

# 数字孪生技术在建筑工程全生命周期质量追溯中的应用

梁怀喜

441702\*\*\*\*\*4254

**摘要：**建筑工程工序繁杂、材料多样，传统质量追溯模式易流程断裂、责任模糊。数字孪生技术以“物理-虚拟”双向映射打破质量数据孤立，构建连贯可追溯的管控体系。本文以建筑工程全生命周期为线索，从设计、施工、运维三阶段剖析其应用逻辑与路径，探讨技术适配性及解决传统追溯痛点的方法，为行业质量管控革新提供思路。

**关键词：**全生命周期；质量追溯；技术适配

**DOI：**10.69979/3029-2727.25.09.084

## 1 研究背景及意义

### 1.1 研究背景

当下，我国建筑业正逐步向“质量优先”的发展模式转变，建筑工程质量对于建筑整体的使用体验与安全性具有显著影响。然而，由于装饰工程所涉及的材料品类繁多，且施工工序存在交叉情况，传统的质量追溯方式主要依赖纸质记录。这种记录方式存在诸多弊端，如数据易丢失、易被篡改等。数字孪生技术凭借构建虚拟模型，能够实现质量数据在全生命周期内的贯穿，并且相关政策也鼓励该技术在工程质量管控领域的应用。

### 1.2 研究意义

#### 1.2.1 理论意义

目前，现有关于数字孪生在建筑领域的研究大多聚焦于结构安全等方面，针对装饰工程的针对性研究相对较少。本文通过梳理适配逻辑，构建应用框架，填补了该领域的理论空白。

#### 1.2.2 实践意义

本文研究成果能够为装饰工程质量管控提供新的思路，例如精准绑定材料信息、提前发现设计与施工之间的冲突、清晰界定质量责任等，推动质量管控模式从“经验驱动”向“技术驱动”转变。

### 1.3 国内外研究现状

#### 1.3.1 国外研究现状

国外在数字孪生技术应用于建筑工程质量追溯方面起步较早，注重结合实际需求开展研究。通过将数字孪生与BIM技术相结合，实现了材料全流程追溯；与物联网技术结合，能够提前干预质量风险；同时关注模型的动态更新，以确保虚拟模型与实际工程的同步性。

#### 1.3.2 国内研究现状

国内对于数字孪生技术在建筑工程质量追溯的研究主要由政策驱动，正从理论研究逐步走向实践应

用。高校团队主要聚焦于设计阶段的应用研究，企业则致力于开发管控平台，以实现质量数据的管理与追溯。此外，国内研究还注重将数字孪生与区块链技术相结合，以确保数据的真实性与安全性。

## 2 数字孪生技术在建筑工程质量追溯中的理论框架

### 2.1 核心概念界定

#### 2.1.1 建筑装饰工程全生命周期

建筑工程全生命周期涵盖从项目启动至拆除的整个过程。结合质量追溯的需求，可将其划分为四个关键阶段：设计阶段主要确定质量标准；施工阶段是质量问题的高发阶段；运维阶段能够暴露并管控质量问题；拆除阶段虽不直接涉及质量追溯，但需依据前期数据判断材料的可回收性。质量追溯需贯穿上述各阶段，形成完整的链条。

#### 2.1.2 数字孪生质量追溯系统

该系统构建了“物理层-数据层-模型层-应用层”的四层架构。物理层包含工程实体、感知设备和移动终端，主要负责数据采集；数据层承担数据传输、存储与处理的任务，为质量追溯提供可靠的数据基础；模型层基于BIM技术构建虚拟模型，为质量追溯提供可视化载体；应用层通过开发功能模块，实现质量管控的便捷化与智能化。

### 2.2 技术融合原理

#### 2.2.1 数字孪生与BIM的协同

BIM模型是数字孪生与BIM协同的基础，协同的核心在于使BIM模型“动态化”。在设计阶段，通过嵌入信息构建“信息富集型”模型；施工阶段实时更新模型；运维阶段录入维修更换信息，从而为质量追溯提供连续完整的数据。

#### 2.2.2 数字孪生与区块链的融合

为解决质量数据的可信度问题,将关键质量数据上传至区块链网络,并在数字孪生模型中为数据生成唯一标识并进行关联,以确保追溯结果的客观公正。

### 2.2.3 数字孪生与物联网的交互

物联网技术能够实现数字孪生模型的“实时性”。在施工现场部署感知设备,通过物联网传输数据,并与预设标准进行比对,当数据超出范围时自动预警,从而完善质量追溯链条。

## 3 数字孪生技术于装饰工程全生命周期质量追溯中的应用场景

### 3.1 设计阶段: 质量标准的源头追溯

#### 3.1.1 材料选型与信息绑定

设计阶段作为质量标准的源头,数字孪生技术将材料信息与设计方案进行深度绑定,构建“信息档案”,以规避施工过程中出现“材料与设计不符”的问题。若在后续发现材料质量问题,可借助虚拟模型反向追溯设计阶段材料选型的依据,判断是否源于设计疏漏,从而清晰界定设计阶段的质量责任。

#### 3.1.2 深化设计与冲突排查

装饰工程深化设计时常因各专业之间协调不足而出现冲突,例如吊顶与机电管线、墙面装饰与门窗尺寸等问题,若未及时发现,将导致返工并影响工程质量。数字孪生技术通过构建综合虚拟模型,对深化设计方案进行仿真验证,模拟安装过程,检查空间冲突与工艺矛盾,结合材料特性与施工要求判断其可施工性,标记冲突并提出优化建议,以减少质量隐患。

### 3.2 施工阶段: 质量过程的实时追溯

#### 3.2.1 材料进场验收管控

材料进场验收是保障施工质量的首道防线,传统验收方式易出现“漏检、错检”情况。数字孪生技术对验收流程进行优化,现场人员通过扫描材料标识,调取设计信息核对规格等,查看区块链关联文件验证质量,标记不合格材料并记录相关信息,防止其流入施工环节,为追溯供应商责任提供依据。

#### 3.2.2 施工工艺实时监控

装饰工程施工工艺较为复杂,操作不当极易引发质量问题。数字孪生技术可实现实时监控,通过部署感知设备采集数据并反馈至模型,与预设标准进行比对,当出现偏差时及时预警,记录偏差信息,形成追溯记录,便于分析原因与界定责任。

#### 3.2.3 质量验收流程优化

传统装饰验收主要依赖人工,验收结果易受主观因素影响,且记录难以保存与查询。数字孪生技术构建“虚拟+实体”双轨模式,对实体进行扫描并与模型比对,自动生成验收数据,上传至模型形成报告,标记不合格

项并推送整改,重新验收后更新结果,以减少误差,实现数据可追溯。

### 3.3 运维阶段: 质量问题的持续追溯

#### 3.3.1 装饰部件维修管理

在运维阶段,装饰部件可能会出现质量问题,需要及时进行维修。数字孪生技术对维修追溯流程进行优化,通过扫描部件标识调取相关信息,生成维修工单,维修完成后更新记录,确保维修过程规范,追溯损坏原因,为质量改进提供依据。

#### 3.3.2 质量风险预判与干预

装饰工程运维部分质量问题具有渐进性,提前预判可避免问题扩大。数字孪生技术结合历史与实时数据对风险进行预判,分析老化与损坏趋势,标记风险位置并发出预警,记录整个过程,完善追溯链条。

## 4 关键技术实施路径与应用价值

### 4.1 关键技术实施路径

#### 4.1.1 数字孪生模型构建

数字孪生模型构建应依据装饰工程特性分阶段推进。在设计阶段,基于建筑信息模型(BIM)软件搭建几何模型,并嵌入非几何数据,以形成初始模型。其次,在施工阶段,借助物联网设备采集施工现场数据,如材料进场情况、工程进度、质量检验结果等,并将这些数据导入模型,实现模型的动态更新,从而确保虚拟模型与物理实体同步。在运维阶段,持续录入装饰部件的维修、更换以及环境影响等数据,进一步丰富模型内容,为装饰工程全生命周期的质量追溯提供载体。

#### 4.1.2 质量数据管理体系搭建

质量数据是装饰工程质量管控的核心要素,因此需构建规范的管理体系。具体而言,一是要明确数据采集范围,涵盖设计、施工、运维等各阶段的数据,实现对装饰工程全生命周期数据的覆盖;二是要统一数据标准,制定统一的数据格式与编码规则;三是要建立数据安全机制,结合区块链技术存储关键数据,并设置访问权限;四是要优化数据查询功能,设计便捷的数据接口,以支持多维度的数据查询。

#### 4.1.3 多技术协同应用

数字孪生技术需要与其他相关技术协同应用。与物联网技术协同,可实现对施工现场数据的实时采集;与区块链技术协同,能够确保数据的真实性和不可篡改性;与人工智能技术结合,可对数据进行深入分析,挖掘潜在规律,为质量风险的预判提供支持。例如,通过分析墙面涂料脱落案例,可提前发出质量风险预警。

### 4.2 数字孪生技术在质量追溯中的应用价值

#### 4.2.1 提升质量追溯效率

传统的质量追溯方式繁琐且耗时，而数字孪生技术通过构建统一的模型与平台，将分散的数据进行集中整合，实现“一站式”质量追溯，从而有效提升了质量追溯的效率和完整性。

#### 4.2.2 强化质量责任界定

装饰工程涉及多个参与方，在传统模式下容易出现责任推诿的情况。数字孪生技术通过记录各参与方的操作信息，形成清晰的质量追溯链条，能够精准界定质量责任，规范各方行为。

#### 4.2.3 降低质量管控成本

一方面，通过虚拟仿真技术可提前发现质量问题，减少工程返工成本；另一方面，借助数字孪生技术对质量风险进行预判并提前干预，可减少运维阶段的维修成本，同时降低纸质文档的管理成本。

### 5 数字孪生技术应用面临的挑战与对策

#### 5.1 面临的挑战

##### 5.1.1 技术融合难度较高

数字孪生需与多种技术协同应用，然而不同技术在标准和格式方面存在差异，易引发“数据孤岛”“接口不兼容”等问题，进而增加了应用的复杂程度。

##### 5.1.2 行业应用壁垒较高

其一，模型构建与平台开发需要复合型专业人才，而当前行业内此类人才较为匮乏；其二，应用过程需要投入大量资金，涵盖硬件采购、软件开发以及技术培训等方面。对于中小型装饰企业而言，过高的投入成本形成了应用壁垒，限制了该技术的规模化推广。

##### 5.1.3 数据安全风险显著

数字孪生质量追溯系统整合了装饰工程全生命周期的敏感数据，如设计方案、供应商信息等。数据泄露或篡改会给企业带来损失与风险。尽管区块链技术可防止数据篡改，但网络安全防护和权限管理存在漏洞，如黑客攻击、内部越权访问等，对数据安全构成威胁。

#### 5.2 应对对策

##### 5.2.1 建立统一的技术标准体系

由行业协会、科研机构和龙头企业牵头，制定数字孪生技术在装饰工程质量追溯领域的应用标准，明确接口规范、数据格式以及协同流程。例如，统一物联网与数字孪生模型的数据标准，制定建筑信息模型（BIM）与数字孪生模型的协同规则，推动标准的普及与执行，降低技术融合难度。

##### 5.2.2 完善人才培养与资金支持机制

一方面，高校应调整专业设置，开设交叉学科以培养复合型人才，企业可与高校、培训机构合作开展在职培训。另一方面，政府应出台相关政策，为应用企业提供补贴和税收优惠，金融机构应推出专项贷款，为中小企业提供资金支持，推动该技术的广泛应用。

#### 5.2.3 构建全方位的数据安全防护体系

从技术和管理两个层面加强防护。在技术方面，采用加密传输等技术，引入身份认证和权限分级管理。在管理方面，制定严格的制度，规范数据流程，明确责任主体，定期进行评估与演练，引入第三方审计机构进行监督。

### 6 结论与展望

#### 6.1 研究结论

本文研究数字孪生技术在建筑工程质量追溯的应用，结论为：该技术通过双向映射打破传统问题，构建全阶段追溯体系，为质量管控提供新路径。各阶段应用逻辑有侧重：设计聚焦源头追溯，施工强调实时追溯，运维注重持续追溯。应用需多技术协同，结合其他技术发挥价值，实现提升效率等目标。当前面临技术融合难等挑战，需建立标准、完善支持和构建防护体系推动推广。

#### 6.2 未来展望

未来，数字孪生技术在质量追溯应用有以下趋势：技术更智能，与人工智能融合；行业应用更规模化，拓展至中小企业；应用场景更多元，拓展至成本管控；跨领域协同更紧密，实现数据共享。总之，虽面临挑战，但该技术将成推动行业高质量发展的核心技术。

### 参考文献

- [1] 李娟. BIM技术和数字孪生技术在建筑工程中的应用特征及问题分析[J]. 四川水泥, 2024(9):55-57.
- [2] 周晋 刘杨 陈熙. 数字孪生技术在房地产市场中的应用[J]. 2023.
- [3] 刘刚, 马智亮, 曾勃, 等. 数字孪生技术在建筑工程中的应用研究综述[J]. 土木建筑工程信息技术, 2023, 15(6):1-8.
- [4] 王晓颖, 顾钦子. 建筑全生命周期中的数字孪生技术应用研究[J]. 建筑科技, 2024, 8(7):140-143.
- [5] 沈娟斐, 李超, 陈岳飞. 数字孪生在建筑工程领域的应用[J]. 中国检验检测, 2022, 30(3):5.