

基于数字孪生的公路工程隐蔽工程验收与可追溯机制研究

王碧川

云南云岭高速公路工程咨询有限公司 云南 昆明 650041

【摘要】：公路工程隐蔽工程因施工区域受限、工序复杂、节点分散等特点，长期面临记录不完整、责任难界定和验收信息滞后等问题。本研究利用数字孪生技术构建虚实融合的隐蔽工程管理系统，通过实时采集施工数据、构建三维工程模型并关联关键工序信息，实现施工状态的动态呈现及数据自动留痕机制。系统以可视化管理为核心，将设计、施工与验收数据融为统一载体，使隐蔽工程质量问题具备可回溯性与可验证性。研究提出的技术框架包括数据采集体系构建、数字孪生模型更新、工序节点追踪与验收流程重构，为透明化验收、责任溯源和全过程质量控制提供支撑。研究成果为公路工程隐蔽工程的数字化管理提供技术路径，具有推广价值。

【关键词】：数字孪生；公路工程；隐蔽工程；可追溯机制；质量验收

DOI:10.12417/2811-0722.26.02.033

引言

隐蔽工程在公路建设中占据关键地位，其质量直接影响结构安全与运营稳定。然而，由于隐蔽工程难以在完工后全面检查，传统验收方式常依赖人工记录和阶段性检查，导致信息断层明显、质量责任边界模糊，难以满足精细化管理需求。数字孪生技术的发展为解决上述难题提供了新的可能，通过构建与物理工程同步更新的虚拟模型，实现施工过程的数据化、可视化与动态管理。本研究旨在探索数字孪生在公路隐蔽工程验收与可追溯体系中的应用路径，构建符合行业特性的技术框架与管理机制，以提升质量控制效率，为工程全生命周期管理提供支撑。

1 公路隐蔽工程数字化管理的发展态势

随着 BIM、物联网、激光扫描和移动测绘等技术的工程化成熟，施工现场的关键工序、结构参数和环境状态能够以更高的精度被捕获，为隐蔽工程这一传统“不可见”环节提供了可量化、可存证的基础数据。数字孪生技术的引入进一步推动管理模式由静态档案向动态映射转型，通过构建与实体工程同步更新的数字模型，使隐蔽工程在施工过程中具备可观察、可分析和可验证的数字形态。这一趋势在公路路基、桥梁下部结构、排水设施等隐蔽部位的管理实践中表现尤为明显，虚实对应的管理方式逐步替代依赖人工记录的传统方式。

随着数据链的完善，隐蔽工程管理正在向全过程质量监控的方向深化。工程现场的传感器阵列、移动终端和机具设备持续输出施工状态信息，使得施工断面的压实度、钢筋布设位置、混凝土浇筑参数等关键指标能够实时记录并自动上传至管理平台^[1]。其价值不仅体现在形成连续完整的工程数据链，还体现在为监理单位和建设单位提供即时的审核与校核依据，提升了验收流程的透明度。工程数据与数字模型的融合能力不断增强，模型中的构件信息可依据现场进度自动更新，形成动态可视化载体，使管理人员能够从空间尺度掌握隐蔽工程的施工质量。

在管理理念方面，数字化手段逐渐使隐蔽工程从事后核走向过程控制。数字孪生驱动的实时反馈机制促使施工组织方式发生变化，工序间的衔接依托数据匹配实现精准管理，减少了信息孤岛和管理延迟。隐蔽工程的验收环节正在由纸质资料汇编转向基于数字证据链的质量确认，模型中固化的历史数据、时序记录和操作轨迹成为工程真实性的重要凭据。行业相关规范亦在向数字化交付、数据留痕和智能监测方向调整，为隐蔽工程数字化管理体系的成型提供制度支撑。

2 隐蔽工程数字化建设中的关键矛盾

隐蔽工程数字化建设在实际推进过程中面临多维度矛盾，这些矛盾集中体现在数据获取、模型表达、流程衔接与管理协同等方面，并直接影响数字化成果的可靠性与工程应用价值。隐蔽工程处于施工现场的非开放空间，具有结构封闭、施工窗口短、工序重叠频繁等特性，造成数据采集条件受限。传感器布设、图像采集、扫描设备操作均受到场地狭窄、光照不足和作业干扰等因素影响，导致部分关键参数呈现缺失、不连续或精度不足的情况。数据链不完整使数字孪生模型难以实现高一致性复刻，虚实映射的准确度受到制约，影响工程质量追踪的深度。

数据标准的不统一构成另一重矛盾。不同施工单位、监理机构和检测团队在信息格式、命名规则及记录方法上存在差异，导致数据难以在平台中实现无缝融合。隐蔽工程的构件往往涉及多专业、多工序，其信息属性复杂，若缺乏统一的数据表达框架，数字模型中构件信息难以保持一致性和可调取性，进而影响工程全生命周期的数据复用价值。部分施工现场仍以手工记录作为辅助方式，人工数据与自动化数据难以完全对应，加剧了数据碎片化问题^[2]。在管理流程方面，数字化建设未能充分融入传统验收体系，形成流程错位的矛盾。隐蔽工程验收节点紧凑、参与方众多，一旦数字化流程与施工进度不同步，容易出现模型更新滞后、验收信息延迟及数据难以及时固化的情况。部分单位对数字化工具依赖不足，使数据生成与验

收工作脱节,造成虚拟模型与实体状态不一致。管理制度缺乏配套机制,也影响数字化成果在责任划分、质量评价和竣工交付中的权威性,降低数字化建设的实际效能。

人员能力与技术系统之间的匹配矛盾同样突出。隐蔽工程施工团队对数字化工具的操作熟练度存在差异,部分人员对数字孪生、信息化记录方式及数据质量要求理解不足,影响信息采集的规范性。系统平台运行涉及数据处理、模型更新和业务逻辑判断等复杂环节,对管理团队提出更高的专业能力要求,而培训机制与人员储备往往无法同步满足需求。技术系统本身在适应复杂现场环境、实现高频数据更新和保障系统稳定性方面仍存在瓶颈,使数字化建设在工程环境中面临实际应用阻力。

3 数字孪生驱动的管理技术路径构建

数字孪生驱动的隐蔽工程管理技术路径的构建依托虚实融合机制,通过工程感知体系、数据处理链、动态模型更新规则以及质量验收逻辑的重塑,形成贯穿施工全过程的系统化框架。技术路径的核心在于实现物理工程状态与数字模型的同步映射,使隐蔽部位的施工过程具备可视化、可分析和可溯源的能力。为了达成这一目标,需要在施工现场布设与工程特性匹配的感知单元,包括位移、振动、温度、湿度、压实力等多类传感设备,并结合图像采集与三维扫描手段获取结构细部信息。这些数据在采集后进入统一的数据处理中心,通过格式转换、异常剔除与特征提取,构成可被模型识别的数字化输入,实现数据从物理世界到虚拟世界的高质量传递。

在模型层面技术路径强调构建可持续更新的数字孪生体。隐蔽工程具有施工阶段性强、工序衔接复杂的特点,数字孪生模型必须能够根据现场信息进行实时或准实时更新,保持虚拟构件与实际构件在位置、参数和状态上的一致^[3]。模型更新依托参数驱动、规则驱动和数据驱动相结合的机制,既保证构件几何形态的准确性,也确保工序属性、材料特征和施工时序的完整表达。模型内部嵌入的逻辑规则可以对数据异常进行判断,对施工偏差给出提示,实现结构化的质量预警功能。此外,模型中的构件关联历史数据、施工记录及现场影像,为验收工作提供完整的数字证据链。

在管理流程方面,数字孪生技术通过重构验收机制提升了隐蔽工程质量控制的有效性。系统以数据留痕为基础,将工序指标、施工过程与模型状态同步固化,形成连续的可追踪记录。监理和建设单位可通过模型查看工序位置及实时信息,实现远程核查和协同审核。当封闭节点完成时,系统自动生成对应的结构状态与检验信息,使验收结论与实际施工形成明确对应。通过平台化整合设计、施工和监测等多源数据,管理人员能够开展跨阶段分析并识别潜在风险,从而提升验收流程的透明度、规范性与管理效率。

4 虚实融合条件下的质量管控应用示例

虚实融合条件下的质量管控应用示例体现了数字孪生在隐蔽工程施工关键环节中的实时支撑能力。以路基压实作业为例,施工机械在运行中产生的压实遍数、碾压轨迹、速度与振幅等数据通过传感设备实时采集并上传至管理平台。系统将这些信息与数字模型自动关联,使压实质量能够精确映射到具体空间位置。当某一区域出现压实度不足或漏压现象时,模型会以颜色或提示方式标识异常部位,引导管理人员及时采取措施,实现问题定位与现场整改的同步完成。虚拟模型与实体作业之间的动态联动,使管理人员能够在封闭前发现潜在隐患,确保隐蔽工程关键工序的质量更加透明和可验证,显著提升施工过程的监督精度与管理可靠性。

在钢筋隐蔽节点管理中,虚实融合的优势更加突出。钢筋绑扎完成后,通过三维扫描或图像测量技术获取钢筋位置、间距、保护层厚度等关键数据,并将其与设计模型自动比对。系统对偏差值进行分析,并在数字孪生模型中以构件属性的形式固化,使每一处钢筋节点都具备可回溯的数据证据^[4]。监理单位可通过平台查看某一构件的钢筋布设详情,包括扫描图像、测量值、施工时序等信息,而无需依赖现场拆检或单纯凭借人工检查记录判断质量。隐蔽节点的质量验收因此从以往的“点检”转向面向整体的“全域可视”,减少了质量盲区。

混凝土浇筑的质量管理在虚实融合条件下得到显著提升。温度传感器、塌落度记录仪及灌注监测设备能够连续采集入模温度、浇筑速率和振捣状态等关键参数,并实时传输至数字孪生平台。系统将数据与构件三维模型关联,生成动态施工状态图层,使浇筑过程的均匀性和稳定性得到直观验证。当温度偏离合理范围或振捣频率异常时,模型会即时标示异常区域,为管理人员提供现场调整依据。在验收阶段,系统依据全过程数据自动生成质量核验包,将监测曲线、影像资料和构件状态集成于统一界面,使验收人员能够从参数、过程和空间信息等多个维度判断质量水平。

5 基于数字孪生的工程管理深入拓展

基于数字孪生的工程管理深入拓展表现在管理范围的延伸、功能体系的完善与数据价值的深化利用,推动公路隐蔽工程质量管理由施工阶段应用向全生命周期治理发展。随着数据不断累积,数字孪生模型由记录施工过程的工具演变为覆盖设计、施工、运维多阶段的综合工程载体。构件属性、时序信息与历史记录在模型中完整保留,形成可长期追踪的数字档案,为运行期的质量监测提供可靠依据。排水系统、边坡防护等隐蔽部位投入使用后,其变形、渗水及环境变化可通过监测数据与模型联动进行分析,帮助管理人员及时识别结构性能变化趋势,实现风险预控和预防性养护,使隐蔽工程管理更加持续、精准和可预测。

随着系统功能的扩展,基于数字孪生的管理方式逐渐具备预测分析能力。依托大量的历史数据和现场监测信息,系统可建立隐蔽工程的状态演化模型,识别潜在质量隐患并给出风险等级评估^[5]。当某一工序的施工参数与历史合格区间出现偏离,平台可提前提示管理人员关注可能产生的结构问题。对于长期性病害,模型能够通过时序数据对变形速率、沉降趋势等指标进行判断,为制定养护策略提供量化依据。数字孪生所承载的深层数据分析能力,使质量管理从被动响应走向主动调控,为工程运行安全提供更具前瞻性的支撑。

在管理协同方面,数字孪生技术促使多参与方建立更紧密的信息共享机制。施工单位、监理单位和建设单位可依托统一模型掌握工程状态,提高信息透明度,减少沟通误差。模型内置的数据逻辑与质量规则为多方提供一致的判断依据,使管理决策更具协调性。在竣工阶段,数字孪生模型可作为数字化交付成果,替代传统图纸与资料,形成结构清晰、内容完整、可直接支撑运维的工程数据包,为后期养护提供可靠依据。随着

算法、感知设备和计算能力的提升,模型逐渐具备自动识别偏差、智能调整参数和生成质量报告的能力,有助于降低人工工作量并提升管理效率。未来的隐蔽工程管理将依托数字孪生实现工程状态自动捕获、数据自动处理和风险自动预警,构建实时、高效、可持续的质量管控体系。

6 结语

数字孪生为公路隐蔽工程质量管理提供了全新的技术框架,使传统依赖人工记录与经验判断的管理模式向数据驱动和过程透明的方向迈进。通过构建虚实同步的工程模型,隐蔽工序在施工阶段具备可视化、可追踪和可验证的特征,为全过程质量控制奠定了坚实基础。随着感知技术、模型算法与信息平台的不断完善,数字孪生在验收流程优化、风险识别和协同管理中的作用愈加突出。其对数据价值的深度挖掘推动了工程理由阶段性监督向全生命周期治理的延伸,为提升公路建设质量与运行安全提供可靠支撑,并为行业未来的智能化发展创造更广阔的空间。

参考文献:

- [1] 庞骁奕,乔科,汪军,等.数字孪生技术在公路工程领域的应用研究[J].四川水泥,2023,(06):247-249+252.
- [2] 朱海明,王顺超,王嘉晨,等.基于数字孪生的山岭地区高速公路施工进度管理研究[J].土木工程信息技术,2023,15(02):37-43.
- [3] 王嘉晨.基于数字孪生的山岭地区高速公路施工进度管理研究[D].华中科技大学,2022.
- [4] 梁才.Bentley 数字孪生技术在公路品质工程建设中的应用[J].中国交通信息化,2020,(06):121-124.
- [5] 申威,覃延春.基于 BIM+GIS 的公路工程数字孪生系统建设与应用[J].中国交通信息化,2023,(05):130-135.