

复杂地质条件下隧道施工管理智能化技术研究

袁 磊

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 710024

摘要：复杂地质条件下隧道施工面临地质多样、风险隐蔽等诸多挑战，传统管理模式难满足需求。本文构建了复杂地质隧道施工智能化管理技术体系，涵盖感知层全要素智能监测、数据层多源数据融合与管理、决策层智能分析与决策支持、应用层全流程智能化管理模块。同时提出从技术、人才、政策与资金三方面保障技术推广应用，旨在提升施工管理效率与安全性，保障工程顺利推进。

关键词：复杂地质；隧道施工；智能化管理

1 复杂地质隧道施工管理挑战与需求分析

1.1 复杂地质特征与施工风险

复杂地质隧道施工中，地质特征呈现显著多样性与不确定性，给施工安全和进度控制带来多重挑战。常见的复杂地质包括岩溶发育区、破碎带、富水地层、煤层瓦斯区及软岩大变形段等，这些地质条件相互交织，进一步加剧施工难度。岩溶发育区易出现突水突泥事故，破碎带岩体稳定性极差，开挖过程中极易发生坍塌，富水地层会导致基坑积水、围岩软化，煤层瓦斯区存在瓦斯泄漏爆炸风险，软岩大变形则会造成初期支护结构变形甚至破坏^[1]。施工过程中，这些风险具有隐蔽性强、突发概率高、影响范围广的特点，不仅威胁施工人员生命安全，还会导致施工工期延误、工程成本超支。同时复杂地质条件下，施工参数调整难度大，传统施工方法难以适应地质条件变化，进一步放大施工风险，对施工管理提出极高要求。

1.2 智能化管理需求

面对复杂地质隧道施工的高风险与高难度，传统管理模式已难以满足实际需求，智能化管理成为必然选择。传统管理依赖人工监测、经验判断和纸质记录，存在监测精度低、数据传递滞后、决策响应缓慢等问题。在地质条件复杂的隧道施工中，人工监测难以实现对围岩变形、应力变化、地下水动态等关键指标的实时全面监测，数据误差较大，易导致风险预警不及时。经验判断式的决策模式缺乏科学数据支撑，难以精准应对复杂地质带来的突发状况，往往造成决策失误。纸质记录方式不仅效率低下，还存在数据丢失、篡改风险，不利于施工过程追溯和经验总结。随着隧道工程规模扩大和地质复杂程度提升，施工过程中产生的各类数据呈指数级增长，传统管理模式无法实现对多源数据的有效整合与分析。因此，迫切需要构建智能化管理体系，通过智能

监测、数据融合、智能决策等技术，实现对施工全过程的实时监控、精准预警和科学决策，提升施工管理的效率和安全性，保障工程顺利推进。

2 复杂地质隧道施工智能化管理技术体系构建

2.1 体系构建原则与框架

复杂地质隧道施工智能化管理技术体系构建需遵循实用性、系统性、兼容性和可扩展性四大核心原则。实用性原则要求体系紧密贴合施工实际需求，聚焦地质风险防控、进度管控、成本优化等核心目标，确保各项技术和模块能够直接服务于施工管理实践，避免技术与实际应用脱节。系统性原则强调体系各层级、各模块之间的有机衔接，形成从数据感知、传输、处理到决策应用的完整闭环，确保信息流转顺畅、功能协同高效。兼容性原则旨在实现体系与现有施工设备、管理系统的有效对接，降低系统建设成本，同时支持不同厂商设备和不同格式数据的接入，提升体系的通用性。可扩展性原则要求体系具备应对不同地质条件、隧道规模和施工工艺变化的能力，能够通过模块增减、功能升级等方式适应未来技术发展和工程需求变化。基于上述原则，体系构建采用“感知-数据-决策-应用”四层框架，感知层负责数据采集，数据层承担数据处理与存储，决策层提供智能分析与决策支持，应用层实现具体管理功能落地，各层级分工明确又相互关联，共同构成完整的智能化管理技术体系。

2.2 感知层：全要素智能监测系统

感知层作为智能化管理技术体系的基础，承担着施工全过程全要素数据的实时采集任务，通过构建多维度、高精度的智能监测系统，为后续管理决策提供数据支撑。系统涵盖地质环境、施工状态、结构安全等核心监测要素，采用物联网、传感器、无人机、三维激光扫描等先进技术，实现对关键指标的全方位监测。在地质

环境监测方面，部署地质雷达、超前钻探设备和分布式光纤传感器，实时探测前方地质条件变化，精准识别岩溶、破碎带等不良地质分布范围和规模；安装地下水监测传感器，监测地下水位、水压和水质变化，预警突水风险^[2]。施工状态监测中，利用视频监控系统和红外热成像技术，实时监控开挖、支护、衬砌等施工工序操作规范；通过振动传感器监测爆破施工产生的振动波，避免对围岩稳定性造成破坏。结构安全监测则针对初期支护、二次衬砌等结构，安装应变计、位移计和裂缝监测仪，实时采集结构应力、变形和裂缝发展数据。所有监测设备通过无线通信模块接入数据传输网络，实现监测数据的实时上传，同时具备数据异常自动报警功能，确保对施工风险的及时感知。

2.3 数据层：多源数据融合与管理平台

数据层作为智能化管理技术体系的数据处理核心，通过构建多源数据融合与管理平台，实现对感知层采集数据的高效处理、存储和管理。平台接入的数据类型丰富，包括地质勘察数据、实时监测数据、施工日志数据、设备运行数据、成本核算数据等多源异构数据，这些数据在格式、精度和更新频率上存在差异，需通过数据融合技术实现标准化处理。平台首先采用数据清洗技术，剔除监测数据中的异常值、缺失值和噪声数据，确保数据准确性；通过数据标准化模块，将不同格式的数据转换为统一格式，实现数据互通互联。数据融合环节采用统计学方法、机器学习算法和深度学习模型，对多源数据进行关联分析和融合处理，挖掘数据背后的隐藏关联，例如将地质监测数据与施工变形数据融合，精准判断地质条件变化对结构安全的影响。存储方面，平台采用分布式数据库和云存储技术，构建海量数据存储架构，满足大规模数据的存储需求，同时具备数据备份和恢复功能，保障数据安全性。平台搭建数据共享接口，实现与施工单位、监理单位、建设单位等多方的数据共享，支持数据查询、统计和分析功能，为决策层提供全面的数据支撑。

2.4 决策层：智能分析与决策支持系统

决策层作为智能化管理技术体系的核心大脑，通过智能分析与决策支持系统，实现对数据层处理后数据的深度分析和科学决策。系统整合大数据分析、人工智能、机器学习等先进技术，构建多维度决策分析模型，涵盖风险预警、进度管控、成本优化、质量控制等核心决策场景。在风险预警方面，系统基于历史施工数据和实时监测数据，通过机器学习算法训练风险预测模型，实时预测突水突泥、坍塌、结构变形等施工风险发生概

率，并根据风险等级自动发出预警信号，同时提供风险处置建议方案。进度管控模块通过对比施工计划数据与实际施工数据，分析工序完成情况和工期偏差原因，采用关键路径法识别影响工期的关键工序，自动生成进度调整方案。成本优化模块对施工材料消耗、设备租赁、人工费用等成本数据进行实时统计分析，识别成本超支风险点，结合施工进度和质量要求，提出成本控制建议。质量控制模块通过分析施工检测数据和质量验收数据，识别施工质量隐患，追溯质量问题产生的工序和责任人，确保施工质量符合规范要求。系统采用可视化界面展示分析结果和决策建议，支持管理人员直观掌握施工全局情况，提升决策效率和准确性。

2.5 应用层：全流程智能化管理模块

应用层作为智能化管理技术体系的落地载体，通过构建全流程智能化管理模块，将感知层、数据层和决策层的技术成果转化成实际施工管理应用。模块覆盖隧道施工全生命周期，包括施工前期准备、施工过程管控、竣工验收等关键阶段，形成涵盖地质勘察、施工设计、工序施工、安全管理、质量管理、进度管理、成本管理等全流程的智能化管理功能^[3]。施工前期准备阶段，地质勘察智能模块整合勘察数据和超前探测数据，生成三维地质模型，为施工设计提供精准地质依据；施工设计智能模块基于地质模型和施工规范，自动优化施工方案和支护参数。施工过程管控阶段，工序施工智能模块实时监控开挖、支护、衬砌等工序施工质量和进度，通过智能终端向施工人员推送操作规范和技术要求；安全管理智能模块对接风险预警系统，实时展示风险信息，调度应急救援资源，记录风险处置过程。竣工验收阶段，验收智能模块整合施工全过程数据，自动生成验收报告，对比验收数据与规范要求，识别验收不合格项并追溯整改。各模块之间数据互通，实现施工管理各环节的协同联动，通过移动终端、PC端等多终端接入方式，满足管理人员、施工人员、监理人员等不同角色的使用需求，全面提升施工管理的智能化水平。

3 复杂地质隧道智能化管理技术推广应用保障措施

3.1 技术保障：突破核心技术瓶颈

技术保障是复杂地质隧道智能化管理技术推广应用的核心支撑，需聚焦关键核心技术瓶颈，通过产学研用协同创新实现技术突破和成果转化。针对当前智能化管理技术中存在的高精度感知设备国产化率低、多源数据融合精度不足、智能决策模型适应性差等核心问题，构建以企业为主体、高校和科研院所为支撑的协同创新机制，设立专项技术攻关项目。在感知设备方面，联合科

研院所研发适用于复杂地质环境的高精度、高稳定性传感器和监测设备，提升设备在恶劣施工环境下的适应性和耐久性，降低设备采购成本；开发国产化数据传输模块，解决数据传输过程中的延迟和丢包问题。多源数据融合技术领域，引入先进的深度学习算法和大数据处理技术，优化数据融合模型，提升不同格式、不同精度数据的融合效率和精度，实现对地质条件和施工状态的精准刻画。智能决策模型方面，结合不同区域、不同地质类型的隧道施工案例，构建多场景决策模型库，通过迁移学习技术提升模型对不同施工场景的适应性，同时建立模型迭代更新机制，根据实际施工数据持续优化模型性能。

3.2 人才保障：构建复合型管理团队

人才保障是复杂地质隧道智能化管理技术推广应用的关键支撑，需构建一支兼具隧道施工专业知识、智能化技术能力和管理经验的复合型管理团队。首先，建立多元化人才培养体系，联合高校、职业院校和企业开展定向人才培养，在高校相关专业增设隧道智能化管理课程，涵盖物联网技术、大数据分析、人工智能、隧道施工技术等核心内容，培养具备扎实理论基础的专业人才；企业内部开展在职人员培训，针对施工管理人员和技术人员开展智能化设备操作、管理系统使用等实操培训，提升现有人员的智能化技术应用能力。其次，完善人才引进机制，制定优惠人才引进政策，面向行业内外引进具备隧道施工管理经验和智能化技术背景的高端人才，包括数据分析师、人工智能算法工程师、智能化系统运维工程师等，充实人才队伍。同时，构建合理的人才激励机制，设立技术创新奖励基金，对在智能化技术研发、应用推广中取得突出成绩的团队和个人给予表彰奖励；建立科学的职业发展通道，为人才提供晋升机会和发展空间，激发人才创新活力。

3.3 政策与资金保障

政策与资金保障是复杂地质隧道智能化管理技术推广应用的重要支撑，需通过完善政策体系和加大资金投入，为技术推广应用创造良好环境。在政策保障方面，政府相关部门应结合隧道工程建设发展需求，制定出台支持复杂地质隧道智能化管理技术推广应用的专项政

策，包括技术推广补贴政策、标准制定政策、示范工程建设政策等^[4]。出台技术推广补贴政策，对采用智能化管理技术的隧道工程项目给予一定比例的资金补贴，降低项目建设单位的技术应用成本；加快制定智能化管理技术标准和规范，明确技术应用要求、检测评估标准和安全保障规范，为技术推广应用提供统一依据；开展智能化管理示范工程建设，选取地质条件复杂、具有代表性的隧道工程项目作为示范工程，总结推广成功经验和应用模式，发挥示范引领作用。在资金保障方面，建立多元化资金投入机制，加大政府财政资金支持力度，设立隧道智能化管理技术推广专项基金，用于技术研发、示范工程建设和人才培养；鼓励金融机构创新金融产品，为采用智能化管理技术的隧道工程项目提供低息贷款、融资担保等金融支持；引导社会资本参与智能化技术研发和推广应用，通过产学研合作、PPP模式等方式吸引社会资本投入，形成政府引导、企业主导、社会参与的多元化资金保障体系，确保智能化管理技术推广应用的资金需求。

结束语

复杂地质隧道施工管理智能化是行业发展的必然趋势。本文构建的智能化管理技术体系及提出的保障措施，为应对复杂地质挑战提供了新思路与新方法。未来，需持续突破技术瓶颈、培养复合型人才、完善政策资金支持，推动智能化管理技术在隧道工程中广泛应用，提升我国隧道施工整体水平，助力基础设施建设高质量发展。

参考文献

- [1]母晓维.复杂地质条件下隧道施工管理智能化技术研究[J].江西建材, 2025(7):183-185.
- [2]唐少辉,张晓平,刘浩,等.复杂地层水下盾构隧道工程难点及关键技术研究与展望[J].工程地质学报,2021,29(5):1477-1487.
- [3]李东.隧道施工安全管理与风险预警技术研究[J].工程技术研究, 2024, 6(22):9-11.
- [4]李强.复杂地质条件下铁路隧道施工技术解析[J].工程技术研究, 2020(10): 81-82。