



## 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控体系构建。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，以最终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融合，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率分析。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

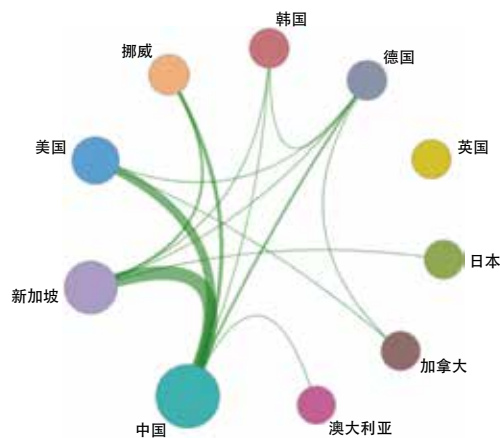


图 6.1 “深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”工程研究前沿主要国家间的合作网络

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

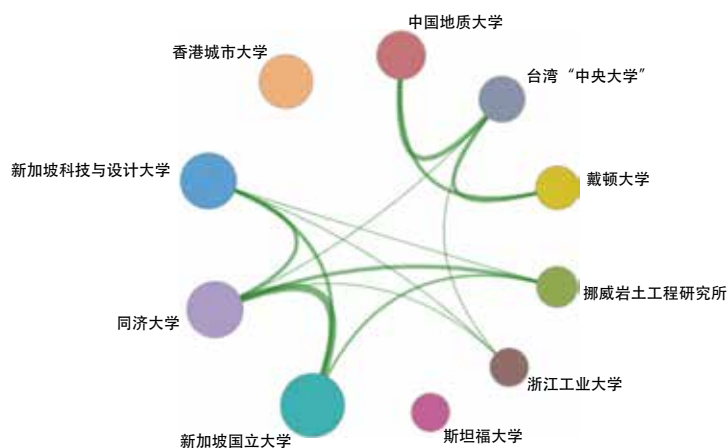


图 6.2 “深地深海地质结构三维重构与参数智能反演”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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

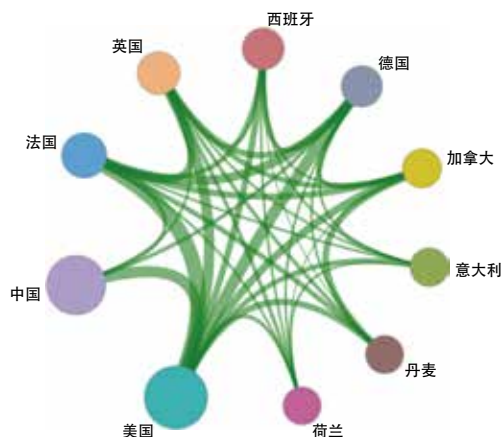


图 6.4 “月球与火星智能遥感探测”工程研究前沿主要国家间的合作网络

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

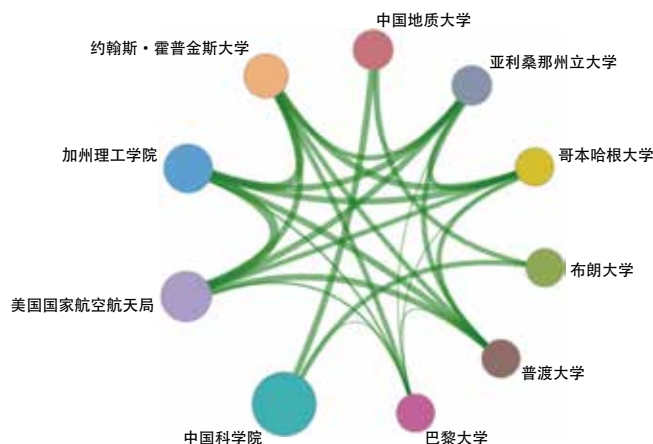


图 6.5 “月球与火星智能遥感探测”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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

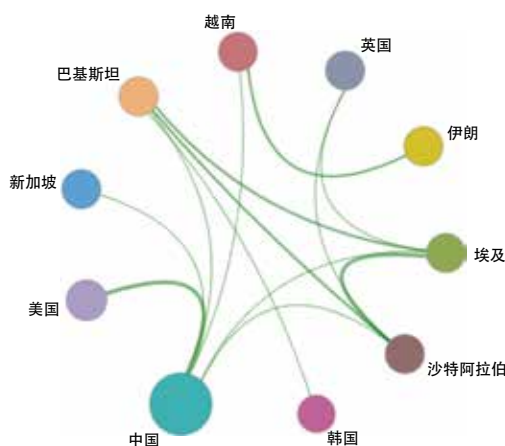


图 6.7 “建筑物理性能数智化预测与后评估方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

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

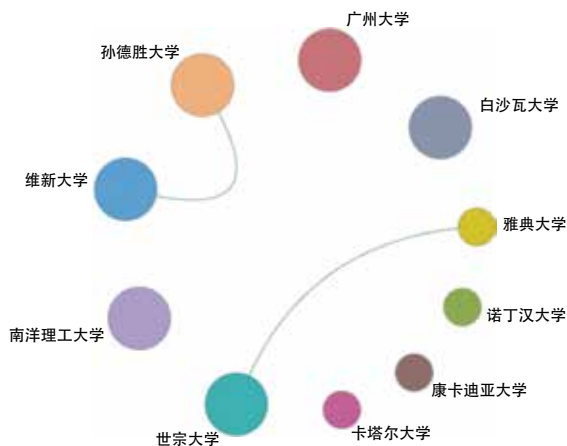


图 6.8 “建筑物理性能数智化预测与后评估方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

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1733,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

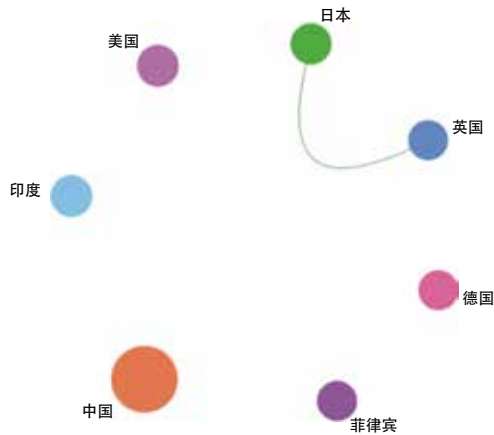


图 6.10 “重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”工程开发前沿主要国家间的合作网络

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）。

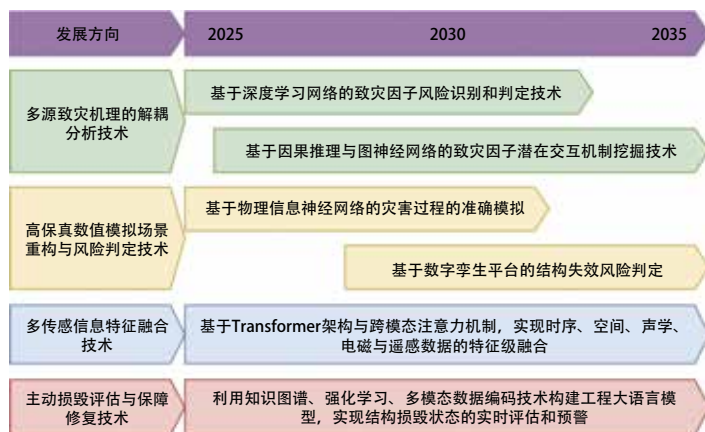


图 6.12 “重大基础设施多源致灾机制与长期服役性能保障技术”工程开发前沿的发展路线

### 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。

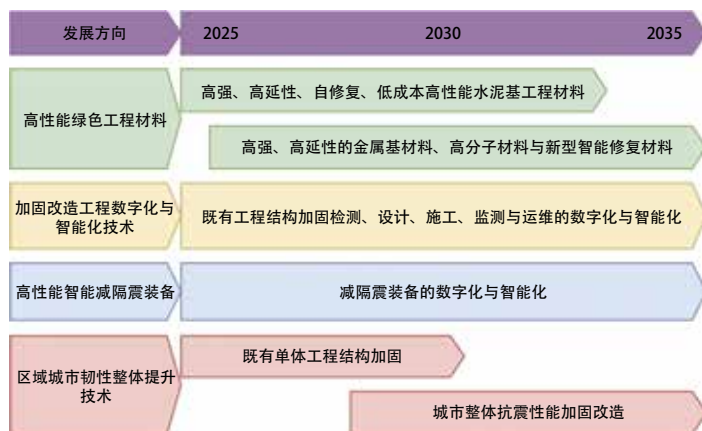


图 6.13 “既有工程结构减隔震加固技术与装置”工程开发前沿的发展路线

### 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

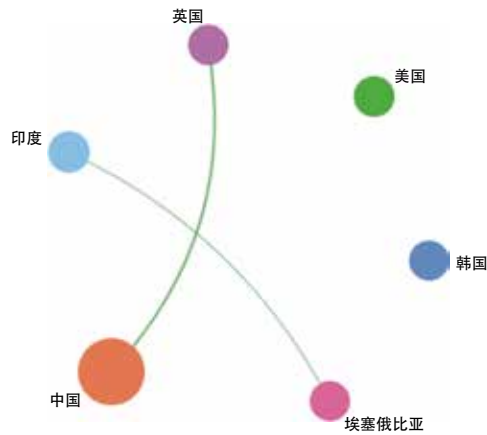


图 6.14 “基于数字孪生的城市空间精细化治理”工程开发前沿主要国家间的合作网络

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

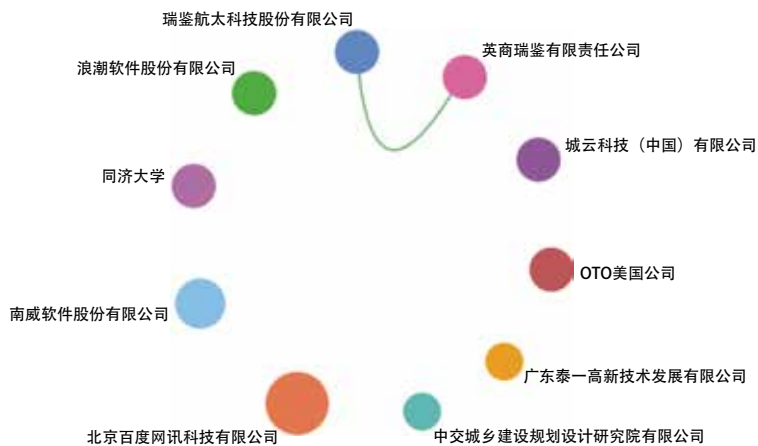


图 6.15 “基于数字孪生的城市空间精细化治理”工程开发前沿主要机构间的合作网络

“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<sup>1</sup> 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<sup>2</sup> 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

<sup>1</sup> 西安建筑科技大学。

<sup>2</sup> 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