



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

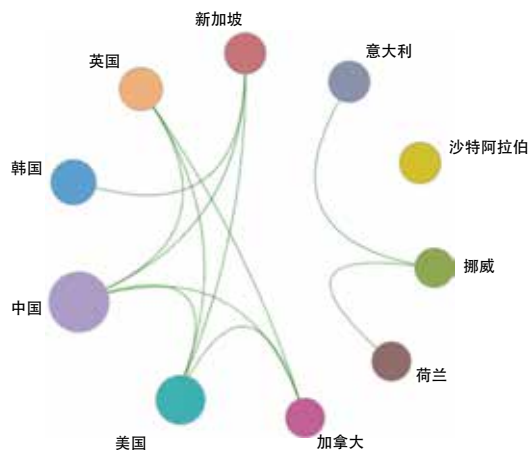


图 10.1 “智能地空协同的低空交通与物流”工程研究前沿主要国家间的合作网络

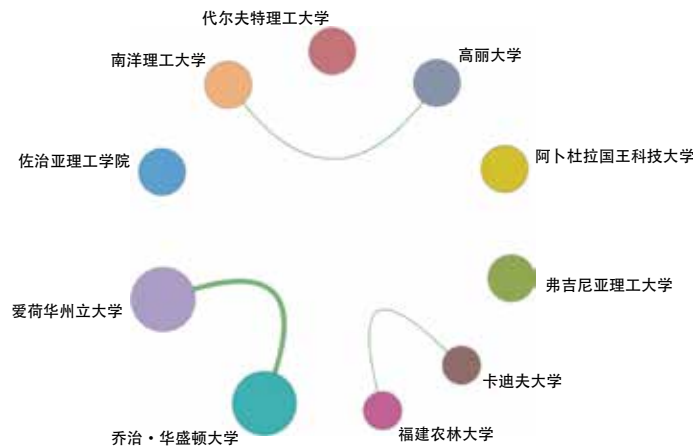


图 10.2 “智能地空协同的低空交通与物流”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 10.5 “智能地空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 “智能地空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与鲁棒性，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

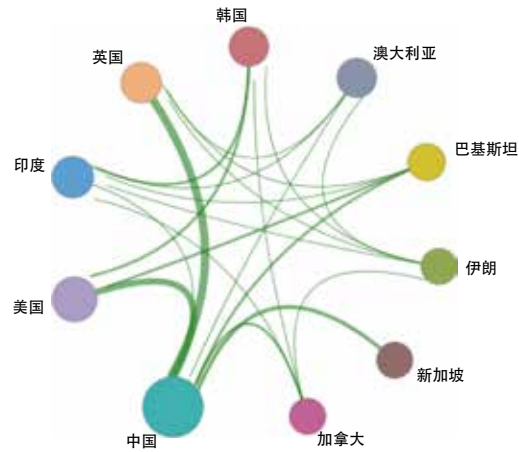


图 10.4 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿主要国家间的合作网络

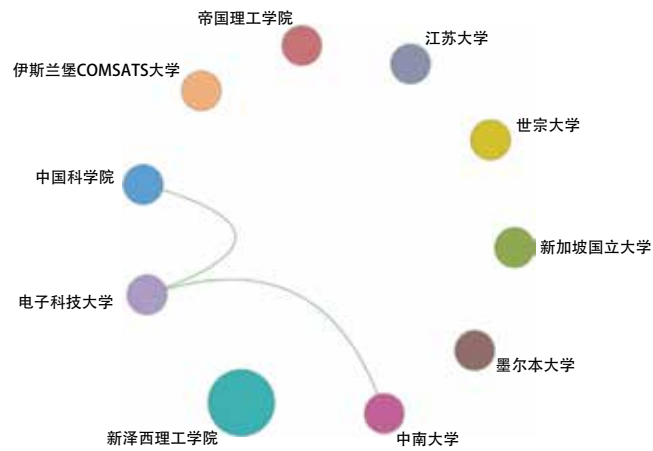


图 10.5 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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。

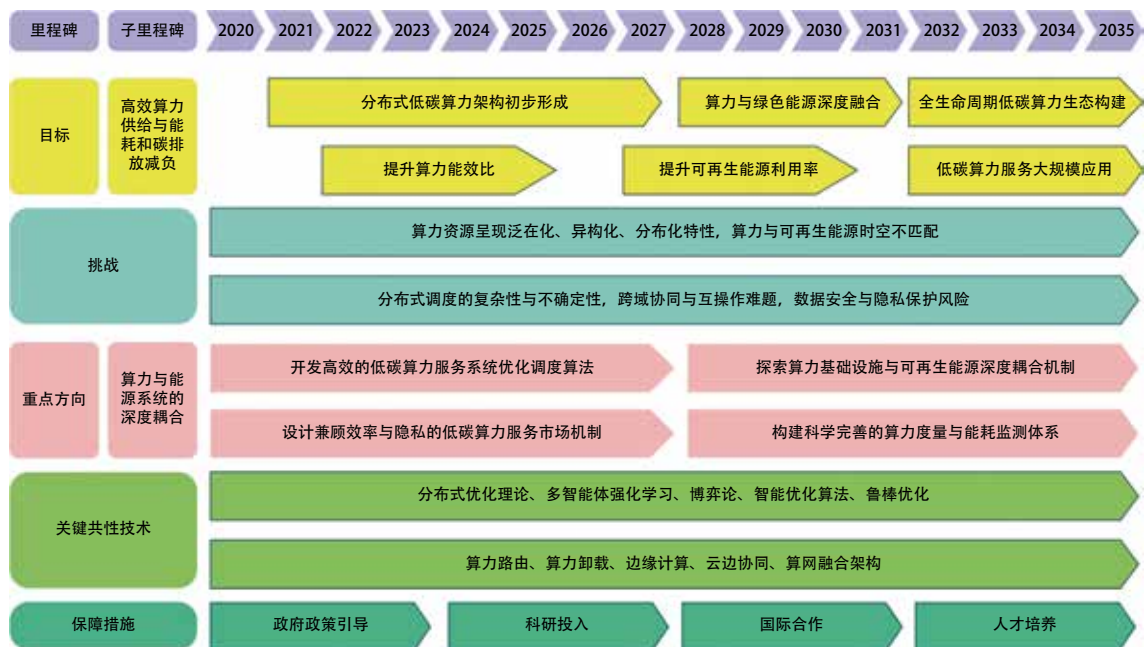


图 10.6 “低碳算力服务系统分布式优化”工程研究前沿的发展路线

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

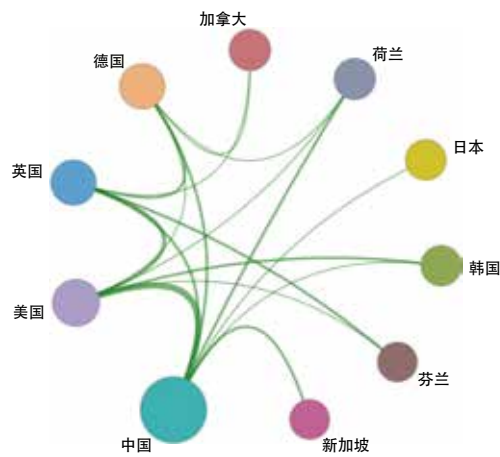


图 10.7 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿主要国家间的合作网络

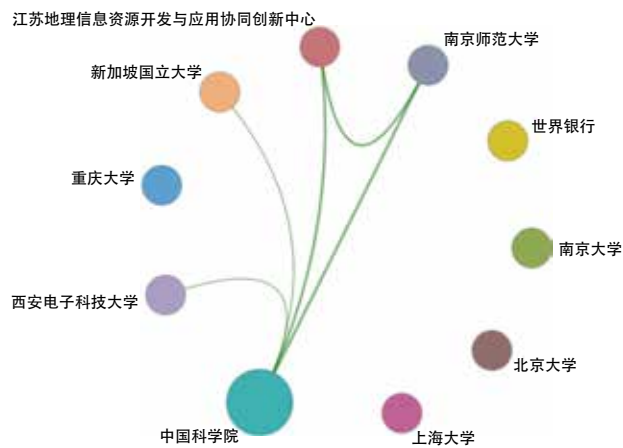


图 10.8 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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。

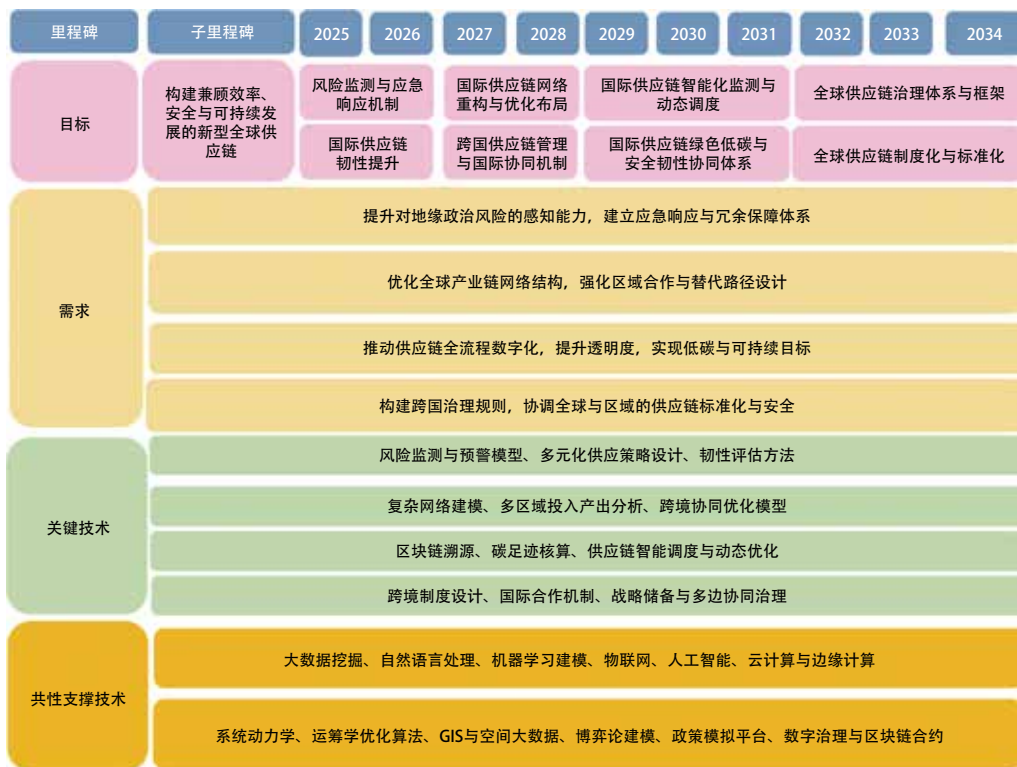


图 10.9 “地缘政治风险下的供应链重构”工程研究前沿的发展路线

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

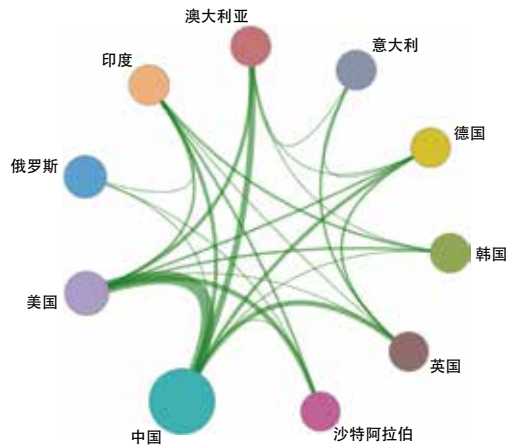


图 10.10 “地外建造系统工程管理”工程研究前沿主要国家间的合作网络

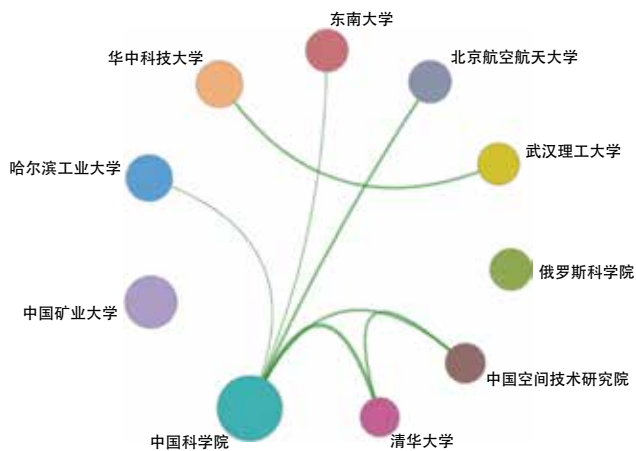


图 10.11 “地外建造系统工程管理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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	面向边缘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;又如有的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

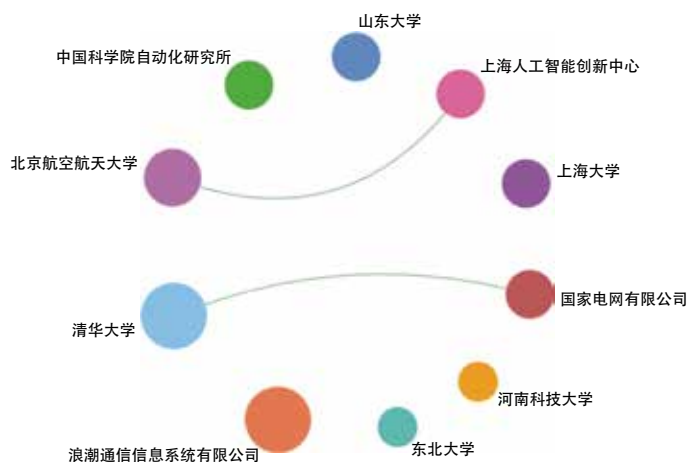


图 10.14 “基于大语言模型的工程建造方案自动生成技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

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 workflow，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分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), 其中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

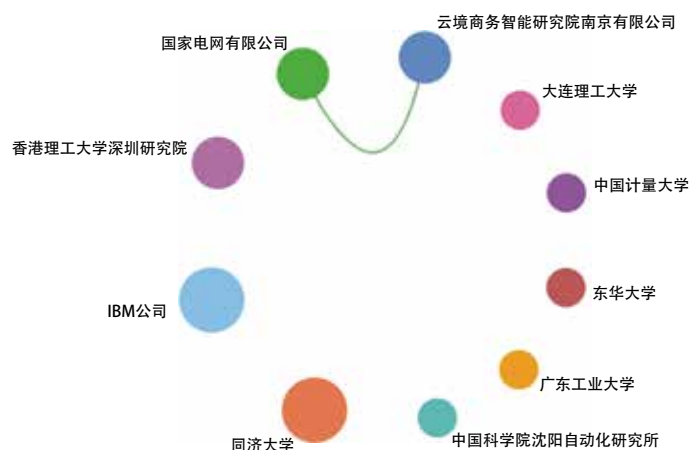


图 10.16 “人-机-环共融的工业数字孪生系统”工程开发前沿主要机构间的合作网络

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 於世为 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 王翊蘅 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