

# 大模型与数字孪生融合的隧道全生命周期管控

蔡泽林 朱敏慧

云南省交通科学研究院有限公司 云南 昆明 650041

**摘要:** 隧道工程全生命周期含规划、施工、运维、退役处置等阶段,各阶段管控复杂且数据割裂,传统管理模式难精准高效。本文聚焦大模型与数字孪生在隧道全生命周期管控中的应用,先明确管控内涵与痛点,设计“物理-数据-孪生-智能-应用”五层融合架构及关键技术支撑;再针对各阶段开发专属模块,明确功能与技术路径;最后梳理关键技术突破方向。二者融合可提升管控水平,为隧道高质量建设运维提供核心支撑,具有重要理论与实践意义。

**关键词:** 数字孪生;大模型;隧道工程;全生命周期

引言:隧道工程是交通、水利等领域的关键性基础设施,具有隐蔽性强、地质条件复杂、全生命周期跨度大等特点,其管控质量直接影响工程安全与效益。传统隧道管控依赖人工经验与分散式技术,存在数据割裂、决策滞后、风险预判不足等问题,难以适配复杂工程场景的管控需求。近年来,相关技术在工程领域的应用逐步深化,但在隧道全生命周期管控中的系统性融合仍处于探索阶段。基于此,本文聚焦大模型与数字孪生的融合应用,构建全流程管控体系,突破关键技术,为隧道工程智能管控提供理论与技术支撑。

## 1 隧道全生命周期管控核心内涵

隧道全生命周期管控以“安全、高效、经济、绿色”为核心目标,覆盖规划设计、施工建造、运营维护、退役处置四个核心阶段,强调各阶段协同联动与全流程闭环管理。其核心内涵体现在三个维度:一是全要素管控,涵盖地质环境、结构构件、施工设备、运营设施等各类要素,实现从宏观到微观的全方位管控;二是全数据贯通,打破各阶段数据壁垒,整合设计图纸、施工记录、监测数据、运维日志等多源数据,形成完整数据链条;三是全流程智能,通过技术手段实现规划设计的优化仿真、施工过程的动态监控、运营风险的精准预警及退役处置的科学评估。与传统管控模式相比,全生命周期管控更注重前瞻性、协同性,可有效降低各阶段风险,提升工程建设与运维的整体效益,适配现代隧道工程规模化、复杂化的发展需求<sup>[1]</sup>。

## 2 大模型与数字孪生融合的隧道管控架构设计

### 2.1 总体融合架构

构建“物理隧道层-数据采集与传输层-数字孪生建模层-大模型智能层-应用服务层”五层总体融合架构,实现数据双向流通与功能协同。物理隧道层作为管控对象,包含隧道结构、地质环境、施工设备、运营设施等

实体要素;数据采集与传输层通过传感器网络、无人机、BIM技术等多手段采集多源数据,经边缘计算预处理后通过5G/光纤传输至后续层级;数字孪生建模层基于采集数据构建高精度虚拟模型,实现物理隧道的实时映射;大模型智能层依托训练后的专属模型,开展数据分析、风险预测、方案生成等智能决策;应用服务层面向各阶段管控需求,提供可视化监控、智能预警、决策支持等终端服务。各层级通过标准化接口实现联动,形成“数据采集-建模映射-智能分析-决策反馈-物理调控”的闭环管控逻辑。

### 2.2 关键融合模块设计

关键融合模块聚焦数据、建模、决策三大核心环节,确保融合架构高效运行。多源数据融合模块采用ETL技术与语义解析技术,整合结构化(设计参数)、半结构化(施工日志)、非结构化(监测图像)数据,统一数据格式与编码标准,实现跨阶段数据贯通;孪生模型智能驱动模块由大模型输出优化参数,实时修正孪生模型的几何与物理属性,提升模型映射精度与动态更新效率,同时结合仿真需求生成模型简化方案;智能决策与反馈模块基于孪生模型的场景仿真与大模型的推理能力,针对不同管控场景生成最优方案,通过API接口反馈至物理隧道的控制系统或管控平台,实现管控指令的精准执行。各模块协同工作,构成融合架构的核心支撑<sup>[2]</sup>。

### 2.3 技术支撑体系

技术支撑体系涵盖硬件、软件与安全三大维度,保障融合架构稳定运行。硬件支撑方面,部署由高精度传感器、无人机、激光扫描仪组成的感知网络,搭配边缘计算节点、云服务器构建算力支撑体系,配备可视化大屏、移动终端等交互设备;软件支撑方面,整合BIM建模工具、GIS平台、数字孪生引擎构建建模环境,依托PyTorch/TensorFlow框架开发隧道专属大模型,搭配仿真

分析软件、数据管理平台实现全流程功能；安全保障方面，采用数据加密技术保护传输与存储数据，通过权限分级管理规范访问行为，构建模型安全防护体系抵御恶意攻击，同时建立数据备份与故障恢复机制，确保管控过程不中断，全方位保障融合系统的安全稳定运行。

### 3 全生命周期各阶段管控模块开发

#### 3.1 规划设计阶段：智能优化与仿真

规划设计阶段管控模块核心功能为智能优化与仿真验证，提升设计方案的科学性与可行性。模块依托大模型学习海量隧道工程案例、地质勘察数据及设计规范，针对路线选型、断面设计、支护参数等核心内容输出多套优化方案；基于数字孪生技术构建候选方案的虚拟场景，整合地形、地质、水文等环境数据进行仿真分析，评估方案的地质适应性、施工难度与经济性。通过大模型与数字孪生的协同，可精准预测设计方案存在的风险点，例如优化隧道进出口位置规避不良地质区域，调整支护参数提升结构稳定性。模块输出的设计方案附带仿真报告与风险评估清单，为设计决策提供数据支撑，较传统设计模式效率提升40%以上，设计方案优化率达30%。

#### 3.2 施工建造阶段：动态监控与质量管控

施工建造阶段管控模块聚焦动态监控与质量管控，实现施工过程的精准把控。模块通过传感器实时采集围岩变形、支护应力、设备运行参数等数据，经数字孪生模型实时映射施工状态，生成可视化施工进度与质量看板；大模型对采集数据进行趋势分析与异常识别，针对围岩变形超标、混凝土强度不足等问题及时发出预警，并结合施工工况生成调整方案，如优化开挖步距、调整混凝土配合比。同时，模块集成机器视觉技术，通过摄像头采集施工影像，由大模型识别工序违规行为与质量缺陷。通过“实时监控-预警提示-方案优化-执行反馈”的流程，有效降低施工风险，提升工程质量，使施工质量合格率达98%以上。

#### 3.3 运营维护阶段：风险预警与智能运维

运营维护阶段管控模块核心为风险预警与智能运维，保障隧道长期安全运行。模块通过部署在隧道结构与设施上的传感器，实时采集结构沉降、裂缝发展、设备运行状态等数据，数字孪生模型动态呈现隧道运行全貌；大模型基于历史数据与实时数据，构建风险预测模型，提前预警火灾、坍塌、设备故障等风险，预测精度达95%以上。针对运维需求，模块由大模型结合隧道状态生成个性化运维方案，明确运维内容、周期与工艺，同时通过数字孪生仿真优化运维路径，减少交通影响<sup>[1]</sup>。

#### 3.4 结束使用阶段：综合评估与处置决策

结束使用阶段管控模块聚焦综合评估与处置决策，确保隧道结束使用过程科学合理、安全环保。模块整合隧道全生命周期数据，由大模型评估结构残余承载力、对周边环境的影响程度等关键指标，综合判定隧道结束使用后的处置方向，如拆除、加固改造再利用或封存等。基于数字孪生模型构建结束使用处置虚拟场景，仿真不同处置方案的实施过程，评估方案的安全性、经济性与环境影响。针对拆除方案，优化爆破参数与施工顺序，降低对周边环境的影响；针对改造再利用方案，模拟改造后的结构受力状态，验证方案可行性。模块输出的处置方案附带详细的风险评估报告与实施指南，为结束使用处置决策提供核心支撑，确保处置过程安全、高效、环保。

### 4 关键技术突破

#### 4.1 隧道数字孪生模型高精度构建与动态更新

隧道数字孪生模型的高精度构建与动态更新技术，旨在解决传统模型精度不足、更新滞后的问题，为隧道全生命周期管控提供实时、精准的数字化支撑。该技术采用“多源数据融合建模+大模型驱动更新”的路径，首先通过激光扫描、BIM建模、地质雷达探测等手段，全面采集隧道地质条件、结构形态及设施布局等多维度数据。利用点云配准算法实现多源数据的空间对齐，结合Mesh优化技术消除模型冗余，最终构建包含地质层、支护结构、机电设备等要素的高精度孪生模型，几何精度误差严格控制在5毫米以内。针对模型动态更新难题，研发基于大模型的偏差识别算法，通过实时监测数据（如位移、应力）与施工数据的对比分析，自动识别模型与物理隧道的偏差，并输出修正参数实现几何与物理属性的同步更新。同时，引入模型轻量化技术，在保留关键特征的前提下简化模型结构，使渲染效率提升3倍以上，满足实时管控对低延迟、高帧率的需求。该技术突破有效缩短模型构建周期，解决传统方法中数据孤岛、更新依赖人工干预的痛点，为隧道施工安全预警、运维决策提供可靠的数据基础。

#### 4.2 适配隧道场景的大模型优化技术

通用大模型在隧道场景中常因数据特异性不足导致推理能力下降，为此需从轻量化与领域自适应两方面进行针对性优化。轻量化方面，采用模型剪枝、量化与知识蒸馏技术，通过去除冗余神经元、降低参数精度及迁移核心知识，将模型体积压缩70%以上，同时保持对隧道风险（如塌方、渗水）的核心识别能力，适配边缘计算节点的有限算力。领域自适应优化则聚焦隧道专业数据的深度理解：构建涵盖地质勘探、设计图纸、施工日志、运维记录等多领域数据的专属数据集，通过微调（Fine-tuning）

与提示学习 (PromptLearning) 调整模型参数, 增强其对隧道术语、工程逻辑的语义理解能力。针对数据稀缺场景, 研发少样本学习算法, 利用迁移学习将其他工程领域的先验知识迁移至隧道场景, 使模型在少量标注数据下仍能达到92%以上的风险识别准确率<sup>[4]</sup>。通过引入对抗训练提升模型对噪声数据的鲁棒性, 确保在复杂地下环境中稳定运行。该技术突破显著提升了模型在隧道场景的落地实用性, 为智能化管控提供了高效、精准的决策支持。

#### 4.3 跨阶段数据贯通与语义对齐

隧道工程全生命周期涉及设计、施工、运维等多阶段, 数据格式异构、语义割裂问题长期制约数字化管控效率。为此, 构建“标准制定-数据治理-语义对齐”的完整技术体系: 首先制定统一的数据标准, 明确地质、结构、设备等数据的分类编码、格式规范及采集精度要求, 例如规定支护参数需包含锚杆长度、间距等10项核心字段; 其次采用数据清洗、去重、补全技术治理多源数据, 剔除异常值并填充缺失信息, 提升数据可用性; 最后研发基于大模型的语义对齐算法, 通过预训练学习隧道专业术语库 (如“超前支护”与“管棚”的对应关系), 结合注意力机制捕捉数据间的隐含关联, 实现设计图纸中的“支护参数”与施工记录中的“实测值”的精准映射。构建分布式数据管理平台, 采用区块链技术确保数据不可篡改, 支持多部门实时共享与协同分析。该技术体系打破数据壁垒, 使全生命周期数据从“孤岛”转变为“流动的资产”, 为隧道结构健康监测、运维策略优化提供跨阶段、多维度的数据支撑, 显著提升决策的科学性。

#### 4.4 虚实联动的实时交互与控制

虚实联动是数字孪生技术的核心价值, 但传统方案存在延迟高、控制精度低等问题。为此, 从数据传输、状态映射与控制反馈三方面实现技术突破: 在数据传输层, 采用边缘计算节点就近处理关键数据 (如位移传感

器信号), 将传输延迟压缩至100毫秒以内, 避免云端通信导致的指令滞后; 在状态映射层, 研发高精度实时映射算法, 通过卡尔曼滤波融合多传感器数据, 动态修正数字模型与物理隧道的偏差, 确保两者状态同步误差小于2%; 在控制反馈层, 构建大模型驱动的精准确控模型, 基于孪生模型仿真结果生成施工机械的转向角度、通风系统的风速等精细化指令, 并通过工业互联网协议 (如OPCUA) 实时传输至执行设备, 实现毫米级控制精度。同时建立闭环反馈机制, 通过物联网传感器实时采集控制效果数据 (如支护应力变化), 利用强化学习动态调整控制参数, 形成“虚拟仿真-指令输出-物理控制-效果反馈”的迭代优化循环。该技术突破使数字孪生从“静态展示”升级为“动态操控”, 在隧道掘进、应急处置等场景中实现了虚实世界的无缝协同, 显著提升了施工效率与安全性。

#### 结束语

大模型与数字孪生的融合为隧道全生命周期管控提供了革命性的技术路径, 有效破解了传统管控模式的诸多痛点。本文构建的融合管控架构、各阶段专属模块及关键技术突破, 形成完整的技术体系, 可实现隧道全要素、全数据、全流程的智能化管控。未来, 需进一步强化极端地质条件下的技术适配性, 研发多隧道协同管控技术, 推动技术国产化与低成本化发展。

#### 参考文献

- [1]王坤,黄元库,梁策,等.数字孪生驱动的隧道工程全生命周期管理研究[J].中国铁路,2024(7):59-68.
- [2]万世付,仇文革,黄琦茗,等.BIM技术在隧道工程全生命周期的应用研究[J].现代隧道技术,2020,57(z1):63-69.
- [3]王峰娟.道路桥梁隧道项目造价控制与优化策略[J].运输经理世界,2025(14):100-102.
- [4]李玉婷.城市桥梁隧道全生命周期检测维修技术研究[J].建设机械技术与管理,2025,38(6):28-30,34.