

BIM 与三维激光扫描技术融合的水利工程施工质量数字孪生全周期检测方法

湛晓颖¹, 赵中亚¹, 党安华^{2*}

(1. 山东汇科检测技术服务有限公司, 山东 东营 257000;

2. 山东禹科检测技术服务有限公司, 山东 东营 257000)

摘要 水利工程施工质量直接影响到工程的安全稳定运行和使用年限, 传统的检测方法存在着效率低、精度差、数据割裂等缺点, 无法满足现代化水利工程精细化、智能化的质量控制要求。针对上述问题, 可采取建筑信息模型 (BIM) 与三维激光扫描技术相结合的水利工程施工质量数字孪生检测方法。本文首先梳理 BIM、三维激光扫描和数字孪生的相关理论和技术基础, 确定各个技术在水利工程质量检测中所用的方法; 其次, 创建融合二者的技术体系, 确定检测指标体系、数据融合机制、搭建并完善数字孪生检测模型; 再次, 以工程实例为背景进行场景设置, 并展开实际操作来检验该种方法的检测准确性和使用效果; 最后, 对研究结果以及其应用价值进行总结, 指出未来的改进方向。结果表明, 该方法可以实现水利工程施工质量的实时、精准、全面检测, 提高质量管控的数字化和智能化水平, 为水利工程施工质量检测提供新的技术途径和理论依据。

关键词 BIM 技术; 三维激光扫描; 水利工程; 施工质量检测; 数字孪生

中图分类号: TV51; P234.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.13.013

0 引言

水利工程是关系到民生保障和生态安全的基础建设工程, 其施工质量直接影响到工程的运行安全性、稳定性以及耐久性。施工质量检测是保证工程质量的关键步骤。传统的水利工程施工质量检测大多依靠人工操作和常规仪器测量, 存在检测效率低、劳动强度大、数据主观性强、检测范围小等缺点, 不能满足大型、复杂的水利工程对精细化质量控制的要求, 也不能实现施工过程中质量隐患的实时预警和动态管控。随着数字化、智能化技术在工程领域迅速发展, BIM 技术、三维激光扫描技术、数字孪生技术开始结合使用, 为水利工程施工质量检测提供了新的途径。BIM 技术依靠可视化、参数化、协同化的特性, 可以完成水利工程全生命周期的数字化建模和信息管理; 三维激光扫描技术能迅速、准确地获得施工现场的三维空间数据, 为质量检测提供客观、真实的依据; 数字孪生技术可以把物理工程和虚拟模型进行实时映射, 达到施工质量的动态模拟、实时检测和精准控制的目的。因此, 本文以融合 BIM 和三维激光扫描技术的水利工程施工

质量数字孪生检测法为核心, 建立完整的检测体系并进行应用验证, 旨在弥补传统检测方法的不足, 促进水利工程施工质量检测由传统的数字化、人工化向智能化、数字化方向发展, 为水利工程施工质量控制提供技术支持。

1 相关理论与技术基础

1.1 BIM 技术核心特性及在水利工程中的应用

BIM 技术即建筑信息模型技术, 是用数字方式对建筑物进行描述的一种新的工程管理技术, 其主要特点有可视化、参数化、协同化和全生命周期性。可视化特性打破传统的二维图纸的局限, 可以把水利工程的结构、构件、施工流程等用三维立体模型的形式直观地表现出来, 使人们清楚地了解工程的各个部分以及它们之间的空间位置; 参数化特性可以对模型中的构件进行参数化的定义和关联, 在一个构件参数发生变化时, 关联构件也会自动更新, 从而提高建模速度和模型精度; 协同化功能可以让多个专业的人员在同一个模型平台上共享数据并开展合作, 有效地解决传统工程中信息分割、沟通不畅等问题; 全生命周期性可

作者简介: 湛晓颖 (1991-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程质量检测。

*通信作者: 党安华 (1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程质量检测。E-mail: danganhua@163.com

以使从工程的设计、施工、运维到最后的报废全过程的信息得到有效的管理,给工程各阶段的决策提供数据支持。

1.2 三维激光扫描技术原理及数据处理流程

三维激光扫描技术具有扫描速度快、测量精度高、非接触式测量、数据获取全面等优点,不需要接触被测物体就可以得到该物体的全部三维空间信息,适合于复杂、危险环境下水利工程施工质量检测。三维激光扫描技术的数据处理流程由三个部分组成,即数据采集、数据预处理和数据后处理。数据采集阶段用激光扫描设备对水利工程施工区进行全面扫描,得到原始三维点云数据;数据预处理阶段是对原始点云数据做去噪、滤波、对齐等工作,去掉多余的点云和噪声点云,统一数据坐标系,提高点云数据的质量;数据后处理阶段对点云数据进行分割、提取、建模等处理,把点云数据变成可以用于质量检测的三维模型或者特征参数,为后续数字孪生检测提供数据支持。

1.3 数字孪生技术在工程质量检测中的构建逻辑

在工程质量检测领域,数字孪生技术的创建过程主要是从物理实体层、虚拟模型层、数据链路层和服务应用层这四个部分展开的。物理实体层是数字孪生检测的基础,主要是指水利工程施工实体以及与其配套的检测设备,负责采集施工过程中各种质量数据和运行状态数据;虚拟模型层是对物理实体的数字化映射,用BIM技术和三维激光扫描技术创建起来的,可以准确地复现出物理实体的结构特征、尺寸参数及运行状态,从而对物理实体进行可视化的模拟;数据链路层是连接物理实体层和虚拟模型层的关键部分,它把物理实体产生的各种数据及时地传送给虚拟模型层,又把虚拟模型层模拟出来的结果同控制指令一起送还给物理实体层,使数据能双向交流并实时更新;服务应用层是数字孪生检测的目标,依靠虚拟模型和实时的数据,来完成施工质量的实时检测、隐患预知、结果剖析等工作,给工程质量治理提供决定性的依据。

2 融合BIM与三维激光扫描技术的数字孪生检测体系构建

2.1 水利工程施工质量检测指标体系确立

根据水利工程施工实际情况,检测指标体系主要由结构几何参数检测指标、结构外观质量检测指标和结构性能检测指标三大部分组成。结构几何参数检测指标主要用来检测水利工程结构尺寸精度、位置偏差、平整度、垂直度等关键参数,是保证工程结构稳定和安全的因素;结构外观质量检测指标主要是检测

结构表面的裂缝、蜂窝、麻面、破损等外观缺陷,防止外观缺陷对结构耐久性和整体性造成影响;结构性检测指标主要是检测结构的强度、刚度、抗渗性、抗冻性等主要性能,以保证工程结构能满足设计要求并达到运行目的^[1]。

2.2 BIM与三维激光扫描数据融合机制设计

根据融合机制可以分为数据坐标对齐、数据互补融合和数据误差修正这三个部分。在数据坐标对齐过程中,由于BIM模型和三维激光扫描点云数据使用的坐标系不同,需要使用坐标转换技术把两者都统一到同一个坐标系上,保证数据的一致性,坐标对齐主要用坐标平移、旋转、缩放等方法,配合特征点匹配技术,使二者的精确对齐。在数据互补融合环节,BIM模型的数据主要是指工程结构的设计参数、构件信息、施工流程等结构化数据,三维激光扫描数据主要是指施工实体的三维空间信息、外观缺陷等非结构化数据,经过数据融合技术把两种不同的数据加以综合,使设计数据同实际施工数据达到对比分析的目的,从而精确地找出施工质量存在的问题。

2.3 数字孪生检测模型搭建与优化路径

数字孪生检测模型的搭建是实现水利工程施工质量数字孪生检测的关键载体。它的搭建要以BIM技术和三维激光扫描技术为依托,按照数字孪生建立模型的逻辑,把物理实体和虚拟模型进行实时映射并双向互动^[2]。模型建立分为三步:第一步是利用BIM技术创建水利工程的设计三维模型,并补充完善模型的参数信息、构件关联关系和施工流程信息,使模型可以准确地再现工程设计方案;第二步是用三维激光扫描技术获取水利工程施工实体的实时点云数据,经过数据预处理和数据融合技术把点云数据和BIM设计模型融合起来,得到包含实际施工数据的虚拟孪生模型,达到设计模型与实际施工实体的精确对比的目的;第三步是集成物联网、人工智能等技术,在虚拟模型上建立起数据采集、传输、分析和反馈的闭环系统,从而对物理实体实施实时监控并动态更新。

3 水利工程施工质量数字孪生检测应用与验证

3.1 工程实例选取及检测场景设定

为了检验融合BIM和三维激光扫描的数字孪生检测方法的可行性和有效性,选择典型的水利工程进行应用验证^[3]。一般来说,常规的水利枢纽工程包括主体结构施工、附属设施施工等各个部分,施工工艺繁杂,质量控制难度大,传统的检测方法不能满足精细化控制的要求,更适合用数字孪生检测的方法来开展质量

检测工作。根据工程的施工特点和质量控制要求,确定三个主要检测场景,即主体结构几何参数检测场景、主体结构外观质量检测场景和附属设施施工质量检测场景。主体结构几何参数检测场景主要是对工程主体结构尺寸精度、位置偏差、平整度等重要参数进行实时检测,重点是结构关键部位施工精度的控制;主体结构外观质量检测场景主要是对主体结构表面的裂缝、破损、蜂窝等外观缺陷进行自动识别和检测,及时发现施工过程中出现的外观质量问题;附属设施施工质量检测场景主要是对工程附属设施安装精度、结构连接质量等进行检测,保证附属设施能与主体结构共同工作,满足工程运行需要。

3.2 数字孪生检测方法实操步骤实施

根据设定的检测场景,数字孪生检测的方法操作步骤主要有五个部分,保证检测工作的有序、高效进行^[4]。第一,做好前期工作,组建专业的检测队伍,确定各个成员的职责,调试 BIM 建模软件、三维激光扫描设备、数据处理软件等相关的设备和软件,保证设备和软件正常工作,并收集工程设计图纸、施工方案等相关资料,根据 BIM 技术建立工程设计三维模型,补充模型参数信息,使模型准确无误。第二,数据采集工作,用三维激光扫描设备对各个检测场景的施工实体进行全面扫描,得到原始三维点云数据,再通过物联网设备采集施工过程中各种质量数据和运行状态数据,保证数据采集全面、实时。第三,数据处理和融合,对采集来的原始点云数据做去噪、滤波、对齐等预处理,去掉冗余的数据以及噪声的数据;用设计的数据融合方法,把经过预处理过的点云数据同 BIM 设计模型融合起来,构成数字孪生检测模型,完成设计数据同实际施工数据的对比分析。第四,实时检测和缺陷识别,用数字孪生检测模型对各个检测场景下的施工质量进行实时检测,用人工智能算法自动识别出结构几何参数偏差以及外观质量缺陷,并将检测结果及缺陷位置记录下来。第五,检测结果的反馈和整改,把检测过程中发现的质量问题以及检测结果及时地反馈给施工队伍,并明确整改的要求及整改期限,施工队伍完成整改之后,再用数字孪生检测的方法对质量进行复核,保证质量问题整改到位。

3.3 检测结果准确性与应用效果分析

通过各检测场景的实操来检验数字孪生检测方法的检测准确性和应用效果,主要比较该方法和传统的检测方法的不同之处,证明它的优越性^[5]。从检测准确度来说,选择多个检测指标,用数字孪生检测法和

传统的检测法进行检测,比较两者检测的结果,发现数字孪生检测法的检测误差较小,可以更好地识别出结构几何参数偏差以及外观质量缺陷,检测准确性比传统检测方法高很多,可以满足水利工程施工质量精细化检测的要求。采用数字孪生检测的方法可以实现施工质量的实时检测和动态控制,比传统的检测方法提高检测效率,减轻人的工作负担,减少人为因素造成的检测结果偏差,实现质量问题早发现、早解决的目的,有效避免工程质量隐患扩大。另外,该方法所创建的数字孪生检测模型可以达到施工数据实时共享和协同管理的目的,提升各个参与方之间沟通效率及协同水平,改善施工质量控制流程,推进水利工程施工质量管控由传统的物理方式向数字化、智能化的方向转变。因此,融合 BIM 和三维激光扫描技术的数字孪生检测方法准确率高、实用性强,可以很好地弥补传统检测方法的不足,在水利工程施工质量检测中具有很好的推广价值。

4 结束语

通过对融合 BIM 和三维激光扫描技术的水利工程施工质量数字孪生检测方法进行深入的研究,系统地梳理 BIM 技术、三维激光扫描技术和数字孪生技术的相关理论及应用基础,建立完整的数字孪生检测体系,即检测指标体系、数据融合机制和数字孪生检测模型,用工程实例的应用来证明该方法的可行性和有效性。经研究可知,该方法可以完成水利工程施工质量的实时、准确、全方位检测,有效地提高质量控制的数字化和智能化程度,解决传统检测方法效率低、精度差、数据割裂等缺点,为水利工程施工质量检测提供新的技术途径及理论依据。

参考文献:

- [1] 王雪健,张育雨,蒋四礼,等.基于数字孪生的地铁工程盾构施工风险管理与平台实现[J].隧道建设(中英文),2025,45(11):2100-2116.
- [2] 袁媛,刘杨,张国文,等.基于 BIM 技术的数字孪生水利[J].水利技术监督,2025(12):26-28,66.
- [3] 高玉生,王国岗,赵文超,等.水利工程勘测全过程数字孪生技术研究[J].中国水利,2025(19):3-13.
- [4] 张利娟,秦俊虹,聂常山.基于数字孪生技术的水利工程造价控制分析[J].黑龙江水利科技,2025,53(08):155-157.
- [5] 冯燕青.数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径[J].智能建筑与智慧城市,2025(06):177-179.