

全球工程前沿 2025

中国工程院全球工程前沿项目组 著

中国教育出版传媒集团
高等教育出版社

目录

前言

1

01

第一章 研究方法

3

- 1.1 工程研究前沿遴选 5
 - 1.1.1 论文数据获取与预处理 5
 - 1.1.2 论文主题挖掘 5
 - 1.1.3 研究前沿确定与解读 6
- 1.2 工程开发前沿遴选 6
 - 1.2.1 专利数据获取与预处理 7
 - 1.2.2 专利主题挖掘 7
 - 1.2.3 开发前沿确定与解读 7
- 1.3 发展路线图 8
- 1.4 术语解释 8

02

第二章 机械与运载工程前沿

9

- 2.1 工程研究前沿 10
 - 2.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 10
 - 2.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 15
- 2.2 工程开发前沿 25
 - 2.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 25
 - 2.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 30

03

第三章 信息与电子工程前沿

39

- 3.1 工程研究前沿 40
 - 3.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 40
 - 3.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 46
- 3.2 工程开发前沿 57
 - 3.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 57
 - 3.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 63

04

第四章 化工、冶金与材料工程前沿

75

- 4.1 工程研究前沿 76
 - 4.1.1 Top 11 工程研究前沿发展态势 76
 - 4.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 81
- 4.2 工程开发前沿 92
 - 4.2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势 92
 - 4.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 97

05

第五章 能源与矿业工程前沿

109

- 5.1 工程研究前沿 110
 - 5.1.1 Top 12 工程研究前沿发展态势 110
 - 5.1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读 115
- 5.2 工程开发前沿 129

	5.2.1 Top 12 工程开发前沿发展态势	129
	5.2.2 Top 4 工程开发前沿重点解读	135
06	第六章 土木、水利与建筑工程前沿	147
	6.1 工程研究前沿	148
	6.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势	148
	6.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读	153
	6.2 工程开发前沿	164
	6.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势	164
	6.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读	169
07	第七章 环境与轻纺工程前沿	179
	7.1 工程研究前沿	180
	7.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势	180
	7.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读	184
	7.2 工程开发前沿	194
	7.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势	194
	7.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读	198
08	第八章 农业前沿	207
	8.1 工程研究前沿	208
	8.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势	208
	8.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读	213
	8.2 工程开发前沿	225
	8.2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势	225
	8.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读	231
09	第九章 医药卫生前沿	243
	9.1 工程研究前沿	244
	9.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势	244
	9.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读	249
	9.2 工程开发前沿	259
	9.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势	259
	9.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读	264
10	第十章 工程管理前沿	277
	10.1 工程研究前沿	278
	10.1.1 Top 11 工程研究前沿发展态势	278
	10.1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读	284
	10.2 工程开发前沿	298
	10.2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势	298
	10.2.2 Top 4 工程开发前沿重点解读	304
	总体组成员	313

前言

工程科技是改变世界的重要力量，工程前沿代表工程科技未来创新发展的重要方向。当今时代，世界之变、时代之变、历史之变正以前所未有的方式展开，新一轮科技革命和产业变革持续深入演进，人类社会面临前所未有的挑战。前瞻把握世界科技发展动向，准确识变、科学应变、主动求变，已成为各国的共同选择。

为研判工程科技前沿发展趋势，敏锐抓住科技革命新方向，中国工程院作为国家工程科技界最高荣誉性、咨询性学术机构，自 2017 年起开展全球工程前沿研究项目，每年研判并发布全球近百项工程研究前沿和工程开发前沿，以期发挥学术引领作用，积极引导工程科技和产业创新发展。

2025 年度全球工程前沿研究项目依托中国工程院 9 个学部及中国工程院《工程》系列期刊开展研究工作。研究以数据分析为基础，以专家研判为核心，遵从定量分析与定性研究相结合、数据挖掘与专家论证相佐证、工程研究前沿与工程开发前沿并重的原则，凝练获得 94 个工程研究前沿和 95 个工程开发前沿，并重点解读 29 个工程研究前沿和 28 个工程开发前沿。

为提高前沿研判的科学性，在前七年实践经验的基础上，2025 年度的研究工作继续在研究最初阶段完善技术体系，明确九大领域的技术边界和结构，梳理各分支技术之间的关联关系；继续在重点前沿解读过程中利用发展路线图工具，研判重点工程前沿未来 5~10 年的发展方向和趋势。

本书为 2025 年度全球工程前沿研究项目的成果，由两部分组成：第一章主要说明研究采用的数据和研究方法；第二章至第十章为机械与运载工程，信息与电子工程，化工、冶金与材料工程，能源与矿业工程，土木、水利与建筑工程，环境与轻纺工程，农业，医药卫生和工程管理 9 个领域报告，分别描述与分析各领域工程研究前沿和工程开发前沿概况，并对重点前沿进行详细解读。

工程前沿研判是一项复杂且有挑战性的工作。九年来，项目研究聚焦全球工程科技发展的热点和难点，将前沿研究、学术论坛与期刊建设紧密结合，相互促进，逐步探索出一条别具特色的研究路径。工程前沿研究得到了来自我国工程科技界各领域、各机构近千位院士和专家的支持，在此向所有指导工程前沿研究的院士、参与工程前沿研究的专家表示感谢！



第一章

研究方法

工程是人类借助科学技术改造世界的实践活动。工程前沿指具有前瞻性、先导性和探索性，对工程科技未来发展有重大影响和引领作用的关键方向，是培育新质生产力的重要指引。根据前沿所处的创新阶段，工程前沿可分为侧重理论探索的工程研究前沿和侧重实践应用的工程开发前沿。

2025 年度全球工程前沿研究采用专家与数据多轮交互、迭代遴选研判的方法，通过专家研判与数据分析深度融合，在 9 个领域共遴选出 94 个工程研究前沿和 95 个工程开发前沿，并重点解读 29 个工程研究前沿和 28 个工程开发前沿。各领域前沿数量分布如表 1.1 所示。

表 1.1 9 个领域前沿数量分布

领域	工程研究前沿 / 个	工程开发前沿 / 个
机械与运载工程	10	10
信息与电子工程	10	10
化工、冶金与材料工程	11	11
能源与矿业工程	12	12
土木、水利与建筑工程	10	10
环境与轻纺工程	10	10
农业	10	11
医药卫生	10	10
工程管理	11	11
合计	94	95

工程前沿研究进程包括四个阶段：数据挖掘、数据分析、专家遴选和专家解读。在数据挖掘阶段，通过对高影响力期刊和会议论文进行共被引聚类分析获得文献聚类主题，对高影响力专利进行共词聚类获得备选工程开发热点。在数据分析阶段，由文献情报专家对各个前沿热点的论文与专利数据进行分析，识别前沿的特征。在专家遴选阶段，通过领域专家问卷调查、专家研讨、专家修正等方式获得最终工程前沿，并绘制重点前沿方向的技术路线图。在专家解读阶段，邀请各工程前沿领域的权威专家，对前沿的研究现状、发展趋势和发展重点进行深入解读。研究实施流程如图 1.1 所示，

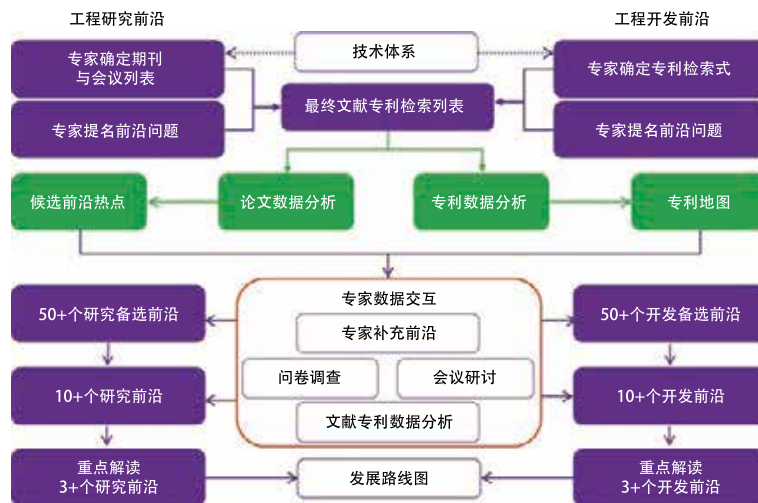


图 1.1 全球工程前沿研究流程

其中绿色部分以数据分析为主，紫色部分以专家研判为主，红色方框为专家与数据多轮深度交互的过程。

1.1 工程研究前沿遴选

工程研究前沿遴选包括两种途径：一是基于 Web of Science 数据库 SCI 期刊论文和会议论文数据，经数据挖掘聚类形成工程研究前沿主题；二是通过专家提名，提出工程研究前沿问题。以上结果经过专家研判论证、提炼得到备选工程研究前沿，再经过问卷调查和多轮专家研讨，遴选出 9 个领域 94 个工程研究前沿。

1.1.1 论文数据获取与预处理

首先构建中国工程院 9 个学部领域技术体系与 Web of Science 学科的映射关系，获得每个领域对应的学术期刊和学术会议列表。经领域专家审核与修订后，确定本年度重点分析的 9 个领域共计 12 840 本学术期刊和 65 558 个学术会议。此外，针对 84 种综合性国际学术期刊，采用单篇文章归类的方法，即根据文章参考文献的主要归属学科来确定相关期刊中单篇文章的研究领域。

针对每个领域的期刊论文和会议论文，参照 Web of Science 高被引论文确定方法，综合考虑期刊论文和会议论文差别、出版年等因素，筛选出 2019—2024 年期间发表的被引频次位于前 10% 的高影响力论文（截至 2025 年 1 月），作为研究前沿分析的基础数据集。各领域数据源概况如表 1.2 所示。

表 1.2 各领域数据源概况

序号	领域	期刊 / 本	会议 / 个	高影响力论文 / 篇
1	机械与运载工程	552	3 960	134 201
2	信息与电子工程	1 024	29 736	249 622
3	化工、冶金与材料工程	1 247	4 068	348 915
4	能源与矿业工程	953	3 195	180 227
5	土木、水利与建筑工程	418	1 843	120 417
6	环境与轻纺工程	1 374	1 292	280 307
7	农业	1 502	1 588	215 969
8	医药卫生	4 932	17 845	561 604
9	工程管理	838	2 031	69 450

1.1.2 论文主题挖掘

基于基础数据集，利用共被引方法对高影响力论文进行聚类分析，获得每个领域的前沿聚类主题，每个聚类主题由一定数量的核心论文组成。其中，2019—2022 年出版的期刊论文和会议论文，按照核心论文数量、总被引频次、平均出版年、常被引论文占比依次筛选，每个领域获得

35 个不相似的文献聚类主题；2023—2024 年出版的期刊论文和会议论文，按照核心论文数量、总被引频次、常被引论文占比依次筛选，每个领域获得 25 个不相似的文献聚类主题。以上聚类分析中，如果各领域聚类主题有交叉，则递补不交叉的聚类主题，对于没有聚类主题覆盖的学科，按照关键词进行定制检索和挖掘，最终筛选得到 9 个领域 745 个备选研究热点（包括相似和不相似主题），如表 1.3 所示。

表 1.3 各领域文献聚类结果

序号	领域	聚类主题 / 个	核心论文 / 篇	备选研究热点 / 个
1	机械与运载工程	13 731	54 175	86
2	信息与电子工程	25 003	108 278	67
3	化工、冶金与材料工程	31 950	126 639	64
4	能源与矿业工程	18 319	74 689	83
5	土木、水利与建筑工程	12 040	49 089	129
6	环境与轻纺工程	28 149	106 639	98
7	农业	21 354	77 914	90
8	医药卫生	54 272	217 657	64
9	工程管理	6 613	24 463	64

1.1.3 研究前沿确定与解读

与论文数据处理挖掘同步，领域专家基于专业背景知识，并结合其他综合性科技情报信息，如科技动态、科技政策、新闻报道等进行分析判断，提出工程研究前沿问题，并将其融入前沿确定的每个阶段。

在数据对接阶段，图书情报专家将领域专家提出的研究前沿问题转化为检索式，作为初始数据来源的重要组成部分；在数据分析阶段，针对没有文献聚类主题覆盖的学科，领域专家提供关键词、代表性论文或代表性期刊，用于定制检索和挖掘；在专家研判阶段，领域专家对照文献聚类结果查漏补缺，对于未出现在数据挖掘结果中而专家认为重要的前沿进行第二轮提名，图书情报专家提供数据支撑。最终，领域专家对数据挖掘和专家提名的工程研究前沿素材进行归并、修订和提炼，而后经过问卷调查和多轮会议研讨，每个领域遴选出 10 余个工程研究前沿。

工程研究前沿确定后，各领域依据发展前景、受关注度选取 3（或 4）个重点研究前沿，邀请前沿方向的权威专家从国家和机构布局、合作网络、发展趋势、研发重点等角度详细解读前沿。

1.2 工程开发前沿遴选

工程开发前沿遴选同样包括两种途径：一是基于 Derwent Innovation 专利检索平台，对 9 个领域 53 个学科组中被引频次位于各学科组前 10 000 的高影响力专利家族进行文本聚类，获得 53 张专利地图，领域专家从专利地图中解读出备选工程开发前沿；二是通过专家提名，提出工程开

发前沿问题。在这两种途径获得的备选开发前沿基础上，通过多轮专家研讨和问卷调查，最终遴选产生 9 个领域 95 个工程开发前沿。

1.2.1 专利数据获取与预处理

在数据对接阶段，基于 Derwent Innovation 专利数据库，采用德温特世界专利索引（DWPI）手工代码、《国际专利分类表》（IPC 分类）、美国专利局分类体系（UC）等专利分类号和特定的技术关键词，初步构建 9 个领域 53 个学科组的专利数据检索范围及检索策略。领域专家对专利检索式删减、增补和完善，并提名备选前沿主题，图书情报专家将其转化为专利检索式。以上两部分检索式整合后确定 53 个学科组的专利检索式，在 2019—2024 年“DWPI 和 DPCI（德温特专利引文索引）专利集合”中检索（专利引用时间截至 2025 年 1 月），进而获得相应学科的专利文献。最后对检索得到的百万量级专利文献根据“年均被引频次”和“技术覆盖宽度”指标进行筛选，综合评估得到每个学科前 10 000 个专利家族。

1.2.2 专利主题挖掘

在前面形成的专利家族数据基础上，针对 9 个领域 53 个学科组被引频次位于前 10 000 的高影响力专利家族，开展专利文本语义相似度分析，基于 DWPI 标题和 DWPI 摘要字段进行主题聚类，获得 53 张能快速直观呈现工程开发技术分布的 ThemeScape 专利地图，以关键词的形式展现所聚集专利的总体技术信息。

领域专家在图书情报专家的辅助下，从专利地图中提炼技术开发前沿、归并相似前沿、确定开发前沿名称，得到每个学科组的备选工程开发前沿。同时，为避免遗漏新兴的或交叉的前沿，领域专家重视专利地图中低频次、关联性较低的离群技术点的研判。

1.2.3 开发前沿确定与解读

在专利数据处理与挖掘的同时，领域专家基于专业背景知识，并结合其他综合情报信息，如产业动态、科技政策、新闻报道等进行分析判断，提出开发前沿问题，并将其融入前沿确定的每个阶段。

在数据对接阶段，图书情报专家将领域专家提出的开发前沿问题转化为专利检索式，作为基础数据集的重要组成部分；在数据分析阶段，领域专家开展第二轮前沿提名，补充数据挖掘中淹没的专利量少、影响力尚未显现的新兴技术点；在专家研判阶段，领域专家研读高影响力专利，图书情报专家辅助领域专家从“高峰”“蓝海”和“孤岛”等多角度解读专利地图。最终，领域专家对专利地图解读结果与专家提名前沿进行归并、修订和提炼，得到备选工程开发前沿，而后通过问卷调查或多轮专题研讨，遴选出每个领域 10 余个工程开发前沿。

工程开发前沿确定后，各领域依据发展前景、受关注度选取 3（或 4 个）重点开发前沿，邀请前沿方向的权威专家从国家和机构布局、合作网络、发展趋势、研发重点等角度详细解读前沿。

1.3 发展路线图

技术路线图是描绘技术未来发展趋势的重要工具。为强化工程前沿的学术引领作用，在本年度研究中，各领域深入分析重点工程研究前沿和重点工程开发前沿的发展方向、发展重点和发展趋势，以可视化的方式绘制该前沿未来 5~10 年的发展路线图。

1.4 术语解释

文献（论文）：包括 Web of Science 中经过同行评议的公开发布的研究性期刊论文、综述和会议论文。

高影响力论文：指被引频次在同出版年、同学科论文中排名前 10% 的论文。

文献聚类主题：对高影响力论文进行共被引聚类分析获得的一系列主题和关键词的组合。

核心论文：根据研究前沿的获取方式不同，核心论文有两种含义——如果是来自数据挖掘经专家修正的前沿，核心论文为高影响力论文；如果是来自专家提名的前沿，核心论文为按主题检索被引频次排前 10% 的论文。

论文比例：某个国家或机构参与的核心论文数量占全部国家或机构产出核心论文数量的比例。

施引核心论文：指引用核心论文的文献。

被引频次：指某篇论文被 Web of Science 核心合集收录的所有论文引用的次数。

平均出版年：指对文献聚类主题中所有文献的出版年取平均数。

常被引论文：指引文速度排名前 10% 的论文。

引文速度：是一定时间内衡量累计被引频次增长速度的指标。在本研究中，每一篇文献的引文速度是从发表的月份开始，记录每个月的累计被引频次。

高影响力专利：每个学科依据 DPCI 年均被引频次排前 10 000 的 DWPI 专利家族。

核心专利：根据开发前沿的获取方式不同，核心专利有两种含义——如果是来自专利地图的前沿，核心专利指高影响力专利；如果是来自专家提名的前沿，核心专利指按主题检索的全部专利。

专利比例：某个国家（作为专利优先权国家）或机构参与的核心专利数量占全部国家或机构产出核心专利数量的比例。

ThemeScape 专利地图：基于 Derwent Innovation 中的 DWPI 增值专利信息，通过分析专利文献中的语义相似度，将相关技术的专利聚集在一起，并以地图形式可视化展现，是形象反映某一行业或技术领域整体面貌的主题全景图。

技术覆盖宽度：指每个 DWPI 专利家族覆盖的 DWPI 分类的数量。该指标可以体现专利的领域交叉广度。

中国工程院学部专业划分标准体系：按照《中国工程院院士增选学部专业划分标准（试行）》确定，包含机械与运载工程，信息与电子工程，化工、冶金与材料工程，能源与矿业工程，土木、水利与建筑工程，环境与轻纺工程，农业，医药卫生，工程管理共 9 个学部 53 个专业学科。



第二章

机械与运载工程前沿

2.1 工程研究前沿

2.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

机械与运载工程领域 Top 10 工程研究热点涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（表 2.1）。其中，属于传统研究深化的有：电磁波吸收材料与多尺度结构设计、机械超材料设计方法、直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究、超临界压缩空气储能技术研究、多车网联协同自动驾驶方法、基于液晶弹性体的软体机器人研究、多声源定位方法。新兴前沿则包括：生物混合机器人、基于视觉的触觉传感器、近空间太阳能飞艇。2019—2024 年，各前沿相关的核心论文发表情况见表 2.2。

（1）电磁波吸收材料与多尺度结构设计

电磁波吸收材料是一类能够高效吸收入射电磁波，并通过磁损耗、介电损耗或电阻损耗等机制将其能量转化为热能或其他形式能量予以耗散的功能材料。多尺度结构设计指在微观、介观和宏观多个尺度层次上协同调控材料的组成与结构。基于该策略开发的吸波材料，可有效克服传统材料的低频宽带吸收性能不足、功能单一等局限，推动吸波材料向高效化、轻量化、智能化等多功能集成方向发展。

当前研究主要聚焦于以下方向：通过物理或化学方法调控零维、一维和二维吸收剂的组成

表 2.1 机械与运载工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	电磁波吸收材料与多尺度结构设计	31	2 882	92.97	2023.1
2	机械超材料设计方法	23	845	36.74	2021.3
3	直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究	6	301	50.17	2023.3
4	生物混合机器人	4	734	183.50	2020.8
5	超临界压缩空气储能技术研究	10	1 420	142.00	2020.1
6	多车网联协同自动驾驶方法	18	1 637	90.94	2022.1
7	基于液晶弹性体的软体机器人研究	37	1 608	43.46	2022.2
8	基于视觉的触觉传感器	22	614	27.91	2021.1
9	近空间太阳能飞艇	6	1 074	179.00	2019.5
10	多声源定位方法	22	1 492	67.82	2020.5

表 2.2 机械与运载工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	电磁波吸收材料与多尺度结构设计	3	1	1	0	6	20
2	机械超材料设计方法	3	4	5	6	4	1
3	直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究	0	0	0	0	4	2
4	生物混合机器人	1	1	0	2	0	0
5	超临界压缩空气储能技术研究	3	3	4	0	0	0
6	多车网联协同自动驾驶方法	0	1	4	6	6	1
7	基于液晶弹性体的软体机器人研究	1	4	9	7	6	10
8	基于视觉的触觉传感器	3	5	4	6	4	0
9	近空间太阳能飞艇	4	1	1	0	0	0
10	多声源定位方法	7	7	3	2	2	1

及其在微观至介观尺度上的结构参数，借助形状各向异性优化其电磁参数，增强电磁波能量耗散能力，从而提升材料针对多频段电磁波的吸收性能；同时，通过宏观结构设计突破本征电磁特性的限制，实现低频、宽频乃至动态可调谐的电磁波吸收。从发展趋势来看，吸波性能逐步向更低频、超宽频、宽角域与智能可调谐方向扩展，吸波材料正从单一吸波功能向多功能集成转变；应用形式也从涂层向结构功能一体化、集成化与智能制造方向演进，以满足未来高性能飞行器、舰船雷达隐身和电子设备电磁防护等领域的迫切需求。

（2）机械超材料设计方法

机械超材料（mechanical metamaterials）是一类通过精巧结构设计实现非常规力学性能的人造材料，其性能往往超越传统材料固有极限，如负泊松比、可编程刚度、极端能量吸收、非线性波动调控等。该研究前沿的核心在于基于力学原理与结构几何特征的多尺度设计方法，通过参数化建模、优化算法以及智能制造，实现从微观结构到宏观力学性能的映射与调控。当前研究方向主要包括：基于拓扑优化与人工智能（AI）的超材料结构设计；基于拓扑优化的逆向设计方法、人工智能驱动的生成式设计、多尺度计算与性能预测，以及面向增材制造的工艺一体化设计等。未来，机械超材料设计方法将朝着智能化、跨尺度化与应用导向化方向发展：通过机器学习与数字孪生加速设计迭代，实现与4D打印等先进制造技术的深度结合，并推动其在航空航天、智能防护、生物医用材料等领域的广泛应用。

（3）直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究

直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究旨在通过开发高效、稳定的催化剂与选择性隔膜，实现直接以海水为原料电解制氢。该技术可以缓解电解水技术对高纯度淡水的依赖，具有资源丰富、环境友好、潜力巨大等优势，是未来绿色氢能制备的重要方向之一。其核心挑战在于解决海水中的氯离子腐蚀、钙镁离子沉积对催化剂、隔膜以及电解槽寿命的负面影响，从而推动

低成本、规模化绿氢生产，服务于海洋能源与碳中和战略。

目前该领域的主要研究方向包括：① 抗腐蚀催化剂设计——开发非贵金属或低贵金属负载催化剂（如过渡金属硫化物、磷化物），通过界面工程调控电子结构，抑制氯离子吸附与析氯副反应，提升析氧反应（oxygen evolution reaction, OER）选择性；② 高选择性隔膜材料——研究阴离子交换膜或防水透气膜等，以阻隔氯离子及杂质（如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ）渗透，防止电极污染与结垢；③ 系统集成与工程优化——结合机械设计与材料科学，开发耐腐蚀电解槽结构、流体动力学调控技术，以及能量管理策略，提升系统在真实海水环境下的耐久性与能效。具体的技术发展趋势将聚焦于材料-器件-系统的多尺度协同创新，催化剂向“自修复”与“自适应”方向发展，隔膜追求高选择性与机械强度一体化，电解槽设计将结合人工智能与高通量筛选，加速材料迭代等。

（4）生物混合机器人

生物混合机器人是指将硅基人工材料（如电子电路、机械结构、纳米材料等）与碳基生物系统（如细胞、组织、微生物等）有机整合而成的一类新型机器人系统，旨在构建兼具生物系统独特的感知修复能力以及机电系统精准可靠特性的智能实体。目前，该技术主要可分为两类：一类是由肌肉细胞或微生物与微纳功能组件集成的微观生物混合机器人；另一类是由动物组织与机电系统融合构成的宏观生物混合机器人。相较于传统的硅基机器人，生物混合机器人展现出更优异的柔性、自愈能力、能量转换效率以及生化感知与响应功能。如何实现碳基与硅基系统的有机融合，是推动该领域发展的核心科学问题。

该领域的发展主要围绕两大核心思路展开。其一是利用硅基技术增强碳基生命，即通过硅基材料和电子器件对传统碳基生命的特定功能进行监测、调控、增强乃至部分替代，以提升生物系统的整体效能。具体的技术发展趋势包括多模态感知与神经接口技术、用于疾病监测诊断与治疗的植入式器件、生物执行器工程与控制技术等。其二是碳基与硅基的深度融合，即将生物组织与人工硅基结构深度耦合，形成统一的功能整体，构建真正意义上的“活机器”。具体的技术发展趋势包括仿生启发下的碳基-硅基异质结构设计与制造、基于干细胞和类器官的可再生功能模块开发、基于多源生物信号融合的自主感知与决策技术等。

（5）超临界压缩空气储能技术研究

超临界压缩空气储能（supercritical compressed air energy storage, SC-CAES）系统在用电低谷时，通过压缩机将空气压缩至超临界状态（同时存储压缩热），并利用存储的冷能将超临界空气冷却液化储存（储能）；在用电高峰，液态空气加压吸热至超临界状态（同时液态空气中的冷能被回收存储），并进一步吸收压缩热后通过膨胀机驱动电机发电（释能）。SC-CAES通过回收利用压缩机的压缩热解决了对化石燃料的依赖问题；通过空气的液态储存，储能密度比气态空气大幅提高，解决了对大型储气室的依赖问题；通过采用储热、储冷、超临界换热等新技术提高了系统的效率。由于综合了储热、液态空气存储和空气的超临界特性等优点，SC-CAES拥有能量密度高、不受地理条件限制、储能周期不受限制、对环境友好和能够回收废热等优点。

目前该领域的主要研究方向包括超临界条件下压缩和膨胀过程中空气流动与损失机理、蓄热与蓄冷材料的特性及传热机理、超临界压缩空气储能系统能量耦合机理与集成控制方法等。发展趋势聚焦于进一步提升系统效率、提高系统动态响应速度与运行可靠性、降低系统建设与运维成本等。SC-CAES 将与人工智能、数字孪生、多能互补系统深度融合，从日内调峰拓展至多时间尺度储能及工业余能回收等多场景应用，推动构建更智能、高效、可持续的新型电力系统。

（6）多车网联协同自动驾驶方法

多车网联协同自动驾驶方法是指利用先进车辆网联技术，将多个车辆的状态信息、感知信息、决策意图等关键要素进行实时共享、融合和分析，实现驾驶环境全方位感知和更加安全的驾驶行为决策与运动规划。多车网联协同自动驾驶是单车自主驾驶的未来技术形态，旨在通过感知协同和决策协同，解决单车因传感器视角视距限制、遮挡、恶劣天气等因素造成的感知能力不足挑战，以及因其他交通参与者行为强不确定性引发的预测、决策能力不足挑战，最终实现更安全、高效的智能交通系统。

目前该领域的主要技术方向包括低时延高弹性通信组网技术、多车异步信息时序一致性融合方法、带宽受限条件下协同感知方法、分布式智能协同决策与规划、信息安全与抗干扰等。在通信不确定性挑战客观存在的背景下，设计强鲁棒、高抗扰的融合感知与智能协同决策系统是未来该领域的技术发展方向。具体的技术发展趋势包括基于无监督学习的柔性时空对齐技术、基于事件触发与注意力机制的通信感知协同技术、数据和知识混合驱动的容错型协同决策等。产业应用预期会从港口、矿区、园区、工厂等封闭场景向复杂开放交通场景发展，涉及车辆未来可达数亿辆，具备万亿规模产业潜力。

（7）基于液晶弹性体的软体机器人研究

基于液晶弹性体的软体机器人研究核心在于将液晶弹性体这一兼具液晶各向异性与聚合物弹性的智能材料，通过材料特性与机器人结构设计、驱动控制深度融合，实现传统刚性机器人难以完成的柔性运动与环境交互。将液晶弹性体的刺激响应特性与软体机器人的柔性需求“强强联合”，既发挥材料的高效驱动优势，又通过机器人系统设计拓展其功能边界，构建出能在复杂环境中灵活作业的智能系统。

目前该领域的主要研究内容包括：材料与结构的适配设计，研究液晶弹性体分子排列、交联密度等参数与机器人肢体结构的匹配规律，通过优化算法实现材料性能与结构刚度、变形范围的协同；多场驱动的控制逻辑，探索光、热、电等多刺激源对液晶弹性体的耦合驱动机制，建立驱动信号与机器人运动姿态的映射模型，开发相关控制算法，实现软体机器人的高精度动作控制；仿生运动原理的转化，借鉴生物协同运动模式，研究驱动单元的分布式布局方案，基于机器学习构建运动与结构的映射模型，将生物运动转化为模块化驱动结构，提升运动的灵活性。未来的发展趋势在于解决能量密度与续航能力问题，提升在复杂环境中的适应性与可靠性，推动其在医疗健康、极端环境作业与微创手术等领域落地。

（8）基于视觉的触觉传感器

基于视觉的触觉传感器是一类借助视觉采集与数据处理技术实现触觉信息感知的新型传感

器。其核心原理是通过传感器内部的小型摄像头，透过透明弹性体观测不透明“皮肤”（外膜）在接触物体时的变形，再结合光度立体算法等技术，将捕捉到的变形图像转化为包含接触位置、力度大小、物体纹理及形状的相关数据，从而模拟人类触觉感知功能。

相较于基于其他原理的触觉传感器，该触觉传感器的优势是分辨率高、结构简单、能够感知的数据模态丰富等。同样，它也面临着透明弹性体部分容易磨损、感知范围相对较小、相关算法开发还不成熟等问题。

目前该领域的主要研究方向包括：基于视觉的触觉传感器感知结构优化、触觉图像与点云高速处理技术开发，以及与其他模态数据的融合以完成更复杂任务等。随着相关技术的不断发展，基于视觉的触觉传感器的发展趋势可以概括为：更好用的传感器（提高感知精度与耐久度）、更先进的算法（提高感知稳定性与准确性，并与其他数据模态更好地融合）以及更复杂的应用场景（如人机交互、具身智能任务等）。

（9）近空间太阳能飞艇

近空间太阳能飞艇主要是指采用浮力克服自重、采用太阳能持久供电和配置推进装置抗风飞行的一种临近空间长航时飞行器，具有超长航时、站高望远、精准控制、定点驻留和较大载重的特点，兼具静轨卫星“区域连续看”和低空飞机“近距离看得清”的优势，是开发利用临近空间的重要载体，其主要工作任务包括高分辨对地观测、远程侦察监视、原位气象探测和广域通信覆盖等方面。

目前该领域的主要技术方向包括基于热力学的飞艇总体设计、高耐候轻质蒙皮材料技术、大型柔性囊体气密技术、高效率循环能源技术、不依赖卫星的高精度持久导航定位技术、稀薄气体下高效率推进技术、智能任务规划与飞控技术等。面向加快开发利用临近空间的发展需求，具备更长航时、更大载重、更强操控能力的近空间太阳能飞艇是该领域未来的发展方向，具体技术发展趋势包括具有跨年飞行能力的超长航时技术、功能结构一体化载荷技术、长时无人自主值守技术、多艇组网智能运控技术等。

（10）多声源定位方法

水下声纳相当于舰艇的眼睛和耳朵。多声源定位方法主要是指利用声纳水听器阵列接收的各种海面舰船辐射噪声、水下潜航器辐射噪声、海上资源勘探及主动声纳发射的人工信号，实现对目标声源的具体位置（包括声源方位、距离、深度和速度）进行估计的方法。这是在水声学、海洋工程、国防安全等领域的重要课题，其核心挑战在于水下潜航器的目标源级逐年降低、海面强干扰很多，再加上水听器阵列孔径有限导致的时空增益及分辨率不足、水声环境复杂多变导致的环境适配、阵形畸变及一致性导致测向误差等因素，最终导致对水下弱目标探测定位异常困难，迫切需要发展基于高时空分辨、环境宽容的自适应声源定位稳健方法。目前，该领域主要研究方向包括：基于自适应波束形成的多声源方位估计方法、基于高分辨率子空间谱估计方法、联合时延估计与定位方法、基于稀疏信号恢复（压缩感知）的定位方法、基于匹配声场处理水下目标声源定位、基于深度学习的水下多声源定位方法等。本项技术未来发展趋势是，发展基于压缩感知的水平阵高分辨测向处理算法，提高目标方位分辨能力；发展稳健高增益的

水声阵列信号处理技术,提高空间处理增益;发展基于匹配声场空间频率干涉结构的长时间累计技术,提高时间处理增益;发展基于深度学习宽容性匹配声场定位技术,提高多目标定位方法的环境宽容性;发展基于声场物理特征的目标深度定位技术,提高水面和水下目标的辨别能力;发展无人自主智能的探测跟踪定位技术,更好改进声纳的综合探测能力。

2.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

2.1.2.1 电磁波吸收材料与多尺度结构设计

面对现代电子系统与装备对电磁兼容、隐身与防护性能要求的日益提升,微波吸收材料的研究正朝着低频化、宽频带、多功能一体化等方向迅速发展。传统微波吸收材料依赖铁氧体、磁性金属微粉等吸收剂的电磁损耗机制实现吸波性能,但仍存在低频段吸收性能不足、功能单一等挑战,难以满足现代平台对轻量化与紧凑集成以及适应复杂电磁环境与多物理场耦合等实际工况需求。多尺度结构设计作为应对上述挑战的核心途径,通过在微观、介观与宏观尺度上协同调控材料组分、分布状态与几何结构设计,可显著优化阻抗匹配、拓展吸收频带,并实现结构-功能一体化集成,为高性能电磁波吸收材料研制提供了创新途径。从发展历程来看,早期以 Dallenbach 层与 Salisbury 屏为代表的结构设计奠定了单层吸波材料中阻抗匹配与损耗机制的理论基础。近年来,碳纳米管、石墨烯、片状磁性微粉及磁性纤维等各向异性吸收剂的广泛应用,显著拓展了电磁参数的调控维度,有效提升了材料吸波性能。在此背景下,多尺度结构设计已成为该领域的重要研究方向,持续推动吸波材料向高效化与多功能化发展。

当前的研究重点主要集中在 3 个方面:一是开发新型材料体系,依托理论模型与算法实现逆向设计,制备具有优异本征损耗特性的吸收剂;二是聚焦微观-介观-宏观多尺度协同结构设计,通过形状各向异性吸收剂取向分布、阻抗梯度化多层分级以及设计构建人工超材料等方法,精准调控电磁参数与阻抗匹配,增强损耗机制,突破材料本征性能局限;三是发展可工程化的先进制备工艺,如大面积印刷与增材制造等低成本规模化技术,全面提升材料在复杂环境下的可靠性与耐久性,支撑实际装备应用。随着人工智能与增材制造等新技术的深度融合,微波吸收材料的多尺度结构设计正逐步迈向数字化与智能化。通过融合多尺度建模与机器学习逆向设计,可实现从目标性能需求到材料与结构的高效精准映射;同时,进一步强化多功能协同与集成能力,推动吸波材料在雷达隐身、多领域电磁防护应用,从而显著提升综合系统的整体效能。

该前沿中核心论文数排名第一的国家是中国,篇均被引频次排名第一的国家是新加坡(表 2.3)。在核心论文的主要产出国家中,中国与新加坡、韩国、美国的合作是最多的(图 2.1)。核心论文数排名第一的机构是青岛大学、南京航空航天大学与复旦大学,篇均被引频次排名前三的机构是华南理工大学、湖南大学与青岛大学(表 2.4)。在核心论文的主要产出机构中,复旦大学与之江实验室之间的合作最多(图 2.2)。施引核心论文数排名第一的国家是中国(表 2.5),施引核心论文数排名前三的机构是西北工业大学、青岛大学与南京航空航天大学(表 2.6)。图 2.3 为“电磁波吸收材料与多尺度结构设计”工程研究前沿的发展路线。

表 2.3 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	31	100.00	2 882	92.97	2023.1
2	新加坡	2	6.45	473	236.50	2021.0
3	美国	2	6.45	163	81.50	2023.5
4	韩国	2	6.45	59	29.50	2024.0
5	日本	1	3.23	110	110.00	2020.0

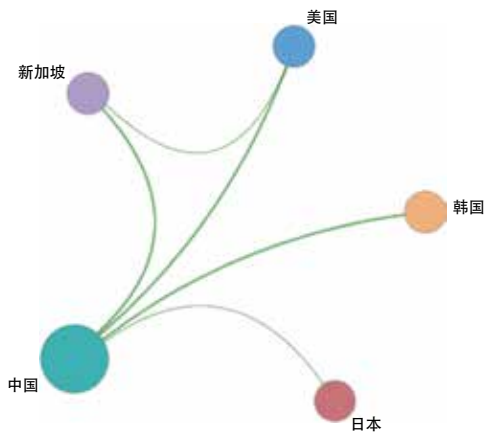


图 2.1 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 2.4 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	青岛大学	8	25.81	1 095	136.88	2022.0
2	南京航空航天大学	8	25.81	1 079	134.88	2022.4
3	复旦大学	8	25.81	842	105.25	2022.9
4	西北工业大学	7	22.58	866	123.71	2023.7
5	湖南大学	3	9.68	476	158.67	2022.7
6	之江实验室	3	9.68	169	56.33	2023.7
7	北京理工大学	3	9.68	52	17.33	2024.0
8	上海大学	3	9.68	35	11.67	2024.0
9	华南理工大学	2	6.45	337	168.50	2024.0
10	北京航空航天大学	2	6.45	211	105.50	2023.5

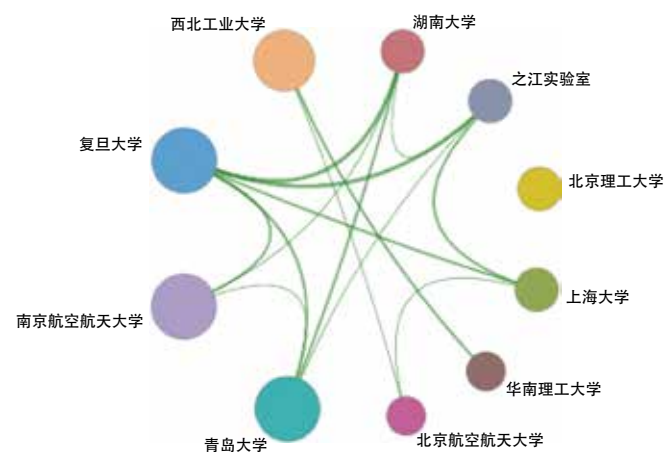


图 2.2 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计” 工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 2.5 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计” 工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 886	84.35	2023.0
2	美国	68	3.04	2022.7
3	印度	48	2.15	2023.3
4	韩国	41	1.83	2023.6
5	英国	38	1.70	2023.4
6	新加坡	35	1.57	2022.5
7	沙特阿拉伯	34	1.52	2023.4
8	伊朗	27	1.21	2023.1
9	澳大利亚	24	1.07	2023.1
10	埃及	19	0.85	2023.2

表 2.6 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计” 工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	西北工业大学	233	21.07	2022.9
2	青岛大学	171	15.46	2022.1
3	南京航空航天大学	131	11.84	2022.2
4	中国科学院	97	8.77	2023.2
5	四川大学	85	7.69	2023.7
6	复旦大学	78	7.05	2023.1
7	哈尔滨工业大学	73	6.60	2022.9
8	南京大学	65	5.88	2022.1
9	湖北汽车工业学院	64	5.79	2023.8
10	陕西科技大学	59	5.33	2022.8



图 2.3 “电磁波吸收材料与多尺度结构设计”工程研究前沿的发展路线

2.1.2.2 机械超材料设计方法

“机械超材料”的概念雏形可追溯至 20 世纪对复合材料结构的研究，但其真正的飞跃始于 21 世纪初。随着增材制造技术的成熟，制造复杂微观结构成为可能，推动了该领域的实验验证和理论发展。早期研究多集中于发现具有单一奇特性质（如拉胀性）的结构。现状是研究已进入“按需设计”的阶段。传统的试错式设计已被计算驱动的“逆向设计”所取代。特别是拓扑优化方法，通过将性能目标转化为数学优化问题，自动寻找最优的材料分布。当前最前沿的趋势是人工智能的深度介入。机器学习模型，尤其是深度学习，被用于建立微观结构与宏观性能之间的超快速映射关系，极大地加速了设计进程。生成对抗网络等甚至能“创造”出全新的、反直觉的高性能结构。未来的趋势是向着多功能、动态可调、环境自适应的智能超材料设计迈进，并实现从设计到制造的无缝数字化闭环。

当前研究方向主要集中在以下方面：① 拓扑优化与人工智能驱动的设计——通过遗传算法、深度学习、生成对抗网络等实现高效搜索与优化；② 可编程与可重构结构——通过可调几何单元实现多状态力学响应，适应复杂工况；③ 多物理场耦合超材料——如力-电耦合用于自供能

传感、力-热耦合用于自适应散热；④ 跨尺度设计与制造——结合增材制造与纳米加工，实现微观-宏观一体化。

机械超材料设计方法是颠覆性的，它从根本上改变了材料研发的范式，从“发现”材料转变为“发明”材料。这允许工程师打破传统材料性能的界限，获得前所未有的性能组合，例如既轻便又坚韧、既能吸能又可导波的材料。这种能力为诸多尖端领域提供了全新的解决方案：在航空航天领域，可设计出轻质高强的缓冲吸能结构和蒙皮；在生物医疗领域，可定制与人体组织力学性能完美匹配的植入体或组织支架；在软体机器人领域，能创造可编程的软质执行器；在防护装备领域，可用于开发新一代的隐身装甲和减震平台。因此，掌握先进的超材料设计方法，已成为提升国家高端装备制造核心竞争力的关键。

该前沿核心论文的主要产出国家中，核心论文数最多的是中国，篇均被引频次排在前三位的是美国、德国与法国（表 2.7）；中国与法国的合作最多（图 2.4）。在核心论文的主要产出机构中，核心论文数排名第一的是西北工业大学，篇均被引频次排在第一位的是同济大学（表 2.8）。在所有合作机构中，西北工业大学与洛林大学的合作最多（图 2.5）。施引核心论文数排在第一位的国家是中国（表 2.9）。施引核心论文数排名前三的机构是西北工业大学、天津大学与北京交通大学（表 2.10）。图 2.6 为“机械超材料设计方法”工程研究前沿的发展路线。

表 2.7 “机械超材料设计方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	19	82.61	749	39.42	2021.3
2	法国	6	26.09	248	41.33	2021.5
3	韩国	4	17.39	96	24.00	2021.5
4	美国	2	8.70	105	52.50	2020.0
5	德国	1	4.35	52	52.00	2020.0
6	新加坡	1	4.35	37	37.00	2021.0

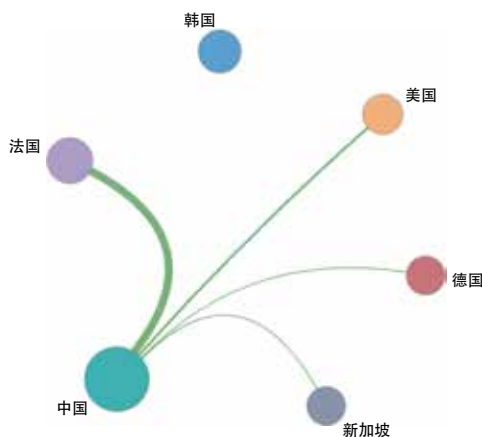


图 2.4 “机械超材料设计方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络



表 2.8 “机械超材料设计方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	西北工业大学	9	39.13	357	39.67	2021.2
2	洛林大学	6	26.09	248	41.33	2021.5
3	首尔大学	4	17.39	96	24.00	2021.5
4	北京交通大学	3	13.04	158	52.67	2021.3
5	天津大学	3	13.04	158	52.67	2021.3
6	重庆大学	2	8.70	109	54.50	2019.5
7	忠南大学	2	8.70	66	33.00	2020.0
8	韩国机械材料研究院	2	8.70	61	30.50	2020.5
9	西安交通大学	2	8.70	28	14.00	2022.5
10	同济大学	1	4.35	80	80.00	2020.0

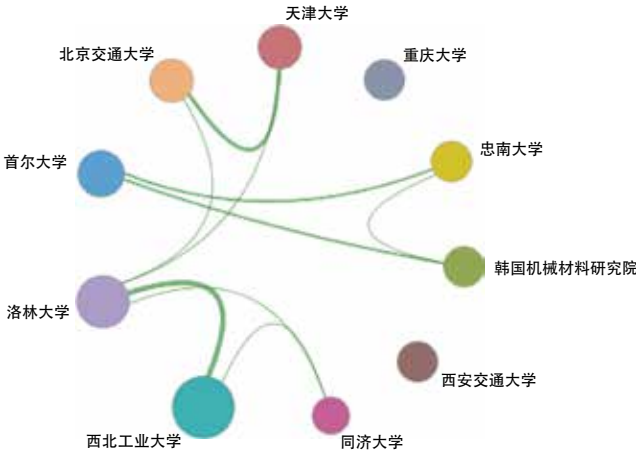


图 2.5 “机械超材料设计方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 2.9 “机械超材料设计方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	316	67.09	2022.6
2	法国	36	7.64	2021.6
3	美国	32	6.79	2022.8
4	韩国	30	6.37	2023.0
5	新加坡	13	2.76	2023.0
6	德国	12	2.55	2021.9
7	俄罗斯	10	2.12	2022.6
8	英国	7	1.49	2022.4
9	澳大利亚	6	1.27	2023.0
10	意大利	5	1.06	2023.4

表 2.10 “机械超材料设计方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	西北工业大学	43	16.29	2022.4
2	天津大学	33	12.50	2022.5
3	北京交通大学	28	10.61	2022.2
4	同济大学	27	10.23	2022.6
5	西安交通大学	27	10.23	2022.2
6	洛林大学	26	9.85	2021.4
7	中国科学院	19	7.20	2022.8
8	哈尔滨工业大学	16	6.06	2023.1
9	南京航空航天大学	15	5.68	2022.7
10	香港科技大学	15	5.68	2022.2

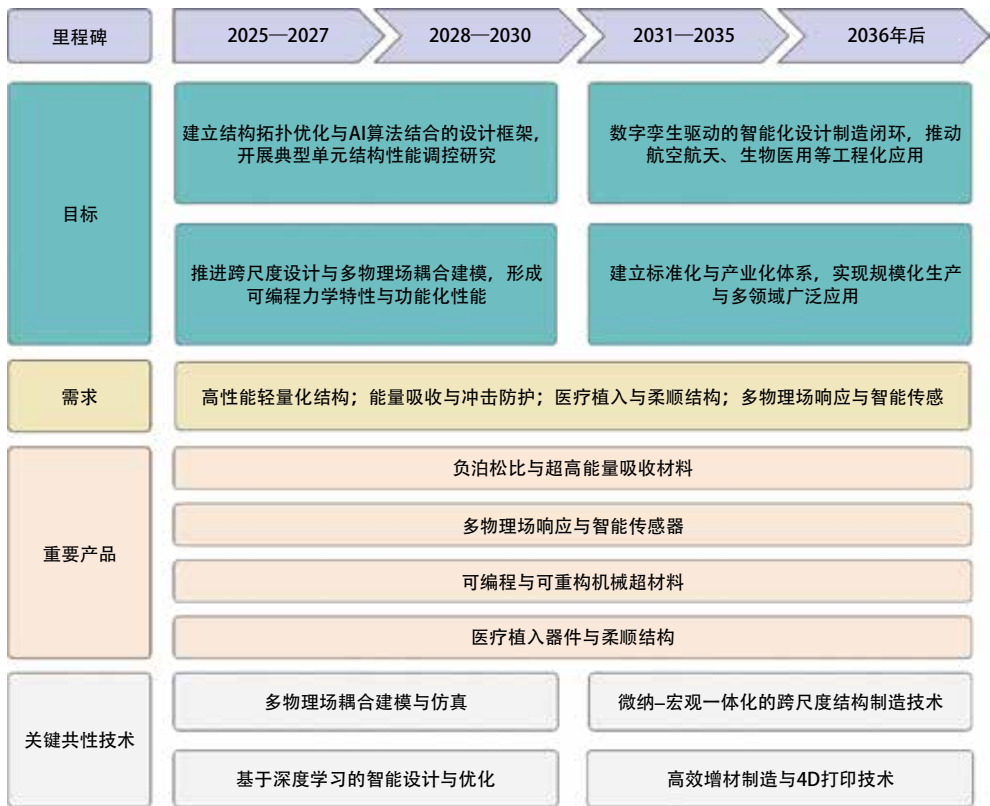


图 2.6 “机械超材料设计方法”工程研究前沿的发展路线

2.1.2.3 直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究

随着可再生能源制氢需求的爆炸式增长，传统电解水制氢必须使用高纯淡水的高成本模式受到挑战。直接电解海水生产绿色氢气迎来新机遇，其核心工程挑战在于：海水是一个复杂的化学体系，富含氯离子、镁离子、钙离子、微生物和悬浮颗粒等，直接电解会导致催化剂中毒、腐蚀、隔膜结垢堵塞等一系列致命问题。因此，直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究的本质是设计能够抵抗极端复杂电解液环境的高性能抗腐蚀催化剂与高选择性隔膜，并实现两者的协同集成，构建出新一代工业级电解槽。

近年来，随着材料科学与电化学的深度结合，直接海水电解（DSE）研究取得了显著突破。2022 年，谢和平等报道了一种基于防水透气膜的电解槽（*Nature*, 2022, 612: 673-678），在 $250 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 电流密度下稳定运行超过 3 200 h，标志着 DSE 向实用化迈出了关键一步。同时，在催化剂方面，NiFe 层状双氢氧化物（LDH）、 Cr_2O_3 修饰的 CoO_x 等材料展现出在高碱度局部微环境中卓越的抗氯离子腐蚀和抗沉淀能力。目前研究处于从实验室原理验证向工业化示范突破的关键阶段。研究主要分为以下 3 个方面：

1) 高选择性抗中毒催化剂的微观设计与宏量制备：重点探索在阳极高电位和 Cl^- 环境下兼具高活性与超高稳定性的 OER 催化剂。研究方向从“克级”的实验室合成向“公斤级”的工程化制备工艺转变，满足工业应用需求是未来趋势。

2) 高选择性、抗结垢隔膜的结构设计与传质机理：开发新型复合隔膜，其核心是实现离子的精准筛分。深入研究孔道结构、表面电荷、亲疏水性对离子传输路径的影响，并赋予隔膜自清洁或防生物污损功能是未来趋势。

3) 电解槽工程设计与多物理场耦合优化：耐腐蚀流场设计，优化腔体结构与流道，确保海水均匀分布，避免死区导致杂质浓缩结晶；热管理设计，电解过程产热，需高效热控系统维持温度稳定，防止盐分因过饱和而析出；系统智能调控，根据海水水质、温度、电流密度变化动态调整运行参数，实现自适应稳定运行。

总之，直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究在材料科学、电化学、海洋工程与机械工程等多学科交叉领域具有重要研究价值，对保障国家能源安全、推动海洋经济高质量发展和促进生态文明建设等具有重要意义。

该前沿核心论文的主要产出国家中，核心论文数排在第一位的是中国，篇均被引频次并列第一的是澳大利亚、加拿大与英国（表 2.11）；加拿大、澳大利亚、英国三方互为合作方，中国则分别与加拿大、澳大利亚、英国和新加坡等开展合作（图 2.7）。核心论文的主要产出机构中，核心论文数排名第一的是中国科学院，篇均被引频次并列第一的是斯威本科技大学、牛津大学、萨里大学与多伦多大学（表 2.12）；清华大学与中国科学院之间合作最多（图 2.8）。施引核心论文的主要产出国家中，发文量排在第一位的是中国（表 2.13）。施引核心论文的主要产出机构中，发文量排名第一的是中国科学院（表 2.14）。图 2.9 为“直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿的发展路线。

表 2.11 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	6	100.00	301	50.17	2023.3
2	澳大利亚	1	16.67	136	136.00	2023.0
3	加拿大	1	16.67	136	136.00	2023.0
4	英国	1	16.67	136	136.00	2023.0
5	以色列	1	16.67	56	56.00	2023.0
6	新加坡	1	16.67	21	21.00	2024.0

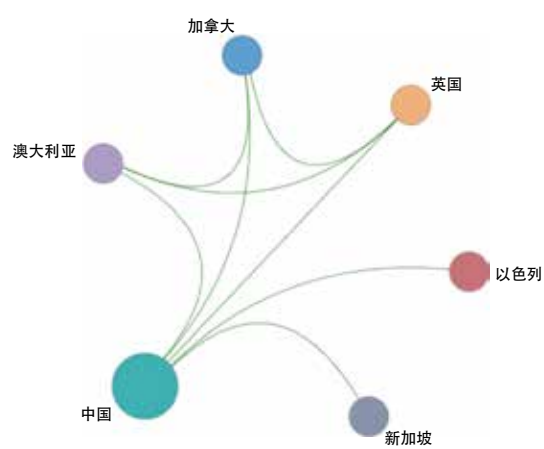


图 2.7 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 2.12 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	5	83.33	283	56.60	2023.2
2	清华大学	2	33.33	157	78.50	2023.5
3	斯威本科技大学	1	16.67	136	136.00	2023.0
4	牛津大学	1	16.67	136	136.00	2023.0
5	萨里大学	1	16.67	136	136.00	2023.0
6	多伦多大学	1	16.67	136	136.00	2023.0
7	巴伊兰大学	1	16.67	56	56.00	2023.0
8	中国地质大学（武汉）	1	16.67	56	56.00	2023.0
9	华中科技大学	1	16.67	56	56.00	2023.0
10	同济大学	1	16.67	56	56.00	2023.0

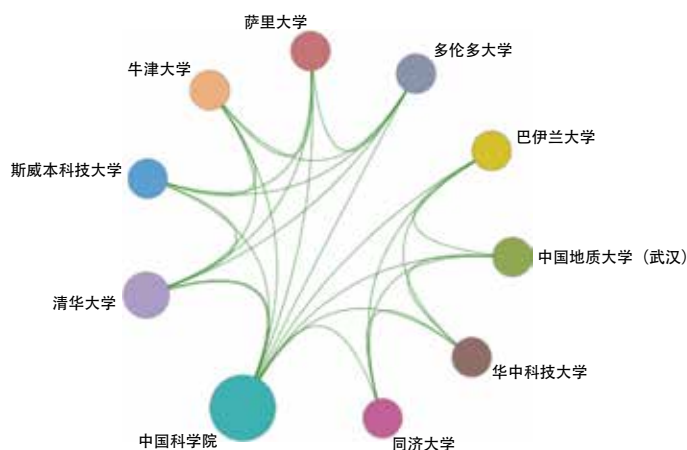


图 2.8 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 2.13 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	267	75.85	2023.9
2	澳大利亚	20	5.68	2023.8
3	韩国	15	4.26	2023.9
4	印度	9	2.56	2024.0
5	美国	8	2.27	2023.9
6	沙特阿拉伯	8	2.27	2023.9
7	加拿大	7	1.99	2023.9
8	日本	6	1.70	2024.0
9	德国	5	1.42	2024.0
10	英国	4	1.14	2023.8

表 2.14 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	30	18.18	2023.9
2	青岛科技大学	17	10.30	2023.9
3	四川大学	16	9.70	2023.9
4	山东师范大学	15	9.09	2023.8
5	电子科技大学	15	9.09	2023.8
6	崂山实验室	14	8.48	2023.8
7	清华大学	13	7.88	2023.8
8	成都大学	12	7.27	2023.7
9	香港城市大学	12	7.27	2023.8
10	华中科技大学	11	6.67	2024.0

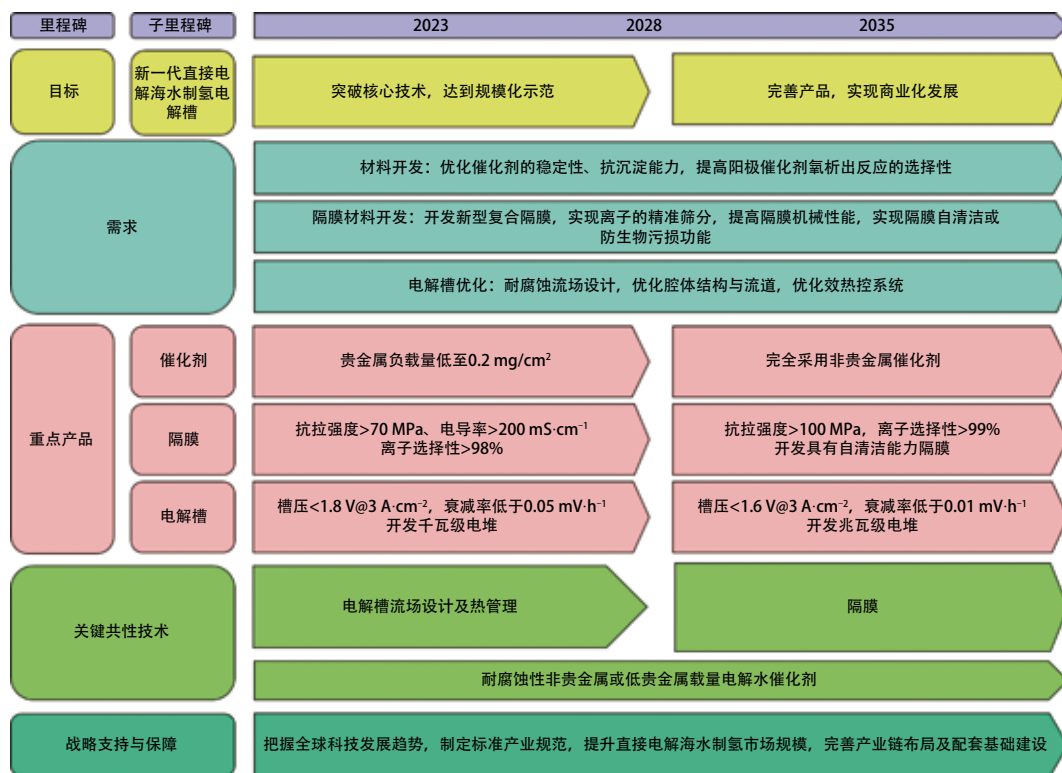


图 2.9 “直接电解海水制氢的催化剂与隔膜研究”工程研究前沿的发展路线

2.2 工程开发前沿

2.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

机械与运载工程领域的 Top 10 工程开发前沿涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（表 2.15）。其中，属于传统研究深化的有：低空无人机集群反制技术、多无人机协同打击任务分配方法、有人-无人系统协同作战任务规划方法、车路云一体化交通系统控制、无人船与水下机器人协同水下地形测量技术、基于大模型的故障诊断技术。新兴前沿则包括：高能量密度全固态动力电池技术、基于智能网的低空交通管理技术、存储芯片 3D 堆叠封装技术、三维立体集成封装的微流道散热技术。各开发前沿涉及的核心专利 2019—2024 年公开情况见表 2.16。

（1）高能量密度全固态动力电池技术

高能量密度全固态动力电池技术是应用于新能源汽车、航空航天、低空经济和高端储能等领域的前沿技术。其核心内涵是通过采用固态电解质取代传统电解液，突破能量密度和安全性的瓶颈，实现高比能、高安全和高稳定。相比于传统锂离子电池，全固态动力电池不仅大幅提升质量与体积能量密度，还能有效抑制热失控和枝晶生长，具备更高的本征安全。

当前研究热点主要集中在 3 个方面：一是固态电解质材料的开发，包括硫化物、氧化物、聚



表 2.15 机械与运载工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用数	平均被引数	平均公开年
1	高能量密度全固态动力电池技术	15	21	1.40	2022.3
2	低空无人机集群反制技术	138	612	4.43	2022.3
3	多无人机协同打击任务分配方法	11	53	4.82	2022.5
4	有人-无人系统协同作战任务规划方法	22	93	4.23	2022.9
5	基于智能网的低空交通管理技术	6	40	6.67	2023.5
6	车路云一体化交通系统控制	4	0	0.00	2022.8
7	存储芯片 3D 堆叠封装技术	19	78	4.11	2022.0
8	无人船与水下机器人协同水下地形测量技术	1	20	20.00	2022.0
9	三维立体集成封装的微流道散热技术	42	164	3.90	2022.5
10	基于大模型的故障诊断技术	31	39	1.26	2023.9

表 2.16 机械与运载工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	高能量密度全固态动力电池技术	1	2	1	3	3	5
2	低空无人机集群反制技术	13	20	8	19	35	43
3	多无人机协同打击任务分配方法	0	0	2	4	3	2
4	有人-无人系统协同作战任务规划方法	0	0	2	6	6	8
5	基于智能网的低空交通管理技术	0	0	0	1	1	4
6	车路云一体化交通系统控制	0	0	0	2	1	1
7	存储芯片 3D 堆叠封装技术	1	2	3	8	1	4
8	无人船与水下机器人协同水下地形测量技术	0	0	0	1	0	0
9	三维立体集成封装的微流道散热技术	3	1	1	15	12	10
10	基于大模型的故障诊断技术	0	0	0	0	2	29

合物及其复合体系,目标是实现室温下 10^{-3} S/cm 以上的离子电导率,同时具备优异的化学稳定性;二是电极-电解质界面调控,通过人工界面膜、梯度结构等策略降低界面阻抗并抑制副反应;三是工程化与应用技术,涵盖薄膜电池、叠层电池及车规级模组开发,重点解决产品设计、制造技术与装备、装机应用等难题。

提高能量密度和安全性是未来全固态电池发展的核心趋势。预计 2025—2030 年将实现 400 W·h/kg 以上的能量密度和 1 000 次以上的循环寿命,并在消费电子和新能源汽车中实现小规模应用;2030—2035 年,能量密度有望突破 500 W·h/kg,循环寿命达到 2 000 次以上,实现在新能源汽车领域规模应用,以及在电动航空、无人机、人形机器人、深空探测等领域的高端应用,推动智能电网与氢能的协同发展。

(2) 低空无人机集群反制技术

低空无人机集群反制技术是反无人机技术的一个重要分支,是一项综合运用智能探测、行为

识别、干扰劫持、多模式毁伤等多种手段实施体系化主动防御的前沿技术。该技术除了具备反制“低慢小”目标的基本属性外，还要面临集群异质化、通信组网多样化、协同控制复杂化、群体决策自主化等新挑战。因此，破解集群的“协同优势”并兼顾时效性与可靠性，是当前无人机集群反制领域的研究重点。

该领域研究方向主要包括：① 极端环境集群态势感知，旨在解决集群目标测不准、辨不清、意图难判的瓶颈难题；② 综合反制决策与效能评估，旨在利用人工智能驱动多元反制的决策生成；③ 先进毁伤与干扰截停，聚焦于新型有效打击或干扰手段；④ 多元协同的复杂系统集成，旨在集成多元“软硬”手段形成协同反制能力。未来发展趋势主要集中于电磁等主导的多模态精准探测、高效低成本大范围新毁伤新机制、多元反制技术协同毁伤等，以形成人工智能赋能的“精准威胁感知—智能匹配决策—高效行动打击”的技术闭环。

（3）多无人机协同打击任务分配方法

无人机在未来战争中将逐渐成为主战装备之一。目前，多个国家已列装多型无人机，更有众多新型号在研。在俄乌冲突和以伊冲突中，无人机发挥了至关重要的作用，受到了广泛的关注，人们由此看到了未来战争的可能景象。

复杂环境下多目标打击将是无人机在军事应用中面临的典型任务之一。考虑环境约束和无人机自身动力学约束，在对地面、水面和空中的固定目标、移动目标和机动目标执行打击任务中，多无人机实现协同打击效能最大的任务分配方法是亟待研究的关键问题。

在机器人领域，关于任务分配方法已经有许多研究成果，这些成果可以应用于打击固定目标和移动目标情景下的多无人机任务分配问题，但难以处理多约束复杂环境下机动目标协同打击的任务分配问题。机动目标在感知到无人机来袭时，会采取逃逸策略，甚至采取协同规避对策，使得多无人机的协同打击任务分配问题十分复杂。而在未来以无人武器为主的战争中，多无人机对多机动目标（包括无人机、无人车、无人艇、有人驾驶装备和作战人员）实施协同打击将是常规任务，多无人机任务分配方法和技术是一个重要的发展方向，相关发展趋势包括复杂环境协同感知方法、机动目标协同识别与定位方法、协同任务生成方法和协同任务分配方法等。

（4）有人—无人系统协同作战任务规划方法

有人—无人系统协同作战任务规划方法是现代军事领域的重要研究方向，其核心是利用人工智能、大数据、物联网等技术，结合地形、地貌、气象、电磁等因素，基于网络信息系统，实现各有人—无人作战要素的战场信息按需共享、战场态势一致认知、作战行动智能筹划、作战资源一体调度、临机情况快速响应、有人—无人整体联动，旨在构建有人系统与无人系统混合编组，发挥二者互补增效优势，提升整体作战效能。

有人—无人系统协同作战任务规划方法相关技术包括态势感知、态势认知、任务理解、任务分解分配、机动路线规划、侦察规划、火力打击规划、通信中继规划、方案评估、协同控制、人机协同、互联互通互操作等。

围绕有人—无人系统 OODA [即 observation（观察）、orientation（判断/调整）、decision（决策）和 action（执行）] 全流程，目前相关研究主要集中在多源异构信息融合、威胁判断

与打击清单生成、有人-无人协同路径规划、协同侦察规划、火力分配、有人-无人协同控制、人机协同等方面，未来的技术发展趋势包括云-边-端协同架构、智能杀伤网、人机互信、多智能体强化学习、多模态感知与态势认知、基于大模型的行动策略规划、基于博弈对抗的临机决策、未知/拒止环境下分布式协同控制等。

（5）基于智能网的低空交通管理技术

智能网是物联网与人工智能融合的新架构，其核心是人、机、物三元主体的智能互联。基于智能网的低空交通管理系统通过融合通信、感知、导航、气象与算力网络，实现对无人机、电动垂直起降飞行器（eVTOL）等低空飞行器的协同调度与安全监理。系统采用“通感算控”一体化架构，具备实时监测、风险预警、动态处置等能力，是低空经济的关键基础设施。

当前该技术的主要研究方向包括低空立体通信（5G-A/星链多链路冗余）、高精度感知（雷达/光电/ADS-B融合）、飞行风险消减规避、微气象预测和云边端智能决策等，以解决城市复杂环境中的实时管控问题。

实现低空空域空中交通高效运行，“低空安全”是核心挑战。智能网技术需要从“造得安全、飞得合规、管得到位”3个层面系统构建低空安全闭环体系：通过通感融合实现电子围栏、身份认证与动态禁飞区管理；借助高精度导航和实时气象降低碰撞风险；结合AI与数字孪生构建空天地监管平台，实现异常飞行快速响应。

无人驾驶航空器本体的自主安全能力是低空交通管理的重要基础，其与智能网的协同互补，才能实现从被动响应到主动免疫的安全范式转变，实现“全空域覆盖、全流程可控、全要素智能”目标，突破高可靠与低成本瓶颈，可为我国低空交通发展提供核心支撑。

（6）车路云一体化交通系统控制

车路云一体化交通系统（vehicle-road-cloud integrated transportation system, VRCITS）是指通过新一代信息与通信技术将人、车、路、云的物理空间、信息空间融合为一体，基于系统协同感知、决策与控制，实现智能网联汽车交通安全、节能、舒适及高效运行的信息物理系统，由车辆及其他交通参与者、路侧基础设施、云控平台、相关支撑平台、通信网等部分组成。目前传统车辆缺乏与其他交通参与者以及基础设施的实时协同，缺少全局交通信息支撑，只能做出局部最优决策，VRCITS代表着智能交通系统从“局部智能”向“全局智慧”的演进。为了应对VRCITS信息跨域融合、分层决策与协同控制的复杂性，传统的交通系统设计方法、构型，以及协同优化控制策略等需要进行优化升级，同时需强化自动驾驶合规与防御性驾驶机制，并建立可持续成长的系统架构，同时完善自动驾驶安全性测试评价体系。

目前该领域的主要技术方向包括车路云一体化复杂系统架构设计、车路云融合感知、智能决策优化、动态调度与协同控制等。发挥VRCITS数据的海量性、完备性、准确性优势，人工智能驱动的车路云一体化协同行驶控制关键技术是该领域未来的发展方向，重点涵盖面向自动驾驶合规与安全的协同决策机制、符合防御性驾驶理念的动态行为响应、支持系统可持续成长的演进路径，以及融入安全性测试评价的闭环验证方法。具体的技术发展趋势包括数据驱动的车端和路侧感知方法、基于多模态模型的路侧开集感知技术、车端结合监督学习和强化学习的自动驾驶大模型预训练与微调的方法、宏微观协同规划与长短时域协同决策的车云协同网络系统等。

(7) 存储芯片 3D 堆叠封装技术

存储芯片 3D 堆叠封装是一种采用硅通孔、微凸块、混合键合等高密度互连技术,实现存储芯片垂直方向堆叠,以突破存储器二维微缩瓶颈的前沿技术。其核心目标是打破“存储墙”,提升存储芯片容量和带宽。

该技术领域的主要发展方向是基于“材料-结构-工艺-系统”4个维度,在有限空间内高效、可靠堆叠更多存储单元,实现带宽、能效与功能密度代际跃迁。其发展趋势包括持续优化 3D NAND 和 DRAM 单元,持续推动 PCRAM、MRAM、RRAM、FeRAM 等新型存储介质性能提升;持续优化混合键合、超薄晶圆减薄等超高互连密度技术,实现更高 3D 堆叠层数;研究基于高效热界面材料与集成微流道冷却等高效热管理技术,解决高密度堆叠热问题;创新设计与工艺架构,实现存储、控制、计算芯粒高并行度异构集成。探索玻璃通孔、光电集成及二维材料等新材料与新技术,支撑下一代系统级互连架构的发展,满足人工智能与高性能计算系统需求。

该技术领域的具体研究方向主要包括:小尺寸硅通孔、微间距混合键合、极小间距布线、超大面积中介层技术等;微流道冷却、导热界面材料、相变散热等;多芯片-封装-系统级的协同优化、跨尺度多物理场精确建模和仿真等;多模态感存算融合架构、低功耗数模混合电路优化、异构集成系统架构等。

(8) 无人船与水下机器人协同水下地形测量技术

无人船与水下机器人协同水下地形测量技术是指利用无人船和水下机器人通过协同作业,对水下地形进行高精度测绘和数据采集的前沿技术。其核心概念在于实现水面与水下平台的无缝协作:无人船负责水面导航、通信中继、GPS 支持和能源补给,水下机器人搭载多波束声呐、侧扫声呐等设备进行地形扫描。这种模式有效克服单一平台的通信、定位和续航局限,适用于海洋勘探、河床监测、海底资源调查和灾害评估等领域。与传统单一测量方法相比,该技术在复杂水域(如深海或湍流区)中展现更高效率和安全性,通过实时数据共享与任务分配优化作业流程。例如,无人船可充当“母舰”,为水下机器人提供动态路径规划和紧急回收支持,提升测量覆盖范围与数据准确性。

目前该领域的主要技术方向包括多平台协同控制算法、声学光学传感器数据融合、高精度定位导航、能量管理和通信优化。研究重点强调鲁棒路径规划和避障机制,确保系统在干扰环境下的稳定运行。例如,采用分布式控制架构,实现无人船与水下机器人的自主任务协商,支持高效数据采集和实时三维建模。未来发展趋势聚焦智能化与自主化。基于人工智能的自主决策技术将成为核心,如利用机器学习进行实时地形识别和异常检测;结合深度学习进行多模态传感器融合来提升测量精度;此外,可重构协同架构,如无人船搭载机器人集群,支持大规模并行测量。随着 5G 和卫星通信整合,该技术将扩展至远程海洋监测,推动环境保护与资源开发创新。

(9) 三维立体集成封装的微流道散热技术

三维立体集成封装的微流道散热技术是一种针对堆叠芯片封装的先进冷却方案,通过在封装内部加工微米级流道,引入液冷强制对流换热,有效缓解封装热点和热阻问题,具有高效、高集成度、散热均匀等优势,在提升芯片性能和长期可靠性方面具有重要意义。

主要技术方向包括:① 加工工艺优化——开发与封装工艺兼容的加工方法,提高流道尺寸

精度和表面质量，确保结构强度和密封性能；② 系统集成协同——突破微流道与微泵、电光互连结构集成技术，提升系统紧凑性和可靠性；③ 流道设计创新——针对不同应用场景和封装结构，运用机器学习等仿真方法，对微流道进行全局优化，改善均温性、降低压降、提高散热效率；④ 关键材料择优——开发适合规模化制造的结构材料，探索高比热容单相流体和高相变潜热两相流体，实现协同高效散热。

三维立体集成封装的微流道散热技术正朝着极限散热、多维协同和智能化方向发展。通过结合微纳加工等新技术，实现精密流道可控制备；推进电-热-流-光多维设计，构建高集成度三维协同布局；发展自适应流道优化方法，促进热点预测和流体分配智能化；解决流道材料疲劳、密封失效等关键挑战，确保长期稳定性，形成面向三维立体集成封装的完整热管理方案。

（10）基于大模型的故障诊断技术

基于大模型的故障诊断技术是指利用具备大规模参数和强泛化能力的智能模型，对工业设备系统运行数据进行建模与分析，实现设备健康状态评估、故障识别与定位的智能诊断方法。目前典型的基于大模型的故障诊断技术主要是在大规模预训练模型基础上发展而来的。与通用大模型相比，面向故障诊断的大模型更加注重复杂时序信号与多源数据的处理，强调在资源受限的工业边缘环境下高效运行、可解释、诊断可靠。为适应多样化的诊断任务，需要在诊断跨任务迁移、领域知识增强、多模态感知融合以及轻量化优化等方面进行优化升级。

目前，大模型驱动的机械故障诊断主要技术方向包括基于推理大模型的诊断逻辑迁移方法、融合领域知识的知识增强建模方法、基于振动视觉等多源传感器的多模态数据融合方法、面向工业应用的轻量化优化方法等。结合大模型强大的表征和推理能力，发展形成大模型驱动的机械故障诊断新范式，是该领域未来的重要发展方向。具体的技术发展趋势包括：基于推理能力的跨任务诊断大模型，融合知识图谱的可解释与可靠诊断模型，多模态感知下的变工况故障诊断方法，以及面向边缘部署的轻量化与高效推理设计等。

2.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.2.1 高能量密度全固态动力电池技术

随着新能源汽车、电动航空与战略储能对高比能、高安全的需求攀升，传统液态锂离子电池在能量密度、热稳定性与电解液安全性上已接近极限。全固态动力电池以固态电解质取代可燃液态体系，被视为下一代储能的关键突破。自 20 世纪 80 年代提出以来，全固态电池研究已历经材料探索、原型验证到产业化初启，日本、韩国及欧美车企率先布局，中国亦将其纳入国家重点研发计划。

全固态电池的演进可概括为“性能—安全—规模”三重跨越：早期（1980—2010）主要探索硫化物、氧化物和聚合物电解质的导电机理；近十余年（2010—2023）通过界面工程与原型验证，室温离子电导率突破 10^{-3} S/cm，循环寿命提升至百次量级；未来十年将迈向规模化和多场景应用，预计 2028—2035 年单体能量密度可达 400~500 W·h/kg，循环寿命提升至 1 000~2 000 次，并在电动航空、长续航车辆和分布式储能中实现商业化。

全固态电池的重要性在于突破“安全底线”与“性能天花板”：固态电解质不可燃，可显著

抑制热失控；同时兼容锂金属负极和高电压正极，为能量密度持续提升打开空间，进而重塑交通电动化、智能电网与国防动力格局。

当前研究热点集中于以下三大方向：

- 1) 固态电解质材料：硫化物导电性与润湿性优，但受空气敏感与成本制约；氧化物稳定而界面阻抗大；聚合物加工性好但室温导电率低。多相复合、离子液体辅助与纳米结构调控是兼顾导电性与稳定性的前沿策略。
- 2) 电极－电解质界面：锂枝晶、硅基体积膨胀及高电压正极副反应是寿命瓶颈，通过人工固体电解质界面膜（SEI 膜）、弹性缓冲层和原位反应调控可有效降低阻抗并延长寿命。
- 3) 结构与工程化：干法成膜、层压与共烧结工艺，以及先进封装和热管理方案，是实现致密界面、低成本和规模化制造的关键。

展望未来，全固态电池发展将经历“三步走”：近期（2025 年前），率先在可穿戴电子和高端 3C 产品小规模应用；中期（2028—2035 年），完成车规级模组验证并实现产业化和规模应用于，同时实现在无人机和人形机器人领域的应用；长期（2035—2040 年），借助富锂层状、硫基正极、金属锂负极和智能电池管理技术，支撑电动航空、深空探测和分布式储能，成为高安全高比能的终极能源体系。

目前，该前沿中核心专利公开量和平均被引数排名第一的国家是中国（表 2.17）。核心专利的主要产出国家之间暂无合作。核心专利公开量最多的机构是中南大学（表 2.18）。核心专利的主要产出机构中，中南大学与深圳市国拓智能机械有限公司之间存在合作（图 2.10）。图 2.11 为“高能量密度全固态动力电池技术”工程开发前沿的发展路线。

表 2.17 “高能量密度全固态动力电池技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	13	86.67	21	100.00	1.62
2	德国	1	6.67	0	0.00	0.00
3	美国	1	6.67	0	0.00	0.00

表 2.18 “高能量密度全固态动力电池技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中南大学	2	13.33	7	33.33	3.50
2	北京新能源汽车股份有限公司	1	6.67	5	23.81	5.00
3	南京金龙客车制造有限公司	1	6.67	5	23.81	5.00
4	重庆九环新越新能源科技发展有限公司	1	6.67	2	9.52	2.00
5	深圳市国拓智能机械有限公司	1	6.67	2	9.52	2.00
6	中国第一汽车股份有限公司	1	6.67	1	4.76	1.00
7	江苏智泰新能源科技有限公司	1	6.67	1	4.76	1.00
8	6K 公司	1	6.67	0	0.00	0.00
9	中国科学院物理研究所	1	6.67	0	0.00	0.00
10	梅赛德斯－奔驰集团股份公司	1	6.67	0	0.00	0.00

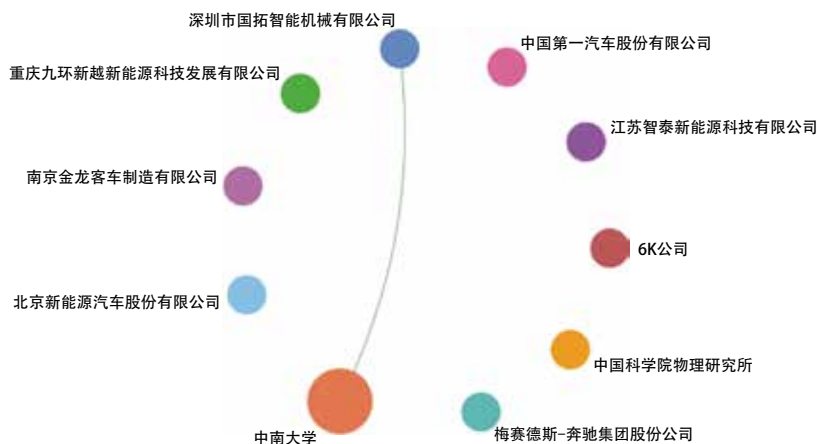


图 2.10 “高能量密度全固态动力电池技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

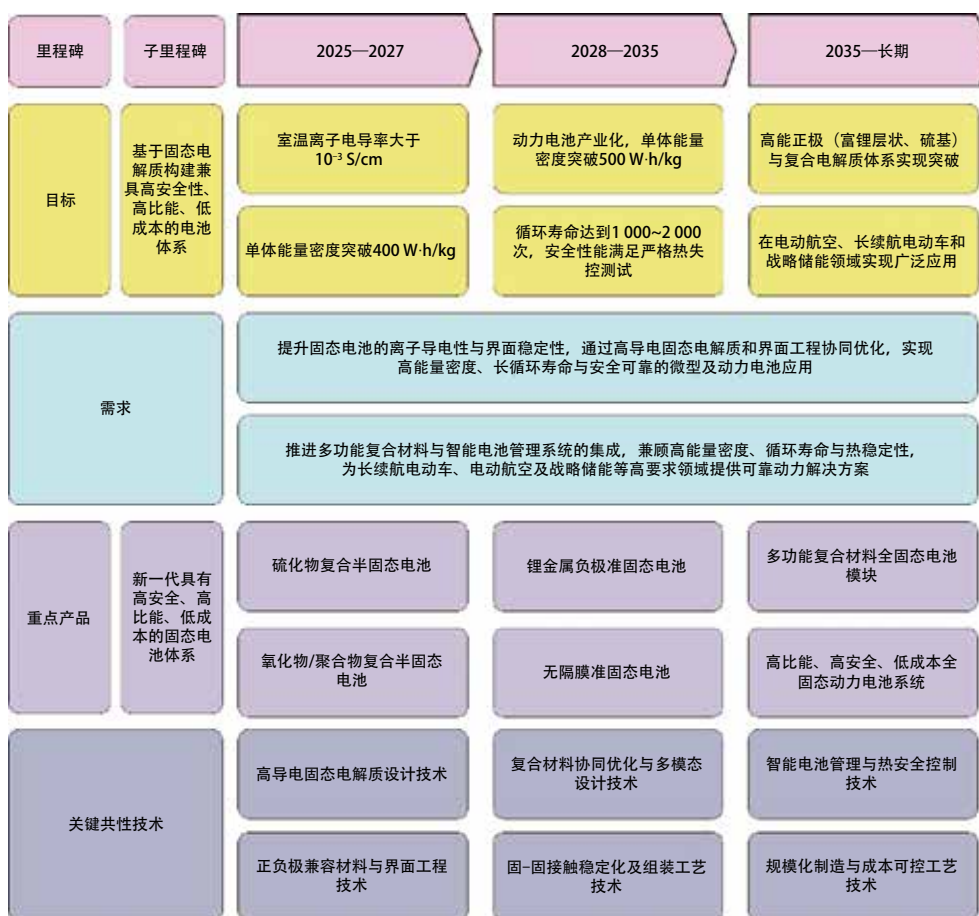


图 2.11 “高能量密度全固态动力电池技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.2.2 低空无人机集群反制技术

低空无人机集群凭借灵活部署、低成本与高效适配等优势在支撑低空经济发展的同时，也伴随多重风险，如侵犯隐私、威胁航空安全、危害公共和国家安全等。由此看出，发展有效的低空无人机集群反制技术，对保障和维持低空经济有序发展具有重要的战略意义。

低空无人机集群反制需要在复杂低空电磁和强动态扰动环境下，借助智能探测、行为识别、干扰劫持、多模式毁伤等多种手段，实施体系化的主动防御。该技术正由早期的常规火力、拦截网、猛禽等物理/生物手段单点反制，进入“软硬”兼施、群对群的多点/集群体系化反制阶段，尤其是当前可综合运用常规火力、高功率微波、激光、电磁压制与网络劫持，实现“点”杀伤和“面”压制。未来该技术将向具备高抗扰、低成本、大范围毁伤能力的“精准威胁感知—智能匹配决策—高效行动打击”完整技术体系发展。

该领域研究方向主要涵盖：① 集群态势感知是反制体系的敏感单元，正由单一雷达/光电探测发展为以电磁等主导的多源融合与AI预测，旨在提升极端环境下集群行为意图探测能力。② 综合反制决策与效能评估作为反制技术体系的智慧大脑，正由人工规则向半自动算法、AI+博弈论、自适应优化演进，其中，面向大规模异质集群的高动态、非线性和随机行为的自主决策是该方向的研究重点。③ 先进毁伤与干扰截停技术是反制体系的手腕拳脚，软硬结合，既打击通信或控制，又摧毁实体。该技术正向定向能武器发展，微波武器已由单纯链路干扰扩展为电磁脉冲区域杀伤，激光武器正从低功率致盲发展到百千瓦级烧蚀，但仍存在系统功耗高、作用范围有限、多目标拦截能力不足、环境适应性差等问题。未来该方向将聚焦于发展依托定向能、等离子体等技术的高效低成本大范围毁伤新机制。④ 多元协同的复杂系统集成，强调多层统筹与跨域协同，将电子战、网络劫持、定向能或物理打击与效果评估深度集成，目标在于形成高效协同、自适应的综合防御体系。

目前，该前沿中核心专利公开量排名第一的国家是中国，平均被引数排名第一的国家是加拿大（表2.19）。核心专利公开量排名第一的机构是四川华讯新科科技有限公司（表2.20）。核心专利的主要产出国家之间、主要产出机构之间均未见合作。图2.12为“低空无人机集群反制技术”工程开发前沿的发展路线。

表 2.19 “低空无人机集群反制技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	122	88.41	268	43.79	2.20
2	美国	7	5.07	225	36.76	32.14
3	俄罗斯	3	2.17	9	1.47	3.00
4	印度	2	1.45	0	0.00	0.00
5	日本	2	1.45	0	0.00	0.00
6	加拿大	1	0.72	110	17.97	110.00
7	土耳其	1	0.72	0	0.00	0.00

表 2.20 “低空无人机集群反制技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	四川华讯新科科技有限公司	6	4.35	15	2.45	2.50
2	中国电子科技集团公司	5	3.62	3	0.49	0.60
3	中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所	4	2.90	24	3.92	6.00
4	国防科技大学	4	2.90	6	0.98	1.50
5	西北工业大学	4	2.90	1	0.16	0.25
6	雷神技术公司	3	2.17	162	26.47	54.00
7	北京航空航天大学	3	2.17	30	4.90	10.00
8	北京理工大学	3	2.17	14	2.29	4.67
9	沈阳航空航天大学	3	2.17	12	1.96	4.00
10	中国航天空气动力技术研究院	3	2.17	9	1.47	3.00

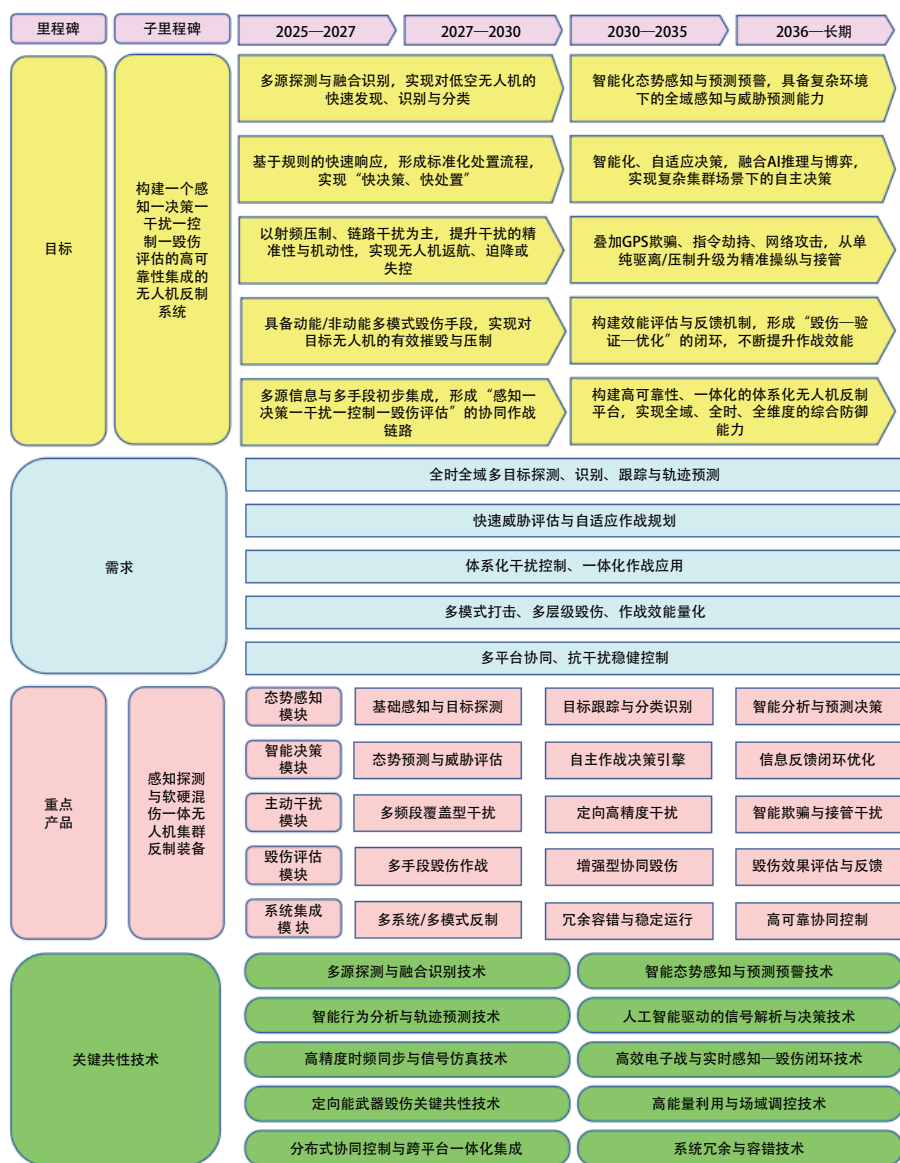


图 2.12 “低空无人机集群反制技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.2.3 多无人机协同打击任务分配方法

随着无人机技术的不断成熟和完善，其军事应用的优势日益显现，近年来其在军事冲突中所发挥的作用更使人们认识到，无人机在未来战争中将成为重要的军事装备。随着无人机在军事中的大量应用，无人机集群协同执行任务将成为典型的应用模式。为完成无人机集群执行协同打击任务，有众多可行的方案，为了提高作战效能，多无人机协同打击任务分配方法和技术十分重要。

在自动化技术的发展中，尤其是机器人技术和先进航空技术的发展中，任务分配方法已得到深入研究，已有大量的相关研究成果。但是这些方法难以处理在复杂环境和复杂约束下机动目标协同打击中的任务分配问题。当被打击目标具有机动规避的功能时，协同打击问题便成为一类协同动态博弈问题，此时协同打击任务分配问题变得甚为复杂，加之环境约束和无人机自身的动力学等约束，使得该问题极具挑战性。

在执行对机动目标的打击任务时，需要规避障碍和危险区域（如敌方的防空火力范围），还要避免己方无人机之间的碰撞，因此需对存在障碍场景中具有避碰约束下的协同动态博弈问题开展研究，为制定协同打击策略奠定理论基础。在制定协同打击策略时，关于被打击目标和己方无人机的位置信息有两种形式，即全局位置信息和相对位置信息，前者可以获得被打击目标和己方无人机在三维空间的坐标信息，而后者只能获得相对位置信息，需分别研究基于不同类型位置信息的协同打击策略的分析和制定方法。无人机的杀伤能力（弹药的爆破能力和杀伤半径）和其所携带的能量（电池或燃油）总是有限的，研究这些约束条件下的协同打击策略分析与制定方法具有重要的实际意义。在多无人机对多机动目标实施协同打击策略分析中，打击策略可以分解为一对一和多对一的形式，从而形成子任务。当无人机携带的载荷相异（弹药、能量、通信设备和计算设备相异）时，需根据子任务需求进行无人机编组。以打击效能最大为目的，进行无人机编组和子任务分配，实现协同打击的任务分配方法和技术是多无人机军事应用中极为重要的关键技术。在机间协同的同时，进行空地协同，整合空中无人机机载资源和地面装备（包括通信、侦察和打击等），实现无人机体系化协同打击，将极大地提高无人机集群的作战效能。

目前，该前沿中核心专利的主要产出国家是中国（表 2.21）。核心专利公开量最多的机构是哈尔滨工业大学和国防科技大学（表 2.22）。核心专利主要产出国家之间、主要产出机构之间均未见合作。图 2.13 为“多无人机协同打击任务分配方法”工程开发前沿的发展路线。

表 2.21 “多无人机协同打击任务分配方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例/%	被引数	被引数比例/%	平均被引数
1	中国	11	100.00	53	100.00	4.82

表 2.22 “多无人机协同打击任务分配方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	哈尔滨工程大学	2	18.18	16	30.19	8.00
2	国防科技大学	2	18.18	13	24.53	6.50
3	北京航空航天大学	1	9.09	13	24.53	13.00
4	合肥工业大学	1	9.09	5	9.43	5.00
5	北京中科星通技术有限公司	1	9.09	2	3.77	2.00
6	海鹰航空通用装备有限责任公司	1	9.09	2	3.77	2.00
7	航空工业信息中心	1	9.09	1	1.89	1.00
8	电子科技大学	1	9.09	1	1.89	1.00
9	北京理工大学	1	9.09	0	0.00	0.00



图 2.13 “多无人机协同打击任务分配方法”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：陈学东¹ 郭东明

院士专家组：

曹喜滨 丁荣军 樊会涛 甘晓华 赫晓东 侯 晓 焦宗夏 卢秉恒 李 东 刘 宏
冷劲松 李 骏 李克强 李魁武 刘怡昕 林忠钦 马玉山 孙逢春 史丽萍 王 超
吴光辉 王海峰 王树新 王田天 王向明 王云鹏 王玉明 王自力 项昌乐 徐芭南

¹ 华中科技大学。

徐 青 杨德森 严新平 郑津洋 周建平 朱 坤 邹汝平 朱英富

工作组:

马天宝 马 将 骆 鸿 李明雨 范利武 牛士超 孙冬柏 罗国强 杨立军 王同敏
李秦川 王中钢 王从思 贺 威 黄 田 杨树明 李建利 梅云辉 吴广宁 陈玉丽
黄明辉 汪爱英 陶友传 毕传兴 詹 梅 路 新 付世晓 王开云 于靖军 刘 巍
段吉安 王天友 尧命发 王建民 管仁国 赵立东 王立平 闫永达 陈伟球 王时龙
周天丰 黄昔光 豆志河 王树青 朱继宏 李 好 吴德发 王新云 康重庆 朱 恂
张景瑞 胡家兵 孙 剑 周志成 黄海鸿 欧阳钢 李升波 史铁林 夏 奇 龙 胡
刘智勇 陈惜曦

执笔组:

龚荣洲 王 鲜 赵 伟 李 箐 贺 永 何超凡 陈海生 徐少兵 高博麟 吴志刚
张 涛 董希旺 刘东旭 宋 俊 黄云辉 赵 剑 陈 旺 潘 泉 缪向水 谢少荣
罗小兵 陈雪峰 赵志斌



第三章

信息与电子工程前沿

3.1 工程研究前沿

3.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿见表 3.1，涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向。其中，“量子与经典计算融合的计算体系”为数据挖掘与专家提名前沿，其余均为专家提名前沿。各前沿涉及的核心论文 2019—2024 年发表情况见表 3.2。

（1）高速低功耗片上光互连技术

高速低功耗片上光互连技术是通过在芯片或多芯片系统中引入光互连通信链路，利用光信号在高带宽、低延迟和低功耗方面的优势，突破传统电互连在速率、能耗和信号完整性方面的瓶颈。该技术对满足人工智能（AI）、高性能计算（HPC）、数据中心和未来超大规模集成芯片的需求具有重要意义。

该技术研究重点主要集中在器件、架构和集成等层面：① 在器件层面，新型片上光学元件的设计与优化是目前研发重点，例如高速电光调制器、高灵敏度光电探测器以及高效波分复用与解复用器件，以提升互连速率并降低单比特能耗；② 在整体架构层面，片上光网络（ONoC）、芯片间光互连以及光输入/输出（Optical I/O）接口的设计是提升带宽密度和通信效率的重要方向；③ 在集成技术层面，电子与光子的深度融合被视为集成技术演进的关键，例如光子器件与互补金属氧化物半导体（CMOS）电路协同优化，电子-光子集成回路（EPIC）、异质集成

表 3.1 信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	高速低功耗片上光互连技术	243	3 499	14.40	2021.4
2	跨域异构无人系统智能控制理论与方法	146	1 613	11.05	2022.2
3	通感算智控一体化网络系统理论与技术	172	25 737	149.63	2021.2
4	多智能体构建及协同技术	256	20 996	82.02	2021.0
5	类生命机器人基础理论	197	4 784	24.28	2022.1
6	跨介质远距离光电探测与通信技术	144	1 948	13.53	2021.7
7	宏观尺度原子级精度制造机理与方法	313	38 112	121.76	2020.6
8	量子与经典计算融合的计算体系	412	57 702	140.05	2020.8
9	晶圆双面器件与双面互连技术	47	325	6.91	2021.9
10	毫米波太赫兹射频前端集成电路	167	9 344	55.95	2020.5

表 3.2 信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	高速低功耗片上光互连技术	44	57	26	43	29	44
2	跨域异构无人系统智能控制理论与方法	14	17	14	25	37	39
3	通感算智控一体化网络系统理论与技术	22	38	39	42	26	5
4	多智能体构建及协同技术	50	54	59	48	33	12
5	类生命机器人基础理论	22	26	22	35	28	64
6	跨介质远距离光电探测与通信技术	22	20	22	26	17	37
7	宏观尺度原子级精度制造机理与方法	90	72	61	57	29	4
8	量子与经典计算融合的计算体系	91	89	123	53	41	15
9	晶圆双面器件与双面互连技术	8	5	6	6	9	13
10	毫米波太赫兹射频前端集成电路	49	47	29	29	12	1

和共封装光学（CPO）等方案，正不断推动该领域向大规模应用迈进。

展望未来，该前沿发展趋势主要体现在以下方面：① 传输带宽将持续提升，借助多波长复用、硅光调制器优化以及集成光放大技术等，有望突破目前电互连的瓶颈，实现 Tb/s 级的片上通信；② 能效优化将成为关键驱动力，通过低功耗激光器、高速低损耗光波导和智能功率管理策略，光互连能在保持高吞吐量的同时显著降低系统能耗；③ 系统集成度和模块化设计将不断增强，片上光互连将逐步向可扩展的模块化芯粒平台演进，使得处理器、存储器和专用加速器能够灵活组合；④ 智能化管理和动态调度将成为趋势，通过片上光网络的自适应路由、负载均衡和热管理技术，光互连系统将能够根据应用需求实时优化性能与功耗，为高性能计算、人工智能训练与推理以及云数据中心的算力扩展提供强有力支撑。

（2）跨域异构无人系统智能控制理论与方法

跨域异构无人系统智能控制理论与方法是指针对空、天、地、海等多域协同任务场景中存在的多类型无人系统（如无人机、无人艇、无人车、无人潜航器等），通过构建统一的智能决策与控制框架，突破单域、同构无人系统控制方法的固有限制，从而实现跨域协同感知、跨域信息互联以及跨域任务协作等关键目标。这一研究前沿不仅关注单个无人平台的自主智能，更强调异构无人系统群体在跨域复杂环境中执行任务的整体协同与群体效能。

从研究内涵来看，跨域异构无人系统智能控制的核心在于探索跨域控制机理与智能决策机制，重点解决多源数据融合困难、跨域动力学差异显著、任务需求高度动态化等问题。因而，当前主要研究方向包括：① 跨域感知与信息融合方法，即针对不同平台与环境所采集的多源异构数据，研究鲁棒一致性建模、时空对齐与多模态信息融合方法，以提升全局态势感知能力；② 自主协同与鲁棒控制算法，即探索在受限通信、强对抗和复杂环境下的分布式鲁棒控制与协同算法，确保无人系统群体能够稳定、高效地完成任务；③ 任务分配与智能决策机制，即结合强化学习、博弈论与分布式优化理论，研究多任务动态分配与智能决策方法，以提升系统在大规模任务场景中的自主性与灵活性。

展望未来，跨域异构无人系统智能控制理论与方法的发展仍面临 3 个亟待突破的关键问题：

① 可验证的学习控制方法，即在保证学习型算法自适应性的同时，建立严格的可验证性与安全性分析框架；② 能力级联与软硬件协同，即进一步探索无人系统在感知、通信、计算、执行等多层次能力之间的级联耦合与优化机制；③ 标准化接口与互操作性，即推动跨平台、跨域的统一接口与标准体系建设，实现不同类型无人系统的高效互联与无缝协作，最终建立跨域协同生态。

总体来看，跨域异构无人系统智能控制理论与方法正在从概念探索逐步迈向系统化、工程化和实用化阶段，并有望成为推动未来无人系统技术体系升级的重要引擎。

（3）通感算智控一体化网络系统理论与技术

通感算智控一体化网络系统理论与技术是面向数字化、网络化、智能化时代的新型网络体系架构与理论框架，融合多维信息服务能力，对信息服务资源进行系统性的一体化优化。它以网络为基础，目标是让网络实现从数据传输的“通信管道”向“信息服务网络”的革命性转变。该体系突破传统网络单一数据传输角色局限，通过深度融合通信（高效数据传输）、感知（环境状态精准获取）、计算（数据处理与资源调度）、智能（自主分析与决策支持）及控制（精准指令执行与反馈调节）五大核心要素，构建具备“环境感知、实时通信、智能分析、自主决策、精准调控”的综合信息服务系统，旨在以网络通信为基础，解决传统网络中感知与通信割裂、计算与智能脱节、控制响应滞后等问题，通过多要素协同优化与动态适配，实现通、感、算、智、控的基础设施化的普惠服务。

主要研究方向包括：① 在通感融合方向，通过新型通感融合空口设计、多源协作化感知以及基于毫米波的目标感知算法，兼顾目标感知精度与通信性能，实现通信与感知功能资源共享；② 在通算融合方向，联合感知通算资源并通过“算力路由”等技术进行联合调度，构建端、边、云算力协同计算环境，提升用户体验及资源利用效率；③ 在通智融合方向，不仅要通过意图识别与映射、网络信息测量、网络策略生成与验证等技术实现网络“内生智能”，提升网络运行、运维效率，还需针对 AI 应用与智能体带来的流量模式变化、实时性传输需求、多因素身份认证机制以及细粒度访问控制策略等挑战，提出面向智能体通信网络的架构设计方案，支撑异构多智能体间任务的调用与协作；④ 在通控融合方向，聚焦构建支持超低时延与确定性传输的实时交互机制，保障精准调控的时效性、可靠性与安全性。

未来需结合低空经济、物理数字混合、AI 普惠的发展趋势，进一步深化多维度信息服务能力的协同效用，提出多要素系统化融合的基础理论，在端网协同的操作系统、中间件等一体化计算环境实现突破，在支持跨架构计算的基础上，实现系统级异构资源的动态优化调配，形成“感知—通信—计算—智能—控制”无缝衔接的多要素网络服务新范式。

（4）多智能体构建及协同技术

多智能体构建及协同技术旨在通过设计多个具备自主决策能力（包括自主感知、决策与执行能力等）的智能体，模拟人类社会学习与群体协作机制，研究多智能体的高效协同与竞争机制，实现复杂任务整体目标优化的智能计算与控制范式。该方向关注单智能体体系结构与学习机制，更强调多智能体之间在共享、部分共享或不完备信息条件下的交互、协作与博弈，最终突破单智能体的能力局限，通过群体智能涌现提升系统的适应性、鲁棒性和可信性，为实际场景提供可扩展的智能化解决方案。

多智能体构建主要依托机器学习、控制、分布式系统等相关技术,研究智能体的自主感知、环境建模、规划决策与任务执行方法;协同技术侧重于任务分解与分配、信息交互与融合、群体协作与冲突解决等关键问题,探索从个体智能到群体智能的涌现机制。研究重点包括:多智能体体系结构设计与可扩展建模,多智能体的标准通信协议构建,多智能体分布式协同目标优化,多智能体间实时交互与合作机制,多智能体博弈与联盟策略,以及人机混合智能系统中的协同模式等。

该项技术正驱动人工智能从“单体智能”向“群体智能”跃进,通过分工协同、资源优化等技术攻克复杂系统管控难题。未来仍需通信架构精简、安全框架标准化、伦理规范制定等方向持续突破,深度融合具身智能与虚实交互技术,为工业4.0与人机共生智能社会建设提供底层引擎,最终实现“1+1>2”群体智能效应。

(5) 类生命机器人基础理论

类生命机器人基础理论是研究生命系统与机电系统在分子、细胞和组织尺度深度融合中的基本原理与科学问题。该领域聚焦于揭示生命功能单元与人工组件在结构、能量与信息层面的耦合机制,致力于构建一套能够系统阐释类生命系统感知、驱动与智能功能实现的理论框架,以突破传统机器人的能力边界和发展范式。

主要研究方向包括:①生物-机电跨介质接口理论,探索细胞与人工材料界面间力、电、化学信号的传导与交互机制;②类生命功能单元建模,发展基于生物能量转换、信息传递与处理机制的建模方法;③生命-机电系统协同理论,研究生物元件与人工元件之间的功能耦合及动态互作用机制;④类生命智能基础理论,探索基于生命本征特性的感知-决策-控制闭环机理,以及碳基-硅基混合智能的理论模型与增强机制。

发展趋势主要包括:①深化生机系统融合机制,发展生物-机器多尺度界面动态自适应耦合理论体系;②加强类生命系统定量建模,构建可量化、可解释、可预测的类生命系统精准控制模型;③推动跨尺度理论整合,建立从分子、细胞到组织层级的跨层级偶联理论;④实现理论与实验的紧密结合,通过类生命系统平台迭代完善理论框架,最终形成系统化的类生命机器人基础理论体系。

(6) 跨介质远距离光电探测与通信技术

跨介质远距离光电探测与通信技术是指基于空中平台向海水发射蓝绿波段激光,实现高效、高精度大气及海洋跨介质剖面参数探测和高速通信。该技术利用蓝绿激光可以穿透海气界面及海水的特性,实现远距离、大深度的信息传输,根据激光在大气、海表和海水水体返回的后向回波信号实现对大气及海洋垂直剖面参数的探测。

针对跨介质远距离光电探测与通信技术面临的探不深、测不准、稳定性不足等瓶颈问题和应用短板,主要依托高效调制编码技术、光信号动态非线性压缩、光子数可分辨探测、最大比分集多孔径自适应阵列接收和匹配海水最佳透过率的太阳暗线蓝绿脉冲激光等核心技术,拓展海洋穿透深度,抑制太阳背景光和海面波动的干扰,大幅提升跨介质远距离光电探测与通信技术在真实海况下的适用能力。

研究趋势包括：① 提升太阳背景光抑制能力，发展全天时跨域通信探测技术，进一步提升跨介质远距离光电探测与通信系统的天时适应性；② 发展智能场景自适应技术，提升跨介质远距离光电探测与通信系统对水质、时段的环境适应性；③ 发展跨介质通信探测一体化技术，研制小型化、低功耗通信探测一体系统，提升水下平台跨域协同探测能力。跨介质远距离光电探测与通信技术为大范围海洋资源、生态和海岛礁调查和监测提供新的立体遥感技术，为水下海洋环境监测等领域提供跨介质双向高速通信手段。

（7）宏观尺度原子级精度制造机理与方法

宏观尺度原子级精度制造是在毫米到米量级宏观尺度下，基于材料原子级离散化和量子理论，使用原子量级的精确材料去除、增加和控制等方法，结合原子级表征、实时监测和闭环控制，实现宏观器件的原子级形貌和精度控制，是新制造范式（亦即制造范式Ⅲ）中核心使能技术主要组成部分。

其研究方向主要分为两个层面：① 机理层面上主要研究基于量子力学的制造基础新理论，包括原子键断裂、扩散重排、自组织作用机制，多场耦合对原子迁移的驱动规律，局域能量输入与原子限域/增减的关系，原子级制造中表界面效应与缺陷工程和原子到宏观器件的跨尺度映射理论；② 方法层面上则基于新机理开发可控工艺，如离子束、激光、原子层刻蚀/沉积、多场耦合加工，并结合原子级表征、实时监测和闭环控制，实现原子级到宏观尺度的精度一致性。

该前沿未来发展趋势包括：① 机理层面上聚焦制造理论体系重构，基于量子力学理论发展多尺度、多物理场协同作用机制研究，建立从原子层去除、表面重排到宏观形貌演化的统一模型，实现原子级加工精度和加工量的可预测与可设计；② 方法层面上则向高效化、智能化和规模化发展，利用多能场耦合加工、原子层级增/减材工艺、缺陷自修复等技术，提高加工速率与稳定性；③ 融合加工过程原子级原位表征、实时反馈控制和数字孪生，实现自适应调控和全流程闭环优化，推动宏观尺度原子级制造的颠覆性应用落地。

（8）量子与经典计算融合的计算体系

量子与经典计算融合的计算体系是结合量子并行计算与经典控制的新型计算范式，旨在通过优势互补攻克单一架构难以解决的复杂问题。其核心在于分工：量子处理单元（QPU）利用叠加与纠缠等特性执行核心计算，而经典计算机则负责数据处理、流程控制与算法优化等关键辅助任务。

针对这种混合系统，目前研究主要集中在算法和软硬件系统集成。在算法层面，聚焦于含噪声中等规模量子（NISQ）硬件开发和优化有效的混合算法。其中，变分量子算法（VQA）是融合计算的典范。它通过一个经典的优化器来迭代调整一个参数化的量子线路，巧妙地将量子态制备与测量任务交给 QPU，而将繁重的参数优化任务交还给经典计算机。其代表性算法包括用于量子化学与材料科学的变分量子本征求解器（VQE），以及用于解决组合优化问题的量子近似优化算法（QAOA）。另一个算法的前沿领域是量子机器学习（QML），它探索如何将变分量子线路用作机器学习模型的一部分，例如设计量子神经网络，期望在模式识别和数据分类等领域提供超越经典算法的能力。在软硬件集成层面，核心目标是构建高效、低延迟的量子-经典协同执行

环境。这是一个系统工程挑战，关键研究方向包括：开发能将高级算法语言高效编译为 QPU 物理指令的编译器；设计能够最小化经典与量子处理器之间通信延迟的控制软件和中间件；探索将 QPU 作为加速器无缝集成到经典高性能计算中心的系统架构。其最终目标是通过端到端优化，实现软硬件的深度耦合。

该前沿正沿着算法与软硬件协同两个层面并行演进，共同推动该领域从理论探索走向实际应用。在算法层面，发展趋势正从通用框架转向面向应用的“问题感知”式深度优化。为超越 VQE 和 QAOA 等基础模型，在特定问题上更快取得“量子优势”，算法设计正日益走向定制化。例如，在组合优化领域，通过构造能够编码问题约束的驱动哈密顿量，或通过高效生成可行解空间并在其内部进行搜索，均可显著提升求解速度与解的质量。这种设计是能更高效利用有限量子资源的关键。在软硬件协同层面，核心趋势是以性能为驱动的深度集成，旨在从根本上解决量子与经典计算单元间的通信延迟瓶颈，实现二者的高速互联。其实现路径涵盖从构建统一的混合软件架构与指令集，到最终实现片上物理集成，从而构建一个无缝且高效的混合计算系统，为解决更复杂的计算难题提供坚实基础。

（9）晶圆双面器件与双面互连技术

晶圆双面器件与双面互连技术是在同一晶圆的正反两面分别构筑有源器件与金属互连网络，并通过垂直通孔实现双面器件或电路的电源与信号互连，是当前国际先进集成电路技术发展的重要方向。其代表性技术——倒装堆叠晶体管（FFET）通过正 / 背面有源区的自对准和双面引脚布局，可将标准单元电路高度压缩近一半，增加了器件密度和布局布线空间，从而大幅提升芯片集成度。双面互连可有效提升电路绕线自由度，降低布线拥塞、信号延迟和 IR 损耗。更进一步，倒装三维集成（Flip 3D, F3D）则通过晶圆双面电路和双面混合键合，将有源层与互正反两面连层交替构建于晶圆两侧，实现高密度封装级三维堆叠。

晶圆双面器件与双面互连技术主要研究方向涵盖：① 基础工艺（晶圆键合、低温互连、衬底减薄、背部光刻）；② 器件结构优化（双面结构改进、热管理）；③ 双面供电与信号布线协同（跨面通孔形成、拥塞与寄生控制）；④ 双面标准单元电路与电子设计自动化（EDA）支撑（双输出库建模、跨面设计规则和布局布线）；⑤ 电路设计方法学。此外，由于该前沿与先进封装〔如混合键合芯粒互连、2.5D/3D 硅中介层（SiP）〕自然兼容，可将先进逻辑制程与先进封装技术深度融合，打破传统芯粒级与器件级三维集成之间的界限。

晶圆双面器件与双面互连技术的发展趋势包括：① 从即将进入量产的背面供电技术，发展到背面互连及双面互连，再到双面功能单元，最终实现双面芯片集成及多层堆叠三维集成技术；② 实现逻辑标准单元高度进一步压缩，电路互连性能大幅提升，并通过 F3D 模块化循环实现可扩展的多层堆叠架构；③ 多学科设计技术协同优化（DTCO）将深度协同器件、工艺、互连、EDA 与体系结构，推动先进逻辑与先进封装的统一演进，实现更高集成度、更低能耗和更优系统性能，对后摩尔时代三维集成技术的长期演进具有重大战略意义。

（10）毫米波太赫兹射频前端集成电路

毫米波太赫兹射频前端集成电路是工作在毫米波（30~300 GHz）和太赫兹（0.1~10 THz）频

段的无线通信系统核心模块，集成了调制器、放大器和天线等组件，负责信号的调制、解调、发射与接收等任务，利用充足的频谱资源实现信号的超高速率传输，是 6G 无线通信、车载雷达和卫星互联网等前沿技术的关键组成部分。

近年来，该前沿的主要研究方向包括：① 制程突破与工艺创新，提高核心器件晶体管的截止频率，将其可用频率扩展至太赫兹频段；② 毫米波太赫兹通信系统及关键电路创新，优化收发链路架构以及频率源、放大器等关键模块的设计，提升系统性能；③ 系统集成创新，利用异构集成、三维堆叠等技术将不同工艺节点或不同材料的芯片整合在单个封装系统，提高系统的集成度；④ 波束成形技术创新，通过优化相控阵系统架构并开发自适应校准算法，实现更高精度波束成形，增强抗干扰性能。

未来研究趋势主要包括：① 硅基工艺性能突破，进一步提升晶体管的截止频率；② 高频化与宽带化演进，满足 6G 通信与超分辨雷达需求；③ 融合人工智能技术，系统化设计电路模块以及优化实时信号处理，提升电路设计效率；④ 采用更先进的封装技术，例如在三维堆叠中集成多材料芯粒，提升能效与功能密度。

3.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

3.1.2.1 高速低功耗片上光互连技术

随着人工智能与数据中心规模的快速增长，功耗墙与带宽墙问题愈发突出，传统电互连在传输距离、速率和能效方面已接近物理极限。相比之下，光互连凭借在带宽密度、链路距离和能效上的系统级优势，被认为是支撑算力规模化与绿色计算的关键基础设施，也是推动计算体系结构从“以算为中心”向“算-存-互联协同”转变的重要技术路径。高速低功耗片上光互连正是这一趋势的代表性方案，它通过在芯片上或封装层级集成电光调制器、光电探测器、复用器与波导，以光互连取代传统电互连，实现高带宽、低时延和低能耗的数据传输。其技术路线涵盖 ONoC、Optical I/O，以及结合先进封装的 CPO/XPO 等架构。

这一前沿技术的发展源于硅光子与 CMOS 工艺兼容性的早期探索，经过高速电光调制器、光电探测器和低损耗波导等器件性能的持续突破，以及小规模系统原型的演示，逐渐积累了基础。目前，片上光互连正在由实验室技术快速向产业化应用过渡，其在未来计算体系结构中的战略地位将日益凸显。近年来，随着先进封装、异质集成和光电协同设计的进展，光互连将在芯粒架构、处理器与加速器的互连中发挥更广泛的作用，并有望与人工智能计算、云计算和高性能网络深度结合，成为支撑新一代计算与通信体系结构的关键技术基础。

高速低功耗片上光互连技术的研究重点在于带宽与能耗之间的平衡。器件方向聚焦于低电压高速电光调制器、低暗噪声光电探测器，以及低损耗、低串扰的波分复用与解复用器件，以优化链路性能和能效；系统层面则围绕 ONoC 拓扑结构设计、流量调度和 Optical I/O 接口规范展开，光交换与光缓存架构的探索也在进行中；在集成与封装层面，电子-光子集成电路、异质集成、3D/2.5D 封装以及 CPO/XPO 的热-光-电协同设计和可靠性问题受到持续关注。

与此同时，研究正逐步面向 AI 训练和芯粒处理器互连等应用场景，力求在新一代高性能计算中发挥支撑作用。

在科研机构层面，国外的麻省理工学院、斯坦福大学、加州大学圣芭芭拉分校、比利时微电子研究中心（IMEC）等在硅光与封装协同方面保持领先产出；国内则以中国科学院、清华大学、复旦大学、上海交通大学、浙江大学、华中科技大学等为代表，在器件研发、系统原型和工程化推进上均有布局。在产业界，英特尔（Intel）、国际商业机器公司（IBM）、博通、迈威尔等企业围绕 Optical I/O、CPO/XPO 和代工平台构建起了完整的生态体系。同时，OIF、IEEE 802.3、COBO 等国际标准化组织不断推动接口、调制格式与链路规范的统一，而由产业联盟主导的多源协议（MSA）则在光模块封装、接口定义与互操作性方面发挥了重要作用，共同促进了光互连技术的生态成熟与规模化应用。跨机构合作的重点正逐步从器件与系统验证扩展到标准化、可制造性与可靠性评估，并进一步延伸至工具链和软件栈的协同发展。

“高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表 3.3。中国的核心论文数排名第一，占总论文数的 32.10%；美国紧随其后，占 31.69%；中国的平均出版年比美国的晚半年。排名前十的核心论文产出机构中，4 家来自中国、3 家来自美国、2 家来自比利时、1 家来自希腊（表 3.4）。除美国外，主要核心论文产出国家集中在东亚和西欧（图 3.1）。主要产出机构中，以比利时微电子研究中心、根特大学以及希腊的塞萨洛尼基亚里士多德大学三者间合作最多（图 3.2）。施引核心论文方面，中国领先，约占 45.65%，第二名是美国，其余国家占比均低于 10%（表 3.5）；排名前十的施引核心论文产出机构主要集中在中国和美国（表 3.6），体现了中美科研机构对该主题的高度关注。

未来 5~10 年，高速低功耗片上光互连技术将从“可行性验证”走向“规模化应用”的关键阶段（图 3.3）。其发展重点首先体现在器件迭代方面，但相比于单一器件性能的突破，未来的研究重心将逐渐转向系统级能效优化和集成度提升。

表 3.3 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	78	32.10	1 333	17.09	2021.8
2	美国	77	31.69	1 892	24.57	2021.2
3	日本	21	8.64	131	6.24	2020.9
4	英国	20	8.23	336	16.80	2021.4
5	比利时	18	7.41	260	14.44	2020.4
6	希腊	14	5.76	105	7.50	2020.4
7	德国	12	4.94	43	3.58	2021.1
8	法国	9	3.70	115	12.78	2020.0
9	意大利	9	3.70	67	7.44	2022.2
10	韩国	9	3.70	54	6.00	2022.0

表 3.4 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	17	7.00	131	7.71	2022.0
2	比利时微电子研究中心	13	5.35	185	14.23	2020.5
3	上海交通大学	11	4.53	414	37.64	2022.8
4	塞萨洛尼亚里士多德大学	11	4.53	87	7.91	2020.0
5	加州大学圣塔芭芭拉分校	10	4.12	588	58.80	2021.8
6	华中科技大学	10	4.12	356	35.60	2021.6
7	浙江大学	9	3.70	213	23.67	2022.0
8	根特大学	9	3.70	124	13.78	2020.0
9	英特尔公司	8	3.29	413	51.62	2022.0
10	哥伦比亚大学	8	3.29	276	34.50	2020.9

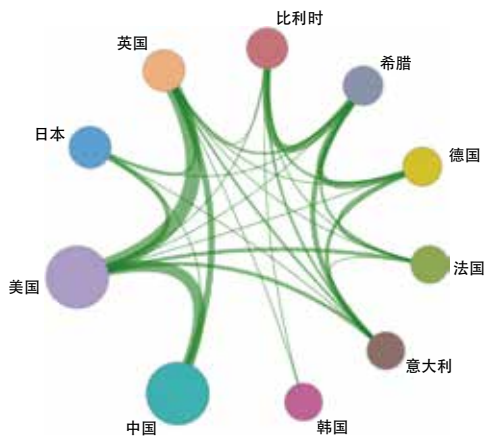


图 3.1 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

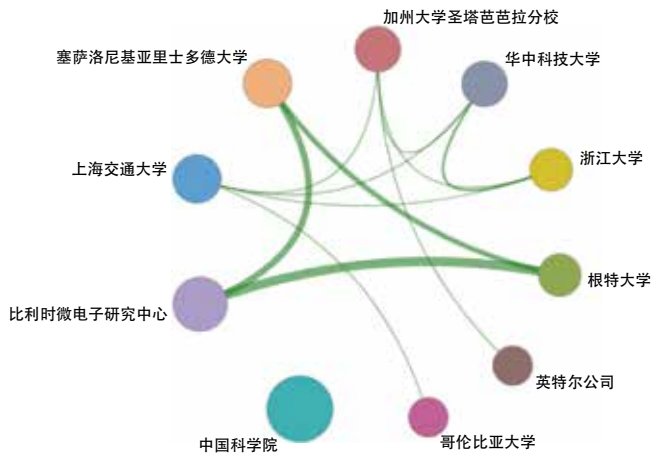


图 3.2 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 3.5 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 300	45.65	2023.0
2	美国	654	22.96	2022.6
3	英国	141	4.95	2022.5
4	日本	128	4.49	2022.5
5	加拿大	114	4.00	2022.5
6	德国	112	3.93	2022.8
7	新加坡	86	3.02	2022.9
8	意大利	82	2.88	2022.9
9	印度	78	2.74	2022.7
10	韩国	77	2.70	2022.7

表 3.6 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	238	24.24	2023.0
2	浙江大学	125	12.73	2023.0
3	上海交通大学	118	12.02	2022.6
4	华中科技大学	101	10.29	2023.0
5	加州大学圣塔芭芭拉分校	90	9.16	2021.7
6	北京大学	63	6.42	2022.7
7	鹏城实验室	53	5.40	2023.2
8	北京邮电大学	51	5.19	2023.3
9	哈尔滨工业大学	49	4.99	2022.7
10	慧与科技公司	48	4.89	2022.0

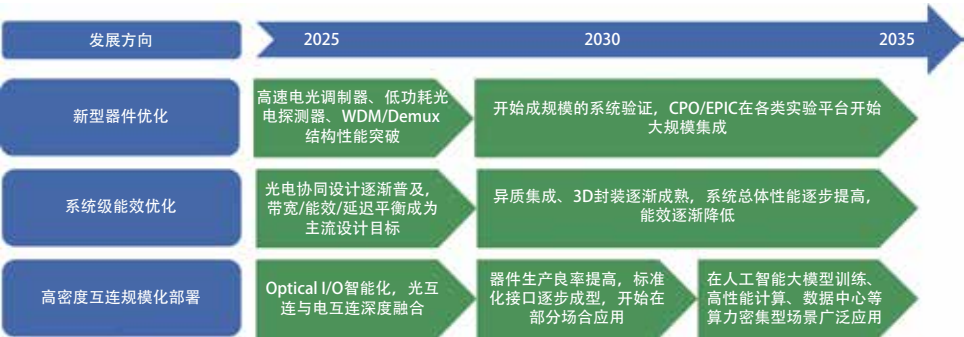


图 3.3 “高速低功耗片上光互连技术”工程研究前沿的发展路线

在发展趋势上：① 高速电光调制器、低功耗光电探测器以及 WDM/Demux 等关键组件仍将持续优化，以提升速率和降低能耗。共封装光学（CPO）、电子-光子集成电路（EPIC）等新型架构将在 2030 年前后实现规模化验证和应用，推动光互连从实验室逐步走向产业部署。② 通过异质集成、三维封装以及光电协同设计，片上光互连和芯片间通信能够实现更高层次的整体优化，逐步克服传统电互连的带宽和能耗瓶颈。③ Optical I/O 智能化、光互连与电互连深度融合将成为重要方向，器件生产良率和标准化接口也将不断成熟，进一步降低大规模应用的门槛。未来，片上光互连不仅是半导体与光子学交叉融合的技术制高点，更是算力体系持续演进的核心动力。在算力需求快速攀升的背景下，其能效和带宽优势将为 AI 模型训练、高性能计算、超大规模数据中心等场景提供关键支撑。尤其是图形处理单元（GPU）、芯粒架构的互连需求，将推动高速光互连成为支撑异构计算与分布式系统的核心基础设施。

总体来看，未来高速低功耗片上光互连将逐步渗透至服务器、加速器互连、边缘智能设备等产业化部署，并有望与新型计算范式相结合，如类脑计算和量子加速，从而拓展应用边界。该前沿不仅具有巨大的技术潜力，也将在算力、能效与系统架构优化的驱动下，展现广阔的产业化和应用前景。

3.1.2.2 跨域异构无人系统智能控制理论与方法

跨域异构无人系统智能控制旨在通过集成空、天、地、海等多域的异构无人平台，突破传统单域任务的局限，解决复杂环境下的跨域协同瓶颈。其核心是依托“感知—决策—执行”的闭环智能控制架构，实现跨域异构无人系统任务级自主，在灾害救援、军事协同、智慧城市等应用场景中展现出巨大的颠覆性潜力。

跨域异构无人系统研究最初起源于单域同构多平台协同（如多旋翼无人机编队、车联网协作）以及单平台多传感器融合的延伸。随着无人平台类型日益多样化、任务复杂性不断提升，单域无人系统逐渐难以满足多任务需求。例如，在海空联合作战、天地一体化观测以及空地协同物流等任务中，单一域内的无人系统往往存在感知盲区、决策滞后或执行能力不足等问题。近年来，传感器的小型化、边缘计算能力的提升以及异构通信技术的发展，使研究重心逐步从“同构群体的队形控制”转向“异构平台跨域协同与任务映射”。在过去 5 年间，人工智能与深度学习的快速发展进一步推动了该领域的进展：一方面，基于数据驱动的行为生成方法与模型驱动的安全保障框架实现并行发展；另一方面，边缘-云协同计算架构使复杂的全局规划能够在分布式环境下实时完成，从而显著提升了跨域协作的可行性与规模化应用前景。

跨域异构无人系统的研究兼具战略价值、社会价值与经济价值。在战略层面，它有助于提升国防态势感知与快速反应能力；在社会层面，它可广泛应用于灾害救援与环境监测；在经济层面，它将推动智慧物流与自动化港口等新兴产业的发展。通过不同平台的能力互补，跨域协作能够显著提升任务效率与系统鲁棒性。例如，高速远距侦察平台与近距执行平台的协同可缩短响应时间并降低风险暴露；异构感知融合可提高目标识别与跟踪的可靠性。因此，相关理论与方法的成熟程度将直接决定跨域自主系统在复杂环境下的实用化水平与安全可控性。

当前的主要研究方向可以概括为 3 类：跨域感知与信息融合方法、自主协同与鲁棒控制算法、任务分配与智能决策机制。其中，在跨域感知与信息融合方法方面，强调解决数据异步、带宽受限与语义不一致问题，重点研究时序对齐、信息可信度评估、基于图 / 因果的多模态融合等方法，并结合不确定性量化技术实现鲁棒感知与认知。在自主协同与鲁棒控制算法方面，将强化学习、在线自适应估计与鲁棒控制结合，提出具有安全性和稳定性保障的协同控制算法，以支持无人系统在未知、动态环境中稳健运行。在任务分配与智能决策机制方面，提出“局部低阶控制 + 全局策略规划”的分层架构，局部层侧重保障平台安全与稳定，全局层则面向任务分配与跨平台路径协同，并在此基础上，利用深度强化学习、模仿学习和博弈论等方法，实现策略生成的实时性与全局性能最优。

“跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表 3.7。中国的核心论文数排名第一，占总论文数的 51.37%；美国和意大利紧随其后，分别位列第二、三位。此外，英国核心论文数虽然排名第五，但其篇均被引频次却位居第一，体现了论文的高质量。排名前十的核心论文产出机构中，7 家来自中国，其余 3 家分别来自新加坡、挪威及英国（表 3.8）。主要产出国家间的合作网络如图 3.4 所示，中美之间的合作交流最为频繁。

表 3.7 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	75	51.37	997	13.29	2022.7
2	美国	32	21.92	291	9.09	2021.4
3	意大利	11	7.53	63	5.73	2021.9
4	印度	9	6.16	124	13.78	2021.6
5	英国	7	4.79	212	30.29	2021.4
6	德国	7	4.79	30	4.29	2022.4
7	西班牙	6	4.11	62	10.33	2021.7
8	葡萄牙	6	4.11	40	6.67	2022.3
9	加拿大	5	3.42	30	6.00	2021.4
10	法国	5	3.42	21	4.20	2022.0

表 3.8 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	西安电子科技大学	5	3.42	140	28.00	2023.4
2	北京邮电大学	4	2.74	111	27.75	2021.5
3	电子科技大学	3	2.05	243	81.00	2021.3
4	上海交通大学	3	2.05	31	10.33	2022.3
5	武汉大学	3	2.05	18	6.00	2024.0
6	浙江大学	3	2.05	7	2.33	2023.7
7	同济大学	3	2.05	6	2.00	2022.0
8	南洋理工大学	3	2.05	1	0.33	2024.0
9	奥斯陆大学	2	1.37	205	102.50	2021.0
10	坎皮纳斯州立大学	2	1.37	112	56.00	2020.0

机构合作方面，中国的多家机构之间存在合作关系，中国的西安电子科技大学、浙江大学与新加坡南洋理工大学间交流紧密（图 3.5）。施引核心论文方面，中国遥遥领先，超过总数的一半，第二名是美国，其余国家占比均低于 10%（表 3.9）；排名前十的施引核心论文产出机构如表 3.10 所示，10 家机构全部来自亚洲，且除排名第五的南洋理工大学来自新加坡外，其余 9 家都来自中国，体现了亚洲特别是中国的科研机构对该主题的高度关注。

在过去 5 年中，跨域异构无人系统智能控制理论与方法取得诸多研究成果。然而，从整个领域的发展进程看，其应用与研究仍处于起步阶段，存在众多亟待解决的瓶颈问题。如图 3.6 所示，未来 5~10 年，跨域异构无人系统智能控制将沿以下 3 条主线演进：

第一，可验证的学习控制方法。在保持性能提升的同时，发展面向控制任务的安全强化学习、对抗鲁棒训练与证明性策略合成方法。通过将“学习”与“验证”深度结合，使得控制策略既能具备高性能，又能在实际应用前提供形式化的安全性与稳定性证明，从而显著降低工程应用风险。这一方向将推动“黑箱式学习”逐步走向“可解释、可验证、可部署”的新范式。

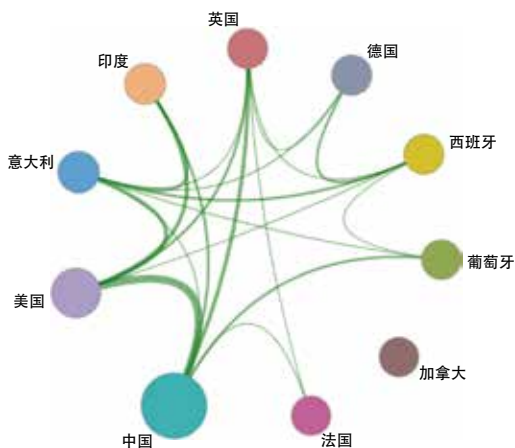


图 3.4 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

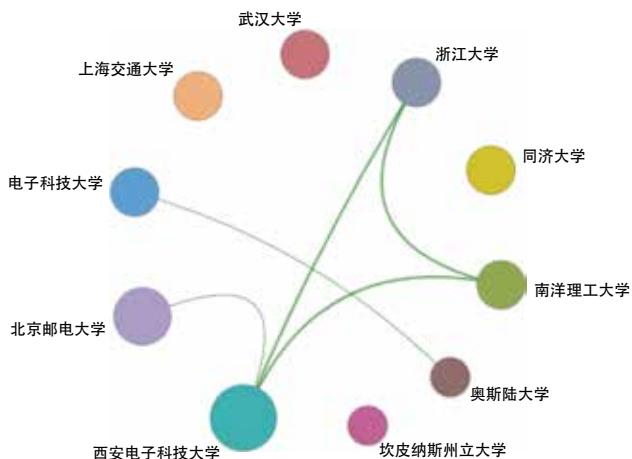


图 3.5 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 3.9 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	895	51.82	2023.3
2	美国	176	10.19	2022.9
3	印度	115	6.66	2023.2
4	英国	109	6.31	2022.9
5	韩国	78	4.52	2022.9
6	沙特阿拉伯	78	4.52	2023.0
7	加拿大	72	4.17	2022.7
8	澳大利亚	59	3.42	2023.2
9	意大利	57	3.30	2023.2
10	新加坡	47	2.72	2023.1

表 3.10 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	西安电子科技大学	39	10.99	2023.0
2	北京邮电大学	38	10.70	2023.0
3	中国科学院	35	9.86	2023.1
4	上海交通大学	34	9.58	2022.9
5	南洋理工大学	32	9.01	2023.6
6	中国石油大学（华东）	31	8.73	2023.2
7	北京航空航天大学	31	8.73	2023.5
8	电子科技大学	30	8.45	2022.4
9	北京理工大学	29	8.17	2023.4
10	南京航空航天大学	28	7.89	2023.6



图 3.6 “跨域异构无人系统智能控制理论与方法”工程研究前沿的发展路线

第二，能力级联与软硬件协同。未来研究将强调软硬件能力的级联与协同，推动形成从仿真验证、半实物测试到实地试验的多层级验证体系与标准化评估指标，加速技术从实验室走向实际应用。同时，平台的感知、算力与通信能力将逐步走向“能力池化、服务化”，即将原本绑定于

平台的能力抽象为可调用的服务模块。任务执行则通过跨域的“能力编排”与调度来完成，实现真正意义上的软件定义跨域系统。

第三，标准化接口与互操作性。为推动跨域无人系统的规模化应用，需要建立统一的国际/行业标准，包括通信协议、能力描述语言与数据交换格式等。这不仅能够显著降低跨平台集成的复杂性与成本，还将促进跨组织、跨领域的系统级互操作。此外，在技术发展的同时，还需要构建配套的政策与法规框架，确保跨域协作合法合规、安全且符合伦理规范。通过技术标准与制度规范的双轮驱动，有望逐步形成一个开放、共享且可持续发展的跨域无人系统生态。

3.1.2.3 通感算智控一体化网络系统理论与技术

通感算智控一体化网络是新一代信息技术融合创新的代表，反映了智能时代对网络能力的更高要求。从 1G、2G 语音服务时代，到 3G、4G 移动互联网时代，再到 5G 服务化架构开启了以行业专网为代表的产业互联网时代，网络一直扮演着“通信管道”的角色，提供基本的数据传输能力。随着 5G-A/6G、低空经济、算力网络、AI 大模型应用的发展，迫切需要网络转变角色，深入信息的采、传、算、控全流程，深度融合多技术要素，拓展全新的能力维度。国际电信联盟无线电通信组标准化组织（ITU-R）明确了“通信-感知-计算-智能-控制”融合目标，该领域不仅涉及通信工程、人工智能、系统工程等多学科交叉，更需突破传统网络架构，用理论创新与技术攻关推动网络从“被动连接”向“主动智能”转型，成为支撑未来数字经济发展的新型基础设施。

该领域的发展可划分为 3 个层面：① 基础层面，各维度持续突破，如通信迈向超高速、确定性传输，感知侧重多频段、高精度、多源数据融合技术；② 融合层面，实现多要素协同，如通感融合尝试利用通信基站附加雷达感知功能，通算融合通过分布式计算、异构算力缓解端侧高算力需求；③ 一体层面，以任务为中心，重点突破通感算智控多能力的系统性整合、内生式部署，通过统一资源编排、联合状态感知、多要素协同调度来保障服务的任务高效执行和用户体验质量（QoE）。

该领域的发展是“数智化”时代的发展要求，是新场景、新需求的触发：通信与感知的互补解决了传统雷达感知依赖专用设备的成本高、覆盖有限等问题，催生 6G 通感一体（ISAC）新业务；通算融合突破端、边、云异构算力的协同，通过计算任务卸载，满足推理、渲染等任务对算力的高需求；通智融合将赋予网络智能分析与决策能力，解析用户意图，实现用户定制化服务、网络的“自动驾驶”；通控融合保障了控制指令的可靠传输与即时执行，其构建的低时延、高可靠通信-控制闭环，支撑工业互联网中设备精准协同、自动安全避险、远程操控等应用。通感算智控一体化网络系统以“通”为基础，通过多要素协同，让网络成为信息服务的平台。

“通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家见表 3.11。中国的核心论文数排名第一，约占总论文数的 69%；其次为美国，占比为 29.65%；英国、澳大利亚和加拿大紧随其后；这几个主要产出国家的论文平均出版年都集中在 2021 年上半年。国家间的交流主要以中国、美国为核心展开，各国合作密切（图 3.7）。排名前十的核心论文主要产出机构如表 3.12 所示，9 家来自中国、1 家来自新加坡。各产出机构间合作频繁，除中国科学院外，都至少与其中 3 家有合作关系，其中澳门大学更是与超过半数的机构进行了合作（图 3.8）。施引核心论文方面，中国排名第一，约占 48%，美国占比为 11.10%，排名第二

（表 3.13）；排名前十的施引核心论文主要产出机构中，除南洋理工大学外，其余 9 家机构都来自中国（表 3.14），体现了中国科研机构对该前沿的高度关注。

表 3.11 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	119	69.19	17 643	148.26	2021.2
2	美国	51	29.65	8 819	172.92	2021.2
3	英国	25	14.53	5 802	232.08	2021.6
4	澳大利亚	22	12.79	4 391	199.59	2021.1
5	加拿大	19	11.05	2 633	138.58	2021.1
6	新加坡	17	9.88	2 844	167.29	2020.8
7	韩国	14	8.14	1 997	142.64	2021.0
8	法国	10	5.81	2 112	211.20	2021.0
9	意大利	9	5.23	3 978	442.00	2020.8
10	德国	9	5.23	1 533	170.33	2021.8

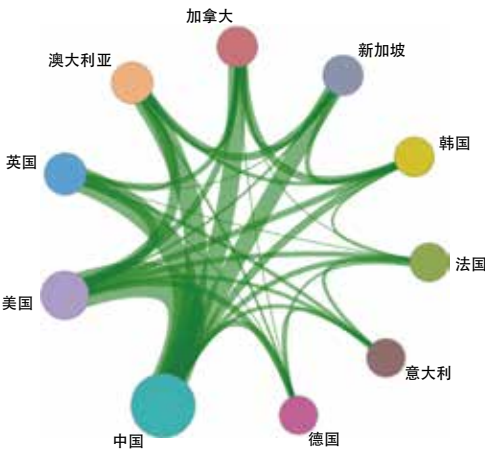


图 3.7 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 3.12 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	北京邮电大学	19	11.05	3 757	197.74	2021.6
2	东南大学	14	8.14	1 617	115.50	2022.3
3	浙江大学	11	6.40	1 854	168.55	2021.1
4	南洋理工大学	9	5.23	1 747	194.11	2020.6
5	电子科技大学	9	5.23	1 604	178.22	2020.8
6	澳门大学	9	5.23	1 070	118.89	2021.8
7	西安电子科技大学	8	4.65	1 051	131.38	2021.4
8	南方科技大学	7	4.07	2 243	320.43	2021.9
9	清华大学	7	4.07	1 180	168.57	2021.7
10	中国科学院	7	4.07	1 057	151.00	2020.0

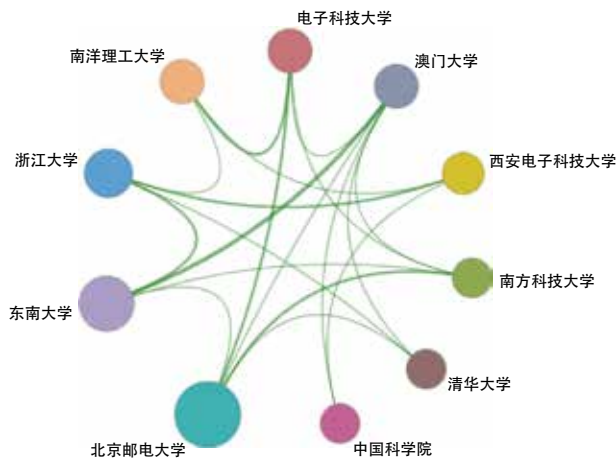


图 3.8 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 3.13 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	10 598	47.93	2023.0
2	美国	2 455	11.10	2022.8
3	英国	1 751	7.92	2023.0
4	加拿大	1 226	5.54	2022.8
5	印度	1 184	5.35	2023.1
6	韩国	1 153	5.21	2023.0
7	澳大利亚	899	4.07	2022.8
8	新加坡	800	3.62	2023.3
9	沙特阿拉伯	773	3.50	2023.0
10	德国	717	3.24	2023.1

表 3.14 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	北京邮电大学	898	16.21	2023.0
2	东南大学	798	14.41	2023.3
3	西安电子科技大学	526	9.50	2023.0
4	电子科技大学	526	9.50	2023.1
5	清华大学	485	8.76	2023.0
6	南洋理工大学	482	8.70	2023.3
7	浙江大学	460	8.30	2023.2
8	中国科学院	403	7.28	2022.9
9	上海交通大学	355	6.41	2023.2
10	北京交通大学	303	5.47	2023.1

当前，通感算智控一体化网络系统理论与技术的应用和研究仍处于起步阶段，存在众多亟待解决的关键性、基础性问题。如图 3.9 所示，该前沿未来 5~10 年重点发展方向包括 5 个方面：

- 1) 通感融合方向：从单站感知向终端感知、多站协作发展，从低频、毫米波向太赫兹演进，以一体化协议与架构、网络化协作、AI 辅助感知等实现高精度感知与通信。
- 2) 通算融合方向：以端边云算力的普惠服务为目标，通过端网协同的操作系统、中间件等深度协同计算环境的突破实现算力的按需调用，通过“在网计算”“算力路由”等技术，突破算网资源的联合感知和调度，并实现国际标准化。
- 3) 通智融合方向：向网络智能自治、“自动驾驶”能力演进，实现网络内生智能、全域智能服务，结合分布化、机会式模型推理等 AI 应用架构，实现网络架构与 AI 应用架构的一体适配，向智能体通信网络方向发展。
- 4) 通控融合方向：从通信与控制协同架构、跨域控制与多系统协同向实时化、精准化、自治化发展，实现通信与控制指令的微秒级同步，支撑无人化产线等新一代工业互联网。
- 5) 通感算智控一体：向多模态协同、多要素融合的平台化服务网络发展，通过全局优化实现关键要素的资源动态调配，形成“通信-感知-计算-智能-控制”无缝衔接的新范式，突破算力、连接、能效的瓶颈。

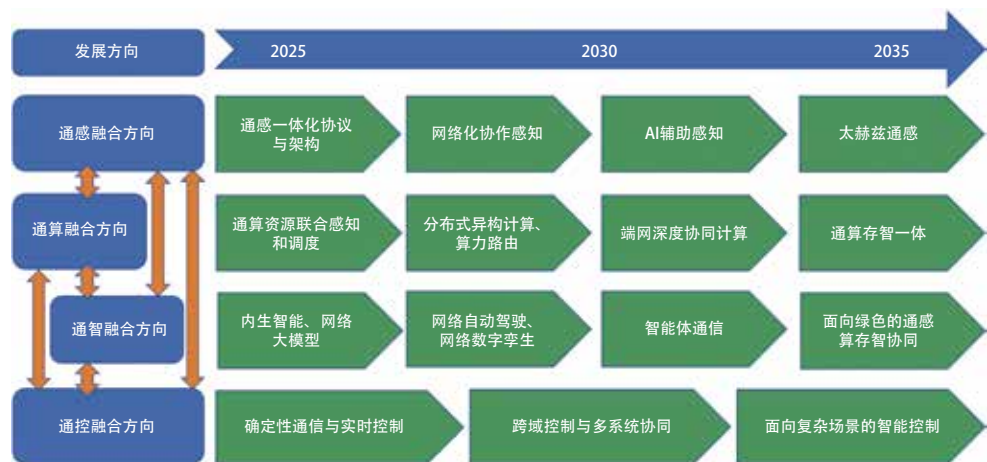


图 3.9 “通感算智控一体化网络系统理论与技术”工程研究前沿的发展路线

3.2 工程开发前沿

3.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿见表 3.15，涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向。其中，“高端装备制造数字孪生与精准调控技术”“大模型推理和优化部署技术开源实现”“大尺寸复杂工业零部件实时检测方法”为数据挖掘与专家提名前沿，其余为专家提名前沿。各开发前沿涉及的核心专利 2019—2024 年公开情况见表 3.16。



表 3.15 信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引数	平均被引数	平均公开年
1	人工智能赋能的科研自动化系统开发	79	138	1.75	2022.9
2	极紫外光刻元件检测技术	270	1 111	4.11	2022.3
3	亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化	451	4 163	9.23	2022.7
4	灵巧手智能感知与控制技术	211	921	4.36	2021.6
5	高端装备制造数字孪生与精准调控技术	348	1 189	3.42	2022.5
6	大模型推理和优化部署技术开源实现	160	239	1.49	2023.4
7	大尺寸复杂工业零部件实时检测方法	368	737	2.00	2022.2
8	智能体驱动的电子设计自动化技术	76	390	5.13	2022.8
9	端到端低时延高吞吐智算网技术	173	1 551	8.97	2022.8
10	水下地形光学测量设备	172	559	3.25	2022.9

表 3.16 信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	人工智能赋能的科研自动化系统开发	2	7	9	3	15	43
2	极紫外光刻元件检测技术	27	29	38	31	45	100
3	亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化	24	29	41	47	120	190
4	灵巧手智能感知与控制技术	29	34	37	38	42	31
5	高端装备制造数字孪生与精准调控技术	20	29	32	64	75	128
6	大模型推理和优化部署技术开源实现	1	7	2	14	30	106
7	大尺寸复杂工业零部件实时检测方法	39	34	38	67	76	114
8	智能体驱动的电子设计自动化技术	2	5	2	17	19	31
9	端到端低时延高吞吐智算网技术	5	6	14	32	50	66
10	水下地形光学测量设备	6	5	14	29	45	73

(1) 人工智能赋能的科研自动化系统开发

人工智能科研自动化 (artificial intelligence research automation, AIRA) 旨在赋予 AI 类似或超越人类科学家的科研能力, 进而实现 AI 辅助或主导下的自动化科学研究, AIRA 的实现将极大地提升科研与科技创新的速度和质量, 从而促进科研范式的颠覆性转变, 即从人类智能主导的科研模式向 AI 主导的科研范式转变。“人工智能赋能的科研自动化系统开发”的内涵就是通过研发先进的 AI 驱动的系统或平台并深度应用于科研全流程, 以赋能 AIRA 的实现。

该前沿的主要研发方向围绕 AI 系统在研究闭环中的赋能范围展开, 最终目的是使 AI 能够更全面地应用于更多科研环节, 以实现部分科研环节或者完整科研闭环的 AIRA。一个真实的科研过程闭环通常包含“研究想法和问题的提出—研究方案和实验的设计—实验的执行和完成—实验结果的收集和分析—研究结论和报告的产生—研究评议”。为此, 根据 AI 系统在研究闭环中

所赋能的自动化范围，可以分为部分式 AIRA 系统的研发和完全式 AIRA 系统的研发：如果一个 AI 系统能够以自动化的方式辅助或完成上述一个或多个环节，则称之为部分式 AIRA 系统；而如果一个 AI 系统能够以独立自主的方式完成或主导上述科研闭环，则称之为完全式 AIRA 系统。

该前沿的研究趋势包括：全学科通用的科学数据电子化方法与标准规范；面向研究闭环的流程自动化与任务编排技术；AI 自动化的创新研究想法与问题的提出；AI 自动化的研究方案与实验设计；AI 或机器人驱动的自动化实验执行与数据采集；AI 自动化的实验结果收集与分析；AI 研究结论、报告与论文的自动化生成；AI 自动化的研究评议，新型学术发表范式的探索；AIRA 系统的安全与合规治理；通用型与领域专用型 AIRA 系统的研发与应用；跨学科与跨机构的开放共享与创新科研合作分工机制。

（2）极紫外光刻元件检测技术

极紫外（EUV）光刻元件检测技术是指针对 EUV 光刻系统中关键光学元件（如掩模、反射镜、多层膜、滤光片、投影光学系统等）的精密检测、缺陷定位与性能评估的技术体系。由于极紫外光刻使用的波长极短且对污染、缺陷极为敏感，任何微小瑕疵都会显著影响成像质量与工艺稳定性，从而直接制约芯片制程的良率与分辨率。因此，相关检测技术与设备仪器必须具备高灵敏度、高分辨率与高精度，以满足形貌、缺陷、光学参数等多维度的综合需求，保障 EUV 光刻系统的高性能制造与长期稳定运行。

极紫外光刻元件检测技术是保障先进制程稳定量产的核心基础能力，其主要研究方向包括：① 自主研发高端检测装备与核心仪器，包括高精度 EUV 计量系统、真空兼容检测平台、超高稳定光源模块以及纳米级运动控制装置，以满足先进节点严格的计量要求；② 在 EUV 波段下开展原位与在线波长检测，实现制程与检测环境的一致性，减少环境差异引起的测量误差；③ 利用干涉测量、散射计、EUV 显微成像等方法对多层膜和反射镜的膜层厚度均匀性、反射率及应力状态进行高精度评估；④ 针对掩模在制造、修复及服役全过程中可能出现的缺陷进行快速检测与修复效果验证，并结合人工智能与大数据分析技术，对缺陷模式和演化趋势进行建模，实现器件寿命预测与预测性维护；⑤ 通过全生命周期质量管理，将检测、分析与工艺调整构建成闭环，持续提升设备利用率和制程良率。

未来，极紫外光刻元件检测技术将朝着更高分辨率、更高速率和非接触化的方向发展，并与光刻机深度融合实现实时在线监测，实现半导体加工全流程的实时在线监测与自适应质量控制。国际上的领先机构和企业正集中资源突破多个维度的技术瓶颈，包括面向 EUV 投影物镜的超稳定干涉测量、多层膜反射率的绝对定标计量、掩模缺陷在纳米至皮米范围内的精准识别与分类，以及在真空超洁净环境下的波前动态测量。同时，人工智能与大数据分析在缺陷机理建模、寿命预测以及预测性维护中的应用也正逐步成熟，实现检测数据与工艺优化的闭环联动。全球各方还在推进覆盖硬件架构、光源稳定性控制、光学传感器灵敏度提升和高速数据处理平台的系统级突破，并着力构建可跨国互认的计量标准体系，以适配 2 nm 及以下节点的大规模量产需求。当下，在该领域内的国际合作不仅集中于标准同步和数据互认，还向核心技术联合研发、关键器件联合验证等方向扩展，为推动 EUV 检测技术的持续创新与产业生态完善奠定基础。

（3）亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化

亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化，是指在芯片设计与制造过程中有意识地将制造约束、工艺可行性与工艺可调节项前置并融入设计决策，通过跨层次的联合建模、联合优化与双向反馈，使设计意图与制造能力形成闭环互驱，从而在功耗、性能、面积与成本（PPAC）等系统级目标上实现全局最优的一整套方法论。其旨在打破传统设计与制造的壁垒，应对原子级物理效应和高昂成本压力，建立一个由 AI 驱动、二者深度融合的闭环生态系统，以驱动芯片研发范式从分阶段线性流程向系统级协同设计过程演进。

当前该前沿的研究主要聚焦于三大核心方向。首先是设计端智能化，在亚 5 nm 节点下，传统设计空间探索已难以应对极端的 PPA 权衡，AI 原生 EDA 工具成为必然选择。例如，利用强化学习与生成模型，不仅可在极大搜索空间内自主发现近似最优解，还能对更小节点的可行设计提前验证和迁移优化。其次是制造端智能化，亚 5 nm 节点工艺极度复杂，工艺误差已接近原子级别，通过在晶圆厂部署 AI 和数字孪生技术，实现对光刻、沉积、蚀刻等关键工艺的超高精度建模、预测与控制，提升良率和效率，同时虚拟工艺线可在设计初期即评估未来更小制程的可行性与风险。最后，也是最关键的，构建连接设计与制造的桥梁，通过设计-工艺协同优化（DTCO）、系统-工艺协同优化（STCO）等方法论，将制造端的约束和可能性实时反馈并融入设计决策中。这一机制确保设计制造协同优化不仅能适应现有工艺，还能进一步随节点尺度减小而持续进化。这些研究方向的融合是推动亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化从理念走向现实的基石。

为应对亚 5 nm 及未来节点挑战，芯片系统设计与制造工艺协同优化将从当前分散的方法论演进为一个全栈式、自学习的智能平台，并形成自我演进的新生态：物理制造数据持续优化设计 AI，而更智能的设计则指导产生更优的制造结果，实现生态的自我进化。其最终形态将是一个能让设计工具实时查询虚拟工厂状态、实现从材料到系统全栈协同优化的智能系统，为后摩尔时代的计算创新提供源源不断的动力。

（4）灵巧手智能感知与控制技术

灵巧手智能感知与控制技术主要指灵巧手融合视觉、触觉、力觉等多模态物理信息，实现作业环境与对象的智能感知，并且模仿人手的控制策略，实现灵巧手精准抓取操作的技术。

灵巧手智能感知与控制技术主要依托视触力觉集成感知、高功率密度驱控一体化和高维自由度仿人手操作技能学习技术，开发高密度集成感知的灵巧手触觉传感器，结合深度学习、强化学习、扩散模型等方法，研究多区域通道的接触感知、多模态感知与高维自由控制的紧耦合集成以及通用操作技能迁移学习等问题。例如，人形机器人结合灵巧手感知与控制技术，可以更广泛应用于多种场景的多个任务。

灵巧手智能感知与控制的发展趋势包括：① 研发更通用、可快速迁移新任务的视触力觉感知集成“灵巧操作技能基础模型”；② 提升灵巧手的小型化、轻量化、智能化，满足通用人形机器人的操作需求；③ 探索人机协作中的自然语言交互控制，提升操作技能学习效率。灵巧手智能感知与控制发展的最终目标是在动态真实世界中实现接近甚至超越人类水平的通用、鲁棒操作能力，服务于医疗康复、先进制造、家庭服务、太空作业等广泛场景，进一步解放人类的双

手,推动社会的进步与发展。

(5) 高端装备制造数字孪生与精准调控技术

高端装备制造数字孪生与精准调控技术主要指通过物理机理、数据驱动或数物融合等建模方式,构建与实际制造工艺过程一致并随之动态演变的高保真孪生模型,基于孪生模型的虚拟感知与预测能力,实现对工艺参数的在线调控,以保证高端装备的制造精度。

该领域目前主要研究方向包括:①多物理场耦合的工艺孪生建模,构建高精度代理模型,表征复杂工艺过程涉及的力、热、流体等多物理场耦合作用;②数字孪生模型的动态更新,基于多模态传感器数据融合,利用数据同化、参数估计等技术实现孪生模型随物理空间的同步演化;③孪生模型验证与不确定性量化,基于概率表征与不确定性传播理论,量化数据感知、数据同化、孪生建模、物理执行等多源不确定性及其对模型预测的综合影响;④孪生模型驱动的制造工艺在线决策,基于孪生模型对制造精度的预测能力,采用预测控制、强化学习等方法实现在线的工艺滚动优化。

该领域未来发展方向包括:①全制造周期集成,从加工、装配等单一工艺环节的数字孪生,向跨工艺、全制造周期的系统化集成发展;②服役性能数字孪生,制造精度直接影响装备的服役性能,可以在制造过程中进一步预测服役性能,并实现面向服役性能的制造工艺调控;③实时性与边缘孪生,借助边缘计算、GPU加速等技术,支持高实时的工艺孪生与决策。

(6) 大模型推理和优化部署技术开源实现

随着大语言模型(large language model, LLM)和多模态基础模型在自然语言处理、计算机视觉、代码生成等领域的广泛应用,其推理效率与部署可扩展性正成为制约产业化落地的关键瓶颈。为应对这一挑战,开源社区与产业界正加速推进大模型在推理加速、内存压缩、异构硬件适配、分布式部署等方面的优化技术研究,并致力于提供可复用、可扩展的开源实现。

该工程前沿聚焦于以下几个核心方向:①以张量并行与流水线并行为代表的并行策略实现,用于支持百亿级至万亿级模型的分布式部署;②模型量化、剪枝与蒸馏等轻量化技术,以减少推理时的计算与存储开销;③适配多样化硬件架构(如GPU、TPU、ASIC、FPGA等)的推理编译优化;④低延迟推理与弹性服务调度机制,以支撑在线服务与边缘计算场景;⑤标准化的开源工具链构建,如vLLM、SGLang、llama.cpp、TensorRT-LLM、LMDeploy、KTransformers等,推动行业生态协同发展。

未来趋势将进一步体现为“异构融合、高效弹性、自治部署、全链条开源”的综合能力建设,推动大模型由“能用”向“高效可用”演进,从而支持智能化应用在千行百业的规模化部署。

(7) 大尺寸复杂工业零部件实时检测方法

大尺寸复杂工业零部件通常是指物理尺寸超出标准加工或检测设备包络范围的复杂结构部件,如飞机蒙皮、高铁车身、风电叶片等高端装备大型零部件。大尺寸复杂工业零部件实时检测技术涵盖对检测对象几何尺寸测量数据的快速获取、处理和即时反馈,同时强调对零部件外观缺陷、内部结构异常、装配偏差等各类质量问题的自动化识别与判断。

目前,大尺寸复杂工业零部件实时检测方法主要研究方向包括:①多源感知与数据融合——

整合激光跟踪仪、室内 GPS、高速摄影测量系统、无损检测以及机器视觉等多种先进传感器，实现对大型零部件几何信息、表面形貌、缺陷特征等多维度数据的实时、高频采集；② 人工智能与深度学习辅助——利用深度学习强大的特征提取和模式识别能力，实现对微小、低对比度、不规则缺陷的精准识别与分类，包括点云配准、去噪、分割算法优化，以及基于神经网络的几何特征与缺陷识别；③ 实时数据处理与闭环反馈——开发高效的数据处理算法和自适应控制系统，确保检测结果能够即时反馈至生产线，指导加工、装配或进行缺陷修复，从而实现生产过程的实时监控与闭环质量控制；④ 专用自动化检测系统构建——发展固定式和柔性化的专用检测系统，通过集成关节臂机器人、直线运动单元、载运平台等自动化执行机构，实现对不同尺寸、批量零部件的高效自动化检测。

未来，大尺寸复杂工业零部件实时检测方法将朝着全面智能化和自动化方向深度发展：

- ① 自主分析与智能决策——系统将能够基于三维模型、标注和知识库，自动提取检测要素、规划检测路径，并进行检测流程与精度的仿真，最终实现对产品质量状态的自主判断；
- ② 自主学习与自适应优化——系统将具备从海量检测数据中学习缺陷模式、优化检测流程、提升评价方法的自适应能力，从而持续降低人工干预成本，显著提升检测效率与质量；
- ③ 检测数据与产品全生命周期质量管理——将检测数据融入数字孪生体系，贯穿产品设计、制造、使用、维护的全生命周期，提供全面的质量追溯与风险预判。

（8）智能体驱动的电子设计自动化技术

智能体驱动的电子设计自动化（EDA）技术是指以智能体系统为核心，面向电子系统设计，智能化地实现集成电路设计数据生成，并利用 EDA 工具进行设计优化，以满足电子系统需求的 EDA 与 AI 相结合的系列技术。该智能体系统可由多个具备不同集成电路设计领域知识的智能体组合而成，通过任务分配与协助，为设计者提供从需求定义到设计实现的端到端解决方案。

主要技术包括：① 集成电路设计领域大模型技术——具备集成电路设计知识、EDA 工具使用方法；② 设计需求分解技术——将电子系统设计需求分解为 EDA 工具所需的输入及约束，并生成测试方案及测试用例；③ 设计数据生成技术——能够生成数字电路的硬件代码、模拟类电路的拓扑结构及参数、三维集成芯片的架构及子芯粒功能定义；④ 设计优化技术——智能体系统基于强化学习或传统优化算法调用 EDA 工具完成芯片的功能及物理设计优化。

智能体驱动的 EDA 技术需在以下方面重点布局：① 数字逻辑芯片功能设计智能化技术——基于生成式 AI 技术生成 RTL 代码、测试方案及测试向量，并结合代码分析 / 仿真等验证技术完成芯片的功能验证；② 数字逻辑芯片物理设计智能化技术——通过智能体系统和 EDA 工具的联动，完成数字芯片版图设计并确保其满足时序及物理签核要求；③ 模拟芯片设计智能化技术——通过智能体系统和 EDA 工具的联动，完成模拟芯片电路拓扑选择与参数优化、版图设计及后仿验证，并确保其满足物理验证及可靠性需求；④ 三维集成芯片系统设计智能化——通过智能体系统完成三维集成芯片架构设计、功能划分，以及物理设计环节的芯粒布局规划与 TSV/BUMP 分布设计。

（9）端到端低时延高吞吐智算网技术

端到端低时延高吞吐智算网技术是智能计算与通信网络传输深度融合的新型基础设施技术，

具体是在智能计算与大规模分布式系统环境下，构建能够提供极低时延和高吞吐率的多模态信息传输与处理网络，以满足人工智能训练、推理以及科学计算等对算力和通信提出的低时延、高吞吐等极致性能要求。该前沿的核心在于突破传统网络在带宽利用、时延控制和智能调度上的瓶颈，深度融合计算架构、理论与方法，实现计算与通信资源的深度协同与高效调度。

其主要研究方向包括：① 新型通算一体化网络架构设计，探索软件定义网络（SDN）、网络功能虚拟化（NFV）和可编程交换机技术，支持大规模算力互联和动态资源编排；② 高性能通算一体化传输协议与调度机制，研究基于远程直接存储器访问（RDMA）、智能网卡和拥塞控制的新型协议，以降低传输开销并提升并行计算效率，实现低时延传输；③ 智能算网融合，利用 AI 驱动的网络优化方法，实现自适应流量调度、拥塞预测和资源按需分配；④ 异构资源协同，打通中央处理器（CPU）、GPU、张量处理器（TPU）和专用加速器之间的高速互联通道，形成多层次低时延通信能力。

发展趋势上，该技术将朝着智算网一体化和算力即服务的方向演进。一方面，未来智算网将与云、边、端紧密结合，构建跨地域、跨架构的统一算力调度平台，满足多样化 AI 应用场景；另一方面，将更加注重确定性低时延与弹性高带宽的并存，借助光互联、量子通信等新兴技术提升算网基础能力。同时，绿色节能和安全可信也是未来的重要趋势，力求在提升性能的同时兼顾可持续发展和隐私保护。端到端低时延高吞吐智算网技术正驱动网络从“信息传输通道”向“智能算力中枢”演进，成为 AI 时代的关键基础设施。通过系统级创新与垂直整合，该技术将助力实现“算力无处不在、网络智能高效”的愿景，赋能数字经济高质量发展。

（10）水下地形光学测量设备

水下地形光学测量设备通过主动发射光信号，接收并分析回波信号特性来反演海底三维地形信息。设备主要分为两类：一类搭载于水下移动平台，对深海海底进行精细测量；另一类搭载于空中平台，对浅水区域海底地形进行精细测量。

其主要研究方向包括：① 复杂介质光传输优化——研究抑制水体吸收、散射及大气-水界面动态效应的光学技术与精确校正模型，提升信号光传输距离；② 微弱信号探测与识别——研究高灵敏度探测技术和识别算法，增强对水下远距离极弱回波的捕获与辨别能力；③ 动态环境适应性提升——研究平台运动、水流扰动及波浪影响的方法，保障复杂作业环境下的测量稳定性与精度；④ 智能信息反演与处理——研究基于深度学习的数据处理技术，实现地形特征自动提取、三维地形重建、底质分类等功能。

该前沿的发展趋势表现为：① 发展单光子探测、多波段融合等新型水下激光雷达技术，实现更低功耗、更远探测距离、更高测深精度；② 发展深度集成的人工智能算法，实现海量激光雷达数据的实时噪声智能过滤、地形特征自动识别和在线三维重构。

3.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

3.2.2.1 人工智能赋能的科研自动化系统开发

人工智能科研自动化（AIRA）是一个新兴方向，旨在让 AI 自动化完成从立题、文献调研与

评审、假说与实验设计、实验实施到论文生成的全流程科研闭环。其兴起建立在近年大模型能力的跃升之上（以 2023 年发布的 GPT-4 为代表，而 2025 年最新发布的 GPT-5 已在所有领域具备博士级知识问答能力）。

当前研究以面向特定科研环节的部分式 AIRA 为主，如文献调研与评审环节已有 AutoSurvey 与 DeepReview 等系统；也出现了面向计算机领域的完全式 AIRA 探索，如 Sakana AI 在 2025 年发布的“AI Scientist-v2”可自动完成从提出研究思路、设计实验，到编写代码、进行实验乃至撰写论文的全过程，其自动生成的论文已被计算机顶级会议 ICLR 2025 接收。在需要真实物理实验的学科，探索主要体现在三个方向：面向特定实验的自动化实验室（如加州大学伯克利分校 A-Lab 连续自主运行 17 天，发现 41 种新材料）、人形或类人机器人进行实验，以及“AI 主脑+人类代理”的人机协作范式（2023 年，西湖大学进行了“AI 主脑科学家”研究的首次探索；2025 年，斯坦福大学在 *Nature* 发表的研究展示了由 AI 担任首席科学家设计纳米抗体、人类完成合成与验证）。

AIRA 的重要性在于 AI 能够进行大规模、不间断的研究，有望显著提升创新速度并带来成果爆发式增长，有效提高国家科技竞争力。其主要研究方向包括：① 建立全学科通用的科研数据电子化方法与平台，制定统一数据标准与规范；② 面向各科研环节开发对应的 AIRA 系统；③ 推动分立的部分式系统协同整合与自动化流程编排，迈向覆盖科研闭环的完全式 AIRA；④ 突破以统计拟合为主的训练范式，引入因果推理与新型模型架构以增强创新能力；⑤ 在自然科学等需真实实验的领域实现完全式 AIRA。

“人工智能赋能的科研自动化系统开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家见表 3.17。结果显示，作为一个新兴方向，目前该前沿的核心专利总量偏少，主要集中在中国、印度、美国等国家。其中，中国公开的核心专利占全球总公开量的约 75%，展现了中国对这个领域浓厚的研究兴趣；美国虽然专利公开量仅占 1.75%，但在平均被引数上表现出色，位居第一。该前沿核心专利的主要产出机构见表 3.18，排名前十的主要产出机构的专利公开量差距不大；但在平均被引数上，武汉大学、中国石油天然气股份有限公司位居前列，体现了其较高的专利质量。

表 3.17 “人工智能赋能的科研自动化系统开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	43	75.44	48	92.31	1.12
2	印度	10	17.54	0	0.00	0.00
3	美国	1	1.75	4	7.69	4.00
4	瑞士	1	1.75	0	0.00	0.00
5	以色列	1	1.75	0	0.00	0.00
6	越南	1	1.75	0	0.00	0.00

表 3.18 “人工智能赋能的科研自动化系统开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	北京大学	2	3.51	2	3.85	1.00
2	中南大学	2	3.51	1	1.92	0.50
3	浙江大学	2	3.51	1	1.92	0.50
4	中国电子科技集团	2	3.51	0	0.00	0.00
5	上海大学	2	3.51	0	0.00	0.00
6	苏雷什·吉扬·维哈尔大学	2	3.51	0	0.00	0.00
7	武汉大学	1	1.75	12	23.08	12.00
8	中国石油天然气股份有限公司	1	1.75	9	17.31	9.00
9	武汉朗立创科技有限公司	1	1.75	6	11.54	6.00
10	天津职业技术师范大学	1	1.75	5	9.62	5.00

“人工智能赋能的科研自动化系统开发”工程开发前沿的发展路线如图 3.10 所示。当前，AIRA 研发仍处于起步阶段，面临诸多亟待突破的挑战。未来 5~10 年的重点将聚焦于以下 4 个方向：

第一，部分式 AIRA 系统。开发针对特定科研环节的部分式 AIRA 系统（如针对研究想法提出、研究方案和实验设计、任务编排、实验执行、论文撰写、同行评议等环节），在关键节点实现可落地的环节级自动化能力，为后续的端到端整合奠定基础。

第二，AI 驱动的自动化创新想法提出系统。AIRA 的根本目标不是自动复现已知发现，而是自动化产生并推动突破现有科技边界的新发现。为此：① 突破支撑创新的因果推理技术，使设想生成超越统计拟合，兼顾因果一致性与可证伪性；② 构建面向创新的新型模型与系统架构，建立持续学习与自主创新机制，在反馈中不断提升假说质量与新颖性；③ 迈向能够自动提出重大（或突破性）创新科研想法的 AIRA 系统，即在重大科学问题上具备提出突破性设想的能力，并形成从设想到验证的可执行路径。

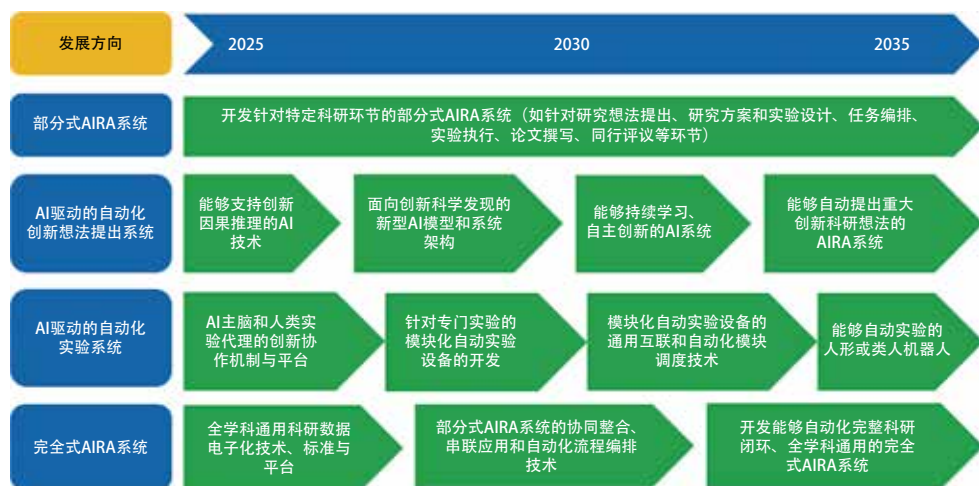


图 3.10 “人工智能赋能的科研自动化系统开发”工程开发前沿的发展路线

第三, AI 驱动的自动化实验系统。尽管 AI 已具备较强的语言智能, 但仍缺乏感知真实世界的有效途径与“躯体”, 因此“实验设计—执行—验证”是迈向完全式 AIRA 的核心与最大挑战。即便 AI 能够提出创新设想, 但若不能转化为可行的实验方案并在真实物理环境中完成验证, 则缺乏科学实证性。为此: ① 建立“AI 主脑+人类实验代理”的协作机制与平台, 由 AI 主脑统筹设计与决策、人类完成操作与验证, 打通“虚拟—现实”闭环; ② 面向专门实验开发模块化自动化设备, 并攻关设备的通用互联与自动化模块调度, 提升复用与编排效率; ③ 在上述路径成熟基础上, 探索可执行实验的人形或类人机器人, 进一步扩展实验自动化的通用性与覆盖面。

第四, 完全式 AIRA 系统。当前完全式 AIRA 主要见于计算机科学领域; 该领域可在虚拟空间以代码完成实验、无须与真实物理世界交互, 因而实现门槛相对较低。但 AIRA 的终极目标是面向全学科的科研自动化。为此: ① 数据是科学与 AI 的共同基石, 需搭建全学科通用的科研数据电子化技术、标准与平台, 统一数据结构与规范, 支撑跨学科共享与流程追溯, 为完全式 AIRA 提供坚实数据基础; ② 推进部分式 AIRA 的协同整合、串联应用与自动化流程编排, 将分散的环节级能力连成可复用、可追踪的端到端流程; ③ 开发面向全学科、可自动化完整科研闭环的 AIRA 系统, 形成从想法生成、实验实施到论文撰写与评审的自主闭环, 并在多学科场景稳定运行。

3.2.2.2 极紫外光刻元件检测技术

极紫外光刻元件检测技术是支撑 EUV 光刻系统高精度制造、保障系统稳定高效运行的关键技术, 主要涉及在真空短波长条件下对掩模版、投影物镜等核心光学元件的形貌精度、表面粗糙度、膜层厚度、缺陷分布以及波前特性等进行精密测量。由于 EUV 光刻使用的波长仅为 13.5 nm, 其光学元件的反射率、缺陷尺寸和波前误差要求达到纳米甚至皮米量级, 因此, 检测技术必须具备超高分辨率、超高精确度以及快速反馈能力, 该技术贯穿于 EUV 光刻机的研发、生产、调试与运行的全生命周期, 是实现整机集成不可或缺的核心技术之一。

自 20 世纪末以来, 随着 EUV 光刻技术的推进以及光学计量与真空超精密检测技术的快速进步, 极紫外光刻元件检测技术得到快速发展。早期工作主要集中在干涉波前检测和反射率测量, 比如在 2003 年德国物理技术联邦研究院 (PTB) 建成首套 EUV 反射率绝对测量装置, 2010 年起, 随着荷兰阿斯麦 (ASML) 等公司在商业化 EUV 光刻机上的布局, 国际上陆续出现面向高数值孔径 (High-NA) 投影物镜的相位干涉检测系统, 并被用于多层膜反射镜的量化评估。针对 EUV 掩模 <10 nm 缺陷检测难题, 2016 年美国科磊 (KLA) 公司推出基于散射计量与离轴照明的掩模检测平台, 实现了缺陷的自动识别与分类, 有效提升掩模良率与生产效率。同一时期, 日本尼康公司与东京大学合作开发全场真空波前检测系统, 用于极紫外反射镜像差参数的高精度标定。近年来, 中国在高端检测装备国产化方面开始布局, 一些高校与科研院所完成了原理验证和样机研制, 但整体仍处于实验室阶段, 距离大规模工业化应用尚有差距。这些成果为未来 EUV 光刻机核心元件的检测自主化奠定了技术基础, 同时推动了部分核心元件检测标准和溯源体系的初步建设。

当前在极紫外光学元件检测方面，全球已经形成以 ASML、蔡司（Zeiss）、KLA 为主导的技术格局，美国、荷兰、日本等国已在多层膜计量、掩模缺陷检测、真空波前测量等关键环节建立成熟的工业体系，在国际竞争中保持技术领先。相比之下，中国虽然在清华大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所等单位的带动下，在多层膜反射镜表面形貌检测、掩模缺陷检测等方向取得阶段性成果，但整体仍处于技术积累和系统验证阶段，与国际先进水平存在明显差距，亟须在核心检测装备、关键传感器与高精度算法等领域加大研发投入，加快突破瓶颈，健全检测标准体系与产业化链条，实现国产化与自主可控，保障先进半导体制造的战略安全。

“极紫外光刻元件检测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家见表 3.19。从国家层面看，核心专利主要来自 7 个国家，其中中国、德国、日本在专利公开量上位居前列，合计约占全球总公开量的 68%。美国虽然在公开量上位居第六，但平均被引数高居第一，在高价值专利数量上保持领先地位。日本专利公开量和平均被引数排名分别为第三和第二，凸显其技术质量与影响力优势。新加坡虽然专利公开量排名第七，但平均被引数排名第三，也展现了较高的专利质量与技术价值。表 3.20 列出了该前沿核心专利的主要产出机构。从机构层面看，卡尔蔡司半导体制造技术有限公司、台湾积体电路制造股份有限公司（简称台积电）、ASML 公司等国际龙头企

表 3.19 “极紫外光刻元件检测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	74	27.41	178	16.02	2.41
2	德国	67	24.81	236	21.24	3.52
3	日本	44	16.30	341	30.69	7.75
4	韩国	36	13.33	57	5.13	1.58
5	荷兰	25	9.26	80	7.20	3.20
6	美国	23	8.52	216	19.44	9.39
7	新加坡	1	0.37	4	0.36	4.00

表 3.20 “极紫外光刻元件检测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	卡尔蔡司半导体制造技术有限公司	61	22.59	226	20.34	3.70
2	台湾积体电路制造股份有限公司	34	12.59	140	12.60	4.12
3	ASML 公司	27	10.00	80	7.20	2.96
4	吉光株式会社	17	6.30	129	11.61	7.59
5	三星电子有限公司	16	5.93	35	3.15	2.19
6	雷徠光电科技株式会社	13	4.81	30	2.70	2.31
7	KLA 公司	12	4.44	182	16.38	15.17
8	ESOL 有限公司	9	3.33	15	1.35	1.67
9	韩国汉阳大学产业合作基金会	8	2.96	6	0.54	0.75
10	纽富来科技株式会社	6	2.22	13	1.17	2.17

业在公开量上处于第一梯队，但在平均被引数上，KLA 公司显著高于全球平均水平，表明其成果在业内具有重要影响力。在国家合作方面，全球范围内专利合作较为有限，主要集中在日本与德国之间（图 3.11），这可能是受该领域技术保护的影响。

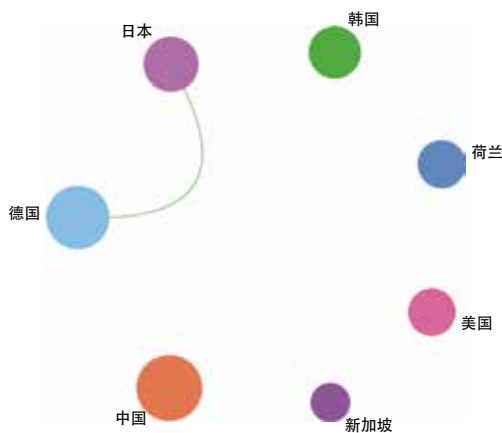


图 3.11 “极紫外光刻元件检测技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

在过去 5 年中，极紫外光刻元件检测技术在反射镜多层膜计量、EUV 掩模缺陷检测、真空波前测量等方向取得显著进展。在全球范围内，行业正朝着更高精度、更高稳定性和智能化检测方向演进。然而，从整体产业化与规模化应用程度看，仍存在技术与工程瓶颈，包括：原位检测系统在长周期稳定性与环境适应性方面不足、多模态计量数据融合算法不够成熟、缺陷智能识别与分类精度有待进一步提升、跨国检测标准体系尚未完全统一。在 EUV 投影物镜干涉检测、X 射线反射率计量与真空波前干涉等领域，高端检测装备的核心系统目前仍主要由荷兰、德国、日本、美国等国的领先企业掌控。未来 5~10 年，全球发展的重点将围绕“高精度、高稳定性、可持续与可控的供应生态”三大目标推进，如图 3.12 所示，重点方向包括以下 5 个方面：

1) 高端检测装备的研发与性能突破。面向 EUV 投影物镜、掩模、反射镜等核心部件，研发新一代干涉检测仪、X 射线反射率计量系统、真空波前干涉仪等高精度设备，实现光学系统、光源、传感器、控制单元与计量软件的高水平集成与长周期稳定运行，并与高数值孔径（High-NA）工艺深度适配。在系统层面强调模块化与可互操作接口设计、热-力-真空稳定性、污染抑制与超净装配、在役校准与可维护性，并通过联合研发与多元化供应链增强生态韧性。

2) 原位实时检测技术。将波前传感器、缺陷检测模组直接集成至 EUV 光刻机曝光系统，实现生产全流程的在线监控、误差补偿与动态调节。突破真空环境下的高速干涉计量、环境扰动主动抑制、低延迟数据链路与毫秒级处理架构，使检测系统在亚纳米级精度、毫秒级响应下长期稳定运行，支撑量产线良率与稳定性的持续提升。

3) 多模态高精度计量融合技术。融合相移干涉、剪切干涉、Shack-Hartmann 波前传感、散射成像等多种方法，对 EUV 元件的形貌、反射率、相位与缺陷进行协同测量，实现多源数据的精确对齐与误差分离。建立统一的计量建模与融合算法框架，达到亚纳米级综合测量精度；同时推动开放数据格式与跨设备互操作，降低跨平台比对与溯源成本。

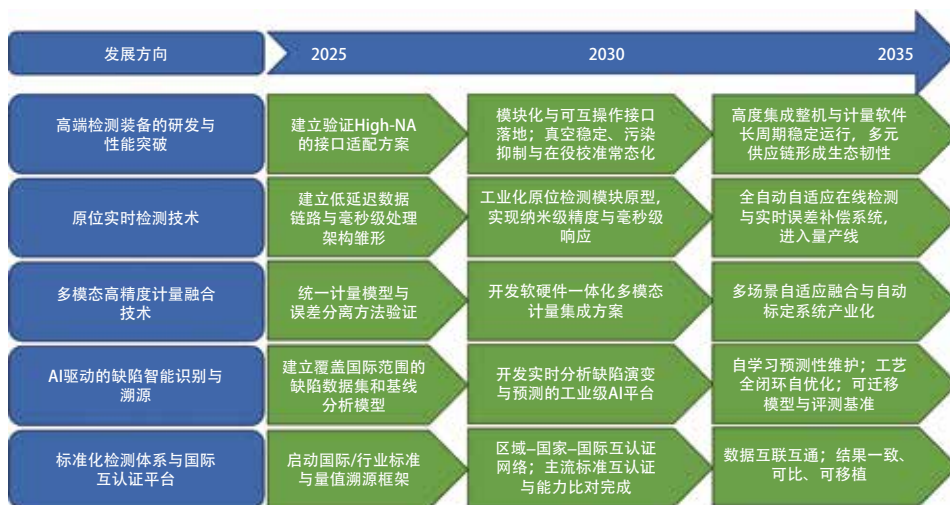


图 3.12 “极紫外光刻元件检测技术”工程开发前沿的发展路线

4) AI 驱动的缺陷智能识别与溯源。基于深度学习与模式识别技术，对大规模图像与波前数据进行实时特征提取、缺陷定位、成因分析与趋势预测。构建涵盖多类 EUV 缺陷的高质量训练数据集，在部署侧发展轻量化推理与边缘算力方案，打通设计—制造—检测—运维的工艺闭环，实现预测性维护与自适应工艺优化，同时兼顾数据安全与跨区域合规。

5) 标准化检测体系与国际互认证平台。推进面向 EUV 反射镜、投影物镜、掩模等对象的检测标准在全球范围内的协调与统一，建设国际互认证的计量与检测平台，支持跨国产线与跨机构应用。各主要技术体在推进本国标准的同时，加强与国际标准体系的兼容性，确保检测数据的全球通用性与可信性；同步完善量值溯源与不确定度评估体系，构建由区域 / 国家级计量机构与同步辐射装置组成的互认证网络，配套参考样品与标准工件，开展方法学比对与能力验证，确保检测结果一致、可比、可移植，从而提升全球产业链协同效率与行业话语权。

3.2.2.3 亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化

在亚 5 nm 时代，芯片系统设计制造协同的内涵和实践都发生了质的飞跃。其发展历程大致经历了 3 个阶段：① 可制造性设计，主要是在设计后端考虑制造规则，进行被动规避。② 设计—工艺协同优化（DTCO），开始在晶体管和标准单元层面进行主动的联合优化。三星在其 3 nm GAA 工艺中，利用 DTCO 充分发挥了纳米片宽度可连续调节的优势，为设计者提供了比 FinFET 更精细的 PPA 权衡空间。③ 如今，这一理念已演进至系统—工艺协同优化（STCO），并与人工智能深度融合。目前，行业正从系统、架构、封装到器件的全栈层面进行协同考量。一个典型的例子是超威半导体公司（AMD）的 Instinct MI300 系列加速器，它通过 STCO 理念，将 5 nm 的 GPU 芯粒、6 nm 的 I/O 芯粒以及 HBM3 高带宽内存，利用台积电的 CoWoS-S 先进封装技术整合为一体，实现了 CPU 与 GPU 的紧密协同。

设计制造协同的重要性体现在 3 个层面：技术上，它是突破后摩尔时代性能瓶颈、延续摩尔定律精神的核心技术路径；经济上，面对呈指数级增长的开发成本，它是控制成本、缩短研发周

期、提升投资回报率的关键；产业与战略上，它正在重塑全球半导体产业的竞争格局，掌握高效协同优化方法的企业和国家，将在未来的高科技竞争中占据战略制高点。

设计制造协同的理念为后摩尔时代提供了突破性能瓶颈、控制开发成本的核心路径，是确保半导体产业可持续发展的关键。面对 2 nm 节点超过 7 亿美元的设计成本和极高的制造不确定性，其主要研究方向均围绕着提升效率、降低风险和最大化系统性能展开。在 AI 原生 EDA 方向，新思科技（Synopsys）的 DSO.ai 平台利用强化学习，为瑞萨电子的汽车微控制单元（MCU）设计流程实现了超过 10% 的 PPA 改进，并显著缩短了开发周期，这就是通过智能化手段应对复杂性的直接体现。在虚拟制造方向，IMEC 等机构正大力投入于高保真工艺建模，旨在设计早期就能通过仿真精确预测晶体管性能和可变性，避免昂贵的设计周期。而在先进封装协同设计方向，业界正聚焦于解决 3D 堆叠带来的热密度挑战，研究微流控散热等颠覆性技术，以确保像英特尔 Foveros Direct 这类直接混合键合技术能够发挥其最大的系统性能优势。

如表 3.21 所示，“亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家高度集中于北美、东亚和西欧。受益于巨大的研发投入，中国在 AI 辅助 EDA 等方向进步迅速，专利公开量位居第一，但平均被引数排名第七，说明高影响力研究与产业化结合方面仍需进一步加强。美国凭借其顶尖大学、EDA 公司和半导体巨头的创新铁三角，在专利公开量上位居第二。而比利时、荷兰、日本、法国则在平均被引数上稳居前四席，显现出其在该前沿上的高度影响力。表 3.22 展示了该领域在机构层面的主要格局：台积电、IBM、Intel 等制造巨头是将理论转化为生产力的核心，其专利公开量占据前三；格芯、东京电子、Intel、三星电子等公司的高平均被引数体现了它们在这个领域强大的技术影响力；中国的中芯国际集成电路制造（上海）有限公司、中国科学院微电子研究所也在前十榜单上占有一席之地，说明其在该领域也具有一定影响力。

如图 3.13 所示，国际合作网络以美国为核心，链接德国、英国、中国和法国等国。其中美国与德国、英国之间的合作尤为密切，而其他各国相互间的合作还较为有限。由此可见，全球范围内各个国家之间的交流合作仍需进一步开展，以便更好地推动该技术的发展和应用。

表 3.21 “亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	238	52.77	1 435	34.47	6.03
2	美国	135	29.93	937	22.51	6.94
3	韩国	46	10.20	617	14.82	13.41
4	日本	19	4.21	803	19.29	42.26
5	印度	5	1.11	0	0.00	0.00
6	法国	4	0.89	130	3.12	32.50
7	德国	3	0.67	2	0.05	0.67
8	比利时	2	0.44	188	4.52	94.00
9	英国	2	0.44	2	0.05	1.00
10	荷兰	1	0.22	74	1.78	74.00

表 3.22 “亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	台湾积体电路制造股份有限公司	173	38.36	1 318	31.66	7.62
2	IBM 公司	62	13.75	580	13.93	9.35
3	Intel 公司	31	6.87	679	16.31	21.90
4	三星电子有限公司	31	6.87	617	14.82	19.90
5	应用材料公司	20	4.43	84	2.02	4.20
6	中芯国际集成电路制造（上海）有限公司	18	3.99	33	0.79	1.83
7	中国科学院微电子研究所	13	2.88	6	0.14	0.46
8	高通公司	11	2.44	26	0.62	2.36
9	东京电子有限公司	10	2.22	203	4.88	20.30
10	格芯公司	6	1.33	134	3.22	22.33

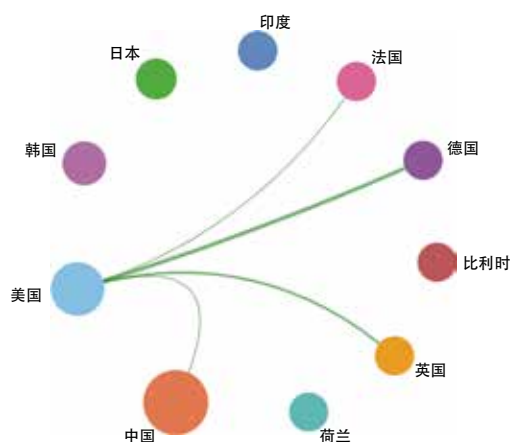


图 3.13 “亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化”工程开发前沿主要国家间的合作网络

亚 5 nm 时代，芯片系统设计与制造工艺的协同优化将不再是零散工具的集合，而是演进为一个全栈式、闭环化、自学习的智能平台。未来 5~10 年，这一演进将深刻重塑芯片的创造方式，主要有以下 4 个发展方向（图 3.14）：

1) 工艺节点的持续推进：继续探索更小制程节点的可行路径。通过发展如纳米线、二维材料等新型晶体管结构以及更先进的光刻技术，克服物理极限和成本压力。设计制造协同优化在这一过程中发挥关键作用，通过联合仿真与反馈机制降低风险、加速技术迭代。

2) AI 原生电子设计自动化：面向亚 5 nm 高复杂度芯片设计需求，构建以 AI 为核心驱动的原生电子设计自动化体系。通过跨层次设计智能生成与优化，打通从系统架构到物理版图的全流程智能建模与布局机制；依托高置信度智能验证与评估技术，实现设计阶段的行为分析、规则检查与性能预测一体化集成；同时发展工艺自适应的设计迁移优化方法，提升设计在不同工艺节点间的复用效率与制造适配能力，加速高性能芯片的敏捷开发与迭代。

3) 虚实融合的智能制造：针对亚 5 nm 制造工艺的复杂性与精度瓶颈，构建融合仿真先验与实测数据的智能制造建模框架。依托虚实融合的核心工艺建模，实现对光刻、蚀刻等关键工序的高保真建模与快速预测；面向工艺流程间的耦合关系，发展长流程工艺因果建模与优化机制，提升对制程状态演化与缺陷生成的全局掌控能力；探索超高维新工艺路径优化策略，以强化学习与专家知识协同引导，实现新材料、新结构条件下的高效工艺流程发现与验证。

4) 系统目标驱动的闭环优化：以 PPA、良率、鲁棒性等系统级指标为牵引，构建设计与制造之间高效联动的闭环优化机制。通过跨层次系统级建模与映射，建立设计意图、物理结构与制造可行性之间的因果关联模型；引入设计制造双向反馈与调节机制，打通从缺陷检测到设计优化的反馈通路，实现设计制造协同迭代；进一步发展多目标协同优化智能系统，融合因果推理与强化学习，完成跨流程、多目标约束下的全局最优策略搜索，推动设计与制造从串联走向共构共优。

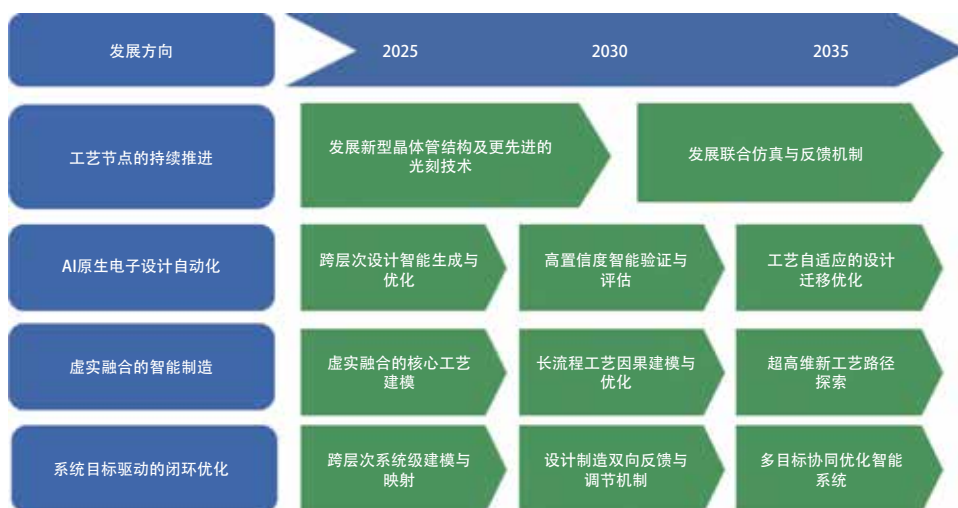


图 3.14 “亚 5 nm 节点芯片系统设计与制造工艺协同优化”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

组长：潘云鹤 费爱国

学科召集人（按拼音顺序）：

陈文光 程 龙 陆振刚 邵晓鹏 辛 斌 邢成文 杨 俊 张建华 张 岳 周 鹏
卓 成

前沿遴选组（按拼音顺序）：

卜伟海 陈迟晓 陈文华 陈 谐 程宝平 戴道铎 邓启文 樊凌雁 韩亚洪 何荣茂
 贺诗波 胡春光 黄崇文 黄 辰 黄岩军 霍凝坤 霍宇驰 贾伟乐 金 晶 景丽萍
 李 刚 李 戈 李海莉 李伟钢 李文博 李园春 李忠奎 刘 东 刘 伟 刘湘雯
 刘晓明 刘 焱 刘淮钊 路 延 马 健 潘振岗 钱 徽 钱文生 秦 飞 秦家虎
 隋修宝 孙 滔 汤璧均 唐 江 田 震 王 璠 王纪奎 吴冠豪 吴 集 吴易明
 夏书银 谢 晖 邢孟道 许 驰 徐嘉伟 徐 静 许迎科 徐余江 薛春来 杨红霞
 杨 青 杨树明 叶新江 尹建伟 余 翔 曾雪锋 詹启伟 张 川 张 杰 赵鲁豫
 赵亚军 赵 焱 郑道勤 周 俊 朱秋国

图情组：

霍凝坤 梁江海 夏江国 刘书雷 杨未强 何丽莎 韩雨珊

执笔组（按拼音顺序）：

研究前沿：卜伟海 房丰洲 景丽萍 李园春 刘 东 孙 滔 谢 晖 尹建伟 曾志刚
 张文富
 开发前沿：方 斌 黄崇文 刘晓明 吴国俊 徐 静 杨树明 曾雪锋 章明星 张 岳
 卓 成

工作组：

联络指导：高 祥 张纯洁 湛群芳 邓晃煌

项目秘书：翟自洋

项目助理：何丽莎



第四章

化工、冶金与材料工程前沿



4.1 工程研究前沿

4.1.1 Top 11 工程研究前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 11 工程研究前沿的核心论文情况见表 4.1 和表 4.2。其中“仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建”来自数据挖掘，其篇均被引频次达到 214.19 次。“人形机器人用超弹性多感知柔性材料”“光电催化高效精准合成高附加值化学品”和“新型材料限域空间物质传输与固化研究”则根据数据挖掘由专家研判而来。其他前沿则纯粹来自专家推荐。跟随航天航空科技的进步，“月表资源原位利用”研究得到广大专家的普遍认可，成为化工、冶金与材料工程领域的 Top 1。与之相关的“太空微重力环境冶金技术研究”则排名第六。与机器人和人工智能（AI）相关的研究前沿有 3 个入选，分别是“人形机器人用超弹性多感知柔性材料”“仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建”和“机器学习势函数驱动的分子智能设计与合成”。能源相关的基础研究仍然备受关注，“纳米储能材料与器件”核心论文被引频次达到 67 048 次。从篇均被引频次来看，研究周期长的冶金领域前沿和航天材料领域前沿，其篇均被引频次普遍不高。

（1）月表资源原位利用

月表资源原位利用（*in-situ* resource utilization, ISRU）是人类深空探索的重要前沿，目标是

表 4.1 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	月表资源原位利用	75	4 085	54.47	2020.8
2	人形机器人用超弹性多感知柔性材料	230	28 652	124.57	2021.0
3	光电催化高效精准合成高附加值化学品	170	26 111	153.59	2020.5
4	宽温域零膨胀航天器材料研究	101	6 238	61.76	2020.6
5	新型材料限域空间物质传输与固化研究	169	19 083	112.92	2020.6
6	太空微重力环境冶金技术研究	48	3 011	62.73	2020.7
7	仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建	85	18 206	214.19	2020.4
8	面向大宗化学品、高性能材料和能源生物制造的仿生细胞器精准构筑	118	12 852	108.92	2020.6
9	多源固体废物协同重构与闭环高值化利用	141	9 731	69.01	2020.6
10	纳米储能材料与器件	498	67 048	134.63	2020.6
11	机器学习势函数驱动的分子智能设计与合成	316	46 612	147.51	2021.0

表 4.2 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	月表资源原位利用	12	23	16	19	5	0
2	人形机器人用超弹性多感知柔性材料	39	67	37	46	28	13
3	光电催化高效精准合成高附加值化学品	50	50	31	24	12	3
4	宽温域零膨胀航天器材料研究	29	19	26	15	10	2
5	新型材料限域空间物质传输与固化研究	46	42	39	21	16	5
6	太空微重力环境冶金技术研究	11	11	12	10	4	0
7	仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建	35	14	17	9	8	2
8	面向大宗化学品、高性能材料和能源生物制造的仿生细胞器精准构筑	29	34	20	26	6	3
9	多源固体废物协同重构与闭环高值化利用	35	39	35	18	11	3
10	纳米储能材料与器件	149	120	100	74	44	11
11	机器学习势函数驱动分子智能设计与合成	45	78	86	57	35	15

在月壤和极区水冰等资源的基础上获取金属、氧气、水和建材，减少对地球补给的依赖，推动月球科研站和长期驻留的实现。其基本思路是结合月壤的物质组成和特殊环境条件，建立适合的资源转化方法，提高利用效率和可持续性。研究方向主要包括：① 月壤矿物的赋存形式与分离机理研究，包括明确氧在硅酸盐和氧化物中的存在方式，金属与挥发分在钛铁矿、硅酸盐、玻璃等物相中的分布特征等，为不同元素的提取提供依据；② 月壤原位建造与挥发分提取，探索利用烧结和增材制造等技术实现建材制备，同时开发水和其他挥发物的采集、分离和储存技术，为生命支持和推进剂提供条件；③ 月壤的冶金性质与月面冶炼工艺研究，利用月表真空等环境进行矿物热分解，降低反应能耗并释放氧气和挥发物；或结合还原工艺，构建氧气、金属与副产物循环利用的路径，研究低重力条件下金属熔融与气化的规律。其未来趋势是形成资源、能源与制造的耦合体系，以光伏和小型核能作为驱动力，并通过搭建模型和优化方法提升工艺的稳定性与规模化水平，使月表资源利用由实验探索走向工程应用，为深空可持续发展奠定物质基础。

(2) 人形机器人用超弹性多感知柔性材料

人形机器人作为智能化系统的前沿应用，其性能提升对触觉传感器提出了更高的要求。实现机器人在复杂环境中高效交互、精确感知与安全执行任务，依赖于柔性结构材料的创新。这些材料的关键任务是在力学、触觉、电学与热学等多模态感知之间实现高效协同，以满足机器人在对环境的适应性和任务执行的多样化需求。面向未来智能机器人对拟人化皮肤与传感系统的迫切需求，设计与制备兼具超弹性、优异多模态感知性能以及力学稳定性的柔性材料，成为突破性技术的重要方向。实现这一目标的核心挑战在于如何通过多尺度结构设计，优化材料性能，确保其具备强大的力学稳定性和传感能力。这一挑战涉及从原子尺度到宏观尺度的多层次结构优化，涵盖材料设计、制造工艺、系统集成等多个领域。深入理解和调控这些复杂体系的性能，有助于突破传统材料的瓶颈，提升机器人感知能力，推动人形机器人在更加复杂的环境中安全高效地工作。目前，全球在这一领域的研究聚焦于以下方向：① 材料与结构设计，通过多尺

度结构优化,提升材料的力学性能、电导性及多模态感知能力;②多物理场耦合机制研究,探索力学、电学、热学等多领域之间的协同作用,以开发具有高灵敏度与超弹性的柔性材料;③系统集成与实际应用,将机器人与传感系统集成,推动其在典型人形机器人中的应用验证,实现从材料设计到系统集成的全链条创新。

(3) 光电催化高效精准合成高附加值化学品

绿色化工的核心目标之一是高效、高选择性地合成高附加值化学品。光电催化是实现太阳能向化学能转化的重要途径,可在温和条件下将资源分子高效转化为清洁燃料等高附加值化学品。其核心在于实现光子吸收、电荷分离传输、表界面催化、分子活化及传质等多过程的高效协同,涵盖光物理、光化学、能质传输与转化等多个环节,具有跨尺度、多过程耦合特征。深入理解并调控这一复杂体系,有助于突破能量转换效率瓶颈,提升反应选择性、体系稳定性,并实现应用拓展。当前研究重点集中于3个层面:一是材料与体系设计,通过能带调控、界面优化及多相/均相协同,提升光电催化性能;二是反应机制解析,通过先进的原位与时间分辨表征,揭示光电材料、电荷动力学、表面催化之间的构效关系;三是器件及工艺集成,围绕反应路径、性能优化和反应器设计,探索从单一产氢向二氧化碳还原、高附加值化学品合成等多元应用的拓展。未来光电催化将朝着定制化、高值化与系统化发展,通过材料、机制、反应工程协同,实现理性设计与高效调控,进一步与生物质转化、碳循环等过程耦合,构建太阳能驱动高附加值化学品的生产体系。

(4) 宽温域零膨胀航天器材料研究

宽温域零膨胀航天器材料是指在太空极端变温环境中,能保持微观尺寸近乎不变(热膨胀系数绝对值 $\leq 1 \text{ ppm/K}^1$)、主要用于航天器的关键功能材料。该类材料能够解决航天器精密部件(如光学系统、动力机构、大型天线结构等)因热胀冷缩引发形变与热应力而导致的失效问题,保证航天器在严苛热循环中的结构稳定性、精度及其长期服役可靠性。其应用还可扩展至超精密加工、灵敏传感探测等前沿技术,以及深海、深地、深空等极端环境。目前研究正从追求单一性能突破向多目标全局优化与多尺度协同设计转变。除追求宽温域近零膨胀系数外,还需考虑在太空应用的特殊要求,如轻质、抗辐照,以及优良的力学性能(强度、韧性)、光学性能(透明)、热/电学性能(导热/导电、热/电绝缘)等。未来研究前沿包括:①通过原子/电子多尺度精准调控,结合机器学习驱动的高通量计算,优化成分-工艺-性能,实现对热膨胀行为等多物性的智能调控;②探索提升零膨胀效应、拓宽零膨胀温度区间的精细结构调控和可控化学合成技术,利用化学元素替代、缺陷工程、界面应力效应和介观形貌调控等方法实现本征零膨胀幅度与温度区间的精准调控,以及提高材料的宏观化学热稳定性和力学性能等;③研究界面结构影响块体材料宏观零膨胀性能的作用机制,探索提升块体材料零膨胀幅度与温度区间的界面工程,利用界面的精细调控实现块体材料的零膨胀达到本征性能极限,并兼顾具体的力、热、光、电性能要求。面向未来深空探测、高轨卫星等对极端环境适应性的更高要求,该领域前沿正朝着超宽温域、智能响应、高效热管理等方向推进。从机理研究来说,依托大科学装置如中子衍射、同步辐射先进原位表征技术,解析材料微观结构、相变动力学、磁-弹/热-弹耦合及缺陷演化机制,为材料设

¹ $1 \text{ ppm/K} = 1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

计提供理论依据。从材料性能来说,应聚焦轻质化(如先进铝基、钛基复合材料)、高强度/刚度、抗辐照、宽温域稳定性与良好导热性等多功能一体化,为走向实际应用奠定基础。

(5) 新型材料限域空间物质传输与固化研究

新型材料限域空间物质传输与固化研究是当前材料科学、化学工程及纳米技术交叉领域的前沿核心议题,旨在探索并调控物质在微米至纳米尺度的受限空间(如多孔材料、层状结构、人工纳米通道)内的独特行为。其核心内涵是研究在此极限维度下,物质传输(如离子、分子、流体的输运)和相变固化(如聚合、结晶、凝胶化)的物理化学规律,其完全不同于宏观体相,而是显著地受到表界面效应和量子限域效应的影响。研究关键点主要涉及4个方面:①限域空间内的传输机制与调控。阐明传输物质与限域壁面之间的复杂相互作用(如静电、配位作用),研究导致离子/分子选择性筛分、超快输运等现象的机理。通过精确调控孔道尺寸、表界面化学和结构有序性,实现对传输速率和选择性的按需定制。②受限环境下的固化动力学与微结构演化。限域条件会显著改变固化反应的路径、速率以及最终产物的微观结构。通过研究界面如何诱导成核、空间阻碍如何影响分子链排列以及如何控制固化收缩与应力分布,以期获得结构均匀、缺陷少、性能优异(如高强度、高韧性)的固体材料。③传输-固化过程的动态耦合与协同调控。首先要理解并协调传输与固化这两个相继或同步发生的过程,确保反应前驱体能够充分、快速地传输至反应区域,同时要保证固化过程不会过早地堵塞传输通道;然后借助外场(热、光、电)进行时空精准的智能调控。④多尺度模拟与原位表征技术的融合。通过理论模拟(从分子动力学到有限元分析)与先进原位表征技术(如原位电镜、光谱、X射线散射)结合,揭示微观机理、验证假设和预测材料性能,加速新材料的设计与开发进程。

(6) 太空微重力环境冶金技术研究

太空微重力环境冶金是指在近地轨道或深空等微重力条件下进行金属冶炼与材料制备。该技术通过消除地球重力导致的沉降、对流等干扰,使材料制备过程转而由界面力主导,从而克服地面冶炼中难以避免的成分偏析和缺陷形成。借此可制备出成分极度均匀的复合合金、结构可控的多孔金属、高纯度单晶及特殊非晶材料等传统方法无法获得的高性能材料。实验表明,太空制备的合金性能可提升10倍以上。该领域的研究方向集中在以下方向:①无容器冶金技术,采用电磁悬浮等手段避免器壁污染,以制备高纯度特种合金(如航空发动机用钛合金单晶体);②异种金属均匀融合,解决地面因密度差异导致的分层问题;③新型功能材料开发,包括缺陷密度极低的半导体晶体、自修复聚合物、结构可控的泡沫金属等;④天地协同智能控制算法构建,通过融合天基平台与地面系统的多源数据,构建联合智能控制模型,实现对微重力冶金过程的自主实时调控与参数优化;⑤原位资源利用(ISRU)闭环技术,在太空环境中直接提取并转化地外资源,构建“资源开采—转化—利用—回收”的自持循环系统,支撑太空冶金的可持续运行。

(7) 仿生电子皮肤与智能触觉感知系统构建

仿生电子皮肤是通过柔性敏感材料、微纳结构设计与多功能传感单元的集成,模拟人类皮肤的多模态感知能力,实现压力、应变、摩擦、温度和湿度等信息的实时采集与反馈。智能触觉感知系统则在此基础上进一步构建“信号采集—传输—分析—反馈”全链路系统,从而赋予人工器

件类人甚至超越人类的触觉认知能力。当前，国内外研究主要集中在3个方面：一是新型柔性传感材料与器件结构设计，以提升传感性能和环境适应性；二是多功能集成与信号解耦，探索力-热-湿度等多模态协同感知，同时引入可拉伸、自愈合等特性，以接近生物组织性能；三是智能感知与数据融合，利用机器学习等方法实现信号的高效处理与智能反馈。仿生电子皮肤与智能触觉感知系统作为多学科交叉的战略方向，未来将聚焦以下核心方向：①性能层面，推动“超仿生”与“高可靠”协同发展，突破生物皮肤感知极限，实现多模态信号精准捕获，提升柔性器件耐用性与可靠性；②功能层面，重点突破自供电与生物兼容瓶颈，拓展其在全时健康监测、智能假肢、植入式医疗等领域的应用潜力；③系统层面，构建智能触觉网络，结合人工智能技术实现多模态融合与环境自适，推动从“感知”到“认知”的跨越。

（8）面向大宗化学品、高性能材料和能源生物制造的仿生细胞器精准构筑

仿生细胞器是具有类细胞器结构与功能的人工亚细胞单元，可用于生物制造细胞工厂中，实现代谢途径的空间组织与高效催化。该类系统能够有效克服传统微生物细胞中酶分子分散、代谢中间体扩散损失及途径竞争等问题，显著提升目标产物的合成效率与产量，是大宗化学品、高性能材料与能源生物制造过程中的关键赋能技术。目前，研究主要集中于以下方面：①复杂多变细胞环境下仿生细胞器的高精度组装，揭示生物大分子自组装的“分子语言”，推动从经验试错向理性设计的范式转变；②发展细胞器原位表征技术，解析仿生细胞器微环境（pH、离子强度、分子拥挤度等）对酶促反应动力学的影响机制，建立结构-功能关系模型，并深入阐释酶分子在细胞器内的协同机制；③开发刺激响应型智能细胞器，通过整合光、热、pH等感应元件，实现代谢途径的时空调控与自适应优化；④提升仿生细胞器的生物兼容性与鲁棒性，增强其在多种工业底盘细胞中的适配性，推动从实验室概念向产业化应用的跨越，助力化工、能源与材料产业的绿色转型与升级。未来，该领域将深度融合人工智能、超分辨成像和合成生物学技术，实现仿生细胞器的高通量设计、实时监测与动态调控，在碳中和背景下的绿色生物经济中发挥关键作用。

（9）多源固体废物协同重构与闭环高值化利用

多源固体废物协同重构与闭环高值化利用是对冶金、化工等领域产生的冶金渣、粉煤灰、退役动力电池等多品类、多组分固体废物，利用跨行业协同调度与多尺度结构重构技术，实现“固体废物—资源—高值产品—再生资源”全生命周期闭环利用的前沿交叉领域。该技术突破传统单一固体废物“低附加值处置”模式，破解成分互补性差、有害组分协同控制难等瓶颈，解决全球固体废物堆存问题，以及缓解矿产短缺问题，其应用可延伸至绿色基建、新能源材料、高端装备制造等战略领域。该领域的研究聚焦三大方向：①多源固体废物成分-结构-性能耦合机制解析，依托多尺度表征与机器学习，建立跨品类固体废物协同调配模型，实现“以废定产”的智能设计，破解成分波动导致的产品质量不稳定难题；②多尺度协同重构技术创新，开发高温熔体重组、低温水热晶化、界面改性调控等技术，实现固体废物中硅、铝、钙、锂等元素的定向分离与高值化转化，制备高端陶瓷、新型胶凝材料、新能源正极材料等产品；③闭环产业链构建与系统优化，结合区域固体废物分布特征，设计“收集—预处理—转化—再生”全链条技术体系，耦合碳捕集

与污染物协同控制，实现环境效益与经济效益的统一。面向全球资源与生态挑战，该领域向跨区域协同调度、全组分零废弃、高值产品定制化推进，需深化固体废物转化过程热力学与动力学规律，突破大型化装备与智能化控制技术，为全球固体废物资源化利用提供可推广的技术范式。

(10) 纳米储能材料与器件

纳米储能材料与器件，特别是一维纳米线结构体系，是突破传统电化学储能器件能量密度与功率密度瓶颈、赋能高性能储能技术发展的关键平台。通过在纳米尺度上设计储能材料的几何构型与界面特性，可以为揭示载流子输运机制、优化反应动力学提供理想模型，有望从根本上解决储能中的容量衰减、倍率性能和安全性问题。当前研究正从单一材料优化转向多物理场耦合与多粒子协同的深入探索，重点包括：发展基于单纳米线的原位表征技术，实时解析电化学过程中电子、离子、声子等相互作用，进而推动界面工程设计，开发场效应储能、界面催化储能等新型器件。然而，该领域仍面临多场耦合机制不明、多粒子协同理论缺失、跨尺度集成失配等挑战。纳米储能材料与器件的全球研发趋势集中在以下方面：① 多场耦合理论与原位表征技术，揭示力-热-电-光多场环境下材料的本征储能行为；② 多粒子协同输运建模与仿生设计，实现电子-离子输运动态匹配与界面副反应抑制；③ 跨维度制造工艺，实现储能、传感、计算等功能一体化集成；④ 数据驱动的 AI 研发范式，构建“设计-集成-应用”全链条创新，加速产业化进程。

(11) 机器学习势函数驱动的分子智能设计与合成

机器学习势函数通过数据驱动原子间相互作用建模，实现了精度与效率协同提升。过去 20 年，机器学习势函数实现了跨越式发展，近年涌现的高阶等变消息传递神经网络（MPNN）通过嵌入空间对称性约束，突破了传统模型在复杂体系中的精度瓶颈。当前，机器学习势函数聚焦两大核心挑战：一是提升模型泛化能力与拟合精度，通过机理模型耦合与预训练模型微调等方式，打破模型对特定体系的依赖；二是革新数据范式，开发高质量势能面数据，利用主动学习与自适应采样技术降低数据成本，从根本上解决“数据饥渴”难题。未来，机器学习势函数将沿着“通用化-专用化”双轨并行发展：通用性模型用于实现跨元素、相态普适性；专用模型则聚焦特定化学问题（如催化反应路径、生物分子构象），定制化架构实现量子级精度。随着技术成熟，机器学习势函数应用将深度渗透至分子智能设计全链条，助力反应网络探索高效遍历万亿级反应路径，实现动力学与热力学多尺度性质精准预测，推动分子设计与合成智能化转型。

4.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

4.1.2.1 月表资源原位利用

月表资源原位利用（ISRU）被认为是人类深空探索进入长期驻留阶段的关键环节。其核心思路是直接利用月球表层土壤、水冰和其他挥发性物质，获取氧气、水、金属与建材，以支撑科研设施和居住模块运行，从而摆脱对地球频繁补给的依赖。这一理念的提出意味着探索模式的转变——从“地球依赖”逐步走向“外星自给”，为建设月球科研站和更远深空的任务奠定物质与

技术基础。20 世纪，阿波罗计划首次带回月壤样品，揭示了月球表面的成分特征，也为资源利用的设想提供了起点。进入 21 世纪，美国在“阿尔忒弥斯计划”、中国在“国际月球科研站”建设方案中均将 ISRU 作为重点方向，欧洲航天局和部分新兴航天国家也展开相关部署。研究已经从早期的概念层面和实验室尝试逐渐过渡到工艺探索与系统验证。

从全球学术产出的核心论文来看，中国（29 篇，38.67%）与美国（27 篇，36.00%）处于领先地位，英国、德国、荷兰、加拿大和意大利等国也保持活跃贡献（表 4.3）。中国科学院、中国地质大学、美国国家航空航天局（NASA）、中国空间技术研究院和北京航空航天大学是主要力量，其中中国科学院的篇均被引频次超过 70，显示出其在国际学界的影响力（表 4.4）。合作网络显示，中美之间交流最为紧密，同时中欧之间也建立起较强的互动（图 4.1 和图 4.2）。施引核心论文的数据表明，中国和美国在推动知识传播方面占据主导位置，英国、德国和意大利则发挥补充作用（表 4.5 和表 4.6）。

表 4.3 “月表资源原位利用”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	29	38.67	1 728	59.59	2021.0
2	美国	27	36.00	1 457	53.96	2020.9
3	英国	11	14.67	567	51.55	2020.5
4	德国	9	12.00	497	55.22	2020.4
5	荷兰	5	6.67	204	40.80	2020.8
6	加拿大	4	5.33	180	45.00	2020.0
7	意大利	4	5.33	174	43.50	2022.0
8	澳大利亚	3	4.00	145	48.33	2021.7
9	韩国	3	4.00	127	42.33	2020.7
10	印度	3	4.00	118	39.33	2021.3

表 4.4 “月表资源原位利用”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	11	14.67	772	70.18	2020.4
2	中国地质大学	6	8.00	356	59.33	2021.0
3	美国国家航空航天局	5	6.67	315	63.00	2020.0
4	中国空间技术研究院	5	6.67	219	43.80	2021.4
5	北京航空航天大学	4	5.33	290	72.50	2021.2
6	澳门科技大学	4	5.33	210	52.50	2020.2
7	夏威夷大学马诺阿分校	4	5.33	180	45.00	2021.0
8	华中科技大学	4	5.33	167	41.75	2020.0
9	同济大学	3	4.00	275	91.67	2021.3
10	中佛罗里达大学	3	4.00	262	87.33	2020.7

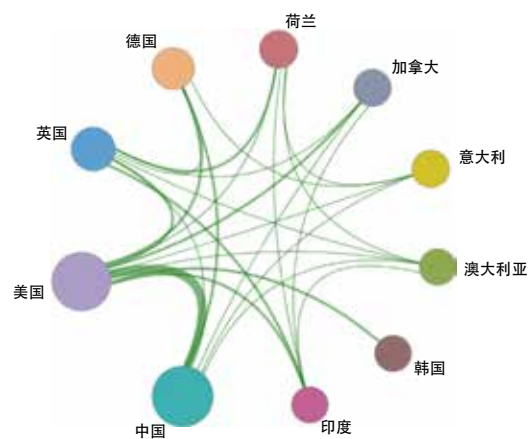


图 4.1 “月表资源原位利用”工程研究前沿主要国家间的合作网络

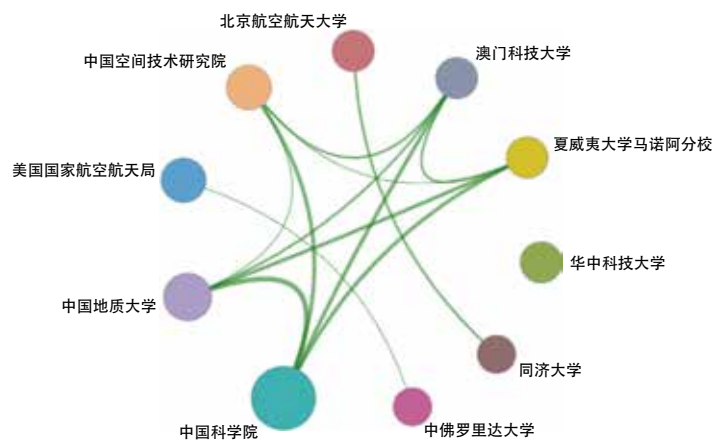


图 4.2 “月表资源原位利用”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 4.5 “月表资源原位利用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 012	39.01	2023.0
2	美国	600	23.13	2022.9
3	英国	207	7.98	2022.8
4	德国	178	6.86	2022.7
5	意大利	124	4.78	2023.1
6	澳大利亚	93	3.59	2023.0
7	印度	90	3.47	2023.3
8	法国	79	3.05	2022.6
9	沙特阿拉伯	73	2.81	2023.3
10	日本	71	2.74	2023.1

表 4.6 “月表资源原位利用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	349	37.85	2022.5
2	美国国家航空航天局	82	8.89	2022.5
3	澳门科技大学	74	8.03	2021.9
4	中国地质大学	71	7.70	2022.5
5	哈尔滨工业大学	60	6.51	2023.2
6	加州理工学院	59	6.40	2022.6
7	同济大学	51	5.53	2023.2
8	山东大学	48	5.21	2022.6
9	中山大学	44	4.77	2022.4
10	北京航空航天大学	42	4.56	2023.1

研究工作目前集中在 3 个方向：① 月壤矿物赋存状态与分离机理，目标是阐明氧、金属与挥发分在硅酸盐、钛铁矿和玻璃等物相中的存在方式与分布特征，以此作为分离提取的理论依据；② 原位建材制备与挥发物利用，通过烧结和 3D 打印等工艺，探索在月面直接制造结构构件，并发展采冰、气体分离和储存技术，为科研设施和生命维持系统提供条件；③ 月面冶金工艺与循环利用，借助真空和低重力环境，开展低能耗热分解与还原工艺研究，实现氧气与金属的协同获取，并构建资源闭环利用模式。

结合上述方向，未来 5~10 年的发展趋势（图 4.3）主要体现在 3 个方面：① 在矿物分离机制方面，研究正从宏观定性逐步转向微观定量。随着样品返回和原位探测手段的进步，有望建立系统的矿物数据库与工艺模拟平台，为大规模提取提供方法论基础。② 在建材与挥发物利用方面，发展路径是由单点工艺实验过渡到集成化示范。建材制造、冰资源采集与气体储存技术将被整合，形成“建材－水－气体”一体化的应用系统，直接面向科研站与居住舱需求。③ 在冶金工艺与循环利用方面，重点将放在开发连续化、低能耗的工艺链，实现氧气和金属的协同产出，并与光伏、小型核能等能源系统结合，推动“资源－能源－材料”的闭环运行。

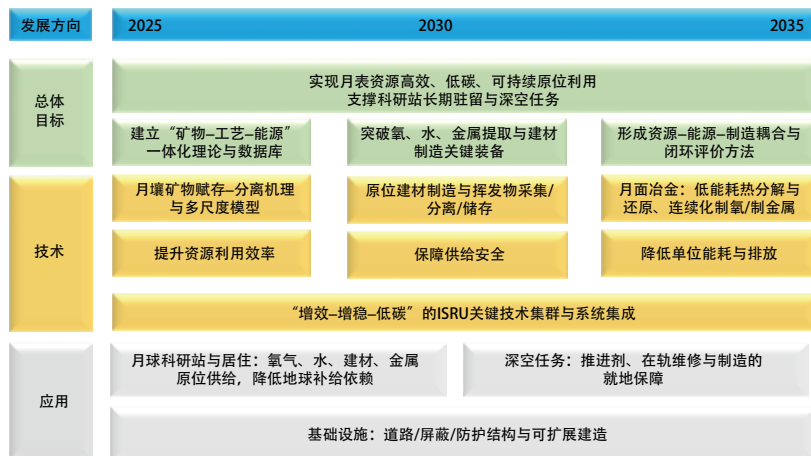


图 4.3 “月表资源原位利用”工程研究前沿的发展路线

可以预期,月表资源原位利用正在进入由基础研究迈向工程应用的过渡期。其价值不仅在于降低深空任务的经济成本,更在于为建立可自持续的空间活动体系提供可行路径。随着国际合作的深入和关键技术的突破,未来10年有望见到月面示范性应用的落地,这将为火星乃至更远行星的资源利用提供直接经验与技术借鉴。

4.1.2.2 人形机器人用超弹性多感知柔性材料

随着人形机器人向更高层次的智能化和类人功能进化,兼具超弹性与多感知功能的柔性结构材料在机器人触觉感知系统中扮演着至关重要的角色。然而,当前柔性材料的力触觉感知功能普遍存在灵敏度不足、感知功能单一、强度与导电性能之间相互制约等问题,这些瓶颈限制了其在复杂环境下的广泛应用。为此,基于复合材料多尺度结构优化与多功能结构一体化调控设计,突破传统材料的空间结构与性能局限,已经成为解决这一问题的关键技术路径。通过这种方法,有望实现柔性结构材料在垂直力、滑动力及温度等多种外部刺激下的高灵敏感知功能,满足未来人形机器人拟人类功能实现的需求。中国工业和信息化部发布的《人形机器人创新发展指导意见》中对传感器系统提出了前瞻性的技术方向,强调要面向复杂环境感知需求,开发集成高精度仿生眼与类脑处理算法的视觉传感器,实现对动态环境中目标识别、空间建模和深度估计等功能的融合;在触觉方面,聚焦高分辨率、具备多点接触检测能力的仿人电子皮肤的开发,使机器人具备对微小力变化和多次接触事件的实时响应能力,为机器人在真实环境中实现高效感知与自主决策奠定了技术基础。美国《智能机器人技术路线图》提出,未来10年内将加大对高性能、低能耗触觉传感器研发的投入,探索更精准、广泛的触觉感知系统,使机器人能够在复杂环境下与人类进行更加自然的互动。与此同时,美国还计划利用多种先进的材料技术,提高机器人触觉系统的灵敏度和可靠性,推动传感器技术的产业化进程。

从需求出发,柔性结构材料不仅需要具备高弹性和柔韧性,还应兼顾超高灵敏度、强度与导电性能之间的平衡。传统材料多采用金属基或聚合物基复合材料,但这些材料往往在力学性能与导电性能之间存在矛盾。为解决这一问题,多功能复合材料设计通过引入纳米材料、导电聚合物以及先进的二维材料(如石墨烯、MXene等),在保证材料的柔性和韧性的同时,显著提升了材料的灵敏度与导电性。通过优化复合材料的微观结构,可以有效提高传感器对多种感知信号(如力、温度、湿度等)的反应速度与准确性。传统的触觉感知系统往往依赖单一的感知模式,无法同时处理多种感知信号。为了实现多感知功能的集成,研究者开始将力、温度、湿度等感知功能进行集成化设计,构建具有高度多功能性和协同响应能力的柔性传感器阵列。通过材料基因工程与高通量筛选技术,开发新型的柔性传感器材料,可以使其在应对复杂多变的环境条件时,保持高稳定性与高灵敏度,为人形机器人提供更准确、更全面的环境感知能力。

从核心论文的产出和引用来看(表4.7至表4.10),中国和欧美发达国家对相关研究都非常重视,其中,中美之间的研究合作众多(图4.4),清华大学与中国科学院和北京航空航天大学有密切合作(图4.5)。

表 4.7 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	149	64.78	18 247	122.46	2021.2
2	美国	65	28.26	9 743	149.89	2020.8
3	新加坡	14	6.09	2 021	144.36	2020.9
4	德国	14	6.09	1 791	127.93	2021.6
5	英国	13	5.65	1 756	135.08	2020.3
6	韩国	11	4.78	1 429	129.91	2021.2
7	瑞士	10	4.35	1 016	101.60	2021.4
8	日本	9	3.91	1 485	165.00	2019.9
9	意大利	9	3.91	674	74.89	2020.6
10	加拿大	7	3.04	1 042	148.86	2020.9

表 4.8 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	29	12.61	4 111	141.76	2021.4
2	清华大学	17	7.39	2 267	133.35	2021.1
3	浙江大学	16	6.96	1 466	91.62	2020.6
4	新加坡国立大学	11	4.78	1 686	153.27	2020.8
5	北京理工大学	10	4.35	959	95.90	2021.4
6	北京航空航天大学	8	3.48	1 224	153.00	2020.9
7	东华大学	8	3.48	798	99.75	2022.1
8	香港城市大学	7	3.04	756	108.00	2021.0
9	苏黎世联邦理工学院	7	3.04	604	86.29	2022.0
10	天津大学	7	3.04	510	72.86	2022.0

表 4.9 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	14 618	58.17	2023.0
2	美国	3 162	12.58	2022.6
3	韩国	1 477	5.88	2022.9
4	英国	1 176	4.68	2022.7
5	印度	827	3.29	2023.1
6	日本	766	3.05	2022.6
7	德国	716	2.85	2022.7
8	新加坡	648	2.58	2022.9
9	意大利	600	2.39	2022.8
10	澳大利亚	589	2.34	2022.6

表 4.10 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	1 664	26.87	2022.8
2	浙江大学	658	10.63	2023.0
3	清华大学	591	9.54	2023.0
4	上海交通大学	478	7.72	2022.8
5	四川大学	466	7.53	2022.8
6	哈尔滨工业大学	463	7.48	2023.1
7	西安交通大学	409	6.61	2022.8
8	中国科学技术大学	386	6.23	2023.0
9	华南理工大学	384	6.20	2023.0
10	西北工业大学	350	5.65	2023.1

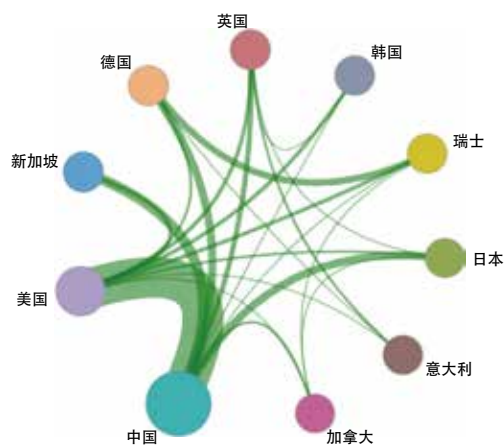


图 4.4 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿主要国家间的合作网络

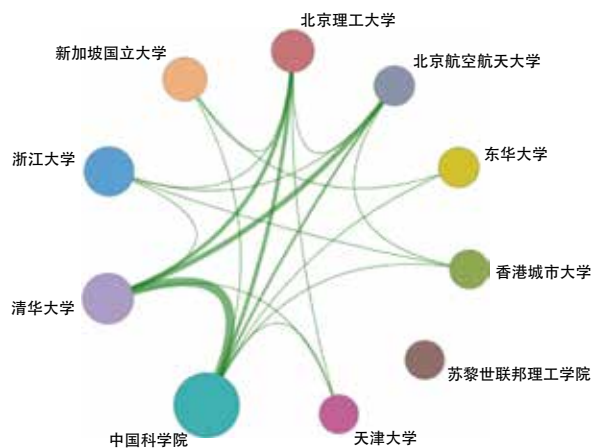


图 4.5 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿主要机构间的合作网络

随着传感技术的不断进步，未来 5~10 年内，基于超弹性复合材料的柔性传感器系统将在结构微型化、材料智能化、传感器系统集成化等方面取得更为显著的进展（图 4.6）。首先，微纳制造技术与异质集成将推动柔性结构材料的集成化和多功能化，解决单一感知元件性能不足的问题，使传感器阵列在感知信号的精确度和响应速度上得到极大提升。其次，依托类脑神经网络算法，将推动多模态感知信息的融合推理与智能识别，提升机器人在动态、复杂环境下的自适应能力。最后，随着高性能、低能耗柔性材料的出现，绿色环保与智能可持续设计将成为未来柔性结构材料研究的重要方向，为人形机器人提供更加环保、经济的感知解决方案。超弹性多感知柔性材料的设计与制备，将在材料创新、传感技术集成及智能化算法等多方面展开深度突破，为实现人形机器人感知功能的提升奠定坚实的技术基础。通过技术集成与多学科协同创新，未来的柔性传感器材料将具备更加精准的感知能力和极高的可靠性，推动人形机器人从“模仿动作”向“理解环境”迈出关键一步，进而为智能机器人产业的快速发展提供强有力的支持。



图 4.6 “人形机器人用超弹性多感知柔性材料”工程研究前沿的发展路线

4.1.2.3 光电催化高效精准合成高附加值化学品

光电催化技术是当前太阳能研究的前沿方向，其核心目标是实现太阳能向化学能的高效转化。该技术模拟自然光合作用，利用半导体材料在光照下激发产生的电子-空穴对，在催化位点作用下实现氧化还原反应，将水、二氧化碳等资源分子转化为氢气、碳基燃料以及各类高附加值化学品。这一过程融合光电转换与催化反应优势，为人工光合成提供了有效路径。光电催化能够将太阳能以化学能形式存储于分子键中，实现高效转化、稳定存储与按需释放，有效解决太阳能间歇性和分散性带来的应用限制。从战略层面看，发展高效光电催化技术不仅具有科学研究的重要意义，更是构建未来清洁能源体系与绿色化工的重要途径。

光电催化研究可追溯至 20 世纪 70 年代本田-藤岛效应的发现。早期研究主要集中在水解制氢，材料以二氧化钛等宽禁带半导体为主，能量转化效率有限。随着纳米科学、表界面调控

和原位表征的发展,该领域取得显著进展,研究范围已从单一制氢扩展至二氧化碳还原、氮气固定、有机物合成等,材料体系也从金属氧化物拓展到硫化物、氮化物及有机框架材料等。然而,尽管实验室中的太阳能转化效率已有所提升,但整体仍面临效率、选择性与稳定性不足等挑战。

现阶段,全球科学家积极投入光电催化研究,重点探索电极材料设计与制备、电荷传输与分离机制以及高效合成应用。近年来,“光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家和机构分别见表 4.11 和表 4.12,60.59% 的核心论文来自中国,排名第一的机构为中国科学院。主要国家间和机构间的合作网络分别如图 4.7 和图 4.8 所示。全球科学家在该领域建立了广泛的合作,中国、美国和澳大利亚合作最为紧密。施引核心论文的主要产出国家和机构中,中国占比高达 56.59%,中国科学院的占比高达 33.13% (表 4.13 和表 4.14)。

表 4.11 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	103	60.59	14 871	144.38	2020.5
2	印度	24	14.12	3 580	149.17	2020.4
3	美国	21	12.35	3 912	186.29	2019.9
4	英国	17	10.00	3 647	214.53	2020.2
5	澳大利亚	16	9.41	2 618	163.62	2020.2
6	韩国	14	8.24	2 522	180.14	2020.5
7	法国	9	5.29	1 208	134.22	2022.0
8	新加坡	7	4.12	1 113	159.00	2020.3
9	日本	7	4.12	905	129.29	2021.3
10	巴基斯坦	7	4.12	782	111.71	2020.9

表 4.12 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	20	11.76	3 078	153.90	2020.6
2	北京化工大学	8	4.71	1 242	155.25	2020.1
3	剑桥大学	7	4.12	1 448	206.86	2020.6
4	郑州大学	7	4.12	587	83.86	2020.7
5	中山大学	6	3.53	839	139.83	2020.2
6	深圳大学	5	2.94	1 441	288.20	2020.2
7	湖南大学	5	2.94	934	186.80	2020.0
8	广州大学	4	2.35	1 635	408.75	2020.0
9	悉尼大学	4	2.35	811	202.75	2019.8
10	昆士兰科技大学	4	2.35	528	132.00	2020.8

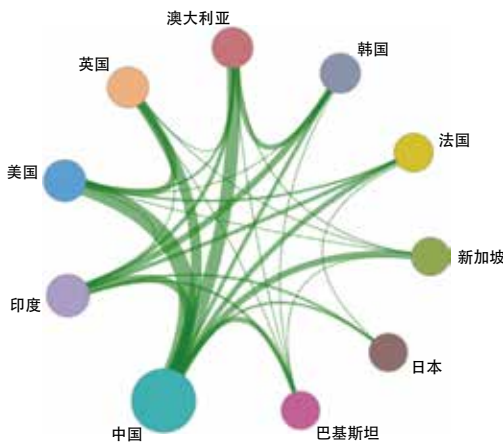


图 4.7 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿主要国家间的合作网络

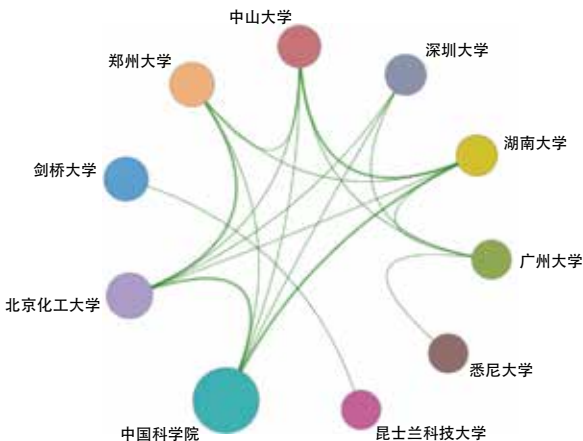


图 4.8 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 4.13 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 / %	平均施引年
1	中国	13 893	56.59	2022.7
2	印度	2 473	10.07	2022.8
3	美国	1 559	6.35	2022.3
4	韩国	1 338	5.45	2022.7
5	沙特阿拉伯	1 084	4.42	2023.0
6	澳大利亚	767	3.12	2022.4
7	日本	764	3.11	2022.5
8	德国	718	2.92	2022.5
9	英国	689	2.81	2022.5
10	伊朗	666	2.71	2022.6

表 4.14 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	1 482	33.13	2022.6
2	江苏大学	388	8.67	2022.6
3	郑州大学	350	7.82	2022.0
4	中国科学技术大学	324	7.24	2022.6
5	天津大学	295	6.60	2022.4
6	沙特王国大学	290	6.48	2023.1
7	福州大学	283	6.33	2022.6
8	湖南大学	275	6.15	2022.2
9	清华大学	268	5.99	2022.6
10	哈尔滨工业大学	261	5.84	2022.5

近年来，“光电催化高效精准合成高附加值化学品”研究发展迅速。未来 5~10 年，该领域将沿智能设计、精准合成、精细表征与系统集成方向拓展，基础研究更加深入，同时向应用和工程层面拓展（图 4.9）。一方面，智能化材料设计将成为重要方向，借助机器学习与高通量计算实现半导体光电材料的理性设计与精准合成，构建材料基因库，实现光电催化材料的理性筛选与优化；另一方面，通过精准合成、表界面设计构建高效光电极及表面催化位点，依托先进表征揭示光电催化体系中的普适性原则，以指导材料与反应体系优化、规模化体系开发。在应用层面，工艺条件调控、新型反应器设计与能质管理将成为关键方向；聚焦多场耦合、多相与均相相融合、多模型协同催化，形成更高效的能量转化平台；通过器件化、模块化与集成化设计将推动实验室成果向规模化应用转化。基于绿色合成理念，光电催化可在温和条件下将资源分子高效转化为高附加值化学品，用于绿氢制备、碳资源升级、精细化工、有机化学品及功能材料的绿色合成，实现廉价资源向高附加值化学品的高效转化。通过跨学科、多尺度集成与智能化优化，光电催化技术有望成为绿色能源转换与化学品高值化生产的重要支撑平台，为可持续化工与碳中和目标提供关键技术保障。

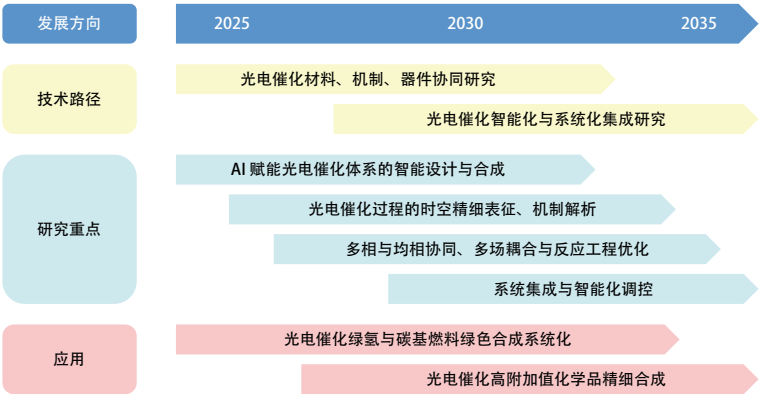


图 4.9 “光电催化高效精准合成高附加值化学品”工程研究前沿的发展路线

4.2 工程开发前沿

4.2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 11 工程开发前沿的专利公开情况见表 4.15 和表 4.16。其中“高效稳定离子电池关键材料研发与结构设计”来自专利地图挖掘，其平均被引数排名第一（26.93），但逐年公开量呈逐步下降趋势。“新能源动力电池绿色循环利用”和“高性能纤维增强复合材料跨尺度设计与集成开发”是基于数据由专家研判而来。其他前沿则是由专家推荐而来。化工与冶金领域的开发前沿体现了绿色低碳和资源利用，材料领域的开发前沿则体现在复合材料设计和极端环境应用等方面。

（1）绿电－绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备

实现煤炭清洁低碳转型、大规模消纳可再生能源、发展绿氢经济、推动工业深度脱碳是保障能源安全和培育新增长点的关键路径。绿电－绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备以绿氢耦合煤化工深度脱碳为核心攻关方向，聚焦可再生能源制氢与煤炭碳氢转化过程的耦合机制研究，通过多学科交叉融合创新突破碳－氢－氧元素定向重构的科学技术难题，着力突破高效、稳定且选择性可控的催化剂体系设计与规模化制备技术。① 开发高效稳定电解水制氢催化剂，提升电解槽在宽功率范围内的响应速度和效率稳定性，揭示动态负载下催化剂反应动力学的瞬态变化规律，突破绿电动态工况下的产氢效率和寿命瓶颈；② 开发动态自适应催化剂，提升催化剂耐晶格畸变和抗积碳能力，原位表征动态氢输入下催化剂活性位点的瞬态变化，建立非稳态反

表 4.15 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引数	平均被引数	平均公开年
1	绿电－绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备	1 016	5 792	5.70	2021.4
2	新能源动力电池绿色循环利用	944	8 340	8.83	2021.8
3	工业 CO ₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品	581	4 906	8.44	2021.4
4	高效稳定离子电池关键材料研发与结构设计	843	22 703	26.93	2020.7
5	关键工程结构材料长寿命安全服役加速评价方法与寿命预测	929	5 513	5.93	2021.7
6	高温复杂服役环境下辐射 / 热防护陶瓷涂层研发	351	924	2.63	2021.3
7	机器学习辅助新型聚合物材料发现与理性设计	445	2 027	4.56	2022.0
8	低品位锂资源绿色提取	337	1 285	3.81	2022.5
9	高性能纤维增强复合材料跨尺度设计与集成开发	517	2 084	4.03	2022.3
10	极端环境冶金过程强化技术	505	1 581	3.13	2021.8
11	甲烷高效减排及高附加值化学品转化	1 377	5 676	4.12	2021.8

表 4.16 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	绿电－绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备	205	142	175	177	135	182
2	新能源动力电池绿色循环利用	120	108	161	181	183	191
3	工业 CO ₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品	102	93	104	120	77	85
4	高效稳定离子电池关键材料研发与结构设计	259	177	127	137	142	1
5	关键工程结构材料长寿命安全服役加速评价方法与寿命预测	74	147	164	252	168	124
6	高温复杂服役环境下辐射 / 热防护陶瓷涂层研发	64	54	74	76	43	40
7	机器学习辅助新型聚合物材料发现与理性设计	30	53	75	100	95	92
8	低品位锂资源绿色提取	26	25	37	41	73	135
9	高性能纤维增强复合材料跨尺度设计与集成开发	47	55	56	83	112	164
10	极端环境冶金过程强化技术	69	66	62	107	97	104
11	甲烷高效减排及高附加值化学品转化	231	205	154	192	255	340

应动力学模型，量化波动氢源对反应路径的影响机制，构建柔性化、低碳化的新一代绿色化工体系；③ 构建“绿电－绿氢－低碳化工”协同运行新模式，助推传统化工向“原料绿色化、过程低碳化、能效最大化”的现代产业形态转型升级。

（2）新能源动力电池绿色循环利用

随着全球新能源汽车产业的飞速发展，动力电池的报废量逐年激增，预计到 2030 年，全球动力电池年退役量将突破 1 200 万吨。退役动力电池富含锂、镍、钴、铜等关键金属，同时其含有的有机电解液等毒害组分存在巨大的环境风险。动力电池的绿色循环利用是降低原生矿产资源消耗、支撑新能源产业绿色发展的关键环节。现有退役电池材料回收的主要方法包括火法冶金、湿法冶金和直接修复法，其中湿法冶金是产业化领域的主流方法。未来，新能源动力电池绿色循环利用的发展趋势将主要聚焦以下方面：① 基于人工智能与大数据技术，开发退役动力电池快速精准检测与智能化梯次利用技术；② 利用 AI 和机械臂联动控制技术，开发异构兼容的退役锂电池精准识别与智能拆解技术；攻克正负极精准分离、电解液绿色回收与高值化利用等关键技术；③ 在现有湿法工艺基础上，进一步开发废旧锂电材料全组分高效回收与新能源材料短流程制备技术，实现溶液体系循环与废水废渣零产出；④ 针对退役动力电池经精细分离后的正、负极废料，开发直接修复与升级再造技术，突破修复再生路线规模化应用的技术瓶颈。

（3）工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品

电力和化工等行业每年排放大量以 CO₂ 为主要成分的工业废气，其资源化利用是实现“双碳”

目标的关键路径。然而，现有生物转化技术主要针对炼钢等过程产生的无氧、富含 CO/H_2 的“资源型废气”，尚缺乏对体量更庞大、应用场景更广泛、含氧的以 CO_2 为主的工业废气进行高效资源化利用的系统性解决方案，对于组分复杂的工业废气也缺少灵活的多模式生物利用策略。工业 CO_2 废气多模式生物转化是一项旨在突破此瓶颈的战略性技术。该技术通过多元化利用复杂组分的工业废气进行预处理和赋能，在拓宽原料来源的基础上，结合厌氧固碳途径（如 Wood-Ljungdahl 途径）和好氧固碳途径 [如 CBB 循环（Calvin-Benson-Bassham cycle）途径] 的固有特征和优势，最终目标是对于单一且价值较低的醇酸等大宗化学品实现产品矩阵的“高值化”升级。一方面，利用工业 CO_2 废气高效合成可作为粮食补充的高价值生物蛋白；另一方面，通过复杂多样的微生物代谢途径，为医药和种植养殖行业等领域生产萜类等高价值化学品，构建真正具备经济竞争力的负碳工业新范式。

（4）高效稳定离子电池关键材料研发与结构设计

离子电池通过离子（ Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 等）在正负电极间的可逆脱嵌过程实现能量的转换与存储，是可再生能源和储能系统中高性能二次电池技术的重要研究方向。随着能源需求的增长，亟须研发高效稳定离子电池关键材料与结构，以提高能源利用率、储能性能、循环耐用性与安全性。目前，该方向的研究主要集中在以下方面：① 发展高离子电导率和高电化学稳定性的电解质材料；② 研究电极-电解质界面机理，开发长期稳定、高性能正负极材料，利用电极表面改性优化界面稳定性与循环性能；③ 建立精准的电-热耦合模型，优化电池内部传热，确保电池全生命周期内的可靠性；④ 通过集成的热管理系统监测离子电池使用过程，防止热量积累造成热失控爆炸，提高离子电池的安全性。未来的发展趋势将聚焦于开发高能量密度、长寿命、高安全性的新型材料体系（如固态电解质、高容量正负极），并结合 AI 驱动的智能制造，优化从材料制备到电池包集成的全流程，使电池系统具备预测性维护能力，从而大幅提升其性能、安全性和可靠性，加速其在新能源汽车、智能电网等领域的广泛应用和可持续发展。

（5）关键工程结构材料长寿命安全服役加速评价方法与寿命预测

重大工业装备、基础设施和尖端国防装备等是国民经济发展与国家安全的基石。其关键工程结构材料常因在力学载荷、焊接残余应力、化学介质侵蚀与热循环等多场耦合环境下服役，易发生局部快速腐蚀和环境断裂而过早失效。随着装备性能参数和材料强度的不断提升，此类问题愈发凸显，严重制约其服役寿命和可靠性。发展高效、科学的失效评测与寿命预测方法，是保障重大工程长周期安全运行、推动装备技术迭代的技术前沿。当前研发主要集中在 4 个方面：① 长周期环境断裂试验、失效机理研究与数据积累；② 复杂环境-载荷耦合作用下的失效理论与寿命建模；③ 多模式、跨尺度失效过程的数值模拟；④ 基于 AI 与多源异构数据的服役行为智能预测方法。现有方法仍严重依赖长周期试验，评测效率低、理论模型成熟度不足。未来的研究重点将聚焦于服役行为加速评价方法与全寿命预测理论的深度融合，构建融合高通量在线动态监检测与数字孪生技术的智能评价体系，以实现关键材料与结构退变因素的快速识别、动态过程推演与智能预警，大幅提升寿命评估的效率与准确性。其将有力推动能源、

海洋工程、交通运输、智慧城市、国防设施等领域高品质制造与长寿命高可靠运行关键技术的发展。

(6) 高温复杂服役环境下辐射 / 热防护陶瓷涂层研发

高温复杂服役环境下辐射 / 热防护陶瓷涂层研发是支撑未来高超声速飞行器、新一代航空发动机与重型燃气轮机等大国重器性能跨越的核心材料技术,能在极端热-力-化耦合环境下实现高效隔热、热辐射屏蔽、多场环境(高温氧化、腐蚀、烧蚀等)防护,为金属、陶瓷基复合材料等热端部件防护涂层提供新材料体系,保障装备在高温 / 超高温环境下的服役可靠性。当前的研发主要聚焦3个方面:①发展 $>1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低热导率、低辐射透过率(辐射抑制)超高温复合陶瓷涂层,以解决传统涂层红外透过率高,透过的辐射能量直接加热基体致其超耐温极限的问题;②发展 $>2\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高辐射型抗氧化烧蚀涂层,保障飞行器生存能力与武器打击精度;③发展高温红外辐射与屏蔽耦合热光学数据库以及智能涂层设计,构建新型高温涂层材料设计所需的关键“数据底座”和国际通用基准,提升工程适用性与国际竞争力。未来发展态势呈现出多学科深度交叉融合的特征:材料基因工程将加速新型低导热率、高熵、自愈合、光热调控功能涂层成分的发掘;人工智能与数字化将赋能涂层设计—制备—服役全周期的仿真与优化;极端环境原位测试与表征技术将成为验证与迭代的关键。

(7) 机器学习辅助新型聚合物材料发现与理性设计

机器学习辅助新型聚合物材料发现与理性设计正以数据驱动与机理融合为核心,推动材料研发范式发生根本性变革。近年来,基于神经网络和生成对抗网络的算法已能够高效建立聚合物“组成-结构-性能”的跨尺度映射关系,实现高性能分子的生成与逆向设计。当前该领域聚焦两大关键方向:一是提升模型的可解释性与泛化能力,融合物理先验知识与多模态数据,打破对特定聚合物体系的依赖;二是构建自动化闭环研发系统,集成机器人高通量实验、主动学习与自适应优化策略,显著降低实验成本并加速材料验证迭代。未来,机器学习驱动的高分子开发将沿“通用平台-专用模型”双路径演进:通用大模型致力于覆盖多类别聚合物性能预测;专用模型则深入嵌段共聚物自组装、生物医用材料降解机理等特定场景,实现功能定制化设计。随着生成算法与合成技术的深度融合,机器学习将全面赋能从单体筛选、聚合路径优化到材料应用全链条,推动高分子材料向智能设计新范式跨越。

(8) 低品位锂资源绿色提取

随着电动汽车渗透率的不断提高,制造动力电池所需的锂盐的市场需求快速增长。锂辉石、高品位盐湖卤水等常规优质锂资源储量有限,无法满足快速增长的锂盐市场需求。锂储量更大的低品位锂资源,如低品位盐湖、石油卤水、海水、锂云母、锂黏土、提锂尾渣、电解铝的电解渣等,具有重大的开发潜力。低品位锂资源锂含量低、赋存状态复杂、伴生杂质多,提锂难度大、成本高,对提锂技术提出更高的要求。针对固相锂资源,研究重点包括低能耗矿相转化技术、高选择性浸出以及尾渣利用技术;针对液相锂资源,研究重点包括新型分离介质开发(新型吸附剂、萃取剂、膜材料等)及其相应的配套工艺。未来的提锂技术,将朝着多技术耦合集成以及更加精准高效的方向发展,如吸附与电化学结合可能会取代单一的吸附或者膜分离技术,精准萃取提锂

一步反萃直接得到产品的技术有望取代需要多步转化的技术路线。这些新技术的发展将提高低品位锂资源提取效率，推动新能源产业不断升级。

（9）高性能纤维增强复合材料跨尺度设计与集成开发

高性能纤维增强复合材料通过耦合微观（界面/材料）、介观（结构排布）和宏观（整体性能）各层级间的相互作用，实现性能与功能的协同优化，其开发旨在克服传统复合材料力学各向异性、功能单一及环境不可持续等局限，通过多尺度优化和集成工艺开发，在保持轻量化优势的同时，实现高韧性、功能化和可循环的协同突破，以满足复杂多变的应用需求。凭借其在航空航天、交通运输和民用工业等领域的广泛应用，高性能纤维增强复合材料已成为推动现代工业与科技发展的核心动力之一。目前，开发重点主要包括以下方面：① 发展多尺度建模与仿真技术，在设计域内对多种材料的分布进行优化，实现结构宏观拓扑、微观纤维方向和纤维疏密的并行优化设计；② 研究先进界面改性方法和精确制造工艺，以提升材料的韧性、功能性与可设计性；③ 开发纤维复合材料的低碳成型工艺，并深入理解损伤演化机制，实现材料性能与可持续性的协同突破。未来发展在于进一步实现智能化、多功能集成、极端环境适应性和全生命周期优化，以驱动材料在关键工程领域的颠覆性创新。

（10）极端环境冶金过程强化技术

面对全球资源约束趋紧和“双碳”目标带来的严峻挑战，传统冶金工业高能耗、高物耗、高污染的发展模式已难以为继，亟需颠覆性技术变革。极端环境冶金过程强化技术，将不再局限于对现有工艺的优化，而是着力于创造全新冶金范式，通过引入超高温、超高压、强磁场、等离子体、超重力、微尺度等极端物理化学条件，从根本上改变物质反应热力学与动力学路径，旨在突破传统冶金工艺瓶颈，推动行业绿色可持续发展，成为革命性工程前沿。该领域重点研究方向包括：① 揭示极端物理场（如等离子体、超快变温等）下金属原子/分子的运动、传递与反应规律，建立极端环境冶金反应新理论；② 发展等离子体直接还原等非碳冶金新方法，摆脱对化石能源的依赖，从源头解决碳排放问题；③ 探索微流控、超重力等技术在湿法冶金及复杂物料分离中的应用，实现反应过程的超高效强化与微型化、集成化；④ 研究激光、微波等局部赋能的原生矿物精准解离技术，大幅降低选冶过程的能耗与物耗。极端环境冶金过程强化技术旨在颠覆传统火法/湿法及“造渣”的冶金理念，通过在原子/分子尺度上精准调控反应过程，并结合先进检测、数字孪生与人工智能等技术，实现从实验室工艺向工业化的可控放大，为构建绿色、低碳、高效的新一代冶金技术体系提供理论基础与核心技术支撑。

（11）甲烷高效减排及高附加值化学品转化

甲烷是天然气的主要成分，既是全球能源体系中不可或缺的清洁高效能源载体，也是人为造成的仅次于二氧化碳的第二大温室气体，其20年全球升温潜势（GWP）为二氧化碳的82倍，对短期气候变暖的驱动作用尤为显著。随着全球气候变化加剧，甲烷减排已成为国际社会共识。开发甲烷梯级高效利用技术，有助于保障能源安全，推动工业领域绿色升级，实现高质量可持续发展。该领域未来的研究将聚焦以下方向：① 高效捕集技术——研发高效捕集材料（如功能性吸附剂、膜材料等），通过“材料性能优化—工艺参数耦合”的协同设计强化捕集效率，针对不

同场景的气源特性（如高浓度伴生气、煤矿瓦斯、生物沼气等）定制差异化的富集提纯方案，解决“低浓度甲烷难回收、高杂质甲烷难利用”的行业痛点；② 低成本高效催化剂——推动贵金属催化剂的减量化与性能强化（如单原子贵金属、合金催化剂等），在降低成本的同时提升催化活性；加速非贵金属催化剂（如稀土金属氧化物等）的研发与产业化，实现不同浓度甲烷混合气的高通量、低温、高选择性催化降解或转化；③ 新兴转化技术——发展生物转化（如嗜甲烷菌定向合成蛋白、生物甲烷制氢）、光催化转化、等离子体协同催化等新兴技术，进一步提升甲烷综合利用效率，推动技术从“实验室验证”向“工业化应用”跨越。

4.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

4.2.2.1 绿电—绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备

煤化工过程（如煤制甲醇、煤制烯烃等）依赖化石能源，碳排放强度高，亟需绿色转型。绿电（可再生能源电力）电解水制绿氢技术可实现零碳氢源供给，通过绿电—绿氢耦合煤化工，将绿氢作为原料或能源注入煤化工流程，替代传统煤焦气化或甲烷重整过程，可以从源头降低工艺碳排放。这一路径不仅是煤化工低碳化的核心解决方案，也是可再生能源消纳和氢能产业化的重要应用场景。实现绿电—绿氢—煤化工高效耦合的关键在于催化剂体系，其性能直接影响反应效率、产物选择性和过程经济性。由于绿氢引入将改变原料组成（如氢碳比）和工艺条件，可能导致传统催化剂活性下降或改变产物选择性，需重新设计适配绿氢体系的催化剂，实现绿氢高效利用与碳资源最大化转化。绿氢的间歇性、波动性会引起工况的频繁变换，对催化剂的动态工况耐久性和稳定性提出极高要求。因而，需要构建高效稳定的活性中心，分析其在复杂工况下的演变规律，建立非稳态反应动力学模型，创制动态自适应涉氢催化剂；针对波动特性与规律，建立进料气优化分配模型，动态调整氢碳比与流量，平抑剧烈波动。此外，攻克反应系统的柔性化与自适应控制，动态调节循环气量、分流比、反应温度及压力等关键参数，确保合成气组成始终维持在最佳催化反应区间，从而保护催化剂并维持高转化率，实现“绿电—绿氢—低碳化工”协同运行。

传统煤化工催化剂已发展数十年，以铜基甲醇合成催化剂、铁基费托催化剂等为代表，但均基于化石原料体系设计。随着绿氢概念的兴起，研究开始关注绿氢与煤化工的耦合潜力。从核心专利的主要产出国家来看，目前国内外进展主要集中在国内，远超美国、韩国、日本等（表 4.17）；因为技术竞争等因素，不同国家之间相互合作较少（图 4.10）。中国主要技术来源于中国神华煤制油化工有限公司、宁夏宝丰能源集团股份有限公司（以下简称宝丰能源）等（表 4.18），其中，宝丰能源的“太阳能电解水制氢耦合煤制烯烃”项目已实现部分绿氢替代，但催化剂仍沿用传统体系，未针对绿氢特性优化。因此，结合高通量计算与 AI 预测，加速催化剂组分筛选和构效关系解析，开发可响应 H_2/CO 比例变化的智能催化剂，通过结构自适应调控反应路径，实现特定产物高选择性成为目前研究趋势。主要机构间的合作网络如图 4.11 所示。

表 4.17 “绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	750	73.82	1 505	25.98	2.01
2	美国	69	6.79	2 683	46.32	38.88
3	韩国	47	4.63	130	2.24	2.77
4	日本	32	3.15	125	2.16	3.91
5	德国	18	1.77	315	5.44	17.50
6	加拿大	11	1.08	196	3.38	17.82
7	印度	10	0.98	15	0.26	1.50
8	澳大利亚	8	0.79	189	3.26	23.62
9	英国	7	0.69	72	1.24	10.29
10	法国	7	0.69	65	1.12	9.29

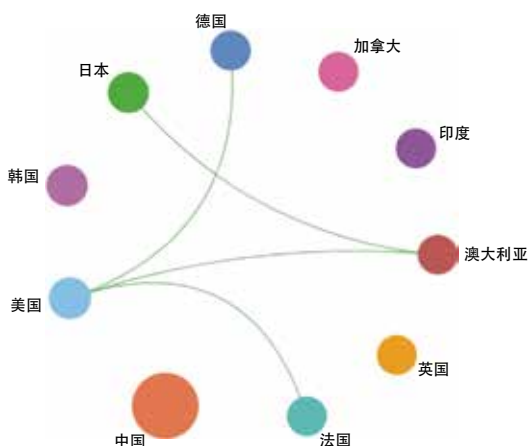


图 4.10 “绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 4.18 “绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国神华煤制油化工有限公司	118	11.61	84	1.45	0.71
2	宁夏宝丰能源集团股份有限公司	41	4.04	50	0.86	1.22
3	国能包头煤化工有限责任公司	21	2.07	7	0.12	0.33
4	神华工程技术有限公司	20	1.97	6	0.10	0.30
5	中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司	19	1.87	74	1.28	3.89
6	神华集团有限责任公司	18	1.77	15	0.26	0.83
7	浙江天禄环境科技有限公司	18	1.77	7	0.12	0.39
8	中国石油化工股份有限公司	13	1.28	45	0.78	3.46
9	国家电网有限公司	10	0.98	6	0.10	0.60
10	中国科学院大连化学物理研究所	9	0.89	95	1.64	10.56

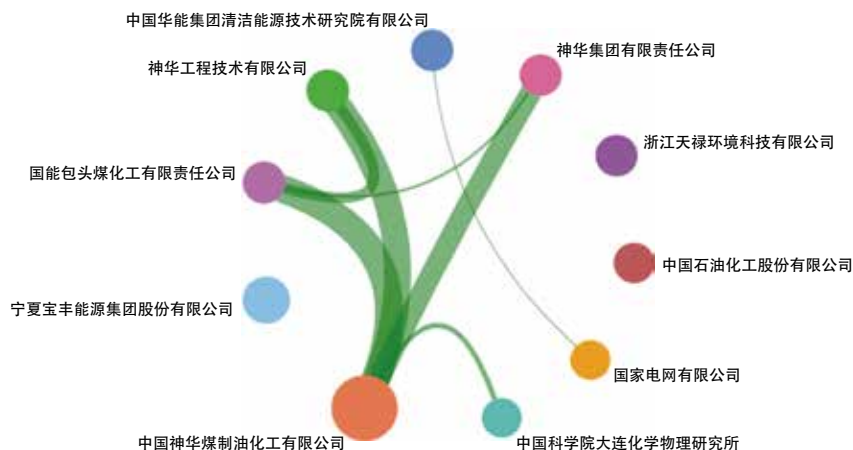


图 4.11 “绿电 – 绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备”工程开发前沿主要机构间的合作网络

绿电 – 绿氢耦合煤化工是重塑传统产业低碳竞争力的关键路径，而催化剂体系的设计与规模化制备是其中的技术制高点。当前需突破催化剂活性、选择性与稳定性的矛盾，并通过绿色、低成本的制备技术推动产业化落地。通过开发新型电极催化剂（如高熵合金、单原子催化剂等），提升电解槽在宽功率波动条件下的响应速度与效率稳定性，重点解决动态工况下电极催化剂的衰减问题，显著延长其使用寿命；同时研制金属 – 酸性双功能催化剂，实现煤分子中典型桥键的高选择性断裂，推动煤基资源向高附加值化学品和清洁燃料的定向转化，形成适用于规模化生产的氢 – 煤共转化工艺包，支撑“绿氢 + 煤化工”集成系统的稳定运行与工程示范。聚焦绿氢制取与资源高效加氢转化耦合技术体系构建，系统开展绿氢驱动、高效催化剂的开发和关键技术的攻关，深度融合系统优化和智能控制等多学科交叉优势，联合能源化工龙头企业，形成可复制推广的清洁能源化工转型解决方案，将为煤化工行业低碳变革提供关键技术支撑。

未来 5~10 年，绿电 – 绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备技术将聚焦于催化剂稳定性提升、催化效率优化及智能化系统融合，推动煤化工行业的低碳转型和绿色发展（图 4.12）。① 高熵合金材料通过多金属成分的合理组合，显著提高催化剂的活性位点和稳定性。未来，将结合电子缓冲机制，优化催化剂在动态工况下的稳定性和反应速度，突破现有催化剂在极端工况下的耐久性瓶颈，从而提升煤化工过程中的反应效率和稳定性。此举将为高效、稳定的煤化工催化剂体系奠定基础。② 通过金属 – 酸性双功能催化剂的协同作用，实现煤分子的定向重构与选择性断裂碳氢键。该技术将显著提高煤化工中煤资源的转化效率和选择性，推动煤化工过程向高效、低碳化方向转型。通过精确调控催化剂的金属与酸性位点的相互作用，实现煤分子在分子层面的高效转化和增值。③ 未来将实现绿电、绿氢与煤化工过程的协同运行，通过智能化控制系统实时调节反应条件，优化催化剂工作状态，提高能源利用效率并降低碳排放。通过系统优化，确保催化剂在不同工况下的高效运行，并推动煤化工产业向低碳化、智能化转型。智能化系统的融合将增强煤化工过程中绿色能源的有效应用，推动传统煤化工向绿色、智能化产业形态转型。此外，通过绿电驱动 CO_2 资源化和高值化利用，将成为实现煤化工低碳转型的

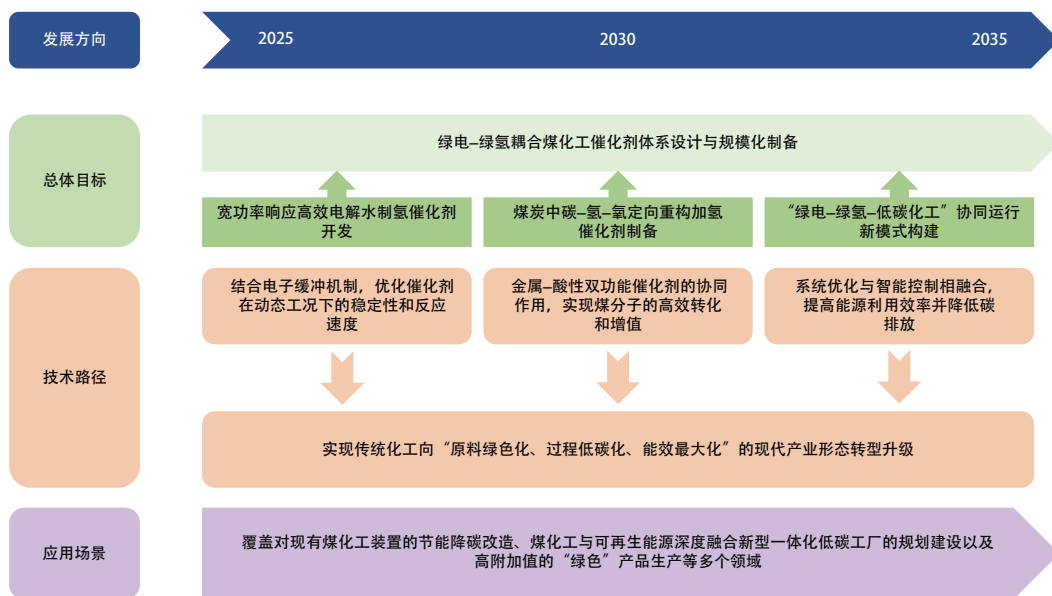


图 4.12 “绿电-绿氢耦合煤化工催化剂体系设计与规模化制备”工程开发前沿的发展路线

关键路径。CO₂ 电解技术能够将二氧化碳转化为绿色合成气，进一步制备可持续航空燃料、甲醇、乙醇等液体燃料，这些燃料不仅可以替代传统石化燃料，还能显著减少碳排放，推动航空和运输行业的低碳化。CO₂ 电解还可用于制备高附加值氘代甲酸、氘代乙醇等化学品，这些产品在医药合成、同位素示踪和核磁共振分析等领域具有广泛应用。这些技术创新不仅能有效减少煤化工过程中 CO₂ 的排放，还能将其转化为高附加值的化学品和燃料，为实现碳中和目标、推动煤化工绿色转型提供强有力的技术支撑，同时为全球能源与化工产业的可持续发展提供重要保障。

4.2.2.2 新能源动力电池绿色循环利用

根据国际能源署的预测，到 2030 年，全球动力电池的保有量将达到 3 000 GW·h，同时全球动力电池的年退役量也将突破 1 200 万吨。退役动力电池中富含锂、镍、钴、铜等关键金属，其含量远高于原生矿产资源，相当于一座巨型的“城市矿山”。同时，相比于开采原生矿产，回收利用动力电池能有效减少碳排放。数据显示，再生镍、钴、锂的碳排放较原材料可分别降低 76%、84% 和 92%。此外，退役电池中还含有有机物、氟、磷等有毒物质，对环境的危害极为严重。因此，退役动力电池的绿色循环利用可有效降低原生矿产资源消耗、支撑新能源产业绿色发展，并助力“双碳”目标的实现。

近年来，退役新能源动力电池的回收受到全球范围内的广泛关注，中国政府高度重视退役动力电池的循环利用。2025 年 2 月，国务院常务会议审议通过《健全新能源动力电池回收利用体系行动方案》。会议指出，当前中国新能源汽车动力电池已进入规模化退役阶段，全面提升动力电池回收利用能力和水平尤为重要。美国 2021 年通过《基础设施投资与就业法案》，提供 1.92 亿美元专项资金支持电池回收技术研发。欧盟 2023 年实施的《电池与废电池法规》则对电池产

品中再生材料的比例以及全生命周期的碳足迹进行了严格的限定。

在全球范围内，动力电池绿色循环利用呈现东亚、北美、欧洲三足鼎立的技术创新格局，由表 4.19 可以看出，中国在新能源动力电池绿色循环利用领域的专利数量处于领先地位，其余专利由欧美、日本、韩国等发达国家和地区产出。表 4.20 则说明中国专利技术在高校和企业均有产出，体现电池回收领域在产学研一体化上发展均衡。此外，中国积极参与全球技术交流，在以美国为核心的技术合作网络中占据一席之地，但仍需扩大国际影响力，国内外机构协作有待加强联结，进一步推动技术发展（图 4.13 和图 4.14）。

表 4.19 “新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	361	38.24	2 244	26.91	6.22
2	美国	241	25.53	3 014	36.14	12.51
3	日本	113	11.97	1 086	13.02	9.61
4	韩国	99	10.49	580	6.95	5.86
5	德国	29	3.07	340	4.08	11.72
6	加拿大	24	2.54	414	4.96	17.25
7	法国	18	1.91	75	0.90	4.17
8	英国	14	1.48	164	1.97	11.71
9	以色列	11	1.17	112	1.34	10.18
10	澳大利亚	6	0.64	40	0.48	6.67

表 4.20 “新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	LG 化学公司	36	3.81	213	2.55	5.92
2	广东邦普循环科技有限公司	30	3.18	227	2.72	7.57
3	丰田汽车公司	27	2.86	118	1.41	4.37
4	SK 创新公司	21	2.22	135	1.62	6.43
5	中南大学	13	1.38	101	1.21	7.77
6	伍斯特理工学院	12	1.27	244	2.93	20.33
7	艾森德元素公司	12	1.27	33	0.40	2.75
8	新日矿金属株式会社	11	1.17	270	3.24	24.55
9	通用汽车全球技术运营有限责任公司	11	1.17	100	1.20	9.09
10	巴斯夫欧洲公司	10	1.06	169	2.03	16.90

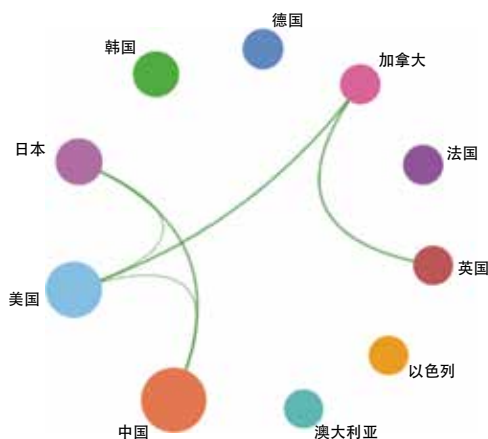


图 4.13 “新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿主要国家间的合作网络

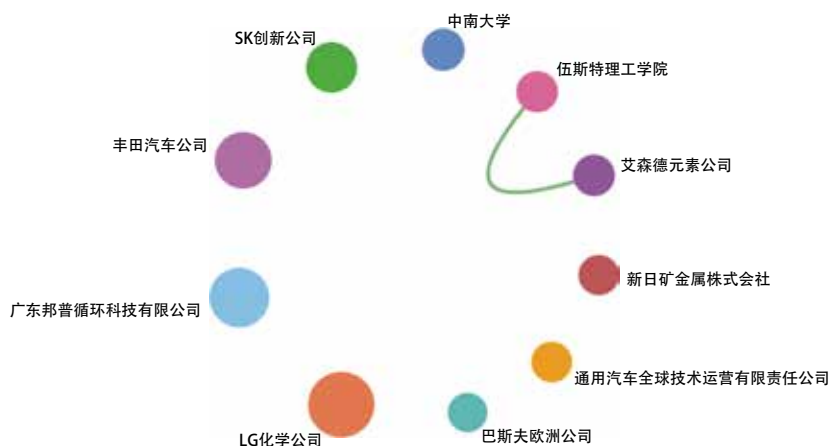


图 4.14 “新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿主要机构间的合作网络

未来动力电池绿色循环利用产业将面临大规模技术更新和产能扩张。图 4.15 为“新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿的发展路线，按各个技术环节具体为：① 基于人工智能与大数据技术，开发退役动力电池快速精准检测与智能化梯次利用技术，实现高精度、智能化、无损检测，提升梯次利用效率 and 安全性；② 利用 AI 与机械臂联动控制技术，开发异构兼容的退役锂电池精准识别与智能拆解技术；通过智能仿生机器人搭建图像识别控制系统，实现预处理工序全程无人化、自动化运行，达到拆解步骤精细化和筛分技术精准化，为后续湿法冶金或修复再生流程提供高纯度极粉；③ 现有的三元与磷酸铁锂黑粉的湿法工序均存在试剂消耗量大、流程冗长、废水产出量大等共性问题，需开发高选择性与可循环的浸出体系，并研发短流程制备电池前驱体、低浓度废液靶向提锂、硫酸钠高值转化消纳等技术；④ 精细化分选将大幅促进修复路线的发展，开发多源异构废料的均一化修复、石墨及硅碳材料的深度净化与低成本修复、升级再造制备高性能电池材料等技术，实现修复再生路线的大规模产业化应用；⑤ 研发钠离子电池、固态电池、锂硫电池等新型电池体系的循环利用技术。

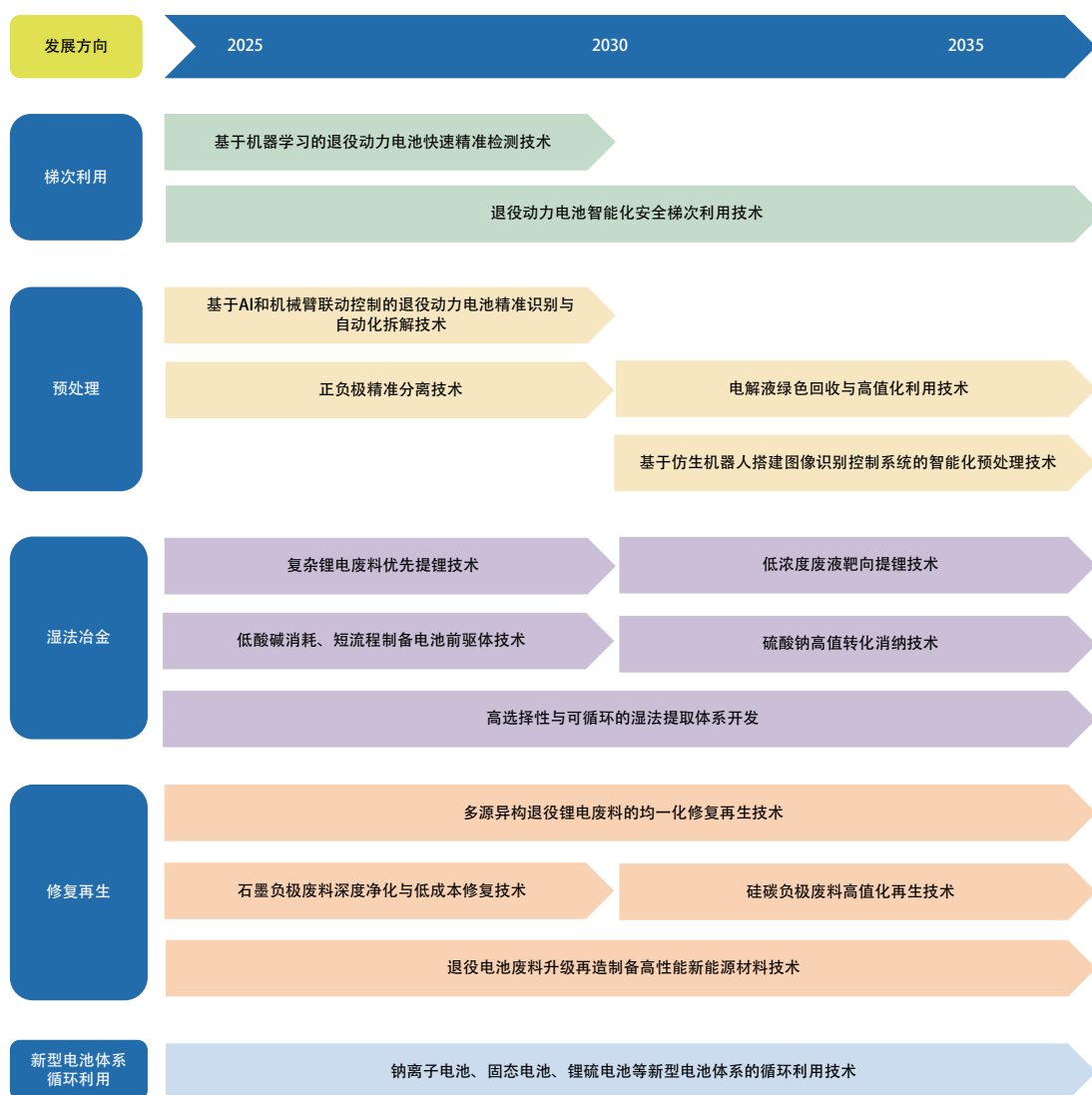


图 4.15 “新能源动力电池绿色循环利用”工程开发前沿的发展路线

4.2.2.3 工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品

在全球“双碳”战略背景下，工业 CO₂ 废气的资源化利用面临一个核心的结构性挑战。工业 CO₂ 废气主要可分为两类：一类是来自炼钢厂等高炉、转炉的富含 CO 和 H₂ 等高能量还原性组分且不含氧的工业 CO₂ 废气，是一种相对易于利用的“资源型尾气”；另一类是前一类气体经加氧燃烧处理后，或直接来自电厂烟道气的 CO/H₂ 含量极低、以 CO₂ 为主的含氧无价值废气。后者体量更大，占工业尾气总量的 60% 以上，区域分布广泛，现有研究中少有行之有效的处理技术。基于此，亟待提出超越单一技术路线、实现厌氧与好氧过程整合与协同的多模式生物转化的策略，综合利用这两类工业 CO₂ 废气，并匹配多元的需求和场景。厌氧模式是当前处理第一类“资源型尾气”的主流商业化技术。以朗泽科技（LanzaTech）及其在中国的合作伙伴首钢朗泽以及巨鹏生物等为代表，利用杨氏梭菌（*Clostridium ljungdahlii*）等厌氧微生物，已逐步实现万吨级

燃料乙醇和菌体蛋白的生产，显示了工业 CO₂ 废气生物转化的巨大潜力。而好氧模式主要是利用小球藻（*Chlorella vulgaris*）等好氧或兼性光能异养微生物，直接在含氧环境下处理以 CO₂ 为主的工业废气。

在产品方面，以燃料乙醇为代表的大宗化学品，其市场价值难以完全覆盖高昂的固定资产投资和运营成本，极大地限制了技术路线的普适性和经济竞争力。多模式生物转化，其核心目标不仅在于实现对体量更庞大的工业 CO₂ 废气的利用，更在于驱动产品组合向高附加值转化的战略性升级。一方面利用 CO₂ 高效合成高价值蛋白，响应保障国家粮食安全的战略意义；另一方面通过多元化的微生物代谢途径生产更为复杂的高值化产品，以满足农业、食品、医药、种植养殖等领域对高品质原料的需求，推动相关产业的升级和附加值提升，为 CO₂ 的资源化利用构建真正可持续发展的商业模式。

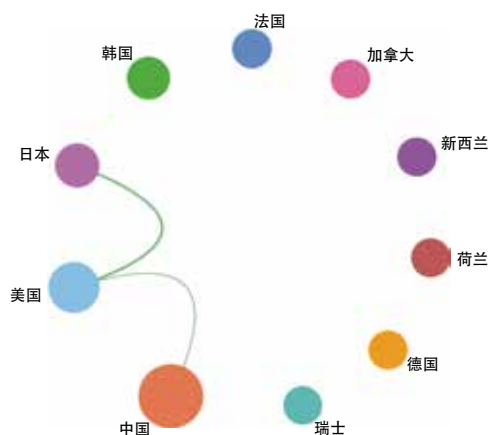
专利和创新生态的全球分布进一步映射出各国在该领域的竞争格局（表 4.21、表 4.22 和图 4.16）。中国以 266 件核心专利公开量（占比为 45.78%）位居全球首位，专利产出主要集中在高校、研究院所和新兴企业，显示出广泛的技术布局和政策推动力。然而，从专利平均被引数和技术原创性看，美国专利总数（131 件）虽不及中国，但以 3 073 次被引和 23.46 的平均被引数长期主导全球技术影响力。日本、加拿大、新西兰、荷兰等国家在部分细分方向上展现出高质量原创技术，尤其新西兰等国在少数高影响力专利上的突破尤为突出。机构层面，朗泽科技、基弗迪、吉诺马蒂卡等国际企业凭借高平均被引数和专利影响力成为技术与产业化主力，国际头部机构通过跨国合作和知识产权协同，加速了技术的全球扩散与落地。中国本土企业与高校科研院所等（如巨鹏生物、同济大学、大连理工大学）在专利数量上表现活跃，但整体影响力与国际龙头仍存在一定差距，在未来有较大的发展空间。未来，随着技术平台持续完善和应用场景不断拓展，跨区域、跨领域的协同创新将进一步提升多模式生物转化体系的工程化水平和全球影响力。

表 4.21 “工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	266	45.78	561	11.43	2.11
2	美国	131	22.55	3 073	62.64	23.46
3	日本	62	10.67	523	10.66	8.44
4	韩国	47	8.09	97	1.98	2.06
5	法国	12	2.07	64	1.30	5.33
6	加拿大	10	1.72	190	3.87	19.00
7	新西兰	9	1.55	422	8.60	46.89
8	荷兰	8	1.38	108	2.20	13.50
9	德国	8	1.38	49	1.00	6.12
10	瑞士	4	0.69	18	0.37	4.50

表 4.22 “工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	朗泽科技公司	33	5.68	937	19.10	28.39
2	基弗迪公司	13	2.24	563	11.48	43.31
3	积水化学工业株式会社	10	1.72	40	0.82	4.00
4	伊欧根公司	8	1.38	132	2.69	16.50
5	吉诺马蒂卡公司	7	1.20	722	14.72	103.14
6	巨鹏生物（香港）有限公司	5	0.86	147	3.00	29.40
7	健康生物株式会社	5	0.86	15	0.31	3.00
8	同济大学	5	0.86	13	0.26	2.60
9	韩国科学技术研究院	5	0.86	10	0.20	2.00
10	大连理工大学	5	0.86	7	0.14	1.40

图 4.16 “工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品”工程开发前沿主要国家间的合作网络

CO₂ 生物转化技术从实验室向大规模产业化过渡面临诸多挑战，包括气液传质效率低下、能量利用效率不高、产物合成效率偏低等问题。展望未来 5~10 年（图 4.17），解决这些问题对全面提升反应器产能、系统长期运行稳定性以及整体工业技术经济可行性至关重要。首先，通过优良微生物菌株的筛选与代谢工程改造，开发出性能稳定、效率优异的工业级生物催化剂。这一适应性工程需确保菌株能在工业生物反应器的苛刻环境中（具有高细胞密度、高剪切应力、高产物浓度等特征）实现高稳定性与高效率运行。在此基础上，工艺优化需转向微观尺度的气液传质强化以及生物转化过程的智能调控，这是解决传质与效率瓶颈的核心工程策略。通过反应器设计与过程强化技术，可为工程菌株营造最优操作环境，确保气态底物被高效捕获与利用。同时，采用先进的在线监测与智能控制系统，对整个复杂生物过程进行精准调控与动态优化，这对保障长期运行稳定性、提升反应器产能至关重要，也是让工程菌株的理论潜力在大规模工业装置中充分发挥的关键。最后，为进一步提高整体系统效率与经济性，采用“多模式策略”，即通过厌氧与好氧微生物的顺序分工及协同利用实现高效转化。这一策略类似于构建一条高效微生物生产线：不

同功能的微生物在各自最优环境中协作，共同分解复杂的合成任务。该系统集成策略不仅能有效提升能量利用效率与最终产物合成效率，还可构建灵活的产物升级矩阵。依托这一集成框架，反应器产能与长期运行稳定性得到系统性提升，最终通过推动高附加值产品生产及实现工业价值链的绿色转型，确保该技术具备整体工业经济可行性。随着技术的逐步成熟，应用场景将覆盖绿色化工、生物材料、食品蛋白、医药健康、农业生物肥料等多个领域，推动传统化工、能源、材料产业链的绿色升级。随着技术突破和产业链完善，以 CO₂ 为主的工业废气的多模式生物转化有望成为“负碳制造”与绿色循环经济的支撑力量，引领全球绿色制造和可持续发展新纪元。

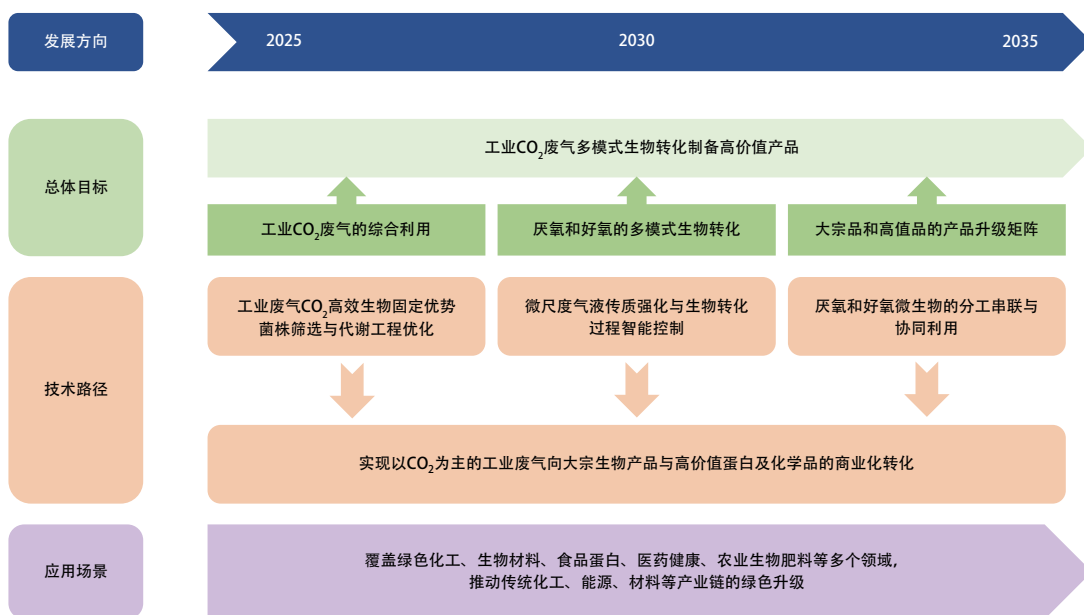


图 4.17 “工业 CO₂ 废气多模式生物转化制备高价值产品” 工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：谭天伟 元英进

工作组：

联络指导：马新宾 何朝辉 涂 璇

项目秘书：程路丽 黄耀东 李艳妮 朱晓文

执笔组：

陈 霄 程 驰 侯军刚 胡国平 胡平安 胡文吉豪 黄守莹 康 巍 李茂帅 李 政

李兴亚 刘 东 刘付朋 刘智勇 麦立强 牛 慧 王 聪 王海鹰 王亚明 魏奎先
薛 闯 颜 旭 姚昌国 张家靛 张 磊 张 生 祝 薇 朱晓文

数据分析组:

北京航空航天大学

邓 元 王 聪 祝 薇 包书骋 胡少雄 黄 悦 邱 天 张青青 周 曼

北京化工大学

高彦静

北京科技大学

刘智勇 张家靛

重庆大学

党 杰

大连理工大学

陈 霄 程 驰 侯军刚 姜晓滨 康 巍 牛 慧 彭 冲 薛 闯 杨 赫 于 畅
张 磊 张新富

哈尔滨工业大学

胡平安 李达鑫 李 洋 王亚明 肖海英 周 玉

江西理工大学

刘付朋

昆明理工大学

魏奎先

天津大学

柴立元 黄守莹 李茂帅 王 娜 张 生

郑州大学

李永立

中国宝武中央研究院

代铭玉 孙 竹 王 媛 姚昌国

中国科学技术大学

李兴亚 刘 东

中国科学院赣江创新研究院

陈庆军 胡国平 王 路 张 绘

中国科学院过程工程研究所

李 政 阎文艺

中南大学

胡文吉豪 刘 恢 王海鹰 颜 旭



第五章

能源与矿业工程前沿



5.1 工程研究前沿

5.1.1 Top 12 工程研究前沿发展态势

能源与矿业工程领域组研判得到的 Top 12 工程研究前沿见表 5.1，涵盖能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程 4 个学科。其中，“人工智能辅助能源材料设计”“低成本水系电池关键材料研究”“深海 CO₂ 水合物固态规模化封存技术”属于能源和电气科学技术与工程领域；“核聚变用高温超导磁体研究”“超临界 CO₂ 循环的铅冷微堆等第四代核电技术的应用”“核电站智能诊断技术”属于核科学技术与工程领域；“基于大数据的成矿预测技术”“超临界 CO₂ 致裂页岩储层增渗技术”“CO₂ 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术”属于地质资源科学技术与工程领域；“非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”“多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究”“煤层气多相流动规律及对产能提升的作用机制”属于矿业科学技术与工程领域。2019—2024 年各研究前沿相关核心论文的发表情况见表 5.2。

表 5.1 能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	人工智能辅助能源材料设计	506	14 885	29.42	2022.5
2	核聚变用高温超导磁体研究	402	4 835	12.03	2022.0
3	基于大数据的成矿预测技术	210	3 586	17.08	2021.4
4	非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究	724	12 839	17.73	2021.8
5	低成本水系电池关键材料研究	577	150 763	261.29	2020.7
6	深海 CO ₂ 水合物固态规模化封存技术	98	1 522	15.53	2021.9
7	超临界 CO ₂ 循环的铅冷微堆等第四代核电技术的应用	1 411	26 084	18.49	2021.8
8	核电站智能诊断技术	264	3 190	12.08	2022.2
9	超临界 CO ₂ 致裂页岩储层增渗技术	691	13 661	19.77	2021.8
10	CO ₂ 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术	357	6 840	19.16	2021.8
11	多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究	436	3 791	8.69	2022.6
12	煤层气多相流动规律及对产能提升的作用机制	161	3 246	20.16	2021.3

注：前沿来源包括三类，即数据挖掘、专家提名、数据挖掘+专家提名，前沿 1、3、5、6、9、10 为专家提名，其余为数据挖掘+专家提名。

表 5.2 能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	人工智能辅助能源材料设计	24	47	61	77	102	195
2	核聚变用高温超导磁体研究	49	48	57	66	71	111
3	基于大数据的成矿预测技术	53	18	20	27	25	64
4	非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究	91	91	111	150	123	158
5	低成本水系电池关键材料研究	126	158	139	103	43	8
6	深海 CO ₂ 水合物固态规模化封存技术	15	10	12	18	15	28
7	超临界 CO ₂ 循环的铅冷微堆等第四代核电技术的应用	173	209	206	243	256	324
8	核电站智能诊断技术	14	36	40	45	52	77
9	超临界 CO ₂ 致裂页岩储层增渗技术	91	93	115	116	111	165
10	CO ₂ 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术	58	37	49	68	63	82
11	多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究	26	30	45	72	74	189
12	煤层气多相流动规律及对产能提升的作用机制	48	12	12	19	19	48

(1) 人工智能辅助能源材料设计

人工智能（AI）辅助能源材料设计是 AI 与材料科学交叉融合的一个快速发展的前沿领域，指利用 AI 技术（如机器学习、深度学习、生成模型和大语言模型等），结合材料科学、计算化学和物理学原理，加速能源相关材料的发现、优化与开发过程。其总体目标是通过数据驱动和智能化方法，设计出用于能量存储与转换、催化反应以及性能优化的高效、低成本能源材料。该领域的主要研究方向和发展趋势包括：① 从“小数据”向“大数据”范式转变——早期依赖迁移学习解决数据稀缺问题，现转向大数据创造，利用开放数据库和云平台加速材料发现，嵌入物理知识以提升模型可解释性；② 模型驱动与数据驱动融合——结合深度学习与物理 / 化学理论，构建混合模型预测复杂行为，如电池寿命和反应路径；③ 高通量与自动化实验——集成机器人与 AI 智能体，实现自主化材料设计，缩短能源材料开发周期。

(2) 核聚变用高温超导磁体研究

在未来清洁能源体系中，核聚变被视为解决能源与环境问题的终极途径，而高温超导（HTS）磁体的出现为实现紧凑型、高场强的聚变装置提供了革命性的技术支撑。相较于传统低温超导材料（NbTi、Nb₃Sn），HTS 材料（如 REBCO、Bi-2212 等）具备更高的临界温度、临界电流密度和耐受磁场强度上限，使得磁体能够在 20 T 以上稳定工作，从而显著提升等离子体约束能力，减小装置体积和成本，并拓展运行工况的安全裕度。这不仅为磁约束聚变装置（如托卡马克与仿星器）的紧凑化和商用化提供了可能，也为探索新型磁约束方案开辟了道路。

当前研究方向主要集中在 3 个方面：① 材料与导体开发，包括高性能 REBCO 涂层导体、长

长度 Bi-2212 线材及其稳定性与均匀性研究；② 磁体结构与工程设计，涉及高场环向场（TF）、中心螺线管（CS）、极向场（PF）线圈的绕制工艺、应力管理和电磁-力学耦合分析，以及无绝缘（NI）、部分绝缘（PI）等新型绕线技术在聚变条件下的应用；③ 运行与保护技术，包括交流损耗控制、屏蔽电流效应抑制、热稳定性与快速保护策略，以及低温冷却与整体系统集成方案。通过上述研究，科学家正逐步解决 HTS 在强电磁负载与复杂三维结构下的可行性和可靠性问题。

（3）基于大数据的成矿预测技术

随着露头矿和浅表矿被勘探殆尽，矿床的发现已变得越来越困难。例如，据标普全球市场财智（S&P Global Market Intelligence）统计，1990—2023 年全球共发现大型铜矿 239 个，而最近 5 年却只发现 4 个。相较于传统的找矿勘察，基于大数据 + 人工智能的成矿预测技术在成矿理论的指导下，通过挖掘、提取和融合多源、多尺度、多维地学大数据中的成矿有利信息，对预测单位的成矿有利度、勘探风险及资源量进行定位、定量、定概率计算，实现三维成矿预测与靶区圈定。成矿有利信息的数据挖掘、提取、融合是三维成矿预测的关键环节，随着计算机科学的发展，其已从传统静态的统计分析向动态的成矿过程数值模拟、大数据 + 人工智能的方向发展。例如，在中国华北重点金矿集区的资源预测评价中通过融合地质大数据与深度机器学习已圈定了多处找矿靶区。此外，国外研究机构和资本市场也正加大对大数据 + 人工智能成矿预测的投入，美国科博尔德金属（KoBold Metal）公司更是利用人工智能找矿技术在赞比亚发现了世界级的 Mingomba 铜矿。这些成矿预测理论技术的创新与应用，极大地提高了找矿过程中智能化空间决策水平与效率，是未来全球找矿勘查领域的必争高地。

（4）非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究

非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究是通过智能化技术与地质工程深度融合，突破页岩气、致密油等低渗难采资源开发瓶颈的系统性工程，从而创新性实现低成本、高采收率、低环境影响。其主要研究方向包括：① 复杂储层智能化表征及甜点精准预测方法——整合地震、测井、生产动态等数据，通过机器学习方法构建高精度储层三维模型，基于历史生产数据训练智能模型，实现区域甜点精准预测；② 开发方案高效决策及生产方式智能优化——基于大模型与物联网实时监测井口压力、流量、含水率等数据，结合大数据分析实现生产参数（如排量、井底压力）的动态调整，进而高效提采；③ 新型提采工艺及智能提采装备开发——研发超临界 CO₂ 压裂、自生酸压裂、脉冲压裂等低伤害提采方法，研制自动化提采装备等。该研究领域主要呈现三大发展趋势：一是智能化深度渗透，如数字孪生平台开发应用；二是绿色低碳转型，如电驱压裂设备研发、生物可降解压裂液研制等；三是跨学科技术协同突破，如纳米流体驱油技术等。

（5）低成本水系电池关键材料研究

在全球能源结构加速向可再生绿色能源转型的大背景下，低成本安全储能电池技术是实现“双碳”目标的关键技术之一。目前商用的锂离子电池和钠离子电池因使用了易燃易爆、有毒有害的有机电解液，无法突破高能量密度与本征安全的矛盾；金属锂固态电池无法破解低成本、长寿命的瓶颈。因此，现有的化学储能电池技术均无法满足高能量密度、长循环寿命、本征安全、低成本、环境友好等要求。

水系锌离子储能体系因其体积能量密度高、本征安全性好、环境友好和成本低廉等优势,在大规模储能领域展现出巨大潜力。然而,水系电池受限于正极、电解液、隔膜等关键材料,仍面临着循环稳定性差、质量能量密度较低等挑战,尚未实现规模化商业应用。为应对上述挑战,需研究水系锌离子电池的反应机理和动力学过程,研发低成本、高容量、长寿命的正极材料,设计宽电化学窗口、长寿命的水系电解液,研发高离子迁移、高力学性能的隔膜材料,设计器件结构,完善制造工艺。随着技术成熟和规模化生产,水系锌离子电池的成本将持续下降。其在大规模风电/光伏储能、家用分布式储能、低速电动车、两轮电动自行车、电网备用电源、5G 基站等对安全要求高、需快速充放电的场景中拥有广阔的应用市场。

(6) 深海 CO₂ 水合物固态规模化封存技术

深海 CO₂ 水合物固态规模化封存技术是指利用深海高压低温环境下 CO₂ 自然形成笼型水合物的特性,将 CO₂ 规模性注入海床或浅层沉积层,使其逐步形成 CO₂ 水合物并实现长期稳定封存。该技术封存潜力大、效果显著,其核心机理和促进方法已得到初步原理性验证。该领域的研究主要聚焦于 4 个关键方向:① CO₂ 相态转化研究——致力于探究 CO₂ 临界相态转化机制,建立海洋环境下 CO₂ 水合物快速形成碳矿的方法;② 深海浅层 CO₂ 高效注入及规模固化研究——旨在揭示沉积物孔隙中液态 CO₂ 的迁移规律,建立 CO₂ 高效注入方法,强化 CO₂ 水合物规模化生成;③ “地层-海底-水体”多维声-光-电一体化监测技术——融合地震监测、传感器阵列和声波测试等多种技术手段,构建全方位的 CO₂ 封存状态、运移、逸散监测体系;④ 风险评价和规模化封存技术工艺及装备研发——重点攻关固化封存风险评价体系,实现海上液态 CO₂ 注入关键技术与装备自主可控,支撑形成百万吨级到千万吨级 CO₂ 年封存能力。未来,该技术有望与海洋地质碳封存相结合,构建覆盖深海多层系、多模式的海洋 CO₂ 封存体系,从而显著提升其经济性与规模化应用潜力。

(7) 超临界 CO₂ 循环的铅冷微堆等第四代核电技术的应用

基于 21 世纪初第四代核能系统国际论坛(GIF)提出的可持续性、经济性、安全性与可靠性、废物最小化、防扩散和实体保护六大领域的技术目标及相关评估指标,第四代核电技术遵循“零功率装置—原型堆—示范堆—商业堆”的研发和试验验证路径,成为国际上小型和微型核反应堆开发热点堆型,有望成为核能创新领域的“游戏改变者”。

GIF 对 130 余种先进核能概念进行综合对比,重点考虑安全性、经济性、核资源最佳利用、核废物最小化等与堆型选择和设计密切相关的特性指标,最终锁定 6 种最具发展前景的候选堆型:一是钠冷快堆,根据技术成熟度和工业发展水平,有望利用自裂变核能时代起积累至今的裂变及增殖核材料,以提供电能;二是超高温气冷堆,具有提供具有多种工业用途的高温热能的潜力,可在 700~950 ℃ 的堆芯出口温度范围内供应核热和电力,可以实现高温制氢;三是铅冷快堆,铅或铅合金中子吸收和慢化能力弱,反应堆中子经济性好,使其具有更高的核废物嬗变和核燃料增殖能力,结合超临界 CO₂ 循环可实现高热电转化效率;四是钍基熔盐堆,以氟化盐与溶解 U、Pu、Th 等的氟化物熔融混合后作燃料,在 600~700 ℃ 高温和低压下运行,探索钍作为核燃料应用;此外,还包括气冷快堆和超临界水冷堆。

第四代核电技术是综合性能大幅提升的革新性核能技术，离不开先进燃料、材料等一系列共性技术的突破，特别是能够实现快中子辐照环境下材料考验的超高通量反应堆，其建设将是决定未来燃料材料能否成熟和第四代核电技术能否落地的关键。

(8) 核电站智能诊断技术

近年来，人工智能技术被广泛应用于核电领域，以促进核电厂通过实现自诊断、自寻优、自适应，最终达到提高生产效率、降低运行成本、提升运行安全性的目的，包括故障诊断、瞬态工况识别和核电维修机器人 3 个典型应用。第一，建立结合神经网络和基于规则的实时专家系统的核反应堆混合监测系统，通过神经网络进行核电厂动态建模，通过实时专家系统成功显示系统运行状态。针对核电厂可能出现的不同类型故障，利用人工神经网络、数据融合和符号有向图等技术构建混合智能模糊神经网络，对核电厂的不同故障进行检测和识别；对组件等核心部件进行智能诊断，降低潜在的核电厂安全威胁。第二，瞬态工况识别，通过自动诊断来提升瞬态工况识别的准确性和速度，利用动态神经网络聚合模型对瞬态工况进行检测、分类和预测，并通过分类器获得瞬态工况的类型、位置和严重程度。第三，核电维修机器人，核电设备复杂且具有放射性，在人员不可到达或操作精度要求较高的区域，通过远程操控机器人完成对设备的检测、维修、处理等操作在核电维修领域尤为重要。

通过对模型、算法和系统的可解释性研究，实现知识 - 数据双向驱动的可信、可靠人工智能技术，是该交叉领域的研究趋势，这一趋势也将推动人工智能产业达到新的应用高度，助力核电行业在确保安全的前提下实现数字化转型和智能化升级。

(9) 超临界 CO₂ 致裂页岩储层增渗技术

超临界 CO₂ 致裂页岩储层增渗技术以超临界 CO₂ 作为压裂液，通过物理压裂在页岩储层中形成复杂缝网，并利用超临界 CO₂ 特有的置换吸附、溶解有机质等物理化学特性，大幅提高页岩储层的渗流能力，是一种节水、环保、高效的新型页岩气增产技术。目前，该领域的研究主要集中在以下 4 个关键方向：① 超临界 CO₂ 在页岩储层中的裂缝起裂、扩展机制及其影响因素研究；② 超临界 CO₂ 与页岩储层之间的物理化学作用机理及其对改造效果的影响研究；③ 超临界 CO₂ 压裂配套装备与压裂材料的研发，重点包括大排量、超高压、耐腐蚀的 CO₂ 泵送设备的设计与制造，以及高性能 CO₂ 增稠剂、减阻剂等压裂液添加剂的开发；④ 超临界 CO₂ 压裂施工参数的优化设计与智能控制技术研究，依托数值模拟、实时监测与大数据分析，实现压裂过程的精准调控与动态优化。未来该技术的研发将更加注重与材料科学、地球物理学、化学等学科的深度融合，进一步发展和完善数值模拟方法，并积极推进现场试验，有望实现该技术的大规模商业化应用，为全球页岩气资源的高效开发和能源绿色转型提供有力支撑。

(10) CO₂ 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术

CO₂ 压裂裂缝扩展机制及碳封存技术是以超临界或液态 CO₂ 作为压裂液，通过高压注入储层，以相变膨胀、低黏度渗透和竞争吸附为核心，诱导岩石破裂并形成多尺度裂缝网络，通过地质构造封闭、溶解扩散和矿物碳酸化三重机制实现碳封存。该领域的研究主要聚焦于 4 个关键方向：

① 超临界 CO₂ 压裂过程中温度场、流体场、岩石力学场的动态耦合作用，包括低黏度流体诱发

复杂裂缝网络的机理以及起裂压力骤降现象的物理原理；② 量化 CO_2 -矿物反应对岩石断裂韧性的降解规律，研究矿物沉淀/溶解对裂缝长期导流能力的影响机制，以评估封存稳定性；③ 开发基于真实地质结构的数值模型，整合裂缝粗糙度、尺寸效应和非均质性，精准模拟超临界 CO_2 在低渗透储层中的裂缝分支行为，研究注入压力诱发断层活化的临界条件，建立含杂质 CO_2 的管道减压-裂纹扩展预测模型，并设计专用止裂技术以防控泄漏风险；④ 优化支撑剂输送方案，降低对高成本设备的依赖，探索相变压裂参数对煤层渗透率增强的调控机制，提升封存开采协同效益。该技术可显著提升低渗透储层开发效率，实现压裂过程中的部分碳封存，兼具增产与减排双重效益，在非常规油气开采和碳封存领域具有广阔的应用市场。

(11) 多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究

多源数据驱动智能钻井方法及数字井筒模型研究是结合地质数据、工程数据和设备数据，通过智能化手段优化施工参数，并构建数字化井筒模型辅助钻井方案决策。其主要研究方向包括：多源数据治理技术及智能算法优化研究，实现多源数据时空对齐与特征提取，解决异构数据融合难题，结合钻井工程现实场景动态调整智能模型参数，在神经网络中嵌入机理先验知识，实现钻井参数精准推荐；高精度数字化井筒模型构建，通过多物理场耦合建模实现井下数据演化过程实时监测；井下风险智能预警与复杂工况钻井参数智能调控，基于深度学习分析钻井参数时序数据，分类识别卡钻、井漏、井涌等井下作业风险并实现智能预警，构建实时反馈系统，基于智能模型对复杂工况进行闭环调控等。该研究主要呈现两大发展趋势：一是多源数据知识库共享搭建及数据实时决策，如多区块数据共享及随钻提取参数就地分析决策；二是“绿色+智能化”协同发展，研发低碳钻井装备，结合钻井参数优化减少现场泥浆浪费与碳排放等。

(12) 煤层气多相流动规律及对产能提升的作用机制

煤层气多相流动规律是指煤层中气体和液体在煤体孔隙与裂隙中共存并相互作用的复杂流动过程。煤层气赋存于煤体的孔隙与裂隙系统中，其运移过程涉及解吸、扩散与渗流等多阶段行为，同时受到煤层水、应力扰动与裂隙结构演化等多因素影响，形成复杂的非线性、多相、多尺度耦合流动特征。深入揭示其多相流动机制，对科学指导排采制度设计、实现煤层气稳定高产具有重要意义。其主要研究方向包括：煤层气中气与水两相耦合流动机制、煤层气解吸-扩散-渗流多过程协同机制、裂隙网络演化对渗流路径与气体运移能力的影响、多尺度多场耦合的数值模拟与实验验证方法，以及关键控制参数对抽采产能的敏感性分析等。未来，煤层气多相流研究将朝着模型精细化、参数智能反演与开发工艺动态调控方向发展。将人工智能算法引入产能预测与抽采调控中，实现对不同煤层气赋存条件下排采过程的精准优化；结合数字孪生与物联网感知系统，构建“监测—模拟—调控”闭环协同机制，推动煤层气开发向高效、安全、绿色方向迈进。

5.1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读

5.1.2.1 人工智能辅助能源材料设计

人工智能辅助能源材料设计是指利用人工智能技术，包括机器学习、深度学习、生成模型和

大语言模型等方法，结合材料科学、计算化学和物理学，加速能源相关材料的研发过程。其核心目标是通过高通量筛选、属性预测、逆向设计和自主实验，开发高效、可持续、低成本的材料，用于能源存储、能量转化、催化反应及可再生能源系统。通过人工智能方法整合实验数据、模拟数据和公开数据库，挖掘材料结构–性能关系，可以显著缩短传统试错式研发的周期。

早期材料设计主要依赖实验试错和基础计算方法。高通量计算开始兴起时，因受限于计算资源和数据规模而进展缓慢。随着人工智能技术的发展，支持向量机、随机森林等机器学习算法开始用于材料属性预测，早期应用集中于以简单回归模型预测电池材料或催化剂性能。2010年后，深度学习和图神经网络的引入显著提升了预测精度，生成模型实现逆向设计。自主实验室概念也应运而生，将机器人与人工智能相结合，实现实验自动化。如今，大语言模型和多模态人工智能正被用于知识提取和复杂系统优化。生成式人工智能在探索未知化学空间和可持续材料设计中展现出巨大潜力。

结合最新研究进展，人工智能辅助能源材料设计的主要研究方向包括以下方面：① 材料属性预测与高通量筛选描述——利用机器学习模型，结合密度泛函理论（DFT）等高通量计算方法，预测材料物理化学属性，筛选候选材料，可应用于电池电极材料优化、能源材料性能预测；② 生成模型与逆向设计描述——采用对抗神经网络、扩散模型等生成模型，从目标性能反向生成新材料结构，探索未知化学空间，可应用于新型碳捕集材料、高效光伏材料设计；③ 催化材料智能设计与合成——结合 AI 智能体和机器人技术，预测催化剂活性，优化合成路径并实现自动化，可应用于燃料电池催化剂、CO₂ 电还原催化剂、电解水材料的设计和合成。

“人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿中核心论文数最多的国家是美国、中国和德国（表 5.3）。核心论文的主要产出机构为麻省理工学院、清华大学、中国科学院、多伦多大学和新加坡国立大学等（表 5.4）。核心论文主要国家间和机构间的合作网络分别如图 5.1 和图 5.2 所示。施引核心论文数排名靠前的国家是中国和美国（表 5.5），施引核心论文数排名靠前的机构是中国科学院、麻省理工学院、浙江大学、清华大学和上海交通大学（表 5.6）。

表 5.3 “人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	167	33.00	6 191	37.07	2022.3
2	中国	160	31.62	4 300	26.88	2022.6
3	德国	42	8.30	1 402	33.38	2022.0
4	英国	35	6.92	1 445	41.29	2022.1
5	加拿大	31	6.13	1 102	35.55	2022.3
6	印度	31	6.13	466	15.03	2022.9
7	韩国	30	5.93	421	14.03	2023.2
8	日本	28	5.53	1 161	41.46	2022.1
9	新加坡	21	4.15	749	35.67	2022.8
10	澳大利亚	16	3.16	952	59.50	2022.2

表 5.4 “人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	麻省理工学院	19	3.75	1 236	65.05	2022.1
2	清华大学	17	3.36	310	18.24	2022.9
3	中国科学院	17	3.36	236	13.88	2022.7
4	多伦多大学	13	2.57	839	64.54	2022.2
5	新加坡国立大学	13	2.57	391	30.08	2022.8
6	美国西北大学	13	2.57	321	24.69	2023.0
7	上海交通大学	12	2.37	352	29.33	2022.9
8	浙江大学	10	1.98	668	66.80	2021.9
9	加州理工大学	10	1.98	585	58.50	2021.9
10	阿贡国家实验室	9	1.78	520	57.78	2021.8

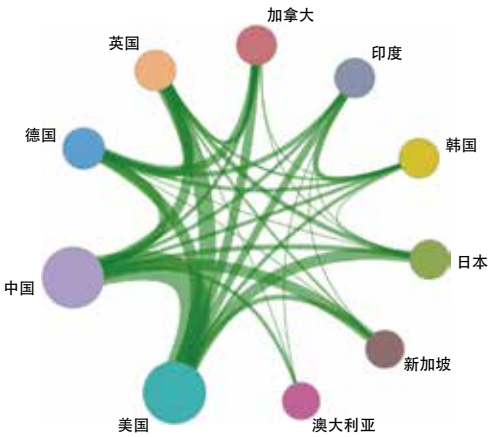


图 5.1 “人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿主要国家间的合作网络

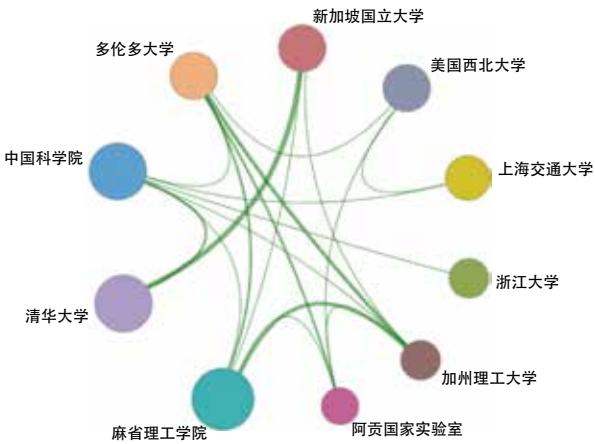


图 5.2 “人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 5.5 “人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	4 677	37.41	2023.5
2	美国	2 667	21.33	2023.1
3	印度	876	7.01	2023.5
4	英国	854	6.83	2023.2
5	德国	739	5.91	2023.1
6	韩国	634	5.07	2023.5
7	日本	542	4.33	2023.1
8	加拿大	414	3.31	2023.2
9	澳大利亚	413	3.30	2023.2
10	沙特阿拉伯	371	2.97	2023.5

表 5.6 “人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	500	23.85	2023.4
2	麻省理工学院	224	10.69	2022.9
3	浙江大学	202	9.64	2023.3
4	清华大学	195	9.30	2023.5
5	上海交通大学	190	9.06	2023.5
6	北京科技大学	155	7.40	2023.1
7	新加坡国立大学	141	6.73	2023.3
8	西安交通大学	125	5.96	2023.4
9	哈尔滨工业大学	123	5.87	2023.4
10	上海大学	122	5.82	2023.5

“人工智能辅助能源材料设计”领域未来的重点发展方向和趋势（图 5.3）如下：

- 1) 从“小数据”向“大数据”范式转变：早期依赖迁移学习解决数据稀缺，现转向大数据创造，利用开放数据库和云平台加速材料发现，嵌入物理知识，提升模型可解释性。
- 2) 模型驱动与数据驱动融合：结合深度学习与物理/化学理论，构建混合模型预测复杂行为，如电池寿命和反应路径。
- 3) 高通量与自动化实验：集成机器人和 AI 智能体，实现材料自主设计，缩短能源材料开发周期。

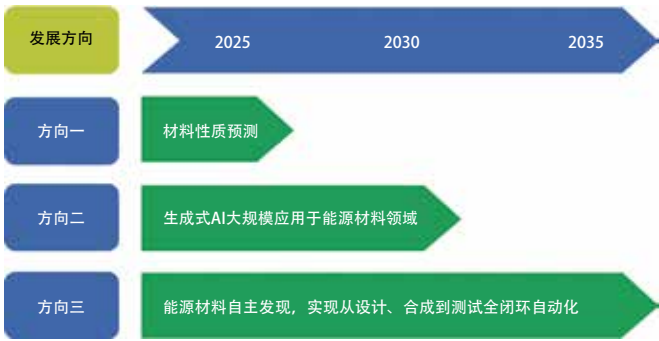


图 5.3 “人工智能辅助能源材料设计”工程研究前沿的发展路线

5.1.2.2 核聚变用高温超导磁体研究

核聚变用高温超导磁体研究作为一个关乎未来能源的前沿工程领域，其全球科研力量分布呈现多极化格局，且国际合作网络紧密。从国家层面看，中国和美国构成了该领域的绝对双核心（表 5.7）。数据显示，中国的核心论文产出数量以 128 篇（占比 31.84%）位居全球第一，展现了强大的科研产出能力。美国则以 107 篇（占比 26.62%）紧随其后，并在论文影响力上更胜一筹，其被引频次（2 389）和篇均被引频次（22.33）均大幅领先，表明其研究成果获得了更广泛的关注和认可。意大利、日本、瑞士、德国、英国等传统科技强国也是重要的参与力量，共同构成了第二梯队。值得注意的是，韩国虽然论文总数不多，但其篇均被引频次高达 37.44，凸显了其卓越的研究质量。

表 5.7 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	128	31.84	1 020	7.97	2022.0
2	美国	107	26.62	2 389	22.33	2022.1
3	意大利	43	10.70	404	9.40	2022.4
4	日本	42	10.45	862	20.52	2021.2
5	瑞士	40	9.95	892	22.30	2021.5
6	德国	39	9.70	592	15.18	2021.7
7	英国	30	7.46	553	18.43	2021.9
8	法国	26	6.47	204	7.85	2021.5
9	韩国	18	4.48	674	37.44	2022.6
10	西班牙	17	4.23	102	6.00	2022.4

从机构分布来看，领先机构呈现出中、美、欧三足鼎立的态势（表 5.8）。中国科学院以 78 篇核心论文（占比 19.40%）的绝对优势成为全球最高产的机构，中国科学技术大学也表现活跃，排名第二。这标志着中国科研机构在该前沿的基础研究中扮演着引领角色。美国方面，麻省理

工学院和劳伦斯伯克利国家实验室是两大核心支柱，其中麻省理工学院的篇均被引频次（28.67）尤为突出。欧洲的研究力量则相对分散，包括意大利的都灵理工大学、德国的卡尔斯鲁厄理工学院以及跨国的欧洲核能机构等。尤其值得关注的是，美国的联邦聚变系统公司（CFS），其篇均被引频次高达 46.75，位居所有机构之首，显示出私营企业在尖端技术研发与创新上的巨大活力。

表 5.8 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	78	19.40	614	7.87	2022.1
2	中国科学技术大学	49	12.19	333	6.80	2022.3
3	麻省理工学院	30	7.46	860	28.67	2022.3
4	劳伦斯伯克利国家实验室	28	6.97	305	10.89	2021.8
5	都灵理工大学	22	5.47	225	10.23	2022.2
6	卡尔斯鲁厄理工学院	20	4.98	391	19.55	2021.5
7	欧洲核能机构	18	4.48	217	12.06	2022.6
8	联邦聚变系统公司	16	3.98	748	46.75	2022.7
9	科罗拉多大学	16	3.98	556	34.75	2021.3
10	日本东北大学	14	3.48	113	8.07	2021.1

合作情况方面，该领域具有高度的国际化特征。图 5.4 和图 5.5 显示，全球主要国家间和主要机构间已形成了密集而复杂的合作网络。这种合作不仅体现在共同发表核心论文上，更体现在知识的交流与扩散中。

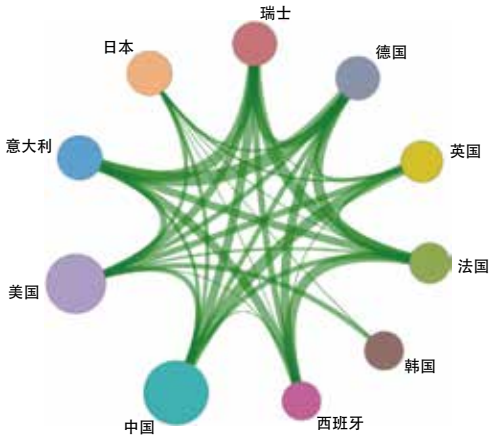


图 5.4 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

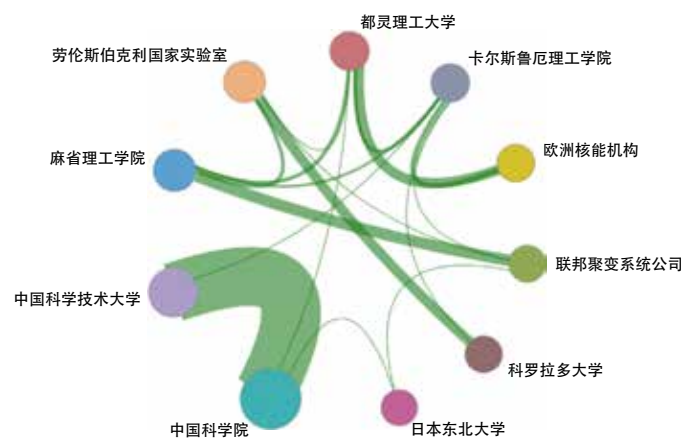


图 5.5 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

从施引核心论文数据来看，中国（1 049 篇）和美国（654 篇）同样是最大的知识消费与跟进群体（表 5.9），他们积极关注、参考并推动该领域的最新成果。其中，中国科学院同样是施引核心论文的最主要产出机构（表 5.10），这表明其不仅自身研究成果丰硕，也在持续追踪并融入全球科研对话，积极推动着该前沿领域的持续演进与发展。

综上所述，全球科研界正通过紧密的跨国、跨机构合作，共同推动核聚变用高温超导磁体技术走向成熟。

图 5.6 为“核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿的发展路线。首先，高场紧凑型聚变装置将成为未来的突破口，例如基于 20 T 级 HTS 磁体的紧凑托卡马克已进入实验验证阶段。其次，规模化与工程化将是核心任务，包括长长度导体生产工艺的成熟、低成本化以及磁体模块化装配的实现。再次，跨学科融合将日益重要，结合先进仿真[如有限元建模（FEM）、多物理场耦合]、人工智能优化设计与新型冷却技术，将加速 HTS 磁体工程的落地。最后，随着国际聚变计划与初创企业的推动，HTS 磁体有望在未来 10~20 年内完成从实验室验证到商用反应堆原型的跨越，成为推动人类迈向可持续核聚变能的重要基石。

表 5.9 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 049	31.73	2023.0
2	美国	654	19.78	2022.9
3	日本	293	8.86	2022.7
4	英国	254	7.68	2022.9
5	德国	212	6.41	2022.8
6	意大利	205	6.20	2023.1
7	韩国	168	5.08	2022.8
8	瑞士	158	4.78	2022.7
9	法国	137	4.14	2022.9
10	俄罗斯	90	2.72	2022.6

表 5.10 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	386	28.87	2023.1
2	麻省理工学院	147	10.99	2023.0
3	中国科学技术大学	142	10.62	2023.2
4	兰州大学	117	8.75	2022.9
5	上海交通大学	103	7.70	2022.7
6	首尔大学	90	6.73	2022.8
7	联邦聚变系统公司	87	6.51	2023.3
8	西南交通大学	72	5.39	2022.7
9	普林斯顿等离子体物理实验室	65	4.86	2022.9
10	华中科技大学	64	4.79	2023.0

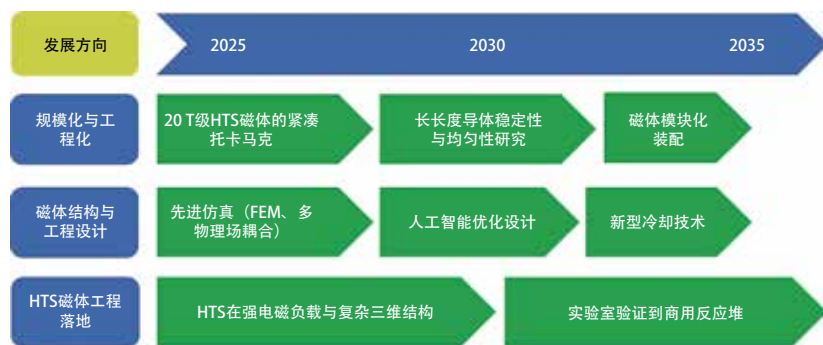


图 5.6 “核聚变用高温超导磁体研究”工程研究前沿的发展路线

5.1.2.3 基于大数据的成矿预测技术

成矿预测主要关注矿产资源形成的地质作用、成矿机制及时空分布规律，预测潜在的成矿区域。进入“大数据时代”后，海量、多源、异构的地质信息及数字化平台为成矿规律的系统发掘和预测精度的提升提供了新条件，地质大数据与智能化手段的结合已成为该领域的核心前沿。

传统成矿预测依赖经验与现场调查，近年逐步由定性向定量转变，由数据稀疏向数据密集过渡。当前研究强调多源数据融合、区域数字平台构建和可重复定量预测体系的工程化落地。成矿预测正由单一学科方法向跨学科、数据驱动和工程化实施方向演进。基于大数据的成矿预测能处理海量、多维地质信息，快速锁定潜在靶区，显著提升找矿效率、降低勘查成本；数据驱动的预测比单纯经验判断更为客观，可对不确定性进行量化，为决策提供更可靠依据。

基于大数据的成矿预测技术主要聚焦于：① 构建大数据找矿信息平台，实现地质、地球物理、遥感、勘探、地球化学等多源数据的标准化、整合与可视化管理；② 研究如何从海量异构数据中提取关键成矿信号和指标，建立统一的特征表征与融合框架；③ 开发可工程化部署的成矿预测系统，构建面向区域决策的量化评价与潜力区优先级排序流程；④ 构建成矿知识库 / 图谱，整

合结构化与非结构化知识，支持知识检索、溯源和可视化表达。

“基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿中核心论文数排在前三位的国家是中国（136）、澳大利亚（37）和加拿大（19）；篇均被引频次排在前三位的国家是英国（71.40）、印度（69.17）和西班牙（54.00），见表 5.11。在主要产出国家中，中国与澳大利亚、加拿大间的合作较多，见图 5.7。核心论文数排在前三位的机构是中国地质大学（武汉）（42）、中南大学（29）和中国科学院（19）；篇均被引频次排在前三位的机构是西澳大学（65.50）、阿米卡比尔理工大学（34.29）和中国地质大学（武汉）（28.21），见表 5.12。在主要产出机构中，中国地质大学（武汉）与中国地质科学院的合作较多，见图 5.8。

施引核心论文数排在前三位的国家是中国（1 258）、澳大利亚（292）和美国（215），见表 5.13；施引核心论文的主要产出机构有中国地质大学（武汉）（355）、中国科学院（162）、中国地质科学院（147）等，见表 5.14。

表 5.11 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	136	64.76	2 434	17.90	2021.7
2	澳大利亚	37	17.62	1 282	34.65	2020.0
3	加拿大	19	9.05	656	34.53	2021.5
4	伊朗	12	5.71	388	32.33	2021.8
5	南非	10	4.76	438	43.80	2021.3
6	美国	9	4.29	372	41.33	2021.6
7	印度	6	2.86	415	69.17	2021.5
8	西班牙	6	2.86	324	54.00	2022.0
9	巴西	6	2.86	320	53.33	2022.0
10	英国	5	2.38	357	71.40	2022.2

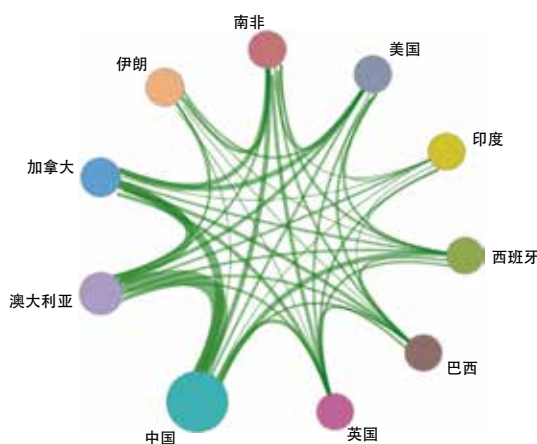


图 5.7 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 5.12 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国地质大学（武汉）	42	20.00	1 185	28.21	2020.7
2	中南大学	29	13.81	195	6.72	2023.1
3	中国科学院	19	9.05	231	12.16	2022.4
4	中国地质科学院	15	7.14	164	10.93	2021.5
5	中国地质调查局	10	4.76	74	7.40	2022.8
6	中国地质大学（北京）	9	4.29	171	19.00	2021.6
7	西澳大学	8	3.81	524	65.50	2020.6
8	成都理工大学	8	3.81	147	18.38	2021.2
9	阿米卡比尔理工大学	7	3.33	240	34.29	2021.6
10	悉尼大学	7	3.33	83	11.86	2020.9

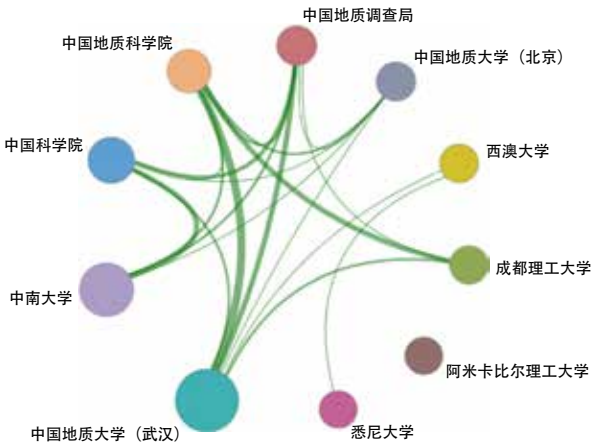


图 5.8 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 5.13 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 258	47.49	2022.4
2	澳大利亚	292	11.02	2021.4
3	美国	215	8.12	2022.7
4	伊朗	215	8.12	2022.2
5	加拿大	210	7.93	2022.1
6	南非	96	3.62	2022.1
7	英国	88	3.32	2022.7
8	印度	87	3.28	2022.7
9	德国	87	3.28	2023.0
10	巴西	54	2.04	2022.3

表 5.14 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国地质大学（武汉）	355	27.41	2022.1
2	中国科学院	162	12.51	2022.4
3	中国地质科学院	147	11.35	2021.7
4	中南大学	117	9.03	2022.8
5	西澳大学	91	7.03	2020.8
6	吉林大学	76	5.87	2022.6
7	成都理工大学	74	5.71	2022.6
8	中国地质调查局	73	5.64	2022.8
9	阿米卡比尔理工大学	70	5.41	2022.4
10	中国地质大学（北京）	65	5.02	2022.4

未来 5~10 年，基于大数据的成矿预测技术将重点聚焦区域 / 省域级地质大数据平台建设与共享、端到端工程化预测系统研发、多源时空（3D/4D）信息融合与成矿表征，以及示范工程建设和标准化工作。在发展趋势上，将整体从原型化探索转向可解释、可监管、可工程化的成熟体系，并更加注重不确定性量化与多尺度协同分析。其发展潜力体现在有望显著提升找矿效率与成功率，为保障国家关键金属资源安全供给提供支撑，并推动向低环境影响的绿色勘查模式转型。其主要应用场景包括国家与省域层面的矿产资源普查与潜力区排序、关键金属矿产的靶区发现与评价、企业勘探流程的优化与加速，以及环境敏感区的低干扰勘查。同时，技术与人才培养、数据共享机制以及法规标准将成为推动落地的关键保障。图 5.9 为“基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿的发展路线。

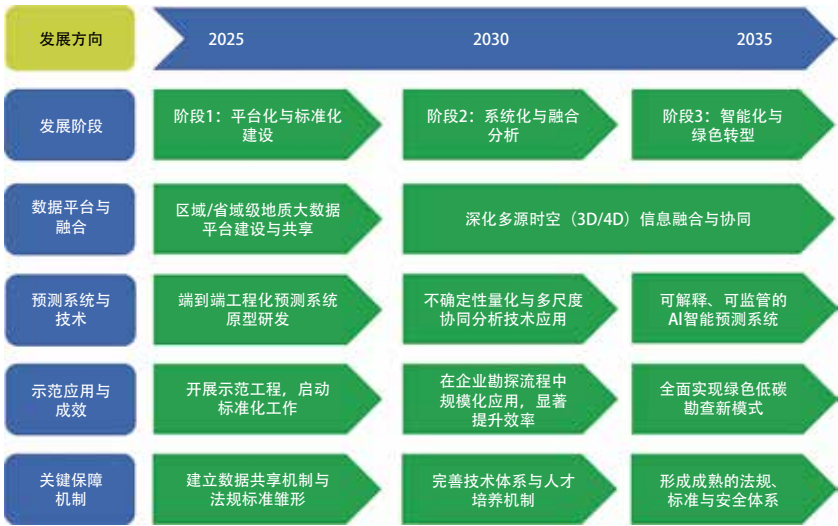


图 5.9 “基于大数据的成矿预测技术”工程研究前沿的发展路线



5.1.2.4 非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究

随着全球常规油气资源渐趋紧张，开发非常规油气资源可拓宽能源供给渠道，在增强国家能源安全保障的同时带动相关产业发展，推动区域经济增长。非常规油气资源包括页岩气、致密油等，具有储层致密、渗透率低、开发难度大等特点。非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究是基于开发地质信息及工程信息，结合智能化开发手段，实现对非常规油气资源的精准勘探－高效开采－数字化管理，在提高资源开发效益的同时降低开发成本和环境影响。受开发与提采技术所限，早期非常规油气开发进展缓慢；直至 20 世纪 90 年代末，美国凭借水平井与大规模分段压裂技术掀起“页岩气革命”，才推动非常规油气开发的飞跃。21 世纪以来，伴随着物联网、大数据、人工智能技术的兴起，油气田智能开发逐渐成为主流趋势。当下，全球范围内的多源数据整合分析与油气田开发大数据库构建，推动了“甜点区块”储层的精准定位，结合智能设备对开采参数的实时调控，非常规油气资源开采效率持续提升。目前，该研究主要形成了 3 个主要研究方向：① 复杂储层智能化表征及甜点区块精准预测方法，通过多源数据融合与智能算法实现储层精细刻画及高产区域定位；② 开发方案高效决策及生产方式智能优化，通过数字孪生、优化算法与实时数据交互，实现开发方案动态调整与生产方式自主优化；③ 新型提采工艺及智能提采装备开发，围绕压裂、驱替及井下作业等环节，开发高效提采技术与智能化装备。

中国在该研究前沿中占据绝对主导地位，核心论文数（503 篇，占比 69.48%）和被引频次（9 297）均遥遥领先，但篇均被引频次（18.48）相对较低（表 5.15）。美国、加拿大和澳大利亚的论文数量虽远少于中国，但其篇均被引频次更高，研究影响力更为突出。英国、德国等国家虽论文产出较少，但研究质量普遍较高。主要合作集中在中国、美国、加拿大和澳大利亚之间（图 5.10）。国内研究机构主要为石油高校及企业，如中国石油大学（北京）、中国石油大学（华东）、西南石油大学、长江大学等石油院校，中国石油长庆油田及中国石化华东油气田（页岩气开发技术先导企业）等石油企业，同时石油高校与企业间开展了广泛的协同合作，如油气行业产学研联盟；国际从事相关研究机构主要集中在北美（如加拿大的卡尔加里大学）（表 5.16 和图 5.11）。该前沿中施引核心论文的主要产出国家和机构分别见表 5.17 和表 5.18）。

表 5.15 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	503	69.48	9 297	18.48	2022.0
2	美国	132	18.23	2 823	21.39	2021.2
3	加拿大	54	7.46	1 496	27.70	2021.6
4	澳大利亚	31	4.28	1 402	45.23	2021.5
5	沙特阿拉伯	26	3.59	387	14.88	2021.5
6	伊朗	22	3.04	351	15.95	2021.9
7	英国	12	1.66	466	38.83	2021.0
8	印度	12	1.66	277	23.08	2022.2
9	马来西亚	12	1.66	175	14.58	2021.5
10	德国	10	1.38	303	30.30	2021.2

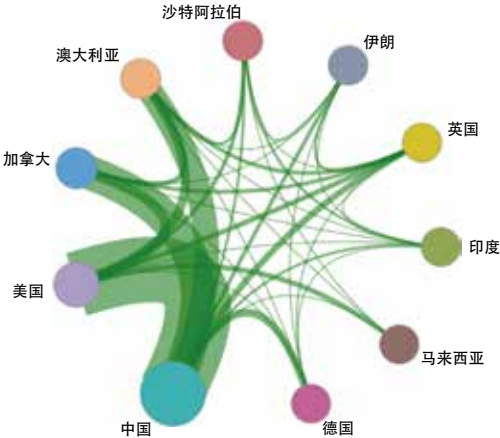


图 5.10 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 5.16 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国石油大学（北京）	135	18.65	2 634	19.51	2022.1
2	中国石油大学（华东）	60	8.29	1 038	17.30	2021.9
3	西南石油大学	50	6.91	697	13.94	2022.3
4	中国科学院	45	6.22	688	15.29	2022.0
5	中国石油天然气股份有限公司	41	5.66	721	17.59	2021.9
6	卡尔加里大学	35	4.83	1 279	36.54	2021.2
7	中国地质大学（武汉）	34	4.70	832	24.47	2021.8
8	东北石油大学	23	3.18	298	12.96	2022.9
9	中国石油化工集团有限公司	19	2.62	193	10.16	2022.7
10	长江大学	18	2.49	260	14.44	2022.3

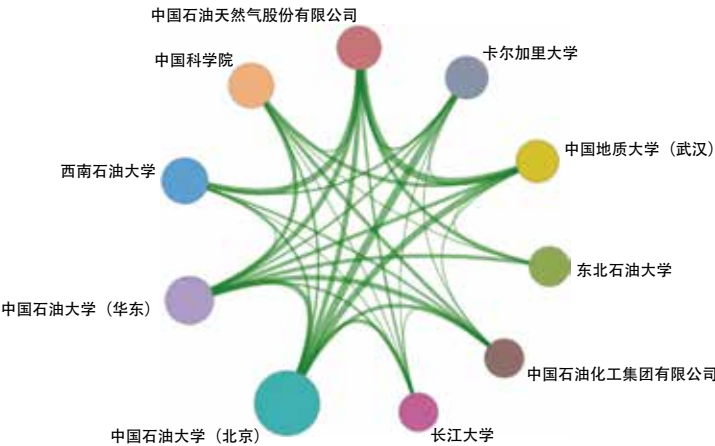


图 5.11 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 5.17 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	7 171	65.57	2023.0
2	美国	991	9.06	2022.5
3	加拿大	550	5.03	2022.7
4	俄罗斯	398	3.64	2022.8
5	伊朗	382	3.49	2022.5
6	澳大利亚	326	2.98	2022.5
7	沙特阿拉伯	301	2.75	2022.8
8	英国	265	2.42	2022.6
9	印度	259	2.37	2023.0
10	德国	164	1.50	2022.8

表 5.18 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国石油大学（北京）	1 186	21.72	2022.9
2	中国石油大学（华东）	789	14.45	2022.9
3	西南石油大学	671	12.29	2023.1
4	中国科学院	530	9.71	2022.9
5	中国矿业大学	478	8.75	2022.7
6	中国地质大学（武汉）	404	7.40	2022.9
7	东北石油大学	327	5.99	2023.1
8	中国石油天然气股份有限公司	318	5.82	2023.0
9	长江大学	282	5.16	2023.1
10	卡尔加里大学	242	4.43	2022.7

未来 5~10 年，非常规油气开发将以“智能化、绿色化、全球化”为主线，通过 AI 大模型、量子计算、碳捕获利用与封存（CCUS）等技术突破，实现从“资源驱动”向“技术驱动”的跨越。智能化深度融合方面，将基于 GeoGPT、昆仑大模型等智能化平台，构建“地质-工程-经济”一体化数字孪生系统，实现从储层表征到生产优化的全流程智能决策；高效提采技术升级方面，将迎来 CCUS 规模化应用，即采用枢纽模式整合捕集、运输、封存环节，降低全链条成本，扩展至多气源接入，形成区域性碳管理网络；绿色低碳技术体系构建，实现全生命周期环保及新能源融合，构建“油气+光伏+储能”多能互补系统；基础理论与装备突破，如纳米孔隙渗流模型、智能装备国产化等。图 5.12 为“非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿的发展路线。

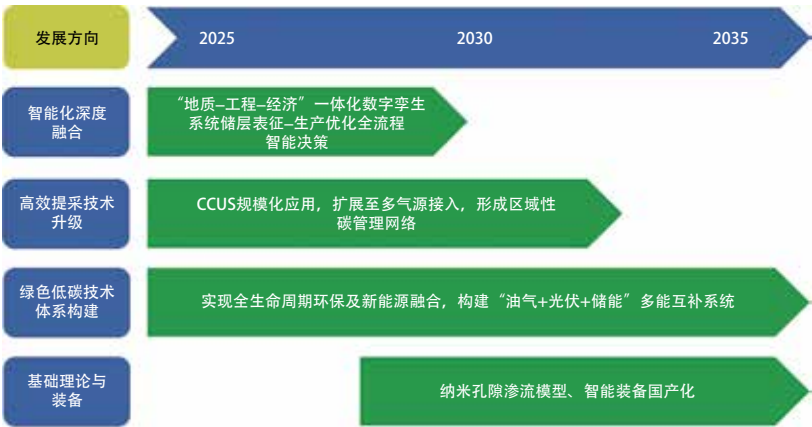


图 5.12 “非常规油气资源智能开发及高效提采方法研究”工程研究前沿的发展路线

5.2 工程开发前沿

5.2.1 Top 12 工程开发前沿发展态势

能源与矿业工程领域组研判得到的 Top 12 工程开发前沿见表 5.19。它们涵盖了能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程 4 个学科。其中，“人工智能驱动的虚拟电厂”“海上风光耦合发电系统”“沙戈荒能源大基地风-光-火-储多能互融工程技术”属于能源和电气科学技术与工程领域；“极端天气核能安全技术”“核电站数

表 5.19 能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引数	平均被引数	平均公开年
1	人工智能驱动的虚拟电厂	563	1 204	2.14	2023.3
2	极端天气核能安全技术	63	239	3.79	2022.6
3	复杂油气藏压裂优化与产能预测技术	776	3 197	4.12	2022.3
4	超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备	963	2 126	2.21	2022.3
5	海上风光耦合发电系统	91	307	3.37	2022.2
6	沙戈荒能源大基地风-光-火-储多能互融工程技术	2 101	2 489	1.18	2021.6
7	核电站数字孪生技术	50	252	5.04	2019.0
8	核电站提升功率输出方法和设备研究	250	408	1.63	2022.2
9	战略性矿产资源综合评价技术	1 323	6 000	4.54	2022.1
10	智能地下成像与储层建模一体化技术	1 294	18 879	14.59	2022.2
11	煤矿井下瓦斯增产及采空区 CO ₂ 封存技术	455	594	1.31	2022.5
12	深部矿井热害治理技术	174	628	3.61	2022.0

注：前沿来源包括三类，即数据挖掘、专家提名、数据挖掘+专家提名，前沿 1、5、6、9 为专家提名，其余为数据挖掘+专家提名。

字孪生技术”“核电站提升功率输出方法和设备研究”属于核科学技术与工程领域；“复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”“战略性矿产资源综合评价技术”“智能地下成像与储层建模一体化技术”属于地质资源科学技术与工程领域；“超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”“煤矿井下瓦斯增产及采空区 CO₂ 封存技术”“深部矿井热害治理技术”属于矿业科学技术与工程领域。2019—2024 年各开发前沿相关核心专利的公开情况见表 5.20。

表 5.20 能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	人工智能驱动的虚拟电厂	13	17	22	38	137	336
2	极端天气核能安全技术	6	6	6	4	11	30
3	复杂油气藏压裂优化与产能预测技术	48	74	95	151	166	242
4	超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备	79	97	111	151	220	305
5	海上风光耦合发电系统	10	3	14	20	22	22
6	沙戈荒能源大基地风—光—火—储多能互融工程技术	323	300	379	381	322	396
7	核电站数字孪生技术	50	0	0	0	0	0
8	核电站提升功率输出方法和设备研究	15	26	34	62	41	72
9	战略性矿产资源综合评价技术	120	163	164	229	292	355
10	智能地下成像与储层建模一体化技术	146	144	140	179	243	442
11	煤矿井下瓦斯增产及采空区 CO ₂ 封存技术	19	27	48	118	111	132
12	深部矿井热害治理技术	19	29	17	20	41	48

（1）人工智能驱动的虚拟电厂

人工智能驱动的虚拟电厂是将人工智能技术深度应用于含海量电力需求侧灵活资源的虚拟电厂，提升虚拟电厂发用电曲线预测及可调能力评估精度，提高虚拟电厂交易运行收益，并增强虚拟电厂对新型电力系统支撑能力的“AI+能源”融合技术。该领域的主要研究方向包括：人工智能驱动的虚拟电厂发用电预测技术，提升虚拟电厂聚合资源发用电曲线的预测准确性；人工智能驱动的虚拟电厂可调能力动态评估技术，实现需求侧资源差异化用电行为偏好的精准建模，以及资源的真实可调能力的动态评估；人工智能驱动的虚拟电厂竞价及调度策略生成方法，在复杂电力市场环境（需求响应市场、电能量市场、辅助服务市场等）下结合外部市场信息及内部资源特征生成最优交易策略，并基于市场交易结果制定最优调度方案。未来，该领域的发展趋势包括：融合气象特征、企业生产、人流/交通流趋势等多源异构数据，进一步提升虚拟电厂资源预测精确度；通过同态加密、差分隐私、联邦学习等技术，保护需求侧资源数据隐私，防范虚拟电厂聚合资源的隐私泄露风险；利用区块链技术增强虚拟电厂交易、调度与结算的透明性、可信赖性和可追溯性等。

（2）极端天气核能安全技术

随着对气候变化认识的深入，我们在关注气候变暖的同时也应该重视极端天气事件的强度与频率发生的变化。核电站的设计与运行充分考虑了地震、洪水和热带气旋等因素，能够配合

电网安全应对极端天气。然而,气候变化诱发的海生物异常繁殖与附着导致鼓网堵塞等现象,迫使核电机组降功率甚至停机停堆。随着类似经验反馈的增多,冷源安全问题愈发突出。冷源系统是电站的循环水系统,最关键的要素是最终热阱的设计。为进一步提高核电厂冷源安全性,强化纵深防御措施,须从监测、预防、处置等方面进行改进:首先,可通过运行参数监测、取水口定期巡检、卫星遥感、水质和水文监测、反冲洗生物采集监测、监测雷达、水下视频与声呐探测等手段,对不同致灾物进行全面、全时监测,及时发现可能引发取水系统堵塞的异常情况;其次,制定取水口拦污设施相关设计规范,加强冷源系统管理与维护,制定维修大纲和策略以及工作过程管理,维持冷却水取水口建筑物、设备及相关系统的工作能力。通过实施“纵深防御”策略,从取水口位置选取与水域监测、除污设备设置、备用水源规划、福岛核事故后设计改进到冷源系统组织管理等多个方面进行全方位优化和创新实践,能够有效提升核电厂冷源的安全性和可靠性。

(3) 复杂油气藏压裂优化与产能预测技术

复杂油气藏压裂优化与产能预测技术是致密砂岩、碳酸盐岩等复杂储层高效开发的核心技术。此类储层具有低孔低渗、非均质性强特点,常规开发难以实现经济有效开采,需通过水力压裂构建人工裂缝网络提升产能。该技术融合地质建模、工程优化、实时监测与机器学习,旨在实现压裂设计精确化与产能预测智能化。

其核心技术内涵分4个方面:一是多尺度数据融合与联合反演,基于地震、测井、岩心数据,借助全波形与岩相反演提升储层参数识别精度,为压裂设计提供地质依据;二是地质力学分析与裂缝预测,结合地应力、岩石力学参数和微震监测,构建三维裂缝模型,优化压裂施工参数;三是动态数据实时优化,利用光纤声波传感等手段监测压裂过程,依托机器学习实现参数动态调控;四是产能预测与数字孪生一体化,融合地质模型、历史生产与实时数据,借助神经网络与数值模拟预测产能,并通过数字孪生优化生产策略。

该技术呈智能化、集成化、绿色化发展趋势:人工智能替代经验模型,实现参数自主优化;地质-工程-生产数据融合,构建“设计-施工-监测-预测-优化”闭环;低污染压裂液与节能工艺是研发重点;应用向页岩油、深层致密气等更具挑战性的储层拓展。

(4) 超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备

超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备是指针对埋深超过6 000 m甚至更深地层的极端地质条件,以实现安全、高效、经济开发为目标,融合绿色环保理念与智能化技术的综合性钻井工程体系。该技术体系涵盖地质勘探、钻井设计、实时控制、废弃物处理等全流程,是多学科交叉、技术密集的系统工程。在智能化方面,该体系的核心在于借助智能算法、物联网传感器、大数据分析、数字孪生等前沿技术,全面提升钻井过程的感知、决策与控制能力。例如,通过随钻测井(LWD)和随钻地震(SWD)技术,能够实时获取地下岩性、物性和流体信息,形成动态地质模型;进而利用机器学习、深度学习等算法,对海量井下数据进行快速解释与反演,实现钻速预测、井眼轨迹精准控制、钻井参数多目标优化(如机械钻速、井身质量、工具安全的协同),从而达到提速、降本、增效的目的。智能系统还能根据实钻数据自主调整钻压、转速、流量等参数,

有效规避复杂地质风险，减少非生产时间。在绿色化方面，该技术体系强调在整个钻井生命周期内贯彻低碳环保原则。针对超深层高温高压环境，研发应用高性能环保型钻井液体系至关重要，这类钻井液需具备良好的生物降解性、低毒性、高循环利用率，并能有效保护产层。同时，大力推广节能装备，如采用网电或混合动力驱动的电动钻机，相比传统柴油钻机可显著降低化石能源消耗与 CO₂ 排放。此外，对钻井产生的固体岩屑和废水实施严格的无害化处理与资源化利用流程，例如通过热脱附、生物降解等先进工艺实现废弃物的清洁处理和循环再生，最大限度减轻对环境的影响，实现勘探—开采全流程的“绿色化”转型。未来，该领域的发展将更加注重智能化与绿色化的深度融合，例如开发自主决策的智能钻井机器人、构建全生命周期的碳排放监测与优化系统，从而推动超深层油气资源开发向更加安全、高效、清洁、可持续发展的方向发展。

（5）海上风光耦合发电系统

海上风光耦合发电系统是指将风电和光伏发电项目在相同或相邻海域集中规划建设，通过共享基础设施，实现风光互补高效利用的综合能源系统。其核心是通过空间立体开发、多能互补与智能调控，最大化提高海域资源利用率，平抑单一能源出力波动，降低度电成本（LCOE），提升发电系统的稳定性与经济性。

该领域聚焦于工程技术应用中的关键技术问题，主要研究方向包括：① 一体化平台设计——研发适用于海上恶劣环境的浮动式 / 固定式综合平台，实现风电与光伏发电的深度集成或高效空间立体开发；② 智能协同控制技术——基于数字孪生与大数据构建系统状态感知、功率预测和多目标优化控制系统，重点突破风光出力耦合建模、实时动态协调控制等；③ 多能融合系统集成——探索与海洋能、绿氢制储等能源形式的互补融合，构建综合海上能源系统。

随着深远海能源开发战略推进，海上风光耦合发电系统工程开发呈现以下前沿趋势：主战场向深远海（水深 >50 m，离岸 >50 km）延伸，驱动抗极端环境的漂浮平台、高可靠性柔直输电及无人化智能运维技术发展；同时，通过标准化设计、模块化建造、大规模集成、运维船舶人员共享、公共基础设施共享等途径降低成本。

（6）沙戈荒能源大基地风—光—火—储多能互融工程技术

沙戈荒能源大基地是针对风能、太阳能等可再生能源能量密度低、不稳定波动等特征，利用沙漠、戈壁、荒滩建设的风电、光伏基地，并配置一定容量的燃煤、光热发电和储能，以实现高比例可再生能源的大规模利用。

当前沙戈荒能源大基地主要以风—光—火—储多能互补的模式为主，通过大电网集中调度，采用电能“削峰填谷”为主的刚性耦合和调控方式。在新型储能技术尚有待突破的背景下，仍依赖于火电机组的灵活调节能力，以牺牲效率和安全性以及高碳排放强度为代价；风、光等可再生能源消纳和利用途径单一。要突破上述挑战，亟须建设本质安全可靠、灵活低碳的多能互融新能源大基地。改变大型风光电力基地模式，综合考虑风—光—火—储等不同能源的能源与资源双重属性，进行风、光与化石能源的源头互补；通过异质能量与多元物质跨系统的深度耦合，突破电—氢 / 燃料—碳多过程协同有序转化、不同品位能量的梯级利用和多元存储等关键技术；构建热—流—力—电—控动态特性的数字孪生表征体系，实现高比例可再生能源非稳态输入与多负荷输出的全

时空源荷匹配。

预计到 2030 年,我国沙戈荒能源大基地总装机容量将超过 4.5 亿千瓦。风-光-火-储多能互融工程技术有望对沙戈荒能源大基地的系统构建、规划设计与全工况优化运行提供有力支撑。

(7) 核电站数字孪生技术

数字孪生是实现物理系统向数字化模型映射的关键技术。它通过多维度信息感知与现实物体的交互融合,并借助智能算法等工具,实现对现实物体的智能认知、迭代优化等功能。数字孪生核电站是动力学、机械学、建模、仿真、数据处理、智能算法、优化迭代等多种技术的系统结合体,是面向复杂系统和设备的建模与仿真。目前,尽管数字孪生技术在学术和实践上仍处于发展阶段,但其有潜力广泛应用于关键复杂核电设备的设计、制造、运行维护、性能优化等全生命周期过程。

关键技术包括:① 核电设备及系统的数字模型——实现孪生核电站的基础,建模方法包括三维动态仿真与数字特征建模,其中系统级建模是数字孪生建模研究的重点和难点,也是未来进一步研究的方向;② 数字孪生海量数据的信息处理技术——通过数据管理平台和中心数据库实现核电系统的状态信息管理,借助信息传感交互与协同技术建立中心数据库与各离散数据库的信息协同,实现数字孪生核电站设备之间数据的匹配和真实映射;③ 数字孪生核电站的仿真运维研究——依托数字孪生核电站模型和信息处理技术,进行孪生核电站设备的运行状态模拟、设备检测模拟、维修模拟、设备改造、整体性能优化模拟等,通过沉浸式仿真技术可更加真实地反映数字孪生核电站数据对实体核电站运维的预测效果。

(8) 核电站提升功率输出方法和设备研究

随着核电技术的进步,核电机组的安全性显著提升。利用新技术对早期核电厂进行改造,可以充分释放其潜力,提升其发电能力,持续增强核电竞争力。根据核电机组反应堆功率提升幅度不同,功率提升主要有 3 种途径:① 测量不确定度再俘获(measurement uncertainty recapture),可使功率增加近 2%。实现功率提升的方法是改善反应堆功率计算技术,即通过采用最先进的给水流量测量装置降低测量不确定度,反过来这也为更精确的功率计算打下了基础。② 伸展功率提升(stretch power uprate),一般可使功率提高 2%~7%,但是仍处于机组的现有设计容量范围内。各台机组的实际功率提升比率将取决于机组的运行裕度设计。伸展功率提升通常需要修改仪表设备的整定值,但不需要实施重大的电厂改造。③ 扩展功率提升(extended power uprate),可使功率提高 7%~20%,需要对核电厂配套设备如高压涡轮、冷凝泵和马达、主发电机和/或变压器进行重大改造。掌握功率提升方法,可增加核电机组出力,并为核电机组的设计优化和核电技术自主创新奠定基础,从而充分发展核电优势,提高核电竞争力,为群堆优化提供支撑,实现核电可持续发展。

(9) 战略性矿产资源综合评价技术

战略性矿产资源综合评价技术是指对战略性矿产资源的成矿地质条件、成矿控制因素、找矿潜力、矿产调查、矿产勘查、资源量(储量)的数量和品质、共伴生矿产综合利用价值等,进行多方法、多指标综合评价的技术方法。成矿地质条件和成矿控制因素研究的主要技术方向

包括放射性同位素定年技术、稳定同位素示踪技术、岩石矿物结构分析技术、元素成分及含量高精度高准确度分析技术、流体/熔体包裹体分析测试技术、成岩成矿模拟实验技术等。找矿潜力和矿产调查研究的主要技术方向包括地质调查、物探、化探、遥感、综合信息评价、人工智能(AI)找矿预测区(靶区)圈定等技术。矿产勘查研究的主要技术方向是绿色勘查技术,包括卫星多光谱和高光谱技术、航空和无人机物探技术、无人机遥感技术、绿色化探技术、尽量用浅钻代替探槽和剥土工程、环保钻井泥浆技术、绿色高效钻探技术等。资源量(储量)的数量和品质研究的主要技术方向包括几何法和矿体圈定与资源量(储量)估算软件(如SD法、MicroMine等)。共伴生矿产综合利用价值研究的主要技术方向包括共伴生矿产的赋存状态研究方法、伴生矿产含量的高精度测试技术、综合指标评价技术、综合利用技术、生态环境影响评估技术等。战略性矿产资源综合评价技术的发展趋势包括:高精度微区原位同位素定年技术、非传统同位素示踪技术、不透明矿物流体包裹体分析技术、成岩成矿模拟实验技术、天(卫星)-空(无人机)-地(地面)-井(钻孔)联合探测技术、多矿种联合勘查(如油钾兼探等)技术、新发现矿种(如天然氢、高纯石英原料等)勘查技术、多元信息联合反演技术、地质图AI读图技术、当量指标矿体圈定方法等。

(10) 智能地下成像与储层建模一体化技术

智能地下成像与储层建模一体化技术是融合地震成像、多物理场反演、数字孪生与人工智能的跨学科技术体系。其核心是通过多源数据融合与智能算法,突破传统地质建模的“静态、单一尺度、低分辨率”局限,实现地下储层从宏观构造到微观孔隙的全尺度、动态化、高精度表征,构建可实时更新的三维数字孪生模型,为油气勘探开发、深地工程及碳封存提供全生命周期决策支持。

其技术内涵分为3个方向:一是多物理场耦合反演,整合地震、测井、重力、电磁等多物理场数据,结合深度学习突破传统反演的线性假设限制,提升复杂地质体的成像分辨率;二是数据增强与知识嵌入,通过生成对抗网络合成稀缺数据,结合地质先验知识构建约束模型,解决小样本问题;三是数字孪生与动态建模,基于实时监测数据构建储层参数的“四维”动态模型。

技术发展趋势向自动化、多尺度化和生态化:从“人工干预”向“端到端自动化”演进,实现孔隙-裂隙网络的自动识别与参数反演;从宏观构造建模向微观孔隙成像延伸,结合纳米CT和分子模拟,指导“甜点”评价;研发自主可控的建模平台,并构建开放应用程序接口(API),支持第三方算法插件集成,形成“核心软件+生态应用”的产业格局。

(11) 煤矿井下瓦斯增产及采空区 CO₂ 封存技术

煤矿井下瓦斯增产技术旨在通过多种物理和化学方法,提高煤层中瓦斯的抽采效率,保障矿井安全并实现资源的有效利用。采空区 CO₂ 封存技术则是在煤矿采空区内注入 CO₂,实现瓦斯替代、环境治理和温室气体减排的多重目标。二者结合,构成了矿井瓦斯治理与环境保护的重要工程技术体系。其主要研究方向包括:高瓦斯煤层高效增透增产技术(如水力压裂、液态 CO₂ 致裂、定向爆破等);采空区裂隙演化及其对气体运移通道的影响,CO₂ 吸附-渗流-封存行为模拟与实验验证;封存稳定性与风险评估模型构建;井下多气体协同调控技术。

未来发展趋势主要集中在“增产+封存”一体化、过程智能控制与环境安全评估等方面。具体表现为：基于物联网与智能传感器的井下气体动态监测系统将进一步完善，实现多源气体浓度与压力信息的实时采集与远程调控；基于大数据驱动的瓦斯抽采-CO₂注入协同优化算法将不断推进；同时，采空区碳封存将与碳资产管理挂钩，形成“资源化+低碳化+智能化”融合的新型煤矿绿色发展路径。

（12）深部矿井热害治理技术

深部矿井热害治理技术是指针对矿井深部高温、高压和复杂地质条件下出现的热灾害，采取的预防、控制和缓解技术措施。随着矿井开采深度增加，地温升高、热源多样、热负荷增大，井下热害问题日趋严重，呈现出高温、高湿、多源叠加的复杂特点。有效的热害治理需从热源控制、传热路径削弱和作业面降温等多个层次协同开展，实现热环境的系统性调控。其主要研究方向包括：高温地热场建模与热源识别；冷却系统设计（如制冷站、冰浆/冷水输送系统）；热障隔热与通风耦合系统优化；深部热害多物理场数值模拟与动态控制策略；热能回收利用与绿色能源协同系统构建。

未来，热害治理将朝着系统集成化、运行智能化和能效梯级利用方向发展。具体趋势包括：发展集制冷、通风、控湿于一体的智能热害调控系统，实现对矿井不同作业区域的差异化温控；引入热能回收技术，将深部高温废热用于井上供暖、工业余热利用等，实现能源循环；同时，结合AI智能算法与数字孪生平台，提升井下热环境响应式调控能力，为深部矿井安全、舒适、高效作业提供技术保障。

5.2.2 Top 4 工程开发前沿重点解读

5.2.2.1 人工智能驱动的虚拟电厂

虚拟电厂是基于电力系统架构，运用现代信息通信、系统集成控制等技术，聚合分布式电源、可调节负荷、储能等各类分散资源，作为新型运营主体协同参与电力系统优化和电力市场交易的电力运行组织模式。不同于传统集中式电厂，虚拟电厂聚合资源类型多元、发用电行为机理复杂、调节能力及偏好差异性高，给其规模化发展带来较大挑战。

人工智能驱动的虚拟电厂通过融合先进人工智能算法、发用电资源物理特征和电力市场机制规则，实现对分布式光伏、用户侧储能、工商业用户、电动交通工具等海量电力需求侧灵活资源的精准预测、高效交易与最优调度。借助时间序列预测、强化学习、大语言模型等人工智能技术，虚拟电厂可精准识别并聚合多类型需求侧资源的灵活调节能力，为新型电力系统缓解保供压力、提高新能源消纳能力、提升电力资源配置效率、助力能源电力行业低碳化转型提供解决方案。

虚拟电厂概念最早于20世纪90年代提出，其发展历程经历了从人工调度到自动化控制，再到利用人工智能技术实现自适应优化的演变。早期虚拟电厂主要依赖人工指令进行调度，本质是在用电紧张时段进行负荷削减与有序用电。随着信息化、数字化技术的进步，虚拟电厂逐

步转变为集中控制模式，通过预设规则进行自动化调度。近年来，随着物联网、云计算与大数据技术的发展，虚拟电厂具备了海量数据实时采集与分析能力，人工智能方法开始广泛应用于虚拟电厂发用电预测、调节能力建模、交易策略生成与调度优化等各个环节，使虚拟电厂的价值不再局限于电力保供，还可满足新型电力系统调峰、备用、调频等灵活调节需求。在此背景下，“AI + 能源”模式成为虚拟电厂技术发展的主流方向。主要研究内容包括人工智能助力下的高精度负荷预测与行为建模、基于人工智能的可调能力动态评估、智能竞价策略生成以及多类型资源自适应调度优化等。在新型电力系统发展趋势下，人工智能驱动的虚拟电厂在促进可再生能源消纳、保障电网安全运行以及推动能源结构转型等方面将具有重要的现实意义和战略价值。

在“人工智能驱动的虚拟电厂”工程研究前沿中，印度以 316 件核心专利位居世界第一，公开量比例为 56.23%，其次为中国、美国和韩国（表 5.21）。其中，美国与印度的合作最多，中国主要与美国建立了合作（图 5.13）。专利产出较多的机构有拉夫里科技大学、国家电网有限公司、卡林加大学等（表 5.22），但机构之间并无合作。

表 5.21 “人工智能驱动的虚拟电厂”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	印度	316	56.23	10	0.83	0.03
2	中国	112	19.93	277	23.01	2.47
3	美国	93	16.55	811	67.36	8.72
4	韩国	27	4.80	26	2.16	0.96
5	德国	8	1.42	32	2.66	4.00
6	加拿大	4	0.71	17	1.41	4.25
7	荷兰	4	0.71	6	0.50	1.50
8	以色列	3	0.53	49	4.07	16.33
9	阿拉伯联合酋长国	3	0.53	0	0.00	0.00
10	日本	3	0.53	0	0.00	0.00

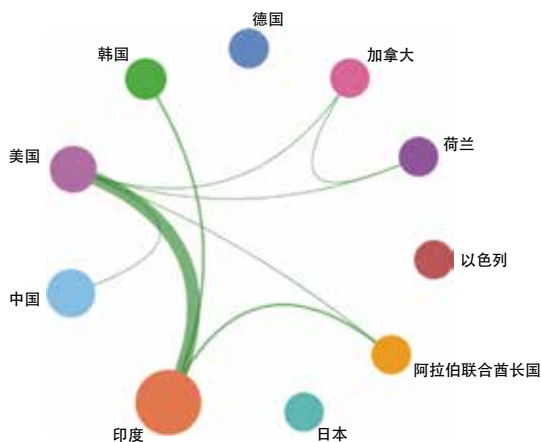


图 5.13 “人工智能驱动的虚拟电厂”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 5.22 “人工智能驱动的虚拟电厂”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	拉夫里科技大学	17	3.02	0	0.00	0.00
2	国家电网有限公司	15	2.67	41	3.41	2.73
3	卡林加大学	11	1.96	1	0.08	0.09
4	强力电气工程投资组合 2022 有限责任公司	10	1.78	4	0.33	0.40
5	萨维塔工程学院	6	1.07	0	0.00	0.00
6	萨维塔医学与技术科学 研究所	6	1.07	0	0.00	0.00
7	通用电气公司	5	0.89	162	13.46	32.40
8	韩国三星电子公司	5	0.89	8	0.66	1.60
9	尼提梅纳克希理工学院	5	0.89	1	0.08	0.20
10	阿努拉格大学	5	0.89	0	0.00	0.00

未来 5~10 年,“人工智能驱动的虚拟电厂”的主要发展方向包括:① 灵活性资源多源异构数据融合与协同分析——融合企业生产、电力气象、人流 / 交通流趋势等海量多元数据,构建更精确、更鲁棒的虚拟电厂预测与运行模型,进一步深挖需求侧资源灵活性潜力;② 面向虚拟电厂的隐私保护与安全协同技术——应用差分隐私、联邦学习、安全多方计算等方法,在满足虚拟电厂调度运行需求的前提下,保护需求侧资源的发用电特征数据隐私,提升虚拟电厂数据安全性;③ 可解释性和可信赖性提升——增强人工智能技术在虚拟电厂场景中的可解释性和可信赖性,规避人工智能黑箱模型导致的小概率极端结果或不可行结果。随着人工智能技术的进步和虚拟电厂市场环境的日益完善,人工智能驱动的虚拟电厂将在未来新型电力系统中发挥日益重要的作用,成为未来能源系统调节资源的重要组成部分。图 5.14 为“人工智能驱动的虚拟电厂”工程开发前沿的发展路线。

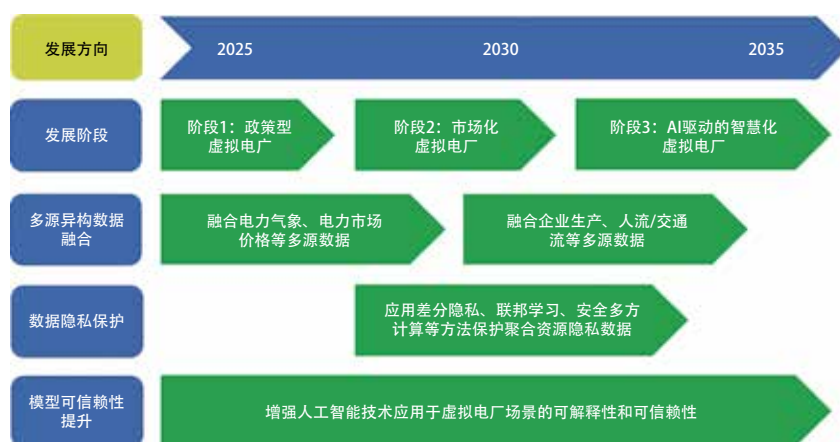


图 5.14 “人工智能驱动的虚拟电厂”工程开发前沿的发展路线



5.2.2.2 极端天气核能安全技术

极端天气是相对罕见的且对人类社会和生态系统产生破坏的天气现象的统称。根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）最新评估报告，全球气候变化不断加剧，台风、干旱、强降水等极端天气事件频发。核电发展始终围绕“安全”这一核心主题，安全被视为核工业的生命线。为积极应对日益增多的极端天气，核电界主要从选址、应急和冷源三方面考虑。

根据国内外核电厂选址有关法规要求，在核电厂选址中需要评价 3 个方面的基本内容：首先是厂址外部环境对核电厂安全可能产生的影响，包括极端天气；其次是核电厂对厂址周围区域环境可能产生的影响，包括极端天气导致核电站对所在区域的影响；最后是实施应急计划的可行性，即在假定核电厂发生需要采取应急事故的工况下，极端天气对实施应急计划的影响。在核电厂选址中，要对这些事件因素（尤其是极端天气可能产生的影响）以极低的发生概率水平或极端状态进行安全评价，以确定厂址的适宜性和工程的设计基准。

核反应堆运行期间，包括停运后，热量必须从堆芯安全导出，而冷源在这一过程中扮演着不可或缺的角色。冷源丧失事件会导致机组降功率运行甚至停机停堆，严重影响核电厂的安全稳定运行。据世界核电运营者协会（WANO）的权威统计，自 2004 年以来，全球范围内已发生上百起核电厂冷源安全风险事件。我国所有核电厂均建设在沿海地区，受海洋环境变化影响显著。首先，优化核电厂取水构筑物，采用直流冷却水系统，而部分电厂由于取水海域条件限制或取水水深要求等，采用深层涵洞取水或组合型取水方式；其次，冷源相关设施的优化和改造是提升核电冷源可靠性的关键环节，包括提升鼓网抗堵能力、优化和改造前置冷源设施等措施；最后，取水构筑物及海水过滤设施的改进，取水构筑物的改进以降低取水流速为标准，并基于生物对外界刺激的应激反应，增设声呐、气泡幕等生物行为驱导装置。

在“极端天气核能安全技术”工程研究前沿中，中国以 35 件核心专利位居世界第一，公开量比例为 57.38%，其次为美国、德国和日本（表 5.23）。其中，美国与丹麦的合作最多（图 5.15）。专利产出较多的机构有鞍钢股份有限公司、中广核研究院有限公司、南佛罗里达大学等（表 5.24），但机构之间并无合作。

表 5.23 “极端天气核能安全技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	35	57.38	57	24.26	1.63
2	美国	16	26.23	125	53.19	7.81
3	德国	2	3.28	28	11.91	14.00
4	日本	2	3.28	21	8.94	10.50
5	丹麦	2	3.28	2	0.85	1.00
6	法国	2	3.28	0	0.00	0.00
7	印度	1	1.64	4	1.70	4.00
8	加拿大	1	1.64	0	0.00	0.00
9	韩国	1	1.64	0	0.00	0.00
10	沙特阿拉伯	1	1.64	0	0.00	0.00

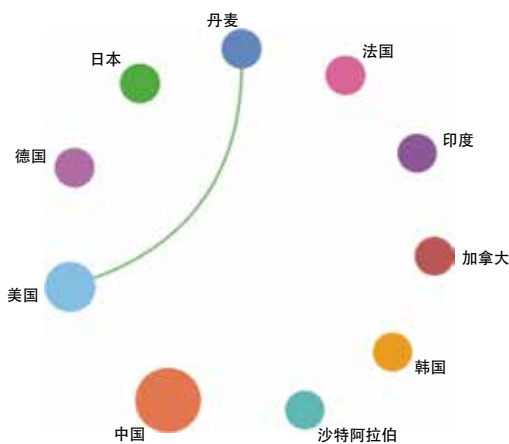


图 5.15 “极端天气核能安全技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 5.24 “极端天气核能安全技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	鞍钢股份有限公司	5	8.20	5	2.13	1.00
2	中广核研究院有限公司	2	3.28	22	9.36	11.00
3	南佛罗里达大学	2	3.28	2	0.85	1.00
4	华北电力大学	2	3.28	0	0.00	0.00
5	罗谢尔集团有限责任公司	2	3.28	0	0.00	0.00
6	丰田汽车公司	2	3.28	0	0.00	0.00
7	布里萨国际有限责任公司	1	1.64	36	15.32	36.00
8	索利迪亚技术公司	1	1.64	28	11.91	28.00
9	光谱系统与技术公司	1	1.64	21	8.94	21.00
10	日本触媒株式会社	1	1.64	20	8.51	20.00

未来 5~10 年重点发展方向（图 5.16）包括：

- 1) 基于原机组循环水系统设备进行升级改造，以提高抵御流道堵塞的能力：海工优化实体工程推进；拦截过滤设施阶梯配置；海生物化学抑制研究；使用高强度网兜提高拦截和处理效率；建立取水区堵塞物监测预警系统。
- 2) 分析冷源丧失的最极端工况，结合事故特征进行多重事故叠加工况下的安全分析：电源方面，地震导致失去厂外 500 kV 和 220 kV 供电、地震导致 6 台固定式柴油发电机无法正常工作；设备方面，安全厂用水泵因失电无法启动；气象方面，取水头部海域大风导致人员无法进行清污作业，造成海面浮游生物不断向取水头部聚集；海生物方面，大量海生物堵塞取水头部；厂区道路，地震导致厂区道路受损，移动柴油发电机、移动泵等设备无法运输至规定位置。
- 3) 多种冷源方案探索：正常运行时机组采用海水冷却二回路，海水丧失后机组采用空冷塔进行冷却，并进行三回路海水流道的清理，同时积极探索二次循环冷却技术在核电站的应用。

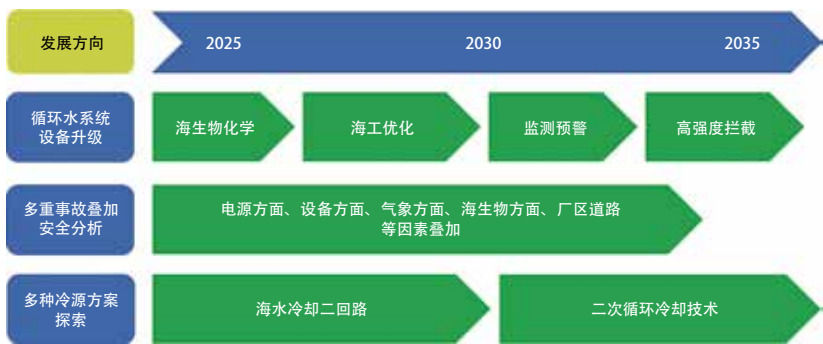


图 5.16 “极端天气核能安全技术”工程开发前沿的发展路线

5.2.2.3 复杂油气藏压裂优化与产能预测技术

复杂油气藏压裂优化与产能预测技术是针对低渗透、超低渗透、页岩气、致密油等非常规油气资源开发的关键工程技术，该技术通过融合地质建模、压裂工艺优化、动态监测与大数据分析等多学科手段，实现对复杂油气藏的高效开发。随着全球能源结构转型，非常规油气资源占据越来越重要的地位。推动该技术的研发与应用，可大幅提升复杂油气藏的单井产量和最终采收率，对保障国家能源安全、促进油气行业技术升级具有重大意义。该技术起源于 20 世纪 70 年代的水力压裂技术，随着水平井和多段压裂技术的发展，逐步形成了以“地质－工程一体化”为核心的现代压裂优化体系。近年来，随着人工智能、大数据等技术的融合应用，压裂优化与产能预测正朝着智能化、精细化、实时化方向发展。

从专利产出情况来看，中国在该领域的专利公开量占比高达 91.88%（表 5.25），显示出极强的技术活跃度和主导地位。美国、加拿大、澳大利亚、法国等国家虽然专利数量不多且公开量较少，但平均被引数较高，表明其技术质量与影响力较强。从机构层面看，中国石油天然气股份有限公司、中国石油化工集团有限公司、西南石油大学、中国石油大学（北京）等机构在专利公

表 5.25 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	713	91.88	2 428	75.95	3.41
2	美国	20	2.58	406	12.70	20.30
3	韩国	13	1.68	39	1.22	3.00
4	日本	8	1.03	22	0.69	2.75
5	俄罗斯	6	0.77	10	0.31	1.67
6	加拿大	3	0.39	74	2.31	24.67
7	澳大利亚	2	0.26	69	2.16	34.50
8	印度	2	0.26	51	1.60	25.50
9	法国	2	0.26	43	1.35	21.50
10	荷兰	2	0.26	38	1.19	19.00

开量和被引数方面领先（表 5.26），显示出中国在产业化与学术研究方面的双重优势。尤其是西南石油大学、成都理工大学等高校在平均被引数上表现突出，表明其研究成果具有较高的学术影响力。国际合作方面，中国虽在数量上领先，但与国际高水平机构的合作仍有待加强；中国国内机构之间的合作较为密集，但跨国合作，尤其是与欧美高水平研究机构的合作，则相对较少（图 5.17 和图 5.18）。

图 5.19 为“复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿的发展路线。从发展趋势来看，复杂油气藏压裂优化与产能预测技术未来将更加注重跨学科融合，特别是与岩石力学、渗流力学、地球物理、计算机科学、人工智能等的结合，推动复杂油气藏压裂技术向“智能、精准、绿色”方向发展。该技术不仅适用于传统页岩气、致密油等非常规油气开发，还可拓展至深层油气、海洋油气等领域。此外，随着碳中和目标推进，该技术还可与 CCUS 技术结合，推动油气行业绿色低碳转型。

表 5.26 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国石油天然气股份有限公司	152	19.59	577	18.05	3.80
2	中国石油化工集团有限公司	98	12.63	305	9.54	3.11
3	西南石油大学	65	8.38	311	9.73	4.78
4	中国石油大学（北京）	65	8.38	231	7.23	3.55
5	中国海洋石油集团有限公司	55	7.09	98	3.07	1.78
6	中国矿业大学（北京）	17	2.19	92	2.88	5.41
7	北京科技大学	15	1.93	50	1.56	3.33
8	西安石油大学	13	1.68	54	1.69	4.15
9	成都理工大学	9	1.16	136	4.25	15.11
10	中煤科工集团重庆研究院有限公司	8	1.03	8	0.25	1.00

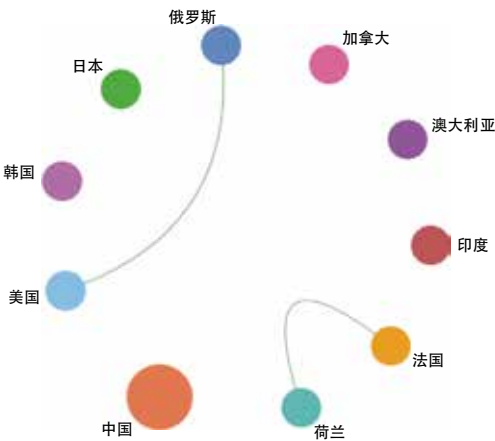


图 5.17 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

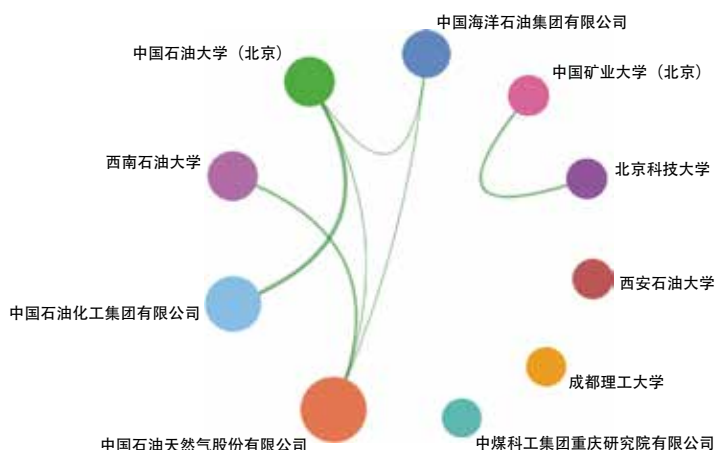


图 5.18 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

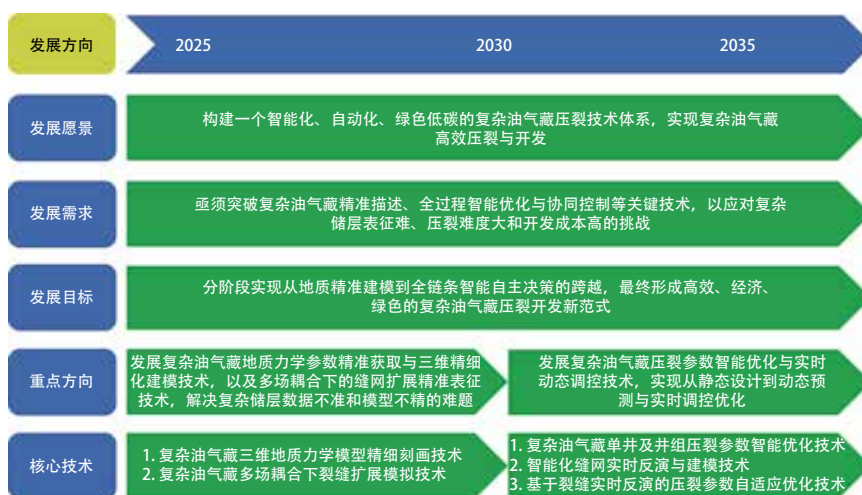


图 5.19 “复杂油气藏压裂优化与产能预测技术”工程开发前沿的发展路线

5.2.2.4 超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备

深层与超深层赋存我国 39% 剩余石油、57% 剩余天然气，预测万米深地仍蕴藏大量油气资源。我国超深层油气资源集中于塔里木盆地、四川盆地等区域。当前钻完井深度突破 9 000 m，但超深层“四超”条件导致钻井风险大、质量控制困难。发展超深层油气资源开采技术可增强我国能源自主供给能力，减少进口依赖，缓解能源供需矛盾；绿色智能一体化钻井技术及装备的发展能够推动钻井过程提速降本，减少环境影响，实现经济与环保双赢。超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备是指融合智能化、绿色环保理念与先进钻井工艺，利用智能算法、传感器、大数据，集成地质数据采集、井眼轨迹控制、钻井参数优化，配合节能低污染装备，实现全流程智能—绿色作业。早期钻井技术简单，难以满足超深层需求，而近年深井超深井技术迅猛发展，自动化钻机、井身结构优化、控压钻井等关键技术实现突破，8 000 m 超深井常态化，首口万米井塔科 1 井挺进 11 100 m。国内，塔里木盆地超深层油气丰富，中国石化西北油田在此开展智能导

钻实钻应用；四川盆地也是重点区域，地层复杂，需先进钻井技术。国际上，中东地区如沙特阿拉伯、阿联酋超深层油气开发活跃，吸引全球技术合作；美国二叠纪盆地，页岩油气开发推动钻井技术进步。未来，智能化与多技术融合加深，5G、大数据、云计算助力实时决策与数字孪生；绿色低碳升级，研发环保钻井液、采用清洁能源；装备向高可靠性、高适应性发展。

在专利产出方面，中国占据绝对主导地位，其专利公开量占比高达 99.17%，被引数占比 94.87%（表 5.27）。其余国家如澳大利亚、美国、阿根廷等虽然也有少量专利产出，但数量和影响力远低于中国；美国、阿根廷和荷兰的平均被引数较高，显示出较强的个别影响力。主要研究机构包括：中国石油大学（北京）、西南石油大学、成都理工大学等高校，其在钻井技术理论研究、装备研发贡献突出；中国石油天然气股份有限公司、中国石油化工集团有限公司等大型石油企业，其拥有先进研发与实践平台（表 5.28）。国际化合作开展较少，当前相关研究合作主要集中在阿根廷与荷兰之间（图 5.20）。主要机构间的合作网络如图 5.21 所示。

表 5.27 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	955	99.17	2 017	94.87	2.11
2	澳大利亚	3	0.31	10	0.47	3.33
3	美国	2	0.21	48	2.26	24.00
4	阿根廷	1	0.10	51	2.40	51.00
5	荷兰	1	0.10	51	2.40	51.00
6	日本	1	0.10	0	0.00	0.00
7	南非	1	0.10	0	0.00	0.00

表 5.28 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国石油天然气股份有限公司	219	22.74	350	16.46	1.60
2	中国石油化工集团有限公司	148	15.37	211	9.92	1.43
3	西南石油大学	147	15.26	400	18.81	2.72
4	中国石油大学（北京）	118	12.25	422	19.85	3.58
5	四川谐铭科技有限公司	18	1.87	35	1.65	1.94
6	中国海洋石油集团有限公司	16	1.66	31	1.46	1.94
7	中国建筑材料科学研究总院有限公司	14	1.45	30	1.41	2.14
8	西安石油大学	10	1.04	31	1.46	3.10
9	长江大学	9	0.93	14	0.66	1.56
10	成都理工大学	7	0.73	90	4.23	12.86

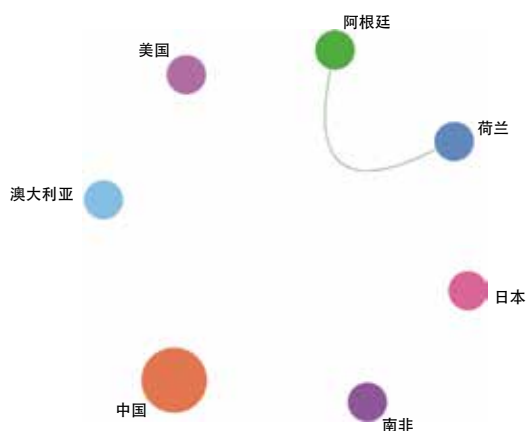


图 5.20 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿主要国家间的合作网络

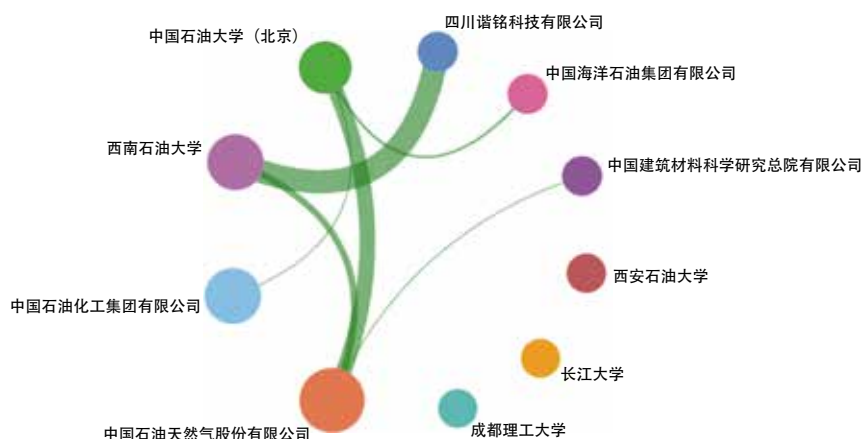


图 5.21 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿主要机构间的合作网络

未来 5~10 年，超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备将迎来全方位的变革与突破，为能源行业的可持续发展注入强大动力。中国已在塔里木盆地、四川盆地等地的现有超深层油气田利用绿色智能一体化技术及装备对老井进行改造，提高钻井效率，并优化新井钻井方案，提升开发效益。该领域的重点发展方向及趋势如下：钻井智能决策与精准控制，例如借助 5G 通信技术的高速低延迟特性，实现井下与地面数据的即时传输，结合大数据分析、人工智能算法，对钻井过程中的地质变化、设备状态等进行实时分析，使钻井决策更精准高效；井下智能机器与高效能装备研发，研发能在复杂井下环境自主作业的机器人，执行钻井工具更换、井壁修复等任务，降低人工干预，提升作业安全性与精准度，进一步提高钻机的自动化程度，实现更多作业环节的自动控制，减少人工操作，增强设备的可靠性与稳定性，降低故障率，保障超深层钻井作业的连续性；新型钻井低碳环保型材料研发，通过应用绿色技术大幅减少钻井作业对环境的负面影响，减少化学药剂使用、降低废弃物排放、提高资源利用率。图 5.22 为“超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿的发展路线。

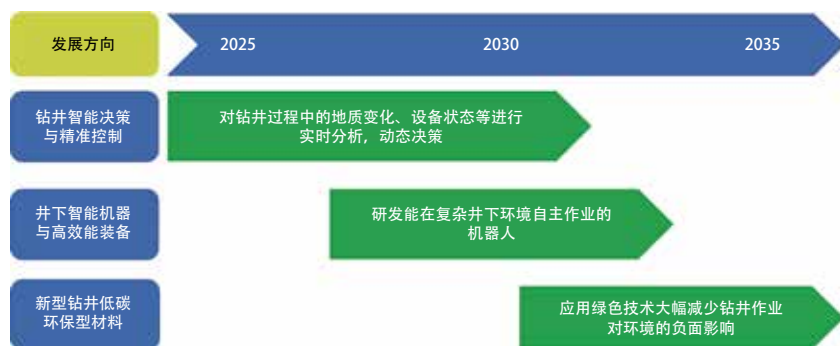


图 5.22 “超深层油气资源绿色智能一体化钻井技术及装备”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：黄 震 周守为 苏义脑 彭苏萍

中国工程院二局能源与矿业工程学部办公室：解光辉 邢慧娴

Frontiers in Energy 编辑部：刘瑞芹 殷 靓 付凌霄

图书情报人员：陈天天

能源和电气科学技术与工程学科组：

组 长：黄 震 岳光溪

秘书长：巨永林 周 托

课题组成员：严 正 沈文忠 上官文峰 沈水云 王 倩 陈思捷 赵 耀 韩 东 张家博

执笔组成员：李 昂 张 宸 林天全 冯云岗 杜小泽 董保灿

核科学技术与工程学科组：

组 长：叶奇蓁 李建刚

秘书长：苏 罡 高 翔

课题组成员：李恭顺 杨 勇 郭 晴 郭 林 林贤军 白云生

执笔组成员：李恭顺 杨 勇 郭 晴 郭 林 林贤军 白云生

地质资源科学技术与工程学科组：

组 长：赵文智 毛景文

秘书长：刘 敏 王 坤

课题组成员：刘 敏 王 坤 丁 麟 简 伟 李永新 王 辽 徐文华

执笔组成员：简 伟 王 坤 刘 敏 李永新 陈 念 李厚民 王 辽 徐文华 关 铭

矿业科学技术与工程学科组：

组 长：袁 亮 李根生 吴爱祥

秘书长：周福宝 张 农 宋先知 江丙友

课题组成员：宋先知 江丙友 时国庆 梁东旭 阮竹恩 王海柱 王高升

执笔组成员：江丙友 时国庆 梁东旭 阮竹恩 王高升 张鹏成 孙 一

A large, light blue circular graphic with a dashed line and an arrow pointing clockwise, framing the chapter title.

第六章

土木、水利与建筑工程前沿



6.1 工程研究前沿

6.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿汇总见表 6.1，涉及岩土与地下工程、测绘工程、建筑学、土木工程材料、结构工程、交通工程、市政工程、城市规划与风景园林、水利工程、工程力学等学科方向。其中“建筑物理性能数智化预测与后评估方法”“气候演变对道路/轨道/机场工程安全的影响机理”“城市雨/污水系统的数字重构理论与方法”和“数智赋能水库大坝安全性能提升”为专家提名前沿，其他为数据挖掘前沿或基于数据挖掘前沿凝练而成的前沿。各前沿所涉及的核心论文自 2019 年至 2024 年的发表情况见表 6.2。

(1) 深地深海地质结构三维重构与参数智能反演

深地深海地质结构三维重构与参数智能反演是指通过机器视觉与人工智能（AI）技术，对地球深部及海底地质结构进行高精度三维建模，并智能反演关键地质参数的技术体系。相较于传统勘探手段“高成本、低分辨率”的局限性，该技术利用图像、点云等多源数据，构建地下地质结构的可视化与参数化表征体系，为深部资源开发、地质灾害预警及重大工程安全保障提供核心支撑。近年来，随着中国“深地工程”计划推进和“可燃冰”试采等深海开发项目实施，深地深海

表 6.1 土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	深地深海地质结构三维重构与参数智能反演	57	2 909	51.04	2021.7
2	月球与火星智能遥感探测	79	4 102	51.92	2021.7
3	建筑物理性能数智化预测与后评估方法	40	2 870	71.75	2021.5
4	人工智能辅助水泥基材料性能调控	27	1 809	67.00	2022.9
5	混凝土结构性能智能检测与监测	159	15 008	94.39	2021.6
6	气候演变对道路/轨道/机场工程安全的影响机理	16	728	45.50	2021.8
7	城市雨/污水系统的数字重构理论与方法	31	1 347	43.45	2022.4
8	社区建成环境多模态感知和健康宜居优化方法	98	5 493	56.05	2021.7
9	数智赋能水库大坝安全性能提升	25	1 006	40.24	2022.8
10	数据驱动的工程结构建模与计算	26	5 337	205.27	2022.0

表 6.2 土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	深地深海地质结构三维重构与参数智能反演	4	10	13	13	6	11
2	月球与火星智能遥感探测	7	10	19	15	16	12
3	建筑物理性能数智化预测与后评估方法	6	8	7	5	7	7
4	人工智能辅助水泥基材料性能调控	0	1	2	5	10	9
5	混凝土结构性能智能检测与监测	22	33	17	32	23	32
6	气候演变对道路 / 轨道 / 机场工程安全的影响机理	1	4	2	3	2	4
7	城市雨 / 污水系统的数字重构理论与方法	2	0	6	8	6	9
8	社区建成环境多模态感知和健康宜居优化方法	14	18	17	9	16	24
9	数智赋能水库大坝安全性能提升	0	2	3	4	5	11
10	数据驱动的工程结构建模与计算	0	4	4	8	8	2

地质结构的精细刻画需求日益迫切，但受限于极端环境下的数据获取困难性、结构复杂性和多源信息异构性，亟须突破三维重构与智能反演关键技术。其主要研究方向包括：① 深地岩体结构机器视觉三维重建与裂隙识别；② 多源地球物理数据融合的深地深海地层参数智能反演；③ 深部高温高压环境岩石物理参数动态反演与不确定性量化；④ 深部构造活动与地质灾害实时重构及风险预警；⑤ 深地深海工程地质结构智能评价与安全防护体系构建。未来主要发展趋势在于多模态数据协同处理与 AI 模型可解释性提升，推动实现现场实时重构；构建深地深海地质数字孪生系统，支撑工程全生命周期管理；强化地质－工程－AI 跨学科融合，实现从地质结构识别到灾害防控的智能化闭环。从 2019 年至 2024 年，核心论文数为 57，被引频次为 2 909，篇均被引频次为 51.04。

(2) 月球与火星智能遥感探测

月球与火星智能遥感探测是指利用人工智能、大数据和深度学习等新兴技术，对月球和火星的遥感数据（轨道器和巡视器）进行高效获取、处理与解译，以实现对外地环境的智能感知与科学认知。其研究意义在于突破传统遥感探测在数据处理效率、特征提取精度及自主决策能力上的局限，为揭示月球与火星的地质演化、资源分布及潜在宜居环境提供技术支持，同时也为未来深空探测和星际探索奠定技术基础。其主要研究方向包括：① 多源遥感数据融合与解译；② 地貌单元与矿物分布智能识别；③ 典型目标检测与变化过程监测；④ 探测器在轨自主感知与任务规划。未来主要发展趋势在于以多模态数据智能融合与深度解译为核心，构建资源分布、地质演化与风险认知体系；加快行星的科学知识图谱建立，实现由宏观观测向微观机理解析、由数据驱动向知识驱动的转变；发展面向月球与火星智能遥感探测的专业大模型，提升目标解译、任务规划与风险预测能力。未来月球与火星智能遥感探测将在科学研究、资源利用、安全保障与深空探索中发挥核心支撑作用，形成深度智能化的探测新范式。从 2019 年至 2024 年，核心论文数为 79，被引频次为 4 102，篇均被引频次为 51.92。

（3）建筑物理性能数智化预测与后评估方法

建筑物理性能是衡量建筑环境质量与使用舒适度的核心指标，涵盖热环境、光环境、声环境、风环境及能源效率等多维属性。近年来，随着表示学习、物理机理嵌入、边云协同计算、强化学习等数智技术的突破，建筑物理性能的预测与后评估方法正迎来范式变革。构建“建筑物理性能数智化预测与后评估技术体系”，是推动建筑行业从经验依赖向数据驱动、从静态设计向全生命周期动态设计优化转型的关键路径，对实现建筑领域低碳化、智能化与高质量发展具有深远战略意义。其主要研究方向包括：① 建筑多物理场耦合建模与可计算表征；② 知识增强的多尺度性能预测与不确定性量化；③ 边云协同的建筑运行诊断与异常溯源；④ 基于需求响应的自主调控与多目标优化。未来主要发展趋势在于构建建筑性能基准数据体系、深化可解释机理建模、开发建筑物理通用模型框架、人机协同自主调控系统集成等。从 2019 年至 2024 年，核心论文数为 40，被引频次为 2 870，篇均被引频次为 71.75。

（4）人工智能辅助水泥基材料性能调控

人工智能辅助水泥基材料性能调控是指利用机器学习、深度学习等人工智能技术，对水泥基材料从原材料选择、配合比设计、制备到服役的全过程进行数据驱动建模、逆向设计和智能优化，旨在突破传统经验法“周期长、成本高、效率低”的局限，实现材料性能的精准、高效、按需设计与调控。其主要研究方向包括：① 构建融合材料组分、工艺与性能的“材料基因”数据库，基于 AI 算法，实现按目标性能逆向推荐最优材料配比；② 构建从微观结构到宏观性能的跨尺度 AI 预测模型，深刻揭示材料性能形成机理；③ 利用计算机视觉、传感器数据流和强化学习等技术，实现材料生产过程的实时监测与动态调控；④ 基于长期监测数据和环境要素构建时序预测模型，评估结构在复杂环境下的性能演变与剩余寿命。未来主要发展趋势在于构建跨尺度、全链条的智能设计平台，深度融合物理机理与数据驱动模型，提升模型的可解释性与预测能力。同时，随着物联网（IoT）与数字孪生技术的发展，实现材料数据的实时采集与高效融合利用，最终形成从实验室设计到工程应用与长效运维的精准智能控制体系，为重大基础设施的长寿命、高安全与可持续运行提供关键技术支撑。从 2019 年至 2024 年，核心论文数为 27，被引频次为 1 809，篇均被引频次为 67.00。

（5）混凝土结构性能智能检测与监测

混凝土结构性能智能检测与监测是指利用先进的传感器、物联网、大数据、人工智能等技术，对混凝土结构的“健康状态”进行自动化、实时化、精细化的“体检”和“长期健康管理”。智能检测通常是间歇性或一次性的，旨在评估结构在特定时刻的性能状态，发现已有的缺陷和损伤；智能监测是长期、连续性的，旨在实时感知结构在环境和荷载作用下的响应，掌握结构性能的演变趋势，预警异常状态，为预测性维护提供数据支持。当前我国基础设施建设进入“建养并重”阶段，混凝土结构性能智能检测与监测对推进“城市更新”国家战略具有重大意义。其主要研究方向包括：① 高灵敏度、高耐久性的先进感知技术与智能传感器；② 高精度、高效率的缺陷智能检测与识别方法；③ 海量、异构监测数据智能处理与挖掘；④ 高保真结构数字孪生与预测性维护；⑤ 灵活自主智能化检测 / 监测装备与机器人；⑥ 数物融合的混凝土结构性能演化模

型动态校准。未来主要发展趋势在于“感知—数据—模型—决策”的深度集成，以实现混凝土结构基础设施全生命周期智慧运维。从2019年至2024年，核心论文数为159，被引频次为15 008，篇均被引频次为94.39。

（6）气候演变对道路 / 轨道 / 机场工程安全的影响机理

在全球气候变化背景下，极端天气事件（如特大暴雨、持续高温、冻融循环等）的强度和频率显著增加，道路、轨道、机场等交通基础设施的性能保持与安全保障面临严峻挑战。气候演变导致的“热—水—力—化学”等多场耦合效应显著，诱发材料老化、结构损伤和功能劣化，进而引发交通基础设施结构损伤、沉降变形、表面病害等风险，严重威胁交通系统的可靠性与安全性。因此，深入研究气候演变对交通基础设施安全的影响机理，对保障基础设施全生命周期安全、提升其防灾减灾能力具有重大的理论价值和现实意义。其主要研究方向包括：① 极端气候环境下基础设施致灾荷载识别与表征；② 多场耦合下材料损伤与结构劣化效应；③ 设施损伤累积演化与全生命周期性能衰退规律；④ 多尺度损伤演化的灾变突变机制。未来主要发展趋势在于深度融合机理与数据，构建精准映射致灾荷载、推演损伤累积与性能衰退全过程的数字孪生系统，实现从状态评估、寿命预测到风险预警的一体化智能决策，以系统性应对未来气候变化带来的挑战。从2019年至2024年，核心论文数为16，被引频次为728，篇均被引频次为45.50。

（7）城市雨 / 污水系统的数字重构理论与方法

城市雨 / 污水系统的数字重构是指依托数字技术对城市雨水收集、传输、处理以及污水管网输送、处理、资源化利用等全流程进行数字化建模、仿真与优化，以突破系统依赖经验运维、状态感知滞后、资源调配低效等瓶颈。近年来，频发的极端降雨导致的城市内涝、合流制管网溢流污染、污水资源化利用率低等问题凸显，传统运维模式已难以满足现代城市水环境治理需求，开展雨 / 污水系统数字重构理论与方法研究，对提升系统韧性、实现精细化管理具有重要意义。其主要研究方向包括：① 雨 / 污水管网全生命周期智慧管理技术；② 基于水文—水力耦合的系统动态仿真模型构建；③ 数字孪生驱动的管网故障智能诊断与预警；④ 多目标优化的雨 / 污水系统调度理论与方法；⑤ 基于数字重构的雨 / 污水分流改造与合流制溢流管控方案优化。未来主要发展趋势在于深化物理机理与数据驱动融合的建模方法，提升模型对城市雨 / 污水系统复杂场景的适配性；依托物联网、边缘计算实现系统状态实时感知，强化数字孪生的动态更新能力；推动数字重构与智慧水务平台深度结合，构建“监测—仿真—调度—评估”闭环的雨 / 污水系统综合治理体系，助力实现优质高效的城市水环境治理目标。从2019年至2024年，核心论文数为31，被引频次为1 347，篇均被引频次为43.45。

（8）社区建成环境多模态感知和健康宜居优化方法

城市发展进入存量更新阶段，提升健康宜居性是社区建成环境优化的关键目标。目前规划实践面临感知数据缺失、空间活动复杂、健康机理模糊、场景目标多样等挑战，难以满足高质量发展的精细化、智能化决策需求。社区建成环境多模态感知和健康宜居优化方法是智能城市规划与公共健康交叉领域的重要研究前沿，其内涵是通过多源异构数据采集、融合与分析技术，

全面感知和量化社区建成环境的物理特征及其动态变化,同时结合居民行为模式与健康效应数据,建立环境-健康关联模型,进而提出循证空间优化策略,最终实现社区健康绩效和人居质量的提升。其主要研究方向包括:①多模态人地数据的采集、融合与协同计算;②跟踪评估社区空间演化对健康宜居的影响;③社区环境-健康行为-健康宜居效应的级联机制;④多目标优化的更新设计与干预策略以及健康公平性研究;⑤基于社会人智能体模拟的健康宜居评价模型与规划治理平台。未来主要发展趋势将侧重于智能感知技术的嵌入式应用,多学科方法深度融合、人工智能驱动的动态决策支持,构建集成模拟、评估与干预闭环的智能化决策支持框架。该领域正逐步形成一套从感知、认知到干预的完整方法论体系,有望成为未来健康城市科学研究的重要范式。从2019年至2024年,核心论文数为98,被引频次为5493,篇均被引频次为56.05。

(9) 数智赋能水库大坝安全性能提升

水库大坝是流域防洪、国家水网构建及河湖生态修复的核心基础设施,但当前面临工程老化、自然灾害频发等现实挑战,传统管理模式难以满足精细化安全风险防控的需求。数智赋能,通过将人工智能、数字孪生等新一代信息技术与坝工知识深度融合,推动大坝全生命周期管控数字化、智能化,动态提升服役性能。亟须研究数智赋能理论与方法,构建大坝全生命周期数字化映射体系与智能化运维平台,实现“透彻感知-智能诊断-优化决策-智慧管控”闭环迭代。其主要研究方向包括:①“天-空-地-水-工”透彻感知与多源多模态数据治理体系,破解数据碎片化难题;②“数据-机理-知识”协同驱动的大坝运行风险“识别-诊断-预警-馈控”理论与方法,强化风险预判能力;③基于帕累托最优的大坝风险知情智慧决策方法,平衡安全与效益;④复杂环境下人机协同检测及修复加固技术与装备,提升现场作业效能;⑤大坝全生命周期“感知-分析-决策-执行”智慧运维新范式,实现管理闭环。未来发展将聚焦主动探索、持续学习、自主演进的具身智能新方法,突破材料-结构-功能协同的大坝智能修复与自适应调控技术,最终建成能实时感知、会自主分析、可智能调控、善精准处置的智能大坝,保障工程安全与综合效能发挥。从2019年至2024年,核心论文数为25,被引频次为1006,篇均被引频次为40.24。

(10) 数据驱动的工程结构建模与计算

围绕土木工程结构全生命周期中的复杂力学问题,数据驱动方法可融合多源数据与物理机理,利用机器学习等多种方法协同开展结构建模及计算,并结合实时监测数据对模型状态进行动态更新,从而助力实现工程结构在复杂工况条件下的高效分析。其主要研究方向包括:对材料复杂行为的本构模型预测、结构健康监测与数字孪生/数字表亲模型建立、结构多参数特征提取及多尺度与多物理场建模方法等方面,例如以大语言模型(LLM)提取工程知识并自动配置仿真参数,开展结构响应行为仿真分析;通过图神经网络(GNN)等方法表征复杂结构的几何拓扑关系,支撑多尺度多分辨率的模型建立;基于物理信息神经网络(PINN)等框架嵌入物理约束,建立本构模型并实现结构力学问题的高维微分方程求解等。然而,现阶段数据驱动的工程结构建模与计算仍面临高质量数据稀缺、计算效率与实时性矛盾、模型可解释性与物理一致性不足等问题。

未来,需通过力学、土木工程与计算机科学的深度交叉融合,提升模型的透明度和可信度,进一步发展物理机理与数据驱动融合方法,形成智能化、生成式的结构建模及计算框架,为工程结构全生命周期性能演化及性态评估提供普适性工具。从 2019 年至 2024 年,核心论文数为 26,被引频次为 5 337,篇均被引频次为 205.27。

6.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

6.1.2.1 深地深海地质结构三维重构与参数智能反演

全球深地深海资源开发与工程建设需求旺盛、前景广阔。随着工程向极端环境区域加速推进,深地岩体裂隙识别精度不足、深海地层参数反演困难、高温高压岩石物理参数不确定性突出、海底构造活动实时监测滞后等问题日益凸显,严重威胁工程安全。同时,传统地质-工程评价体系割裂,难以实现全链条智能管控。研究人工智能驱动的多源数据融合与智能评价技术,对构建深地深海工程安全防控体系、保障资源高效开发具有重大战略意义。主要研究方向包括:

1) 深地岩体结构机器视觉三维重建与裂隙识别:针对深地岩体裂隙识别精度不足导致的工程安全风险,亟须建立高精度三维结构模型支撑设计决策。基于钻孔岩芯图像与地震点云数据的深度学习分割技术,实现裂隙特征的自动提取与三维重建,为工程稳定性评估提供量化依据。

2) 多源地球物理数据融合的深地深海地层参数智能反演:深部地层参数反演受单一数据来源分辨率限制,难以精准刻画资源分布特征。通过神经网络融合地震、重力、磁力及测井多源数据,突破传统反演方法局限性,显著提升孔隙度、密度等关键参数的反演精度与勘探效率。

3) 深部高温高压环境岩石物理参数动态反演与不确定性量化:极端高温高压环境下岩石参数测量困难且不确定性突出,制约深部资源安全开发。基于贝叶斯深度学习,融合物理约束与实验数据,动态反演岩石参数并输出概率分布,为储层风险量化与开发方案优化提供科学支撑。

4) 深部构造活动与地质灾害实时重构及风险预警:深部构造活动监测滞后导致地质灾害预警能力不足,威胁深地深海工程安全。利用机器视觉实时分析观测站图像与声呐数据,动态重构构造形变特征并触发分级预警机制,实现灾害风险的主动防控。

5) 深地深海工程地质结构智能评价与安全防控体系构建:传统地质-工程评价体系割裂,难以支撑深地深海工程全周期风险管控。构建地质-工程耦合的 AI 决策系统,融合岩体结构、应力场及工程参数进行智能评价,自动生成风险防控方案并实现监测-预警-治理闭环管理。

“深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”的核心论文有 57 篇,其篇均被引频次为 51.04 (表 6.1)。核心论文产出排名前五的国家为中国、新加坡、美国、挪威和韩国(表 6.3),其中,中国的论文占比为 59.65%,是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家为英国、日本、美国、中国和新加坡,其中,中国的篇均被引频次为 54.94,略高于平均水平。由图 6.1 可知,中国与新加坡和美国之间有着比较密切的合作关系。

核心论文产出排名前五的机构为新加坡国立大学、同济大学、新加坡科技与设计大学、香港城市大学和中国地质大学(表 6.4)。新加坡国立大学聚焦基于机器学习与概率模型,研究地质

不确定性的三维刻画、岩土体参数空间变异、隧道变形破坏机制与可靠度，实现岩土工程非均质场的智能预测与风险评估。同济大学的研究内容为融合多源数据与概率－机器学习，量化地质不确定及土体空间变异，研究隧道变形机制与渐进界面预测，提出改进耦合马尔可夫链、卷积神经网络（CNN）-U-Net 等新法，评估荷载耦合作用与可靠度。新加坡科技与设计大学围绕 MUSIC 岩土库，用贝叶斯层次－谱聚类－CNN 识别异常、预测砂土小应变模量，构建准场地多变量分布，并以改进耦合马尔可夫链量化地质不确定对隧道性能影响。由图 6.2 可知，各主要机构间有一定的合作关系。

施引核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、新加坡、英国和澳大利亚（表 6.5），施引核心论文产出排名前五的机构为同济大学、中国地质大学、香港城市大学、新加坡国立大学和新加坡科技与设计大学（表 6.6）。从施引情况来看，排名前五的核心论文产出国其施引核心论文数也比较多，其中，中国的发表论文数和施引论文数均排名第一，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

表 6.3 “深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	34	59.65	1 868	54.94	2021.9
2	新加坡	20	35.09	1 042	52.10	2021.8
3	美国	13	22.81	730	56.15	2021.2
4	挪威	4	7.02	167	41.75	2022.8
5	韩国	3	5.26	90	30.00	2021.7
6	德国	3	5.26	57	19.00	2023.3
7	英国	2	3.51	179	89.50	2022.0
8	日本	2	3.51	142	71.00	2021.0
9	加拿大	2	3.51	63	31.50	2021.0
10	澳大利亚	1	1.75	33	33.00	2022.0

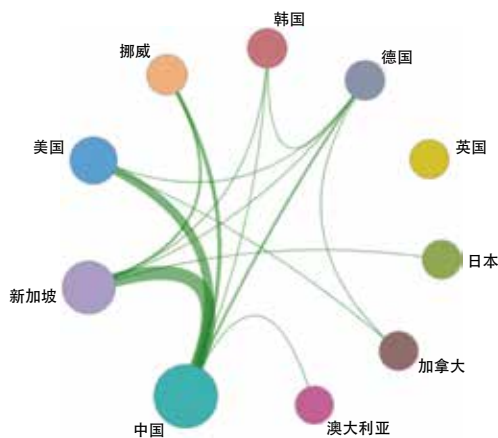


图 6.1 “深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 6.4 “深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	新加坡国立大学	12	21.05	754	62.83	2021.2
2	同济大学	9	15.79	578	64.22	2022.1
3	新加坡科技与设计大学	9	15.79	427	47.44	2022.3
4	香港城市大学	8	14.04	430	53.75	2021.6
5	中国地质大学	6	10.53	433	72.17	2021.2
6	台湾“中央大学”	5	8.77	536	107.20	2020.0
7	戴顿大学	4	7.02	337	84.25	2020.5
8	挪威岩土工程研究所	3	5.26	152	50.67	2022.3
9	浙江工业大学	2	3.51	164	82.00	2021.5
10	斯坦福大学	2	3.51	95	47.50	2020.5

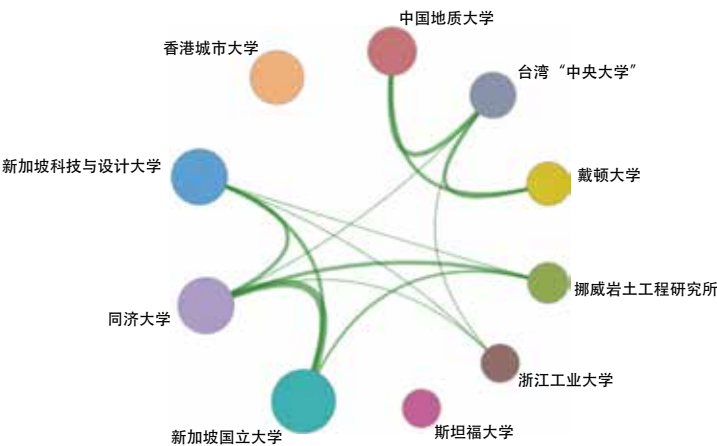


图 6.2 “深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 6.5 “深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 175	58.90	2023.2
2	美国	168	8.42	2023.0
3	新加坡	142	7.12	2022.8
4	英国	100	5.01	2023.2
5	澳大利亚	91	4.56	2023.2
6	日本	70	3.51	2022.8
7	韩国	65	3.26	2023.0
8	印度	53	2.66	2023.3
9	加拿大	46	2.31	2022.5
10	伊朗	46	2.31	2022.8



表 6.6 “深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	同济大学	121	17.66	2022.9
2	中国地质大学	102	14.89	2023.2
3	香港城市大学	69	10.07	2022.7
4	新加坡国立大学	59	8.61	2022.1
5	新加坡科技与设计大学	55	8.03	2023.0
6	河海大学	53	7.74	2023.2
7	中南大学	53	7.74	2023.3
8	中国科学院	47	6.86	2023.4
9	浙江大学	43	6.28	2023.1
10	香港科技大学	42	6.13	2023.5

综合以上统计数据，在“深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”研究前沿领域，与国外同行相比，中国学者具有一定的优势，并逐步发展到领先地位。

未来 10 年，该前沿将聚焦构建深地深海工程全生命周期智能风险防控体系，重点突破多源地球物理数据协同反演与不确定性量化技术，实现极端环境下地质参数的动态精准感知；推动 AI 驱动的地质－工程耦合决策模型从静态评估向实时动态预测—控制闭环升级，形成“感知—分析—决策—治理”一体化智能管控范式；加速技术成果向行业标准和产业化平台转化，建立覆盖全球深海油气田、海底隧道、深地实验室及地热开发等重大工程的灾害预警网络。该前沿研究成果将显著提升工程安全水平与资源开发效率，成为保障国家深地深海战略安全的核心技术支撑（图 6.3）。



图 6.3 “深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”工程研究前沿的发展路线

6.1.2.2 月球与火星智能遥感探测

随着深空探测任务的推进，遥感数据规模急剧增加。然而，行星表面环境复杂多变，传统方法难以满足高效、精准的信息获取需求。地貌分类、含水矿物识别、地质结构解析、资源分布探测等任务对数据处理能力提出更高要求。同时，行星演化规律、潜在资源利用以及宜居环境评估

等重大科学问题亟须突破。开展月球与火星智能遥感探测研究，不仅有助于提升数据处理与信息挖掘效率，还将深化人类对月球与火星的整体认知，为资源开发、基地建设及未来深空探索提供重要理论和技术支撑。主要研究方向包括：

1) 多源遥感数据融合与解译：月球与火星遥感数据来源多样，不同传感器在空间、光谱和时间分辨率上差异显著，单一数据源难以全面反映地表信息。研究通过对光学、雷达、高光谱等多源轨道器和巡视器数据进行预处理、特征提取与融合建模，获取地质单元、地表覆盖与结构形态的综合信息，进而提升遥感解译的精度与适用性。

2) 地貌单元与矿物分布智能识别：月球与火星表面地貌复杂，矿物类型多样，传统识别方法依赖人工解译，效率与准确性受限。研究基于高光谱和高分辨成像轨道器数据，结合深度学习与光谱匹配算法，实现地貌类型与矿物成分的自动分类和识别，为资源探测和宜居性科学分析提供基础数据与技术支撑。

3) 典型目标检测与变化过程监测：月球与火星表面存在撞击坑、季节性斜坡条纹、极地冰盖变化活动等动态变化特征，其时空演化规律对地质研究和宜居性分析具有重要意义。研究基于轨道器的时间序列数据，利用智能检测与变化分析模型，实现典型地表目标的自动提取与动态变化监测，从而揭示地质演化与表面活动过程，为科学探测提供动态证据。

4) 探测器在轨自主感知与任务规划：深空探测环境复杂，受通信延迟和任务不确定性制约，地面控制难度大。研究通过在探测器中嵌入智能算法，实现对环境数据的实时感知、任务优先级评估与路径规划，提升自主决策与应变能力。该研究方向旨在减少地面干预，提高任务执行效率与环境适应性，为长期、远程的月火探测任务提供技术保障。

“月球与火星智能遥感探测”的核心论文有 79 篇（表 6.1），其篇均被引频次为 51.92。核心论文产出排名前五的国家为美国、中国、法国、英国和西班牙（表 6.7），其中，中国的论文占比为 40.51%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家为丹麦、德国、加拿大、法国和美国，其中，中国的篇均被引频次为 50.38，略低于平均水平。由图 6.4 可知，论文数量排名前十的国家之间有较为密切的合作关系。

表 6.7 “月球与火星智能遥感探测”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	37	46.84	2 047	55.32	2021.4
2	中国	32	40.51	1 612	50.38	2022.0
3	法国	14	17.72	901	64.36	2022.0
4	英国	11	13.92	601	54.64	2021.5
5	西班牙	10	12.66	457	45.70	2022.4
6	德国	9	11.39	767	85.22	2021.4
7	加拿大	6	7.59	501	83.50	2021.7
8	意大利	6	7.59	235	39.17	2021.5
9	丹麦	5	6.33	476	95.20	2021.6
10	荷兰	5	6.33	183	36.60	2022.2

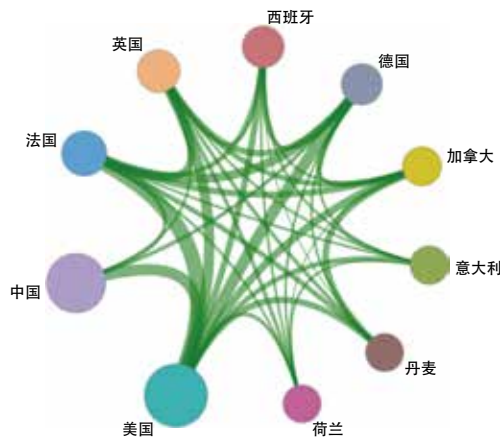


图 6.4 “月球与火星智能遥感探测”工程研究前沿主要国家间的合作网络

核心论文产出排名前五的机构为中国科学院、美国国家航空航天局、加州理工学院、约翰斯·霍普金斯大学和中国地质大学（表 6.8）。中国科学院的研究聚焦嫦娥探月与天问探火，嫦娥五号、六号月球样本揭示水含量、矿物成分等，嫦娥三号、五号还涉及月壤雷达观测与特性，天问一号、祝融号关注火星着陆区地质，另有星载激光雷达进展、遥感图像分割及海南玄武岩光谱分析等。美国国家航空航天局的研究涉及地表水与海洋地形雷达遥感、毅力号相关地质探测（杰泽罗陨石坑地形、马兹组矿物学等）、月球塔设计、系外行星大气研究、火星样本返回计划，还包括火星水冰、古湖气候，以及地球卫星数据校准、火星尘暴观测等。加州理工学院的研究聚焦多星球探测与遥感，含火星奥克夏平原高分辨率图、杰泽罗陨石坑地质矿物分析、水冰资源及样本返回计划，还有地表水雷达遥感突破，也涉及空间站遥感图像深度学习、火星探测器仪器等相关内容。由图 6.5 可知，各主要机构之间合作密切。

表 6.8 “月球与火星智能遥感探测”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 / %	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	22	27.85	1 150	52.27	2022.2
2	美国国家航空航天局	13	16.46	800	61.54	2020.8
3	加州理工学院	12	15.19	889	74.08	2021.8
4	约翰斯·霍普金斯大学	9	11.39	735	81.67	2021.3
5	中国地质大学	6	7.59	329	54.83	2021.8
6	亚利桑那州立大学	6	7.59	290	48.33	2021.7
7	哥本哈根大学	5	6.33	476	95.20	2021.6
8	布朗大学	5	6.33	326	65.20	2021.0
9	普渡大学	5	6.33	309	61.80	2021.6
10	巴黎大学	5	6.33	283	56.60	2021.6

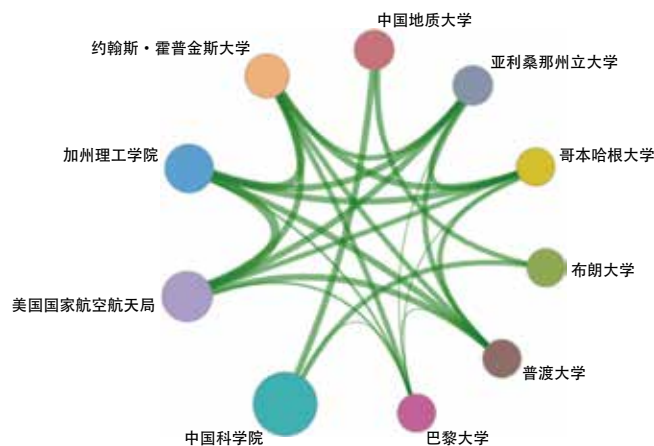


图 6.5 “月球与火星智能遥感探测”工程研究前沿主要机构间的合作网络

施引核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、法国、英国和德国（表 6.9），施引核心论文产出排名前五的机构为中国科学院、加州理工学院、美国国家航空航天局、普渡大学和索邦大学（表 6.10）。从施引情况来看，排名前五的核心论文产出国其施引核心论文数也比较多，其中，美国的发表论文数排名第一，中国的施引论文数排名第一。

综合以上统计数据，在“月球与火星智能遥感探测”研究前沿领域，与国外同行相比，中国学者具有一定的优势，对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

未来 10 年，月球与火星智能遥感探测领域的发展重点将集中于多模态遥感数据智能融合解译、行星科学知识图谱体系建立以及月球与火星智能探测专业大模型构建。该前沿将朝着高度自主化、系统智能化与知识驱动化的方向演进，逐步实现从数据感知、认知理解到自主决策的闭环。随着深空探测任务对实时响应与科学发现能力要求的不断提升，相关技术将显著增强探测器在极端未知环境下的适应性和科研效能。其研究成果预期将广泛应用于月球科研站选址建设、火星着落点选择、极区水冰资源勘探及行星地质演化研究等关键场景，发展潜力巨大（图 6.6）。

表 6.9 “月球与火星智能遥感探测”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 522	32.48	2023.2
2	美国	1 062	22.66	2022.9
3	法国	403	8.60	2022.8
4	英国	325	6.94	2022.7
5	德国	314	6.70	2022.8
6	西班牙	236	5.04	2022.7
7	加拿大	204	4.35	2022.8
8	意大利	189	4.03	2022.9
9	印度	167	3.56	2023.4
10	日本	137	2.92	2023.0



表 6.10 “月球与火星智能遥感探测”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	581	32.84	2023.1
2	加州理工学院	283	16.00	2022.5
3	美国国家航空航天局	178	10.06	2022.5
4	普渡大学	103	5.82	2023.0
5	索邦大学	101	5.71	2022.5
6	行星科学研究所	100	5.65	2022.6
7	约翰斯·霍普金斯大学	97	5.48	2022.6
8	中国地质大学	89	5.03	2023.1
9	澳门科技大学	82	4.64	2023.1
10	亚利桑那州立大学	79	4.47	2022.8

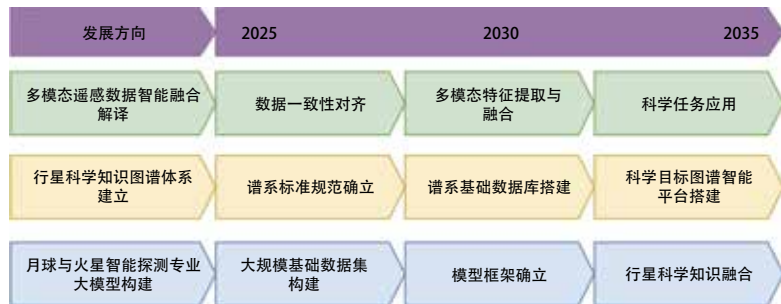


图 6.6 “月球与火星智能遥感探测”工程研究前沿的发展路线

6.1.2.3 建筑物理性能数智化预测与后评估方法

当前，我国建筑在设计、施工与运营全链条中仍面临多物理场耦合机制不清、模型计算效率与精度难以兼顾、诊断方法跨场景适应性弱、动态环境下调控策略响应滞后等关键挑战。建筑物理性能数智化预测与后评估方法以“机理—数据—调控”闭环为核心，通过融合物理建模、大数据分析、边云协同与智能决策，实现对建筑热、光、声、风及能耗等性能的精准刻画、实时预测与动态优化，推动建筑性能管理从传统经验型向全生命周期数智化运营跃升。主要研究内容包括：

1) 建筑多物理场耦合建模与可计算表征：结合机器学习与领域知识，从海量运行数据中挖掘热、光、声、气流、能耗等多物理量间的非线性耦合关系与隐含规律。重点研究基于物理约束的表示学习、因果推理与尺度律提取，构建可迁移、可解释的参数化模型与计算框架，为性能预测提供机理支撑。

2) 知识增强的多尺度性能预测与不确定性量化：集成第一性原理仿真与数据驱动方法，发展物理信息神经网络（PINN）、代理模型等技术，在保证计算效率的同时提升预测精度与泛化能力。关键科学问题包括模型偏差校正、预测不确定性传播分析，以及跨气候区、跨建筑类型的自适应建模方法。

3) 边云协同的建筑运行诊断与异常溯源: 依托物联网感知网络, 实时采集建筑占用率、能耗、室内环境等运行数据, 构建“监测-诊断-定位”一体化平台。通过联邦学习、在线迁移学习等技术实现分布式计算与隐私保护下的协同诊断, 提升系统在动态扰动下的鲁棒性与可扩展性。

4) 基于需求响应的自主调控与多目标优化: 面向能效、舒适性、经济性等多目标平衡问题, 研究融合强化学习、模型预测控制 (MPC) 与多目标进化算法的智能调控策略。重点突破局部设备与全楼宇系统的协同控制、人在回路的调控决策以及跨时间尺度的运行优化, 实现建筑能源系统与物理环境的自主响应与持续调优。

“建筑物理性能数智化预测与后评估方法”的核心论文有 40 篇 (表 6.1), 其篇均被引频次为 71.75。核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、新加坡、巴基斯坦和越南 (表 6.11), 其中, 中国的论文占比为 42.50%, 是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家为韩国、新加坡、巴基斯坦、越南和英国, 其中, 中国的篇均被引频次为 52.47, 略低于平均水平。由图 6.7 可知, 论文数量排名前十的国家之间有一定的合作关系。

表 6.11 “建筑物理性能数智化预测与后评估方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	17	42.50	892	52.47	2021.6
2	美国	4	10.00	177	44.25	2021.2
3	新加坡	3	7.50	426	142.00	2020.7
4	巴基斯坦	3	7.50	381	127.00	2022.0
5	越南	3	7.50	330	110.00	2020.0
6	英国	3	7.50	274	91.33	2021.7
7	伊朗	3	7.50	225	75.00	2021.0
8	埃及	3	7.50	110	36.67	2022.7
9	沙特阿拉伯	3	7.50	110	36.67	2022.7
10	韩国	2	5.00	401	200.50	2020.5

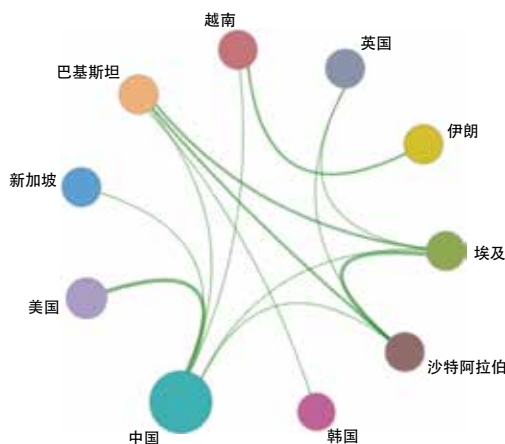


图 6.7 “建筑物理性能数智化预测与后评估方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络



核心论文产出排名前五的机构为世宗大学、南洋理工大学、维新大学、孙德胜大学和广州大学（表 6.12）。世宗大学聚焦短期能源预测以助力节能，提出集成深度学习框架，结合 CNN、长短时记忆网络（LSTM）等提取特征进行研究。南洋理工大学聚焦建筑能源优化领域，采用结合自适应机器学习模型的模型预测控制，并深度融合多源异构数据，旨在提升建筑能效与舒适度，为建筑能源管理提供支持。维新大学研究涉及住宅建筑，对两种机器学习技术在冷热负荷预测中的性能展开评估，助力建筑能源管理。由图 6.8 可知，各机构间研究相对独立。

表 6.12 “建筑物理性能数智化预测与后评估方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	世宗大学	2	5.00	401	200.50	2020.5
2	南洋理工大学	2	5.00	362	181.00	2020.0
3	维新大学	2	5.00	223	111.50	2020.5
4	孙德胜大学	2	5.00	219	109.50	2020.0
5	广州大学	2	5.00	113	56.50	2022.0
6	白沙瓦大学	1	2.50	337	337.00	2020.0
7	雅典大学	1	2.50	133	133.00	2019.0
8	诺丁汉大学	1	2.50	129	129.00	2022.0
9	康卡迪亚大学	1	2.50	127	127.00	2019.0
10	卡塔尔大学	1	2.50	115	115.00	2019.0

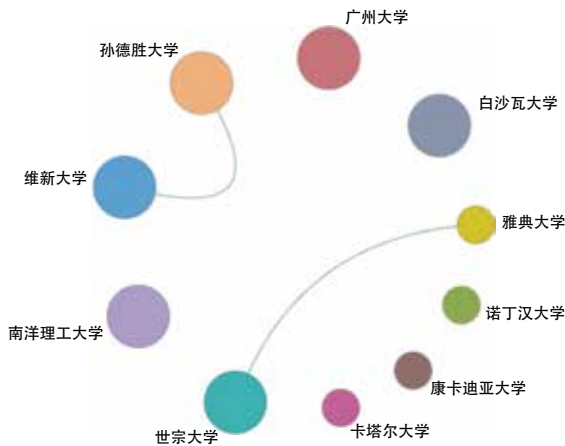


图 6.8 “建筑物理性能数智化预测与后评估方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

施引核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、印度、英国和伊朗（表 6.13），施引核心论文产出排名前五的机构为香港理工大学、东南大学、雅典大学、中国科学院和阿扎德大学（表 6.14）。从施引情况来看，排名前五的核心论文产出国其施引核心论文数也比较多，其中，中国的发表论文数和施引论文数均排名第一，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

表 6.13 “建筑物理性能数智化预测与后评估方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 019	40.07	2023.1
2	美国	298	11.72	2022.9
3	印度	218	8.57	2023.2
4	英国	205	8.06	2022.7
5	伊朗	137	5.39	2022.6
6	沙特阿拉伯	127	4.99	2023.1
7	韩国	122	4.80	2022.8
8	澳大利亚	115	4.52	2022.9
9	西班牙	108	4.25	2022.5
10	加拿大	101	3.97	2022.9

表 6.14 “建筑物理性能数智化预测与后评估方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	香港理工大学	50	12.79	2023.2
2	东南大学	48	12.28	2022.6
3	雅典大学	37	9.46	2021.5
4	中国科学院	36	9.21	2023.4
5	阿扎德大学	33	8.44	2022.5
6	天津大学	33	8.44	2023.0
7	维新大学	33	8.44	2021.0
8	重庆大学	33	8.44	2022.9
9	同济大学	31	7.93	2023.0
10	华中科技大学	30	7.67	2022.8

综合以上统计数据，在“建筑物理性能数智化预测与后评估方法”研究前沿领域，与国外同行相比，中国学者具有一定的优势，并逐步发展到领先地位。

未来 5~10 年，该领域将重点推进建筑性能基准数据体系构建、可解释机理建模深化、建筑物理通用模型框架开发、人机协同自主调控系统集成等方向。该技术体系不仅是建筑行业数字化、智能化转型的核心引擎，也为我国落实“双碳”目标、提升建筑环境品质提供关键技术支撑（图 6.9）。



图 6.9 “建筑物理性能数智化预测与后评估方法”工程研究前沿的发展路线

6.2 工程开发前沿

6.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

土木、水利与建筑工程领域的 Top 10 工程开发前沿汇总见表 6.15，涉及交通工程、结构工程、城市规划与风景园林、测绘工程、土木工程材料、工程力学、建筑学、岩土与地下工程、水利工程、市政工程等学科方向。其中“重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”“流域水文大模型构建技术”“给排水基础设施智能监控技术”和“超高水头大容量冲击式水轮机技术与装备”为专家提名前沿，其他为数据挖掘前沿或基于数据挖掘前沿凝练而成的前沿。各前沿所涉及的核心专利自 2019 年至 2024 年的公开情况见表 6.16。

（1）重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术

重大基础设施（如交通运输网络、能源系统、水利枢纽和城市公共设施）在全生命周期内长期服役于复杂的自然与人为环境中，面临地震、洪水、台风、极端温度、腐蚀、疲劳荷载及人为

表 6.15 土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用数	平均被引数	平均公开年
1	重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术	40	97	2.42	2023.2
2	既有工程结构减隔震加固技术与装置	241	961	3.99	2021.6
3	基于数字孪生的城市空间精细化治理	60	150	2.50	2022.8
4	基于低轨星座的卫星导航增强技术	40	1 564	39.10	2022.1
5	高性能混凝土材料多尺度协同增强技术	86	189	2.20	2022.5
6	具身智能驱动的人机共生空间场景构建技术	12	375	31.25	2020.8
7	浮式海上大功率风电低成本结构体系优化技术	233	1 733	7.44	2021.8
8	流域水文大模型构建技术	125	447	3.58	2023.2
9	给排水基础设施智能监控技术	43	356	8.28	2022.3
10	超高水头大容量冲击式水轮机技术与装备	44	1 215	27.61	2022.6

表 6.16 土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术	3	0	2	3	7	25
2	既有工程结构减隔震加固技术与装置	32	34	55	42	39	39
3	基于数字孪生的城市空间精细化治理	1	0	6	14	19	20
4	基于低轨星座的卫星导航增强技术	3	4	10	3	10	10
5	高性能混凝土材料多尺度协同增强技术	4	5	12	11	31	23
6	具身智能驱动的人机共生空间场景构建技术	2	5	1	2	1	1
7	浮式海上大功率风电低成本结构体系优化技术	31	30	37	40	46	49
8	流域水文大模型构建技术	0	0	1	21	50	53
9	给排水基础设施智能监控技术	4	6	4	6	6	17
10	超高水头大容量冲击式水轮机技术与装备	0	0	12	8	11	13

破坏等多源致灾因子的共同作用。这些因素呈现出时空叠加性、演化不确定性与跨系统耦合性，极易引发结构退化、功能削弱甚至系统性失效等问题，导致巨大的社会、经济与安全风险。对基础设施长期服役性能的快速精确感知、评估、保障，可在最大程度上降低多源灾害影响。其主要研究方向包括：① 实验－数值耦合框架——发展适用于多灾害场景的物理实验平台与高精度数值仿真系统，支撑灾变过程与性能演化规律揭示；② 检测－监测装备与数据分析技术——研发集成多源传感器的智能检测－监测装备，结合人工智能算法实现数据实时采集、特征提取与异常识别；③ 孕灾—致灾—成灾全过程推演技术——基于数字孪生平台推演从灾害孕育、致灾演化到最终成灾的过程机制；④ 损毁评估与修复技术——构建数据－物理双驱动模型，实现结构损毁状态评估和保障修复策略生成。未来发展趋势主要聚焦在利用人工智能技术实现多源致灾机理的解耦分析、多传感信息特征融合、高保真数值模拟场景重构与风险判定以及主动损毁评估与修复技术。从 2019 年至 2024 年，专利公开量为 40，被引数为 97，平均被引数为 2.42。

（2）既有工程结构减隔震加固技术与装置

工程结构抗震加固改造是确保既有工程结构抗震性能的重要措施。由于历史遗留问题、结构老化、规范更新、区域抗震设防等级提升等多重因素，大量既有工程结构亟须进行抗震加固。随着我国韧性城乡战略的推进，消能减隔震技术（安装阻尼器、隔震装置等）可显著提高结构抗震性能，相较传统加固技术优势显著。其主要研究方向包括：① 高性能加固工程材料——具备高强、高延性等性能的新型高性能工程材料的制备、设计及施工技术；② 新型耗能减隔震装备——具备高阻尼、自复位、自适应等性能的新型耗能减隔震装备制造、设计及施工技术；③ 结构韧性整体提升技术——通过结构体系改造升级，提升整体结构抗震韧性的结构设计、改造技术；④ 高效低干预加固修复技术——通过预制化及模块化设计、施工等技术，实现既有工程结构加固的低干预与高效施工。未来发展趋势主要聚焦于高性能绿色工程材料、加固改造工程数字化与智能化技术、高性能智能减隔震装备以及区域城市韧性整体提升技术等。从 2019 年至 2024 年，

专利公开量为 241，被引数为 961，平均被引数为 3.99。

（3）基于数字孪生的城市空间精细化治理

城市空间治理是现代城市发展中的核心议题，涵盖城市规划、建设、运营及公共服务等多个维度。随着物联网、人工智能和城市信息模型（CIM）等新一代数字技术的迅速发展，数字孪生技术为城市空间的实时感知、精准映射、智能推演和协同治理提供了全新路径。构建基于数字孪生的城市空间精细化治理技术体系，对提升城市治理现代化水平、实现高质量发展具有重大战略意义。其主要技术方向包括：① 城市全要素数字化建模与多源数据融合技术；② 城市运行状态的智能感知与实时监测技术；③ 城市治理情景的仿真推演与决策支持技术；④ 多业务协同与智慧应用集成技术。未来发展趋势主要聚焦于全域感知设备部署、CIM 平台构建与更新机制、人工智能仿真算法开发、数字孪生与业务系统深度融合、标准规范与安全保障体系建设等。从 2019 年至 2024 年，专利公开量为 60，被引数为 150，平均被引数为 2.50。

（4）基于低轨星座的卫星导航增强技术

基于低轨星座的卫星导航增强技术是指通过在全球范围内部署大规模低轨卫星星座，并与中高轨道导航系统（如 GPS、北斗、GLONASS、Galileo）协同运行，以提升卫星导航定位精度、完好性和连续性的前沿技术。相较于传统全球导航卫星系统（GNSS），低轨卫星因其轨道高度低（300~1 200 km）、信号强度大、传播时延短和可视概率高，能够显著改善信号在复杂环境下的可用性和抗干扰能力，特别适用于城市峡谷、海洋极区及灾害应急等复杂应用场景。其主要技术方向包括：① 低轨导航增强信号体制设计与星间链路构建，实现与现有 GNSS 的无缝融合定位；② 星座级精密定轨与高精度时间同步技术，保证低轨导航增强系统的整体稳定性和一致性；③ 面向地面用户的智能化增强算法与终端接入技术，提升快速收敛与多路径抑制能力。未来发展趋势表明，随着 SpaceX“星链”、OneWeb、中国“千帆星座”“星网”以及低轨宽带与导航增强项目的快速建设，低轨导航增强将逐步形成“高低轨协同、天地一体化”的技术格局。该技术不仅将与地基增强、广域差分、PPP-RTK 等现有方法深度融合，还将借助人工智能、大数据与边缘计算，实现智能化、泛在化的导航服务。其潜在应用涵盖无人驾驶、智慧交通、精细农业、能源勘探、灾害应急响应以及空间态势感知等领域，预计将在未来 10 年成为全球导航定位服务的重要发展方向。从 2019 年至 2024 年，专利公开量为 40，被引数为 1 564，平均被引数为 39.10。

（5）高性能混凝土材料多尺度协同增强技术

高性能混凝土材料多尺度协同增强技术是提升混凝土材料性能的前沿理念，其核心在于通过跨尺度（纳米/微观—介观—宏观）的设计与调控，协同优化混凝土的力学性能与耐久性，以满足超高层建筑、大跨桥梁、海洋工程等重大基础设施的长寿命与高性能需求。不同于单一材料或单一尺度的改性思路，该方法强调不同尺度增强相（如纳米材料、纤维等）的协同耦合效应，实现材料性能的跨越式提升。其主要研究方向包括：① 纳米/微观尺度增强技术——利用碳纳米管、石墨烯、纳米二氧化硅等材料填充水泥基体微孔隙，基于晶核与填充效应显著改善微观结构；② 介观尺度增强技术——基于矿物掺合料协同作用，提高致密性与长期强度，通过钢纤维、聚

乙烯醇纤维等抑制微裂纹的萌生与扩展,提升抗裂性与抗冲击性;③ 宏观尺度增强技术——采用粗钢纤维或复合纤维束作为宏观增强筋,承受主要荷载以大幅提高极限抗拉强度;④ 多尺度协同设计技术——借助材料计算学与人工智能方法,设计各尺度增强相的最优配比与空间分布,实现多尺度协同增强效果。未来发展趋势主要聚焦于基于机器学习的多尺度材料智能设计方法、具有自感应和自修复功能的智能混凝土制备技术,以及面向低碳目标的绿色多尺度增强材料开发。从 2019 年至 2024 年,专利公开量为 86,被引数为 189,平均被引数为 2.20。

(6) 具身智能驱动的人机共生空间场景构建技术

在智慧人居目标和智能建造体系发展的双重背景下,建筑空间正经历从传统静态构筑物向动态人机共生空间的范式转型。然而,现有人机交互模式在动态场景的多模态感知、深度理解与行为响应方面存在不足,难以支撑复杂建筑场景下的协同需求。具身智能强调智能体实体与物理世界的深度融合,依托多源环境与行为数据的实时感知技术,并借助深度学习和大语言模型开展任务推理与策略迭代,实现自主决策优化与自适应成长。通过构建具身“感知—推理—执行”的闭环机制,同时提升空间智能化水平与协同效能,驱动城市与建筑空间下人机交互场景的系统性变革。其主要研究方向包括:① 环境、行为多模态信息的感知与语义建模;② 基于大语言模型的任务理解与长时序决策;③ 动态空间场景下的行为响应机制与协同控制方法;④ 基于强化学习与模仿学习的动作开发与策略优化;⑤ 人形机器人对建筑空间要素的适应性与系统优化。未来发展将聚焦于动态场景适应性、行为拓展训练及泛化迁移能力,从而提升具身智能在建筑施工巡检,建筑空间服务与运维场景的自主决策与协同优化能力,为人机融合协作模式和建筑空间智慧化提供关键技术支撑。从 2019 年至 2024 年,专利公开量为 12,被引数为 375,平均被引数为 31.25。

(7) 浮式海上大功率风电低成本结构体系优化技术

浮式海上风电是深远海域风能资源开发的必然路径,是海上风能开发中最具挑战性的技术代表。浮式海上风电技术融合了土木工程、海洋工程、结构工程、控制工程等多个学科,面临风—浪—流多源环境下风机—浮式基础—系泊锚固—动态电缆结构体系多目标优化难题。目前,浮式海上风电仍处于工程示范阶段,面对强台风、大波浪、低电价开发需求,突破具备大规模商业化水平的大功率、低成本、高可靠浮式海上风电技术具有重要意义。其主要研究方向包括:① 多场多体非线性耦合动力学高精度仿真分析技术;② 刚柔结构体系一体化设计技术;③ 台风等极端工况下风机—基础主被动协同智能控制与功率优化技术;④ 浮式海上风电高保真水池模型试验技术;⑤ 长柔结构物整机运输、安装及动态监测技术。未来发展趋势主要聚焦于通过人工智能和数字孪生等手段,赋能浮式海上风电规划—设计—施工—运维全生命周期,实现新型结构设计、新型材料应用与智能监测运维,大幅降低浮式海上风电开发成本。从 2019 年至 2024 年,专利公开量为 233,被引数为 1 733,平均被引数为 7.44。

(8) 流域水文大模型构建技术

流域水文大模型是一种以深度学习技术为基础,融合水文气象大数据与机理模型的智能系统,以水文水动力过程模拟与预测模型为大模型底座,包括面向水文预报、水灾害防御、水资源管理、生态水文、水沙输移与水环境等具体业务的应用模型,通过“1 个底座模型 + N 个应用

模型”的架构，实现水利工程全领域的智能模拟、预测与调度分析。近年来，深度学习技术在水文水动力模拟与预报领域取得了快速发展，推动水文大模型在多个关键方向上取得突破。主要研究方向包括：① 多模态水文气象数据融合和预测；② 面向水文水动力过程的物理信息神经网络；③ 基于深度学习的模型参数化与不确定性量化方法；④ 水灾害事件的深度学习模拟和预测技术。未来的发展趋势将聚焦于构建物理机制与智能模型深度耦合的统一框架，以提升模型的迁移能力与物理一致性。同时，推动全球尺度多时空水灾害事件标签数据库的建设，增强模型对水灾害事件的学习与泛化能力。联合气象大模型，打造“大气—水文”端到端智能预测链，实现水灾害的精准预警与韧性决策支持。从 2019 年至 2024 年，专利公开量为 125，被引数为 447，平均被引数为 3.58。

（9）给排水基础设施智能监控技术

给排水系统的安全稳定运行是保障城市公共安全和生态安全的生命线。给排水基础设施智能监控技术是指通过集成先进传感、物联通信与数据分析技术，对水源、泵站、厂、网等基础设施的运行状态进行实时感知、全面互联与智能分析，实现其运行效能的精准评估、异常状况的早期预警与安全风险的超前控制，为给排水系统的精细化管理和韧性化建设提供核心支撑。其主要研究方向包括：① 全域感知技术——适应水下、地下、密闭空间等复杂环境，具有高可靠性、长寿命与自清洁功能的多参数智能传感终端，实现对流量、压力、水质、位移、振动等关键指标的连续精准测量；② 物联组网技术——多模式、高冗余、低功耗的异构通信网络，确保海量监测数据在复杂环境下传输的完整性、实时性与安全性；③ 智能诊断技术——基于机器学习和深度学习的多源数据融合分析算法，实现设备故障的早期诊断、管网漏损的精准定位与水质污染的快速溯源；④ 数字孪生技术——与物理基础设施全要素同步映射、虚实交互的孪生模型，支持运行场景的模拟推演、调度策略的优化仿真与风险事件的应急处置。未来发展趋势将主要聚焦于 AI 驱动的智能诊断与自主决策技术，以及实现全生命周期成本最优的预测性维护技术。从 2019 年至 2024 年，专利公开量为 43，被引数为 356，平均被引数为 8.28。

（10）超高水头大容量冲击式水轮机技术与装备

超高水头大容量冲击式水轮机是开发高落差水能资源的关键动力装备，也是国家建设藏东南水电能源基地的重要支撑。与常规反击式水轮机相比，冲击式水轮机采用了射流冲击水斗的独特能量转化机制，具有调节灵活、启动速度快、运行稳定性强等特点。近年来，在国家大力推动能源绿色低碳转型和数字中国建设的背景下，冲击式水轮机正朝超高水头、大容量、智能化方向快速发展，其水力设计、装备制造和数智运维技术已成为水电工程领域的研发前沿。其主要技术方向包括：① 水力设计，包括高保真多相流动分析与性能预测技术、兼顾多目标多学科的冲击式水轮机智能水力优化设计技术；② 转轮加工制造，包括超大尺寸马氏体不锈钢锻件成分设计及制造工艺、智能化和多工艺加工协同化的转轮高效高质量焊接技术；③ 泥沙磨蚀防护，包括泥沙渐进磨蚀预测、磨蚀防护设计技术以及新型抗磨蚀材料研发；④ 智能运维，包括转轮水斗在射流交变冲击下的动力学特性分析与预测技术、状态监测与故障诊断技术、基于大数据的水轮机状态评估与剩余寿命预测技术。未来发展趋势主要聚焦于超高水头大容量冲击式水轮机的强韧兼

备抗磨蚀表面技术、多源异构数据融合下的机组健康状态感知技术、人工智能驱动的运维决策与自适应调控技术、冲击式水电站与新能源多源协同运行优化技术。从 2019 年至 2024 年，专利公开量为 44，被引数为 1 215，平均被引数为 27.61。

6.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

6.2.2.1 重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术

重大基础设施具有显著的社会功能和经济效益，其服役设计寿命较长、覆盖多类复杂的气候环境，更易暴露于地震、洪水等自然灾害，并受到疲劳荷载、温差剧变等多源致灾因子的共同作用。同时，这些因素可能呈现出时空叠加性、演化不确定性与跨系统耦合性，对基础设施结构退化、功能削弱甚至系统性失效造成难以预测的影响，进而引发一系列对人民生命财产安全乃至社会、经济危害极大的灾害和次生灾害。通过开发重大基础设施长期服役性能保障技术，可以维持其高效与安全运行。目前，相关技术的研发目标正逐渐由被动向主动转变，侧重于结合数值模拟、人工智能等先进技术，实现对致灾机制的溯源分析以及对基础设施长期服役性能的快速精确感知、评估、保障，从而最大程度地降低灾害影响。

重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术的工程前沿研发方向主要包括：

1) 实验－数值耦合框架：构建覆盖地震、洪水、极端温度等多灾害场景的室内实验平台与高保真仿真系统，支持多致灾因子耦合作用的基础设施灾害力学响应测试与机理验证。

2) 检测－监测装备与数据分析技术：融合视觉成像、光纤传感、电磁波等多种感知手段，发展适用于地上、地下及水下的全域感知网络，结合深度学习网络实现数据实时采集、特征提取与异常识别。

3) 孕灾－致灾－成灾全过程推演技术：构建基于数字孪生平台的灾变全过程推演模型，揭示多致灾因子耦合作用下的基础设施材料－结构失效路径。

4) 损毁评估与保障修复技术：构建基于数据驱动与物理机理耦合的模型框架，实现对结构服役状态参数的动态分析和可信评估；开发适应极端环境的新型高性能修复材料，并配套研发特种装备与智能施工技术。

“重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”工程开发前沿的核心专利有 40 件，平均被引数为 2.42（表 6.15）。核心专利产出排名前三的国家为中国、印度和美国（表 6.17），其中，中国的专利占比达 75.00%，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引数为 3.00。由图 6.10 可知，各主要国家间的合作较为稀疏。

核心专利产出排名前三的机构为浙江大学、中国铁建股份有限公司和安徽泽众安全科技有限公司（表 6.18）。浙江大学提出了基于 Weibull 函数的混凝土疲劳变形演化模型，揭示了基础设施在长期服役过程中的材料性能衰退规律。中国铁建股份有限公司研发出减振轨道优化与大数据枢纽损伤识别系统，提升了轨道交通安全性。安徽泽众安全科技有限公司构建了地下空间可燃气体动态预警系统，实现风险分级与实时监测。由图 6.11 可知，各主要机构间的研究相对独立。



表 6.17 “重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	30	75.00	90	92.78	3.00
2	印度	3	7.50	0	0.00	0.00
3	美国	3	7.50	0	0.00	0.00
4	日本	2	5.00	7	7.22	3.50
5	英国	1	2.50	3	3.09	3.00
6	德国	1	2.50	0	0.00	0.00
7	菲律宾	1	2.50	0	0.00	0.00

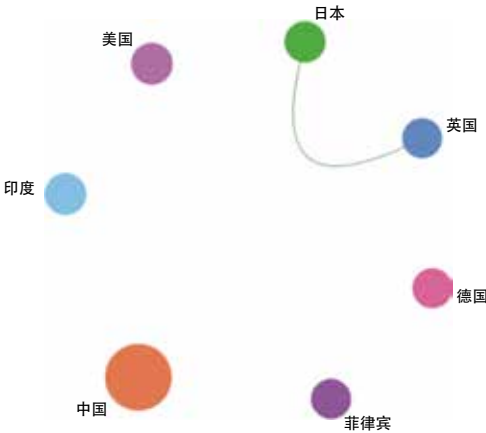


图 6.10 “重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 6.18 “重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	浙江大学	2	5.00	14	14.43	7.00
2	中国铁建股份有限公司	2	5.00	3	3.09	1.50
3	安徽泽众安全科技有限公司	1	2.50	13	13.40	13.00
4	北京理工大学	1	2.50	13	13.40	13.00
5	清华大学合肥公共安全研究院	1	2.50	13	13.40	13.00
6	山东省地质调查院	1	2.50	12	12.37	12.00
7	华南理工大学	1	2.50	11	11.34	11.00
8	苏州思萃融合基建技术研究所有限公司	1	2.50	7	7.22	7.00
9	湖南大学	1	2.50	5	5.15	5.00
10	国家电网有限公司	1	2.50	4	4.12	4.00



图 6.11 “重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

“重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向主要聚焦于利用人工智能技术实现多源致灾机理的解耦分析、高保真数值模拟场景重构与风险判定、多传感信息特征融合以及主动损毁评估与保障修复：① 多源致灾机理的解耦分析技术主要包括基于深度学习网络的致灾因子风险识别和判定技术，以及基于因果推理与图神经网络的致灾因子潜在交互机制挖掘技术；② 高保真数值模拟场景重构与风险判定技术主要包括利用物理信息神经网络校准数值模型参数、补偿模型误差，实现模型对灾害过程的准确模拟，以及通过生成对抗网络或扩散模型合成罕见或极端灾害场景，进而在数字孪生平台中开展结构失效风险判定；③ 多传感信息特征融合技术主要基于 Transformer 架构与跨模态注意力机制，实现时序、空间、声学、电磁与遥感数据的特征级融合；④ 主动损毁评估与保障修复技术的核心在于利用知识图谱、强化学习、多模态数据编码技术构建工程大语言模型，实现结构损毁状态的实时评估和预警，并同步制定可行的主动保障修复方案（图 6.12）。

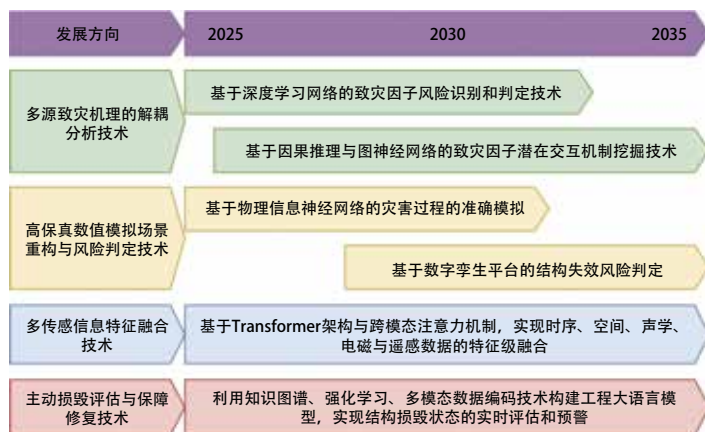


图 6.12 “重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”工程开发前沿的发展路线



6.2.2.2 既有工程结构减隔震加固技术与装置

我国大部分城市位于抗震设防中、高烈度区，工程结构抗震加固改造是城市更新的重要组成部分，也是确保既有工程结构抗震性能、民众人身与财产安全的重要措施。由于历史遗留问题、结构老化、规范更新、区域抗震设防等级提升、工程结构使用功能变化等多重因素，大量既有工程结构亟须进行抗震加固。但传统加固方法通常通过直接提升构件承载力来提升结构的抗震性能，存在加固成本高、施工周期长、影响居民正常生活等系列难题。随着我国韧性城乡战略的推进，消能减隔震技术（安装阻尼器、隔震装置等）可显著提高结构抗震性能，相较于传统加固技术，展现出显著的优势。

既有工程结构减隔震加固技术与装置的前沿研究方向主要包括：

- 1) 高性能加固工程材料：包括高强、高延性、自修复等新型高性能工程材料的制备、设计、施工及维护技术。
- 2) 新型耗能减隔震装备：包括高阻尼、大变形、自复位、自适应、高耐久性等高性能新型耗能减隔震装备的制造、设计、施工和运维技术。
- 3) 结构韧性整体提升技术：传统工程结构通常采用抗震结构体系，在加固改造过程中，通过增加减隔震装置或改造工程结构的防震机制，将原有抗震结构改造升级为减隔震结构体系，可有效降低地震时的地震效应或提升结构的防震性能，包括工程结构的减隔震加固设计、改造与运维技术。
- 4) 高效低干预加固修复技术：通过预制化及模块化设计、施工等技术，可大幅提升既有工程结构加固的效率，大幅压缩施工周期，降低对周边工程设施和居民正常生活的影响，同时也可降低整体加固项目的碳排放，实现既有工程结构加固的低干预、高效施工与绿色化。

“既有工程结构减隔震加固技术与装置”工程开发前沿的核心专利有 241 件，平均被引数为 3.99（表 6.15）。核心专利产出排名前三的国家为中国、美国和日本（表 6.19），其中，中国的专利占比达 94.19%，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引数为 3.71。

表 6.19 “既有工程结构减隔震加固技术与装置”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	227	94.19	842	87.62	3.71
2	美国	6	2.49	98	10.20	16.33
3	日本	3	1.24	3	0.31	1.00
4	沙特阿拉伯	1	0.41	13	1.35	13.00
5	英国	1	0.41	4	0.42	4.00
6	伊朗	1	0.41	1	0.10	1.00
7	德国	1	0.41	0	0.00	0.00
8	韩国	1	0.41	0	0.00	0.00

核心专利产出排名前三的机构为中国中铁股份有限公司、大连理工大学和北京工业大学（表 6.20）。中国中铁股份有限公司聚焦调谐质量阻尼器、磁悬浮减振道床及超高层组合减震系统等研究。大连理工大学主要研究海上风机移动阻尼与层合板优化等。北京工业大学聚焦多翼悬挑阻尼、浮式风机翼型能量阱、压电水上房屋等方面的研究。

表 6.20 “既有工程结构减隔震加固技术与装置”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国中铁股份有限公司	18	7.47	56	5.83	3.11
2	大连理工大学	9	3.73	47	4.89	5.22
3	北京工业大学	9	3.73	2	0.21	0.22
4	华中科技大学	6	2.49	19	1.98	3.17
5	中国建筑股份有限公司	5	2.07	46	4.79	9.20
6	湖南大学	4	1.66	22	2.29	5.50
7	中国铁道科学研究院有限公司	4	1.66	11	1.14	2.75
8	四川大学	4	1.66	10	1.04	2.50
9	隔而固（青岛）振动控制有限公司	4	1.66	5	0.52	1.25
10	同济大学	4	1.66	5	0.52	1.25

“既有工程结构减隔震加固技术与装置”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向主要聚焦于高性能绿色工程材料、加固改造工程数字化与智能化技术、高性能智能减隔震装备以及区域城市韧性整体提升技术等（图 6.13）。具体内容为：① 高性能绿色工程材料主要包括高强、高延性、自修复、低成本高性能水泥基工程材料，以及高强、高延性的金属基材料、高分子材料与新型智能修复材料等。② 加固改造工程数字化与智能化技术主要聚焦信息化技术与传统加固工程的结合，实现既有工程结构加固检测、设计、施工、监测与运维的数字化与智能化，提升加固改造工程的效率、经济性和精准度。③ 高性能智能减隔震装备主要聚焦减隔震装备的数字化与智能化，针对不同地震波，可实现减隔震装置的自主适应，正常运维阶段装置性能的智能监测、预警与控制等。④ 区域城市韧性整体提升技术则对既有单体工程结构加固提出了更高的要求，从区域、城市等更大的视角出发，统筹协调区域城市整体抗震性能的加固改造。

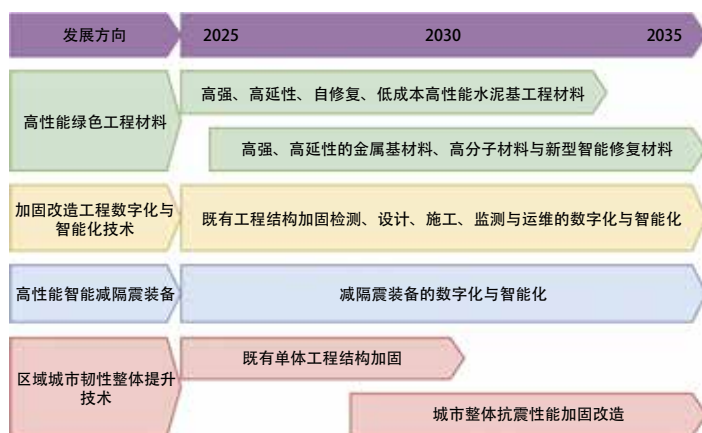


图 6.13 “既有工程结构减隔震加固技术与装置”工程开发前沿的发展路线

6.2.2.3 基于数字孪生的城市空间精细化治理

当前我国城市治理仍面临数据感知覆盖有限、部门协同不足、决策支持缺乏系统性等技术挑战。基于数字孪生的城市空间精细化治理技术体系的核心在于：通过高精度建模、实时感知、仿真推演与智能决策，实现对城市物理空间与社会活动的动态映射和协同调控，推动城市治理从经验驱动转向数据驱动、从被动响应转向主动干预。该体系的前沿研发方向主要包括：

1) 城市全要素数字化建模与多源数据融合技术：构建城市数字孪生体的基础是高精度、多尺度的城市信息模型（CIM），需整合地理信息、建筑结构、基础设施、人口流动、环境监测等多类数据。研发重点包括复杂城市场景的三维重建、物联感知设备的统一接入与数据集成、多模态数据的实时融合与动态更新等，以形成城市运行全貌的数字化镜像。

2) 城市运行状态的智能感知与实时监测技术：依托广泛部署的传感设备与视频识别系统，实现对交通流量、能源消耗、环境质量、公共安全等城市运行指标的实时采集与异常识别。结合边缘计算与 AI 算法，建立“感知－传输－分析”一体的城市运行体征监测体系，形成对城市风险的早期识别与快速响应能力。

3) 城市治理情景的仿真推演与决策支持技术：基于数字孪生模型和算法平台，构建城市治理政策与突发情景的模拟推演能力，如交通疏堵方案评估、自然灾害模拟、公共卫生事件推演等。通过虚实交互与迭代优化，为城市管理提供科学依据和决策支持，提升治理预案的可行性与精准性。

4) 多业务协同与智慧应用集成技术：推动数字孪生平台与现有城市治理系统（如“一网统管”、智慧交通、智慧社区等）的深度融合，打破数据孤岛和业务壁垒。重点开发跨部门、跨层级的协同调度与联动处置机制，实现从城市级宏观决策到社区级精细管理的全链条技术闭环。

“基于数字孪生的城市空间精细化治理”工程开发前沿的核心专利有 60 件，平均被引数为 2.50（表 6.15）。核心专利产出排名前三的国家为中国、印度和英国（表 6.21），其中，中国的专利占比达 88.33%，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引数为 2.74。由图 6.14 可知，各主要国家间的合作较为稀疏。

核心专利产出排名前三的机构为北京百度网讯科技有限公司、南威软件股份有限公司和同济大学（表 6.22）。北京百度网讯科技有限公司的研究聚焦 AI 图像和多任务学习，以及数字孪生实时渲染等方面，赋能全域感知。南威软件股份有限公司关注城市治理文本秒级 AI 分类，以及数字一张图 Web 速绘等方面。同济大学聚焦 5G+IoT 打造智慧社区养老系统等的研究。由图 6.15 可知，各主要机构间的研究相对独立。

表 6.21 “基于数字孪生的城市空间精细化治理”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	53	88.33	145	96.67	2.74
2	印度	4	6.67	0	0.00	0.00
3	英国	2	3.33	0	0.00	0.00
4	美国	2	3.33	0	0.00	0.00
5	韩国	1	1.67	5	3.33	5.00
6	埃塞俄比亚	1	1.67	0	0.00	0.00

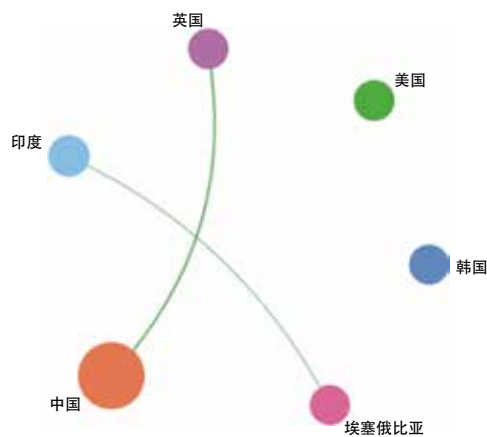


图 6.14 “基于数字孪生的城市空间精细化治理”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 6.22 “基于数字孪生的城市空间精细化治理”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	北京百度网讯科技有限公司	5	8.33	5	3.33	1.00
2	南威软件股份有限公司	3	5.00	0	0.00	0.00
3	同济大学	2	3.33	4	2.67	2.00
4	浪潮软件股份有限公司	2	3.33	1	0.67	0.50
5	瑞鉴航太科技股份有限公司	2	3.33	0	0.00	0.00
6	英商瑞鉴有限责任公司	2	3.33	0	0.00	0.00
7	城云科技（中国）有限公司	2	3.33	0	0.00	0.00
8	OTO 美国公司	2	3.33	0	0.00	0.00
9	广东泰一高新技术发展有限公司	1	1.67	15	10.00	15.00
10	中交城乡建设规划设计研究院有限公司	1	1.67	10	6.67	10.00

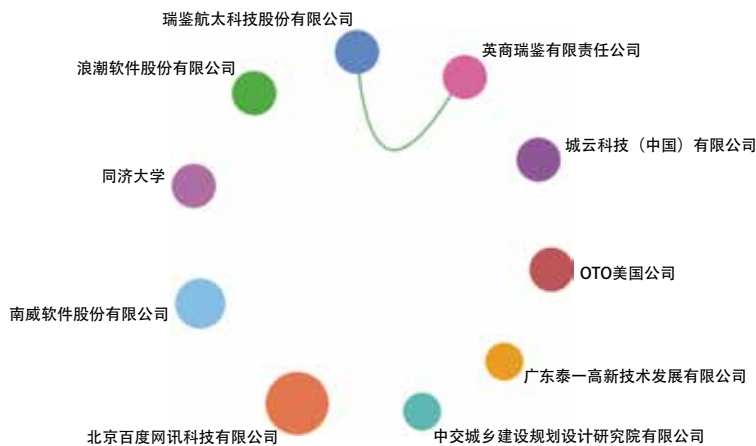


图 6.15 “基于数字孪生的城市空间精细化治理”工程开发前沿主要机构间的合作网络

“基于数字孪生的城市空间精细化治理”工程开发前沿未来 5~10 年的重点方向包括全域感知设备部署、CIM 平台构建与更新机制、人工智能仿真算法开发、数字孪生与业务系统深度融合、标准规范与安全保障体系建设等（图 6.16）。这一体系不仅是技术集成创新的体现，更是推动城市治理体系和治理能力现代化的重要支撑。



图 6.16 “基于数字孪生的城市空间精细化治理”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：崔俊芝 聂建国 朱合华 顾祥林

课题组：

院士：

崔俊芝 欧进萍 王 浩 杨永斌 张建云 刘加平¹ 杜彦良 胡春宏 钮新强 彭永臻
 郑健龙 王复明 陈湘生 张建民 吴志强 岳清瑞 李华军 马 军 朱合华 杜修力
 高宗余 王明洋 唐洪武 刘加平² 童小华 姚仰平 汪双杰

专家：

蔡 奕 曹世杰 陈 鹏 陈 庆 陈求稳 陈 欣 陈永贵 崔新壮 戴 瑛 董必钦
 杜春兰 樊健生 范凌云 范 悦 冯殿垒 冯 江 高 军 高 亮 葛耀君 顾冲时
 郭劲松 郭容寰 韩 杰 郝 洪 贺瑞敏 黄介生 黄廷林 吉国华 贾良玖 姜 超
 蒋金洋 蒋正武 金君良 雷振东 冷 红 李 晨 李益农 李 质 梁思思 林波荣
 凌建明 刘 超 刘翠善 刘 芳 刘仁义 刘书明 刘曙光 刘万增 刘彦伶 彭 翀
 邱 冰 任伟新 邵益生 石 邢 时蓓玲 史才军 舒章康 孙 澄 孙 剑 孙立军
 孙 智 谈广鸣 谭 刚 谭刚毅 田 波 汪 芳 汪 涵 王爱杰 王本劲 王发洲
 王国庆 王建华 王 凯 王 兰 王 平 王世福 王 伟 王向荣 王亚宜 王 怡
 王元战 伍法权 夏圣骥 肖飞鹏 谢 辉 邢 锋 徐 斌 徐 峰 徐俊增 许晓青

¹ 西安建筑科技大学。

² 东南大学。

闫凤英 严金秀 严 宇 阳建强 杨 斌 杨大文 杨建荣 杨 柳 杨庆山 杨仲轩
姚俊兰 叶 蔚 叶 宇 余钟波 禹海涛 岳中琦 张 锋 张天阳 张昕楠 张寅平
张 泽 甄 峰 郑百林 仲 政 周正正 庄晓莹 卓 健

执笔组:

陈 鹏 陈 欣 董必钦 贾良玖 姜 超 蒋正武 林毅峰 刘 超 刘 芳 刘彦伶
刘一歌 柳思聪 罗兴铤 沈盼盼 石 邢 田 雨 汪 涵 王本劲 王 兰 王 伟
武 威 向 衍 徐 婕 严 宇 杨 玲 姚佳伟 姚俊兰 尹 杰 袁 烽 张 泽
朱榴骏



第七章

环境与轻纺工程前沿



7.1 工程研究前沿

7.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

环境与轻纺工程领域（以下简称环境领域）所研判的 Top 10 工程研究前沿见表 7.1，涉及环境科学与工程、气象科学与工程、海洋科学与工程、食品科学与工程、纺织科学工程和轻工科学与工程 6 个学科方向。各前沿 2019—2024 年的逐年核心论文发表情况见表 7.2。

（1）大数据和人工智能技术驱动的空气污染与气候变化协同治理

大数据和人工智能（AI）技术驱动的空气污染与气候变化协同治理正引领环境科学研究范式的深刻变革。其科学基础建立于污染物与温室气体排放的“同源性”，即二者高度依赖于共同的来源（化石燃料燃烧），且在健康影响层面呈现显著的“协同效应”。当前的主要研究方向包括：一是构建空—天—地一体化的智能监测网络，融合多源数据，结合深度学习技术实现排放源的动态精准识别、溯源与预警；二是发展高分辨率环境数字孪生系统，通过模拟大气污染物传输与气候变化的耦合机制，为多情景分析与治理策略评估提供支撑；三是建立健康导向的协同治理模型，量化复合暴露的健康风险与成本效益，优化治理路径；四是打破数据与行政壁垒，构建跨域协同治理架构。未来发展趋势将体现在 3 个维度：技术层面，AI 大模型与物联网、区块链等技术深度融合，显著提升环境系统模拟的精度与决策支持的智能化水平；治理层面，重点由末端管控转向源头结构性调控，推动能源结构、交通模式与产业体系的绿色低碳转型；全球层面，以健康效

表 7.1 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	大数据和人工智能技术驱动的空气污染与气候变化协同治理	4 160	466 114	112.05	2020.5
2	土壤和地下水新污染物全生命周期环境效应与碳足迹	184	30 229	164.29	2020.7
3	固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理	95	13 652	143.71	2020.6
4	气候变化背景下环境暴露相关健康影响评估与预测	80	9 428	117.85	2020.5
5	人工智能在天气预报和气候预测中的应用	112	21 148	188.82	2020.1
6	极端事件对气候临界要素与突变点的贡献机制	10	1 597	159.70	2020.4
7	大型海藻养殖固碳潜力评估	49	5 280	107.76	2020.7
8	营养健康大模型与精准营养研究	16	1 782	111.38	2021.6
9	个性化医疗用智能纺织品	67	7 375	110.07	2021.2
10	智能响应型糖苷类前药	37	529	14.30	2021.6

注：前沿 1、2 来自数据挖掘 + 专家提名，前沿 3、4、8 来自专家提名，其他来自数据挖掘。

表 7.2 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	大数据和人工智能技术驱动的空气污染与气候变化协同治理	1 162	1 191	904	554	279	70
2	土壤和地下水新污染物全生命周期环境效应与碳足迹	43	45	40	35	19	2
3	固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理	23	23	26	14	6	3
4	气候变化背景下环境暴露相关健康影响评估与预测	27	18	15	13	6	1
5	人工智能在天气预报和气候预测中的应用	43	28	25	8	6	1
6	极端事件对气候临界要素与突变点的贡献机制	3	1	5	1	0	0
7	大型海藻养殖固碳潜力评估	11	13	11	9	5	0
8	营养健康大模型与精准营养研究	1	4	2	5	2	2
9	个性化医疗用智能纺织品	10	17	10	17	8	5
10	智能响应型糖苷类前药	4	8	5	9	2	9

益为共同目标的协同治理逐渐成为国际共识，中国的“双碳”目标与空气质量标准修订正是对这一趋势的本土化实践与积极探索。

(2) 土壤和地下水新污染物全生命周期环境效应与碳足迹

土壤和地下水新污染物的全生命周期环境效应与碳足迹涉及污染物从产生到消亡的整个过程中对生态系统的影响，以及相关活动产生的温室气体排放。“全生命周期环境效应”与“碳足迹”的结合，旨在从污染物产生、迁移、转化到最终归趋的全链条视角，系统评估其环境风险及对气候变化的贡献。新污染物通常指未被传统环境管理法规覆盖、具有潜在长期危害但近期才被关注的污染物，其典型特征包括：持久性与生物累积性、低剂量高毒性、来源复杂性、在环境介质中易交叉迁移。新污染物从“摇篮到坟墓”全周期中的碳足迹包括化学品生产与处置环节的直接排放、污染治理过程的碳排放、环境过程的间接排放和生态功能损失的碳成本。当前研究聚焦于新污染物在土壤与地下水中的环境行为、监测技术以及碳足迹核算方法的优化上，下一步需要通过多学科交叉揭示其长期环境危害与隐含碳排放，重点关注高分辨率监测、精准模型构建、低碳修复技术开发等方向，为污染防控与“双碳”目标实现提供理论与技术支持。

(3) 固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理

固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理旨在通过技术革新与系统优化，实现废弃物高效资源化，并同步控制传统污染物（如重金属）与新兴污染物（如微塑料）的排放，推动治理模式从“末端治理”转向“全过程管控”。主要研究方向包括：开发高效、低成本的高值转化技术，将生活垃圾、工业固体废物等转化为再生建材、化工原料或能源产品；研究新旧污染物在处理过程中的迁移转化规律，开发协同控制技术；构建基于物联网与大数据的智慧管理系统，实现废物全生命周期优化；推动建立政策、技术与市场协同机制，完善循环经济产业链。发展趋势上，该领域正从单一技术突破迈向系统集成与智能调控。多技术耦合（如热化学、生物与材料再生技术的联合）成为重点，固体废物处理过程的碳减排与污染协同控制日益关键。随着新材料、人工智能与先进传感技术的深度融合，资源化过程的精准度与智能化水平将显著提升，为“无废

城市”建设与“双碳”目标实现提供核心支撑。

（4）气候变化背景下环境暴露相关健康影响评估与预测

全球气候变化正显著改变环境污染物的分布、浓度及人群暴露模式，进而对公共健康构成日益严峻的多途径、跨尺度威胁。高温、极端天气事件频发以及大气污染物与过敏原的交互作用，加剧了呼吸系统、心血管系统疾病以及传染病的发生风险。在此背景下，环境健康研究正从传统单一污染物风险评价向多重压力源协同效应、全暴露组与生命周期健康影响评估转变。该前沿的核心发展方向包括：① 发展高分辨率环境暴露实时监测技术与个体暴露追踪设备，整合卫星遥感、传感器网络与移动健康技术，实现暴露数据的精准采集；② 构建环境－暴露－健康大数据库，并引入人工智能与机器学习模型，识别敏感人群、关键暴露窗口及复合污染健康效应；③ 建立气候－环境－健康耦合预测系统，评估不同气候变化情景下的未来疾病负担与健康经济效益，为适应性政策制定提供科学依据。

（5）人工智能在天气预报和气候预测中的应用

以深度学习为代表的人工智能技术，凭借其对海量数据中复杂规律的强大挖掘能力，正在推动天气预报和气候预测领域的革新。在天气预报方面，华为盘古气象大模型利用三维神经网络实现了对气压、温度等变量的精准预测；谷歌 GraphCast 基于图神经网络架构，可在 1 分钟内完成未来 10 天的全球天气预报，精度已超越传统数值天气预报（NWP）。在短期气候预测方面，国家气候中心“风顺”大模型通过构建智能扰动生成模块，同时融入海气相互作用，将热带大气季节内振荡（MJO）可预测性延长至 36 天，全球降水异常预测技巧较欧洲中心模型提升 30%。该模型还构建了前兆信号识别模块，借助显著图技术揭示前期热带三大洋协同作用对特定区域强降水的影响机制，增强了模型的可解释性。然而，人工智能在天气预报和气候预测中的应用仍面临若干挑战。一方面，模型物理可解释性不足，“黑箱”特性致使难以揭示内在机理，参数敏感性易导致预报偏差；另一方面，极端天气事件样本稀少，制约了对高影响天气的捕捉能力。未来需建设高质量训练数据集、强化算力支撑，推进人工智能与数值模式深度融合，以实现更精准、可靠的智能气象预测。

（6）极端事件对气候临界要素与突变点的贡献机制

在全球气候变化的大背景下，极端事件对气候临界要素与突变点的影响成为研究前沿热点。国际学术界正逐渐从识别单一临界要素转向理解极端事件如何作为“触发器”或“放大器”，通过破坏系统恢复力、激发正反馈循环及引发跨系统级联，从而推动关键系统（如格陵兰冰盖、亚马孙森林、海洋环流系统等）跨越临界点。研究越来越多地聚焦于复合极端事件（如热浪、干旱叠加）对生态－气候耦合系统稳定性的非线性影响，并利用深度学习、归因分析及高分辨率地球系统模型，量化极端事件在临界点附近对突变概率的贡献及给出早期预警信号。这一方向深刻揭示出，极端事件频发和增强可能显著加速不可逆气候风险的形成，迫切要求将极端事件动态纳入临界要素风险评估框架，以提升对未来气候系统性突变的预测与适应能力。

（7）大型海藻养殖固碳潜力评估

大型海藻养殖是指在沿海或近海区域规模化培育褐藻、红藻、绿藻等大型藻类。它们通过

光合作用吸收并固定二氧化碳,将其转化为有机碳并部分沉降到深海或沉积物中,是海洋“蓝碳”体系的重要组成部分。大型海藻养殖已成为应对气候变化的新兴路径。当前的主要技术方向与研究重点包括:① 品种优化与养殖模式创新——通过分子育种和多层立体化养殖,提高海藻生长速率和环境适应性,增加碳汇量;② 碳循环过程的监测与建模——利用卫星遥感、自动化传感和生态模型,精确追踪从藻体生长到有机碳长期沉积的完整链条;③ 产业耦合与综合利用——探索与海洋牧场、近岸生态修复,以及藻基生物能源、材料生产等环节的协同,提升经济可行性;④ 碳汇核算与标准体系建设——制定统一的碳核算方法和生命周期评估框架,为碳交易和政策制定提供支撑。未来发展趋势呈现出规模化、数字化与多功能化的特点:一方面,近岸—深远海连续化养殖和智能化运维可突破传统空间限制;另一方面,利用合成生物学、AI建模与区块链碳资产管理将强化碳汇核证和产业化推进。随着国际社会对“蓝碳”价值的重视,大型海藻养殖有望成为兼具减排、生态修复与经济收益的全球工程前沿,为实现碳中和目标提供重要支撑。

(8) 营养健康大模型与精准营养研究

营养健康大模型与精准营养研究是人工智能技术与营养科学深度融合的前沿交叉领域。其旨在利用多模态人工智能、大数据分析及多组学技术,根据个体在遗传、生活方式和环境因素方面的差异及可变性,量身定制营养指导;通过优化饮食结构和定制营养素摄入来最大限度地提高健康效益、预防和管理疾病。该领域的主要研究方向包括:利用人工智能整合多源异构数据,结合多组学技术,通过知识图谱与机器学习系统揭示并梳理营养成分、生理稳态与人体健康的复杂关系;搭建能够动态反映个体全生命周期营养需求变化的营养健康大模型;通过采集人群在遗传背景、代谢特征、生活方式及环境暴露等方面的参数,开发基于数字孪生和可解释人工智能的决策支持系统,实现营养素摄入的靶向设计、动态评估与精准调节,为全生命周期人群提供科学、精准的营养健康指导。未来需要扩大营养健康大模型中的训练数据集,减少训练数据的偏差(如样本不平衡、数据不完整、种族与性别差异等),以提高人工智能在精准营养领域应用的有效性、可扩展性和社会影响。

(9) 个性化医疗用智能纺织品

个性化医疗用智能纺织品是融合纺织工程、微电子、信息与生物技术的跨界产物。它指的并不是普通衣物,而是能实时监测生理信号、分析健康数据甚至执行治疗指令的柔性可穿戴系统。其核心在于通过织物嵌入的传感器、驱动单元及算法,将传统被动、通用的医疗监护,转变为主动、连续且个性化的健康管理方式,使医疗保健无缝融入日常生活。当前主要研究方向集中在3个层面:一是生理监测,开发用于持续追踪心电、呼吸、体温、血氧等关键指标的新型传感纤维;二是治疗干预,研制能进行电刺激、热疗或可控释放药物的智能纺织品;三是系统集成,解决数据的采集、能源供应、无线通信及安全交互问题,以构建完整的闭环健康管理系统。未来发展趋势将向智能化、舒适化与产业化纵深发展。人工智能的赋能将使其具备更强的预测与决策能力;新材料和新工艺将提升穿戴舒适性、耐用性和可洗涤性;而柔性电池、自供能技术的突破则致力于实现系统的真正无缝化。最终,智能纺织品将从一个可穿戴设备演进为无形的个性化健康伙伴,

深刻重塑预防性医疗和家庭健康管理的范式。

(10) 智能响应型糖苷类前药

糖苷类前药是一类通过糖苷键将活性药物分子与糖基（如葡萄糖、半乳糖等）共价连接而构建的新型药物形式。糖苷类前药的设计原理是利用病变组织中过度表达的特定糖苷水解酶或糖转运蛋白，实现药物的靶向递送和选择性活化，从而改善原药的药代动力学性质，提高治疗效果并降低毒副作用。然而，传统糖苷类前药仍存在靶向精度不足、激活机制单一和合成工艺复杂等缺点。为解决上述问题，智能响应型糖苷类前药已成为该领域的重要发展方向，其核心设计理念是通过引入多重响应机制，整合内源性刺激（如 pH 梯度、氧化还原电位、酶活性）与外源性触发（如光、超声、磁场），实现对药物的“被动释放”到“主动精准控制”。智能响应型糖苷类前药主要包含活性药物分子、糖基配体和智能连接臂 3 个关键单元，糖基部分利用生物体内天然转运系统穿越生物屏障，在靶部位特定触发条件下连接臂断裂，从而释放活性药物，进而在目标部位发挥治疗作用。目前，智能响应型糖苷类前药已在肿瘤治疗、代谢性疾病、抗感染治疗和神经系统疾病等领域取得了一定进展。未来，智能响应型糖苷类前药应聚焦于开发新型刺激响应型连接臂化学体系，利用人工智能辅助分子理性构建，并建立完善的体内外评价模型，以评估长期药代动力学特性和生物安全性。

7.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

7.1.2.1 固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理

固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理是循环经济与环境污染防治的交叉前沿领域。其核心理念是实现从“末端治理”向“全过程管控”的转变，将固体废物视为“错位的资源”，通过技术创新与系统优化，在实现废物资源化、能源化的同时，同步控制传统污染物（如重金属、二噁英）和新兴污染物（如微塑料、全氟化合物、药品及个人护理品）的环境风险。

该领域经历了从单一填埋/焚烧处置，到分类回收，再到追求“高值化”与“协同治理”的演进历程。根据核心论文发表趋势（表 7.2），该前沿在 2021 年达到峰值（26 篇）后有所回落，表明研究正从规模扩张转向技术深化阶段。其核心论文的篇均被引频次高达 143.71（表 7.1），显示出该领域研究成果具有重要的学术影响力。

该前沿的重要性体现在 3 个方面：在资源安全方面，通过从城市矿产、生物质废物中提取关键金属和再生材料，减少对原生资源的依赖；在环境健康方面，实现新旧污染物的协同治理是保障土壤、地下水和大气环境安全的关键；在气候变化方面，高值资源化过程可替代化石原料和能源，带来显著的碳减排协同效益。

当前研究主要聚焦 4 个方向：① 高值转化技术，如热解气化制备高纯化学品、生物炼制等；② 污染物迁移转化与阻断机制，开发高效吸附剂、催化降解剂等；③ 智慧化管理与系统集成，构建覆盖全生命周期的智慧管理平台；④ 政策—市场—技术协同机制研究。

从研究格局看，根据核心论文产出数据（表 7.3），中国在该领域占据绝对主导地位，核心

论文占比高达 38.95%，远超第二名的印度（14.74%）；美国、英国、澳大利亚等发达国家亦是重要研究力量。在机构层面，中国科学院是核心论文产出的领头羊，而伦敦帝国理工学院和利兹大学虽然核心论文数量不多，但其篇均被引频次分别高达 430.33 和 420.33（表 7.4），显示出卓越的研究质量。合作网络分析表明，该领域已形成紧密的全球合作网络，中国与英国、美国、澳大利亚等国保持着广泛合作（图 7.1 和图 7.2）。施引论文数据进一步显示，中国机构的后续研究最为活跃，中国科学院、中南大学、清华大学、浙江大学等是施引研究的核心力量（表 7.5 和表 7.6），预示着该领域在中国将持续保持强劲发展势头。

表 7.3 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	37	38.95	4 497	121.54	2020.6
2	印度	14	14.74	2 196	156.86	2021.1
3	英国	11	11.58	2 274	206.73	2020.7
4	美国	10	10.53	2 772	277.20	2020.8
5	澳大利亚	7	7.37	1 103	157.57	2020.7
6	马来西亚	7	7.37	757	108.14	2020.9
7	西班牙	7	7.37	736	105.14	2021.1
8	埃及	5	5.26	468	93.60	2021.4
9	意大利	4	4.21	1 306	326.50	2020.2
10	瑞典	4	4.21	701	175.25	2020.2

表 7.4 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	4	4.21	399	99.75	2019.8
2	伦敦帝国理工学院	3	3.16	1 291	430.33	2021.3
3	利兹大学	3	3.16	1 261	420.33	2020.7
4	圣伊格纳西奥德洛约拉大学	3	3.16	395	131.67	2021.0
5	上海交通大学	3	3.16	363	121.00	2020.3
6	维多利亚大学	2	2.11	1 175	587.50	2021.0
7	堪萨斯州立大学	2	2.11	578	289.00	2021.5
8	皇家墨尔本理工大学	2	2.11	438	219.00	2021.0
9	德黑兰大学	2	2.11	389	194.50	2021.0
10	西安交通大学	2	2.11	389	194.50	2021.0

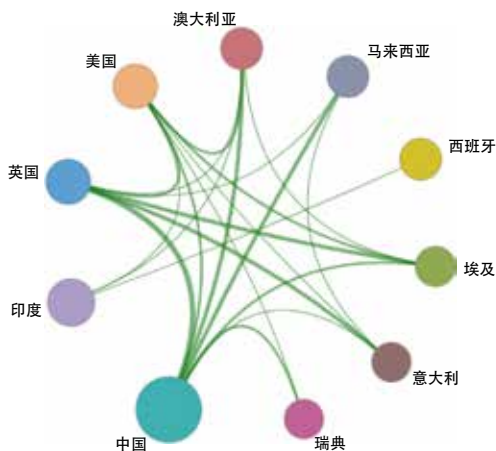


图 7.1 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿主要国家间的合作网络

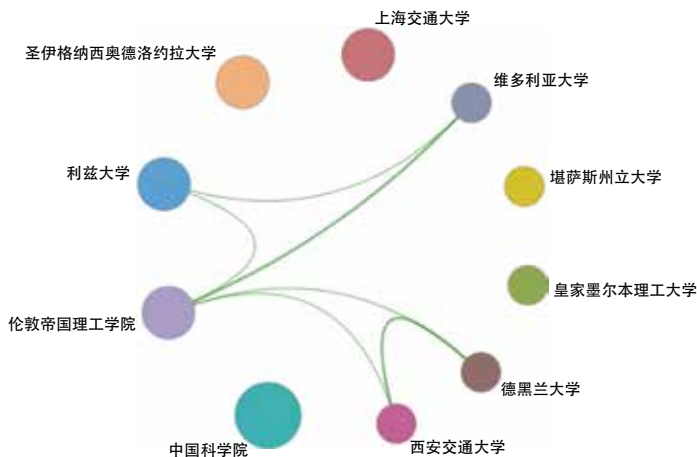


图 7.2 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 7.5 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	3 080	41.49	2022.9
2	印度	990	13.34	2023.1
3	美国	727	9.79	2022.9
4	英国	433	5.83	2022.9
5	意大利	382	5.15	2022.8
6	澳大利亚	329	4.43	2022.7
7	马来西亚	310	4.18	2022.7
8	沙特阿拉伯	307	4.14	2023.0
9	韩国	303	4.08	2022.9
10	西班牙	298	4.01	2022.8

表 7.6 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	260	24.74	2022.9
2	中南大学	106	10.09	2022.8
3	清华大学	105	9.99	2022.9
4	浙江大学	104	9.90	2023.1
5	同济大学	87	8.28	2023.1
6	北京科技大学	86	8.18	2022.9
7	沙特国王大学	75	7.14	2022.9
8	山东大学	61	5.80	2022.9
9	天津大学	58	5.52	2022.8
10	重庆大学	55	5.23	2022.9

展望未来，该前沿将向精准化、智能化、系统化、低碳化深度发展（图 7.3）。重点方向包括：开发基于传感器和 AI 的智能分选技术，实现精准回收；研发电化学合成、光催化转化等低碳工艺；基于回收材料设计功能新材料；构建污染物迁移扩散模型和风险预警系统。发展趋势表现为多技术耦合成为主流、数据驱动贯穿全链条、系统集成取代单点突破。该领域发展潜力巨大，应用场景丰富，涵盖城市矿山开发、塑料闭环循环、有机废物资源化、工业共生等多个方面，是实现“无废社会”和“双碳”目标的必由之路。



图 7.3 “固体废物高值资源循环利用与新旧污染物协同治理”工程研究前沿的发展路线

7.1.2.2 人工智能在天气预报和气候预测中的应用

人工智能正以一种前所未有的方式，对天气预报和气候预测领域进行着全方位的革新。在这个过程中，其重要性愈发凸显，它能够以远超传统数值模式的速度和较低成本，从海量数据中学习复杂的模式，进而显著提升预测精度，这对防灾减灾和应对气候变化至关重要。特别是近年来，人工智能已从早期机器学习辅助修正偏差，演进到如今如盘古气象大模型等纯数据驱动方案，在中期预报的准确性和速度上比肩甚至超越传统方法，实现了从单纯的辅助工具到核心驱动引擎的范式转变。当前主要研究方向聚焦在多个关键领域，包括高精度快速天气与极端事件预报、气候预测降尺度，以及运用 AI 对物理模型的参数化进行优化等。未来将着力推动物理与 AI 的深度融合，发展能遵守物理定律的神经网络及多模态地球系统大模型，并传统数值模式协同配合，



共同构建一个更为可靠、更为完善的地球系统预测框架，为人类更好地认知和应对天气、气候相关问题提供坚实的支撑。

表 7.7 所示为“人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家。可以发现，无论是论文比例还是被引频次，中国均排名第一，其他国家与中国有不小的差距，说明中国在这方面具有较强的研究优势。美国在核心论文数上排名第二，伊朗排名第三。从篇均被引频次来看，中国排名第四，马来西亚核心论文数虽然较少，但是篇均被引频次排名第一，这也从侧面说明发表同行公认的高水平核心论文的重要性。在主要国家间的合作网络中，中国与印度、伊朗、美国、加拿大、越南等合作较为密切，但与其他国家的合作还有待加强（图 7.4）。

表 7.7 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	30	26.79	5 890	196.33	2020.3
2	美国	22	19.64	4 499	204.50	2020.0
3	伊朗	15	13.39	2 103	140.20	2019.9
4	马来西亚	13	11.61	2 914	224.15	2019.7
5	印度	12	10.71	1 400	116.67	2020.8
6	澳大利亚	11	9.82	2 358	214.36	2019.9
7	加拿大	11	9.82	2 023	183.91	2020.0
8	越南	11	9.82	1 565	142.27	2020.0
9	英国	10	8.93	1 571	157.10	2020.8
10	西班牙	9	8.04	1 263	140.33	2019.0

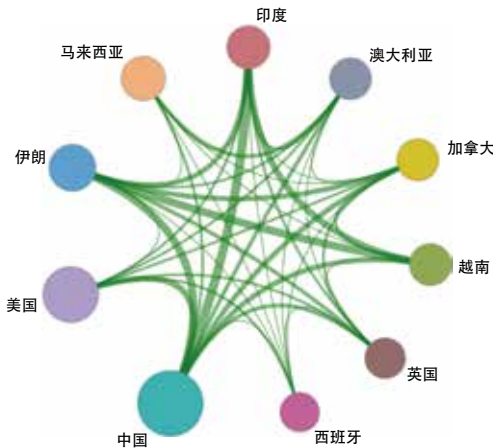


图 7.4 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 7.8 所示为该工程研究前沿中核心论文的主要产出机构。核心论文数排名第一的机构是越南的维新大学。由主要机构间合作网络可以看出，各国国内的部分机构间有合作关系，但这 10 个机构之间的合作较少（图 7.5）。

表 7.8 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	维新大学	9	8.04	1 014	112.67	2020.1
2	中国科学院	6	5.36	1 147	191.17	2020.2
3	孙德胜大学	6	5.36	1 014	169.00	2019.8
4	华中科技大学	4	3.57	805	201.25	2020.2
5	塔比阿特莫达勒斯大学	4	3.57	459	114.75	2020.5
6	大不里士大学	4	3.57	430	107.50	2019.2
7	香港理工大学	3	2.68	1 144	381.33	2019.3
8	马来亚大学	3	2.68	1 097	365.67	2020.0
9	阿卜杜勒·阿齐兹国王大学	3	2.68	998	332.67	2019.7
10	加拿大自然资源部	3	2.68	699	233.00	2019.3

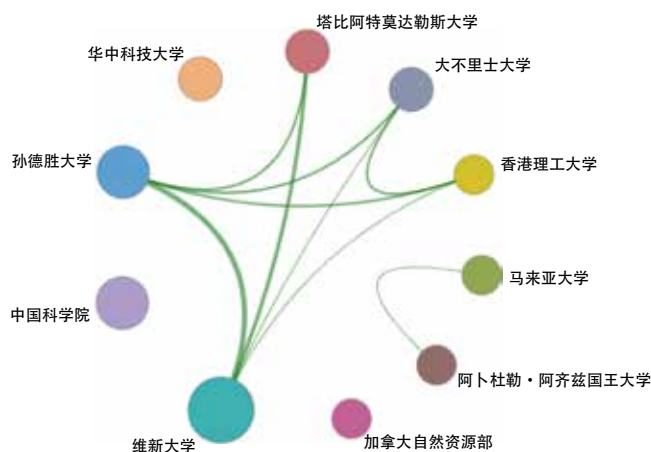


图 7.5 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿主要机构间的合作网络

在施引核心论文的国家排名中，中国排名第一，美国排名第二，印度排名第三（表 7.9）；中国科学院在施引核心论文的机构排名中位列第一，其次是维新大学和孙德胜大学（表 7.10）。由此可以看出，我国在“人工智能在天气预报和气候预测中的应用”方面具有一定的领先优势，中国科学院在该领域的研究机构中也处于领先地位，应继续保持该前沿的相关研究状态，同时加强与其他国家的合作。

图 7.6 为“人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿的发展路线。可以看出，该研究前沿未来 5~10 年将经历两个重点发展阶段：第一个阶段的核心特征是“AI 与传统数值模型的深度融合”，AI 不会取代传统的数值天气预报模式，而是与之深度结合，弥补其短板，提升整个预报系统的效率和精度；第二个阶段的核心特征“基于 AI 的端到端地球系统模拟”，此阶段 AI 模型逐渐成熟，开始从“辅助”角色走向“核心”角色，可能在某些领域取代传统数值模式，催生新的科研范式。



表 7.9 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	3 418	32.82	2021.4
2	美国	1 609	15.45	2021.2
3	印度	1 038	9.97	2021.6
4	伊朗	861	8.27	2021.2
5	澳大利亚	631	6.06	2020.9
6	英国	600	5.76	2021.5
7	韩国	513	4.93	2021.4
8	沙特阿拉伯	476	4.57	2022.0
9	马来西亚	430	4.13	2021.3
10	加拿大	425	4.08	2021.2

表 7.10 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	336	19.95	2021.5
2	维新大学	192	11.40	2020.4
3	孙德胜大学	151	8.97	2020.1
4	阿扎德大学	145	8.61	2021.0
5	河海大学	140	8.31	2021.2
6	德黑兰大学	131	7.78	2021.3
7	大不里士大学	127	7.54	2020.9
8	武汉大学	127	7.54	2021.5
9	华中科技大学	118	7.01	2020.7
10	南昆士兰大学	111	6.59	2020.6



图 7.6 “人工智能在天气预报和气候预测中的应用”工程研究前沿的发展路线

7.1.2.3 个性化医疗用智能纺织品

个性化医疗用智能纺织品是纺织工程、微电子、信息科学与生物医学交叉融合的前沿领域。其核心在于将传感器、驱动单元及数据处理算法集成于柔性织物中，实现对心电、呼吸、血氧、体温等生理信号的实时监测与分析，甚至具备药物释放、电刺激等治疗功能。该类纺织品不再是

传统的被动穿戴物，而是主动、连续、个性化的健康管理平台，推动医疗模式从“治疗为主”向“预防为主”转变。

个性化医疗用智能纺织品的发展历程呈现出明显的技术驱动与跨学科融合特征。其演进大致可分为3个阶段：① 技术萌芽期，以基础柔性传感器和导电织物研究为主，侧重单一生理信号的监测；② 快速发展期，随着物联网、人工智能及微电子技术的进步，研究重点转向多参数感知、系统集成与初步临床应用探索；③ 整合与深化期，研究方向进一步聚焦于精准性、舒适性、智能化以及与实际医疗场景的深度融合。当前，个性化医疗用智能纺织品的发展趋势凸显出三大特点：一是深度智能化，人工智能与机器学习被广泛应用于生理数据的实时分析、异常预警与决策支持；二是功能集成化，从单一监测向“监测—反馈—干预”的闭环系统发展；三是应用场景化，研究更加注重与具体医疗健康场景（如慢病管理、术后康复、老年人监护）的结合，推动技术落地。

智能纺织品为实现“无处不在的健康管理”提供了技术基础。其在慢性病管理、老年监护、康复医疗、运动健康等场景中具有广泛应用潜力，可显著降低医疗成本、提升生活质量，是未来数字医疗和健康物联网的重要组成部分。研究方向主要包括3个方面：一是生理监测，开发高灵敏度、高稳定性的传感纤维与系统；二是治疗干预，研究具有电刺激、热疗或药物控释功能的智能织物；三是系统集成，解决能源管理、数据通信、信号处理与用户交互等关键技术。

中国、美国和英国是该领域研究的主要产出国家（表 7.11），这表明这些国家在该研究领域具有较强的科研实力和活跃的学术氛围。马来西亚、韩国、澳大利亚和新加坡等国家也在该领域展现出积极的研究态势。中国在该领域的科研产出占据绝对优势，核心论文数量领先（91.04%），美国和英国分列第二、三位。主要研究机构包括亚洲大学、天津工业大学、中国医科大学、青岛大学等，其中中国机构在论文数量和影响力方面表现突出（表 7.12）。国家间合作网络（图 7.7）显示，各国之间的合作日益频繁，这有助于推动知识的交流和技术创新。机构间合作网络（图 7.8）显示，高校与科研院所之间合作密切，产业界参与度有待提升。该工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家和机构分别如表 7.13 和表 7.14 所示。

表 7.11 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	61	91.04	6 367	104.38	2021.2
2	美国	10	14.93	1 616	161.60	2021.2
3	英国	6	8.96	685	114.17	2021.2
4	马来西亚	4	5.97	495	123.75	2022.5
5	韩国	3	4.48	453	151.00	2021.7
6	澳大利亚	3	4.48	252	84.00	2021.7
7	新加坡	2	2.99	490	245.00	2021.5
8	西班牙	2	2.99	155	77.50	2021.0
9	加拿大	2	2.99	135	67.50	2021.0
10	巴基斯坦	2	2.99	133	66.50	2022.0



表 7.12 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	亚洲大学	19	28.36	1 645	86.58	2020.6
2	天津工业大学	19	28.36	1 645	86.58	2020.8
3	中国医科大学	17	25.37	1 788	105.18	2020.7
4	青岛大学	17	25.37	1 568	92.24	2020.8
5	闽江学院	14	20.90	1 314	93.86	2020.3
6	武汉纺织大学	10	14.93	1 376	137.60	2020.5
7	东华大学	7	10.45	796	113.71	2021.3
8	中国科学院	5	7.46	557	111.40	2021.4
9	加州大学洛杉矶分校	4	5.97	1 099	274.75	2021.8
10	南京林业大学	4	5.97	310	77.50	2023.2

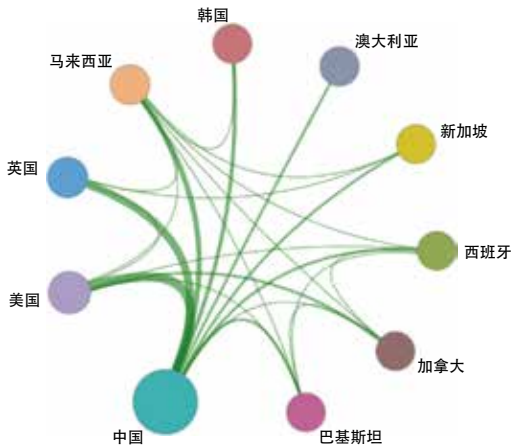


图 7.7 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿主要国家间的合作网络

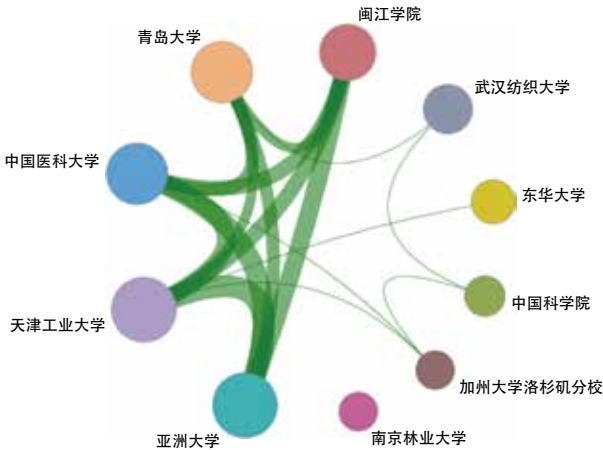


图 7.8 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 7.13 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	4 487	64.45	2023.0
2	美国	568	8.16	2022.9
3	印度	346	4.97	2023.2
4	韩国	343	4.93	2023.0
5	英国	237	3.40	2022.9
6	新加坡	200	2.87	2022.5
7	伊朗	193	2.77	2023.3
8	澳大利亚	171	2.46	2022.8
9	沙特阿拉伯	164	2.36	2023.3
10	德国	128	1.84	2023.0

表 7.14 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	430	22.52	2023.0
2	青岛大学	246	12.89	2022.8
3	东华大学	202	10.58	2023.1
4	天津工业大学	189	9.90	2022.5
5	四川大学	139	7.28	2023.1
6	新加坡国立大学	136	7.12	2022.5
7	中国医科大学	122	6.39	2022.2
8	亚洲大学	119	6.23	2022.0
9	闽江学院	111	5.81	2022.0
10	清华大学	108	5.66	2023.3

未来,个性化医疗用智能纺织品将朝着智能化、舒适化、产业化三大方向深入发展(图 7.9)。人工智能与机器学习技术的融合将增强其数据分析和疾病预测能力;新材料与新工艺的应用将进一步提升穿戴舒适性、耐用性和可洗涤性;自供能技术(如柔性电池、能量采集)的突破将推动实现真正“无缝化”健康监测。此外,多模态传感、闭环控制系统、与云端健康平台的深度融合将成为重点。预计在 5~10 年内,该类产品将从实验室走向规模化应用,广泛应用于家庭健康管理、远程医疗、体育科学和军事医疗等领域,成为个性化医疗生态系统的关键组成部分。



图 7.9 “个性化医疗用智能纺织品”工程研究前沿的发展路线

7.2 工程开发前沿

7.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

环境领域组所研判的 Top 10 工程开发前沿见表 7.15，涉及环境科学工程、气象科学工程、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程和轻工科学工程 6 个学科方向。各工程开发前沿 2019—2024 年的逐年核心专利公开情况见表 7.16。

(1) 在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成

我国土壤污染防治已从污染去除单一目标转向土壤绿色防治与安全健康。根据全国首次重点行业企业用地土壤污染状况调查，目前工矿企业场地数以万计，造成的土壤与地下水复合污染问题日益凸显，产业集群区、工业集聚区等区域性连片场地污染风险防控迫在眉睫。在产业园区 / 企业污染场地约占总体的 60%，针对其历史遗留污染家底不清、新污染物生产与使用

表 7.15 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引数	篇均被引数	平均公开年
1	在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成	104	379	3.64	2022.0
2	湿地智能生态监测感知技术与系统	678	400	0.59	2020.9
3	光伏、半导体等新兴产业废水深度除氟技术	561	1 065	1.90	2022.1
4	数字孪生技术用于污染早期预警与防治	180	393	2.18	2022.5
5	数据驱动的天气和短期气候预测集合预报模型	54	53	0.98	2022.6
6	超深水高压油气藏开发技术	536	1 375	2.57	2021.7
7	高海况场景下的无人舰艇智能航行技术	621	8 810	14.19	2022.7
8	营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制	69	85	1.23	2022.4
9	纳米结构可穿戴电化学生物传感器制备	483	1 132	2.34	2022.2
10	无铝化高阻隔包装技术	5 804	8 434	1.45	2021.9

注：前沿 2 来自数据挖掘 + 专家提名，前沿 1、3、4、8 来自专家提名，其他来自数据挖掘。

表 7.16 环境与轻纺工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成	8	12	18	26	16	24
2	湿地智能生态监测感知技术与系统	109	143	179	210	37	0
3	光伏、半导体等新兴产业废水深度除氟技术	49	66	81	85	121	159
4	数字孪生技术用于污染早期预警与防治	10	13	25	28	29	75
5	数据驱动的天气和短期气候预测集合预报模型	1	6	7	7	14	19
6	超深水高压油气藏开发技术	78	78	86	94	94	106
7	高海况场景下的无人舰艇智能航行技术	29	40	52	89	156	255
8	营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制	6	6	6	11	16	24
9	纳米结构可穿戴电化学生物传感器制备	58	43	62	63	110	147
10	无铝化高阻隔包装技术	610	729	1 056	1 123	1 047	1 239

以及影响周边环境等特点，亟须开发在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成。针对在产企业土壤与地下水污染管控，以“防新增、去存量、控风险”为主要原则，实行“面上防控、带状阻控、点状修复”策略，同时开展生产过程减污降碳与污染源头防控，实现边生产、边管控、边修复。结合石油加工、化工、焦化、电镀、有色金属矿采选等重点行业在产企业优先控制污染物排放和污染特征，开展污染物精细刻画，构建基于一张图的土壤环境管理平台；根据在产企业场地土壤与地下水污染特征与迁移转化，构建污染场地实时风险评估与智能预测模型，实现污染场地多维度－多尺度－动态－可视化－监测预警；集成气相抽提、热脱附、氧化还原、微生物修复等修复技术，制定在产企业污染土壤－地下水智能化修复决策，实施场地分区分类分级管理与修复。

(2) 湿地智能生态监测感知技术与系统

湿地智能生态监测感知技术与系统是集成高精度传感设备、物联网、遥感、人工智能等技术构建的空－天－地一体化湿地生态系统监测与评估体系。其核心在于通过智能感知、实时传输、大数据分析可视化决策，实现湿地水文、气象、土壤、生物多样性等多要素的全天候、全方位动态监测，为湿地保护、修复与管理提供科学依据和智慧支撑。这一系统有效解决了传统监测方式成本高、效率低、数据滞后等问题，推动湿地生态监测从“被动应对”向“主动预警”转变。主要研究方向是融合卫星遥感、无人机巡查与地面物联网传感器，形成“空－天－地一体化”监测网络，以及智能数据分析与预警。卫星遥感负责宏观尺度上的湿地动态变化监测；无人机凭借其机动灵活的优势，在局部区域进行精细监测；地面布设的多种物联网传感器则负责实时采集水质、土壤、气象及生物多样性等关键数据。进一步运用大数据、人工智能和机器学习技术，对多源监测数据进行深度挖掘与分析，开发 AI 算法模型用于鸟类自动识别与统计、野生动物种群监测以及湿地植被分类。系统能够识别生态变化趋势，在数据异常时自动发出预警，能够助力风险防控。未来将进一步进行技术深度融合与智能化升级，加强物联网、AI 模型与专业生态知识的融合。同时，监测设备的自适应能力与智能化水平将持续提升，如研发具备损伤自动识别功能的

新型监测装备，并优化深度学习模型，以提高在复杂湿地环境下的监测精度和效率。监测数据将深度赋能湿地精细化管理与生态价值转化，为构建覆盖监测、评估、预警、决策、管理全链条的智慧体系提供支撑。同时，加强不同平台间的数据对接与业务协同，有助于实现跨部门、跨区域的湿地生态信息互联互通与统一管理。

（3）光伏、半导体等新兴产业废水深度除氟技术

光伏、半导体等战略性新兴产业快速发展，产生了大量含氟废水，而这些废水经化学沉淀处理后仍含约 10 mg/L 氟化物，直接排入环境。受光伏、半导体产业集群化发展影响，部分区域地表水氟化物承载力快速逼近阈值，使得氟化物成为我国地表水主要超标因子之一。严峻的地表水氟污染态势倒逼多地收紧氟污染排放要求，并向地表水水质要求（1~1.5 mg/L）看齐。在深度处理含氟废水需求驱动下，近年来相关技术快速迭代，并开始兼顾水资源与氟资源的回收利用。其中，吸附法、混凝法和膜过滤法构成了工业废水深度除氟的核心技术，其主要开发方向包括：① 新型复合纳米吸附材料的开发、规模化制备与应用技术开发，重点提升对氟离子吸附容量、选择性与长期工作性能；② 面向多种复杂水质的高活性除氟混凝剂研发，以及助凝剂的复配优化与应用验证，提升工艺适配性与稳定性；③ 基于高通量、抗污染的高性能膜材料，发展低成本、可持续运行的膜过滤技术。中国专利在该开发前沿核心专利中占 89.1%，表明我国在该领域已处于需求牵引、创新策源、市场承载的主导地位。

（4）数字孪生技术用于污染早期预警与防治

随着物联网、高性能计算与多尺度建模技术的成熟，数字孪生技术正成为环境治理智能化转型的核心驱动力量。该技术通过构建与物理环境实时同步、双向交互的虚拟系统，实现污染过程的精准模拟、溯源解析与防控策略的虚拟推演，从而大幅提升环境管理的预见性与精细化水平。在污染早期预警与防治领域，数字孪生的核心开发方向涵盖：① 高保真环境模型与多源异构数据融合技术，集成气象水文、实时监测、污染源清单及地理信息数据，构建动态更新的流域或区域环境数字孪生体；② 基于人工智能的实时反演与动态校准算法，提升模型在复杂条件下的仿真精度与预警可靠性；③ 人机协同的决策优化与情景模拟功能，支持多目标约束下的污染管控方案制定与效能评估。目前，该技术已在若干重点流域、工业园区和城市大气污染防治中开展应用示范，正在推动实现从“被动应对”到“主动预警”的治理模式变革。

（5）数据驱动的天气和短期气候预测集合预报模型

数据驱动的天气和短期气候预测集合预报模型正通过端到端的深度学习架构实现业务化突破。此类模型完全基于历史观测与再分析数据进行训练，摒弃了传统数值模式中的显式物理方程与参数化方案，转而利用如 Transformer、图神经网络（GNN）以及球面卷积算子等结构，直接从数据中建模。具体实践中，通常采用编码—解码的架构，在全局网格与局部站点等多个尺度生成高分辨率预报，并在推理阶段借助扩散模型或条件生成技术构建概率性集合输出，从而高效量化预测不确定性。代表性系统——NVIDIA 的 FourCastNet 3、复旦大学的“伏羲”，以及微软研究院联合剑桥大学、艾伦·图灵研究所开发的 Aardvark Weather 等——已在预报精度、集合可靠性、计算效率（如分钟级全球中期预报）以及物理一致性方面展现出显著优势，形成了与传统

数值模式互补乃至竞争的混合预报范式，为实现更高效、可解释且业务可部署的下一代智能天气预报系统奠定了基础。

（6）超深水高压油气藏开发技术

超深水高压油气藏是指水深超过 1 500 m、压力系数大于 1.3 的油气藏，资源丰富，是海洋油气开发最具潜力的前沿领域之一。目前对常规油气田的开发已有较完善的技术体系，但超深水高压油气田开发技术体系尚未完全建立。超深水高压油气开发的技术方向与发展趋势包括：

① 超深水高压油气田开发方案设计研究——需构建水下井口串联开发、半潜平台综合处理、长距离高落差流体混输的创新开发模式，重点加强复杂储层渗流、井筒管流与海管多相流耦合的开发优化模拟技术研究，推动油气田经济高效开发；② 超深水高压开发井钻完井技术研究——核心是攻克窄压力窗口井控与井筒完整性挑战，需攻关精准压力与井壁稳定性控制技术、超高压密封与固井技术以及井筒全生命周期完整性保障技术，保障钻完井作业安全高效；③ 超深水油气田流动安全保障技术研究——超深水高压低温环境会加速水合物、蜡沉积生成，易引发堵塞等问题，需开展海底增压与长距离高落差多相混输技术攻关，优化水下生产系统布局，研发配套流动保障剂，提升输送效率与系统可靠性；④ 超深水装备研发与智能化升级——研发适用于极端环境的超高压—低温—强腐蚀防护材料与工程装备，同步推进智能监测装备迭代升级，实现开发装备的国产化与智能化。

（7）高海况场景下的无人舰艇智能航行技术

高海况场景下的无人舰艇智能航行技术是指保障无人舰艇能够在恶劣海洋环境中自主、安全、高效地完成预定任务的综合性技术集合。其核心在于通过人工智能、先进感知、自动控制等技术深度融合，赋予无人舰艇在极端动态扰动下进行“思考—感知—决策—执行”的能力，使其能克服强风、巨浪等复杂扰动，独立完成路径跟踪、障碍规避和任务执行。目前，该前沿的核心技术方向主要包括：① 智能感知与环境理解技术；② 智能决策与规划技术；③ 智能控制与执行技术。未来，高海况场景下的无人舰艇智能航行技术将朝着更高层次的智能化和协同化方向发展。一是强化人工智能算法与数字孪生技术等无人舰艇的应用，通过高保真仿真测试加速技术验证与迭代，提升舰艇自主化、智能化水平，二是发展多艇集群协同作战模式，通过共享感知、分布决策，提升整体任务韧性和适应性；三是推动无人舰艇的实装测试和应用，加快相应的作战运用与指挥控制体系构建，指导智能航行关键技术的发展与突破。

（8）营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制

营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制是食品科学与人工智能深度融合的前沿领域，其核心在于利用机器学习、大数据分析和多组学技术，实现从原料开发到个性化生产的全链条智能化。该领域突破传统营养模式，通过整合基因组学、代谢组学、生理参数及饮食习惯等数据，构建预测模型和数字化制造平台，旨在实现从“大众化配方”到“一人一策”的精准营养干预，致力于解决慢性疾病防控和健康老龄化等全球性健康挑战。主要技术方向包括：AI 驱动的原料发现与配方设计，如利用生物知识图谱和高通量计算筛选生物活性成分；个性化营养推荐系统，通过机器学习算法，结合生理数据生成动态膳食方案；智能制造与定制化生产，采用 AI 质量监控和 3D

食品打印实现精准定制；以及智能预测与趋势洞察，应用自然语言处理分析消费偏好和风味特性。未来发展趋势聚焦技术深度融合与升级、算法公平性提升、智能闭环系统与绿色制造以及伦理规制框架完善。这一领域正推动食品产业从经验导向迈向数据驱动的新范式，将对全球健康格局和产业可持续性产生深远影响。

（9）纳米结构可穿戴电化学生物传感器制备

纳米结构可穿戴电化学生物传感器是精准医疗与柔性电子的前沿交叉领域。其核心在于利用石墨烯、碳纳米管等纳米材料独特的电化学特性，构筑高灵敏、高选择性的柔性传感界面，通过监测汗液、组织液等中的生物标志物（如葡萄糖、乳酸、pH），实现对生理状态的实时、无创分析。它将传统离体检测转变为原位连续动态监测，为个性化健康管理提供了革命性的工具。其主要技术方向聚焦于3个层面：一是纳米敏感材料设计，通过调控材料形貌与复合结构，提升传感器的灵敏度、稳定性和生物相容性；二是微纳加工与制备工艺，采用静电纺丝、喷墨打印等技术将纳米材料可靠集成到柔性基底上，形成耐用、可拉伸的电极阵列；三是系统集成与封装，攻克微弱信号处理、无线能量供应与数据传输等关键技术，确保器件在实际穿戴环境中的可靠性与舒适性。该领域正朝着多功能集成化、智能化与实用化方向发展。未来趋势包括：开发多模态传感器，以同时检测多种指标；融合人工智能进行数据实时分析与疾病预警；发展自供能技术，以实现能量自给；着力提升器件的长期生物相容性与环境稳定性，推动其从实验室走向真正的临床与日常健康应用。

（10）无铝化高阻隔包装技术

传统铝箔包装材料提供了优异的阻隔性和保鲜性，长期主导食品、药品等高保护需求领域。传统铝箔包装材料由塑料与铝箔多层复合而成，难以有效分离与回收，从而引发了资源浪费与环境污染问题。此外，铝冶金过程属于高能耗环节，伴随显著的二氧化碳排放，与全球碳中和目标形成突出矛盾。基于对可持续发展与循环经济的迫切需求，无铝化高阻隔包装技术应运而生。该技术依托等离子体增强化学气相沉积、磁控溅射、纳米涂覆及多层共挤等先进工艺，在聚烯烃基材上构建氧化硅、氧化铝等透明阻隔层，或引入乙烯-乙烯醇共聚物等高性能聚合物，实现了对氧气、水蒸气等渗透介质的高效阻隔，同时彻底规避了铝层带来的回收兼容性问题。无铝化高阻隔包装技术的显著优势体现在3个方面：一是推动单一材料化设计，提高包装回收利用率；二是显著降低全生命周期碳足迹；三是兼具透明性、微波适应性和金属探测兼容性等功能拓展价值。未来，无铝化高阻隔包装技术将进一步朝向高性能化、资源可持续化及智能化方向演进，包括开发新型纳米复合材料与生物基阻隔薄膜、优化气相沉积工艺以降低成本，并融合传感功能实现包装智能化，最终构建兼顾防护性能与环境友好性的新一代包装材料体系。

7.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

7.2.2.1 在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成

工业园区及周边环境场地土壤与地下水复合污染较重，污染风险防控迫在眉睫，亟须开展在

产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成。国际上关于在产企业土壤与地下水风险防控的研究较早，主要是通过土壤和水污染防治法等法律法规，并结合日常监管进行防控。例如，美国制定了《资源保护与回收法》《清洁水法》《安全饮用水法》《有毒物质控制法》等法律，通过对企业的质量监管检查与设施设备渗漏检测标准进行防控；日本则制定了《土壤污染对策法》，对高风险设施（如加油站）、高风险行业（如石油、化工）加强针对性监管。此外，在修复装备上，注重技术的智能化和集成化，通过高效的修复系统，提高场地适应性，并灵活调整修复策略。

我国土壤污染防治研究虽然起步较晚，但已逐渐从溯源—断源—调查—管控—监管—修复全方位推进在产化工园区边生产边管控工作。2023 年，被列入土壤污染重点监管单位名录的重点行业企业约 1.6 万家。当前，针对在产企业土壤与地下水污染管控主要集中在污染分析、风险预警、治理修复、标准决策、区域实践等方面，如“十四五”国家重点研发计划“大气与土壤、地下水污染综合治理”重点专项中，就系统设立了“大型复杂石化场地污染原位阻断与协同治理技术”“在产医药化工园区土壤—地下水污染风险防控与原位协同修复”等项目，创新研发出系列绿色低碳修复与风险防控技术及装备，集成了气相抽提、土壤淋洗、高级氧化、多相抽提、生物降解、电化学、微生物修复、原位曝气等技术，适应性得以提高，且总能耗和修复成本降低 30%；研发了应急监测和快速修复装备，关键性能指标达到国际同类装备水平；创建了多维度、可视化、互动式场地污染协同监管平台，全面支撑了石油化工等 10 类重点行业在产企业及工业园区场地污染预防和风险管控。

表 7.17 所示为“在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家。可以发现，中国在核心专利比例与被引数比例上都具备较强的优势，其次是美国。相对来说，各国间的合作还有待加强。表 7.18 所示为该工程开发前沿中核心专利的主要产出机构。核心专利排名第一的机构为美国的修复产品公司，其次是中国的上海格林曼环境技术有限公司、煜环环境科技有限公司与中国石油化工集团有限公司。针对在产企业土壤与地下水污染防控，我国石化产业的区域实践工作已逐步成熟，已创新开发了原位再生氧化耦合型垂直可渗透型反应屏障技术、模块组合型水平可渗透反应墙技术、抽出—注入水力控制井群优化布设技术等水土协同的修复技术体系，并实现土壤和地下水污染溯源与管控修复技术集成示范。但目前各机构间的协同合作研究较少，缺少相关合作开发专利。

表 7.17 “在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	86	82.69	174	45.91	2.02
2	美国	12	11.54	189	49.87	15.75
3	比利时	2	1.92	12	3.17	6.00
4	巴西	2	1.92	0	0.00	0.00
5	澳大利亚	1	0.96	2	0.53	2.00
6	新加坡	1	0.96	2	0.53	2.00

表 7.18 “在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	修复产品公司	5	4.81	177	46.70	35.40
2	上海格林曼环境技术有限公司	5	4.81	13	3.43	2.60
3	煜环环境科技有限公司	3	2.88	19	5.01	6.33
4	中国石油化工集团有限公司	3	2.88	1	0.26	0.33
5	北京博诚立新环境科技股份有限公司	2	1.92	12	3.17	6.00
6	上海大学	2	1.92	6	1.58	3.00
7	中国建筑股份有限公司	2	1.92	3	0.79	1.50
8	吉奥斯因泰克咨询公司	2	1.92	3	0.79	1.50
9	鸿灌环境技术有限公司	2	1.92	2	0.53	1.00
10	江苏索尔雷米环保科技有限公司	2	1.92	1	0.26	0.50

“在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”在未来 5~10 年的发展将受到多种因素的影响，包括大数据应用及监管平台的提升，以及跨学科合作的深化等。主要的发展方向包括：① 精细刻画溯源；② 风险识别管控；③ 绿色生态修复。图 7.10 为“在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”工程开发前沿的发展路线。

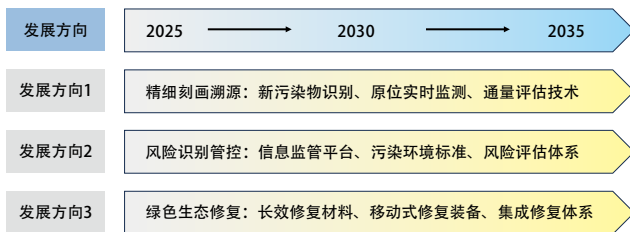


图 7.10 “在产企业场地及地下水污染管控与修复技术集成”工程开发前沿的发展路线

7.2.2.2 超深水高压油气藏开发技术

全球深水和超深水海域蕴藏着巨大的油气资源，近 10 年新发现大型油气田中深水储量占比达 68%，是全球油气勘探开发业务最具潜力的发展方向。我国深水领域资源主要分布在南海海域，资源量超 350 亿吨，是我国油气资源的战略接续区与产量增长极。

超深水高压油气藏开发相关技术起源于 20 世纪末至 21 世纪初，基础突破期以墨西哥湾和巴西盐下油田的开发为代表，通过大位移钻井及耐温 150 ℃、耐压 104 MPa 的高温高压完井装备的应用，初步实现了 2 000 m 水深高压油气的开发。技术成熟期则始于 2010 年后，超深水钻井船能力大幅提升（水深 >3 000 m），动态定位、智能完井、高保真水下控制系统及深水流动安全保障技术日趋成熟，超深水高压气田开发实现技术突破。在此期间，我国相关领域技术实现了全方位、系统性的突破，以“深海一号”这一标志性工程为典范，成功实现了深水至超深水气田的自

主勘探与开发。

超深水高压油气开发技术的重点发展方向包括：① 超深水高压油气田开发方案设计研究——超深水高压油气田通常具有油气藏压力系统复杂且分布分散、离岸距离远、无设施依托的特点,需构建水下井口串联开发、半潜平台综合处理、长距离高落差流体混输的创新开发模式,重点加强复杂储层渗流、井筒管流与海管多相流耦合的开发优化模拟技术研究,推动油气田经济高效开发；② 超深水高压开发井钻完井技术研究——超深水高压地层钻完井作业压力窗口窄、井控风险激增,需攻关精准压力与井壁稳定性控制技术、超高压密封与固井技术以及井筒全生命周期完整性保障技术,保障钻完井作业安全高效；③ 超深水油气田流动安全保障技术研究——超深水高压低温环境会加速水合物、蜡沉积生成,易引发堵塞等问题,需开展海底增压与长距离高落差多相混输模拟分析技术攻关、水合物预测－监测－解堵一体化防控技术研究,优化水下生产系统布局,通过采用动力学抑制剂与主动加热协同的方式,提升输送效率与系统可靠性；④ 超深水装备研发与智能化升级——研发适用于极端环境的超高压－低温－强腐蚀防护材料与工程装备,同步推进智能监测装备迭代升级,实现开发装备的国产化与智能化。

“超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿中核心专利产出呈现出高度集中的地域与机构分布特征。从国家分布来看,中国占据绝对主导地位,其公开量占比高达 91.42%,被引数占比达 83.78%,显示出显著的技术产出与影响力；美国虽然公开量仅占 2.61%,但平均被引数达 7.57,表明其专利质量较高（表 7.19）。机构方面,前十名机构全部来自中国,涵盖能源企业、高校及科研单位,显示出国内在该技术领域的系统布局与协同创新,中国海洋石油集团有限公司（简称中海油）以 22.57% 的公开量占比和 24.95% 的被引数占比领先（表 7.20）。合作网络方面,各国在该领域缺少国际合作,整体仍以国内合作为主；中国国内机构间合作密切（图 7.11），形成了以中海油、石油大学等为核心的研发集群,推动该前沿技术的快速发展与转化应用。

表 7.19 “超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	490	91.42	1 152	83.78	2.35
2	美国	14	2.61	106	7.71	7.57
3	俄罗斯	7	1.31	9	0.65	1.29
4	韩国	4	0.75	22	1.60	5.50
5	德国	4	0.75	21	1.53	5.25
6	印度	3	0.56	0	0.00	0.00
7	日本	2	0.37	5	0.36	2.50
8	法国	2	0.37	2	0.15	1.00
9	马来西亚	2	0.37	0	0.00	0.00
10	澳大利亚	1	0.19	21	1.53	21.00

表 7.20 “超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国海洋石油集团有限公司	121	22.57	343	24.95	2.83
2	中国石油大学（华东）	47	8.77	143	10.40	3.04
3	中国石油大学（北京）	16	2.99	59	4.29	3.69
4	中国石油天然气股份有限公司	16	2.99	44	3.20	2.75
5	中国石油化工集团有限公司	16	2.99	25	1.82	1.56
6	西南石油大学	13	2.43	45	3.27	3.46
7	大连理工大学	12	2.24	59	4.29	4.92
8	长江大学	8	1.49	40	2.91	5.00
9	美钻深海能源科技研发（上海）有限公司	8	1.49	14	1.02	1.75
10	中国船舶重工集团有限公司	7	1.31	28	2.04	4.00

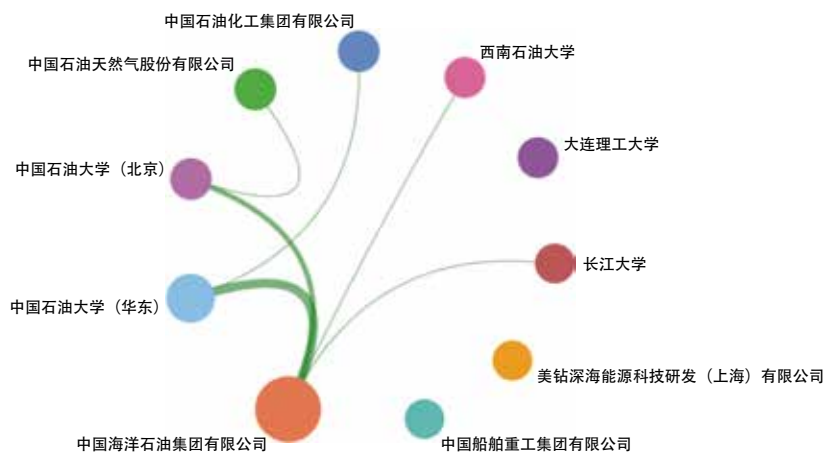


图 7.11 “超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

“超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿未来 10 年发展呈现极限能力突破、智能化深化、全生命周期协同与绿色化转型四大趋势（图 7.12）。① 极限能力突破从“被动耐受”到“环境适应”：通过超高压—低温—强腐蚀协同防护材料体系、万米级超深高压井配套工程装备、深部硬地层高效破岩工艺的深度融合，实现“材料—装备—工艺”协同，逐步突破超深水高压油气藏开发技术边界。② 智能化从“局部智能”到“自主决策”：以提升智能装备可靠性、信息传递及时性、实时决策自主性为核心，研发适应超深水高压极端工况的智能监测、传感、控制设备，开发自主感知—决策—执行系统，减少复杂工况条件下人工干预及非计划关停。③ 全生命周期协同从“数据孤岛”到“协同优化”：通过地质预测与实时工程反馈实现勘探开发协同，通过产能释放与风险预控的动态平衡推动开发生产协同，实现超深水高压油气开发从“经验驱动”向“数据驱动”转型。④ 绿色化转型从“末端减排”到“深海能源共生”：通过“风—光—

水－储”多能利用、高压天然气水合物原位转化、钻完井液有机物的循环利用及废弃装置的生态化改造，将“生态负担”转化为“生态资产”，抢占深海能源共生技术制高点。

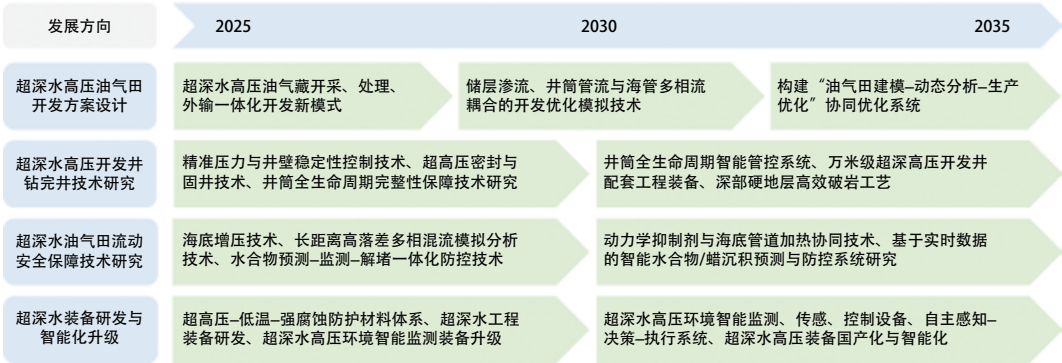


图 7.12 “超深水高压油气藏开发技术”工程开发前沿的发展路线

7.2.2.3 营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制

“营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”代表了食品工业向数智化转型的核心方向，其本质是通过数据科学与智能算法重构从研发到生产的全价值链。该前沿旨在破解传统食品行业依赖经验、开发周期长、个性化程度低的瓶颈，将个体健康数据、生物分子信息与先进制造工艺相结合，推动食品工程从标准化向可定制化跨越。发展至今，已从单点算法应用逐渐进入产业链协同阶段，但仍面临数据整合、模型泛化及规模化落地等挑战。未来突破需依靠生物计算与工业物联网的深度融合，并建立贯穿设计—生产—消费的智能闭环系统。这一转变不仅重塑食品产业技术体系，更对公共健康管理及未来食品供给模式产生深远影响。

基于核心专利的主要产出国家数据分析，“营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”领域呈现明显的“一超多弱”早期发展格局。中国以 59.42% 的专利占比和 87.06% 的被引数占比占据绝对主导地位（表 7.21），表明我国在该交叉学科领域兼具创新活性和技术影响力，已成为推动该前沿发展的核心力量。印度虽专利数量位居第二，但极低的被引指标反映出其技术影响力有限。值得关注的是，智利等国家虽专利总量少，却拥有个别高影响力成果，提示细分领

表 7.21 “营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	41	59.42	74	87.06	1.80
2	印度	21	30.43	1	1.18	0.05
3	韩国	4	5.80	0	0.00	0.00
4	智利	2	2.90	10	11.76	5.00
5	印度尼西亚	1	1.45	0	0.00	0.00
6	沙特阿拉伯	1	1.45	0	0.00	0.00



域可能存在差异化创新机会。总体而言，中国在这一新兴工程前沿中已建立起显著优势，未来需在保持产出规模的同时，着力培育更多高价值核心专利，进一步强化技术引领地位与产业转化能力。

该领域专利的主要产出机构分布呈现高度分散化特征，尚未形成具有绝对优势的领军机构。从全球范围看，创新主体多元但力量分散，排名首位的诺特科特拉华有限公司虽专利影响力突出（平均被引 5 次），但总量有限（表 7.22）。中国机构在数量上占据明显优势，创新主体涵盖科技企业、高校及科研院所等多类型机构。东喜和仪（珠海市）数据科技有限公司单件专利获 13 次引用，显示中国在细分技术上已具备产生重要影响的能力。然而，中国机构整体呈现“多而不强”的特点，大量专利未被引用或引用数较低，表明创新质量参差不齐。这种分布格局反映该领域仍处于早期探索阶段，中国虽已建立广泛的创新基础，但仍需培育具有持续创新能力和国际影响力的领军机构，进一步提升专利质量与技术创新水平。图 7.13 展示了主要国家间在该技术领

表 7.22 “营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	诺特科特拉华有限公司	2	2.90	10	11.76	5.00
2	上海市大数据中心	2	2.90	3	3.53	1.50
3	来安县平松机械制造有限公司	2	2.90	2	2.35	1.00
4	昌迪加尔学院集团	2	2.90	0	0.00	0.00
5	中国农业科学院农业资源与农业区划研究所	2	2.90	0	0.00	0.00
6	东喜和仪（珠海市）数据科技有限公司	1	1.45	13	15.29	13.00
7	鄂尔多斯市斯创网络科技有限责任公司	1	1.45	9	10.59	9.00
8	青岛科技大学	1	1.45	6	7.06	6.00
9	山东每日好农业发展有限公司	1	1.45	5	5.88	5.00
10	江西理工大学	1	1.45	4	4.71	4.00

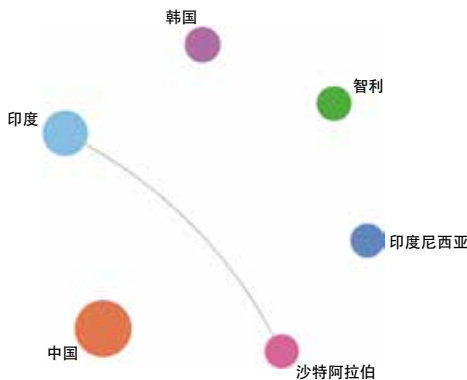


图 7.13 “营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”工程开发前沿主要国家间的合作网络

域的合作网络，可以看出，国家间的研发合作关系较为薄弱，只有印度与沙特阿拉伯之间存在显著合作；机构间则没有发现明显的合作关系。

未来 5~10 年，该前沿的发展将实现从单点技术突破向全产业链协同创新的跨越。重点方向聚焦于多模态数据融合、算法创新与升级以及智能闭环系统构建（图 7.14），通过深度融合多组学与实时监测数据，开发更精准、可解释的 AI 模型，并建立从设计到制造的全程自动反馈系统，推动营养健康食品研发向全程数字化、个性化方向演进，最终形成覆盖“设计—生产—消费”的全新智能产业生态。



图 7.14 “营养健康食品 AI 辅助设计与精准创制”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：郝吉明 曲久辉

专家组：

贺克斌 魏复盛 张全兴 杨志峰 张远航 吴丰昌 朱利中 潘德炉 丁一汇 徐祥德
侯保荣 张 偲 蒋兴伟 任发政 庞国芳 孙晋良 俞建勇 陈克复 石 碧 瞿金平
陈 坚

工作组：

黄 霞 鲁 玺 张 姣 李 彦 许人骥 陈宝梁 潘丙才 席北斗 徐 影 石 英
宋亚芳 白 雁 马秀敏 李 洁 王知泓 郭慧媛 刘元法 刘东红 范 蓓 覃小红
黄 鑫

办公室：

王小文 朱建军 高 岳 张向谊 郑 竞

执笔组:

黄霞 鲁玺 张姣 李彦 潘丙才 张孝林 席北斗 白军红 赵永康 陆克定
姜永海 贾永锋 尚长健 古振澳 盛雅琪 谢湑 邱继琛 于建钊 郑菲 许人骥
徐影 石英 王知泓 白雁 李洁 马秀敏 姜平 王琳 郭慧媛 陈冲
胡瑶 覃小红 张弘楠 黄鑫 肖涵中 梁杰



第八章

农业前沿



8.1 工程研究前沿

8.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

农业领域 Top 10 工程研究前沿体现了农业研究正朝着多学科深度融合、智能化和可持续发展方向迈进，整体呈现出“机理解析精准化、技术应用智能化、系统管理数字化、资源利用绿色化”的鲜明特征。具体表现在以下方面：① 动植物性状形成与调控机制的深度解析，如“水产动物重要性状形成的遗传解析”“基于多维组学的作物性状遗传网络解析”和“园艺植物生长发育及代谢的表观遗传调控机制解析”，致力于从基因组、转录组、表观组等多层次揭示农艺性状的遗传基础与分子网络；② 农业系统智能管理与响应模型的构建，如“农田生态系统管理大模型构建”“基于雷达组网的害虫迁飞规律研究”和“人工智能辅助新型动物疫苗与药物靶点发现及分子设计”，突出大数据、人工智能（AI）、遥感与数字孪生技术在农业预测、决策和灾害防控中的核心作用；③ 农业资源高效利用与生态互作机制的挖掘，如“根际生命共同体多界面生物级联增效机制”“畜禽消化生理与饲料养分互作机制”和“农业动物环境适应性性状形成机制”，聚焦植物－微生物－环境互作、养分高效利用以及生物抗逆性调控；④ 农业材料与绿色技术的前沿创新，如“高性能纳米纤维素基多功能复合材料”，体现农业向生物基材料、低碳制造和循环系统的延伸拓展。

农业领域工程研究前沿核心论文情况如表 8.1 和表 8.2 所示，核心论文数区间为 15~700 篇，平均约为 131.6 篇，相比往年有明显提升；篇均被引频次区间为 11.76~172.16 次，平均约为 73.59 次；

表 8.1 农业领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	农田生态系统管理大模型构建	19	3 271	172.16	2022.1
2	畜禽消化生理与饲料养分互作机制	61	3 721	61.00	2020.3
3	水产动物重要性状形成的遗传解析	69	908	13.16	2022.0
4	基于多维组学的作物性状遗传网络解析	15	1 675	111.67	2021.1
5	人工智能辅助新型动物疫苗与药物靶点发现及分子设计	105	17 955	171.00	2009.6
6	根际生命共同体多界面生物级联增效机制	62	1 642	26.48	2021.8
7	农业动物环境适应性性状形成机制	160	8 765	54.78	2020.2
8	基于雷达组网的害虫迁飞规律研究	50	588	11.76	2022.0
9	高性能纳米纤维素基多功能复合材料	700	68 118	97.31	2020.2
10	园艺植物生长发育及代谢的表观遗传调控机制解析	75	1 240	16.53	2021.6

表 8.2 农业领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	农田生态系统管理大模型构建	1	1	2	8	6	1
2	畜禽消化生理与饲料养分互作机制	14	26	12	7	2	0
3	水产动物重要性状形成的遗传解析	9	10	5	12	12	21
4	基于多维组学的作物性状遗传网络解析	1	6	2	3	3	0
5	人工智能辅助新型动物疫苗与药物靶点发现及分子设计	4	8	2	1	3	0
6	根际生命共同体多界面生物级联增效机制	5	9	15	10	10	13
7	农业动物环境适应性性状形成机制	52	52	36	15	5	0
8	基于雷达组网的害虫迁飞规律研究	0	9	12	12	2	15
9	高性能纳米纤维素基多功能复合材料	239	210	135	78	32	6
10	园艺植物生长发育及代谢的表观遗传调控机制解析	10	14	7	19	16	9

核心论文出版年度以 2020 年、2021 年和 2022 年为主，其中“农田生态系统管理大模型构建”的平均出版年为 2022.1，较其他前沿更贴近当前；而“畜禽消化生理与饲料养分互作机制”等方向仍以 2020 年和 2021 年为主，反映不同前沿的发展阶段差异。

从国家与研究机构表现来看，中国在多数前沿中占据核心地位，尤其在“农田生态系统管理大模型构建”和“水产动物重要性状形成的遗传解析”中核心论文占比分别达到 100% 和 79.71%，显示出中国在智慧农业和遗传育种领域的显著影响力。美国、澳大利亚和欧洲国家（如挪威、丹麦、英国）则在动物营养、基因组学与材料创新方面保持较强实力。国际合作网络普遍存在，例如在畜禽营养与水产遗传领域形成中美、中欧等多边协作格局。

未来这些前沿将进一步融合多组学技术、人工智能、高性能传感与功能材料，推动农业由传统经验驱动向数据驱动和机制引导转型，实现从群体到个体、从田间到系统的全链条精准调控，为保障粮食安全、促进农业绿色转型和应对全球气候变化提供关键技术支撑。

（1）农田生态系统管理大模型构建

农田生态系统是保障全球粮食安全和生态平衡的核心单元，其健康运行对人类社会的可持续发展具有基础性作用。传统农田管理模式在面对粮食安全、气候变化、资源短缺等全球性挑战时，难以全面把握作物生产、环境变化和资源利用之间的复杂耦合关系。随着遥感、传感网络和大数据技术的快速发展，农田生态系统管理大模型被提出并逐步构建。其核心是通过融合多源异构数据，并结合机理模型和人工智能，形成可解释、可推演的农田生态系统管理数字孪生体，最终实现农田管理的精准化、智能化和可持续化。大模型可整合与解析来源多样、结构各异的多尺度海量数据，搭建数字化的“虚拟农田”信息底座，依托人工智能挖掘这些数据背后隐藏的复杂非线性关系，以机理模型为内核框架描述农田生态过程的内在规律，精准地模拟和预测农田生态系统的动态响应，并做出合理的管理决策。与传统管理模式相比，大模型具有更强的泛化能力和可扩展性，不仅能在区域和全球尺度上揭示农业与环境之间的反馈关系，还能挖掘潜在的优化路径。农田生态系统管理大模型的建立与应用，不仅是农业数字化和智能化发展的里程碑，也是应对气

候变化与粮食安全双重挑战的重要战略工具。

（2）畜禽消化生理与饲料养分互作机制

“畜禽消化生理与饲料养分互作机制”是动物营养与畜牧工程的核心研究方向，旨在揭示动物消化系统与饲料养分之间的动态互作及其对消化、吸收、代谢和生产性能的影响。该领域已从传统的表观消化研究发展为多学科交叉的系统科学，聚焦动物－饲料－微生物互作网络，为精准营养与绿色养殖提供科学基础。研究历程经历了从整体观测到机制解析的演变。早期关注表观消化率与生长性能的宏观关系。随着分子生物学、微生物组学与代谢组学等技术的发展，逐步深入到肠道菌群、黏膜免疫和代谢通路等微观机制。当前，已进入多组学整合与大数据驱动阶段，借助体外模拟、类器官和人工智能等手段，在细胞与分子层面阐释互作机理，推动营养策略向“动态精准”跨越。主要研究方向包括：① 肠道微生物与宿主互作机制，重点研究功能性饲料组分对菌群结构及动物生理机能的调控作用；② 养分感知与代谢调控通路，探索营养素如何通过生理信号轴影响养分分配与利用；③ 肠黏膜屏障功能与营养干预，研究氨基酸、脂肪酸等对肠道完整性和免疫调节的作用机制；④ 智能化营养模型开发，整合动物基因型、生理阶段、环境参数和饲料养分，构建精准预测与决策系统，实现营养供给的动态优化。该领域的研究不仅具有重要理论价值，更是推动畜牧业走向精准化、绿色化和高值化的关键技术路径，对未来动物农业转型升级具有重要意义。

（3）水产动物重要性状形成的遗传解析

水产动物重要性状形成是指在自然选择与人工选择的长期作用下，水产动物逐渐积累并表现出生长、繁殖、抗病、肉质等对养殖与利用具有重要价值的性状过程。这一过程在人类渔业生产和水产养殖业的发展演变中发挥重要作用。具体来看，性状形成过程以水产动物基因组内的遗传变异为基础，通过选择和积累逐步固定有利性状。例如，在育种过程中，人类有目的地从具有多样性的群体中选择生长快、抗逆和抗病性强、肉质优良的个体。本质上，这一过程是基因组优良遗传变异的聚合与保留。然而，传统的人工选择历时漫长，且对性状的选择相对直观与经验化，在筛选优异性状的同时，也不可避免地导致群体遗传多样性的下降。相比之下，野生种质及天然群体往往在特定性状方面表现出明显优势，如更强的环境适应性、更优的抗病力以及特定肉质品质，这些特征为遗传改良提供了重要基因资源。如今，随着基因组学、分子标记和基因编辑等现代生物技术的发展，水产动物重要性状的遗传解析逐渐深入，人们能够在分子水平上识别和利用关键调控基因，加速目标性状的精准改良。在此背景下，深入解析水产动物重要性状形成机制，不仅有助于重新挖掘和利用在传统选择过程中丢失的宝贵基因资源，也为培育高产、优质、抗病和环境适应性强的新品种提供了科学依据，对应对环境变化和实现水产养殖业的可持续发展具有重要意义。

（4）基于多维组学的作物性状遗传网络解析

基于多维组学的作物性状遗传网络解析是指整合基因组学、转录组学、蛋白组学、代谢组学等多层次组学数据，系统性解析作物重要农艺性状形成的遗传调控网络。该研究前沿旨在打破单一组学的局限，通过多维度、全基因组水平的数据整合与挖掘，揭示基因－基因、基因－环境互

作调控性状形成的分子机制，为作物精准育种提供理论依据和目标基因资源。其主要研究方向包括：构建多组学整合数据库与分析平台，解析复杂性状（如产量、品质、抗逆性等）的遗传架构；挖掘调控关键性状的核心基因和信号通路；建立基因调控网络模型，预测优良等位变异组合；结合人工智能算法提升大数据挖掘与网络推断效率。随着测序技术成本下降和计算生物学方法不断进步，该领域正向更高分辨率、动态化、机制化的方向发展。未来，多维组学数据将与基因编辑、田间高通量表型组深度融合，推动作物遗传研究从“单个基因”向“网络调控”范式转变，为实现作物设计育种和智慧农业提供核心驱动力。

（5）人工智能辅助新型动物疫苗与药物靶点发现及分子设计

重大动物疫病和人兽共患病的广泛流行严重制约畜牧业高质量发展与公共卫生安全。传统疫苗与药物研发多依赖经验积累和高通量筛选，周期长、效率低、成本高，难以应对复杂多变的病原体与突发疫情。在这一背景下，人工智能逐渐成为基础研究的重要推动力，为新型疫苗与药物靶点发现及分子设计提供了高效、系统的新手段。人工智能的核心优势在于整合和解析多组学与大规模结构数据，识别关键病原因子与宿主靶点。通过深度学习、图神经网络和蛋白质语言模型等方法，可在基因组、转录组、免疫组学和结构组学层面精准预测保护性抗原表位及关键互作节点。同时，生成式模型与分子模拟算法能够虚拟筛选并优化候选抗原、抗体及小分子药物，大幅缩短研发周期，并提升候选分子的稳定性、免疫原性与可制造性。当前研究主要聚焦3个方面：一是基于反向疫苗学2.0的表位预测与多表位疫苗设计，结合人工智能解析病原逃逸突变，提出耐变异候选；二是利用人工智能驱动分子生成与对接模拟，加快小分子、肽类药物和纳米抗体的筛选与优化；三是通过主动学习和数字孪生技术，构建“数据—模型—实验”闭环，加快成果验证和迭代。未来，该领域将推动疫苗与药物研发由“经验驱动”向“数据与机制融合驱动”转型，由单一靶点拓展至多病原、跨物种的通用模型，进一步提升预测的可解释性和普适性。结合信使核糖核酸（mRNA）疫苗平台、纳米递送系统和精准动物模型，人工智能预测成果将加速转化应用。可以预见，人工智能将在重大动物疫病防控的基础研究中发挥战略作用，为突破疫苗设计瓶颈、推动新型药物研发提供坚实支撑。

（6）根际生命共同体多界面生物级联增效机制

作物养分高效不是一个单一的过程，而是涉及植物—土壤—微生物多界面互作的复杂过程。根际生命共同体多界面生物级联增效机制旨在系统阐释植物—根系—根际—菌丝际—土壤微生物连续体中，多界面生物互作通过级联效应协同提升养分效率的机制。其核心含义是，根系分泌物和菌丝分泌物等在根际、菌丝际等关键界面驱动微生物群落结构与功能演变，触发一系列生物互作连锁反应，从而显著活化土壤养分、增强植物吸收能力。主要研究方向包括：多界面碳—养分耦合与信号转导机制，研究碳流如何驱动养分循环及其信号调控路径；植物第一基因组与微生物组（第二基因组）协同机制，解析植物调控核心微生物组装配及其功能表达的分子基础；根系—根际—菌丝际—微生物级联互作过程，揭示关键分泌物与微生物类群介导的养分活化、传输与利用的通路及放大效应。发展趋势聚焦于多学科交叉与系统生物学方法的融合，包括利用同位素示踪、微生物组学、合成生物学与人工智能等手段，从定性描述走向定量解析与功能设计。

未来将着力构建根际互作网络模型，开发基于微生物组靶向调控和植物－微生物协同设计的生物学增效途径，为实现农业绿色增产与养分高效利用提供理论突破和技术支撑。

（7）农业动物环境适应性性状形成机制

农业动物环境适应性性状形成机制研究旨在阐明动物在长期进化与人工选育过程中，为应对极端温度、饲料差异、病原胁迫及高原低氧等环境挑战，所形成的基因型与表型特性及其内在规律。其核心在于解析基因组变异、表观遗传修饰、转录调控与环境适应性的协同机制。我国农业动物种质资源丰富、用途多样，但本土高适应性品种普遍存在生产性能偏低问题，难以满足现代规模化畜牧业需求；此外，现代商业化品种（如高产奶牛、肉鸡）因过度追求生产性能而导致长期高强度选育中耐热性、抗病性及饲料利用效率下降，限制了其在我国复杂多元的生产环境中的应用。多组学和单细胞测序等技术的发展为解析复杂环境适应性性状分子机制、探索“环境－基因”互作提供了强大支撑。面对资源约束趋紧以及气候变化加剧，未来研究将转向动态环境压力中动物适应响应与恢复机制研究，从分子机制拓展至生态系统水平评估，强化气候变化下遗传资源特性鉴定、挖掘保护与利用，为抗逆品种精准选育与创制提供指导。同时，基于人工智能和大数据构建预测模型，将有力地推动基因编辑与基因组选择等育种技术在抗逆性状改良中的应用。未来，随着该领域研究向多维度、动态化、精准化和智能化发展，其将为全球粮食安全和畜牧业可持续发展提供核心理论与技术支持。

（8）基于雷达组网的害虫迁飞规律研究

迁飞性害虫在我国多发频发、突发暴发形势严峻，是长期威胁国家粮食安全、生物安全和生态环境安全的重大生物灾害。其通常于数百米至千米高空飞行，传统手段无法有效监测，因此，构建先进监测技术体系，突破迁飞性害虫早期监测预警与有效阻控的技术瓶颈，进而降低其扩散危害风险，已成为当前农业生物安全领域的核心关注焦点与前沿研究方向。昆虫雷达是实现空中迁飞性害虫精准监测的重要工具，利用昆虫雷达进行虫峰发现、种类自动识别、迁飞路径追踪、迁入时地预测、高效阻截等是该领域的主要研究方向。尽管昆虫雷达技术已展现出显著优势，在新型高分辨率昆虫雷达的研发和数据实时精准解算、基于雷达回波信号的害虫种类识别、融合雷达数据与多源信息的迁飞轨迹预测模型构建、害虫迁飞行为与环境因子互作机制解析、多雷达组网实现大范围联合实时监测、发展基于人工智能的自动化预警技术以及运用监测信息开展有效阻截等方向仍然面临一系列待解决的难题。开展全国尺度迁飞性害虫雷达联网监测、动态跟踪、精准预警和高效阻控研究，其成果不仅能为迁飞性害虫的科学防控提供关键技术支撑，更将为揭示空中昆虫生态系统的结构与功能、完善农业生物灾害综合防控体系奠定重要基础。

（9）高性能纳米纤维素基多功能复合材料

在全球推动碳中和与可持续发展的背景下，从可再生生物质中提取的纳米纤维素因其兼具超高强度、轻质、巨大的比表面积、生物可降解、来源广泛等优异特性，已成为构建下一代高性能绿色材料的核心基元。高性能纳米纤维素基多功能复合材料正是将纳米纤维素作为增强相或功能基体，与聚合物、无机纳米粒子等其他材料通过多尺度复合设计，赋予传统材料前所未有的力学

性能和多重功能性的前沿领域，是解决当前资源、能源和环境挑战的关键科学路径之一。该领域的主要研究方向高度聚焦于“高性能化”与“多功能化”的融合。一方面，利用纳米纤维素卓越的力学性能，开发超强、超韧、轻量化的结构材料，替代石油基塑料及玻璃纤维等，应用于航空航天、汽车轻量化和绿色包装领域。另一方面，深度挖掘其纳米效应与丰富的表面化学特性，开发先进功能材料。例如，构筑柔性、透明的导电网络，应用于可穿戴电子设备与传感器；设计高孔隙率、高比面积的复合气凝胶或薄膜，应用于高效储能器件（电池 / 超级电容器）、电磁屏蔽以及水处理和环境修复。此外，该材料还具有优良的生物相容性，在生物医药领域如组织工程支架、药物控释载体等方面展现出巨大潜力。未来的发展趋势将集中于突破纳米纤维素低成本、规模化制备及其在复合体系中的分散性与界面相容性等关键技术瓶颈。同时，与增材制造（3D 打印）等先进制造技术的深度融合，以实现复杂结构与功能的一体化构筑，以及开发能够响应光、电、热、pH 等多重刺激的智能材料，构建全生物基、可循环的闭环材料体系，是该前沿未来发展的必然方向。

（10）园艺植物生长发育及代谢的表观遗传调控机制解析

表观遗传调控是指通过脱氧核糖核酸（DNA）甲基化、组蛋白修饰、染色质结构重塑等机制在不改变 DNA 序列的前提下调控基因表达的过程，在植物的生长发育、逆境胁迫响应和基因组稳定性维持中具有重要功能，但其详细的作用机制仍不明确。园艺作物种类多样，其产品器官又包括根、茎、叶、花、果等多种，生产中的生物逆境与非生物逆境频发，许多园艺作物以无性繁殖为主，这些都与表观遗传密切相关。挖掘园艺作物在生长发育、产品器官形成、高产优质、生物与非生物逆境抗性等重要农艺性状上的多层次表观调控因子，并解析其调控机制与调控网络，将为提高园艺作物产量和品质、增强环境适应性及抗逆能力、创制重要的基因和表观因子资源提供理论基础和新的思路与方法。

8.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

8.1.2.1 农田生态系统管理大模型构建

（1）研究意义

农田生态系统是保障全球粮食安全和生态平衡的核心单元，其健康运行对人类社会的可持续发展具有基础性作用。传统农田管理模式在面对粮食安全、气候变化、资源短缺等全球性挑战时，难以全面把握作物生产、环境变化和资源利用之间的复杂耦合关系。随着遥感、传感网络和大数据技术的快速发展，农田生态系统管理大模型被提出并逐步构建。其核心是通过融合多源异构数据，并结合机理模型和人工智能，形成可解释、可推演的农田生态系统管理数字孪生体，最终实现农田管理的精准化、智能化和可持续化。大模型能够整合与解析来源多样、结构各异的多尺度海量数据，构建数字化的“虚拟农田”信息底座，利用人工智能，挖掘这些数据背后隐藏的复杂非线性关系，并将机理模型作为内核框架，描述农田生态过程的内在规律，精准地模拟和预测农田生态系统的动态响应，做出合理的管理决策。与传统管理模式相比，大模型具有更强的泛化能

力和可扩展性，不仅能在区域和全球尺度上揭示农业与环境之间的反馈关系，还能挖掘潜在的优化路径。农田生态系统管理大模型的建立与应用，不仅是农业数字化和智能化发展的里程碑，也是应对气候变化与粮食安全双重挑战的重要战略工具。

（2）研究现状

现代农业可持续发展对粮食安全、资源利用效率和生态环境保护提出了更高要求。然而，农田生态系统本身是作物、土壤、气候、微生物以及人类管理措施共同作用的复杂生态网络，过程高度动态且受多重不确定性影响。传统依赖经验或单一机理模型的管理方式，在刻画非线性耦合关系与跨尺度动态方面存在明显不足，难以同时兼顾农业生产力与生态效益的提升。这种局限性逐渐成为制约现代农业转型升级的关键瓶颈。随着多源数据获取与计算能力的提升，农田生态系统管理大模型在近年取得了快速进展。尤其是在数据同化、多模态融合和智能决策方面，大模型展现出前所未有的潜力。研究者通过集成卫星、无人机与地面传感器观测，实现了作物叶面积指数、土壤水分和地上生物量等关键变量的高精度动态监测，并成功将这些信息纳入模型更新过程，从而显著提高了农田系统状态估算与过程模拟的准确性。

在建模方法上，机理模型与深度学习的融合成为最新的研究趋势。部分工作通过将作物生理与土壤水文过程嵌入神经网络架构中，形成了兼具可解释性与预测精度的混合模型；另一些研究则利用图神经网络和注意力机制刻画农田系统中的复杂空间异质性与跨时空依赖关系，有效突破了传统模型在尺度拓展和非线性表征方面的局限。与此同时，数字孪生农田概念逐渐落地，以大模型为核心的虚拟-现实耦合系统已用于指导水肥调控、病虫害预测和碳循环评估等多元场景，为精准农业提供智能化解决方案。值得注意的是，大模型在区域与全球尺度的应用也迈出了实质性步伐。基于大规模遥感与气候资料的多任务模型已实现跨区域作物产量预测和农业环境效应评估，为宏观层面的粮食安全与气候变化应对提供科学支撑。同时，部分研究探索了大模型与政策模拟的结合，尝试评估不同管理措施或减排策略对农业生态系统的长期影响。例如华为与西北农林科技大学联合开发的“九壤耘星”、中国移动的“万象耕耘”等农业大模型平台。这些平台不仅提供预测功能，还支持智能问答、农情预警、自主决策等多样化服务，推动技术从“单点应用”走向“全面赋能”。这些成果表明，农田生态系统管理大模型正在从单点应用走向系统化、智能化与决策化的新阶段。

（3）未来研究方向与创新点

为进一步提升农田生态系统的预测、调控与优化能力，拓展大模型在农业可持续发展中的应用范围，农田生态系统管理大模型的技术潜力需从以下 5 个方向进一步强化：① 空-天-地一体化数据的跨模态对齐与标准化处理将成为基础。通过融合遥感、气象、土壤、农机作业等多源数据，构建高质量的农业数据资源体系，提升大模型对复杂农田系统的表征能力，为模型训练提供数据基础。② 物理信息机器学习、轻量化与边缘智能技术将成为技术主流。高性能计算与模型架构优化，突破大规模时空数据处理与模型推理的算力瓶颈，为农田大模型的高效运行提供技术先决条件；可解释人工智能与知识注入的持续发展，实现对模型推理过程的透明化与机理增强，提升预测结果的可靠性与科学性。③ 技术范式从“单点模型”转向“平台生态”，开源平台将

聚合数据、算法与算力，形成多方共建的应用生态。④ 交互方式从“被动分析”升级为“主动智能体”，模型能够自主规划农事并调度农机执行任务，实现全流程自动化。⑤ 应用场景从“大田生产”延伸至“全产业链”，覆盖供应链、碳交易、保险等领域。

在“农田生态系统管理大模型构建”工程研究前沿的核心论文主要产出国家方面，中国处于绝对领先地位，核心论文有 19 篇，占比 100.00%；美国和新加坡分别以 4 篇（21.05%）和 3 篇（15.79%）位列第二、三位（表 8.3）。从论文影响力来看，澳大利亚和丹麦虽然各只有 1 篇核心论文，但篇均被引频次均达到 733.00，发文质量较高。中国核心论文的平均出版年为 2022.1，表明该研究方向在中国较为新颖且处于活跃状态。在主要产出机构方面，苏州大学和南通大学各产出 6 篇核心论文，并列首位；中国科学技术大学虽仅有 4 篇核心论文，但被引频次高达 1 692 次，篇均被引频次达 423.00，显示出极高的研究质量；湖南大学虽然只有 2 篇核心论文，但篇均被引频次达 470.00，研究成果影响力显著（表 8.4）。国际合作方面，国家间和机构间均存在一定的研究合作（图 8.1 和图 8.2），表明该研究领域具有明显的国际化合作特征。从研究影响力来看，在施引核心论文的主要产出国家中，中国以 1 219 篇（69.66%）的绝对优势位居首位，美国和澳大利亚分别以 131 篇（7.49%）和 101 篇（5.77%）位列第二、三位（表 8.5）；机构方面，中国农业科学院以 236 篇施引核心论文（30.81%）居于首位，中国科学技术大学（95 篇，12.40%）

表 8.3 “农田生态系统管理大模型构建”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	19	100.00	3 271	172.16	2022.1
2	美国	4	21.05	1 366	341.50	2020.8
3	新加坡	3	15.79	833	277.67	2021.7
4	澳大利亚	1	5.26	733	733.00	2020.0
5	丹麦	1	5.26	733	733.00	2020.0

表 8.4 “农田生态系统管理大模型构建”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	苏州大学	6	31.58	640	106.67	2022.0
2	南通大学	6	31.58	532	88.67	2022.7
3	中国科学技术大学	4	21.05	1 692	423.00	2021.5
4	哈尔滨工业大学	3	15.79	833	277.67	2021.7
5	南洋理工大学	3	15.79	833	277.67	2021.7
6	南京大学	3	15.79	493	164.33	2022.0
7	湖南大学	2	10.53	940	470.00	2021.5
8	得克萨斯大学奥斯汀分校	2	10.53	752	376.00	2021.5
9	电子科技大学	2	10.53	258	129.00	2022.5
10	天津大学	2	10.53	237	118.50	2022.0

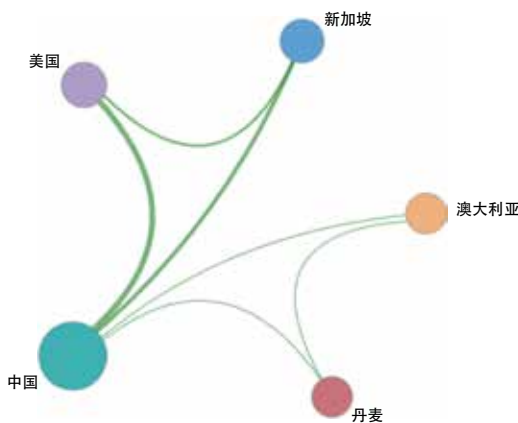


图 8.1 “农田生态系统管理大模型构建”工程研究前沿主要国家间的合作网络

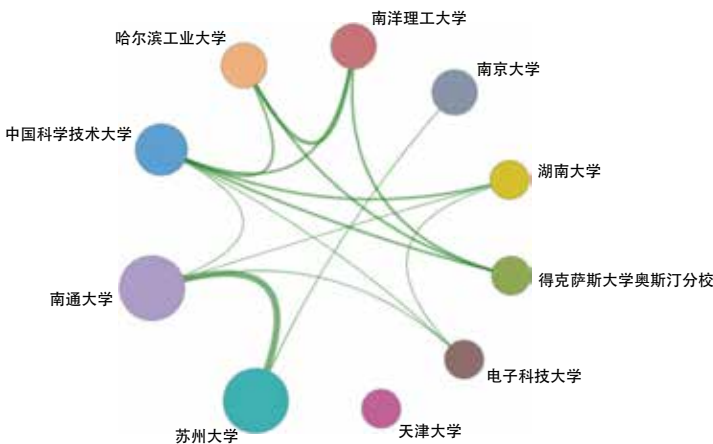


图 8.2 “农田生态系统管理大模型构建”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 8.5 “农田生态系统管理大模型构建”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 219	69.66	2023.4
2	美国	131	7.49	2022.9
3	澳大利亚	101	5.77	2023.3
4	新加坡	49	2.80	2023.1
5	加拿大	44	2.51	2023.0
6	德国	42	2.40	2023.2
7	英国	40	2.29	2023.2
8	韩国	40	2.29	2023.0
9	印度	36	2.06	2023.4
10	日本	28	1.60	2023.0

和湖南大学（70 篇，9.14%）分列第二、三位（表 8.6），显示出中国研究机构在该领域的强劲实力和活跃度；平均施引年均在 2023 年左右，表明该研究前沿正处于快速发展和高度关注阶段。图 8.3 为“农田生态系统管理大模型构建”工程研究前沿的发展路线。

表 8.6 “农田生态系统管理大模型构建”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国农业科学院	236	30.81	2023.3
2	中国科学技术大学	95	12.40	2023.0
3	湖南大学	70	9.14	2023.3
4	天津大学	64	8.36	2023.0
5	苏州大学	61	7.96	2023.3
6	南通大学	53	6.92	2023.4
7	清华大学	52	6.79	2023.2
8	电子科技大学	38	4.96	2023.5
9	北京化工大学	34	4.44	2023.5
10	南洋理工大学	32	4.18	2023.0

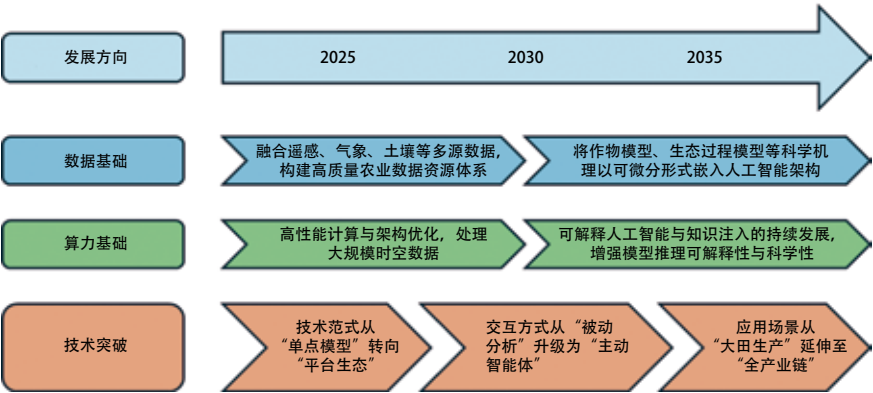


图 8.3 “农田生态系统管理大模型构建”工程研究前沿的发展路线

8.1.2.2 畜禽消化生理与饲料养分互作机制

“畜禽消化生理与饲料养分互作机制”是动物营养学与畜牧工程领域的核心研究方向，旨在系统揭示动物消化系统如何与饲料养分发生动态、精细的相互作用，并影响养分的消化、吸收、代谢及整体生产性能。该领域从传统的“黑箱式”表观消化研究，逐步发展为多学科交叉的系统科学，聚焦于动物－饲料－微生物互作网络，是实现精准营养与绿色养殖的重要科学基础。发展历程经历了从整体观测到机制解析的演变。早期研究主要关注饲料表观消化率与动物生长性能的宏观关系。随着分子生物学、微生物组学和代谢组学等技术的发展，研究进入微观机制探索阶段，开始揭示饲料养分如何影响肠道菌群结构、黏膜免疫及代谢调控信号通路。当前，

研究已进入多组学整合与大数据驱动时代，利用体外模拟系统、类器官模型和人工智能等手段，在细胞和分子水平深入阐释互作机理，推动营养策略从“粗放通用”向“动态精准”跨越。该研究的重要性尤为突出。在资源与环境约束日益严峻的背景下，提高饲料利用效率可直接减少氮、磷排放，降低环境污染，推动畜牧业可持续发展。同时，通过营养手段调控肠道健康，可减少抗生素使用，改善动物福利，保障动物源性食品安全。此外，该机制的研究是实现精准饲喂、节能降耗、提升产业效益的核心科技支撑。主要研究方向包括：① 肠道微生物与宿主互作机制，重点研究功能性饲料组分对菌群结构及动物生理机能的调控作用；② 养分感知与代谢调控通路，探索营养素如何通过生理信号轴影响养分分配与利用；③ 肠黏膜屏障功能与营养干预，研究氨基酸、脂肪酸等对肠道完整性、免疫调节的作用机制；④ 智能化营养模型开发，整合动物基因型、生理阶段、环境参数和饲料营养养分，构建精准预测与决策系统，实现营养供给的动态优化。该领域的研究不仅具有重要理论价值，更是推动畜牧业走向精准化、绿色化和高值化的关键技术路径，对未来动物农业转型升级具有重要意义。

“畜禽消化生理与饲料养分互作机制”相关核心论文的主要产出国家如表 8.7 所示。美国排名第一，拥有 20 篇核心论文，占 32.79%；中国排名第二，有 15 篇，占 24.59%；英国排名第三，有 8 篇，占 13.11%；其他国家如加拿大、意大利、瑞士分别有 7、5、4 篇核心论文。在主要产出机构方面，美国北卡罗来纳州立大学以 5 篇核心论文产出位居第一，占 8.20%，其次是帝斯曼－芬美意公司（3 篇，占 4.92%）；加拿大阿尔伯塔大学排名第三，有 2 篇，占 3.28%（表 8.8）。国家间的研究合作较为普遍，以美国与英国、瑞士之间合作相对紧密，中国则与加拿大、美国合作较多（图 8.4）。各主要机构间的合作网络如图 8.5 所示，以帝斯曼－芬美意公司与中国科学院、加拿大农业及农业食品部、墨尔本大学为主。施引核心论文的主要产出国家见表 8.9，施引核心论文数排名前三位是中国、美国和加拿大，其中，中国占 35.87%，美国占为 20.65%。施引论文的主要产出机构见表 8.10，施引核心论文数排名前三位是佐治亚大学、中国农业大学和中国农业科学院，分别占 12.17%、12.03% 和 12.03%。

表 8.7 “畜禽消化生理与饲料养分互作机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	20	32.79	1 577	78.85	2020.5
2	中国	15	24.59	911	60.73	2020.5
3	英国	8	13.11	352	44.00	2020.0
4	加拿大	7	11.48	449	64.14	2020.1
5	意大利	5	8.20	241	48.20	2020.6
6	瑞士	4	6.56	290	72.50	2019.8
7	法国	3	4.92	260	86.67	2020.0
8	西班牙	3	4.92	202	67.33	2020.3
9	韩国	3	4.92	179	59.67	2020.7
10	德国	3	4.92	137	45.67	2019.3

表 8.8 “畜禽消化生理与饲料养分互作机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	北卡罗来纳州立大学	5	8.20	317	63.40	2020.6
2	帝斯曼 – 芬美意公司	3	4.92	227	75.67	2020.0
3	阿尔伯塔大学	2	3.28	244	122.00	2020.5
4	墨尔本大学	2	3.28	227	113.50	2019.5
5	美国农业部农业研究服务局	2	3.28	156	78.00	2020.5
6	巴塞罗那自治大学	2	3.28	151	75.50	2020.5
7	中国科学院	2	3.28	129	64.50	2021.0
8	加拿大农业及农业食品部	2	3.28	127	63.50	2021.0
9	浙江大学	2	3.28	127	63.50	2022.0
10	哈珀亚当斯大学	2	3.28	110	55.00	2019.5

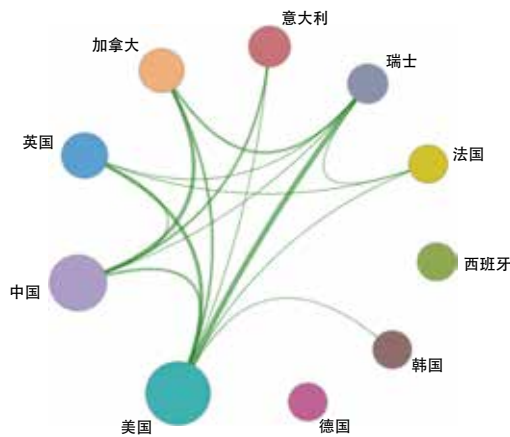


图 8.4 “畜禽消化生理与饲料养分互作机制”工程研究前沿主要国家间的合作网络

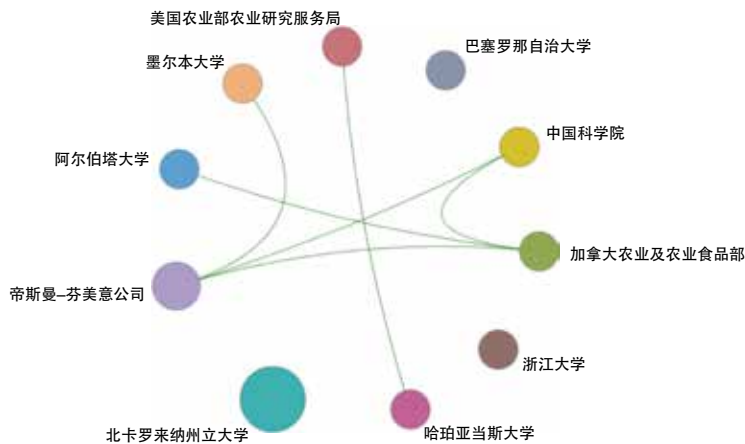


图 8.5 “畜禽消化生理与饲料养分互作机制”工程研究前沿主要机构间的合作网络



表 8.9 “畜禽消化生理与饲料养分互作机制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 018	35.87	2023.0
2	美国	586	20.65	2022.7
3	加拿大	170	5.99	2022.5
4	巴西	153	5.39	2022.9
5	英国	151	5.32	2022.5
6	澳大利亚	138	4.86	2022.5
7	韩国	135	4.76	2022.8
8	意大利	129	4.55	2022.7
9	埃及	124	4.37	2022.9
10	德国	124	4.37	2022.4

表 8.10 “畜禽消化生理与饲料养分互作机制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	佐治亚大学	88	12.17	2023.0
2	中国农业大学	87	12.03	2022.8
3	中国农业科学院	87	12.03	2022.7
4	北卡罗来纳州立大学	81	11.20	2022.7
5	中国科学院	66	9.13	2022.7
6	四川农业大学	63	8.71	2022.8
7	美国农业部农业研究服务局	62	8.58	2022.6
8	南京农业大学	51	7.05	2022.8
9	圭尔夫大学	49	6.78	2021.9
10	西北农林科技大学	45	6.22	2022.9

图 8.6 为“畜禽消化生理与饲料养分互作机制”工程研究前沿的发展路线。未来 5~10 年工程开发前沿将突破传统营养学框架，迈向精准化、系统化与智能化的高度融合。其核心畜禽的精准营养需求及养分，并利用这些机制知识进行主动、精准的工程化干预，最终驱动畜牧业的产业升级。重点发展方向将集中于以下层面：

1) 畜禽精准营养需求与饲料养分高效利用机制：重点解析不同畜禽品种、生理阶段及养殖环境下动态营养需要量的精准参数，阐明常规与非常规饲料原料的养分消化动力学特征及供给效能，系统研究畜禽生理需求与饲料组分之间的互作机制。

2) 智能数字模型驱动精准饲喂系统：融合多组学数据与人工智能技术，构建可模拟畜禽消化代谢全过程的“数字动物”模型，实现对个体营养需求的动态预测与配方优化。依托智能感知与物联网系统，实时监测动物生理状态并自动调整饲喂策略，形成“感知—决策—执行”闭环，最终实现从群体营养到个体定制、从静态供给到动态响应的饲喂变革。

3) 靶向功能性添加剂的理性设计与应用: 基于肠道微生态与养分互作机制的深度解析, 运用合成生物学、精准发酵等先进生物制造技术, 定向开发可特异性改善肠道健康、增强消化吸收效率的新一代功能性添加剂, 实现对饲料养分利用效率的精准提升。



图 8.6 “畜禽消化生理与饲料养分互作机制”工程研究前沿的发展路线

总而言之, 未来 5~10 年, “畜禽消化生理与饲料养分互作机制”的工程研究将是一个由精准方向引领、融合技术驱动并最终在产业层面实现价值重塑的完整链条, 必将推动畜牧业进入一个高效、绿色、智能的新时代。

8.1.2.3 水产动物重要性状形成的遗传解析

(1) 研究意义

水产动物重要性状形成的遗传解析对推动现代水产种业的发展具有重要意义。水产动物的主要经济性性状, 如生长速度、繁殖能力、抗病性以及肉质风味等, 直接影响养殖效益和 market 价值。而这些性状的形成, 既受到自然选择的长期影响, 也受到人工选择和养殖环境的调控, 其背后的遗传基础十分复杂。通过遗传解析, 可以系统揭示关键性状相关的基因及调控网络, 阐明性状表达的分子机制和遗传规律, 为精准育种提供科学依据。同时, 水产动物重要性状形成的遗传解析研究有助于建立高价值水产动物的基因资源库, 实现优良种质的保护与合理利用, 避免遗传多样性的丧失。此外, 基于遗传解析的育种策略能够显著提高育种效率和精准度, 缩短选育周期, 优化种群结构, 从而推动水产养殖生产的可持续发展。在全球水产品需求持续增长的背景下, 这类研究不仅能够保障水产品稳定供给, 还能够提升产业整体竞争力和经济效益, 为水产行业的现代化和高质量发展提供坚实的科学支撑和技术保障。

(2) 研究现状

近年来, 水产动物重要性状形成的遗传解析研究不断取得重要进展, 成为现代水产种业和养殖业发展的核心科技支撑。随着高通量基因组测序、转录组测序、表观遗传学以及单细胞组学等多种组学技术的广泛应用, 水产动物的生长速度、繁殖能力、抗病力、耐逆性以及肉质风味等核心经济性状的遗传基础逐渐被系统揭示。通过对这些性状背后的基因组信息进行解析, 研究者能够明确关键基因、调控网络和数量性状基因座 (QTL), 从而为精准育种和高效选育提供科学依据。在国内研究方面, 中国水产科学研究院、上海海洋大学、华中农业大学等科研单位先后完成了多种重要养殖鱼类的高质量基因组测序, 构建了高密度分子标记图谱, 为后续分子标记辅助选择 (MAS) 和基

基因组选择 (GS) 提供了坚实基础。同时, 研究团队通过关联分析、全基因组关联分析 (GWAS) 以及基因功能验证, 鉴定出与快速生长、抗病力、耐逆性及肉质品质相关的候选基因和关键 QTL。这些成果不仅为传统育种提供了分子工具, 还为新品种选育和优质种质资源的开发提供了理论依据与技术支持。与此同时, 转录组学、单细胞测序、表观遗传学以及基因调控网络分析等新兴技术的应用, 使研究者能够从不同层次解析性状形成的分子调控机制。例如, 通过转录组学研究可以揭示生长、免疫和代谢相关基因的表达模式; 通过单细胞测序技术可以分析不同细胞类型在性状形成过程中的作用; 表观遗传学研究则揭示了 DNA 甲基化、组蛋白修饰等对性状表达的调控效应。这些研究进一步深化了对水产动物性状形成机理的理解, 为精准育种提供了更加全面的分子依据。在国际上, 多个研究团队已在罗非鱼、大西洋鲑、鳟鱼以及对虾等物种中建立了基因组选择体系, 并将其应用于商业化育种实践。通过将基因组信息与表型数据结合, 育种者能够在早期阶段预测个体性状表现, 从而显著提高选育效率和准确性。这不仅缩短了育种周期, 还减少了资源投入, 为产业化生产提供了可操作的技术路径。

总体来看, 水产动物重要性状的遗传解析研究取得的成果, 不仅丰富了对性状形成分子机制的科学认识, 也为现代水产种业的技术革新提供了重要支撑。通过分子标记辅助选择和基因组选择, 研究者能够高效培育出生长快、抗病强、耐逆性高、肉质优良的新品种, 从而推动水产养殖业的高质量发展。随着组学技术的不断进步和大数据分析能力的提升, 未来水产动物遗传解析将更加精准和高效, 预计将在种质创新、产业优化和可持续养殖方面发挥更加重要的作用, 为保障水产品供给、提升产业竞争力以及推进水产种业现代化提供坚实的理论与技术保障。

(3) 未来研究方向与创新点

未来水产动物重要性状形成的遗传解析研究将主要集中在以下方向: ① 深入解析生长、繁殖、抗病、耐逆和肉质等核心性状的遗传基础, 揭示关键基因与调控网络, 为分子设计育种奠定理论依据; ② 加强野生种质和地方品种资源的收集、保护与遗传鉴定, 发掘优异性状基因, 拓展育种的遗传多样性; ③ 建立水产动物多组学联合分析平台, 整合基因组、转录组、蛋白质组和代谢组数据, 精准解析性状形成的分子机制; ④ 发展高通量表型鉴定与环境因子监测技术, 实现性状与环境互作的系统解析; ⑤ 推进精准育种体系建设, 将基因组选择、分子标记辅助选择与智能化养殖环境结合, 加快优良品种的培育与推广。

在“水产动物重要性状形成的遗传解析”工程研究前沿的核心论文主要产出国家方面, 核心论文数排名前三位的是中国 (占 79.71%)、挪威 (占 7.25%) 和美国 (占 7.25%) (表 8.11)。该前沿核心论文的篇均被引频次分布在 2.40~65.00 之间, 其中法国、芬兰和丹麦的篇均被引频次均超过了 50。在主要产出机构方面, 中国水产科学研究院、上海海洋大学、青岛海洋科学与技术试点国家实验室的核心论文数及被引频次较高 (表 8.12)。在国家间的合作网络方面, 国家间的研究合作较为普遍, 以中国、美国、挪威、菲律宾之间合作相对更紧密 (图 8.7)。在机构间的合作网络方面, 各机构间均存在一定的合作关系 (图 8.8)。施引核心论文的主要产出国家有中国、美国和加拿大等, 中国占比超过 1/3, 美国占比为 9.43% (表 8.13)。在施引核心论文的主要产出机构方面, 中国水产科学研究院、上海海洋大学、中国科学院的施引论文量排在前三位 (表 8.14)。图 8.9 为“水产动物重要性状形成的遗传解析”工程研究前沿的发展路线。

表 8.11 “水产动物重要性状形成的遗传解析”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	55	79.71	556	10.11	2022.0
2	挪威	5	7.25	167	33.40	2021.6
3	美国	5	7.25	12	2.40	2023.6
4	加拿大	4	5.80	97	24.25	2021.5
5	澳大利亚	4	5.80	44	11.00	2022.0
6	菲律宾	3	4.35	78	26.00	2019.3
7	法国	2	2.90	121	60.50	2021.0
8	泰国	2	2.90	11	5.50	2023.0
9	芬兰	1	1.45	65	65.00	2021.0
10	丹麦	1	1.45	54	54.00	2020.0

表 8.12 “水产动物重要性状形成的遗传解析”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国水产科学研究院	25	36.23	109	4.36	2022.3
2	上海海洋大学	10	14.49	40	4.00	2022.3
3	青岛海洋科学与技术试点国家实验室	7	10.14	62	8.86	2021.1
4	中国科学院	5	7.25	115	23.00	2021.8
5	中国农业科学院	5	7.25	95	19.00	2020.0
6	厦门大学	4	5.80	60	15.00	2022.8
7	中国海洋大学	4	5.80	60	15.00	2020.8
8	国际水稻研究所	3	4.35	78	26.00	2019.3
9	南京农业大学	3	4.35	36	12.00	2022.7
10	西南大学	3	4.35	31	10.33	2023.0

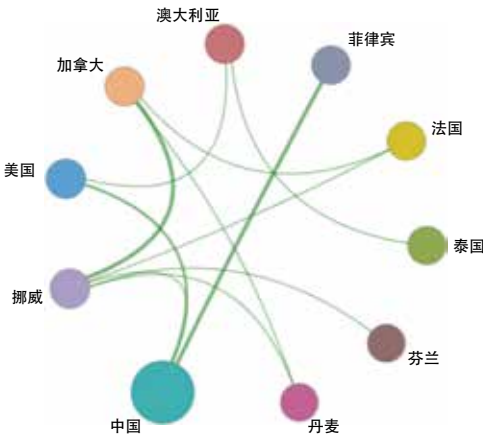


图 8.7 “水产动物重要性状形成的遗传解析”工程研究前沿主要国家间的合作网络

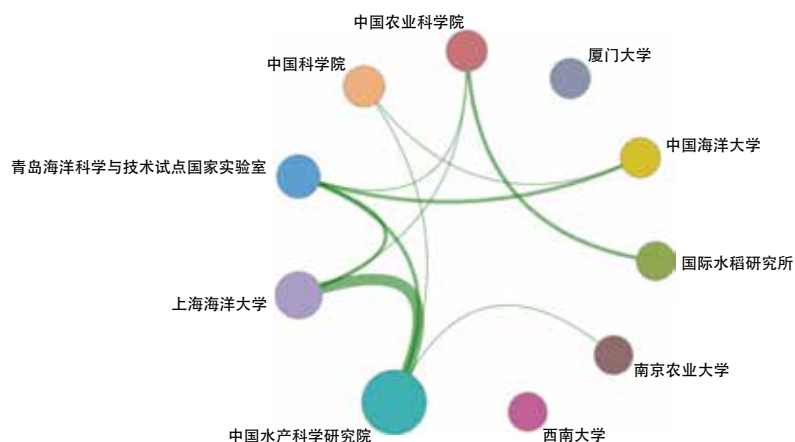


图 8.8 “水产动物重要性状形成的遗传解析”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 8.13 “水产动物重要性状形成的遗传解析”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	359	41.79	2023.0
2	美国	81	9.43	2022.8
3	加拿大	63	7.33	2022.6
4	法国	59	6.87	2022.7
5	挪威	58	6.75	2022.9
6	英国	45	5.24	2022.6
7	意大利	42	4.89	2022.5
8	西班牙	42	4.89	2022.6
9	澳大利亚	42	4.89	2022.5
10	芬兰	41	4.77	2022.9

表 8.14 “水产动物重要性状形成的遗传解析”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国水产科学研究院	76	21.23	2023.2
2	上海海洋大学	45	12.57	2023.2
3	中国科学院	44	12.29	2022.9
4	中国海洋大学	34	9.50	2023.1
5	蒙彼利埃大学	32	8.94	2022.2
6	赫尔辛基大学	29	8.10	2022.9
7	青岛海洋科学与技术试点国家实验室	28	7.82	2022.6
8	马来西亚登嘉楼大学	20	5.59	2022.2
9	厦门大学	17	4.75	2023.2
10	汕头大学	17	4.75	2022.2



图 8.9 “水产动物重要性状形成的遗传解析”工程研究前沿的发展路线

8.2 工程开发前沿

8.2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势

农业领域的 Top 11 工程开发前沿集中体现了现代农业向智能化、绿色化和高值化转型的强劲趋势，其研发焦点紧密围绕人工智能深度赋能、资源高效利用与可持续发展、动物健康与食品安全保障三大方向展开。根据核心专利数据统计分析，这些前沿在近年的技术开发活跃度、影响力及国际合作态势呈现出显著差异。① 人工智能赋能农业智能化的前沿主要包括“基于人工智能的作物养分精准管理”“动物疫病智能诊断、监测与预警”和“多模态自适应具身智能农机技术与装备”。这些方向深度融合了传感技术、大数据、物联网与智能决策算法，致力于实现农业生产的精准化、自动化和自主化。其中，“基于人工智能的作物养分精准管理”核心专利公开量达 115 件，中国以 65 件（56.52%）占据领先地位，且被引数占比高达 82.22%，表明中国在该方向不仅研发活跃，技术成果影响力也尤为突出。② 绿色高效农业技术的前沿涵盖“粮食作物多熟栽培周年光温高效工程”“高性能木质素基绿色胶黏剂精准合成与应用”“设施-农机-农艺融合的设施园艺生产技术”和“作物品种分子设计与智造”。这些技术共同聚焦资源节约、循环利用、生态低碳和高光效生产，旨在突破资源约束、实现农业系统增效减排。其中，“作物品种分子设计与智造”的国际竞争态势鲜明，美国的核心专利公开量为 60 件（47.24%），新西兰虽仅 21 件，但其篇均被引数高达 102.24，显示出极高的影响力；中国在该方向的专利公开量仅 7 件，仍处于追赶阶段。③ 动物健康与食品安全工程前沿包括“畜禽重大疫病抗性品种培育”“畜产品品质提升的饲料营养调控技术”“基于生物化学的农药快速检测技术开发”和“水产动物疫病的快速准确检测技术”，着眼于从源头至餐桌的全链条安全与品质提升。其中，“畜禽重大疫病抗性品种培育”核心专利公开量达 103 件，中国占 88 件（85.44%），占据绝对优势，被引集中度也较高，显示出中国在该方向的强烈研发投入与产出主导地位。农业领域各工程开发前沿核心专利情况如表 8.15 和表 8.16 所示。

从总体态势看，人工智能与大数据技术在农业中的应用已成为最具活力和影响力的创新增长点，中国在智慧农业部分方向已形成规模优势，但在原始创新和关键核心技术（如分子设计育种）上仍与发达国家存在差距。绿色高效类前沿强调多学科交叉与系统集成，正推动农业从传统资源消耗型向智能绿色可持续模式转变。动物与食品安全类前沿则强调整合基因编辑、智能监测与绿



表 8.15 农业领域 Top 11 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用数	平均被引数	平均公开年
1	畜禽重大疫病抗性品种培育	103	128	1.24	2022.1
2	基于人工智能的作物养分精准管理	115	90	0.78	2023.9
3	作物品种分子设计与智造	127	5 409	42.59	2021.5
4	动物疫病智能诊断、监测与预警	84	818	9.74	2022.4
5	畜产品品质提升的饲料营养调控技术	1 069	974	0.91	2021.1
6	粮食作物多熟栽培周年光温高效工程	176	251	1.43	2021.2
7	基于生物化学的农药快速检测技术开发	64	53	0.83	2022.0
8	水产动物疫病的快速准确检测技术	27	124	4.59	2023.3
9	设施－农机－农艺融合的设施园艺生产技术	232	235	1.01	2021.9
10	多模态自适应具身智能农机技术与装备	34	65	1.91	2023.5
11	高性能木质素基绿色胶黏剂精准合成与应用	1 364	6 366	4.67	2021.9

表 8.16 农业领域 Top 11 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	畜禽重大疫病抗性品种培育	12	10	6	27	22	26
2	基于人工智能的作物养分精准管理	0	0	0	0	15	100
3	作物品种分子设计与智造	23	17	16	30	22	19
4	动物疫病智能诊断、监测与预警	3	7	9	18	30	17
5	畜产品品质提升的饲料营养调控技术	294	203	159	119	139	155
6	粮食作物多熟栽培周年光温高效工程	44	24	36	27	22	23
7	基于生物化学的农药快速检测技术开发	9	9	2	14	14	16
8	水产动物疫病的快速准确检测技术	0	0	2	2	9	14
9	设施－农机－农艺融合的设施园艺生产技术	17	41	41	44	39	50
10	多模态自适应具身智能农机技术与装备	0	1	3	1	3	26
11	高性能木质素基绿色胶黏剂精准合成与应用	145	178	246	205	270	320

色材料等技术，实现疫病防控、营养调控与安全检测的精准化、工程化。

国际合作网络分析表明，欧美国家在分子育种、智能算法等领域仍处引领地位，并已形成较稳定的合作集群；中国虽专利总量占优，但跨国合作广度仍有待加强，尤其在高端装备、生物智造等前沿领域。未来，这些工程开发前沿将进一步融合系统生物学、人工智能、先进制造与生态学原理，推动农业系统实现“资源－环境－食品－健康”的多元协同优化，为构建安全、高效、韧性和可持续的全球农业系统提供核心动力。

（1）畜禽重大疫病抗性品种培育

畜禽重大疫病抗性品种培育是指依托现代遗传育种技术，定向选育对非洲猪瘟、高致病性禽流感、布病等重大疫病具有先天遗传抵抗力的畜禽新品种（系），核心目标是从根本上降低感染风险和疫病传播，筑牢畜牧业生物安全防线，支撑产业可持续发展。近年来，我国高度重视动物抗病性状基础研究，发现了一批重要抗病基因并创制多种抗病育种新材料，但仍存在各种问题，例如：重大疫病抗性种质的抗病特性鉴定缺乏系统性评价标准，重大疫病抗病性状遗传调控机制解析缺乏特异性，重大疫病抗性品种选育进程滞后，创制的抗病畜禽育种新材料缺乏商业化应用检验。针对上述问题，亟须综合运用感染免疫学、群体遗传学、比较基因组学和分子生物学，针对畜禽黏膜免疫、固有免疫和体液免疫等重要免疫系统进行多组学（转录组、表观组、蛋白组等）联合分析，整合免疫系统组织多组学数据，系统挖掘影响病原微生物与宿主细胞互作、受体识别、免疫逃逸、病原微生物清除、细胞死亡方式等病原微生物致病机制的抗性关键基因和调控元件。设计高效基因编辑技术体系，综合基因工程和胚胎工程技术创制基因编辑畜禽新种质，在群体水平系统开展抗病能力、生物安全和育种价值评估，在保障遗传多样性的前提下，实现抗病育种从“被动应对”到“主动设计”的跨越，为应对新发突发疫病提供核心种源支撑。

（2）基于人工智能的作物养分精准管理

养分管理是保障作物高产和农业可持续发展的关键环节。传统施肥模式依赖经验与静态推荐，忽视土壤空间异质性和作物个体差异，导致肥料利用率低下，并加剧养分流失与环境负担。在资源约束与绿色转型的双重压力下，这一模式已难以满足现代农业的发展需求。人工智能的兴起为养分管理开辟了新路径。依托土壤与肥料大数据，结合机器学习和深度模型，可以构建作物生长与养分吸收的复杂映射，实现从田块尺度到单株层面的精准诊断与预测。更重要的是，人工智能能够贯穿作物全生育期，对养分供需进行动态监测与调控，分析预测缺素与病虫害发生风险，结合数字孪生模拟不同养分管理方案的产量与品质效应，并与智能农机装备联动，形成实时感知—智能决策—精准执行的闭环体系。未来，人工智能将推动作物养分管理从经验驱动走向数字驱动与智能驱动，从粗放施肥转向动态调控，从单一产量目标拓展至产量、品质与生态环境的系统优化。这不仅有助于显著提升肥料利用效率和作物生产力，更将为农业绿色发展和保障粮食安全提供重要战略支撑。

（3）作物品种分子设计与智造

作物品种分子设计与智造是指利用分子生物学、基因组学和合成生物学等先进技术，对作物遗传基础进行精准设计和高效构建，从而创造出具备理想农艺性状的新品种。这一概念源于传统育种的局限性，传统育种主要依赖自然变异和人工选择，周期长、效率低、随机性强，无法满足现代农业对高产、抗逆、优质作物的迫切需求。随着基因组测序技术的飞速发展，科学家们能够深入解析作物基因组结构、功能基因网络和调控机制，实现从分子水平对品种的“定制化”设计。具体而言，这一过程包括3个核心环节：首先，通过多组学分析（如基因组学、转录组学和代谢组学）解析控制产量、抗病、耐旱等关键性状的基因网络和遗传变异；其次，利用人工智能和大数据平台进行虚拟模拟和优化设计，构建理想品种的“蓝图”，如通过算法

预测基因组合的最优效果；最后，借助基因编辑工具或合成生物学方法，实现基因组的精准改造和快速组装，高效“制造”出新品种。这种方法大大缩短了育种周期，从传统方法的 10~15 年压缩至几年甚至几个月，同时保留了遗传多样性，避免了传统杂交中遗传基础的狭窄化。目前，主要技术方向聚焦于智能育种平台的构建，包括高通量基因型鉴定、机器学习辅助性状预测，以及基因回路设计合成。例如，在水稻和小麦等主要作物上，已成功设计出抗逆品种，提高了产量和资源利用效率。发展趋势方面，随着人工智能和量子计算的融入，分子设计将更趋智能化和自动化，实现“从基因到田间”的全链条智造；同时，结合气候变化挑战，未来将强调可持续性，如开发固氮作物减少化肥使用，或增强光合效率的品种以提升碳汇能力。这一前沿技术对保障全球粮食安全、促进农业绿色转型具有战略意义，有望重塑作物育种范式，推动农业可持续发展。

（4）动物疫病智能诊断、监测与预警

动物疫病智能诊断、监测与预警是支撑现代畜牧业高质量发展、保障公共卫生安全的关键支撑方向，旨在实现对重大疫病的早期发现、快速诊断、精准监测和动态预警。传统诊断往往依赖实验室检测，周期长、成本高，难以满足突发疫情快速处置需求。随着分子生物学、传感技术和人工智能的发展，智能诊断与监测体系逐渐建立，可实现病原的灵敏、多重检测，并通过养殖环境监控、临床影像与多源数据采集，对动物群体健康开展连续跟踪。主要技术方向包括：① 新一代分子诊断与现场快检技术，如 CRISPR 诊断、纳米孔测序、芯片与微流控平台，实现对多种病原的灵敏、快速、多重检测；② 物联网与大数据驱动的监测体系，依托传感器、养殖场环境监控、移动终端采集等多源数据，实现对动物健康和环境中潜在病原的连续监测；③ 人工智能与机器学习模型的预警与预测，通过深度学习、图神经网络和地理信息系统（GIS）分析病原传播链条和空间动态，构建区域性与跨境疫情风险预警系统。未来，该领域将呈现三大趋势：一是诊断更加快速便捷，推动即时检测与智能化决策；二是监测更加连续全面，构建个体-群体-区域多层次健康画像；三是预警更加精准主动，通过数字孪生与 AI 建模实现对潜在疫情的精准预判和多场景模拟。随着标准化数据平台和跨部门协作的建立，智能诊断、监测与预警将为全球动物疫病防控和公共卫生安全提供重要支撑。

（5）畜产品品质提升的饲料营养调控技术

畜产品品质提升的饲料营养调控技术，本质上是将动物营养学的最新研究成果转化为实际的生产技术，通过精准、主动、系统地干预动物日粮配方，从而定向、高效、安全地塑造出具有更佳食用价值、营养功能和市场竞争力畜产品，是现代畜牧业实现高质量发展和产业升级的关键核心技术之一。目前亟须突破对优质肉、蛋、奶重要性状形成的理论认知局限，形成涉及饲料配方优化、功能性添加剂应用、精准饲喂管理等提升畜产品品质的营养调控技术与方案，改善畜产品的营养价值、感官品质和安全性。重点围绕 3 个方面开展研究：一是基于动物个体或群体的特定需求，通过科学调控营养素供给，以优化生产性能、健康水平和产品品质的技术体系；二是以营养素-代谢-表现遗传互作为研究思路，通过能量来源、脂肪酸组成、功能性添加剂协同优化，实现营养精准匹配，结合优质畜产品品牌营销，推动全产业链增值；三是通过能量重分配、氮代

谢优化和降低氧化应激,提高乳脂率和肌内脂肪含量、富集功能性成分、改善肉质安全性与风味等,提升畜产品品质,突破精准营养与功能畜产品开发关键技术,为我国优质肉、蛋、奶产品的生产提供技术方案。

(6) 粮食作物多熟栽培周年光温高效工程

粮食作物多熟栽培周年光温高效工程是指依据不同区域光温资源时空分布特征,通过优化熟制配置、作物品种精选与栽培技术的突破,实现多熟高效光合器官建成、产量形成期与最适光温关键期精准耦合,达成茬口高效衔接、多熟群体生产能力优化,大幅度提高作物光温日生产力,稳定提升单位面积周年总产的栽培工程。

我国耕地资源紧缺且区域光温差异显著,南部与中部地区光温充沛,具备一年两熟或三熟潜力,但传统多熟模式存在茬口衔接滞后、高效光合器官建成时机错位等问题,导致光温资源利用不充分;北部地区温度资源不足,多熟种植存在季节矛盾。长期以来,我国虽在复种指数提升上有很多探索,但对光温与作物生长关键期的匹配规律、多熟群体光温统筹利用机制研究薄弱,致使日生产能力偏低、总生产能力提升受限。在粮食需求刚性增长的新时期,开发周年多熟光温高效工程可破解“耕地有限、提产刚需”的矛盾,对保障国家粮食安全具有迫切现实意义。其核心科技问题主要有:①多熟高效光合器官统筹建成规律及调控;②多熟产量形成期与光温关键期的耦合机制;③日生产能力与周年总生产能力的协同提升;④多熟群体生产能力的光温适配调控;⑤多熟茬口高效衔接与光温持续周年统筹优化利用技术;⑥创新不同生态区光温高效栽培模式与实用技术体系。

通过粮食作物栽培学与农业气象学、信息学、机械工程等学科交叉融合探究,构建覆盖我国华南、华中及华北南部适应气候趋暖的多熟栽培周年光温高效技术体系,可实现周年光温利用效率提升15%以上,粮食周年总生产能力提升20%~30%,推动我国粮食生产从“季别光温利用”向“周年光温高效”转变,形成粮食产业新质生产力,为粮食安全提供重大工程技术支撑。

(7) 基于生物化学的农药快速检测技术开发

我国是农药生产与使用大国,农业生产中农药会通过直接或间接途径残留在谷物、果蔬以及土壤和水中,对人体健康和生态环境构成直接威胁。传统检测技术(如气相色谱法、液相色谱法)因操作复杂、检测周期长,难以满足大批量农产品的快速筛查需求。而基于生物化学的农药快速检测技术,如酶抑制法、免疫分析法,可在短时间内检测农产品中的农药残留。以胶体金免疫层析试纸条为例,利用金标抗体与农药抗原的特异性反应,通过观察试纸条上T线显色情况来判断农药残留是否超标,数分钟内即可出结果,大幅提升了检测效率,可及时拦截农残超标的农产品流入市场,守护消费者“舌尖上的安全”。农药种类多,结构差异大,理化性质各异,制备特异性、高亲和性的农药识别材料是快速检测技术的重要前提;目前的研究致力于开发新型生物识别元件、引入纳米材料和微流控等先进技术手段,不断提升检测性能和适用范围,智能手机读数和物联网技术的融入,正推动该技术向智能化、网络化方向发展,为构建从农业生产到食品消费的全链条质量安全监控体系提供了有力的技术支撑,对保障食品安全和促进农业可持续发展具有重要意义。

(8) 水产动物疫病的快速准确检测技术

水产动物疫病检测是保障水产养殖健康和产业安全的关键环节，其在水产养殖业的发展演变过程中发挥了重要作用，推动水产养殖健康可持续发展。传统的疫病检测方法主要依赖于形态学观察、组织病理学分析和常规培养鉴定，这些方法在早期防控中发挥了重要作用，但存在检测周期长、灵敏度低和难以早期发现等局限。究其本质，疫病检测的核心在于尽早、准确地识别病原，从而为防治提供科学依据。然而传统检测方式往往存在延迟，容易错失最佳防控窗口，导致疾病快速扩散，造成重大经济损失。随着分子生物学、免疫学及信息技术的发展，水产动物疫病的快速检测技术逐渐成熟并得到广泛应用。例如荧光定量聚合酶链反应（PCR）检测，可在数小时内高特异性鉴定病原；免疫学检测如酶联免疫吸附测定（ELISA）、胶体金试纸条，则可实现简便现场检测；近年来新兴的高通量测序、数字 PCR 和 CRISPR 靶向检测技术，能够同时实现多病原的精准识别和超高灵敏度检测，显著提高了检测效率和准确性。相较于传统检测方法，这些新型检测技术不仅缩短了检测时间，还能在病原学分子水平上实现更精确的定性和定量分析，对复杂病原混合感染和新发未知病原的发现尤为重要。在水产养殖规模化、集约化和全球化趋势下，疫病的传播风险和防控难度不断增加，快速准确的检测技术正成为疫病监测预警、防控决策和养殖管理的重要支撑。未来，结合人工智能、大数据和移动检测平台的多维融合，将进一步推动水产动物疫病检测走向智能化、现场化和实时化，为保障水产养殖业的可持续发展提供有力技术支撑。

(9) 设施—农机—农艺融合的设施园艺生产技术

设施园艺已成为我国国民经济和社会发展中的重要产业，在确保我国食物安全、提高人们生活质量、保障健康中国建设、促进农民增收和乡村振兴、助力现代农业发展、提升资源高效利用等方面作用突出。但我国设施园艺生产的机械化水平仍很低，加快设施园艺生产机械化进程是当前农业产业中的紧迫任务之一。基于“设施—农机—农艺”深度融合原则，建立设施蔬菜作物生产农艺、农机作业和设施建设融合的生产技术体系，是提高设施园艺生产机械化/轻简化栽培的基础。主要研究方向包括：日光温室和塑料大棚等设施结构的宜机化优化，方便机械进入与作业；分区域、分品种制定统一、科学的蔬菜种植农艺标准，明确不同蔬菜品种的行距、株距、播种深度、施肥量、灌溉量等关键参数，为机械化作业提供科学依据；研发适合设施作业的各类型机械装备，提高作业精度与质量；制定蔬菜机械化作业规范，明确农机的操作流程、作业质量要求和安全注意事项，确保机械化作业的高效、安全进行。

(10) 多模态自适应具身智能农机技术与装备

面对劳动力短缺与精细化农业需求，传统农机智能化升级成为农业现代化关键。传统农机缺乏对非结构化农田环境的认知与自主响应能力，作业效率、精度和适应性已难以满足智慧农业的发展需求。具身智能作为融合环境感知、信息认知、自主决策与运动控制于一体的智能机制，可为智能农机赋予环境适应性与自主决策能力，已成为推动下一代农业智能机器人发展的重要方向。多模态自适应具身智能农业技术与装备旨在创制“多模态感知—自主认知—精准执行—在线反馈”全闭环的智能农机系统，研究多模态传感器（视觉、激光雷达、光谱等）融合，

精准识别复杂农田环境下作物、土壤、障碍物等关键信息；研究人工智能算法自主决策作业路径规划等任务；研制自适应底盘和灵巧执行机构完成精准作业控制；通过农机本体与农田、农场环境进行动态交互，从中不断学习、调整和进化作业策略。多个具身智能农机构成一个能够自组织、自学习的“农场级智能集群”，实现全生产流程的自主化与最优化农事作业，已成为智慧农业、农业工程领域关注的焦点和研究热点。前沿相关研究成果将为我国智慧农业和无人农场的实现提供核心装备支撑，变革农业生产模式，对保障国家粮食安全、促进农业可持续发展具有重大战略意义。

（11）高性能木质素基绿色胶黏剂精准合成与应用

木质素是自然界中储量最丰富的天然酚类聚合物，主要来源于制浆造纸和生物质炼制过程的工业副产物。木质素基胶黏剂是指以工业木质素为主要原料制备的黏接材料，广泛应用于木/竹质复合材料、金属及塑料制品的黏接。目前主流技术路径是通过木质素部分替代苯酚，合成多组分共聚型胶黏剂，以降低生产成本、减少毒性并实现工业副产物的高值利用。为推动木质素资源的高效转化，开发高性能绿色木质素基胶黏剂已成为研究热点，其高性能集中体现在优良的黏接强度、耐水性及环境稳定性等方面。由于木质素分子富含苯环和醚键结构，但存在反应活性低、结构复杂与不均一等局限，通常需借助酚化、脱甲基化、羟甲基化等化学活化方法或物理改性手段，打破其天然惰性，暴露更多活性位点，增强共聚反应能力。精准合成策略则致力于在分子层面调控反应路径，例如通过催化断裂 β -O-4醚键生成活性酚羟基，或引入柔性链段以改善胶黏剂韧性与界面相容性，从而实现性能的可控提升。高性能木质素基绿色胶黏剂的精准合成与应用，对于推动林业剩余物的高值资源化利用以及开发环境友好型新材料具有重大的经济与环境效益。

8.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

8.2.2.1 畜禽重大疫病抗性品种培育

高致病性禽流感、非洲猪瘟等畜禽重大疫病，以高致死率与传染性为典型特征，不仅给养殖业带来直接巨大经济损失，也严重影响生产效率、危害畜禽产品供给安全与公共卫生安全，已成为畜禽种业和产业健康发展的重要限制因素。畜禽重大疫病抗性品种培育依托遗传改良手段富集、引入或编辑抗病相关基因，定向提升畜禽对重大病原的先天抵御能力，从源头减少疫病发生概率、病原变异频率与防控成本投入，为畜牧业安全生产提供遗传保障。然而，疫病抗性育种难以依赖表型组开展遗传选育，我国地方优良种质资源中蕴含的丰富抗病遗传变异鉴定不足、调控元件解析不清，严重限制了遗传基础的抗病育种应用。此外，抗病性状遗传力较低且与环境和其他重要经济性状间互作复杂，导致关键基因定位难、效应评估不精确，种质创新理论基础仍显薄弱；基因编辑与基因聚合技术在动物育种中的应用仍面临生物安全、伦理审查及产业化推广壁垒。随着多组学技术融合与大数据分析能力的提升，未来对复杂抗病性状的遗传解析将更为深入，产学研深度融合持续加强，通过畜牧兽医学科深度交叉，系统整合感染免疫、遗传资源、技术创新与育

种实践，将推动抗性育种向高效化、精准化和工程化方向发展，最终构建起应对重大疫病的可持续解决方案。

畜禽重大疫病抗性品种的发展历程经历了从传统育种到分子育种的飞跃。早期传统选育通过长期抗病个体筛选与杂交育种积累抗性基因，但该方法周期长、精准度低。随着基因组学、大数据、分子遗传与基因编辑技术的迅速发展，畜禽抗病育种已进入新一轮科研突破与产业应用加速期。基于我国丰富的畜禽遗传资源扩大完善二代、三代基因组测序群体，建立世界范围内各畜禽品种基因组遗传变异（SNP、Indels、STR 和 SV）数据库，系统构建畜禽图泛基因组、遗传变异图谱和调控图谱。随后，通过整合基因组、转录组、表观组、代谢组和微生物组等多组学数据，研究人员得以全面解析抗病性状的复杂调控机制，为关键基因及标记的发现提供支撑。例如，西北农林科技大学构建了高效的猪遗传资源保护体系，鉴定出 62 个关键功能基因和 11 个分子标记，并通过基因编辑技术创制了抗病毒猪新品系，突破传统育种瓶颈。李奎团队绘制了涵盖多个组织的猪遗传调控图谱，定位了 207 个复杂性状的 QTL，为基因组选择和编辑育种提供了重要依据。在绵羊肺炎研究中，研究人员利用多组学技术鉴定出绵羊肺炎支原体为主要病原，并通过 GWAS 筛选出 *FOXF1* 基因及 2 个 SNP 位点，证实其与抗性显著相关。在禽类研究中，研究人员通过靶向测序发现巴西蓝蛋卡皮拉鸡 MHC B-L β II 基因存在 15 种等位基因（含 5 个新等位基因），其多样性增强了对沙门氏菌等病原的抗原呈递能力，为地方品种抗病资源利用提供了依据。这些成果凸显了组学技术从病原鉴定、抗性基因挖掘到表观调控解析的全链条支撑能力，正驱动抗病育种向精准化、高效化发展，为精准育种提供了坚实的遗传基础。

基因编辑技术的出现给动物育种带来了革命性变革，为培育畜禽抗病新品种提供了前所未有的机遇。国内外研究团队聚焦猪蓝耳病（PRRS）防控，通过删除关键受体 *CD163* 基因特定外显子，赋予种猪群体对抗多种在美国流行的 PRRS 毒株的能力，攻毒后病毒核酸和抗体检测表明这些种猪具有 100% 抗蓝耳性状。目前美国食品药品监督管理局（FDA）宣布批准 PIC 公司的基因编辑抗蓝耳猪安全有效，表明其已完成抗蓝耳猪从“概念验证”到“商业应用”的重大突破。中国农业科学院北京畜牧兽医研究所培育出全球首例同时抗 3 种重大疫病（猪繁殖与呼吸综合征、猪传染性胃肠炎病毒和猪德尔塔冠状病毒）的猪，且其繁殖与生产性能正常，为抗病猪新品种培育提供了关键材料与示范效应。在牛身上，基因编辑同样展现出显著潜力。西北农林科技大学团队通过 CRISPR 介入插入 *NRAMP1* 基因，显著提升了对牛结核病的抗性。美国农业部（USDA）与合作者通过修改牛 CD46 受体，培育出全球首例对牛病毒性腹泻病毒（BVDV）具备抗性的基因编辑犊牛“Ginger”。英国科学家通过编辑 ANP32A 蛋白，实现鸡对禽流感（H9N2）的部分抗性。此外，基因编辑已应用于提高家禽对沙门氏菌、禽流感、马立克病与新城疫等的抗性研究。

“畜禽重大疫病抗性品种培育”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家、主要产出机构、主要国家间的合作网络和主要机构间的合作网络分别见表 8.17、表 8.18、图 8.10 和图 8.11。核心专利公开量排名前三的国家是中国（88 件，占比为 85.44%）、捷克（8 件，占比为 7.77%）和韩国（6 件，占比为 5.83%）。韩国与英国之间有合作关系，其他国家之间没有合作。核心

专利产出最多的机构是中国农业科学院（32 件，占比为 31.07%），华南农业大学和 Biopharm 股份有限公司分别排在第二和第三位。被引数比例排名前二的机构是山东省农业科学院奶牛研究中心（18.75%）、山东奥克斯畜牧种业有限公司（18.75%）。捷克科学院分子遗传学研究所与 Biopharm 股份有限公司之间、首尔国立大学与山东奥克斯畜牧种业有限公司之间有合作关系。

表 8.17 “畜禽重大疫病抗性品种培育”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	88	85.44	104	81.25	1.18
2	捷克	8	7.77	16	12.50	2.00
3	韩国	6	5.83	8	6.25	1.33
4	英国	2	1.94	8	6.25	4.00
5	印度尼西亚	1	0.97	0	0.00	0.00

表 8.18 “畜禽重大疫病抗性品种培育”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国农业科学院	32	31.07	17	13.28	0.53
2	华南农业大学	9	8.74	2	1.56	0.22
3	Biopharm 股份有限公司	8	7.77	16	12.50	2.00
4	捷克科学院分子遗传学研究所	8	7.77	16	12.50	2.00
5	山东省农业科学院奶牛研究中心	6	5.83	24	18.75	4.00
6	首尔国立大学	6	5.83	8	6.25	1.33
7	山东奥克斯畜牧种业有限公司	5	4.85	24	18.75	4.80
8	山东农业大学	5	4.85	11	8.59	2.20
9	中国农业大学	5	4.85	6	4.69	1.20
10	西北农林科技大学	5	4.85	1	0.78	0.20

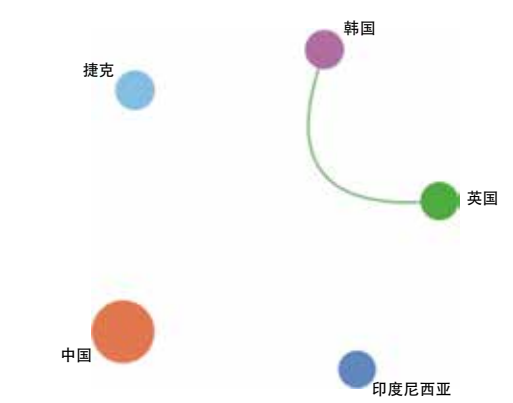


图 8.10 “畜禽重大疫病抗性品种培育”工程开发前沿主要国家间的合作网络

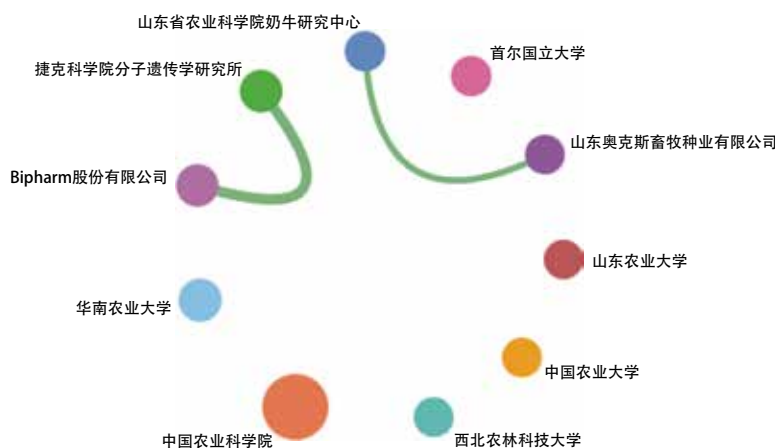


图 8.11 “畜禽重大疫病抗性品种培育”工程开发前沿主要机构间的合作网络

图 8.12 为“畜禽重大疫病抗性品种培育”工程开发前沿的发展路线。未来，畜禽重大疫病抗性品种培育将围绕遗传改良与智慧防控双轨并进，其中基因与分子育种驱动的抗病品种研发，以及智慧监测与综合防控技术融合应用，将成为引领产业升级的两大重点发展方向。首先，畜禽抗病性育种将依托基因组学与免疫基因组学的深入研究，端到端无缺口（T2T）完整参考基因组与泛基因组，加速抗病性相关功能基因或变异位点的发现和精准定位。同时，基因编辑技术将朝着高效、安全的方向继续优化，以实现多基因复杂性状的协同调控和稳健抗病性构建，并强调不引入外源基因的方式，以提升生物安全性和产业可接受度。最后，结合高通量表型组学、大数据统计模型与机器学习，将实现对抗病性“抗病”与“耐受”性状的系统评估，并用于选择反应范式育种决策。



图 8.12 “畜禽重大疫病抗性品种培育”工程开发前沿的发展路线

在充分发挥基因与分子育种潜力的同时，结合现代信息技术和智能化管理手段，将进一步提升抗病品种的实际应用效果和养殖场的整体防控能力。为此，需要建立健全“全链条、综合防控”体系，将疫苗、免疫、生物安全等传统技术与育种策略有机结合，减少对疫苗的过度依赖。同时，开展智能感知研究，将结构振动、射频识别、计算机视觉和可穿戴设备等技术初步应用于畜禽健康监测领域。在此基础上，将实时健康监测、行为识别等 AI 技术联合育种信息系统，实现对病症预警、饲养调控等功能的融合应用，大幅提升畜禽疫病预防与管理水平。并结合国家重点专项，

推动抗病种质与现代牧场科技创新融合落地。最终，构建集基因育种、智能监控、精准防控于一体的现代养殖生态系统，实现产—保—控—养一体化，推动疫病“区域净化与根除”，提升养殖业稳定性与可持续性。

8.2.2.2 基于人工智能的作物养分精准管理

作物养分精准管理是现代农业的重要环节，其核心目标是根据作物生长的不同阶段以及土壤、环境条件，实现精准、适量和高效的肥料投入，从而提升肥料利用率和作物产量，同时降低资源浪费和环境污染。传统施肥模式依赖经验和简化的模型，往往导致“过量—亏缺”并存的问题，既造成养分利用率低下，又带来土壤退化和水体富营养化等生态风险。基于人工智能的作物养分精准管理，则是通过人工智能算法与多源数据融合，构建动态决策模型，实现全生育期、全空间尺度的精准调控。这一前沿的本质是通过“感知—分析—预测—决策—执行”闭环系统，推动养分管理从经验化走向智能化，是农业数字化转型的重要突破口。

作物养分管理的发展可以划分为4个阶段。第一阶段：经验驱动的粗放施肥（20世纪中叶以前）。农户主要依赖经验、历年习惯和简单田间观察进行施肥，缺乏科学依据，施肥水平粗放且随意性强。这一阶段产量增长受限，且往往伴随土壤肥力下降。第二阶段：科学化的配方施肥（20世纪中后期至21世纪初）。随着土壤学、植物营养学的发展，逐渐推广基于土壤养分检测和作物营养诊断的配方施肥。此时施肥决策以静态土壤分析为依据，结合叶面诊断和施肥模型，实现了一定程度的科学化和均衡化，但存在空间态尺度粗糙和时间动态性不足的问题。第三阶段：精准化的差异化施肥（21世纪初以来）。遥感、地块传感器、物联网等新兴技术的应用，使施肥可在田间小尺度内实现空间差异化管理。变量施肥机、无人机施肥等装备得到应用，精准农业理念开始进入养分管理实践。然而，该阶段的决策仍偏向静态，数据碎片化严重，难以实现真正的连续动态调控。第四阶段：智能化的动态调控（近年来）。人工智能的兴起为养分精准管理带来根本性转变。深度学习和时序建模可整合作物图像、光谱、气象、土壤传感等多源异构数据，构建作物全生育期的养分供需动态预测模型。强化学习、因果建模则能实现施肥策略的自适应优化，与无人机、变量施肥机联动，实现作物生长全过程的动态、闭环调控。当前，智能化养分管理已进入快速发展期，但仍处于工程体系构建的初期阶段。

基于人工智能的作物养分精准管理具有多重重要意义：其一，能够大幅提升肥料利用效率，缓解化肥施用过量与农业面源污染问题，助力农业绿色转型；其二，通过动态调控和智能决策，可保障作物稳产高产，在耕地资源有限和气候波动加剧背景下保障粮食安全；其三，为农业数字化和智能化提供核心技术支撑，可推动智慧农业平台与智能农机的深度融合，进而提升农业全要素生产率，为农业转型和可持续发展作出积极贡献。

当前研究重点主要集中在以下方面：通过整合土壤传感器、作物影像、无人机遥感和气象大数据，构建深度学习模型，实现作物养分供需状态的实时诊断与预测；构建基于作物—土壤—环境耦合机制的动态模拟系统，结合时序建模和强化学习，形成“动态预测—实时反馈—智能决策”的闭环调控模式；开发与人工智能决策模型相适配的智能装备，包括无人机变量施肥、

机器人施肥系统，实现精准执行层面的落地应用；针对不同区域、不同作物和不同管理模式，探索迁移学习和边缘计算，提升模型的普适性和推广性。

相关核心专利主要产出国家、主要产出机构、主要国家间的合作网络分别见表 8.19、表 8.20 和图 8.13。核心专利公开量排名前三的国家是中国（65 件，占比为 56.52%）、美国（18 件，占比为 15.65%）和韩国（13 件，占比为 11.30%），合计占比超过八成。中国处于明显的领先地位，专利数量遥遥领先，同时被引数达到 74 次，占比高达 82.22%，显示出在该领域的核心影响力。美国虽排名第二，但被引数比例仅为 7.78%，平均被引数为 0.39，表明整体影响力有限；韩国虽有一定的专利数量，但尚未产生实际引用。值得注意的是，部分新兴市场国家如印度、土耳其和沙特阿拉伯也已有少量专利产出，其中印度在被引数方面表现相对突出，显示出其研究在国际上具备一定的学术影响。印度与埃塞俄比亚之间有合作关系，其他国家间尚无合作。

表 8.19 “基于人工智能的作物养分精准管理”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	65	56.52	74	82.22	1.14
2	美国	18	15.65	7	7.78	0.39
3	韩国	13	11.30	0	0.00	0.00
4	印度	5	4.35	4	4.44	0.80
5	土耳其	4	3.48	0	0.00	0.00
6	加拿大	3	2.61	0	0.00	0.00
7	埃塞俄比亚	1	0.87	4	4.44	4.00
8	沙特阿拉伯	1	0.87	3	3.33	3.00
9	德国	1	0.87	1	1.11	1.00
10	英国	1	0.87	1	1.11	1.00

表 8.20 “基于人工智能的作物养分精准管理”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	宾夕法尼亚州立大学地球与矿物科学学院	4	3.48	0	0.00	0.00
2	浪潮云信息技术股份公司	3	2.61	2	2.22	0.67
3	深圳市博坦科技有限公司	2	1.74	12	13.33	6.00
4	SUB-MERGEN 技术公司	2	1.74	3	3.33	1.50
5	中电万维信息技术有限责任公司	2	1.74	1	1.11	0.50
6	拜耳作物科学公司	2	1.74	0	0.00	0.00
7	CIBO 科技公司	2	1.74	0	0.00	0.00
8	山西西电信息技术研究院有限公司	1	0.87	8	8.89	8.00
9	兰州大学	1	0.87	6	6.67	6.00
10	黑龙江农投大数据科技有限公司	1	0.87	5	5.56	5.00

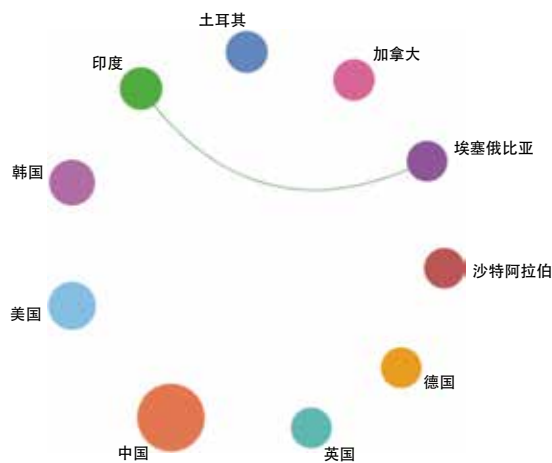


图 8.13 “基于人工智能的作物养分精准管理”工程开发前沿主要国家间的合作网络

从机构分布来看，专利产出最多的机构是宾夕法尼亚州立大学地球与矿物科学学院（4 件，占比为 3.48%），其次是浪潮云信息技术股份公司（3 件，占比为 2.61%）和深圳市博坦科技有限公司（2 件，占比为 1.74%）。值得关注的是，深圳市博坦科技有限公司虽仅有 2 件专利，但被引数达到 12 次，占比为 13.33%，平均被引数高达 6.00，显示出其研究成果质量较高。美国 SUB-MERGEN 技术公司和中国山西西电信息技术研究院有限公司的平均被引数也分别达到 1.50 和 8.00，显示出较强的技术价值。德国拜耳作物科学公司和美国 CIBO 科技公司虽有一定专利储备，但尚未形成明显的引用优势。在高校与科研机构中，兰州大学（平均被引数 6.00）在有限的专利数量下展现出较强的学术贡献，黑龙江农投大数据科技有限公司（平均被引数 5.00）也在应用转化方面表现突出。机构间尚无合作关系。

图 8.14 为“基于人工智能的作物养分精准管理”工程开发前沿的发展路线。未来 10 年，基于人工智能的作物养分精准管理将进一步深化其在机理建模、数据智能和装备智能化方面的融合发展。一方面，作物－土壤－环境机理模型与数据驱动模型将趋于深度融合，形成“机理＋数据”双驱动的智能决策框架；另一方面，跨尺度、跨区域的数据互操作与知识迁移将成为重点突破口，使养分管理模型具备更强的普适性与适应性。同时，智能农机将与 AI 管理模型深度耦合，逐步实现从决策层到执行层的全链条自动化。在农业可持续发展与碳减排目标的推动下，该领域还将

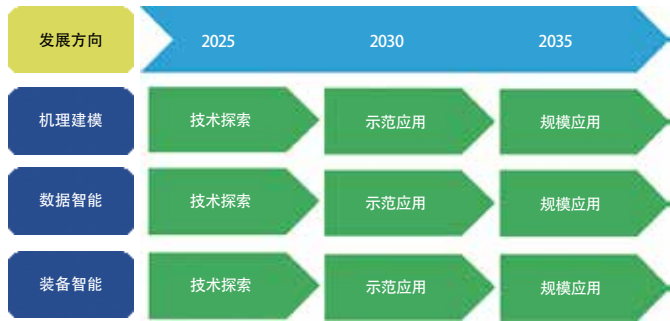


图 8.14 “基于人工智能的作物养分精准管理”工程开发前沿的发展路线

与绿色低碳技术紧密结合，探索“精准养分管理+碳汇增效”的新路径。总体而言，该工程前沿将成为推动农业生产方式由资源消耗型向智能绿色型转型的重要引擎，对未来农业的高效、绿色与可持续发展具有深远意义。

8.2.2.3 作物品种分子设计与智造

作物品种分子设计与智造是作物育种领域的一项颠覆性技术，旨在通过整合分子生物学、基因组学、合成生物学、人工智能与大数据等前沿技术，实现对作物遗传系统的精准解析、智能设计与高效构建，从而培育出具备高产、抗逆、优质、资源高效等优良性状的新品种。该前沿突破了传统育种依赖表型选择和杂交重组的技术瓶颈，实现了从“经验育种”到“精准设计”的范式转变，大幅提升育种效率与可预测性，是国际农业科技竞争的战略高地。

其发展历程可追溯至 20 世纪末基因组学技术的兴起。随着 2000 年以来水稻、玉米、小麦等主要作物参考基因组的陆续完成，作物功能基因组学研究迅猛发展，关键基因挖掘、等位变异鉴定、调控网络解析等基础研究为分子设计奠定了理论基础。2012 年后，CRISPR 等基因编辑技术的成熟，使得定向基因操作成为可能；同时，高通量测序、表型组学与人工智能技术的融合，推动了智能育种平台的初步形成。目前，该前沿已从概念探索进入示范应用阶段，国内外多家科研机构与企业已成功设计出一批抗病、耐盐碱、养分高效利用的新种质。

该前沿的重要性体现在多个方面：一是可应对全球气候变化与粮食安全挑战，通过定向设计适应性品种增强农业韧性；二是减少育种盲目性，显著缩短育种周期（从 10 年以上缩短至 3~5 年），降低人力与资源成本；三是推动绿色农业转型，例如设计氮高效利用作物可减少化肥施用，降低环境负荷。

根据核心专利数据分析，该领域技术创新活跃，全球布局集中。美国是最大的技术输出国，公开专利 60 件，占比为 47.24%，被引数为 1 987；新西兰虽然公开量（21 件，16.54%）位居第二，但被引数（2 147）和平均被引数（102.24）最高，显示其专利影响力突出；中国公开专利 7 件，占比为 5.51%，但被引数较低（3），平均被引仅为 0.43，表明我国仍处于技术追赶阶段，专利质量和影响力有待提升（表 8.21）。其他重要国家包括荷兰（公开量 9 件，7.09%）、加拿大（8 件，6.30%）、芬兰（6 件，4.72%）、德国（4 件，3.15%）等。

从机构分布看，企业是创新主体。美国生物联合公司公开专利 23 件，占比为 23.00%，被引数为 2 486，影响力最大；皮沃特生物股份有限公司和瑞克斯旺种子公司分别以 16 件和 12 件专利紧随其后（表 8.22）。先锋国际良种公司、拜耳作物科学公司等传统农业巨头也位居前列。中国机构中仅扬州大学等个别单位有少量专利公开，整体创新能力与产业转化能力较国际先进水平仍有较大差距。日本、新西兰等国之间有较多合作（图 8.15），企业间合作尤其是跨国农业公司之间的技术联盟成为推动前沿发展的重要力量（图 8.16）。

当前主要研究方向包括：功能基因组与调控机制解析、多组学数据整合与建模、基因编辑与合成生物学工具开发、人工智能辅助性状预测与优化设计、自动化高通量基因型-表型平台构建等。展望未来 5~10 年，该前沿将呈现以下发展趋势：一是技术融合进一步深化，尤其是人

表 8.21 “作物品种分子设计与智造”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	60	47.24	1 987	36.74	33.12
2	新西兰	21	16.54	2 147	39.69	102.24
3	荷兰	9	7.09	175	3.24	19.44
4	加拿大	8	6.30	671	12.41	83.88
5	中国	7	5.51	3	0.06	0.43
6	芬兰	6	4.72	0	0.00	0.00
7	德国	4	3.15	274	5.07	68.50
8	瑞士	4	3.15	47	0.87	11.75
9	日本	3	2.36	254	4.70	84.67
10	澳大利亚	2	1.57	226	4.18	113.00

表 8.22 “作物品种分子设计与智造”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	生物联合公司	23	23.00	2 486	57.48	108.09
2	皮沃特生物股份有限公司	16	16.00	328	7.58	20.50
3	瑞克斯旺种子公司	12	12.00	250	5.78	20.83
4	先锋国际良种公司	6	6.00	47	1.09	7.83
5	米凯利应用科学大学	6	6.00	0	0.00	0.00
6	芬兰自然资源研究所	6	6.00	0	0.00	0.00
7	芬兰东南应用科技大学	6	6.00	0	0.00	0.00
8	InnerPlant 公司	5	5.00	60	1.39	12.00
9	Medicago 公司	4	4.00	491	11.35	122.75
10	拜耳作物科学公司	4	4.00	332	7.68	83.00

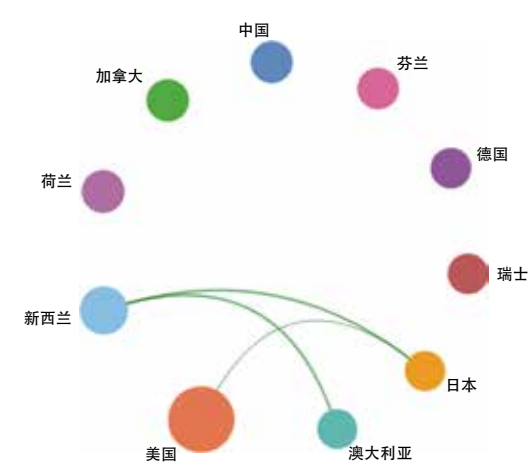


图 8.15 “作物品种分子设计与智造”工程开发前沿主要国家间的合作网络

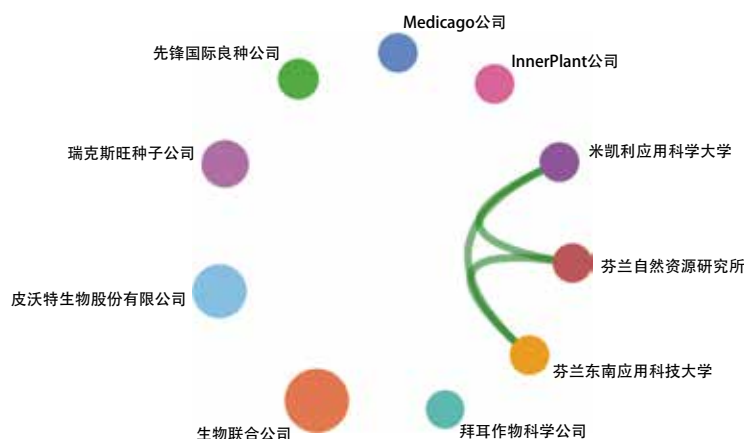


图 8.16 “作物品种分子设计与智造”工程开发前沿主要机构间的合作网络

工智能 + 量子计算将极大提升设计效率与规模；二是品种设计更注重系统性与可持续性，如设计碳汇型作物、固氮作物等；三是自动化、工厂化“智造”模式逐渐成熟，实现从基因型到品种的全链条数字化管理；四是面临伦理、生物安全及知识产权等治理挑战，需建立相应的国际标准与政策框架。预计到 2030 年前后，作物分子设计将在主要大田作物和经济作物中实现规模化应用，成为新一代育种体系的核心引擎，为全球粮食安全与农业可持续发展提供强有力的科技支撑。图 8.17 为“作物品种分子设计与智造”工程开发前沿的发展路线。



图 8.17 “作物品种分子设计与智造”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：孙其信

专家组：

储富祥 戴景瑞 董朝斌 高 辉 韩丹丹 韩 军 胡 炼 黄宇翔 蒋剑春 李道亮
李德发 李天来 刘 军 刘 俊 刘少军 刘 杨 卢 芸 罗锡文 倪中福 齐明芳
沈建忠 孙周平 王军辉 王军军 王 敏 魏海燕 吴孔明 叶 俊 于文吉 臧 英
张代辉 张福锁 张海鹏 张洪程 张守攻 张小兰 张 涌 周 毅 朱齐超

课题组:

陈卫国 初晓一 郜向荣 李红军 李云舟 刘晓娜 师丽娟 孙会军 姚银坤 臧英
赵杰 周丽英 周毅

执笔组:

董朝斌 高元鹏 韩丹丹 韩军 何杰 黄宇翔 李德发 刘德俊 刘军 刘俊
刘新刚 刘旭 刘杨 卢芸 罗锡文 马文涛 潘健 潘兴鲁 齐明芳 任韬宇
孙世坤 孙周平 王军辉 王军军 姚银坤 叶俊 张代辉 张海鹏 张浩文 张洪程
张林 张涌 周毅 朱齐超



第九章

医药卫生前沿



9.1 工程研究前沿

9.1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

医药卫生领域组所研判的 Top 10 工程研究前沿见表 9.1，涉及基础医学、临床医学、生物医学工程、公共卫生与预防医学等学科方向，包括“基于多组学大数据的临床队列研究”“AI 预测蛋白质动态构象”“肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑”“跨物种器官移植的基因编辑优化”“神经退行性疾病的干细胞治疗”“通用型调节性 T 细胞在疾病治疗中的应用”“认知-代谢共病机制研究”“环境暴露与深度表型”“生物 3D 打印在类器官中的应用”和“虚拟细胞大模型构建”。各前沿所涉及的核心论文自 2019 年至 2024 年的发表情况见表 9.2。

（1）基于多组学大数据的临床队列研究

多组学大数据与规范化临床队列融合已成为精准医学研究的重要支柱。系统整合多组学与临床表型数据，深度解析复杂疾病演进过程及其分子基础，为疾病防控、早期诊断和治疗干预提供关键线索。目前，国际上已建立多个大规模的多组学数据队列研究项目，如英国生物样本库（UKB）、美国精准医疗计划（All of Us）、中国慢性病前瞻性研究数据库（CKB），以及多种疾病的专病队列项目，推动医学研究进入大样本、大数据和大发现时代。基于这些队列开展的主要研究方向包括：监测多种疾病的发病趋势，提供重大疾病风险评估和预测，寻找早期生物标志物与可干预因素，明确疾病与遗传和环境因素的复杂关系，实现疾病的早期预防与控制，解析复杂疾病的分子异质性与发病机制，以及研发个体化治疗及疗效监测策略等。基于多组学大数据的临床队列研究是当前国际上具有影响力的前沿领域，世界多国均有较大的研究投入并开展了密切的合作。我

表 9.1 医药卫生领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	基于多组学大数据的临床队列研究	2 345	218 585	93.21	2020.6
2	AI 预测蛋白质动态构象	212	2 738	12.92	2022.4
3	肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑	505	16 351	32.38	2022.3
4	跨物种器官移植的基因编辑优化	176	13 000	73.86	2020.5
5	神经退行性疾病的干细胞治疗	276	5 547	20.10	2021.5
6	通用型调节性 T 细胞在疾病治疗中的应用	227	25 370	111.76	2020.2
7	认知-代谢共病机制研究	1 753	137 965	78.70	2020.4
8	环境暴露与深度表型	130	14 464	111.26	2020.1
9	生物 3D 打印在类器官中的应用	574	62 124	108.23	2020.5
10	虚拟细胞大模型构建	340	3 344	9.84	2021.4

表 9.2 医药卫生领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	基于多组学大数据的临床队列研究	640	618	501	358	194	34
2	AI 预测蛋白质动态构象	14	13	22	43	56	64
3	肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑	42	46	83	85	106	143
4	跨物种器官移植的基因编辑优化	56	39	45	19	13	4
5	神经退行性疾病的干细胞治疗	42	46	47	49	46	46
6	通用型调节性 T 细胞在疾病治疗中的应用	91	50	51	25	10	0
7	认知 - 代谢共病机制研究	569	456	344	250	106	28
8	环境暴露与深度表型	53	33	30	10	4	0
9	生物 3D 打印在类器官中的应用	151	169	136	72	38	8
10	虚拟细胞大模型构建	69	49	63	55	48	56

国是该前沿的主要研究国家之一，目前仍处于紧跟国际前沿的并跑阶段。未来将加强多组学大数据采集与整合分析标准化流程建设，采用单细胞与时空组学等新兴组学技术解析疾病全貌特征和复杂调控网络，并利用人工智能（AI）技术进一步赋能疾病分型、靶点发现和药物研发等精准医学研究。

（2）AI 预测蛋白质动态构象

蛋白质动态构象变化是其发挥生物功能的核心基础，超过 80% 的疾病相关蛋白通过构象变化实现功能调控，如酶活性的切换、抗体 - 抗原的动态适配等，而静态结构无法解释变构效应、配体结合动力学等关键过程。这种动态特性与疾病发生机制、药物结合效率密切相关，精准解析动态构象、发展高效预测技术，对深入理解生命活动、优化药物设计及推动精准医疗发展至关重要。AI 技术正推动药物研发革新：通过预测蛋白质动态构象，揭示隐匿的药物结合位点和耐药突变机制，为设计靶向动态构象的药物提供新策略。同时，AI 弥补了实验数据（如冷冻电镜的静态结构）和分子动力学模拟的局限，通过整合有限数据，高效生成动态构象库，填补室温动态信息的空白。目前该前沿的主要研究方向包括：构建多模态融合的动态预测架构；开发针对复合蛋白质体系的构象解析技术；建立蛋白质突变与构象变化的关联预测模型。该领域作为结构生物学与 AI 交叉的前沿方向，欧美科研机构与科技巨头均加大投入，开展深度技术探索。我国在复合蛋白质体系预测等细分领域已实现突破，但整体仍需追赶国际顶尖水平。未来需利用我国丰富的临床样本资源与完整的产业生态优势，建立动态构象研究平台及数据资源库；强化 4D 建模、跨模态融合等核心技术的自主研发；推动预测技术与新药研发、合成生物学的产业化结合；加强国际数据共享与技术合作，加速 AI 驱动蛋白质动态构象研究从基础突破迈向临床应用。

（3）肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑

肿瘤的发生、进展与复发并非基因事件的线性累积，而是肿瘤细胞与宿主免疫在时空尺度持续博弈与共演化的结果。“免疫逃逸机制的动态重塑”指肿瘤细胞在自然演化与治疗压力下，通过抗原谱变迁与递呈受损、抑制性信号重编程、免疫抑制细胞生态扩张以及代谢与表观遗传等多层级机制，逃避免疫监视的状态，从而获得生存与扩增优势。进入免疫治疗时代，免疫压力导致

免疫检查点被阻断后的继发耐受、双 / 多特异抗体与细胞治疗诱导的代偿性免疫逃逸通路激活，并推动肿瘤在“冷-热”免疫表型间发生可逆转换。当前研究重点在于：构建“演化-免疫-治疗”耦合模型；以单细胞多组学与空间多组学结合病理学方法刻画时空图谱；由单点阻断转向免疫微环境重塑，实施证据驱动联合干预与序贯优化（诱导浸润与原位激活、增强效应与共刺激、维持记忆与长期监护）；以机器学习整合多模态纵向数据，实现个体化疗效预测与过程监测。作为肿瘤治疗研究的重要前沿，该领域已形成高投入、强协作的国际研究格局。我国处于并跑与跟跑并存阶段，应发挥大样本与多中心优势，建设标准化“采-测-算-证-转”平台与开放数据 / 样本库，强化空间组学等关键技术的临床应用与质控一致性，布局机制导向的联合与序贯临床研究，深化国际合作与数据共享，推动精准免疫治疗的规范化与规模化应用。

（4）跨物种器官移植的基因编辑优化

近年来，将基因编辑猪器官移植到终末器官衰竭患者体内的跨物种器官移植已进入临床阶段，以缓解全球供体器官短缺的现状。跨物种器官移植的首要任务是通过基因编辑技术敲除或引入调节异种免疫排斥的相关基因，并清除内源性病原微生物，以确保供体器官的有效性和安全性。编辑策略主要通过基因编辑技术（包括 TALENs、CRISPR/Cas9、PiggyBac 转座子等），清除异种抗原及猪内源性反转录病毒，同时导入人类来源的关键调控基因，以抑制补体激活、凝血紊乱、细胞免疫排斥及炎症反应等过程，共涉及 30 个左右靶基因。基因编辑异种器官移植供体猪的开发主要是围绕这些靶基因制定基因组合方案，然后在体细胞内进行内源基因编码区域的突变、外源基因的随机插入或定点整合，再结合体细胞克隆技术构建基因编辑异种器官移植供体猪。目前，美国 Revivicor 和 eGenesis 两家公司分别开发了 10 基因和 11 基因编辑的异种器官移植供体猪，并获得美国食品药品监督管理局（FDA）批准进入临床试验阶段。我国在该领域也取得显著进展，以云南农业大学和成都中科奥格生物有限公司为代表的研究单位积极推动基因编辑异种器官移植供体猪的研发及临床转化。其中，云南农业大学已成功构建从单基因至 13 基因编辑的供体猪共 18 种，包括具有自主知识产权的猪内源性反转录病毒失活的 8 基因和 10 基因编辑供体猪，为全球基因编辑数量与种类最多的单位。尽管中国科学家在异种移植供体猪的开发以及基因编辑猪到非人灵长类的临床前研究上取得了瞩目成绩，但在临床应用上仍面临诸多挑战，包括目前仍未确定哪些基因组合编辑的供体猪在临床上更有效、是否能挖掘到更有效的靶基因、是否能实现基因在特定部位的精准表达和调控等。总体而言，我国在基因编辑异种器官移植供体猪的研发与临床转化方面仍有待进一步系统性优化和标准化推进，以推动该领域实现从基础研究到临床应用的跨越。

（5）神经退行性疾病的干细胞治疗

神经退行性疾病的干细胞治疗是指利用多能干细胞衍生的功能性细胞来修复或替代体内受损神经元，以改善疾病症状、干预疾病进程的一种前沿医学策略。其核心在于利用多能干细胞的定向分化潜能产出治疗相关细胞，重建受损的神经环路，从而改善神经系统功能。目前应用的多能干细胞主要包括诱导多能干细胞和胚胎干细胞。当前研究主要集中于 3 个方向：一是干细胞体外分化命运的调控，重点在于优化体外分化方案，获得足量、高纯度、细胞特征与功能明确的神经

前体细胞/神经元,并探索其体内整合机制;二是结合基因编辑技术(如CRISPR/Cas9)对干细胞进行遗传修饰,以达到纠正致病突变、增强细胞存活能力或降低免疫原性等目的;三是开发新型细胞递送策略,如精准定位注射技术和生物材料载体,以提升移植细胞的靶向性、存活率、整合效率和功能表达。全球干细胞治疗神经退行性疾病的临床研究进展显著。中国、美国、日本和欧洲已分别开展多项利用多能干细胞衍生多巴胺能神经前体细胞治疗帕金森病的临床试验,初步证明了安全性与潜在疗效。此外,针对肌萎缩侧索硬化症等其他神经退行性疾病的干细胞疗法也取得了探索性突破。然而,在多能干细胞衍生产品的标准化制备、长期安全性评估及机制研究深度上,仍需持续探索。未来,将同步推动自体“定制”型和通用“现货”型细胞产品的开发及临床转化,为临床患者提供更多治疗选择。

(6) 通用型调节性T细胞在疾病治疗中的应用

调节性T细胞(Treg)通过抑制过度活跃的免疫反应维持免疫系统的耐受性和稳态,在抑制靶向自身抗原的免疫细胞的活性以及控制自身免疫病导致的炎症中起重要作用。通用型调节性T细胞(universal Treg, uTreg)是指通过基因编辑或细胞工程削弱或敲除供体特异性分子或位点,以实现跨个体应用的Treg产品。当前,构建uTreg的研究突破主要集中于以下几点。首先,通常从健康供者的外周血或脐带血中提取Treg,经过体外扩增后敲除或沉默免疫原性靶点;然而,Treg的体外扩增培养技术仍需进一步改善,亟待优化其增殖条件并保持其固有功能。其次,提高uTreg在体内的存续时间和归巢能力也是技术发展的一大挑战。此外,构建嵌合抗原受体Treg(CAR-Treg)作为新的策略,通过引入具有特异性的抗原识别受体,实现对特定靶细胞的非主要组织相容性复合体(non-MHC)依赖性识别,有效抑制靶细胞的免疫激活或免疫系统的过度反应,实现疾病免疫调节。尽管CAR-Treg在理论上具备广泛的应用潜力,但其科学性和临床应用仍需更多临床试验的支持。例如,需通过体外实验评价其是否能对靶细胞产生抑制作用,探索保持CAR-Treg在体内的持久性和功能稳定性,避免CAR-Treg对非靶细胞的潜在毒性,并研究确保其在体内的归巢性和特异性调节作用。在实际应用中,已有uTreg产品或项目进入早期临床/转化阶段,例如:Cellenkos推出的“off-the-shelf”Treg细胞疗法在肌萎缩侧索硬化病例中注射后显示疾病进展减缓;Tr1X公司开展的Universal Allogeneic Treg/CAR-Treg项目,聚焦自身免疫与炎症疾病。未来,uTreg技术的发展将专注于优化体外培养技术、提升细胞特异性与持久性调控能力、提高体内存活与归巢能力以及提高安全性与可控性等关键方向。

(7) 认知-代谢共病机制研究

认知-代谢共病机制研究旨在揭示认知障碍(如阿尔茨海默病、血管性痴呆)与代谢障碍(如糖尿病、肥胖)的病理机制联系,包括激素信号紊乱(如胰岛素抵抗)导致脑能量代谢与信息处理及传递异常、慢性低度炎症破坏血脑屏障与脑内免疫微环境、代谢障碍诱发神经元线粒体功能与内稳态失调等。这些机制动态交互,共同导致神经元能量缺乏和功能损伤,驱动认知-代谢共病进程。对共病机制的深入探索,不仅有助于理解代谢系统与中枢神经系统的功能互作,也为从单病向共病演化提供可能的早期预警和一体化防治策略。目前,该领域的研究突破主要集中在两个方面:其一,外周-中枢通讯机制解析。深入解析外周与中枢的代谢信号分子及其下游通

路在生理病理状态下的功能，包括血糖、胰岛素等。借助跨组织的多组学与分子示踪技术的整合策略，从分子—环路—网络多个维度揭示外周代谢与中枢能量稳态、认知功能的病理机制联系，并推动潜在药物靶点的研发；其二，跨器官调控的中枢能量网络研究。通过大脑实时能量监测与空间多组学技术，利用化学遗传和光遗传调控工具，从时空特异性角度阐释神经可塑性受损而影响能量代谢、导致认知障碍的作用及机制，为共病干预提供新的研究思路。近年来，中国科学家在该领域已取得诸多原创性进展，然而当前研究多集中在关联性分析，功能验证方面有待加强。总体而言，在生命周期、共病演进及特异性药物研发等生物医学前沿方面，我国认知—代谢共病机制研究仍处于起步阶段。

（8）环境暴露与深度表型

环境暴露是指个体在整个生命周期内通过各种途径接触到外界物理、化学、生物因素的过程。深度表型是指利用多模态、高分辨率的检测技术，全面精准地收集和分析机体从分子、细胞、组织、器官到整体功能等多个层次的生物学特征。将环境暴露测量与深度表型研究相结合，能够揭示环境因素影响健康的全链条路径，推动环境相关疾病的早期识别与精准防治，对减轻疾病负担、提升人群健康水平具有重要意义。目前，环境暴露与深度表型研究主要聚焦于以下3个方向。首先，精准评估环境暴露，结合可穿戴设备、卫星遥感等先进手段，利用AI技术构建个体化、高精度的暴露评估模型，完整绘制人群暴露图谱。其次，系统整合基因组、转录组、蛋白质组、代谢组等多组学数据，结合影像学、器官功能及认知行为等多维度信息，解析相关表型的动态变化特征和关键分子信号转导，刻画个体健康全景。再次，整合暴露组与深度表型数据，发展因果推断及机制解析新方法，阐明“环境—基因—分子表型—功能表型”的多层次关联与交互作用机制，全面理解环境暴露影响人体健康的生物通路。近年来，国内外环境暴露与深度表型研究取得了显著进展。未来，研究将逐步由传统环境监测拓展至极端环境（如高原、深海、缺氧、低压等特殊环境），致力于实现全生命周期表型精密测量，并融合AI技术精准量化环境与健康的复杂关联，深入阐明内在机制。

（9）生物3D打印在类器官中的应用

生物3D打印通过对细胞、因子和材料的空间精确定位组装，实现细胞/组织微环境的体外重塑，并可通过调控打印组分，研究功能性器官在发育生物学不同阶段的生长机制。在类器官发育早期，通过引入仿生生物材料、三维拓扑结构设计等方式，进一步形成生化及物理信号组合，加强对干细胞定向分化及类器官发育的调控，以实现功能性类器官构建。目前，生物3D打印在类器官中的应用研究主要聚焦于：①研发适配干细胞分化和类器官发育的新型基质材料及生物墨水体系；②通过打印引入材料和结构完成组合生化—物理信号的“时序调控”，实现细胞“自组装”到“助组装”的革命性突破；③打印构建类器官装配体/组装体，模拟和重塑器官亚结构域（血管、免疫等）间互作，实现多种类器官融合、高组织结构及大体积器官再造；④开展高通量打印，解决类器官均质性构建的瓶颈难题，满足药物筛选和临床应用的需求。国内外在生物3D打印类器官构建方面已涌现出多个有影响力的研究成果，例如：美国科学家研发了多种血管化组织类器官打印方法；瑞士科学家打印构建出具有管道结构的肠道和胃类器官，其生物性能大幅提高；澳大利亚科学家通过多种图案打印，改变肾脏类器官的构象以及肾小管的数量，证实生

物 3D 打印是实现可控复杂仿生结构制造的最佳方法；清华大学、北京协和医院团队围绕打印肿瘤类器官、类器官装配体及其药物评价应用开展了系列工作，领跑国际。

（10）虚拟细胞大模型构建

人工智能虚拟细胞（AI virtual cell, AIVC）是近年兴起的革命性研究范式，其核心在于利用 Transformer 等大规模人工智能模型整合海量单细胞与多组学数据进行训练，动态模拟细胞内部过程及对外部扰动的响应。AIVC 显著区别于早期基于数学方程和规则的传统虚拟细胞概念，旨在构建能够全面模拟分子、细胞乃至组织水平生物功能的数字化系统。该领域发展迅速，已成为全球科研与资本关注的重点，欧美处于领先地位，多项标志性成果和大型项目源自欧美，例如 Arc 研究所开发的 STATE 模型基于超过 2.67 亿个单细胞数据训练，能精准预测细胞对药物或基因扰动的响应。DeepMind、Chan Zuckerberg Initiative 等也投入巨资推进相关项目。同时，大规模高质量生物数据集如 Xaira Therapeutics 发布的 Perturb-seq 数据集 X-Atlas/Orion 为训练提供基石。研究机构通过发起虚拟细胞挑战赛和建立 Cell_Eval 等标准化基准推动开放合作。我国在高质量语料和模型创新方面正逐步积累，例如国家生物信息中心和中国科学院广州生物医药与健康研究院“谱系大设施”均在布局汇交整合或者自产基于人群队列的单细胞多组学数据，但在跨尺度数据融合、模型验证和协同平台建设方面仍面临挑战。未来 5~10 年，AIVC 大模型将向更高保真度、多尺度整合和可交互模拟方向演进，模型将更多依赖单细胞多模态和扰动前后配对数据。应用上，AIVC 大模型将作为新药研发的数字试验场和个性化医疗的数字孪生基础，极大地降低药物开发成本、缩短开发周期。技术上，需实现生物实验与计算模型的闭环迭代，发展自主软件生态，布局国家级重大科技基础设施，促进数据开放共享和深度学科交叉，从而抢占生命科技制高点，改变生物医学研究范式。

9.1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

9.1.2.1 基于多组学大数据的临床队列研究

自人类基因组计划启动以来，生命科学领域持续蓬勃发展，多组学大数据日益成为解析复杂疾病机制的关键途径，临床队列研究则是验证医学假设、推动诊疗进步的重要力量，二者结合为精准医学诊疗提供有效循证依据。依托规范化临床队列，系统收集并整合基因组、转录组、表观遗传组、蛋白质组、代谢组、微生物组等多组学数据，以及生活方式、环境暴露、临床诊疗信息、人体健康信息（如可穿戴设备）等多层次、跨尺度、时序化数据，系统挖掘疾病发生、发展及转归的分子机制与个体化特征，对推动疾病防控、风险预测、早期诊断和精准干预具有重要意义。

目前，多个国家已经启动了大规模人群队列研究项目，如英国生物样本库（UK Biobank, UKB）、美国精准医疗计划（All of Us）、中国慢性病前瞻性研究数据库（China Kadoorie Biobank, CKB）等。在专病队列建设方面，已建立心脑血管疾病、肺癌、食管癌、乳腺癌、宫颈癌、白血病、糖尿病、罕见病等多种疾病的专病队列。这些队列研究涵盖数千至数百万样本，包含不同性别、年龄、种族和地理区域，通过整合多组学以及临床表型等数据，共同推动全球精准医学从“单一基因”

向“多组学”综合模型的跨越，为复杂疾病解析和个体化治疗探索提供了宝贵的生物大数据资源。相较于欧美发达国家，中国队列在标准化、规范化与系统化层面仍显薄弱，科学管理、数据质控与随访体系尚待健全，跨队列合作与共享机制亟须解决。

通过开展基于多组学大数据的临床队列研究，持续监测心脑血管、肿瘤、代谢及呼吸系统等主要疾病的发病趋势，提供重大疾病风险评估和预测；持续采集纵向多维数据和长期随访，动态收集个体健康数据，追踪从健康状态到疾病发生的演进轨迹，精准锁定早期生物标志物与可干预风险因子；利用统计与因果推断模型，探究遗传变异、生活方式及环境暴露对疾病发生的独立效应与交互作用，系统阐明疾病发生、发展与遗传-环境因子的复杂关联；基于疾病高危因素谱，分层推进生活方式干预与药物治疗，实现慢性疾病的早期预防与控制；整合分析多组学数据，系统解析恶性肿瘤等复杂疾病的多维异质性，促进疾病精准诊断与分子分型；精准定位与疾病相关的核心分子、信号通路和调控网络，从而揭示复杂疾病分子机制与关键驱动节点，寻找诊断标志物与治疗靶点，研发创新靶向治疗药物，指导个体化精准用药方案；基于纵向多时点采样与多组学深度解析，开发高灵敏度的可测量残留病（measurable residual disease, MRD）监测技术，动态监测患者治疗反应，实时评估疗效，及时为复发高风险患者调整治疗方案。

当前，“基于多组学大数据的临床队列研究”工程研究前沿中核心论文数排在前三位的国家分别是美国、英国和中国。其中，中国的论文占比为 21.19%，是该前沿的主要研究国家之一（表 9.3）。从主要国家间的合作网络来看，“基于多组学大数据的临床队列研究”核心论文数排名前十的国家之间合作密切（图 9.1）。对于“基于多组学大数据的临床队列研究”这一前沿，总的来说，中国的发展与全球研究趋势保持同步。

“基于多组学大数据的临床队列研究”核心论文数排名前十的机构来自美国、英国和瑞典，其中前三位分别是哈佛大学、牛津大学和卡罗林斯卡学院（表 9.4）。从主要机构间的合作网络来看，各科研机构间已有一定合作（图 9.2）。

表 9.3 “基于多组学大数据的临床队列研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 / %	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	1 181	50.36	120 018	101.62	2020.5
2	英国	709	30.23	79 651	112.34	2020.5
3	中国	497	21.19	42 153	84.81	2020.9
4	德国	320	13.65	38 001	118.75	2020.5
5	荷兰	301	12.84	30 752	102.17	2020.5
6	瑞典	266	11.34	28 507	107.17	2020.6
7	澳大利亚	259	11.04	29 288	113.08	2020.5
8	加拿大	222	9.47	23 083	103.98	2020.5
9	法国	183	7.80	19 136	104.57	2020.5
10	意大利	165	7.04	17 891	108.43	2020.7

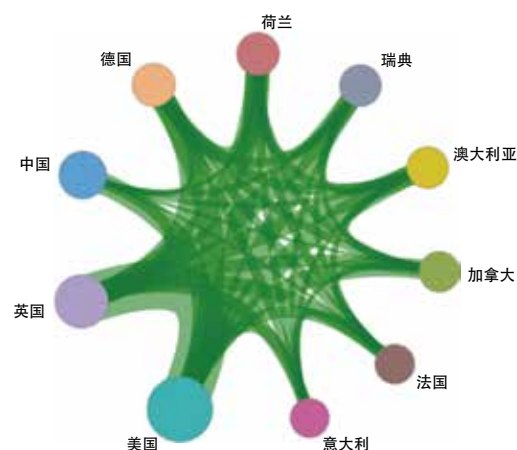


图 9.1 “基于多组学大数据的临床队列研究” 工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 9.4 “基于多组学大数据的临床队列研究” 工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 / %	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	哈佛大学	367	15.65	44 327	120.78	2020.7
2	牛津大学	174	7.42	21 430	123.16	2020.6
3	卡罗林斯卡学院	147	6.27	16 822	114.44	2020.6
4	剑桥大学	143	6.10	19 819	138.59	2020.5
5	布里斯托大学	136	5.80	14 866	109.31	2020.4
6	伦敦帝国学院	129	5.50	14 131	109.54	2020.6
7	布莱根和妇女医院	121	5.16	13 486	111.45	2020.7
8	斯坦福大学	117	4.99	15 221	130.09	2020.6
9	伦敦国王学院	116	4.95	13 375	115.30	2020.3
10	约翰斯·霍普金斯大学	111	4.73	14 842	133.71	2020.4

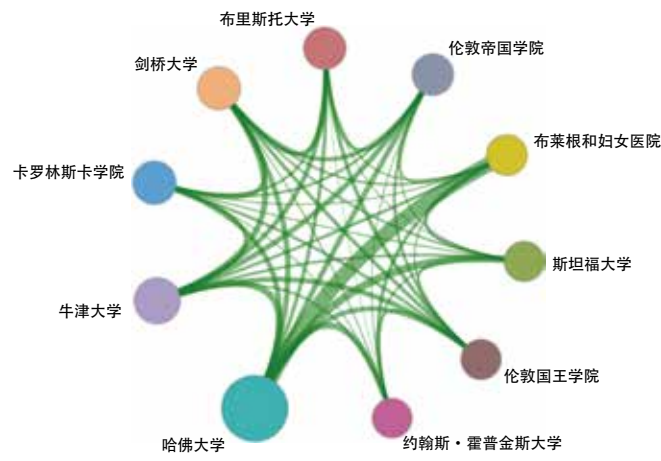


图 9.2 “基于多组学大数据的临床队列研究” 工程研究前沿主要机构间的合作网络

随着多组学大数据整合技术的发展，单细胞与时空组学等新兴组学技术的兴起，以及与 AI 的深度融合，“基于多组学大数据的临床队列研究”正迈入“标准化采集—精准化分析—智能化决策”并行提速的新阶段，未来将进一步推动疾病发病机制解析、精准医疗实践和医学研究创新发展。通过建立健全覆盖数据采集、样本处理、多组学检测、数据质控与生物信息学分析的标准化流程体系，实现多模态数据的高质量整合，深入挖掘疾病的深层次特征。此外，整合影像数据与多组学、临床数据，系统阐明疾病在分子、组织和器官层面的全貌特征，全面解析复杂交互作用与精密调控网络。利用单细胞多组学技术解析细胞异质性、追踪细胞发育和分化轨迹、探索疾病耐药机制等；借助时空组学技术揭示基因调控的时间与空间机制、解析免疫微环境和相互作用、识别肿瘤耐药亚克隆。同时，利用机器学习与深度学习等 AI 算法对多组学数据进行特征选择与整合分析，加速疾病的精准诊断和分子分型，助力创新靶点筛选，优化药物研发流程，为个体化治疗提供切实可行的方案，推动精准医疗走向临床实践，助力医学研究高质量、可持续发展（图 9.3）。



图 9.3 “基于多组学大数据的临床队列研究”工程研究前沿的发展路线

9.1.2.2 AI 预测蛋白质动态构象

AI 预测蛋白质动态构象是指通过 AI 算法（如深度学习、扩散模型等），结合蛋白质序列、静态结构及分子动力学（MD）模拟数据，预测蛋白质在生理条件下的动态构象变化（如构象分布、转变路径、与配体结合的动态过程）的技术。与传统静态结构预测（如 AlphaFold 聚焦单一构象）不同，其核心是捕捉蛋白质“运动状态”——蛋白质在体内并非固定结构，而是通过构象变化实现催化、信号转导等功能，AI 动态预测需模拟这一过程。例如，CONFDIFF 模型通过玻尔兹曼分布与扩散模型结合，生成符合热力学规律的构象集合，实现动态行为预测；AlphaFlow 模型则基于 13.2 TB 的 MD 轨迹数据学习蛋白质构象景观并采样动态变化。

蛋白质结构预测技术的发展经历了从静态到动态、从单一到复杂的演进过程。在奠基阶段（2018—2021 年），AlphaFold 和 RoseTTAFold 实现了高精度的静态结构预测，为动态研究奠定了基础。随后进入起步阶段（2022—2023 年），研究者开始整合 MD 模拟数据训练 AI 模型，并构建专用数据集，使 AI 初步具备了多构象预测能力。直至当前的技术突破阶段（2024 年至今），

多模态 AI 模型涌现，能够模拟包含配体、核酸的复合物动态，并引入了时间维度，实现 4D 轨迹预测。在 AI 算法迭代、多模态融合及 MD 模拟等技术的支撑下，一系列研究突破彰显了动态构象预测的技术潜力与应用价值：复旦大学等团队提出 4D 扩散模型，结合 MD 数据实现多时间步长构象轨迹预测，填补了 AlphaFold 系列模型的动态预测空白；菲鹏数辉发布 DeepConformer 2.0，成为国内首个实现复合蛋白质动态构象预测的模型，可解析突变对构象分布的影响；Meta AI 联合团队开发 FusionProt 框架，通过可学习融合 token 实现序列与结构信息的迭代融合，显著提升构象相关功能预测精度。

就现状而言，该领域展现出显著的技术优势：部分模型对蛋白质局部柔性运动的预测精度已接近实验水平，构象生成速度较传统方法提升百倍。然而，现存局限同样明显：其性能仍依赖数据质量，对同源序列少的蛋白预测精度不足；难以完整模拟毫秒级的长时程构象转变；并且侧链预测精度有待提高，影响了配体结合等关键细节的模拟准确性。

为突破现有蛋白质动态构象预测局限，未来研究将聚焦多源数据融合建模，通过整合 MD 模拟、室温核磁共振动态数据及冷冻电镜构象集合，训练更通用的 AI 模型，例如 EquiScore 通过融合物理先验与数据驱动，已将先导化合物优化成功率提升 30%。同时，将结合高性能计算扩展 AI 预测的时间尺度，以捕捉毫秒级变构效应。在应用层面，致力于开发“AI 预测—实验验证”的闭环工具，通过虚拟筛选与自由能微扰计算，快速优化基于动态结合位点的小分子药物。最终，通过构建大规模动态构象数据库（如“人源蛋白动态组学”计划），为开发超越 AlphaFold 的新一代动态模型提供数据基础。

当前，“AI 预测蛋白质动态构象”工程研究前沿中核心论文数排在前三位的国家分别是美国、中国和德国。其中，中国的论文占比为 17.92%，是该前沿的主要研究国家之一（表 9.5）。从主要国家间的合作网络来看，“AI 预测蛋白质动态构象”核心论文数排名前十的国家之间合作密切（图 9.4）。对于“AI 预测蛋白质动态构象”这一前沿，我国目前处于与国外同类研究跟跑的态势。

表 9.5 “AI 预测蛋白质动态构象”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	美国	96	45.28	1 514	15.77	2022.4
2	中国	38	17.92	470	12.37	2022.8
3	德国	17	8.02	248	14.59	2022.2
4	英国	17	8.02	208	12.24	2022.9
5	日本	16	7.55	251	15.69	2022.1
6	印度	14	6.60	101	7.21	2023.4
7	意大利	9	4.25	206	22.89	2022.9
8	瑞典	7	3.30	118	16.86	2022.0
9	法国	7	3.30	81	11.57	2022.6
10	西班牙	6	2.83	150	25.00	2023.3

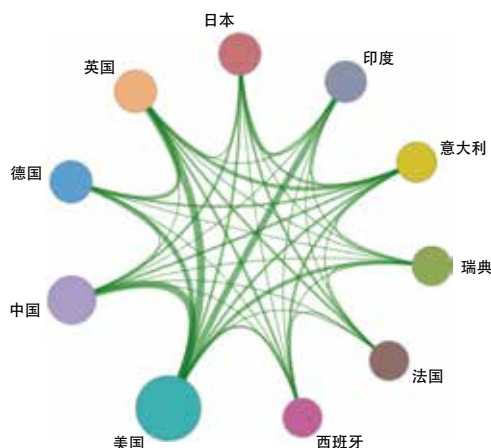


图 9.4 “AI 预测蛋白质动态构象” 工程研究前沿主要国家间的合作网络

“AI 预测蛋白质动态构象” 核心论文数排在前十位的机构来自中国、美国、英国和日本，其中前三位分别是中国科学院、美国南卫理公会大学和美国查普曼大学（表 9.6）。从主要机构间的合作网络来看，各科研机构间有少量合作（图 9.5）。

蛋白质结构预测领域正经历一场深刻的范式变革，其发展前沿呈现出三大核心特点：

1) 从“单一模态”到“多模态协同”的认知跃迁。研究不再割裂地看待序列、结构与功能信息，而是通过先进的跨模态融合架构，实现这些维度数据的深度耦合。例如，ProTrek 等模型已能统一表征序列、结构与自然语言描述，未来将进一步融入动态构象、翻译后修饰等多维信息，以更全面地揭示“序列－结构－动态－功能”的内在联系。

2) 从“静态快照”到“全景动态”的预测升级。前沿研究致力于突破当前在时间尺度和构象覆盖上的局限，目标是从根本上还原蛋白质在生理环境中的真实运动状态。这不仅包括预测构象转变路径，更在于解析其过程中的能量变化与结合动力学等关键参数，实现从微秒到毫秒乃至更长时间尺度的“全景动态”模拟。

表 9.6 “AI 预测蛋白质动态构象” 工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	9	4.25	64	7.11	2022.4
2	南卫理公会大学	8	3.77	143	17.88	2021.8
3	查普曼大学	7	3.30	86	12.29	2022.6
4	中国科学技术大学	7	3.30	77	11.00	2022.9
5	约翰斯·霍普金斯大学	5	2.36	126	25.20	2022.2
6	马里兰大学	5	2.36	111	22.20	2022.4
7	上海交通大学	5	2.36	54	10.80	2023.2
8	伦敦大学学院	5	2.36	39	7.80	2023.2
9	布朗大学	4	1.89	178	44.50	2021.8
10	东京工业大学	4	1.89	139	34.75	2021.0

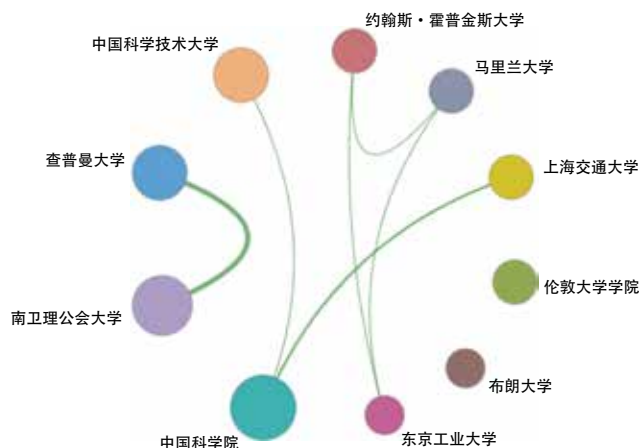


图 9.5 “AI 预测蛋白质动态构象” 工程研究前沿主要机构间的合作网络

3) 从“数据依赖”到“知识驱动”的范式转型。为了克服对海量标注数据的依赖，尤其是提升对孤儿蛋白、病毒蛋白等数据稀缺靶点的预测能力，模型开始深度融合物理化学原理、进化规律等先验知识。同时，“AI 预测—实验验证”的闭环研究模式将加速技术迭代与成果转化，推动该领域从纯数据驱动迈向知识与数据双轮驱动的新范式。

为支撑上述前沿发展，一系列核心研究技术正迅速崛起。在模型架构上，跨模态融合与表征学习技术是基石，通过可学习融合 token 实现不同模态信息的高效迭代交换。在生成能力上，扩散模型与生成式 AI 的应用日益深化，从精准识别无序结构升级到生成符合热力学规律的全构象景观，甚至实现“按需设计”特定条件下的动态构象。在计算效率上，超算与 AI 的协同加速技术至关重要，一方面利用百万原子级超算模拟生成大规模训练数据，另一方面发展轻量化模型以实现终端设备的实时分析。

基于这些技术与理念，该领域正聚焦于若干重点前沿方向：解析内在无序区域（intrinsically disordered region, IDR）的动态调控机制，以攻克“不可成药”靶点；将预测范围扩展至多分子复合物的动态互作，精准模拟其组装路径与亲和力变化；开发基于动态构象的精准医疗技术，通过识别疾病特异性构象标志物来定制个性化疗法；最终目标是构建一个从原子运动到细胞级协同的跨尺度动态预测理论体系，从而完整揭示生命活动的动态调控网络（图 9.6）。



图 9.6 “AI 预测蛋白质动态构象” 工程研究前沿的发展路线

9.1.2.3 肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑

肿瘤免疫治疗已深刻改变临床格局，但疗效差异与获得性耐药仍常见，其关键根源之一是肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制动态重塑。肿瘤并非静态实体，而是在基因组不稳定性、微环境与治疗压力的共同选择下，与宿主免疫在选择压力下长期共演化并持续适应。置于“免疫编辑”（清除—平衡—逃逸）框架审视，起始阶段，免疫系统优先清除高免疫原性克隆；平衡期，低免疫原性或免疫抑制表型的克隆获得存活优势；进入逃逸期后，肿瘤通过抗原谱改变与抗原加工/递呈缺陷、抑制性免疫检查点分子与细胞因子网络重编程、抑制性免疫细胞扩增，以及免疫代谢与表观遗传重塑，形成多轴联动的“策略集”，并随时间与治疗不断改写。

这种动态重塑塑造了肿瘤免疫的时间异质性与空间异质性：前者体现为病程推进及治疗干预过程中免疫状态的持续重写；后者表现为不同病灶乃至同一病灶内部不同区域在细胞组成、表型与功能上的显著差异。其结果是药物可达性、效应细胞浸润与激活阈值以及检查点阻断的强度与持久性均受到影响，从而决定临床获益的程度与持久性。对该过程的系统阐明，有助于实现更精确的人群分层与应答预测，识别可被“引燃并转热”的时机与人群；为单通路阻断转向肿瘤免疫微环境（TME）整体重整提供依据；并构建可操作的耐药预警与复发监测框架，从而改善长期结局。

在演化视角下，需整合“肿瘤克隆—免疫压力—治疗干预”的因果链条，明确逃逸何时发生、发生于何处、经由何种环路实现及其可逆性边界。以免疫生态整体重整为目标，从“只阻断单一通路”转向“恢复免疫稳态”，采用循证的联合与序贯策略以提升并巩固疗效（例如，先诱导浸润与原位激活，继而增强效应与共刺激，最终维持记忆与长期监护）。同步构建跨维度的标志物与分层体系，围绕抗原呈递、抑制轴、髓系生态、代谢/表观遗传等模块形成可复用的动态评估面板，用于个体化疗效预测与随访管理。进一步将“事后解释无效/复发”转变为“前瞻识别前驱信号并及时干预”的治理范式；在多中心协作与标准化数据/样本体系支撑下，加速精准免疫治疗由可行走向可及、由个案走向规范。

免疫监视与免疫编辑理论奠定了“清除—平衡—逃逸”的演化框架；免疫检查点抑制剂的临床成功证明“解除抑制”可获得持久应答，同时揭示获得性耐药与通路替代/网络重构的普遍性。近年，单细胞与空间组学以及成像—病理量化融合描绘出肿瘤—免疫—基质的分区化与层级化互作；代谢与表观遗传研究展示了免疫表型的可塑基础；不同瘤种及分子亚型呈现差异化逃逸轨迹与微环境模板。据此，研究范式正由“单轴机制描述”转向“系统层级的生态重塑”视角，并日益强调个体差异与治疗时序对逃逸进程的决定性影响。

当前，“肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑”工程研究前沿中核心论文数排在前三位的国家分别是中国、美国和德国。其中，中国的论文占比为 62.77%，是该前沿的主要研究国家之一（表 9.7）。从主要国家间的合作网络来看，“肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑”核心论文数排名前十的国家之间合作密切（图 9.7）。对于“肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑”这一前沿，我国目前处于与国外同类研究领跑的态势。

“肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑”核心论文数排名前十的机构来自中国和美国，其中前三位均来自中国，分别是中国科学院、上海交通大学和复旦大学（表 9.8）。从主要机构间的合作网络来看，各机构间有部分合作（图 9.8）。

表 9.7 “肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑” 工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	317	62.77	8 278	26.11	2022.5
2	美国	113	22.38	7 333	64.89	2021.8
3	德国	29	5.74	975	33.62	2021.7
4	英国	22	4.36	2 882	131.00	2021.1
5	日本	21	4.16	481	22.90	2021.9
6	法国	20	3.96	873	43.65	2021.0
7	西班牙	17	3.37	656	38.59	2021.7
8	意大利	16	3.17	356	22.25	2022.2
9	加拿大	14	2.77	528	37.71	2021.1
10	澳大利亚	10	1.98	1 362	136.20	2021.3

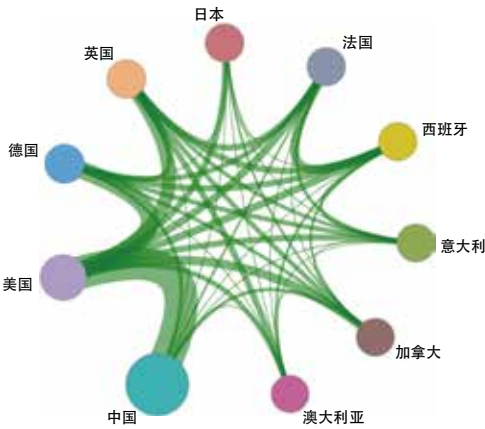


图 9.7 “肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑” 工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 9.8 “肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑” 工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	30	5.94	913	30.43	2022.6
2	上海交通大学	23	4.55	1 026	44.61	2022.2
3	复旦大学	21	4.16	1 326	63.14	2021.7
4	中山大学	19	3.76	586	30.84	2022.5
5	哈佛大学	18	3.56	2 701	150.06	2021.9
6	南方医科大学	17	3.37	448	26.35	2023.3
7	南京医科大学	14	2.77	465	33.21	2022.9
8	同济大学	13	2.57	813	62.54	2022.5
9	郑州大学	12	2.38	271	22.58	2022.7
10	中南大学	11	2.18	158	14.36	2023.3

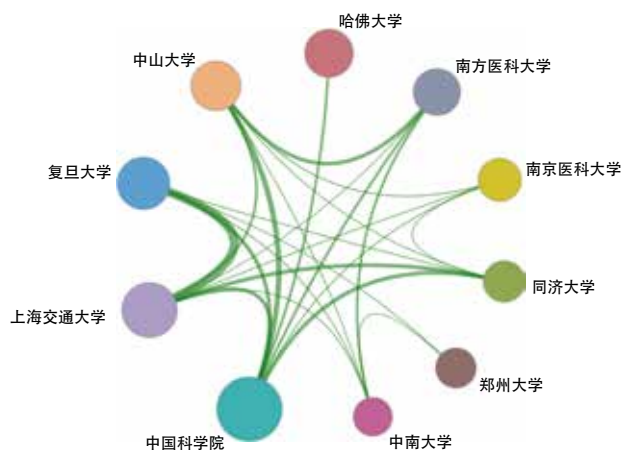


图 9.8 “肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑”工程研究前沿主要机构间的合作网络

未来 5~10 年，该前沿将围绕“可解析—可预测—可重塑”持续推进：依托单细胞组学与空间多组学并与病理实现多模态对齐/融合，构建覆盖抗原呈递、免疫抑制轴、髓系生态、代谢/表观遗传等维度的高分辨免疫生态图谱；以类器官/肿瘤组织切片—免疫细胞共培养与人源化模型开展环路扰动与功能验证，阐明免疫压力—克隆演化—逃逸通路的因果链；以机器学习整合多模态纵向数据，形成分层与动态评估面板，用于个体化疗效预测、耐药前驱信号识别与治疗方案的动态调整；在治疗策略上，从“单点阻断”转向“免疫微环境重塑”，强调“诱导浸润与原位激活—增强效应与共刺激—维持记忆与长期监护”的时序优化；并结合真实世界数据，建立标准化流程与多中心一致性评价体系；同时，打造“采—测—算—证—转”一体化平台，推动关键检测与流程的规范化、国产化，形成“诊断分层—方案推荐—疗程监测—随访复评”的全流程临床路径，促使对免疫异质性的认识转化为可操作的临床工具，支撑精准免疫治疗的规范化与规模化应用（图 9.9）。



图 9.9 “肿瘤演化驱动的免疫逃逸机制的动态重塑”工程研究前沿的发展路线

9.2 工程开发前沿

9.2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

医药卫生学领域 Top 10 工程开发前沿涉及基础医学、临床医学、药学、中药学与生物医学工程等学科方向（表 9.9），其中，新兴前沿包括“中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术”“个体化 mRNA 肿瘤疫苗”“脑连接图谱绘制”“微纳手术机器人”“碱基编辑疗法”和“生成式 AI 赋能的器官数字孪生系统”；作为传统研究深入的前沿包括“无创脑机接口技术”“多靶点 CAR-T 疗法”“溶瘤病毒疗法”和“抗体偶联降解剂技术”。各前沿相关核心专利 2019—2024 年公开情况见表 9.10。

表 9.9 医药卫生领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	被引数	平均被引数	平均公开年
1	无创脑机接口技术	1 937	9 625	4.97	2022.3
2	中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术	3 228	4 543	1.41	2021.7
3	个体化 mRNA 肿瘤疫苗	3 981	16 710	4.20	2022.6
4	多靶点 CAR-T 疗法	1 410	5 383	3.82	2022.1
5	脑连接图谱绘制	452	1 299	2.87	2022.7
6	微纳手术机器人	1 165	22 076	18.95	2022.1
7	溶瘤病毒疗法	9 184	29 501	3.21	2021.9
8	碱基编辑疗法	1 828	7 812	4.27	2022.3
9	生成式 AI 赋能的器官数字孪生系统	165	1 976	11.98	2023.1
10	抗体偶联降解剂技术	836	3 250	3.89	2022.4

表 9.10 医药卫生领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	无创脑机接口技术	128	196	241	353	442	577
2	中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术	412	478	547	579	525	687
3	个体化 mRNA 肿瘤疫苗	194	268	414	693	1 039	1 373
4	多靶点 CAR-T 疗法	104	146	221	271	325	343
5	脑连接图谱绘制	17	21	37	83	129	165
6	微纳手术机器人	107	124	168	211	235	320
7	溶瘤病毒疗法	1 000	1 272	1 420	1 613	1 972	1 907
8	碱基编辑疗法	134	164	218	288	480	544
9	生成式 AI 赋能的器官数字孪生系统	1	7	16	13	39	89
10	抗体偶联降解剂技术	45	71	101	152	201	266

（1）无创脑机接口技术

无创脑机接口（brain-computer interface, BCI）是一种通过外部传感器采集大脑信号，实现大脑与外部设备交互的技术。1924年，德国医生 Hans Berger 记录下人类第一条脑电波，在之后的50余年里，脑机接口技术得到了快速发展，广泛应用于医疗、教育、娱乐、工业、建筑、管理、特种等诸多领域。近年来，无创脑机接口技术国际竞争异常激烈，美国、欧洲、韩国、日本、澳大利亚等国家和地区相继出台支撑政策。美国国防部高级研究计划局（DARPA）自20世纪90年代末便将脑机接口列为颠覆性战略技术，提供长期持续性支持。相比而言，我国脑机接口技术起步较晚、投入有限，但也取得了突破性的进展。2024年，天津大学率先设立全国首个脑机接口专业方向，培养领域急需的卓越医工融合交叉人才；2025年3月，国家医疗保障局为脑机接口医疗服务价格单独立项，使脑机接口医疗收费有规可依；2025年4月，全国首个脑机接口综合临床实验病区启动；2025年7月，工业和信息化部、国家发展和改革委员会、教育部、国家卫生健康委员会、国务院国有资产监督管理委员会、中国科学院、国家药品监督管理局发布《关于推动脑机接口产业创新发展的实施意见》；2025年9月，全国首个脑机接口专用检测平台在天津设立，为推动脑机接口产业高质量发展、加快形成新质生产力注入强劲动力。现阶段我国脑机接口领域加速产业化进程，主要面临技术链和人才链不健全、重大项目支持力度有限、缺乏全面产业布局等问题。未来，技术攻关、伦理安全、人才培养、产学研一体化平台建设等方面可作为该领域研究的主要突破口。无创脑机接口技术将颠覆人机交互模式、革新人类生产生活方式，是培育国防、医疗、教育、电子、通信、人工智能等领域未来产业发展新赛道、新动能、新优势的关键核心技术，将引领我们迈向一个更智能、更便捷的新时代。

（2）中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术

当前，人工智能技术正深刻推动着中医药学研究及临床实践的模式变革。20世纪70年代以来，中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术在数据挖掘、辅助诊断与治疗决策等方面取得突破性进展。然而，该领域的发展仍面临多重挑战：开放优质的大规模中医标准数据资源匮乏、智能模型与中医理论的逻辑适配度低以及中医辅助诊疗决策的服务与产业转化能力不足。当前，研究主要聚焦于中西医表征信息采集与融合、知识图谱与中医大模型构建、智能感知技术研发、中医数智化数据库与诊疗系统开发应用。中国在该领域占据全球主导地位，医疗机构与科技企业是核心创新力量。未来发展的重点在于：构建国家级高质量数据平台与开放共享机制、契合中医理论及思维指导的知识图谱与大语言模型、推动智能传感技术与诊疗设备的研发及应用、建立国际认可的数智化研究成果临床验证与循证评价体系，提升基层医疗与大健康场景服务能力，最终形成“技术-产业-服务”融合的数智中医新生态。

（3）个体化 mRNA 肿瘤疫苗

个体化 mRNA 肿瘤疫苗作为精准免疫治疗的重要突破，通过整合患者肿瘤组织特异性基因组数据与人工智能算法，实现从新抗原预测到 mRNA 疫苗设计的“一人一策”治疗模式，其发展脉络可从个体化药物演进与 mRNA 技术平台成熟两条主线理解。当前该领域已进入快速发展阶段，全球专利布局显示美国以 47.80% 的核心专利占比保持领先，莫德纳、BioNTech 等企业与

科研机构形成了紧密的创新网络；中国正积极跟进并在部分疾病领域实现并跑。临床研究方面，疫苗试验已覆盖黑色素瘤、胰腺癌、非小细胞肺癌等多个癌种，多项Ⅱ/Ⅲ期临床研究显示出延缓复发和改善生存的潜力。展望未来，该领域将在3个维度持续突破：临床应用将拓展至术后辅助治疗、高危人群预防以及晚期联合治疗；核心技术将依托AI驱动实现新抗原预测，实现从“数量堆积”向“质量优化”的转变，并与创新递送系统共同构建技术壁垒；产业化将通过柔性生产平台实现工艺缩小的快速定制模式。要实现上述目标，需要医院、企业与监管机构协同创新，共同构建从快速检测、个体化制备到临床应用的完整生态链，最终推动肿瘤防治从治疗向预防的转变，重塑肿瘤管理模式。

（4）多靶点 CAR-T 疗法

多靶点 CAR-T 疗法是一种通过基因工程技术改造 T 细胞，使其能够同时表达靶向两个及以上抗原的创新免疫治疗手段。与传统单靶点相比，该技术通过靶点协同作用有效克服了因抗原逃逸和肿瘤异质性导致的复发与耐药问题，显著提升了 CAR-T 治疗的有效性和持久性。多靶点 CAR-T 技术通过对双/多靶点的筛选与组合、共刺激域的结构优化、载体容量与表达效率的平衡以及毒性叠加风险的控制，为原发耐药和复发难治患者提供持续而强效的抗肿瘤杀伤效果。双靶点 CAR-T 已成功用于治疗复发/难治性白血病、淋巴瘤及多发性骨髓瘤。研究显示，BCMA/CD38 双靶点 CAR-T 采用并联式人源化双 CAR 结构，在复发难治骨髓瘤患者中提高深度缓解率，对髓外病变或抗原下调患者仍有效，可用于挽救治疗，获美国国立癌症研究院等权威认可。在实体瘤领域，双靶点 CAR-T 已在胶质瘤、胃癌、胰腺癌、卵巢癌等疾病中开展系列临床研究。该技术还拓展至自身免疫性疾病领域，BCMA/CD19 CAR-T 已开展用于系统性红斑狼疮的Ⅰ期临床研究。全球已登记30余项双/多靶点 CAR-T 临床试验，其中17项由中国机构主导。CD19/BCMA（CXSL2200577）与 CS1/BCMA（CXSL2500497）两款双靶 CAR-T 产品已获批 IND，进入临床开发阶段。未来，多靶点 CAR-T 的发展趋势将聚焦智能化与集成化，包括：利用人工智能优化靶点设计，开发逻辑门控 CAR 实现靶点动态调控，探索与小分子药物等联合的 CAR-T+X 模式，推进现货产品实现降本增效，最终全面提升疗效和安全性，并稳步扩展适应证。今后应持续加强临床转化与产业链协同，将多靶点技术与新型工程化免疫细胞深度融合，系统布局基于双靶点的通用型 CAR-T、体内 CAR-T 等现货型产品，全力构建“多靶点、可负担”的 CAR-T 治疗中国方案。

（5）脑连接图谱绘制

脑连接图谱绘制是一项综合应用多模态神经成像与计算建模方法的技术，旨在精准重建、定量表征及网络化呈现脑在不同时空尺度上的结构和功能连接，从而揭示脑网络的信息传递路径、拓扑组织规律与病理重构模式。该技术的核心挑战在于突破多项技术瓶颈，包括：如何整合多模态磁共振、光学与电镜成像、神经环路示踪与组织透明化等技术，实现从微观、介观到宏观尺度的全脑连接测量；如何解析跨尺度结构-功能关联；以及如何实现多模态数据的精准配准、融合与可视化。解决这些问题是构建从单细胞、功能柱到脑区跨尺度全脑连接图谱的基础，也为系统理解脑连接的组织规律、细胞类型与拓扑特性提供标准化知识体系。脑连接图谱技术不仅是揭示

“结构－功能”因果机制、探索脑功能原理的关键工具，还在脑疾病防治与智能技术发展中起到引领作用。它可用于认知心理学中行为与认知的神经机制解析、临床评估中精神疾病的个体化异常模式识别与影像标志物开发、神经外科手术中的连接组引导切除与功能保护、神经调控中的个体化靶点选择和疗效预测，以及类脑工程中神经拟态芯片与计算模型的生物网络参照。由于其广阔前景，中国、欧美等均大力投入该领域，通过国家级科研计划构建公共数据库与工具链，形成了覆盖健康与疾病人群、兼容多尺度数据的新格局，推动科研成果向临床转化，并催生以脑连接组为核心的新一代脑医学、脑机接口与类脑智能产业生态。未来技术突破将依赖高时空分辨脑成像设备、大数据脑图谱生成技术、全自动标注与脑图谱重建算法、脑图谱参考常模绘制技术以及跨尺度脑图谱集成平台的发展。与 AI、脑空间组学、临床医学等领域的深度交叉，有望进一步揭示脑结构与功能的本质联系，为脑疾病精准诊疗和新一代类脑智能提供关键基础与数据资源。

（6）微纳手术机器人

微纳手术机器人是一种在微米或纳米尺度上执行精细操作的智能系统，通过在微观空间内进行精准感知和精细操作，实现精准医疗干预，如靶向药物递送、细胞操作、微血管疏通等。微纳手术机器人通过显微视觉伺服控制、实时定位、高效驱动和群体协同控制等方式在体外或体内环境中执行微观空间的复杂任务。理想的微纳手术机器人应该是生物相容性材料、适应性强的结构、精确的推进可控性、低毒性、最小潜在的免疫原性反应以及体内受控生物降解性的组合。微纳手术机器人在精准医疗领域展现出广泛的应用潜力，可用于疾病早期诊断、狭小腔道的高精度操作、体内药物精准运输等，突破传统手段无法触及的区域，推动诊疗模式向微观化、智能化、无创化方向发展。微纳手术机器人目前正经历从实验室迈向商业化应用的关键阶段，科研技术持续突破、医疗健康需求爆发、工业精密制造升级和政府的战略支持等带来了全球市场规模的迅速增长，以微创医疗机器人、精锋医疗等为代表的中国企业进步显著。综合来看，微纳机器人研究正从介观向微观深入，从单一元件向集成系统迈进，从被动控制向智能自主化飞跃，并更加注重与人工智能、生物技术的深度融合，追求更高的智能化和自主性；同时应用场景从传统的腔镜、骨科手术，向神经介入、心血管疾病治疗（如溶栓）以及更广泛的精准诊断和靶向治疗领域扩展。目前我国已有多个核心团队长期深耕于微纳机器人领域，逐步实现从基础研究到产业化的全链条创新，走“国家战略引导、产学研紧密协同、临床需求驱动”的自主创新之路。

（7）溶瘤病毒疗法

溶瘤病毒疗法是一种新兴的肿瘤免疫治疗方法，利用天然或经基因改造的病毒特异性感染并裂解肿瘤细胞，同时激活机体抗肿瘤免疫应答。该疗法可在肿瘤细胞内复制并释放子代病毒，增强抗肿瘤免疫反应，有效抑制肿瘤生长，与传统放化疗相比具有独特优势。目前该领域仍面临多项挑战。例如病毒需经精准改造以提升肿瘤靶向性并减少对正常细胞的毒性。同时，开发高效的静脉递送系统以保障病毒活性和肿瘤部位富集是一大难点。此外，克服肿瘤免疫逃逸及控制治疗相关副作用也至关重要。临床研究显示，溶瘤病毒在多种晚期及转移性肿瘤中疗效显著，可缩小肿瘤体积、延长生存期并改善生活质量。其与免疫检查点抑制剂、细胞疗法等联合应用时表现出协同增效作用。目前，溶瘤病毒疗法已逐步应用于临床，例如 FDA 批准的 T-VEC 用于黑色素瘤，

以及中国获批的 H101 用于头颈部肿瘤。近期,我国自主研发的新型溶瘤病毒 VG161 在治疗复发难治性肝癌方面取得了重要突破,进一步推动了溶瘤病毒疗法在中国及全球的应用前景。病毒工程优化、递送系统创新及联合治疗策略开发将是该领域未来的重点研究内容。基因编辑技术的应用有望进一步提升病毒安全性与有效性。溶瘤病毒与其他治疗方式结合,尤其在个体化医疗领域,将为肿瘤治疗提供新方向,并有望成为癌症综合治疗的关键组成部分。

(8) 碱基编辑疗法

碱基编辑疗法是基于碱基编辑技术开发的创新基因治疗手段。它通过在不断裂 DNA 双链的前提下精准修正致病基因点突变,从根本上治疗疾病。相较于传统“分子剪刀”型基因编辑技术,其避免了 DNA 双链断裂引发的染色体异常等风险,具有更高的安全性,是基因编辑疗法发展的重要方向。该疗法的临床转化主要面临四大核心挑战:其一,是开发更高精准度、更高效率且无脱靶效应的底层编辑工具;其二,需进行严谨的疾病靶点筛选与基因型-表型关联验证;其三,是开发安全、高效的体内递送系统,以解决组织靶向性和免疫原性问题;其四,是建立稳定、可控、符合 GMP 标准的生产工艺与质量控制体系。目前,该疗法在单基因遗传病(如镰状细胞贫血、地中海贫血)、遗传性耳聋、家族性高胆固醇血症及肿瘤等领域展现出巨大潜力。全球虽尚无产品上市,但临床进展迅速。我国与美国共同处于全球第一梯队,已有多个产品进入临床试验阶段,中国有望引领全球,率先实现首款碱基编辑疗法药物的上市突破。未来,适应证拓展至常见病、新型递送系统开发与个体化治疗将是主要发展方向。我国通过国家重点研发计划等系统性布局,已在工具创新、靶点验证和工艺开发方面建立了自主知识产权体系。下一步需持续加强“产学研医”协同,完善监管科学体系,推动更多原创性疗法上市,惠及全球患者。

(9) 生成式 AI 赋能的器官数字孪生系统

生成式 AI 赋能的器官数字孪生是以个体多模态医学数据为驱动,将生成模型与机理仿真深度耦合,形成可持续更新的患者数字副本。系统自动生成器官的几何、材料与功能参数,联动电机、血流等多物理模型,并持续同化影像与生理监测数据,从而预测疾病进展、评估治疗反应并优化方案,服务临床评估与决策。其关键在于多源数据标准化与时空配准、生成模型的物理一致性约束、跨时相同化与概率校准、不确定性量化及向临床指标的传播,同时满足术前、术中实时与降阶建模需求,保障跨设备与人群的域泛化与公平性,并构建隐私保护、可审计合规与统一接口下的可复现评测。应用已覆盖心血管、肝肾、呼吸、神经与肿瘤的介入与手术规划、器械参数共设计、个体化用药与康复、远程随访与虚拟临床试验。以心血管为例,可支撑经导管主动脉瓣置换术(TAVR)与再同步化方案比选,预测射血分数与再入院风险,实现患者与植入物的在体匹配与仿真。随着高分辨率影像与可穿戴普及、生成式模型与科学计算融合加深以及医院信息化和隐私计算完善,多中心试点与原型系统加速推进,监管与标准对可信性、可解释性与数据安全的要求同步提升。未来将依托高保真器官基础模型与数字表型驱动的生成方法,结合物理一致性的扩散与流式生成、卡尔曼与粒子同化、具覆盖保证的校准与不确定性、从全阶到降阶的蒸馏与边云协同,在联邦学习与差分隐私框架下实现多中心共建与面向医疗器械软件的可审计流程,并与机器人、智慧手术、仿生材料和药物动力学模型深度融合,拓展从个体医疗到群体健康管理

虚拟临床研究的空间。

(10) 抗体偶联降解剂技术

抗体偶联降解剂 (degrader-antibody conjugates, DAC) 技术是一类新兴的靶向蛋白降解技术, 通过将小分子降解剂 (如 PROTAC 或分子胶) 与单克隆抗体偶联, 实现对特定细胞或组织内致病蛋白的精准靶向降解。DAC 技术不仅保留了抗体的高特异性识别能力, 还引入了蛋白质降解机制, 从而在疾病相关蛋白的选择性调控上展现出独特优势。DAC 技术的核心在于高效连接抗体与降解剂, 并确保在体内环境下保持稳定和活性。关键挑战包括: 如何优化抗体与降解剂的偶联方式以避免活性丧失; 如何提升降解剂在靶细胞内的释放效率。此外, DAC 需要在药代动力学 (PK) 与药效学 (PD) 之间实现平衡, 以确保既能高效到达靶点, 又能最大限度降低非特异性毒性。随着靶向蛋白降解技术的快速发展, DAC 在肿瘤和自身免疫疾病等领域展现了广阔的应用潜力。在肿瘤治疗中, DAC 可突破传统抗体药物无法应对的“难成药靶点”, 通过精准降解肿瘤驱动蛋白实现疗效提升; 在自身免疫疾病中, DAC 有望通过靶向降解炎症驱动蛋白为患者提供新的治疗手段。目前, DAC 技术仍处于早期研发和临床前验证阶段, 但已引起全球范围内学术界和产业界的高度关注。欧美多家生物医药公司已启动 DAC 平台建设和管线布局, 部分候选药物进入动物实验与早期临床。未来 DAC 的发展将集中于以下方向: ① 偶联化学与连接子优化, 提升稳定性与选择性, 确保降解剂在目标细胞内有效释放; ② 靶点拓展, 解决“难成药”问题; ③ 多学科融合, 推动智能化 DAC 平台建设; ④ 临床应用推进, 推动 DAC 从概念验证走向疾病治疗。随着技术突破, DAC 有望成为继抗体偶联药物 (ADC) 之后的又一类颠覆性生物药物。

9.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

9.2.2.1 无创脑机接口技术

无创脑机接口 (BCI) 是一种通过外部传感器采集大脑信号, 实现大脑与外部设备交互的技术, 其核心特点在于无须开颅植入电极, 而从外部搭建一条“脑-机-肌”环路, 通过头皮表面采集到的大脑信号, 了解神经元活动, 解码大脑意图, 并将其转化为控制指令。

自 1924 年德国医生 Hans Berger 记录下人类的第一条脑电波以来, 脑机接口技术如今在医疗、教育、娱乐、工业、建筑、管理、特种等诸多领域有着广泛的应用。

在医疗领域, 脑机接口在康复、麻醉、神经重症、精神疾病、听觉、视觉等方面有着广泛的应用, 覆盖了“监测—诊断—治疗”全周期链条。在康复方面, 天津大学神经工程团队于 2014 年最早提出了“神工”机器人的概念, 即通过无创脑机接口技术, 加速偏瘫患者康复进程, 并实现意念打字、站立行走等功能; 在神经重症及退行性脑疾病方面, 脑机接口技术可大大提升相关疾病的诊疗效率, 例如可用于麻醉深度监测、昏迷患者促醒, 可将脑积水诊断时间从 3 天缩短到 30 分钟, 可提前预测脑卒中患者溶栓效果, 可用于退行性脑疾病患者的认知与记忆加强等; 在精神疾病方面, 脑机接口技术为抑郁、自闭、多动等情绪性疾病的客观诊断提供了精准的方式;

此外,近年来,脑机接口在睡眠监测与调控、闭环人工耳蜗设计、青光眼与白内障等眼科疾病的早诊方面都展现出了巨大的潜力,为健康中国建设注入强劲新质生产力。

在教育和娱乐领域,脑机接口近年来在注意力集中、疲劳与警觉度监测、记忆加强、上课绩效评估等方面助力现代教育方式的变革;脑控游戏以及虚拟现实交互相关技术也越来越多地出现在公众视野中。

近年来,随着脑机接口技术的发展,建筑及管理领域涌现出了“神经建筑学”“神经管理学”“神经决策学”“神经经济学”“神经社会学”等新兴学科,通过无创脑机接口技术探索建筑环境如何影响人类的大脑功能、行为、认知和心理,运用神经科学技术研究管理和决策行为等国际新兴前沿问题。

脑机接口是一项完整覆盖“四个面向”的颠覆性技术,其在特种领域的应用受到诸多国家的关注。2016年,天津大学搭建了全球首套在轨脑机交互系统,如今,脑机接口技术为快速视听、脑机交互、脑机智能、设备操控等提供了底层的技术支撑手段。

面向未来,孪生脑及片上脑机接口技术的发展将是前沿神经科学、人工脑机智能复合体的下一个方向。

近年来,无创脑机接口技术国际竞争异常激烈,美国、欧洲、韩国、日本、澳大利亚等国家和地区相继出台支撑政策。DARPA自20世纪90年代末便将脑机接口列为颠覆性战略技术,提供长期持续性支持。美国商务部自2018年起逐步加强对脑机接口相关技术的出口管制。此外,在业界,Neuralink、Facebook、BrainGate等企业均将脑机接口相关技术及产品的开发作为其主要发展方向。2025年6月,Neuralink公司的脑植入设备进入临床试验阶段,并在最新一轮融资中筹集了6.5亿美元。

相比而言,我国脑机接口技术起步较晚、投入有限,但也取得了突破性的进展。2024年,天津大学率先设立全国首个脑机接口专业方向,培养领域急需的卓越医工融合交叉人才;2025年3月,国家医疗保障局为脑机接口医疗服务价格单独立项,使脑机接口医疗收费有规可依;2025年4月,全国首个脑机接口综合临床实验病区启动;2025年7月,工业和信息化部、国家发展和改革委员会、教育部、国家卫生健康委员会、国务院国有资产监督管理委员会、中国科学院、国家药品监督管理局发布《关于推动脑机接口产业创新发展的实施意见》;2025年9月,全国首个脑机接口专用检测平台在天津设立,为推动脑机接口产业高质量发展、加快形成新质生产力注入强劲动力。

当前,无创脑机接口主要朝着更便携、更精准、更稳定、更高效的方向发展,主要研究方向覆盖“电极—芯片—算法—装备”全链条关键技术,包括:①新型神经信号感知理论与检测方法;②多模态融合及信息采集与处理技术;③新一代高通量脑机交互关键技术;④闭环神经精准调控技术;⑤人工脑机智能复合体技术;⑥无创脑机接口技术应用转化。

截至2024年,“无创脑机接口技术”前沿方向的核心专利共1937件,产出数量较多的国家是中国、美国和印度(表9.11),其中,中国的专利占比达到了73.21%,在专利数量方面居于首位,是该工程开发前沿的重点研究国家之一;从主要国家间的合作网络来看,美国与日本、

加拿大、韩国、中国之间，以及加拿大与中国之间存在合作关系（图 9.10）。核心专利产出数量排名前列的机构是天津大学、西安交通大学、华南理工大学（表 9.12）；主要机构之间尚无合作关系。

表 9.11 “无创脑机接口技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	1 418	73.21	4 453	46.26	3.14
2	美国	164	8.47	3 043	31.62	18.55
3	印度	129	6.66	31	0.32	0.24
4	韩国	81	4.18	351	3.65	4.33
5	加拿大	19	0.98	566	5.88	29.79
6	日本	19	0.98	313	3.25	16.47
7	澳大利亚	13	0.67	36	0.37	2.77
8	俄罗斯	11	0.57	25	0.26	2.27
9	以色列	7	0.36	276	2.87	39.43
10	德国	7	0.36	35	0.36	5.00

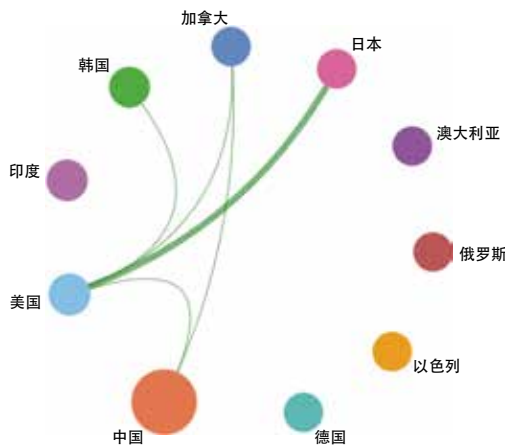


图 9.10 “无创脑机接口技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

现阶段是我国脑机接口领域加速产业化进程的重要机遇期，我们面临的瓶颈为：① 缺乏健全的技术链、完整的人才链，导致产业化能力较弱；② 重大项目数量少，支持力度有限，导致对原始创新和重大应用的关注不足；③ 缺乏全面一体化的脑机接口产业布局，导致场景过小过窄、转化效益不突出。

针对上述核心瓶颈，未来无创脑机接口需要汇聚各方资源，打造协同创新的无创脑机接口高水平产业转化平台。未来趋势（图 9.11）如下：

1) 技术突破：无创脑机接口“电极—芯片—算法—装备”全链条核心技术的前沿突破与开发，如高质量、稳定的头皮干电极，以及便携式、头环式、入耳式脑电采集设备；更精准的高空间分辨率神经调控技术；更高效的 AI 模型与数据分析算法；更自然的 BCI 人机交互范式与交互评估新指标；多模态监测技术及无线传输技术的开发等。

表 9.12 “无创脑机接口技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	天津大学	81	4.18	456	4.74	5.63
2	西安交通大学	47	2.43	257	2.67	5.47
3	华南理工大学	45	2.32	246	2.56	5.47
4	杭州电子科技大学	44	2.27	219	2.28	4.98
5	清华大学	29	1.50	48	0.50	1.66
6	韩国大学研究与商业基金会	26	1.34	200	2.08	7.69
7	重庆邮电大学	26	1.34	114	1.18	4.38
8	西北工业大学	24	1.24	48	0.50	2.00
9	国防科技大学	24	1.24	40	0.42	1.67
10	浙江大学	23	1.19	118	1.23	5.13

2) 伦理与安全规范：患者和用户对 BCI 技术的接受度、数据隐私与伦理、全链路加密技术的开发、安全性与生物相容性等问题。

3) 人才培养：截至 2024 年，全国有 200 余家单位开展脑机接口业务，据预估，到 2030 年，我国脑机接口领域人才缺口将达到 20 万人，建立相关脑机接口专业刻不容缓。

4) 现代化产业体系建设：无创脑机接口“产-学-研-医-管”一体化平台的建设；无创 BCI 专用检测平台以及中试、小试平台建设；相关政府政策持续性支持与关注；相关标准、法规和指南的制定与完善；医保目录的合理定价等。

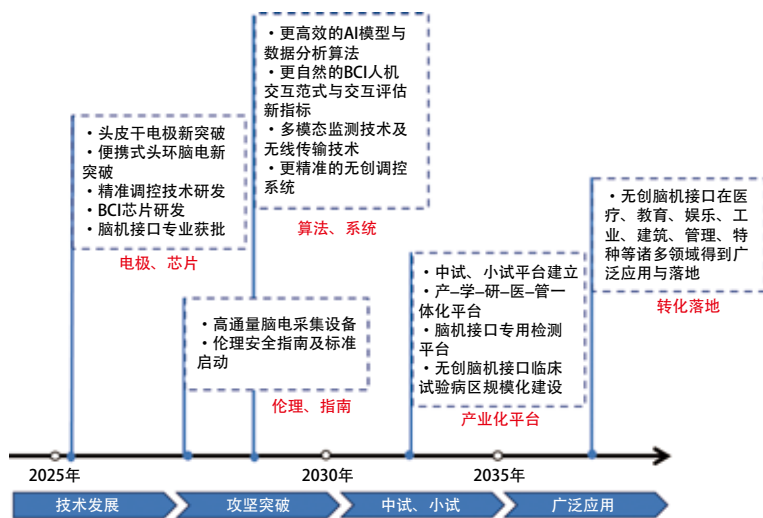


图 9.11 “无创脑机接口技术”工程开发前沿的发展路线

9.2.2.2 中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术

中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术可概括为凭借数字化手段实现四诊、经络、体质

及辨证论治核心要素等表征客观化与标准化的规范过程，通过 AI 技术揭示中医药原理与现代科学机制之间的关联，提升中医药理论的外推性。中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术相结合，系统性地构建一套覆盖“感知—认知—决策—服务”全流程的数智中医诊疗关键技术体系，可重构中医药传承范式，驱动中医药创新发展。20 世纪 70 年代开始，中医智能化领域侧重于开展专家经验知识和诊疗规则研究，处于知识与经验推理阶段。进入 20 世纪 90 年代后，研究人员将传统机器学习方法应用于中医诊断流程改进与诊疗规律发现，本体数据库和知识图谱开始应用。随着深度学习方法的引入，其与图像智能识别技术结合，研究重点转向中医表征的客观化采集，四诊、体质与经络等诊疗设备研发取得快速进展。如今，AI 技术已融入中医药传承创新发展全链条各环节。然而，中医数据要素的价值仍未充分释放，AI 技术在中医辅助诊疗方面有较大探索空间。

中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术拟解决的重要问题包括：

1) 开放优质的大规模中医标准数据资源匮乏：在数据采集方面主要表现为中医表征数据采集标准化不足、多源异构信息融合困难及数据质量参差不齐；在数据集成方面主要表现为现有中医辅助诊疗研究样本量小、病种单一，“数据孤岛”现象突出，专病数据库及可信数据空间建设滞后，支撑 AI 模型充分训练的能力有限。

2) 智能模型与中医理论的逻辑适配度低：现有 AI 模型方法设计难以复现中医理论的核心思维，无法模拟“理—法—方—药”的连贯逻辑，推理过程的可解释性缺失，进而衍生出 AI 模型及相应决策的临床信任问题，导致其应用场景受限。

3) 中医辅助诊疗决策的服务能力与产业转化能力不足：在临床转化方面，当前利用 AI 技术解析辨证论治的现代科学内涵已取得示范性研究进展，但其临床验证与循证评价体系尚未完善；在核心技术方面，中西医表征多模态协同识别、智能传感技术以及模型性能仍有待提升；在产业环境方面，各地域数字基础设施布局不均衡、智能设备市场准入政策不完善等因素，共同制约着基层医疗服务能力提升与产业转化落地。

对中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术实际应用有关键影响的分支领域包括：① 构建中医临床数据标准化与质控体系，形成人工智能高质量中医表征数据集；② 研发融合中医理论的智能诊疗模型；③ 发展数字孪生与虚拟诊疗等创新技术；④ 提升中医辅助诊疗装备的精度和使用性能；⑤ 建立基层中医药数智化服务体系与应用生态。

截至 2024 年，“中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术”前沿方向的核心专利产出前三名的国家为中国、韩国和美国（表 9.13）；中国与加拿大之间存在合作关系（图 9.12）。核心专利产出数量排名前列的机构是平安科技（深圳）有限公司、上海中医药大学附属龙华医院与中国中医科学院广安门医院（表 9.14）；中国中医科学院广安门医院与中国中医科学院中医药信息研究所存在合作关系（图 9.13）。

中医数字化表征与 AI 辅助诊疗技术的融合，标志着中医药学正经历从经验传承向数据驱动的历史性转型，不仅是对传统诊疗范式的技术革新，更是对中医理论本体的深度挖掘与现代化诠释。未来发展的核心在于构建“数智中医”新模式，需开展的重点研究（图 9.14）包括：

表 9.13 “中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	3 172	98.91	4 499	99.03	1.42
2	韩国	9	0.28	16	0.35	1.78
3	美国	8	0.25	20	0.44	2.50
4	日本	8	0.25	4	0.09	0.50
5	印度	4	0.12	2	0.04	0.50
6	俄罗斯	2	0.06	0	0.00	0.00
7	加拿大	1	0.03	7	0.15	7.00
8	以色列	1	0.03	2	0.04	2.00
9	澳大利亚	1	0.03	0	0.00	0.00
10	丹麦	1	0.03	0	0.00	0.00

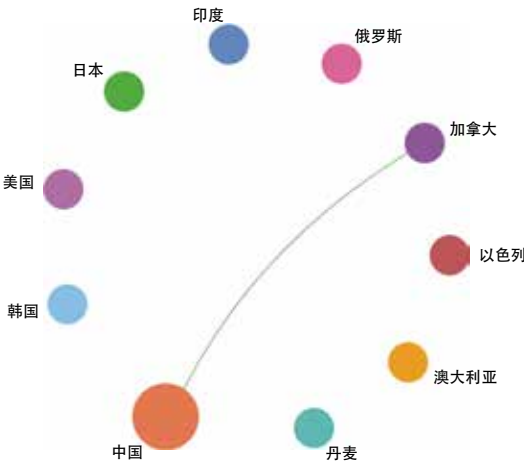


图 9.12 “中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 9.14 “中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	平安科技(深圳)有限公司	41	1.28	87	1.92	2.12
2	上海中医药大学附属龙华医院	35	1.09	67	1.47	1.91
3	中国中医科学院广安门医院	33	1.03	48	1.06	1.45
4	成都中医药大学	30	0.94	61	1.34	2.03
5	中国中医科学院中医药信息研究所	27	0.84	54	1.19	2.00
6	北京中医药大学	26	0.81	24	0.53	0.92
7	南京大经中医药信息技术有限公司	25	0.78	39	0.86	1.56
8	吾征智能技术(北京)有限公司	25	0.78	33	0.73	1.32
9	广州中医药大学	24	0.75	44	0.97	1.83
10	电子科技大学	21	0.65	109	2.40	5.19

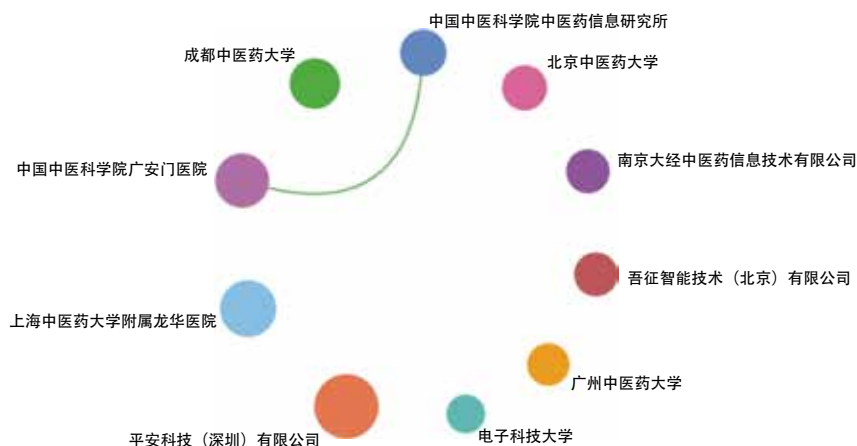


图 9.13 “中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术” 工程开发前沿主要机构间的合作网络

- 1) 构建优质开放共享的中医数据资源体系：在国家层面统筹规划下，系统构建高质量、可共享的大规模中医标准数据集、专病数据库及可信数据空间；建立中医特色表征数据采集与质量控制规范；研发多源异构数据融合与标注技术；逐步建立中医数据治理平台及其体制机制。
- 2) 构建中医知识图谱驱动的可解释模型：充分利用古籍、医案与名医经验等资源，构建契合中医理论与思维的中医辅助诊疗知识图谱，研制符合中医个体化诊疗规律的推理技术与算法模型。
- 3) 阐述中医诊疗的现代科学内涵：利用大数据分析和 AI 技术，挖掘中医表征与现代医学特征及其生物学基础之间的内在关联；通过多维度数据融合分析，阐释中医药诊疗的科学原理。
- 4) 建立临床循证与价值评价体系：针对中医 AI 辅助诊疗研究成果，开展临床真实性、有效性验证；推进构建循证与价值评价体系，为研究成果的临床准入和广泛应用提供科学依据。
- 5) 智能设备研发与基层适配性升级：推动中医智能诊疗技术与设备研发的标准化、规范化应用，提升其医疗与大健康场景适配性，推进中医药服务数字化升级与基层化推广。



图 9.14 “中医数字化表征与 AI 辅助中医诊疗技术” 工程开发前沿的发展路线

9.2.2.3 个体化 mRNA 肿瘤疫苗

个体化 mRNA 肿瘤疫苗是一种基于患者全外显子组及转录组数据的精准免疫疗法。通过 AI 和机器学习算法预测与筛选个体特异性肿瘤新抗原 (neoantigen)，再快速合成编码该抗原的 mRNA 序列，并借助递送系统在体内抗原递呈细胞中表达，从而诱导特异性 T 细胞应答，实现真正意义上“一人一方”的个体化治疗。mRNA 肿瘤疫苗作为肿瘤免疫治疗的新兴方向，在临床、研发及产业化层面均具有战略意义。在临床层面，其可在晚期联合治疗中改善生存质量，在术后辅助治疗中有望降低复发风险，其适用范围正拓展至癌前病变及高危人群的预防性干预，为将部分肿瘤转化为可长期管理的慢性疾病提供了可能性。在研发层面，该平台代表个体化精准医疗的落地，依托组学数据与人工智能技术，实现特异性抗原的高效识别、筛选与序列优化。在产业化层面，mRNA 疫苗推动 GMP 生产模式由“工艺放大”向“工艺缩小”转变，使小规模工业化生产仍可保持质量稳定，并实现生产批次间的快速切换，从而推动 GMP 生产向柔性化、集成化和自动化发展。

个体化 mRNA 肿瘤疫苗的发展可从个体化药物演进与 mRNA 平台成熟两条主线理解。最早的靶向治疗是基于基因突变或分子标志物，使肿瘤治疗进入分子分型时代；随后免疫检查点抑制剂的出现，将免疫标志物纳入个体化治疗的考量；进一步，细胞与基因治疗通过改造患者免疫系统接近“一人一药”。肽类、树突状细胞及 DNA 疫苗的探索则为个体化疫苗奠定了概念与技术基础。个体化 mRNA 药物的发展历程可分为技术储备、抗原预测算法进步、个体化疫苗的早期临床探索及新冠疫苗的成功验证，这一过程充分证明了该平台的可成药性和规模化生产能力。2022—2025 年，mRNA-4157/V940、BNT122 等候选疫苗在 II / III 期临床中展示出延缓肿瘤复发的潜力。截至 2025 年，mRNA 肿瘤疫苗的临床试验已涵盖黑色素瘤、胰腺癌、非小细胞肺癌、头颈部鳞状细胞癌、膀胱癌、结直肠癌以及胶质母细胞瘤等多种恶性肿瘤。上海交通大学医学院附属瑞金医院沈柏用团队在胰腺癌患者中探索疫苗作为一线治疗预防术后复发的可能性。结果显示，疫苗具有良好的安全性和耐受性，可诱导多克隆 T 细胞应答，并呈现降低复发风险的趋势；在多线治疗失败的晚期实体瘤患者中，疫苗能够延长整体生存期和无进展生存期。展望 2030 年，全球首款个体化 mRNA 肿瘤疫苗有望获批上市，从而推动精准免疫治疗真正落地。

个体化 mRNA 肿瘤疫苗的研究目前主要集中于临床策略优化、抗原筛选与序列设计、递送体系改进及生产工艺开发。在临床层面，重点在于通过联合疗法提升患者总生存期和无进展生存期，并深入解析不同治疗组合策略的免疫学机制。在药物设计层面，核心是新抗原预测与筛选优化，结合高质量组学数据和免疫肽质谱等实验手段，不断迭代算法并提升特定人群的适配性；其中，高精度免疫肽质谱以及体外抗原呈递效率评估是关键技术，可为算法训练提供高质量实验数据，具有一定科学难度与技术门槛。mRNA 序列设计则强调元件优化与个体化抗原排列，AI 与机器学习在 mRNA 二级结构预测、翻译效率及免疫原性调控中发挥关键作用。递送体系的研究则聚焦新型阳离子脂质及纳米载体改良，以提升体内递送效率和表达稳定性。生产工艺方面，重点在于工艺缩小、全自动化模块化产线设计及 GMP 标准化，实现高通量、可控和一致性的个体化疫苗制备。



截至 2024 年，“个体化 mRNA 肿瘤疫苗”前沿方向的核心专利共 3 981 件，产出数量较多的国家是美国、中国和德国（表 9.15），其中美国的专利占比达到 47.80%，在专利数量方面居于首位，是该工程开发前沿的主要研究国家之一，中国目前处于总体跟跑、个别疾病领域并跑的姿态；从主要国家间的合作网络来看，各个国家之间合作紧密（图 9.15）。核心专利产出数量排名前列的机构是莫德纳公司、翻译生物公司和宾夕法尼亚大学（表 9.16）；其中，宾夕法尼亚大学与得克萨斯大学存在合作关系（图 9.16）。

图 9.17 为“个体化 mRNA 肿瘤疫苗”工程开发前沿的发展路线。未来 5~10 年，个体化 mRNA 肿瘤疫苗有望在高风险实体瘤术后辅助治疗中实现突破，显著延长患者的无复发生存期和总生存期；在晚期患者中，通过联合用药策略改善生存质量；而在高危或癌前人群中，则有潜力作为预防性干预手段，降低肿瘤发生风险。疗效提升的关键在于药物设计的智能化与精准化——AI/ML 技术将发挥核心作用：一方面整合多组学数据，以提升新抗原识别的精准性；另一方面基于人群特异性算法优化 HLA 多态性适配，并在此基础上改进 mRNA 序列设计、模拟免疫应答过

表 9.15 “个体化 mRNA 肿瘤疫苗”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	美国	1 903	47.80	11 502	68.83	6.04
2	中国	1 251	31.42	2 428	14.53	1.94
3	德国	155	3.89	1 029	6.16	6.64
4	韩国	145	3.64	183	1.10	1.26
5	英国	99	2.49	246	1.47	2.48
6	加拿大	93	2.34	581	3.48	6.25
7	日本	69	1.73	154	0.92	2.23
8	法国	56	1.41	184	1.10	3.29
9	比利时	53	1.33	171	1.02	3.23
10	瑞士	49	1.23	196	1.17	4.00

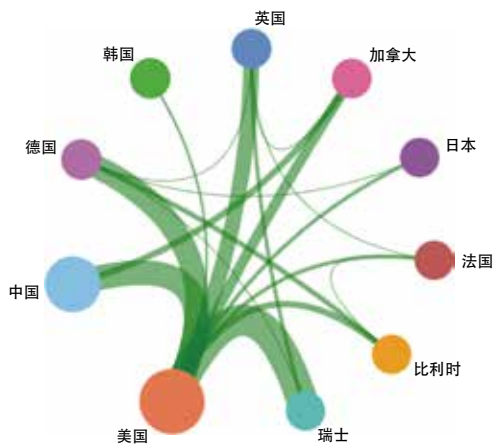


图 9.15 “个体化 mRNA 肿瘤疫苗”工程开发前沿主要国家间的合作网络

表 9.16 “个体化 mRNA 肿瘤疫苗”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	莫德纳公司	164	4.12	3 297	19.73	20.10
2	翻译生物公司	81	2.03	800	4.79	9.88
3	宾夕法尼亚大学	58	1.46	147	0.88	2.53
4	拜恩泰科欧洲股份公司	57	1.43	242	1.45	4.25
5	麻省理工学院	41	1.03	645	3.86	15.73
6	英特利亚治疗公司	38	0.95	639	3.82	16.82
7	旗舰先锋创新七号有限责任公司	35	0.88	284	1.70	8.11
8	得克萨斯大学	34	0.85	302	1.81	8.88
9	加利福尼亚大学	33	0.83	97	0.58	2.94
10	中国药科大学	31	0.78	58	0.35	1.87

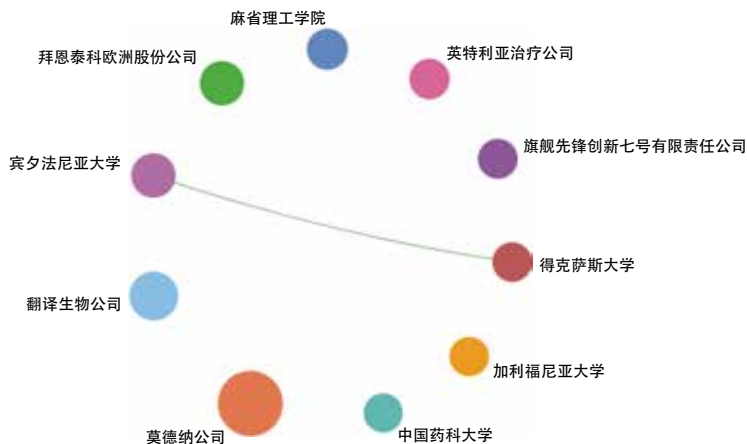


图 9.16 “个体化 mRNA 肿瘤疫苗”工程开发前沿主要机构间的合作网络

程,从而实现药物设计从“抗原数量堆积”到“抗原质量驱动”的转变。同时,发展具有自主知识产权的靶向脂质纳米载体系统来提升递送效率与表达稳定性; mRNA 分子结构的优化,自复制、环状 mRNA 等新型平台的探索,也有望进一步提升免疫原性和治疗效果。随着 I~III 期临床到上市后 IV 期研究的推进,长期积累的真实世界数据将持续反哺算法与模型,推动形成“设计—验证—迭代”的闭环研发体系。

医院在个体化 mRNA 疫苗的临床转化中扮演着关键枢纽角色,承担样本采集、多组学分析、免疫监测与数据反馈等任务,并推动个体化免疫疗法逐步纳入常规肿瘤管理流程,使癌症向慢性病防治迈进。然而,医院在数据合规共享、跨机构标准化以及快速“检测—制备—给药”流程整合等方面仍面临挑战,其高效协同能力是个体化治疗落地的重要保障。

在生产环节,小规模、模块化、自动化的产线技术为 RNA 体外转录、纯化、制剂与封装提供了高可控性与高通量基础,结合在线质量监控与 GMP 标准化体系,可满足多批次快速定制需求。



图 9.17 “个体化 mRNA 肿瘤疫苗”工程开发前沿的发展路线

未来生产将更注重成本控制与灵活性，需在个体化定制与标准化流程之间取得平衡。此外，监管层面的体系创新同样不可或缺，针对个体化、快速迭代的创新药物研发需要新的更加灵活的评审机制，不仅要提升监管人员对 AI 辅助药物设计等前沿技术的理解，还需要通过早期沟通机制明确关键质量属性与安全标准。同时，还要引入灵活适应性策略、实时数据追踪及基于风险的动态评价，建设全链路数据追溯与跨境监管协作框架。在支持个体化治疗的同时提炼共性标准，以实现精准性与规范性的平衡。

综上，个体化 mRNA 肿瘤疫苗的发展将依托 AI 驱动的抗原优化、闭环临床反馈、创新递送系统与柔性生产体系的协同进步，逐步实现从治疗到预防的全链条拓展。医院、企业与监管三方的高效联动，是推动“一人一策”精准免疫治疗真正走向临床的核心动力。

领域课题组成员

领域课题组长：陈赛娟 张伯礼

院士专家组：

黄晓军 梁廷波 赵明辉 胡 豫 朱景德 江 涛 钦伦秀 董念国 冯世庆 雷光华
林天歆 赵国光 徐万海 季加孚 姜 辉 夏宁邵 李 颖 王超龙 胡志斌 阚海东
尹遵栋 吴 晨 詹思延 陈士林 吕爱平 杜冠华 陈 伟 刘剑峰 杜 洋 杨胜勇

青年专家组：

姚海强 张贝贝 熊兴江 梁 凯 齐瑞群 周华强 纳飞飞 易树华 李文斌 吴 芳

周必琪 谭 云 蒋琳加 张 勇 周 静 栾晓东 余山河 庄友文 刘 潇 郑健青
罗 鹏

工作组:

丁 宁 赵西路 奚晓东 严晓昱 陈银银 周 洲 任鹏宇 黄雯韬

文献情报组:

仇晓春 邓珮雯 吴 慧 樊 嵘 寇建德 刘 洁 陶 磊 江洪波 陈大明 陆 娇
毛开云 袁银池 范月蕾 张 洋

报告执笔组:

陈赛娟 程雯艳 赵丽华 陈宝儿 余山河 魏红江 刘 军 许 捷 任鹏宇 马 欢
阚海东 孙 伟 蒋 岚 明 东 刘秀云 仝小林 赵林华 李晓东 王振宇 赵宇平
周雪忠 文天才 鲍婷婷 沈柏用 王 蔚 王新景 梅 恒 贺 永 刘清坤 黄雯韬
梁廷波 沈艺南 陈 佳 骆功宁 饶 燊



第十章

工程管理前沿

10.1 工程研究前沿

10.1.1 Top 11 工程研究前沿发展态势

在工程管理领域，本年度 11 个全球工程研究前沿分别是：“智能地空协同的低空交通与物流”“低碳算力服务系统分布式优化”“地缘政治风险下的供应链重构”“地外建造系统工程管理”“基于多模态（视觉-语言）大模型的人机协作智能制造”“智能驾驶系统安全评估与管理”“大数据生态系统与开放共享机制”“大模型情感感知与认知调控”“平台型企业社会责任生态化治理”“智能体时代的网络治理机制研究”“城市存量空间更新管理与决策”。其核心论文发表情况见表 10.1 和表 10.2。其中，“智能地空协同的低空交通与物流”“低碳算力服务系统分布式优化”“地缘政治风险下的供应链重构”“地外建造系统工程管理”为重点解读的前沿，后文对其目前发展态势以及未来趋势进行详细解读。

（1）智能地空协同的低空交通与物流

智能地空协同的低空交通与物流是指通过智能化手段实现低空载人飞行器〔即电动垂直起降飞行器（VTOL）〕以及载货无人机与现有地面交通载具的融合运行，同时低空垂直起降场站与地面现有交通网络紧密衔接，构建安全高效的“通勤-物流-场站-空域”协同运作的低空立体化交通体系。面向载人运输，需要重点解决 eVTOL 航线与地面交通的换乘衔接、起降场布局与容量管理、航班调度与拥堵缓解等问题。面向载物运输，需探索物流无人机航线优化和地空联合

表 10.1 工程管理领域 Top 11 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	智能地空协同的低空交通与物流	42	2 082	49.57	2021.7
2	低碳算力服务系统分布式优化	49	3 195	65.20	2022.0
3	地缘政治风险下的供应链重构	71	629	8.86	2023.4
4	地外建造系统工程管理	500	553	1.11	2023.8
5	基于多模态（视觉-语言）大模型的人机协作智能制造	29	2 021	69.69	2022.1
6	智能驾驶系统安全评估与管理	71	4 233	59.62	2021.8
7	大数据生态系统与开放共享机制	39	2 868	73.54	2021.8
8	大模型情感感知与认知调控	26	1 020	39.23	2021.7
9	平台型企业社会责任生态化治理	58	3 252	56.07	2021.9
10	智能体时代的网络治理机制研究	34	1 965	57.79	2022.4
11	城市存量空间更新管理与决策	62	4 384	70.71	2021.8

表 10.2 工程管理领域 Top 11 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	智能地空协同的低空交通与物流	0	0	21	13	7	1
2	低碳算力服务系统分布式优化	0	0	17	20	9	3
3	地缘政治风险下的供应链重构	0	0	4	11	9	47
4	地外建造系统工程管理	0	0	0	10	57	433
5	基于多模态(视觉-语言)大模型的人机协作智能制造	0	0	10	9	8	2
6	智能驾驶系统安全评估与管理	0	0	31	25	14	1
7	大数据生态系统与开放共享机制	0	0	18	13	7	1
8	大模型情感感知与认知调控	0	0	13	8	5	0
9	平台型企业社会责任生态化治理	0	0	21	23	12	2
10	智能体时代的网络治理机制研究	0	0	7	12	10	5
11	城市存量空间更新管理与决策	0	0	29	22	8	3

配送等问题。与此同时，地空态势融合感知、基于人工智能（AI）的交通流预测与冲突消解、安全与管控机制（如空域划设、时隙管理、优先级协调）也构成该领域的重要研究内容。从发展趋势看，智能地空协同的低空交通与物流体系将呈现三方面演进。一是多元异构化，衍生出物流、巡检、应急、通勤、观光等多应用场景，这对地空资源的协同运行管控提出了更高要求。二是枢纽化运营，以垂直起降场为核心节点，推动地空一体的多式联运和智能调度平台建设，实现航班调度、物流分拣与地面交通接驳的高效衔接。三是规模化，在大规模运营场景中引入数字孪生和隐私保护机制，提升运行的安全性与可信度。该领域的发展将推动城市交通体系从二维走向三维，为未来智慧城市的低空出行和即时物流开辟新路径。

（2）低碳算力服务系统分布式优化

随着数字经济和大语言模型（LLM）的快速发展，算力已成为继电力之后的重要战略性生产力。然而，算力的海量需求和持续扩张伴随着能源消耗与碳排放的显著增长，使得算力基础设施的巨大能耗与碳排放问题日益凸显。在“双碳”目标与全球绿色转型背景下，低碳算力的分布式优化成为研究前沿，其核心是运用协同优化方法及智能调度技术，对分布式算力网络中的计算任务、算力资源、网络资源和能源供给进行协同调度与管理，在满足高性能算力服务的同时，实现能效优化，减少碳排放。低碳算力服务系统的分布式优化前沿方向主要包括：第一，发展高效的低碳算力服务系统优化调度算法，在时延、能耗与成本等多目标之间实现动态平衡；第二，探索算力基础设施与可再生能源的深度耦合机制，提高绿色能源利用率与消纳水平；第三，设计兼顾效率与隐私的低碳算力服务市场机制，引导产业链上下游积极参与绿色转型；第四，构建科学完善的算力度量与能耗监测体系，为低碳优化提供量化依据。随着我国“东数西算”工程的深入推进、算力网络概念的兴起以及人工智能应用的持续爆发，低碳算力分布系统将加速向着更高程度的智能化、更精细的感知、更强大的跨域协同能力、更强的安全可信保障以及更优化的绿色效能演进，为数字经济高质量与绿色发展提供有力保障，并在大模型训练、自动驾驶和低空经济等领

域发挥关键作用。

（3）地缘政治风险下的供应链重构

在全球化演进与地缘政治博弈加剧的背景下，供应链的稳定性与安全性已成为国际社会关注的核心议题。地缘政治风险下的供应链重构是指在贸易摩擦、区域冲突、技术封锁、制裁壁垒及关键资源受限等不确定性下，国家与企业通过战略调整与制度创新，重塑全球与区域供应链运行逻辑，以提升韧性、安全性与可持续性。不同于以效率和成本最优为导向的传统模式，这一前沿领域更强调效率与安全的平衡、全球协作与区域自主的结合，以及在不稳定环境中的长期稳健性。近年来，疫情、冲突与大国竞争推动供应链从单一依赖走向多元分散，从线性传导转向复杂网络，从被动应对转向主动治理。研究也逐渐由风险分析扩展到结构重构与制度设计，涵盖风险感知、网络优化、韧性提升、绿色智能化与跨境治理等层面。供应链不再是企业运营的中性通道，而是国家安全战略与全球经济秩序的重要支点，尤其在以海运为主体的国际供应链体系中，其重构直接关乎国家战略安全与全球竞争格局。未来，重构将呈现更复杂和多维的特征：一方面，区域化与多元化趋势增强，但如何在全球协作与区域自主间取得平衡仍待突破；另一方面，数字化与智能化加速推进，但要实现从风险监测到动态调度的全链条智能化仍存障碍。同时，在“双碳”目标与安全诉求并重下，绿色低碳与战略韧性的协同问题日益凸显。面对持续增强的不确定性，应通过区域协同、数字化与绿色化转型及国际治理机制的健全，构建兼顾效率、安全与可持续发展的新型供应链体系。

（4）地外建造系统工程管理

地外建造是指在外层空间及其他天体上构建适宜人类生存的空间环境及其配套基础设施。地外建造面临着与地球不同的大气、重力、温度、辐射、磁场、震动等极端环境条件是复杂的技术—社会系统工程，更是世界科技前沿与大国科技竞争的制高点。地外建造系统工程管理，是在地外建造重大工程任务中开展的跨学科、全生命周期的综合性管理活动，支撑实现地外建造科学与工程目标的顶层规划与系统决策优化，并形成面向地外极端环境建造系统的工程管理新范式。目前，国内外主要围绕地外建造系统工程领域“为何建”“建什么”“何时建”“怎么建”等基础前沿问题，开展了地外建造战略目标体系、方案论证、选址规划、结构设计、材料制备、建造工艺及装备的基础科学与关键技术研究。随着人工智能与航天科技的快速发展，地外建造系统工程管理正逐步转向数字孪生模型驱动与智能决策优化新范式，从而解决多目标、多任务、多主体以及极端环境不确定性带来的巨大挑战。研究重点包括地外建造全生命周期体系工程集成建模理论、地外建造选址的多目标协同决策与优化方法、地外建造系统成本—能力—风险耦合机制、地外建造系统复杂管理任务柔性规划与协同调度方法等。展望未来，地外建造系统工程管理将面向世界科技前沿，与工程材料与科学、数学物理科学、地球科学、信息科学等跨领域综合交叉，逐步实现无人探测与载人任务深度融合、科学研究与资源利用一体推进、阶段探索与常态驻留有序衔接、地月空间与更远深空统筹布局等发展趋势。

（5）基于多模态（视觉—语言）大模型的人机协作智能制造

人机协作智能制造是指依托多模态大模型的语义理解与跨模态推理能力，使以人形机器人为

代表的新型制造系统能够理解人类意图并执行复杂制造任务，实现人与制造系统的自然交互和协同决策。这一范式突破了传统自动化依赖结构化指令的局限，有效提升了制造系统的柔性、智能化与自主性。当前研究重点主要体现在 4 个方面：① 基于大模型的人机协同任务规划，依托多模态大模型进行语义理解与层级任务分解，通过显式建模工艺规则、资源约束及安全边界生成可验证的执行方案，并在自然语言与视觉交互下实现人机协同决策闭环；② 语义驱动的人机协作任务执行，机器人基于视觉-语言-动作（VLA）模型解析任务语义并生成机器人动作，人类通过自然语言实时指导或修正，形成“人监督-机执行-人机协作”操作模式；③ 多工业智能体自适应协同控制，在任务分配基础上，结合强化学习与运筹优化实现去中心化控制与全局性能优化，结合自适应调整策略提高协作鲁棒性与柔性，从而支持产线级复杂任务的高效协同执行；④ 高保真仿真环境构建与快速训练，通过人类专家或生成式模型自动构建虚拟工厂生产场景，并结合高性能分布式计算加速多智能体策略学习与 Sim2Real 迁移，实现高保真、可扩展的快速仿真。未来，该领域将聚焦任务规划的可解释性与约束融合、语义操控的泛化与安全性、多智能体协同的自主优化，探索空间智能与具身智能深度耦合，推动制造模式由“人辅助机器”向“人机共生”演化。

（6）智能驾驶系统安全评估与管理

随着智能驾驶技术的快速发展与逐步落地应用，其安全性和可靠性的评估与管理体系成为智能驾驶车辆大规模普及的关键影响因素。相比于其他智能化生产设备，智能驾驶系统具备如下特点：一是应用场景复杂，涉及海量多模态人机交互决策过程，动态环境变量特征维度高；二是潜在应用市场基数大，道路交通事故伤亡率高，面对庞大的交通体量，再微小的事故率也难以容忍；三是系统构建与训练过程不透明，多依赖历史数据与黑箱神经网络，无法适应长尾极端驾驶情境，也难以显式地进行模型调节。近年来，针对智能驾驶系统安全评估与管理的研究取得了显著进展，主要包括：以增强车辆行驶环境建模为视角，利用深度学习等技术增强训练场景的丰富度和覆盖性；以模拟人类驾驶员主观风险识别能力为视角，结合驾驶员视觉注意力机制深入分析驾驶安全风险要素；以交通流运行特征为视角，评估特定智能驾驶系统对周围车辆运行的干扰等。当前研究虽已显著提升了智能驾驶系统的安全表现，但仍遵循经典研究范式，未能突破上述关键症结、引起质变。智能驾驶系统的未来发展趋势，将借助类神经计算技术、类脑芯片等新兴软硬件环境，跳出当前研究算法和硬件的局限，增强智能驾驶系统安全评估与管理的透明性及可理解性，最终实现智能驾驶安全的全方位提升。

（7）大数据生态系统与开放共享机制

大数据生态系统与开放共享机制前沿聚焦多源异构数据在“可用、可信、可计量、可追责”闭环中的流通与价值共创，重点关注领域包括数据要素市场建设、算法和模型与高质量行为数据及时空数据的协同机制、隐私计算与跨域合规以及大数据开放共享系统的韧性预警。核心科学问题聚焦于数据确权与数据分级分类标准、隐私计算与数据安全保障机制、数据共享与激励机制、可信流通与溯源技术等问题。这些问题正在由“单域聚合”转向“跨域数据+可信验证”，并吸收融合了遥感数据与社会经济行为数据，以支撑社会治理精细化与绿色转型。未来发展趋势包括

以下方面：① 技术融合与创新——多种技术融合促进大数据开放共享，发挥硬件最大处理能力，降低管理运维成本；② 跨域数据管理——建立企业、行业、城市等不同维度的跨域数据共享管理机制和管理系统是保障技术融合与创新落地的关键；③ 应用场景拓展——数据与应用进一步分离，实现数据要素化，数据以独立形态存在并通过数据服务为不同业务场景提供服务，提高数据复用性和共享性；④ 生态系统完善——建立健全数据共享与激励机制，通过政策引导、经济激励等方式，鼓励企业和机构积极参与数据共享，构建自组织数据共享生态系统。

（8）大模型情感感知与认知调控

大模型情感感知与认知调控是人工智能、认知科学与临床心理学的深度交叉前沿领域，其核心在于利用大规模预训练模型的表征学习与生成能力解码并调控人类情感认知过程，旨在突破传统心理学依赖主观报告和实验室范式的局限，建立可计算、可解释的新研究范式。该领域源于自然语言处理（NLP）中的情感分析，并随着 Transformer 架构与大模型技术的发展实现能力跃迁。研究路径从早期的文本情绪分类拓展至更复杂的社会认知建模与多模态分析。例如，基于数十万张面部数据训练的深度学习模型可精准识别大型队列（ $n=493$ ）中认知损伤相关的情绪动态；大语言模型能模拟不同人格结构下的心智化差异，揭示传统方法难以捕捉的认知模式。基于此，该前沿的研究方向包括但不限于：① 基于大模型的数字表型分析——从自然语言、语音、面部表情等多模态数据中提取情感与认知状态的生物标志物；② 情感认知的计算建模——利用大模型模拟人类复杂的社会认知过程，如共情、归因和心理理论；③ 生成式 AI 驱动的心理洞察及干预——开发自适应、个性化的 AI 治疗师或心理健康伴侣；④ 模型-大脑-社会价值观对齐——以人类福祉为中心，探究大模型内部表征与人脑情感信息处理神经活动模式之间的对应关系，推动大模型计算机制与机理主动对齐人类社会伦理、隐私及价值观。这一系列研究的协同推进，正在为情感感知与认知调控构建一个前所未有的、机制驱动的理解框架。该框架将计算模型揭示的行为模式系统性地锚定于其生物学基础——从关键神经环路的动态变化到全身生理系统的交互调节，例如从识别出与儿童攻击性显著相关（ $r=0.31$ ）且可在超千人样本中复制的脑网络连接模式，到洞察大语言模型类人行为中体现出的智能涌现模式，并进一步探究心智过程的因果机制，这种多层次的理解是发展新一代干预科学的基石。展望未来，该领域的技术突破将依赖于多模态信息的深度融合，同时大语言模型的可解释性、安全性与伦理规范将成为必须攻克的核心挑战，这些挑战根植于模型内在的偏见与数据隐私问题，直接关系到情感与认知调控的伦理边界。该领域的发展趋势正从通用模型转向领域特化与高度个体化的模型，并日益强调 AI 作为增强人类专家能力的人机协同范式。未来的应用场景将覆盖智能且精准化的心理咨询、临床诊断、自适应的数字疗法、大规模公共心理健康监测等多个方面，将深刻变革我们理解和调控人类情感与认知的方式。

（9）平台型企业社会责任生态化治理

平台型企业社会责任生态化治理是数智经济时代的关键议题，其核心在于应对平台型企业社会责任的广域性、纠缠性、隐蔽性和动态性。平台型企业的发展催生了数智服务、智慧医疗、数字金融、电子商务与社交媒体等多种新业态，同时也带来了算法偏见、数据泄露和虚假信息传播等社会责任问题。在治理过程中，责任主体（包括政府、平台、员工、消费者、社区、服务提供

商、算法工程师和智能机器人)类型多样、作用广泛、影响深远;生态系统覆盖大规模多元化个体或组织,交互复杂、状态异质、逻辑异构,导致数据漏洞与虚假信息难以识别,人机权责关系模糊,传统企业社会责任研究难以适应此类复杂治理需求。当前研究前沿聚焦于解构平台社会责任的内涵与演化规律以构建评价体系,探究多主体责任交互机制以明确角色定位,探索数智场景下的治理路径以应对动态挑战,并强化应急响应机制以提升治理韧性与自适应能力。随着人工智能与大模型等技术发展,治理将趋于科学化与精准化:技术可增强算法透明性与数据溯源能力,从源头管控风险;多元协同的多层次治理网络有助于抑制风险扩散。平台型企业社会责任生态化治理将推动治理实践落地,提升效能,助力数智经济可持续发展。研究主要包括两方面:一是平台型企业社会责任的内涵解构与演化规律,需系统分析其多维度、跨边界、多主体特征及动态演化机制;二是其生态系统与治理机制,需构建以数据与算法为纽带、多元主体协同的动态治理结构,并通过技术-制度-协同三元路径综合推进,以提升治理韧性与可持续性。

(10) 智能体时代的网络治理机制研究

随着互联网时代的持续演进,网络治理成为推进网络强国战略、维护国家安全与发展的重要工作。尤其在当前人工智能技术深度融入社会生产生活的时代,聊天机器人、智能助手、智能推荐系统等人工智能体不断推动人类社会智能化水平的提升,同时也为网络治理带来了多方面的挑战。一方面,传统监管模式难以适应如今人工智能生成信息与真实信息混杂的复杂信息传播环境,治理能力与技术进步之间存在明显差距;另一方面,人工智能体的不正当利用会加剧信息安全风险、虚假信息传播乱象、应用伦理失范等问题,威胁公众舆论导向、社会稳定与政治安全。目前,针对人工智能体参与环境下的网络治理,相关技术研究聚焦于增强人工智能体的可解释性、采用加密技术保障数据隐私、强化其交互与应用安全性、提升系统对抗攻击的鲁棒性等方向。随着各国人工智能政策的大规模出台,全球人工智能治理进入新阶段。面向人工智能体时代的未来研究,在宏观政策层面,应聚焦于人工智能时代下网络治理的路径与干预策略,完善针对人工智能体的网络安全监管政策,建立科学的人工智能体安全评估与伦理评估双重框架,构建“人类主导、人机协同”的新型网络治理范式和开放包容的国际网络治理合作模式;在微观技术层面,需进一步提升人工智能体的鲁棒性,完善不同场景下人工智能体模型的交互与应用协议,制定人工智能体的可信性评估指标和标准化基准;同时,应积极探索区块链技术支持、分布式人工智能体赋能的社会网络系统实现路径和落地应用,从而构建兼顾人类利益与人类信赖的人工智能时代网络环境,推动人工智能技术更好地服务于人类社会。

(11) 城市存量空间更新管理与决策

城市存量空间更新管理与决策的核心在于通过对城市既有空间资源的再利用、系统改造与精细治理,优化城市空间结构,推动城市可持续高质量发展。当前,我国城镇化已进入由增量扩张向存量提质转变的中后期阶段,前序的大规模增量开发在改变城市面貌的同时也带来了建设用地紧缺、资源分配不均和生态环境恶化等问题,城市存量空间更新改造已成为新时期我国经济增长的重要抓手和城市可持续高质量发展的基本路径。该领域研究主要聚焦以下方向:一是支撑服务“城市体检”,通过遥感、无人机、地理信息系统(GIS)等技术手段实现存量空间的状态诊断

与功能评估,辅助城市更新的前置决策与精细化策略制定;二是聚焦多元利益主体之间的互动机制,研究政府、市场与公众等主体之间的角色分工、协作关系及利益协调机制,构建适应城市更新复杂系统情境的协同治理模型;三是深入探索数字孪生、人工智能、模拟仿真等新兴技术在规划、实施与监管环节中的集成应用,以增强存量空间更新的数智化水平与可操作性;四是系统开展城市存量空间更新的投融资机制研究,围绕项目收支、风险管理、利益分配等议题优化城市更新项目的投融资决策,减轻政府财政压力、调动社会资本积极性,实现可持续资金保障。从发展趋势来看,城市存量空间更新已从物理空间的单一改造转向社会空间治理的系统性重塑,存量空间更新的重心日益聚焦以街区、社区为单元的控制性详细规划和基层治理问题。未来,该领域研究将进一步聚焦治理体系优化、空间权属整合与基层参与机制等核心环节,并将人民城市、绿色低碳、韧性城市与包容发展等理念深度嵌入,推动城市存量空间更新管理与决策实践走向智慧化与可持续发展,助力我国城市治理体系和治理能力现代化建设。

10.1.2 Top 4 工程研究前沿重点解读

10.1.2.1 智能地空协同的低空交通与物流

低空交通与物流的发展大体经历了3个阶段。最初,低空飞行器主要应用于农业植保、巡检与测绘等场景,推动了无人机产业化的起步。随后,随着电池、电机与智能控制技术的提升,无人机物流配送等应用场景逐渐走向实际运营,使低空交通逐步具备规模化运行与多场景应用的条件。近年来,eVTOL的出现使低空出行成为可能。目前的发展趋势是从单一功能走向多元融合,形成集出行、物流、巡检、应急与观光等多样化应用于一体的智能地空协同体系,并与地面交通深度衔接,构建综合城市立体交通网络。

现阶段,智能地空协同的低空交通与物流相关研究主要集中在以下3个方面:①面向低空场景的智能管控机制,强调通过地空一体化调度、动态路径优化与冲突消解,实现低空交通与物流网络的安全有序协同运行;②面向智慧物流配送的多式联运体系,聚焦无人机与地面车辆的任务分配与路径协同,推动高效、灵活的末端配送模式创新;③面向基础设施与服务体系建设,围绕起降场、充电补能与信息平台的规划运营,构建支撑大规模低空交通与物流应用的协同服务网络。目前,智能地空协同相关研究正处于从物流配送向多场景应用探索的起步阶段,还存在诸多挑战需要解决。例如:地空多源数据的实时融合与动态管控机制尚不完善,难以在低空航路密集、任务多样并行的环境下兼顾安全性与运行效率,同时基础设施标准、监管政策与应急保障体系仍待健全。目前,该领域正处于关键发展期,是未来构建综合立体交通物流系统的基础。

“智能地空协同的低空交通与物流”工程研究前沿中核心论文数排名前三位的国家是中国、美国和韩国(表10.3),核心论文主要产出机构为乔治·华盛顿大学、爱荷华州立大学和佐治亚理工学院(表10.4)。从主要国家间的合作网络来看,中国和美国与其他国家间的合作较多(图10.1)。从主要机构间的合作网络来看,乔治·华盛顿大学与爱荷华州立大学的合作较为紧密(图10.2)。由表10.5可以看出,中国 and 美国的施引核心论文数排在前两位。由表10.6可以看出,施引核心论文数排名靠前的机构是北京航空航天大学 and 南洋理工大学。

表 10.3 “智能地空协同的低空交通与物流”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	15	35.71	791	52.73	2021.3
2	美国	6	14.29	432	72.00	2021.8
3	韩国	5	11.90	189	37.80	2022.2
4	英国	4	9.52	197	49.25	2022.2
5	新加坡	3	7.14	169	56.33	2021.7
6	意大利	3	7.14	159	53.00	2021.3
7	沙特阿拉伯	3	7.14	80	26.67	2022.3
8	挪威	2	4.76	200	100.00	2021.0
9	荷兰	2	4.76	138	69.00	2021.0
10	加拿大	2	4.76	94	47.00	2023.0

表 10.4 “智能地空协同的低空交通与物流”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	乔治·华盛顿大学	4	9.52	110	27.50	2021.5
2	爱荷华州立大学	4	9.52	110	27.50	2021.5
3	佐治亚理工学院	2	4.76	247	123.50	2021.0
4	南洋理工大学	2	4.76	146	73.00	2021.0
5	代尔夫特理工大学	2	4.76	138	69.00	2021.0
6	高丽大学	2	4.76	87	43.50	2022.0
7	阿卜杜拉国王科技大学	2	4.76	62	31.00	2022.0
8	弗吉尼亚理工大学	2	4.76	42	21.00	2021.0
9	卡迪夫大学	1	2.38	138	138.00	2021.0
10	福建农林大学	1	2.38	138	138.00	2021.0

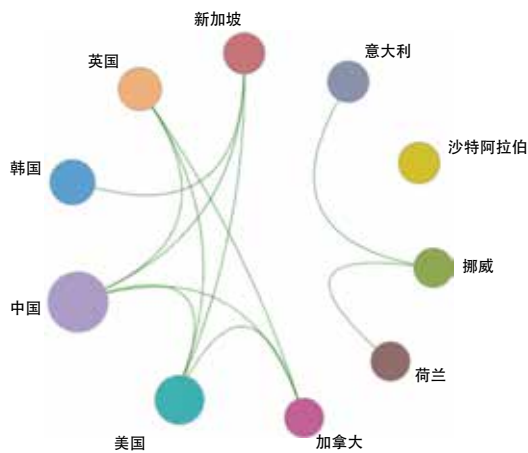


图 10.1 “智能地空协同的低空交通与物流”工程研究前沿主要国家间的合作网络

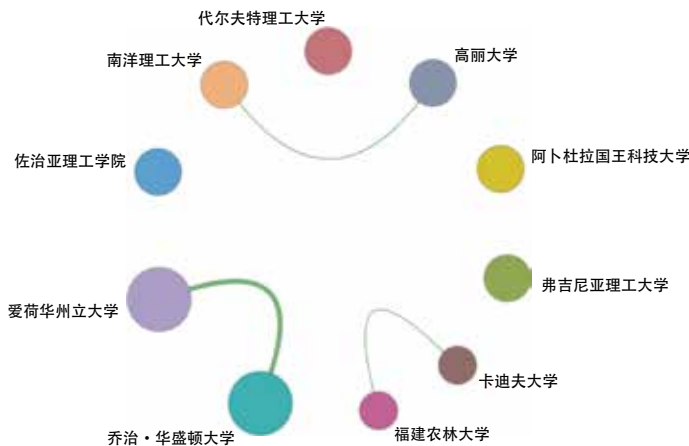


图 10.2 “智能空地协同的低空交通与物流”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 10.5 “智能空地协同的低空交通与物流”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	568	33.55	2023.5
2	美国	321	18.96	2023.4
3	韩国	167	9.86	2023.4
4	英国	104	6.14	2023.6
5	意大利	92	5.43	2023.2
6	德国	84	4.96	2023.3
7	澳大利亚	81	4.78	2023.3
8	印度	75	4.43	2023.5
9	西班牙	70	4.13	2023.3
10	加拿大	69	4.08	2023.5

表 10.6 “智能空地协同的低空交通与物流”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	北京航空航天大学	43	14.10	2023.6
2	南洋理工大学	37	12.13	2023.2
3	香港理工大学	33	10.82	2023.6
4	清华大学	32	10.49	2023.5
5	中国科学院	27	8.85	2023.6
6	皇家墨尔本理工大学	25	8.20	2023.6
7	南京航空航天大学	24	7.87	2023.6
8	代尔夫特理工大学	22	7.21	2023.1
9	北京理工大学	21	6.89	2023.6
10	韩国中央大学	21	6.89	2023.3

图 10.3 展示了“智能地空协同的低空交通与物流”工程研究前沿的发展路线，从 2020 年到 2035 年逐步实现由无人机局部应用到大规模人机融合的系统升级。其重点发展方向包括：面向低空出行与物流的安全高效协同运行，推动 eVTOL 与无人机在多场景下的大规模应用，并实现与地面交通的深度融合。发展趋势上，系统将经历从探索性应用、规模化推广到全面融合的过程，体现出多元场景、跨领域协作的潜力。未来，系统在城市交通、物流配送、公共安全与应急响应等领域均有广阔应用前景，发展潜力巨大。



图 10.3 “智能地空协同的低空交通与物流”工程研究前沿的发展路线

10.1.2.2 低碳算力服务系统分布式优化

随着全球数字化浪潮的到来，以及物联网、人工智能和未来通信技术的发展，全球数据量呈指数级增长，驱动了对算力服务的巨大需求。然而，传统集中式云计算模式在满足需求的同时，面临高能耗、高时延等问题，也给实现“双碳”目标带来严峻挑战。在这一背景下，低碳算力分布式系统应运而生。该系统通过分布式架构组织算力资源，优先使用清洁能源，采用分布式协同与优化调度等策略，致力于实现高计算效能与低碳排放双重目标。作为下一代计算基础设施，低碳算力分布式系统已成为实现数字经济发展与绿色转型“双赢”的关键路径。

中国算力基础设施的发展经历了从本地化信息中心向集中式数据中心的演进，近年来又在国家“东数西算”战略的推动下，进一步发展为云-边-端协同的智能化分布式算力体系，成为缓解算力供需矛盾的重要手段。目前，国际上主要经济体均在加快构建算力与能源融合的基础设施，探索通过智能调度、绿色电力消纳与能效标准提升，实现算力增长与碳排放的解耦。

进入“低碳协同”新阶段，该前沿的研究边界也从单一的数据中心内部节能扩展至将可再生能源供给、电网碳强度、碳交易市场等外部环境因素纳入优化模型的复杂系统。由于系统的高度动态性与异构性，以深度强化学习为代表的人工智能技术被广泛应用，以实现对复杂环境的在线感知和



自适应决策。这一新兴前沿方向发展迅速，影响力高，核心论文的平均出版年为 2022 年，篇均被引频次高达 65.20 次，体现出学术界的高度关注。该前沿的研究方向主要聚焦于：① 面向多目标协同的低碳算力服务系统优化调度方法，旨在开发更高效的分布式算法，应用强化学习、博弈论等方法，在能耗、碳排放、服务延迟和成本等多个冲突目标间取得最优权衡；② 探索算力系统与分布式可再生能源的深度融合与协同调度机制，研究基于能源价格和电网碳强度的动态任务迁移策略，最大化绿色能源利用率；③ 设计兼顾效率与隐私的低碳算力服务市场机制，运用博弈论等方法，在保护数据隐私的同时提升分布式优化算法的自适应性及鲁棒性，并引导产业链上下游积极参与绿色转型；④ 构建科学、完善的算力度量与能耗监测体系，为低碳优化提供量化依据。

“低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家和机构分别如表 10.7 和表 10.8 所示。该前沿的全球性挑战特征也反映在科研合作网络中（图 10.4 和图 10.5）。数据显示，中国和美国是该领域研究的绝对引领者，处于国际合作网络的中心，并与英国、印度、韩国、新加坡等国建立了广泛的合作。在机构层面，中国科学院、清华大学、电子科技大学、新泽西理工学院等国内外优势科研力量作出了重要贡献，形成了多元化、多中心的研究格局，并通过紧密合作共同推进理论与技术创新。该前沿中施引核心论文的主要产出国家和机构分别如表 10.9 和表 10.10 所示。

表 10.7 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	25	51.02	1 815	72.60	2021.9
2	美国	11	22.45	839	76.27	2021.5
3	印度	8	16.33	478	59.75	2022.1
4	英国	7	14.29	587	83.86	2021.6
5	韩国	6	12.24	428	71.33	2022.3
6	澳大利亚	6	12.24	355	59.17	2022.0
7	巴基斯坦	4	8.16	257	64.25	2021.8
8	伊朗	3	6.12	193	64.33	2022.7
9	新加坡	3	6.12	177	59.00	2022.3
10	加拿大	3	6.12	164	54.67	2023.3

表 10.8 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	新泽西理工学院	3	6.12	263	87.67	2021.3
2	电子科技大学	2	4.08	178	89.00	2022.0
3	中国科学院	2	4.08	170	85.00	2022.0
4	伊斯兰堡 COMSATS 大学	2	4.08	158	79.00	2022.0
5	帝国理工学院	2	4.08	142	71.00	2021.5
6	江苏大学	2	4.08	137	68.50	2021.0
7	世宗大学	2	4.08	136	68.00	2023.5
8	新加坡国立大学	2	4.08	135	67.50	2022.0
9	墨尔本大学	2	4.08	129	64.50	2021.5
10	中南大学	2	4.08	126	63.00	2022.5

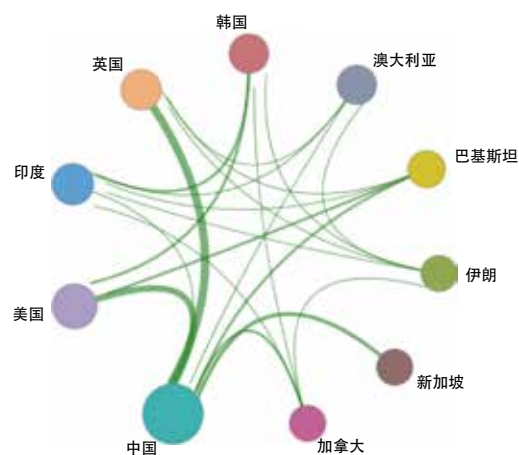


图 10.4 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿主要国家间的合作网络

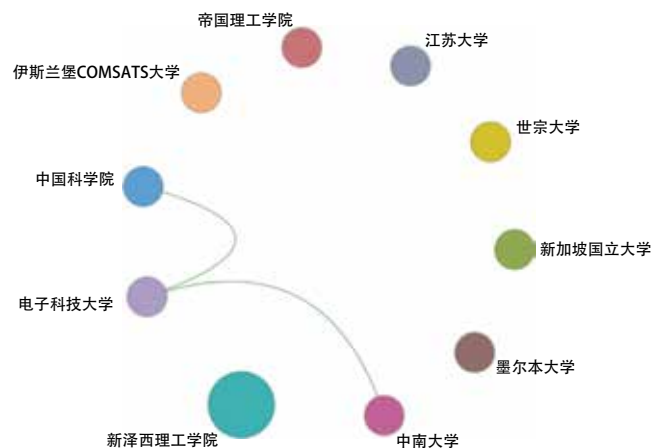


图 10.5 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 10.9 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	1 625	45.33	2023.4
2	印度	406	11.32	2023.3
3	美国	330	9.21	2023.2
4	英国	231	6.44	2023.4
5	沙特阿拉伯	193	5.38	2023.2
6	韩国	175	4.88	2023.2
7	澳大利亚	152	4.24	2023.2
8	加拿大	146	4.07	2023.3
9	伊朗	126	3.51	2023.4
10	巴基斯坦	109	3.04	2023.1



表 10.10 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	75	13.30	2023.4
2	清华大学	64	11.35	2023.6
3	电子科技大学	61	10.82	2023.5
4	北京邮电大学	59	10.46	2023.3
5	新泽西理工学院	46	8.16	2022.5
6	中南大学	45	7.98	2023.4
7	西安交通大学	45	7.98	2023.3
8	浙江大学	44	7.80	2023.3
9	华北电力大学	42	7.45	2023.6
10	东南大学	42	7.45	2023.2

图 10.6 展示了“低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿的发展路线，给出了 2020—2035 年的阶段性目标：从初步构建分布式低碳算力架构、提升能效比，到深度融合绿色能源、实现全生命周期生态构建，并最终推动低碳服务大规模应用。主要挑战包括算力与可再生能源时空不匹配、资源分布不均、安全风险与市场机制不完善。研究重点方向涵盖算力与能源系统深度耦合、多元主体下的调度方法与市场机制设计。关键共性技术涉及分布式优化理论、智能化调度、算力路由与协同计算等。保障措施则强调政策引导、科研投入、国际合作与人才培养。图 10.6 系统呈现了低碳算力系统从理论探索到规模化应用的发展路径。

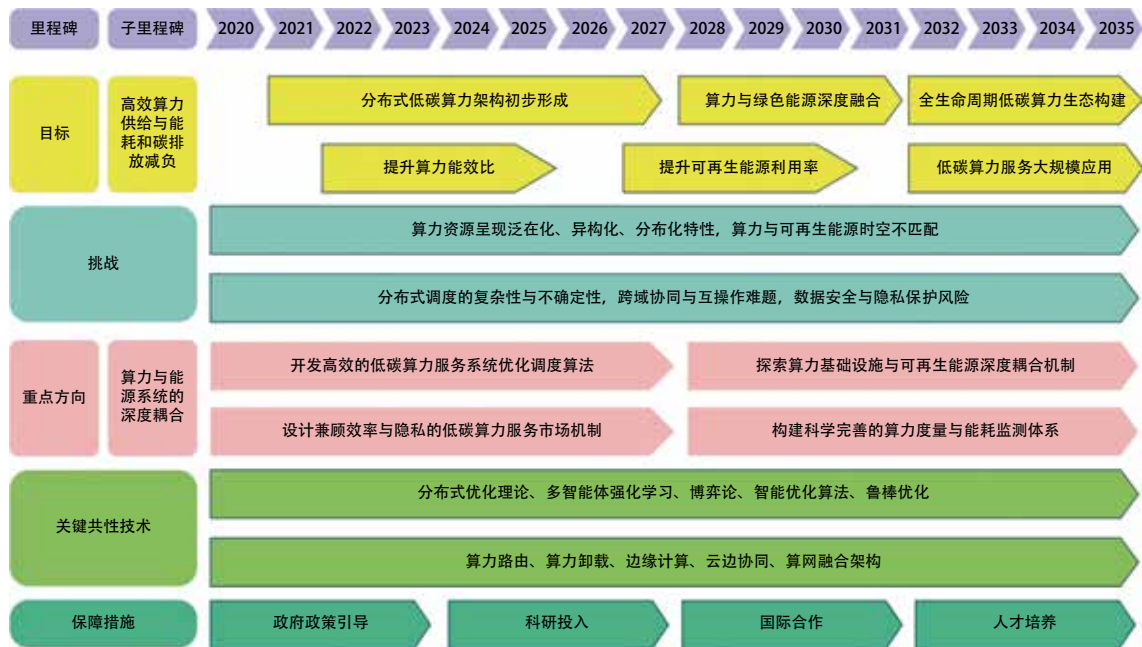


图 10.6 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿的发展路线

10.1.2.3 地缘政治风险下的供应链重构

地缘政治风险下的供应链重构已逐渐成为工程领域的重要研究前沿，其核心在于通过科学方法揭示全球产业链的复杂性，关注系统性脆弱性及其在不确定冲击下的演化机制，并在制度与技术层面提出优化方案。该领域研究经历了3个主要阶段：第一阶段为萌芽期，主要聚焦于风险识别与应急响应，强调利用冗余库存、多渠道采购和供应多样化来降低突发风险；第二阶段始于2008年国际金融危机之后，学术界逐渐形成系统视角，引入投入产出模型、复杂网络建模和系统动力学方法，量化跨行业、跨区域的联动对冲冲击的放大效应；第三阶段则是近年来形成的战略化与制度化趋势，研究关注从整体结构调整、区域协作转向国际规则设计等深层问题，体现了供应链议题从企业管理走向国家战略和全球治理的转变。

现阶段研究的核心方向围绕4个层面展开：其一，在风险感知与预测方面，大数据挖掘、自然语言处理与机器学习被广泛用于构建风险指数与舆情监测系统，实现对地缘政治事件的敏感捕捉与动态预警；其二，在网络结构与系统优化方面，研究者应用复杂网络指标、可计算一般均衡模型以及多区域投入产出框架，揭示产业链的中心性、冗余度和脆弱环节，为多元化布局与去中心化提供量化支撑；其三，在韧性评估与治理机制上，学术界通过多目标优化、系统动力学模拟与博弈分析，研究战略储备、区域协作机制及跨境制度安排对供应链稳定性的影响；其四，在数字化与绿色化转型中，区块链、物联网和碳核算逐步被纳入供应链治理，旨在提高透明度、实现低碳追踪并推动绿色金融介入。

从科研产出看，该前沿中核心论文数排名前三的国家是中国、美国和英国（表10.11），主要产出机构包括中国科学院、西安电子科技大学和重庆大学等（表10.12）。国家合作网络显示，中国和美国与其他国家联系最为紧密，英国也保持较高合作度（图10.7）；在机构合作层面，中国科学院与西安电子科技大学、新加坡国立大学、南京师范大学及江苏地理信息资源开发与应用协同创新中心等建立了密切合作（图10.8）。施引核心论文方面，中国排名第一、英

表 10.11 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	35	49.30	285	8.14	2023.6
2	美国	11	15.49	115	10.45	2023.5
3	英国	9	12.68	178	19.78	2023.1
4	德国	9	12.68	70	7.78	2023.6
5	加拿大	4	5.63	30	7.50	2023.2
6	荷兰	4	5.63	23	5.75	2023.8
7	日本	3	4.23	51	17.00	2022.3
8	韩国	3	4.23	4	1.33	2023.3
9	芬兰	2	2.82	55	27.50	2023.0
10	新加坡	2	2.82	38	19.00	2023.5



表 10.12 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	6	8.45	111	18.50	2023.2
2	西安电子科技大学	2	2.82	58	29.00	2023.0
3	重庆大学	2	2.82	39	19.50	2022.5
4	新加坡国立大学	2	2.82	38	19.00	2023.5
5	江苏地理信息资源开发与应用协同创新中心	2	2.82	27	13.50	2023.5
6	南京师范大学	2	2.82	27	13.50	2023.5
7	世界银行	2	2.82	18	9.00	2024.0
8	南京大学	2	2.82	10	5.00	2024.0
9	北京大学	2	2.82	6	3.00	2024.0
10	上海大学	2	2.82	6	3.00	2024.0

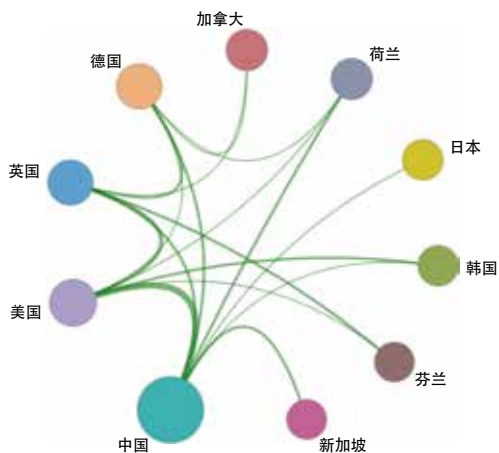


图 10.7 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿主要国家间的合作网络

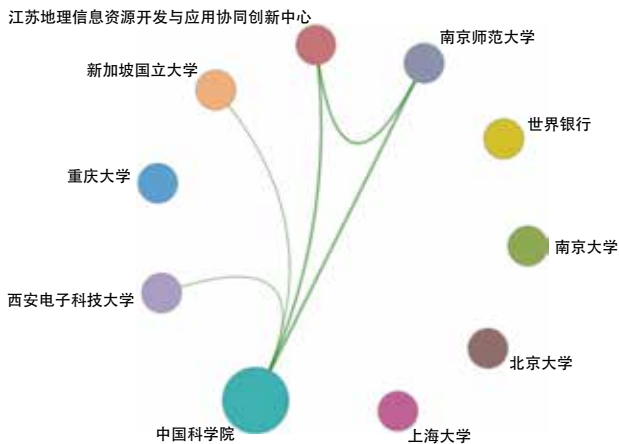


图 10.8 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿主要机构间的合作网络

国位居第二（表 10.13），其中中国科学院、香港理工大学和青岛大学等为代表性高影响力机构（表 10.14），这表明该前沿已形成以中国为核心、辐射多国的研究格局，国际合作与竞争并存。

表 10.13 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	258	43.43	2023.7
2	英国	70	11.78	2023.8
3	美国	62	10.44	2023.6
4	德国	38	6.40	2023.4
5	意大利	34	5.72	2023.7
6	澳大利亚	28	4.71	2023.6
7	印度	28	4.71	2023.6
8	波兰	20	3.37	2023.5
9	荷兰	19	3.20	2023.7
10	法国	19	3.20	2023.8

表 10.14 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	20	21.05	2023.7
2	香港理工大学	9	9.47	2023.9
3	青岛大学	9	9.47	2023.7
4	复旦大学	9	9.47	2023.4
5	九州大学	9	9.47	2023.7
6	重庆大学	8	8.42	2024.0
7	西安交通大学	7	7.37	2023.9
8	清华大学	6	6.32	2023.3
9	华东师范大学	6	6.32	2023.8
10	中国地质大学	6	6.32	2023.5

图 10.9 为“地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿的发展路线。在全球化与地缘政治不确定性持续叠加的背景下，该前沿将依次经历风险识别与韧性提升、网络优化与区域协同、智能化管理与绿色化转型、全球治理与制度创新 4 个阶段演进。其发展趋势表现为由风险应对向结构优化、由区域协同向全球治理的递进。

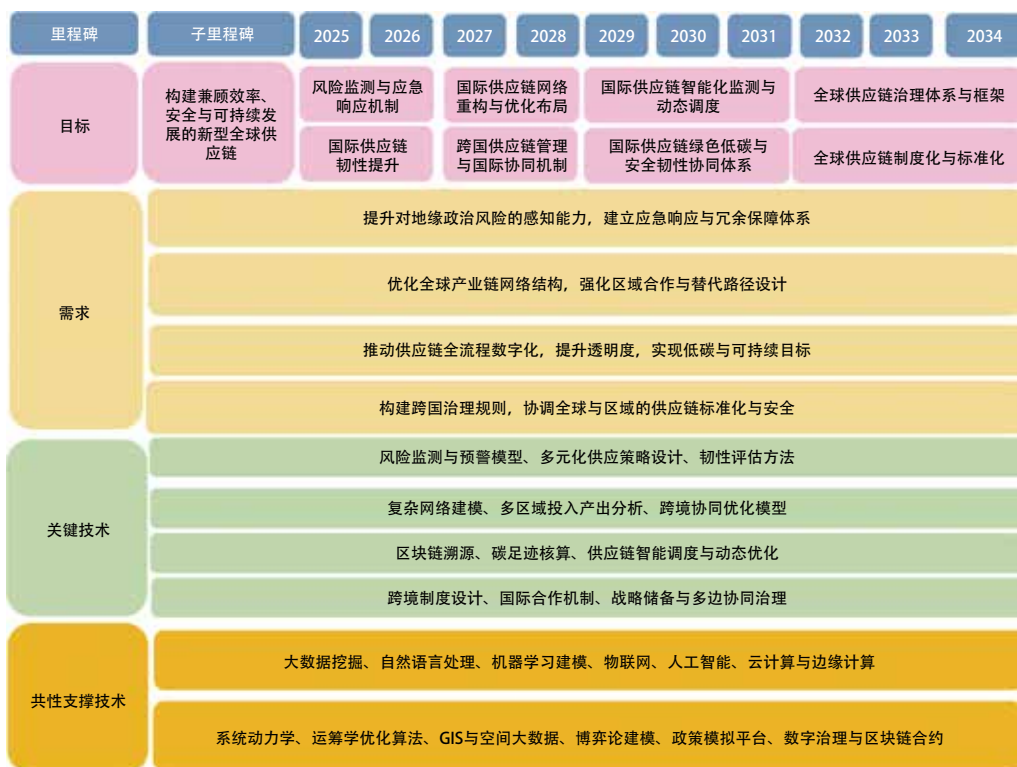


图 10.9 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿的发展路线

10.1.2.4 地外建造系统工程管理

早在人类开展深空探索之前，地外建造的设想就已存在，但受限于技术发展水平，长期停滞在概念与构想阶段。随着深空科学与深空探测技术的高质量发展，人类深空探测正处于从“认识”转向“认识与利用并重”的重大转折阶段，新世纪的探测任务愈发体现出通过系统规划与分步实施，建设永久性地外基础设施的战略意图。随着地外建造系统规模不断扩大、技术复杂度持续上升，仅依靠技术突破已难以实现工程目标的全生命周期管控，地外建造领域的研究视角已从纯粹的技术创新转向系统工程管理层面。

现阶段地外建造系统工程管理研究重点主要集中在以下 4 个方面：① 地外建造全生命周期体系工程集成建模理论——构建复杂系统工程模型驱动的地外建造协同论证方法，研究地外建造系统工程模型的传递与应用机制，并实现地外建造多领域知识与机理的统一建模；② 地外建造选址的多目标协同决策与优化方法——探索广义随机过程下地外建造选址因素的时空分布规律，建立欠观测 / 不完备遥感观测信息的时空匹配与动态融合方法，实现面向地外建造选址的多主体多目标合作博弈决策；③ 地外建造系统成本 - 能力 - 风险耦合机制——研究系统能力与动态边际成本的非线性耦合机制，建立技术成熟度驱动的地外建造可行性边界动态评估方法；④ 地外建造系统复杂管理任务柔性规划与协同调度方法——研究考虑层次任务、复杂约束、不确定性、人在回路的地外建造作业任务规划。

面向未来，地外建造系统工程管理研究将围绕以下战略趋势向纵深发展：一是构建无人探测

与载人任务深度融合的系统工程管理范式，发展人机功能分配与协同决策的管理模式；二是建立科学研究与资源利用一体化推进的管理框架，发展将科学探测活动与原位资源利用工程活动紧密结合的需求对接、任务协同与效益评估方法；三是形成支撑阶段探索迈向常态驻留的体系适应性管理能力，突破适用于技术路线迭代与系统功能扩展的柔性架构设计；四是研究支持地月空间与更远深空统筹布局的体系工程管理机制，探索跨任务、多基地的体系化协同管理模式。围绕上述方向，该领域将与工程材料与科学、数学物理科学、地球科学、信息科学等前沿交叉融合，发展系统建模、智能决策和韧性规划等新理论与新方法，最终形成服务于地外可持续活动的系统工程管理框架。

“地外建造系统工程管理”工程研究前沿中核心论文数排名前三的国家是中国、美国和俄罗斯（表 10.15），主要产出机构包括中国科学院、中国矿业大学、哈尔滨工业大学等（表 10.16）。从主要国家间的合作网络来看，中国与其他国家间的合作较为密切（图 10.10）；从主要机构间的合作网络来看，中国科学院与清华大学、中国空间技术研究院、北京航空航天大学之间的合作较为密切（图 10.11）。由表 10.17 可以看出，施引核心论文数排名第一的国家为中国，美国排第二。由表 10.18 可以看出，施引核心论文数排名靠前的机构是中国科学院、哈尔滨工业大学和中国矿业大学。

图 10.12 展示了“地外建造系统工程管理”工程研究前沿的发展路线。在应对极端环境、多目标多任务协同及全生命周期高效管控等重大需求驱动下，该领域致力于突破体系工程集成建模、多目标协同决策、成本－能力－风险耦合、柔性规划与调度等关键技术。通过基础科学与关键技术、管理科学与技术、基础设施三大支柱的共性支撑，最终推动实现无人探测与载人任务深度融合、科学研究与资源利用一体推进、阶段探索与常态驻留有序衔接、地月空间与更远深空统筹布局的战略目标，形成适应地外可持续活动的系统工程管理新范式。

表 10.15 “地外建造系统工程管理”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	278	55.60	335	1.21	2023.8
2	美国	58	11.60	49	0.84	2023.9
3	俄罗斯	44	8.80	37	0.84	2023.8
4	印度	21	4.20	23	1.10	2024.0
5	澳大利亚	18	3.60	16	0.89	2024.0
6	意大利	16	3.20	17	1.06	2023.8
7	德国	13	2.60	13	1.00	2024.0
8	韩国	12	2.40	17	1.42	2024.0
9	英国	12	2.40	16	1.33	2023.7
10	沙特阿拉伯	11	2.20	18	1.64	2023.7



表 10.16 “地外建造系统工程管理”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例 /%	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	40	8.00	45	1.12	2023.9
2	中国矿业大学	24	4.80	28	1.17	2023.8
3	哈尔滨工业大学	17	3.40	17	1.00	2023.9
4	华中科技大学	17	3.40	12	0.71	2023.9
5	东南大学	12	2.40	17	1.42	2023.9
6	北京航空航天大学	12	2.40	14	1.17	2023.8
7	武汉理工大学	11	2.20	16	1.45	2023.8
8	俄罗斯科学院	11	2.20	8	0.73	2023.9
9	中国空间技术研究院	9	1.80	13	1.44	2023.7
10	清华大学	8	1.60	13	1.62	2024.0

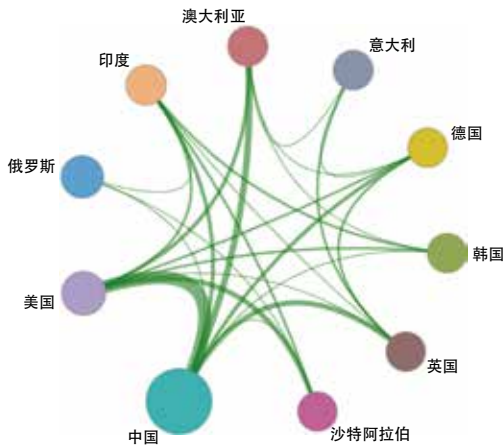


图 10.10 “地外建造系统工程管理”工程研究前沿主要国家间的合作网络

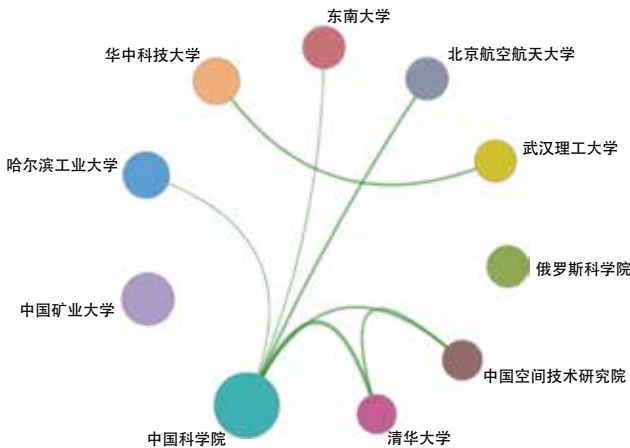


图 10.11 “地外建造系统工程管理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 10.17 “地外建造系统工程管理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国	619	54.44	2023.6
2	美国	132	11.61	2023.5
3	俄罗斯	68	5.98	2023.6
4	沙特阿拉伯	55	4.84	2023.4
5	印度	47	4.13	2023.6
6	意大利	44	3.87	2023.3
7	英国	42	3.69	2023.4
8	澳大利亚	41	3.61	2023.7
9	德国	34	2.99	2023.5
10	土耳其	29	2.55	2023.4

表 10.18 “地外建造系统工程管理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例 /%	平均施引年
1	中国科学院	72	19.89	2023.7
2	哈尔滨工业大学	51	14.09	2023.5
3	中国矿业大学	40	11.05	2023.6
4	华中科技大学	35	9.67	2023.8
5	同济大学	31	8.56	2023.1
6	东南大学	29	8.01	2023.6
7	北京航空航天大学	26	7.18	2023.2
8	武汉大学	20	5.52	2023.8
9	中国空间技术研究院	20	5.52	2023.4
10	武汉理工大学	19	5.25	2023.4

里程碑	子里程碑	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
目标	支撑实现地外建造科学与工程目标的顶层规划与系统决策优化	单机自主，仿真预演				动态优化，人在回路			自主决策，体系协同		
		实现关键装备自动化作业，建立数字孪生静态模型进行方案验证				形成人机交互、动态决策的管理模式			跨任务、多基地的体系化自主协同管理		
需求	应对极端环境（如微重力、高辐射、极端温度、真空、震动等）下的建造挑战										
	解决地外建造系统工程中多目标、多任务、多主体协同带来的复杂性与不确定性										
	实现地外建造全生命周期的高效管控，克服地外建造技术复杂度高、系统规模大的管理难题										
关键技术	地外建造全生命周期体系工程集成建模理论										
	地外建造选址的多目标协同决策与优化方法										
	地外建造系统成本-能力-风险耦合机制										
	地外建造系统复杂管理任务柔性规划与协同调度方法										
共性支撑技术	地外建造战略目标体系、方案论证、选址规划、结构设计、材料制备、建造工艺及装备等基础科学与关键技术										
	体系工程建模理论、智能决策优化方法、多主体协同博弈机制、技术成熟度管理与风险控制体系等管理科学与技术										
	数字孪生平台、地外环境模拟实验舱及测试场、深空通信与导航设施、在轨服务与运输设施等基础设施										

图 10.12 “地外建造系统工程管理”工程研究前沿的发展路线



10.2 工程开发前沿

10.2.1 Top 11 工程开发前沿发展态势

在工程管理领域，本年度 11 个全球工程开发前沿分别是：“大模型赋能城市数字治理的方法与技术”“基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”“人－机－环共融的工业数字孪生系统”“基于多智能体的工程风险识别系统”“基于多智能体的生产线质量诊断平台”“AI 赋能的学习平台研发”“城市微出行系统多模式整合与优化”“面向边端高效推理的大模型轻量化”“基于大模型的工业排产系统”“面向国家水网的跨水系连通工程智能调控技术”“长大线性工程几何模型轻量化显示技术与平台”。其核心专利情况见表 10.19 和表 10.20。其中，“大模型赋能城市数字治理的方法与技术”“基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”“人－机－环共融的工业数字孪生系统”为重点解读的前沿，后文对其目前发展态势以及未来趋势进行详细解读。

(1) 大模型赋能城市数字治理的方法与技术

大模型赋能城市数字治理的方法与技术是指利用大规模预训练模型（如大语言模型等先进人工智能模型）来提升城市管理和公共服务数字化、智能化水平的新兴方向。所谓城市数字治理，涵盖城市交通、空间规划、公共安全、医疗健康、环境管理等诸多领域，引入大模型意味着城市治理系统能够从海量、多源的城市数据中自主学习知识，进行复杂情景的理解与决策支持，为管理者提供更智能的工具。例如，大模型可用于城市风险预测、智能决策辅助、城市运行状态分析与优化等。相较于传统依赖经验和小模型的方案，基于大模型的方法具备更强的泛化和推理能力，能够应对城市治理中高度复杂、多变的问题场景。近年来，得益于深度学习算法和算力的突破，

表 10.19 工程管理领域 Top 11 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用数	平均被引数	平均公开年
1	大模型赋能城市数字治理的方法与技术	22	17	0.77	2024.0
2	基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术	84	85	1.01	2023.8
3	人－机－环共融的工业数字孪生系统	24	71	2.96	2023.0
4	基于多智能体的工程风险识别系统	24	43	1.79	2023.1
5	基于多智能体的生产线质量诊断平台	99	257	2.60	2022.7
6	AI 赋能的学习平台研发	66	340	5.15	2022.6
7	城市微出行系统多模式整合与优化	65	274	4.22	2022.3
8	面向边端高效推理的大模型轻量化	44	90	2.05	2023.7
9	基于大模型的工业排产系统	100	188	1.88	2023.9
10	面向国家水网的跨水系连通工程智能调控技术	30	28	0.93	2022.3
11	长大线性工程几何模型轻量化显示技术与平台	34	70	2.06	2022.6

表 10.20 工程管理领域 Top 11 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	大模型赋能城市数字治理的方法与技术	0	0	0	0	1	21
2	基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术	0	1	0	2	9	72
3	人-机-环共融的工业数字孪生系统	0	0	4	3	6	11
4	基于多智能体的工程风险识别系统	0	1	1	3	9	10
5	基于多智能体的生产线质量诊断平台	5	9	8	12	21	44
6	AI 赋能的学习平台研发	1	4	7	16	17	21
7	城市微出行系统多模式整合与优化	5	7	9	8	15	21
8	面向边端高效推理的大模型轻量化	0	0	0	1	12	31
9	基于大模型的工业排产系统	0	0	0	0	9	91
10	面向国家水网的跨水系连通工程智能调控技术	3	3	1	6	9	8
11	长大线性工程几何模型轻量化显示技术与平台	1	4	5	4	3	17

该方向受到广泛关注并快速发展。总体来看,“大模型+城市治理”的融合应用正引领智慧城市建设的新趋势,其研究方向涵盖城市规划决策智能化、基础设施与公共安全监测、公共服务个性化提升等方面。这一前沿的发展有望带动城市治理模式从经验驱动向数据智能驱动转变,实现由被动响应向主动预测、防范的跨越,对提升城市治理的科学性、精准性和智能化水平具有重大意义和广阔应用前景。

(2) 基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术

大语言模型 (large language model, LLM) 是由具有大量参数的人工神经网络组成的一类语言模型,通过自监督学习或半监督学习对海量文本进行预训练,并经过指令调优、人类反馈强化学习等过程优化而成。近年来,以 ChatGPT 为代表的 LLM 在技术上实现了快速进步和迭代,已成为人工智能领域具有变革性的技术,为工程建造领域带来了新的发展机遇。基于 LLM 的工程建造方案自动生成技术是指利用 LLM 强大的自然语言理解与生成能力,自动编制工程建造相关的各类技术文档,包括设计方案、施工组织设计、施工计划、专项安全施工方案、技术说明和管理方案等。其技术内涵在于将工程领域的专业知识(如规范标准、设计图纸、历史经验数据等)通过预训练或检索增强等方式融入模型,使其能够理解工程建造的需求、规范和约束条件,并据此生成符合工程逻辑、可读性强、结构化且可执行的方案文档。当前的主要研究方向包括:① 工程知识理解与表示,研究如何让 LLM 理解工程建造领域的专业知识、施工规范和多模态信息[如图纸、建筑信息模型(BIM)],为方案生成提供准确的语义基础;② 施工计划与调度自动生成,利用 LLM 根据项目信息生成任务分解、进度安排和资源配置方案;③ 约束驱动的方案生成,探索在成本、工期、安全、环境等多重约束条件下生成可执行的施工方案;④ 工程设计方案生成,在概念设计阶段用 LLM 探索创新性设计思路并评估可行性;⑤ 可解释性与工程可执行性优化,确保生成方案的透明性、可追溯性和实施可行性。发展趋

势上,该技术正朝着多模态理解、智能约束优化与自动化协作方向演进,有望颠覆传统以人工为主的工程方案编制模式。2022年 ChatGPT 问世后,全球迅速掀起将 GPT 等大模型应用于工程领域的热潮,涌现出千问、豆包、DeepSeek 等通用 LLM,以及面向工程建造的专用大模型平台(如上海建工“云工大模型”)。未来,通用模型与行业专用模型的深度融合,将进一步提升方案生成的专业性与适应性。通过与数字化施工系统的协同,可实现“设计—执行—反馈”闭环管理,推动工程方案编制由人工主导逐步迈向人机协同乃至 AI 自动生成的全新模式。

(3) 人—机—环共融的工业数字孪生系统

随着工业 5.0 范式演进,智能制造系统正经历从自动化到智能化的范式跃迁。其核心特征体现为人—机—环境三元共融的协同制造体系:人类作为决策主体具备认知与判断能力,机器执行高精度操作任务,而环境因素(包括物理空间与加工对象)构成动态约束条件。该体系要求实现安全、高效、有序的实时交互,这对制造系统的动态建模能力提出了全新挑战。在此背景下,工业数字孪生系统(industrial digital twin system, iDTS)成为典型解决方案。通过构建与物理实体完全映射的三维虚拟模型,iDTS 实现了对制造系统全要素、全流程的实时镜像,具备虚实交互、数模融合、迭代优化、实时控制等核心功能。人—机—环共融的 iDTS 本质上是人员、实体设备、环境要素与智能计算系统构成的复杂智能体网络,当前该领域的关键技术突破方向包括高精度动态建模、智能仿真优化、多模态交互、安全态势感知、自主学习进化机制等:基于多源数据融合的实时三维重建技术构建高精度动态模型;通过生成式 AI 快速构建数字孪生模型并仿真运动过程;融合视觉、触觉等多通道的人机协同接口实现多模态智能交互;通过对环境、设备、人和生产过程等的实时监测与行为分析实现风险预警,构建“人—机—环”安全态势感知预警系统;基于 AI 专用模型(如深度强化学习)和数字孪生,建立制造系统自主学习和自适应调控架构。这些技术共同支撑工业 5.0 背景下制造系统的实时感知、自主决策与持续进化。

(4) 基于多智能体的工程风险识别系统

以 LLM 为核心技术,将工程合同文件等多模态数据融合为可识别、可推理的风险知识体系与底座,完成风险“识别—分析—量化—监控”闭环。从早期基于规则的机器学习到基于神经网络的以 GPT、DeepSeek 等为代表的 LLM,工程风险识别与量化系统开发有了更强的技术支撑,甚至可以构建面向工程场景的多智能体协同与数字孪生风险传导推演模型。工程是一个开放的、具有不确定性的系统,所面临各项风险的概率分布多是未知的,风险量化非常困难。LLM 擅长跨模态理解与生成,可显著提升工程风险识别的覆盖率和量化的准确率。该领域研究主要聚焦于:基于 LLM 的工程风险识别与量化技术路线探索;基于多智能体的工程风险管控融合;面向工期、成本、质量和环境等多目标优化的风险量化评价与情景推演。中国、美国和欧洲在该领域的相关研究与应用中比较活跃。工程业主、承包商、高校、科技公司、政府组织多方协作,围绕工程风险数据共享、高价值应用场景落地和系统开发;建立联合实验室,选择试点企业和示范项目。未来的研究重点包括基于 LLM 的工程风险识别与量化垂直领域专业模型开发;高质量工程风险大型数据库、案例库与知识库构建;基于多智能体的工程全生命周期风险识别、量化与控制系统开发,以为工程项目业主前期策划提供合理平衡各方风险分担的依据,为工程承包企业投标时的

风险识别、分析、量化与投标决策提供支持，进而实现建设和运营阶段实时的风险监控。

（5）基于多智能体的生产线质量诊断平台

生产线质量诊断是生产线质量控制与分析的基础和前提，其主要任务是对生产线中的质量问题进行在线识别及根因分析，最终确保生产线的高质量运行。近年来，工业 4.0、智能工厂和物联网等工业技术的创新为生产线质量诊断性能提升提供了新的运行范式和技术手段。基于多智能体的生产线质量诊断平台是在共享环境中，将实现生产线质量诊断核心功能的感知、控制、监管智能系统统一到同一个计算框架中，通过多智能体系统的协同运作突破单一智能体系统在解决复杂、大规模工业场景质量诊断中的瓶颈。质量诊断自 20 世纪就受到广泛关注。20 世纪末，伴随着专家系统、机器视觉的发展，汽车生产线焊接质量检测等质量诊断系统开始采用基于人工规则的自动识别模式，随后兴起的深度学习等机器学习方法帮助质量诊断平台克服了泛化能力差、经验依赖的问题。近年来，基于多智能体的框架将数字孪生、智能感知等多种智能技术进行深度融合，形成了生产线质量诊断的新范式。基于多智能体的生产线质量诊断平台的热门研究方向包括多源数据融合与分析、智能故障监测与预警、协同优化与控制等。在智能制造浪潮的推动下，基于多智能体的生产线质量诊断平台正成为工业智能化的核心基础设施，通过分布式智能体的协同感知、推理与决策，逐渐实现从“被动检测”到“主动优化”的质量管控范式变革，为复杂制造场景提供了高精度、自适应的质量诊断解决方案。

（6）AI 赋能的学习平台研发

过去 10 年间，AI 赋能的学习平台先后经历了小模型驱动、大模型增强、智能体协同等发展阶段。在当前以多智能体交互协议架构为代表的新技术革命推动下，学习场景理解、学习资源生成、学习服务适配与跨场景迁移能力进一步提升，推动学习平台向个性化、人格化、生态化方向演进。在此背景下，全球教育科技机构纷纷开展 AI 赋能学习平台的新架构设计、新技术研发与新应用落地：北美地区侧重基础架构创新（如新一代智能导学系统体系架构）；欧洲地区更加注重伦理安全治理（如 AI 教育伦理准则）；亚太地区开展了大量技术创新与规模化应用（如中国的国家智慧教育公共服务平台、华中师范大学小雅智能教学平台等）。总体而言，当前学习平台研发聚焦于教育智能体生态工具链构建，涵盖从训练到部署的全流程，通过学习资源自动生成、推理链重构、偏好优化等技术，赋予模型人格化交互与情感伴随能力；设计算法透明评估与偏见检测机制，保障教育公平，支持学习成果认证与伦理审计。面临的主要挑战包括：教育智能体协同中的策略对齐问题、教学推理链的因果性验证、人格化模型的学习主体情感一致性保障，以及跨学科知识迁移中的偏差控制。未来，AI 赋能的学习平台将进一步提升复杂教学推理能力，整合优质教育资源，扩大受益用户群体，形成“人机互信、群智协同”的学习生态，应用场景覆盖高阶个性化学习、社会化终身学习、元宇宙跨文化教育、特殊儿童干预等领域。

（7）城市微出行系统多模式整合与优化

城市微出行（micromobility）是指通过轻量级交通工具（电动自行车、滑板车等）实现短距离出行的交通方式。其系统整合与优化的核心在于通过大数据和智能算法驱动，系统性集成多种微出行模式，并协同调度多模式资源，提升城市出行的整体效率、可持续性与用户体验。

当前国内外专利的申请、授权情况表明，相关研究逐步由单一微出行系统优化转向与其他公共出行模式协同，实现多方式平台化整合。自 2020 年以来，相关技术创新活跃，主要集中在以下方向：① 共享单车 / 电动滑板车等微出行工具投放管理与充放电调度；② 微出行与公交、轨道系统协同组织与衔接优化；③ 集成微出行的城市一体化出行服务平台开发。中国在该领域技术产出丰富，尤其集中在长三角、珠三角等经济发达、政策与产业配套完善的地区；产学研合作模式丰富，主要表现为高校与出行服务运营商、设计单位联合申请专利，以及校企共建研究院等。展望未来，新型载具的规模化应用，以及人工智能技术对交通垂直领域的赋能，都将为城市微出行系统注入新要素。未来研究方向将聚焦于：① 时空实时响应的微公交系统优化——面向时空分布更加广域化的出行需求，小型公交将成为微出行系统的重要组成部分。通过整合动态出行需求，实时生成最优路径和出行方案，实现精准服务。② 通用人工智能框架下一体化出行服务平台研发——未来生成式 AI 和 LLM 将深度融入微出行系统。用户可通过自然语言交互获取高度个性化的全过程出行方案，系统则能融合实时交通、天气等信息，动态生成最优的整合出行策略，实现“一站式”智慧出行服务。

（8）面向边端高效推理的大模型轻量化

随着大规模人工智能模型在自然语言处理、计算机视觉、多模态感知等领域的广泛应用，模型参数规模和计算需求呈指数级增长。然而，边缘设备在算力、存储和能耗方面受限，直接运行大模型存在显著障碍。为解决这一矛盾，面向边端高效推理的大模型轻量化逐渐成为人工智能前沿研究的重要方向。其发展经历了从传统模型压缩与参数剪枝，到量化、蒸馏、低秩分解及稀疏化，再到结合硬件特性与系统优化的协同设计，逐步形成体系化方法。其中的主要研究方向包括：大模型轻量化与高效训练方法、知识蒸馏与多任务迁移学习、模型剪枝与结构搜索、软硬件协同优化、分布式推理与边端协同机制等。目前，产业界和学术界均已展开积极探索，相关技术已在智能手机、车载终端、可穿戴设备、工业物联网（IoT）等场景中初步落地。一方面，轻量化技术能够显著降低推理延迟与能耗，使边端设备具备实时处理能力，提升用户体验和隐私保护水平；另一方面，它是实现大模型广泛应用的基础，使 AI 服务从“云端集中”向“云边协同”转变。未来的发展趋势包括：① 跨模态知识蒸馏与轻量化统一模型，支持多任务边端应用；② 软硬件协同设计，如面向边缘 AI 芯片的自适应模型结构；③ 云边协同推理与分层部署机制，提升模型整体效率与鲁棒性。

（9）基于大模型的工业排产系统

工业排产系统是制造企业生产运营的核心引擎，通过优化算法整合订单需求、设备产能、物料库存等信息，实现生产计划优化决策。该领域长期受到学术界和产业界的关注，取得了丰富的研究成果。然而，在复杂工业生产过程中，企业应用现状仍然是依赖现场专家结合领域知识，凭经验进行工业排产决策，决策效率及质量低，当生产工况发生变化时难以做到敏捷调整和动态优化。随着 AI 技术的不断突破及应用普及，人类决策范式正从信息化向智能化转型，大语言模型的不断突破进一步加速了人类社会各项活动与 AI 的深度融合，将大语言模型与运筹优化方法相结合实现智能决策，正在成为决策优化领域的研究热点。目前，该领域研究主要聚焦于：大语言模型领域知识注入与人类经验闭环反馈适配微调、基于大语言模型的工业排产自动建模方法、基

于大语言模型的复杂工业排产算法自动设计、人机协同智能决策机制设计等。未来将面向工业实际需求,在以下方面扩展:①提高大语言模型推理准确性与鲁棒性,化解工业排产高可靠性要求与当前大语言模型推理不确定之间的矛盾;②将知识图谱与大语言模型思维链技术融合,实现工业排产的可解释性与合规性,解决大语言模型决策透明度低的难题;③基于大语言模型整合企业资源计划、制造执行、设备运维、仓库管理等系统数据形成多智能体系统,实现工业排产综合优化及动态优化,解决排产系统动态适应性低的难题。

(10) 面向国家水网的跨水系连通工程智能调控技术

跨水系连通工程智能调控技术是国家水网建设的核心科技支撑,通过构建“感知—认知—决策—控制”全过程智能闭环系统,实现对跨流域水资源时空均衡配置、洪旱灾害联合防御、河湖生态健康保障等国家战略目标的全链支撑。该技术需深度融合水文全息感知网络、水动力系统智能仿真、多目标协同决策机制等跨学科理论,破解传统人工调度模式在应对气候变化加剧、用水矛盾多元化、工程协同复杂化时的响应迟滞、风险预判不足及全局优化缺失等关键科技瓶颈,全面提升国家水网骨干工程的战略保障能力。随着人工智能的快速发展,以数字孪生平台为载体、知识—数据混合驱动为内核的智能调控体系,正成为重塑国家水资源配置格局的战略科技力量,推动形成“历史经验—物理机理—数据驱动”三位一体协同治理新模式。未来,需紧密对接国家水网建设战略需求,挖掘流域水循环互馈机制、水工程系统协同阈值、复杂风险传递路径等关键规律,构建空—天—地—水—工一体化全息智能感知网驱动的预报—调度实时耦合系统,建立水资源—水生态—水安全多目标鲁棒优化决策模型,研发融合专家智慧和机器智能的重大风险态势推演与智能阻断技术,构建跨流域—跨部门—跨层级的协同调度平台,形成具备战略预判、动态均衡、风险阻断能力的智慧调控范式,推动预报—预警—预演—预案全链条智能化升级,为构建中国式现代化水资源治理体系提供核心科技引擎。

(11) 长大线性工程几何模型轻量化显示技术与平台

当下,长大线性工程存在复杂地形适配性欠佳、设计协同度低、动态管控烦琐低效等问题。在此背景下,中国建筑科学研究院联合相关单位,依托高效三维图形引擎 BIMBase,深度融合行业数据标准,搭建自主可控的 BIM 全生命周期精细化管控平台,成功实现了数模结构化整合与集成共享,较传统设计方式能更全面、精准地传递长大线性工程所包含的海量数据和复杂信息。同时, BIM 几何模型解决了深化设计、补充建模及设计变更时模型更新烦琐的难题,显著提升设计效率、优化施工调度、强化运维保障能力,赋能长大线性工程全生命周期应用。未来,应持续攻关国产自主可控的 BIM 关键技术。一方面,聚焦几何引擎、渲染引擎和数据引擎等关键环节,加大研发投入力度,突破“卡脖子”技术瓶颈,从而整体提升行业基础共性供给能力,为工程建设筑牢坚实的技术根基;另一方面,积极探索不同工程类型及多元业务场景下的 BIM 平台应用,通过广泛实践不断完善平台功能,促进解决工程中的“真问题”,全面提升建设质量与管理效能。通过应用理论与技术体系协同共进,系统性构建国产自主可控 BIM 平台生态,为工程建设领域的高质量发展注入强劲动力。

10.2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

10.2.2.1 大模型赋能城市数字治理的方法与技术

“大模型赋能城市数字治理的方法与技术”的核心在于将人工智能大模型技术应用于智慧城市和数字政府场景，提升城市治理智能化水平。传统城市数字治理依赖大数据统计分析和垂直领域小模型，存在智能水平有限、适应性不足的问题，难以应对复杂多变的治理需求。大模型具备跨领域知识获取与推理能力，能从海量城市数据中学习深层模式。例如，政务服务引入大语言模型可实现政策文件智能解析和问答，城市应急管理融合生成式模型与知识图谱可进行态势研判和方案生成。引入大模型作为“智脑”将显著提升决策科学性和服务精细化程度。

发展历程上，早期智慧城市系统运用机器学习和知识工程，但局限在垂直子系统智能。2018年前后，深度学习推动城市感知与分析能力增强，但各系统相互孤立。2020年后，超大规模预训练模型在自然语言处理、多模态融合等方面性能飞跃，为城市治理提供了统一智能底座。2023年，ChatGPT等大模型突破引发全球关注，各城市逐渐开始探索“大模型+城市治理”新模式。中国起步迅速，2023年底出现首批将通用大模型应用于城市管理的尝试，如利用国产大语言模型构建城市综合治理助手。专利数据印证了这一现状，该前沿相关核心专利2023年开始出现，2024年呈爆发式增长，核心专利公开量达21件，占总量的95%以上。这些专利涵盖智能市政管理平台、基于大模型的城市安全监测系统、智慧社区与便民服务等应用。

该领域研究热点方向包括5个方面。一是政务智能助手与决策支持，面向政府管理部门，侧重政策文本分析、政务问答、公文写作辅助。二是城市运行状态多模态感知，将大模型用于传感网和视频监控数据分析，融合自然语言、图像和时空数据，实现交通流量、环境质量、治安事件的智能感知。例如有专利提出在城市电力设施部署本地大模型，对物联网传感数据分析，实时预测电气线路故障并预警火灾风险。三是城市规划与数字孪生，利用生成式大模型和强化学习对规划方案自动生成评估，或驱动数字孪生系统模拟推演未来发展。四是公共服务与民生应用，开发面向市民的对话式AI助手和个性化服务平台，更好地理解市民需求、提供精确回复。五是安全与治理策略优化，应用大模型对复杂系统建模优化，如城市应急调度、公共安全态势分析。隐私保护、模型可信性和治理机制创新也是重要关注点。

从专利产出地域看，该前沿核心专利主要集中在中国，拥有22件核心专利（表10.21），反映出我国在“大模型+城市治理”领域的积极布局。在主要产出机构方面，核心专利产出机构较为分散，核心专利公开量排名前列的包括清华大学（2件，9.09%）和无线生活（北京）信息技术有限公司（2件，9.09%），其次有西南交通大学、深圳技术大学等高校，以及中煤科工集团重庆智慧城市科技研究院有限公司、杭州亚信云信息科技有限公司等企业，各贡献1件核心专利（表10.22），这显示产学研多方共同参与技术攻关。合作网络方面，由于核心专利主要集中在一个国家，国家层面缺乏跨国合作，仅呈现中国单一节点。机构层面尚未形成高强度合作集群，机构合作关系有限。随着技术复杂度提高和应用场景拓展，不同机构优势互补、联合攻关将成为趋势。

表 10.21 “大模型赋能城市数字治理的方法与技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	22	100.00	17	100.00	0.77

表 10.22 “大模型赋能城市数字治理的方法与技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	清华大学	2	9.09	4	23.53	2.00
2	无线生活（北京）信息技术有限公司	2	9.09	0	0.00	0.00
3	西南交通大学	1	4.55	4	23.53	4.00
4	上海童渠信息技术有限公司	1	4.55	2	11.76	2.00
5	深圳市元视界科技有限公司	1	4.55	2	11.76	2.00
6	中煤科工集团重庆智慧城市科技研究院有限公司	1	4.55	1	5.88	1.00
7	杭州亚信云信息科技有限公司	1	4.55	1	5.88	1.00
8	深圳技术大学	1	4.55	1	5.88	1.00
9	四川才子软件信息网络有限公司	1	4.55	1	5.88	1.00
10	因筑（苏州）建筑科技有限公司	1	4.55	1	5.88	1.00

未来，“大模型赋能城市数字治理的方法与技术”有望在多个方向实现重点突破（图 10.13）。首先，将研制面向城市治理的领域大模型平台，通过融合多源城市数据实现一体化智能决策，构建城市治理智能底座。其次，推动大模型在交通、能源、市政、安全、医疗等垂直领域深度应用，催生城市运营管理新模式，实现从通用技术向专业场景的深度渗透。最后，加强模型可解释性、数据安全与隐私保护等关键技术攻关，提升大模型在城市场景应用的可靠性和可信度。典型应用场景包括数字孪生城市 AI 中枢、智能城市运行监控平台、个性化公共服务助手等，这些应用将深刻改变城市治理方式，具有广阔发展潜力和应用前景。



图 10.13 “大模型赋能城市数字治理的方法与技术”工程开发前沿的发展路线

10.2.2.2 基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术

“基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”作为工程开发前沿，涵盖了将先进的生成式 AI 技术应用于工程建造计划、方案编制的各个方面。传统上，施工组织设计和施工方案编写需要工程师根据规范与经验，并结合项目实际情况手工编制，过程烦琐且耗时。大语言模型（LLM）的引入使得机器可以理解工程项目描述并自动生成相应的计划方案。这一前沿方向的核心在于提高工程方案编制的智能化程度：通过大模型理解工程知识（包括规范术语、设计要求、建造经验等），自动输出符合要求的文本内容。例如，给定某房建设施建设项目的参数与要求，LLM 能够生成包含任务分解、进度安排、资源配置及风险措施的施工计划初稿。这种技术拓展了大模型在垂直行业的应用边界，被视为智能建造的重要组成部分。

在基于 LLM 的工程建造方案生成领域，早期探索主要集中在工程领域对自然语言处理的应用研究，例如利用自然语言处理技术提取施工合同要点、检查规范符合性等。GPT-3.5、DeepSeek 等生成式大模型相继问世并展现出强大的生成与理解能力，推动了其在工程方案生成领域的应用与发展。自 2023 年以来，相关研究在施工项目调度上进行探索，根据项目描述运用 ChatGPT 生成施工任务列表和进度计划；紧接着，各类工程 AI 助手在行业内涌现。例如，麻省理工学院等机构研究了让生成模型参与机械结构设计，并指出标准生成模型往往只会模仿已有设计，需引入工程性能指标来引导创新设计。2024 年，一项综述研究系统评估了 GPT 在工程建造全生命周期的机遇与挑战，发现大模型可应用于材料选型优化、进度管理等多个环节，但也存在准确性和可控性方面的限制。目前来看，该领域处于初步实践和快速发展阶段：学术界已有初步验证模型可行性的案例，产业界则纷纷推出原型系统，将 LLM 融入施工方案编写、设计辅助等实际工作流程中。

LLM 自动生成工程方案的技术价值和工程意义体现在多个方面。首先，该技术极大地提升了编制效率。传统施工方案编制往往需要数天审核修改，而借助 LLM 可将这一过程压缩到小时甚至分钟级。已有实践表明，依托 LLM，完整施工方案自动生成只需约 5 分钟即可完成，且格式和计算校核俱全，无须二次编辑。有企业研发的施工 AI 助手甚至能在数十秒内输出上万字的方案草案，大幅降低工程人员的重复劳动。其次，该技术提高了方案质量和全面性。LLM 可以广泛学习规范和过往项目经验，减少人工编写遗漏要点的风险。再次，该技术增强了工程沟通与知识管理。通过自然语言生成日报、进度报告等，促进项目各方的信息交流。对于复杂工程，大模型还能充当智能助手，回答现场技术疑问，帮助决策。综上所述，这一技术在工程应用上具有提效、保质和赋能协作的重要作用，被视为推动工程行业数字化转型的关键驱动力之一。

然而，当前技术仍存在局限与挑战。一方面，LLM 生成内容可能存在不准确或不符合规范的情况，需要人工校审把关。例如，研究发现，LLM 在施工计划中遗漏了某些特定任务（如安装门框的步骤），反映出大模型对专业细节的掌握仍有不足。另一方面，模型输出的可控性和可信度是工程领域关注的焦点。行业实践正通过引入检索增强生成（RAG）技术，将模型输出依据权威规范来约束，提高方案的合规性和准确性。总体而言，尽管有改进空间，大模型在工程方案自动生成中的应用前景仍被广泛看好，其重要性将随技术成熟进一步凸显。

目前,该前沿领域主要有以下研究热点和发展方向:

1) 施工计划与调度生成:利用 LLM 自动编制工程项目的任务清单、逻辑顺序和进度甘特图等。例如,有研究让 ChatGPT 解析一段施工场景描述后,成功生成了合理的任务分解和线性施工顺序,显示出模型在项目调度上的潜力。参与测试的项目经理对交互体验评价积极,认为其可自动化许多烦琐的计划编制工作,但也强调仍需人工校对优化。

2) 施工方案文本撰写:这是行业应用最迫切的方向之一。通过在海量已批准的施工方案文档上进行训练或微调,LLM 能够按照指定格式和规范要求,自动生成施工组织设计或专项施工方案的文本初稿,涵盖施工方法、工艺流程、安全措施等内容,为工程技术人员提供高效的编写工具。

3) 工程设计与创意生成:在工程设计早期,LLM 被用来生成创新性的方案构思和设计理念。未来可以通过提示工程(prompt engineering)等手段,引导大模型输出更具创造力的设计方案,同时满足工程约束条件。

4) 人机协同与决策支持:LLM 还被探索用于辅助工程决策和优化。一个典型方向是将 LLM 与工程仿真、优化算法结合,例如 Autodesk 开发了“TileGPT”原型,把 LLM 生成的建筑布局方案与优化引擎耦合,快速探索满足性能要求的建筑体量和立面设计;又如如有研究开发了材料选择优化的聊天机器人,用 LLM 根据设计要求推荐材料方案并调用优化模型计算成本和性能。这类多模态协同将 LLM 作为前端交互和初步方案生成者,再由传统工程算法评估改进,从而实现更智能的方案推演与决策支持。

5) 规范合规检查与知识融合:为确保自动生成的方案符合行业标准,研究者正尝试将建筑规范、法规以知识库形式融入 LLM。例如有专利提出基于大模型的施工方案自动审查系统,该系统利用预训练模型对方案文本进行检查比对,识别不合规内容并给出修改建议。另外,通过检索增强技术,让模型在生成时引用相关规范条文,实现内容的可追溯和可信赖。这一方向对提高 AI 生成方案在工程上的可用性和安全性至关重要。

“基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”工程开发前沿中核心专利数排名前三的国家是中国、韩国,以及新加坡、瑞士、美国和印度(并列第三)(表 10.23)。核心专利的主要产出机构包括浪潮通信信息系统有限公司、清华大学、北京航空航天大学、中国科学院自动化研究所、山东大学、上海人工智能创新中心、上海大学、国家电网有限公司等(表 10.24),其中,清华大学与国家电网有限公司、北京航空航天大学与上海人工智能创新中心之间存在一定的合作(图 10.14)。此外,河南科技大学、东北大学等虽核心专利的公开量不多,但单件专利的影响度较高。

“基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”已由通用大模型试用与验证进入面向工程场景的微调、RAG 与流程嵌入阶段。未来的重点发展方向包括 4 个方面:① 场景拓展——生成对象由纯文本的施工组织设计拓展至多模态一体化方案,涵盖图纸/BIM、进度-资源-费用-风险联动及自动合规审查;② 技术革新——将可控生成与结构化约束引入生成过程,以规范条款、工艺库与安全红线为硬约束,结合形式化验证与可追溯机制,进一步降低幻觉、提升工程可用性;

表 10.23 “基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	75	89.29	79	92.94	1.05
2	韩国	5	5.95	0	0.00	0.00
3	新加坡	1	1.19	3	3.53	3.00
4	瑞士	1	1.19	2	2.35	2.00
5	美国	1	1.19	1	1.18	1.00
6	印度	1	1.19	0	0.00	0.00

表 10.24 “基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	浪潮通信信息系统有限公司	4	4.76	2	2.35	0.50
2	清华大学	4	4.76	0	0.00	0.00
3	北京航空航天大学	3	3.57	1	1.18	0.33
4	中国科学院自动化研究所	2	2.38	3	3.53	1.50
5	山东大学	2	2.38	1	1.18	0.50
6	上海人工智能创新中心	2	2.38	1	1.18	0.50
7	上海大学	2	2.38	1	1.18	0.50
8	国家电网有限公司	2	2.38	0	0.00	0.00
9	河南科技大学	1	1.19	9	10.59	9.00
10	东北大学	1	1.19	9	10.59	9.00

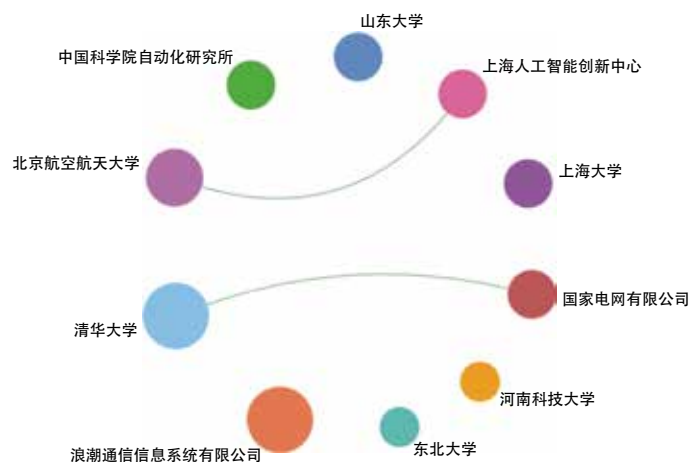


图 10.14 “基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

③ 方法融合——把 LLM 与仿真、优化调度算法、数字孪生 / 物联网数据耦合, 形成“能写—能算—能排—可验证”闭环, 使方案从可编制走向可执行与可评估; ④ 工程化与治理——面向细分行业建设专用大模型与评测基准, 完善数据治理与安全合规体系, 推进云边协同与项目级私域部署, 支撑规模化落地。目前研究学者重点关注的方向主要为多模态 BIM 融合、RAG 可控生成以及与优化 / 仿真的联合求解。图 10.15 展示了该前沿未来的发展路线。

图 10.15 显示, 该前沿将经历“奠基与验证—核心突破—融合与规模应用”三阶段演进: 前期以行业语料治理、RAG 与模板化生成夯实基座, 形成“AI 生成—人工复核—合规校审”闭环; 中期突破多模态理解与约束可控生成, 实现进度—资源—成本一体化输出并完成自动算量校核; 后期将仿真优化与数字孪生深度耦合, 完成云边协同与私域部署, 构建可信 AI 2.0 与工程智能体, 实现方案—审查—比选—交底—反馈的自治工作流, 面向房建、市政、交通、电力等场景规模化落地。



图 10.15 “基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”工程开发前沿的发展路线

10.2.2.3 人—机—环共融的工业数字孪生系统

人—机—环共融的工业数字孪生系统 (iDTS) 是工业 5.0 时代的核心载体, 它通过构建与物理实体完全映射的动态虚拟模型, 实现“人—机—环境”三元要素的深度协同与双向交互。该系统集成了物联网、人工智能和高性能计算等前沿技术, 具备虚实交互、数模驱动、迭代优化与实时控制四大核心功能, 形成了由人员、实体设备、环境要素与智能计算系统构成的复杂智能体网络。其典型特征表现为从传统的“以虚映实”向“以虚控实、虚实共生”演进, 通过实时三维重建、多模态感知和智能决策, 最终实现制造系统全要素、全流程的自主优化与持续进化。

人—机—环共融的 iDTS 的发展经历了 3 个清晰的演进阶段: 从初期的可视化建模阶段主要实现设备外观数字化, 到中期的仿真分析阶段集成有限元等工具进行多物理场性能验证, 再到当前的全要素共融阶段致力于实现物理实体与虚拟模型的实时交互与双向控制。2025 年发布的

国际标准 IEEE Std 3144™-2025《工业数字孪生成熟度模型和评价方法》（*Standard for Digital Twin Maturity Model and Assessment Methodology in Industry*）首次建立了数字孪生成熟度评估体系，将技术能力划分为从基础映射到虚实共生的 5 个等级。目前行业应用整体已达到 L3~L4 水平，实现了相当程度的虚实交互与协同优化，然而向最高级 L5“虚实共生”演进仍面临高精度建模、实时渲染与多物理场耦合等关键技术挑战。

人-机-环共融的 iDTS 通过虚实融合实现降本增效，解决设备停机与参数漂移等产业痛点，显著提升生产效能与产品质量，同时重塑人机协同关系，助力绿色低碳制造，已成为全球工业竞争的战略制高点和制造业数字化转型的核心引擎。当前主要研究方向涵盖异构数据融合与实时交互、多物理场耦合与高精度建模、AI 与数字孪生深度融合、人机协同与共融交互、安全与标准体系构建 5 个关键领域，致力于攻克从实时通信协议到多模态交互的一系列技术瓶颈，推动系统向更高阶的自主智能与虚实共生境界演进。

“人-机-环共融的工业数字孪生系统”工程开发前沿中核心专利主要产出国家为中国和美国（表 10.25），但各国之间目前没有较多的合作。主要产出机构有同济大学、IBM 公司、香港理工大学深圳研究院等（表 10.26），其国家电网有限公司与云境商务智能研究院南京有限公司之间有一定的合作（图 10.16）。

人-机-环共融的 iDTS 正向着动态融合、智能生成、自主学习的方向发展，需要经过动态孪生阶段、协同共融和专用共智 3 个阶段（图 10.17）。经过这 3 个阶段的发展，有望实现人-机-环境多数字孪生体动态融合，AI 驱动的精准数字孪生模型生成，iDTS 与 AI 模型融合的自适应控制 iDTS 快速计算与动态仿真，并应用于个性化定制生产线设计、复杂产品装配与调试、高危环境下的远程作业、高技能人员培训与赋能、预测性维护与自主运维管控等工业场景。

表 10.25 “人-机-环共融的工业数字孪生系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

序号	国家	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	中国	21	87.50	68	95.77	3.24
2	美国	3	12.50	3	4.23	1.00

表 10.26 “人-机-环共融的工业数字孪生系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例 /%	被引数	被引数比例 /%	平均被引数
1	同济大学	3	12.50	9	12.68	3.00
2	IBM 公司	3	12.50	3	4.23	1.00
3	香港理工大学深圳研究院	2	8.33	3	4.23	1.50
4	国家电网有限公司	2	8.33	1	1.41	0.50
5	云境商务智能研究院南京有限公司	2	8.33	1	1.41	0.50
6	大连理工大学	1	4.17	22	30.99	22.00
7	中国计量大学	1	4.17	9	12.68	9.00
8	东华大学	1	4.17	7	9.86	7.00
9	广东工业大学	1	4.17	7	9.86	7.00
10	中国科学院沈阳自动化研究所	1	4.17	5	7.04	5.00

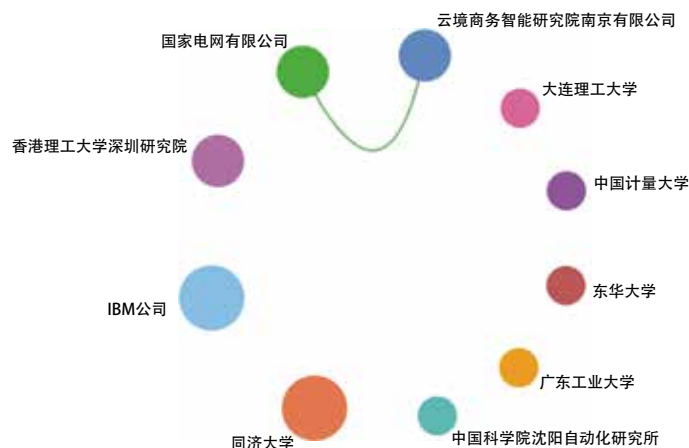


图 10.16 “人-机-环共融的工业数字孪生系统”工程开发前沿主要机构间的合作网络

里程碑	子里程碑	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
目标	实现人机共融的工业数字孪生系统	实现人-机-环的智能感知与交互	初步实现虚实同步与模型矫正	面向人本制造的工业数字孪生人	实现人机环共融的安全态势感知	实现数字孪生体的自学习智能决策	支持iDTS快速计算与动态仿真	实现基于分布式计算的运行优化与AI驱动的自适应执行	实现工业数字孪生系统的全面应用		
需求		多数字孪生体的在位精准匹配，提升模型精度与实时性									
		构建人-机-环多模态自然交互体系，实现虚拟环境下的安全预警									
		提升系统自主学习与决策能力，实现高效仿真与实时响应									
		提升系统协同与资源调度能力，实现系统自适应与智能管控，应用于个性化定制、高危作业、预测性维护等场景									
关键技术		基于生成式AI的数字孪生快速建模，动态校正算法与实时数据融合技术									
		多模态感知与场景理解技术，数字孪生人驱动的虚拟环境构建技术									
		自学习算法与智能决策模型，快速计算架构与动态仿真引擎									
		分布式计算框架与协同优化算法，AI专用模型与自适应控制技术，全链路AI驱动与自适应孪生系统集成									

图 10.17 “人-机-环共融的工业数字孪生系统”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：丁烈云 何继善 胡文瑞 向 巧

课题组：

陈晓红 柴洪峰 陈清泉 傅志寰 刘人怀 陆佑楣 栾恩杰 凌 文 孙永福 邵安林
王基铭 王礼恒 王陇德 汪应洛 王众托 薛 澜 许庆瑞 徐寿波 杨善林 殷瑞钰

袁晴棠 朱高峰 Mirosław Skibniewski Peter E. D. Love 毕军 蔡莉 陈劲
程哲 丁进良 杜文莉 方东平 冯博 高自友 胡祥培 华中生 黄季焜 黄伟
黄思翰 江志斌 康健 骆汉宾 李恒 李永奎 李政 李慧敏 李果 李小冬
李玉龙 刘晓君 刘炳胜 刘德海 罗小春 吕欣 林翰 马灵 欧阳敏 裴军
任宏 司书宾 唐加福 唐立新 唐平波 王红卫 王慧敏 王孟钧 王先甲 王要武
王宗润 魏一鸣 吴德胜 吴建军 吴启迪 吴泽洲 吴杰 许立达 肖辉 杨海
杨洪明 杨剑波 叶强 杨阳 于世为 袁竞峰 曾赛星 周建平 张跃军 镇璐
周鹏 朱文斌

工作组:

钟波涛 王红卫 骆汉宾 聂淑琴 张丽南 李勇 董惠文

执笔组:

研究前沿:

王凯 陈书路 赵钟浩 曲小波 吴庆华 陈继红 周诚 张强 钟言久 陈喜群
刘建国 刘峰 曾赛星 陈曦 王昊

开发前沿:

龙瀛 王翊衡 方伟立 李浩 王昊琪 吉硕 陈勇强 高颖 杨阳 刘三女牙
李萌 郑渤龙 刘士新 冯仲恺 张晓龙

总体组成员

顾问：周 济 陈建峰

项目组长：杨宝峰

项目组成员（排名不分先后）：

陈学东（华中科技大学） 郭东明 潘云鹤 费爱国 元英进 谭天伟
黄 震 周守为 崔俊芝 聂建国 郝吉明 曲久辉 孙其信 张守攻
陈赛娟 张伯礼 丁烈云 卢春房 吴 向 延建林 周炜星 吉久明
蔡 方 郑文江 穆智蕊

综合组执笔：

穆智蕊 郑文江 范旭辉 延建林

数据支持：

科睿唯安

工作组：

组 长：黎青山 唐海英 阳化冰

执行组长：吴 向 延建林 丁 宁

副组长：王晓俊 张晓雪 杨 波 郑文江 周 源

成 员（排名不分先后）：

姬 学 高 祥 何朝辉 解光辉 张 松 王小文 黄 永 何俊勇
聂淑琴 穆智蕊 范旭辉 潘腾飞 李佳敏 刘宇飞 郭鹏远 周海川
宁丽梅 赵金楠 张铁煊

致谢：

感谢高等教育出版社有限公司、科睿唯安公司、中国工程院院刊（系列）编辑部、中国工程院战略咨询中心、中国工程科技知识中心、中国工程院各学部 and 学部办公室、哈尔滨医科大学、华东理工大学、华中科技大学、浙江大学、天津大学、上海交通大学、同济大学、清华大学、中国农业大学、上海交通大学医学院附属瑞金医院、《中国工程科学》杂志社的大力支持！