

数字孪生技术赋能隧道工程安全监测与预警

姜启源

山东建筑大学 山东烟台 264000

摘要：随着城市地下空间开发不断深入，隧道工程面临地质复杂、施工扰动大、运营风险高等多重挑战。传统监测手段存在数据孤岛、响应滞后、预警能力弱等问题。本文提出将数字孪生技术深度融入隧道全生命周期安全监测体系，构建“感知—建模—仿真—决策—反馈”闭环机制。通过融合多源异构传感数据、高精度三维建模、实时动态仿真与智能预警算法，实现对隧道结构状态的全域感知、风险演化模拟与主动预警。案例研究表明，该方法显著提升监测效率与预警准确性，为智慧隧道建设提供新范式。

关键词：数字孪生；隧道工程；安全监测；智能预警

引言

隧道作为交通基础设施的关键节点，其安全运行直接关系公共安全与社会经济稳定。然而，受复杂地质条件、施工扰动及长期服役老化等因素影响，隧道易发生变形、渗漏甚至坍塌等事故。传统监测依赖人工巡检与静态传感器，难以实现动态、连续、全局的风险识别。近年来，数字孪生技术在工业、城市等领域展现出强大潜力，但其在隧道工程中的系统性应用仍处探索阶段。本文立足工程实践，提出基于数字孪生的隧道安全监测与预警新框架，旨在突破现有技术瓶颈，推动隧道运维向智能化、前瞻性转型。

一、数字孪生技术内涵及其在隧道工程中的适配性分析

数字孪生技术依托“物理实体—虚拟模型—数据连接—服务应用”四维架构，构建起虚实映射、实时交互与动态演化的闭环体系，为复杂基础设施提供全生命周期的数字化支撑。隧道工程因其穿越地质条件多变区域、施工扰动效应显著、服役周期长达数十年，对高精度三维建模、多源异构数据融合、结构行为动态仿真及风险智能决策能力提出极高要求。传统监测方法依赖有限测点与静态阈值判断，难以应对时空覆盖不连续、信息孤岛严重、响应机制滞后等固有缺陷。数字孪生通过建立与实体隧道同步演化、高度一致的虚拟镜像，打通地质勘探、结构设计、施工过程与运营维护各阶段的数据链路，实现对变形、应力、渗流、裂缝等关键状态参数的全域感知与趋势预测。面向隧道工程特殊需求，“隧道数

字孪生体”应集成四大核心属性：几何属性确保空间形态与实际构造精确对应；物理属性刻画材料本构关系与荷载响应机制；行为属性模拟结构在时间维度上的损伤演化过程；规则属性则内嵌设计规范、安全控制阈值及运维处置逻辑。四者协同作用，使数字孪生不仅成为状态展示平台，更升级为具备推理、预警与辅助决策能力的智能中枢。该技术有效弥合了物理实体与信息空间之间的割裂，将被动式安全管控转变为主动式风险治理，在提升隧道结构韧性、延长服役寿命、保障公共安全等方面展现出高度契合工程实际的适配性与前瞻性价值。

二、隧道数字孪生监测系统的构建路径

1. 多源感知层

隧道数字孪生监测系统的感知基础依赖于多技术融合的传感网络。光纤光栅传感器可嵌入衬砌结构内部，实现对微应变与温度变化的高灵敏度捕捉；地基或星载 InSAR 技术提供大范围、高精度的地表形变监测，有效识别区域沉降趋势；无人机搭载倾斜摄影系统定期巡检隧道进出口及边仰坡，生成厘米级实景三维模型；BIM 与 GIS 集成构建空间基准框架，支撑工程信息的空间定位与拓扑关联；物联网传感器网络则覆盖渗压、湿度、振动等环境参数，形成全天候、全要素的数据采集体系。这些异构感知手段协同工作，确保毫米级精度的结构响应数据在时间与空间维度上连续、无盲区地获取，为上层建模与分析提供坚实数据底座。

2. 数据融合与建模层

高保真虚拟模型是数字孪生体的核心载体。通过激光扫描获取的点云数据与设计阶段的 BIM 模型进行配准

融合,可重建隧道实际几何形态,修正施工偏差带来的模型失真。在此基础上,将地质勘探数据、支护结构参数、材料性能指标及运营维护记录等多维属性嵌入模型构件中,形成具备工程语义的智能信息模型。该模型不仅反映隧道静态几何特征,还承载其物理构成与历史状态,支持按需调用与多粒度表达。数据融合过程采用统一时空基准与语义本体,消除多源异构数据间的语义鸿沟,确保模型在全生命周期内具备一致性、可追溯性与可扩展性,为后续动态仿真提供结构化输入。

3. 动态仿真与更新机制

数字孪生体的生命力在于与物理实体的同步演化。基于有限元法或离散元法构建的力学仿真引擎,能够模拟围岩一支护体系在不同工况下的应力应变响应。当实时监测数据流入系统后,通过数据同化算法(如卡尔曼滤波或贝叶斯更新)动态修正模型参数,使虚拟体不断逼近真实状态。这种“以实校虚、以虚预实”的机制,使孪生模型不仅能回溯已发生变形的原因,还可预测未来荷载作用下的结构行为。仿真结果以可视化方式呈现风险热点区域,支持对潜在失稳区的提前干预。模型更新频率可根据风险等级灵活调整,实现计算资源与预警时效的最优平衡。

4. 边缘—云协同架构

面对海量高频监测数据,系统采用边缘计算与云计算协同的分层处理架构。部署在隧道现场的边缘节点负责原始数据的滤波、压缩与初步异常检测,降低传输延迟并减轻带宽压力,尤其适用于突发形变等紧急事件的毫秒级响应。经过预处理的数据上传至云端平台,利用分布式计算集群开展多维度关联分析、长期趋势挖掘及机器学习模型训练。云端还承担数字孪生体的集中管理、版本控制与多用户协同访问功能。该架构兼顾实时性与智能性,既保障关键安全事件的快速处置,又支持全网隧道群的宏观风险评估与运维决策优化。

三、基于数字孪生的智能预警模型创新

1. 多尺度风险耦合评估

隧道结构安全状态呈现显著的多尺度特征,单一维度监测难以全面反映系统性风险。微观层面聚焦衬砌裂缝宽度、钢筋锈蚀程度等局部损伤指标,反映材料劣化与局部应力集中;中观层面关注断面收敛变形、拱顶沉降速率等结构整体响应,体现支护体系与围岩相互作用状态;宏观层面则涵盖地表沉降场、区域地质活动等大范围环境扰动,揭示外部荷载对隧道稳定性的影响。数

字孪生平台通过统一时空框架将三类尺度数据关联融合,构建“点—线—面”联动的风险评估机制。当某一尺度出现异常时,系统自动触发跨尺度回溯与推演,识别风险传导路径。例如,局部裂缝扩展可能引发断面刚度下降,进而诱发区域性沉降加速。这种耦合评估模式突破了传统阈值报警的孤立视角,实现从局部隐患到系统风险的全景式识别。

2. 融合物理机理与机器学习的混合预警模型

传统预警依赖固定力学阈值,难以适应复杂工况下的非线性演化规律。新型预警模型将岩土力学本构关系与数据驱动算法深度融合。LSTM网络擅长捕捉形变、渗压等参数的长期时序依赖性,可识别缓慢累积型风险的早期信号;图神经网络(GNN)则将隧道划分为节点与边构成的拓扑图,有效建模空间相邻断面间的力学耦合效应。两类算法输出的风险概率与基于有限元计算的理论安全系数进行加权融合,动态生成随工况自适应调整的预警阈值。例如,在雨季期间,模型自动降低渗流—变形耦合指标的报警门槛。该混合架构既保留物理规律的可解释性,又具备对未知模式的学习能力,显著提升预警的准确性与鲁棒性。

3. 风险演化沙盘

数字孪生体具备强大的情景推演能力,可构建“风险演化沙盘”用于灾害预演与预案测试。在虚拟环境中,系统模拟极端工况如持续强降雨导致地下水位骤升、邻近施工超载、地震动输入或交通流量激增等场景,驱动孪生模型实时计算结构响应。通过可视化技术,展示应力重分布、塑性区扩展、位移场演变等过程,预判潜在失稳位置与破坏模式。沙盘支持多方案对比,例如不同加固措施对抑制裂缝扩展的效果评估,为应急决策提供量化依据。该功能将预警从“事后响应”前移至“事前推演”,使管理者能在灾害发生前制定精准干预策略,实现风险关口的实质性前移。

4. 案例验证

在西南某山岭隧道工程中,数字孪生智能预警系统完成了从理论构建到实际应用的关键验证。该隧道穿越地质条件复杂的破碎带,长期面临衬砌开裂、渗漏水等结构性病害风险。项目部署了包含200余个光纤光栅传感器的分布式感知网络,结合周期性InSAR地表形变监测与无人机倾斜摄影巡检,构建出高精度、多属性融合的隧道数字孪生体。在一次区域性强降雨事件发生前72小时,系统通过LSTM模型捕捉到K28+350断面收敛速

率呈现非线性加速趋势，图神经网络同步识别出该断面与相邻区段出现异常的空间协同变形特征。基于嵌入孪生体的有限元仿真引擎，平台综合判断该区域围岩因节理面遇水软化而濒临局部失稳，随即自动触发黄色预警，并推送包含注浆范围、材料配比及施工时序的处置建议。现场技术人员据此开展针对性加固作业，成功阻断了潜在塌方链式反应。经半年运行统计，该数字孪生预警系统将误报率较传统阈值报警方法降低40%，从数据异常识别到应急指令生成的全流程响应时间缩短60%。这一实践不仅证实了多源感知、智能算法与物理仿真深度融合的技术路径可行性，也凸显了数字孪生在复杂地质隧道中实现“早发现、准判断、快响应”闭环管理的核心价值，为同类工程提供了可复制、可推广的应用范式。

四、工程应用挑战与对策

数字孪生技术在隧道工程中的规模化落地仍面临多重现实挑战。不同参与方在设计、施工与运维阶段采用异构软件平台与数据格式，导致信息割裂、模型断层，形成显著的数据壁垒。解决这一问题需推动跨阶段、跨专业的统一数据标准建设，例如在建筑信息模型（BIM）通用格式IFC基础上融合地理信息标准CityGML，扩展适用于隧道工程的语义本体与属性集，实现全生命周期数据的无缝流转与语义互操作。高精度三维模型虽能提升仿真真实性，但其庞大的数据体量严重制约实时交互性能，尤其在移动端或低带宽环境下。对此，可引入多层次细节（LOD）分级策略，根据应用场景动态加载对应精度模型，并结合WebGL等轻量化渲染技术，在保障可视化效果的同时满足现场人员对流畅交互的需求。当前智能预警算法多基于特定工程训练，面对岩溶、软土、高地应力等多样地质条件时泛化能力有限。构建覆盖典型地质类型、结构形式与灾害模式的隧道数字孪生样本库，成为提升模型适应性的关键路径；在此基础上，利用迁移学习技术将已有知识迁移到新场景，可显著降低数据标注成本并加速模型部署。更深层次的障碍源于制

度与标准体系的滞后。目前尚无针对隧道数字孪生的国家级或行业级技术规范，导致模型精度要求模糊、预警响应流程不清、数据权属边界不明，影响多方协作与责任界定。亟需由主管部门牵头编制《隧道数字孪生建设指南》，明确从数据采集、模型构建、系统集成到预警响应的全流程技术指标，规范数据安全、模型更新机制与应急联动规则。唯有通过技术、标准与管理协同推进，才能真正打通数字孪生从试点示范走向工程常态应用的“最后一公里”。

结束语

数字孪生技术为隧道工程安全监测与预警提供了从“被动响应”向“主动防控”跃迁的技术路径。本文提出的“感知—建模—仿真—决策—反馈”闭环体系，不仅强化了对隧道结构状态的全要素、全过程掌控，更通过智能预警模型实现了风险的早识别、早干预。未来，随着5G、AI、边缘计算等技术的深度融合，隧道数字孪生体将逐步具备自主学习与协同决策能力，成为智慧基础设施的核心组件。然而，技术落地仍需跨学科协作、标准体系支撑与工程实践验证。唯有坚持“技术驱动+场景牵引+制度保障”三位一体推进，方能真正释放数字孪生在重大地下工程安全领域的变革潜力，为国家基础设施韧性提升注入新动能。

参考文献

- [1] 高玉山, 付新锋, 韩磊, 等. 数字孪生技术赋能地面工程项目建设应用与研究[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2022(5): 3.
- [2] 王玲, 张铎, 杨卉, 等. 浅谈数字孪生在桥梁工程中的应用[C]//2024(第十二届)中国水利信息化技术论坛. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 2024.
- [3] 土木工程. 某特长隧道智能建造的数字孪生技术及其应用研究[D]. 2024.