基于多源数据交互与数字孪生赋能的建筑工程量智能测算平台设计与应用研究

卢建斌
成都师范学院，四川 成都 611130
DOI: 10.61369/TACS.2026080013

摘　　要： 针对建筑工程量测算中图纸资料分散、人工识别效率低、清单规则口径不一致和变更数据难同步等问题，提出一种基于多源数据交互与数字孪生赋能的建筑工程量智能测算平台。平台以BIM/CAD图纸、工程清单规范、施工过程数据、现场图像 / 无人机数据和历史造价数据为数据底座，构建“数据采集—模型解析—规则计算—数字孪生映射—工程量输出—审计校核”六层架构。研究通过DTID统一对象编码，将构件实体、空间位置、工程量结果、清单编码和变更版本进行动态关联，实现自动测算、清单生成、变更追踪和审计复核。某高校综合实训楼建筑智能化工程脱敏验证表明，平台测算总耗时由22.5小时降至7.2小时，初稿错漏率由8.6% 降至3.1%，变更追溯时间由2.6小时 / 项降至0.4小时 / 项，清单一致性由83.5% 提升至96.8%。研究可为工程造价数字化、智能审计和全过程成本管控提供可落地的平台化路径。

关 键 词： 多源数据交互；数字孪生；工程量测算；工程造价；建筑智能化；智能审计

Design and Application of an Intelligent Construction Quantity Takeoff Platform Enabled by Multi-source Data Interaction and Digital Twin

Lu Jianbin
Chengdu Normal University, Chengdu, Sichuan 611130

Abstract: To address scattered drawings, inefficient manual recognition, inconsistent bill-of-quantity rules and weak synchronization of design changes, this paper proposes an intelligent construction quantity takeoff platform enabled by multi-source data interaction and digital twin. The platform integrates BIM/CAD drawings, BOQ specifications, construction records, site images/UAV data and historical cost data, and establishes a six-layer architecture covering data acquisition, model parsing, rule calculation, digital twin mapping, quantity output and audit verification. A DTID-based object coding mechanism is used to link components, spaces, quantity results, BOQ codes and change versions. A desensitized intelligent building case shows that the proposed platform reduces takeoff time from 22.5 h to 7.2 h, decreases the initial error-and-omission rate from 8.6% to 3.1%, shortens change tracing time from 2.6 h/item to 0.4 h/item, and increases BOQ consistency from 83.5% to 96.8%. The study provides a practical path for digital cost management, intelligent audit and whole-process cost control.

Keywords: multi-source data interaction; digital twin; quantity takeoff; engineering cost; intelligent building systems; intelligent audit

引言

工程量测算是造价编制、招投标控制、施工成本管理和竣工结算审计的基础。随着建筑项目向智能化、机电化和运维一体化发展，工程量对象呈现构件数量多、系统关联强、图纸版本多和专业协同复杂等特征。尤其在建筑智能化工程中，综合布线、视频安防、门禁一卡通、信息发布、机房工程和楼宇自控等子系统同时包含设备、线缆、端口、点位、桥架和软件授权等对象，传统人工识图与表格汇总方式难以满足快速、准确和可追溯的管理要求。BIM为构件信息结构化和工程量提取提供基础[1]，GB/T 50500-2024也进一步强化了工程量、清单项目特征和计价规则的一致性要求[4]。

作者简介：卢建斌（1974—），男，四川成都人，研究生学历，高级工程师，成都师范学院专职教师；主要研究方向为人工智能应用、数字孪生、建筑智能化与工程造价数字化。

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

工程实践中，传统测算主要存在四类问题：一是设计图纸、BIM 模型、CAD 文件、设备清单、签证单、现场照片和历史指标分散存储，缺少统一编码和版本管理；二是构件、管线和点位识别依赖人工经验，重复录入导致周期长、错漏多；三是清单规则依赖个人理解，容易产生计量口径偏差；四是设计变更、施工洽商、现场签证与工程量结果之间缺少对象级动态关联，成本影响和审计依据需要人工反复核对。ISO 19650强调项目信息的组织、交换和交付管理 [2-3]，但其在工程量测算和清单审计场景中的业务化落地仍需进一步细化。

数字孪生技术为上述问题提供了新的解决路径。建筑数字孪生并非单纯的三维模型展示，而是以物理对象、数据对象和业务规则之间的持续映射为核心，将工程实体、空间位置、时间版本、成本信息和业务流程纳入统一数据网络 [5-9]。本文结合建筑智能化和工程造价应用场景，设计一种基于多源数据交互与数字孪生赋能的建筑工程量智能测算平台。其创新点在于：提出面向工程量测算的 DTID 统一对象编码方法；构建“构件—空间—工程量—清单—变更”的动态关联模型；结合脱敏案例量化验证平台在效率、错漏控制、变更追踪和清单一致性方面的应用效果。

一、相关研究与需求分析

现有研究多围绕 BIM 工程量提取、全过程造价管理、既有建筑信息更新和数字孪生建设管理展开。BIM 可将几何信息、属性信息和构件关系结构化表达 [1]，自动工程量提取研究也表明，基于模型 API、构件过滤和工作区划分能够提高提量效率 [10]。但在实际项目中，BIM 模型工程量与清单计价工程量之间仍存在转换断点，CAD 图纸、Excel 清单、PDF 资料、现场图像和签证记录等非模型数据也难以统一进入计算过程。

建筑智能化工程的测算难点更具专业性：其工程量不仅包括长度、面积、体积等几何量，还包括点位数量、端口数量、设备套数、软件授权、系统调试和联动配置等非几何量；同时，设备选型、点位调整、线路变更和系统联动策略均可能影响造价结果。因此，平台不仅要“算得出”，还要回答“数据从哪里来、按什么规则算、变更影响哪些清单、审计依据如何追溯”。基于此，平台需具备多源接入、统一对象表达、规则计算、数字孪生映射和审计校核五类能力。

表 1 多源数据与平台处理要点

数据类型	主要内容	平台处理方式	应用价值
BIM/CAD 图纸	构件几何、设备点位、管线走向、图层属性	模型解析、图层识别、对象抽取	形成可计算对象
工程清单规范	清单编码、项目特征、计量单位、计算规则	规则库建模、参数匹配、口径校核	保证计价口径一致
施工过程数据	进度记录、设计变更、签证洽商、材料报验	版本管理、流程关联、变更触发	支撑过程成本追溯
现场图像 / 无人机数据	现场照片、巡检影像、安装状态、空间位置	图像标注、位置匹配、状态确认	辅助核实完成量
历史造价数据	类似项目指标、价格、审计差异、清单模板	指标比对、异常识别、经验复用	提升复核效率

二、平台总体技术框架

平台以工程量测算业务流程为主线，以数据治理和数字孪生映射为支撑，形成“数据采集层—模型解析层—规则计算层—数字孪生映射层—工程量输出层—审计校核层”的六层架构（图 1）。该架构强调多源数据之间的可接入、可转换、可关联和可追溯，避免工程量结果成为脱离项目过程的静态表格，并与 ISO 19650关于信息组织和交换质量控制的思想相一致 [2-3]。



图 1 多源数据交互与数字孪生平台总体架构

数据采集层负责从设计、造价、施工和现场端获取原始资料，并对文件完整性、图层命名、空间坐标和关键字段进行质量检查。模型解析层将 BIM、CAD、Excel、PDF 和图像资料转换为工程对象、空间对象、规则对象、结果对象和版本对象。规则计算层将工程量计算抽象为 $Q_i=F(G_i,R_i,P_i,C_i)$，其中 Q_i 为工程量结果，G_i 为几何或数量特征，R_i 为清单或定额规则，P_i 为专业参数，C_i 为现场约束条件；清单匹配按照“对象识别—属性补全—规则筛选—候选清单生成—人工确认—规则回写”执行，并与 GB/T 50500-2024 的清单计价口径衔接 [4]。

数字孪生映射层是平台区别于普通提量工具的关键。平台为每一类可计量对象建立 DTID（Digital Twin ID），并将其与构件实体 ID、空间位置 ID、工程量结果 ID、清单编码 ID 和变更版本 ID 绑定。当设计图纸、设备清单或现场变更发生变化时，平台可沿 DTID 关系链自动定位受影响工程量和清单项，形成可回溯的成本影响分析。工程量输出层生成明细表、分部分项汇总表、清

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

单匹配结果和变更差异表；审计校核层则对对象完整性、规则一致性、指标异常和版本差异进行复核。

三、核心方法

（1）统一对象编码。本文采用“项目编码—专业编码—空间编码—对象类型—对象序号—版本号”构建DTID。例如，某项目三层弱电井内第12台交换机可编码为P001-IB-03-SHAFT-SW-0012-V03。DTID不替代清单编码，而是作为跨数据源对象主键，同时关联图纸位置、设备清单、工程量结果、现场证据和变更记录。该设计吸收了ISO 19650关于信息容器、版本和交换过程管理的思想[2-3]，也借鉴了数字孪生本体化研究中的对象关系表达方法[9]。

（2）多源数据融合。平台按数据导入、格式转换、对象识别、字段映射、冲突消解和结果入库六个步骤处理多源资料。对同一摄像机点位在CAD图纸与设备清单中名称不一致的情况，平台优先依据空间位置、设备类型和唯一编号匹配；对同一对象存在多个版本的情况，平台根据版本时间和审核状态确定当前有效版本，并保留历史版本以供审计追溯。

（3）工程量计算与复核。平台采用“规则驱动+人工复核+历史指标校核”的混合机制。桥架长度、管槽长度和设备数量等可由模型或图纸直接获得的对象由系统自动计算；线缆预留、机柜安装、系统调试和软件授权等需结合现场条件判断的项目，则由规则参数和人工确认共同确定。为评价平台结果与人工复核结果的差异，采用相对偏差指标 $\delta=|Q_p-Q_m|/Q_m\times100\%$。当 δ 超过阈值时，平台自动标记异常并提示复核人员查看图纸来源、计算规则和历史版本。

（4）变更影响分析。平台建立构件—空间、构件—工程量、工程量—清单、清单—费用和对象—版本五类关系表，并形成变更影响矩阵 $M=\{DTID, ChangeID, BOQCode, RuleID, CostImpact, EvidenceID\}$。例如某楼层新增8个无线AP点位时，平台不仅更新AP设备数量，还同步影响网线长度、交换机端口、配线架端口、POE供电容量、安装调试项及相关清单特征描述，从而将数字孪生对象同步机制转化为造价业务中的清单重算和证据追溯机制[5][9]。

四、应用验证

本文选取某高校综合实训楼建筑智能化工程的脱敏数据进行验证。项目建筑面积约1.2万平方米，涉及综合布线、视频安防、门禁管理、信息发布、机房工程和无线网络等子系统。测试数据包括CAD专业图纸18张、设备点位表6份、工程量清单1份、设计变更记录5项、现场照片约120张及同类历史项目指标数据。验证采用同一批原始资料进行对比：人工测算由具有工程造价和智能化工程经验的人员完成，并经复核后作为对照基准；平台测算通过图纸解析、对象编码、规则匹配和变更追踪形成初稿，再由人工对异常项进行复核。

验证指标包括测算效率、错漏控制、变更追踪能力和清单一致性。其中，初稿错漏率=复核发现错漏项数量/初始清单项目总数×100%；清单一致性=规则库匹配正确项数/清单总项数×100%。结果如表2所示。

表2 人工测算与平台测算结果对比（脱敏案例）

评价指标	人工测算	平台测算	改善情况
测算总耗时	22.5小时	7.2小时	减少约68.0%
初稿错漏率	8.6%	3.1%	降低5.5个百分点
变更追溯时间	2.6小时/项	0.4小时/项	追溯效率明显提升
清单一致性	83.5%	96.8%	提高13.3个百分点
计算依据可追溯性	依赖人工备注	自动关联图纸、规则和版本	形成审计链条

从效率看，在本脱敏案例条件下，平台能够自动完成部分图纸对象识别、工程量汇总和清单字段生成，显著减少重复录入和人工统计工作。对于设备点位、线缆长度和桥架路径等重复性较强的对象，平台优势较明显；对于安装方式、调试工作量和特殊施工条件等需专业判断的项目，仍需人工复核。这与BIM自动提量研究中“自动化提升效率但依赖模型质量和人工校核”的结论基本一致[10]。

从准确性和变更管理看，平台通过对象库和规则库减少漏项、重项和计量单位不一致问题，并能发现图纸点位与设备清单不一致、同一对象重复列项、线缆预留规则未统一等问题。数字孪生映射使变更记录与受影响对象建立联系，变更触发后可自动生成受影响对象列表和差异明细，从而提高过程成本控制和结算审计的及时性。

五、应用价值、局限与结论

在工程造价数字化方面，平台可将工程量测算从文件驱动转向数据驱动，使图纸、模型、清单、变更和审计记录形成统一数据链；在智能审计方面，平台通过计算依据、规则版本和变更记录的自动关联，提高证据完整性和可追溯性；在全过程成本管控方面，平台可从预算编制延伸至施工变更、竣工结算和运维阶段，进一步接入物联网设备台账后，还可支撑建筑智能化系统全生命周期成本分析[7]。

本文仍存在一定局限：案例验证属于平台原型阶段的脱敏测试，样本规模和专业类型有限；平台对CAD图层规范、BIM建模质量和清单规则库完整性具有依赖；现场图像和无人机数据目前主要用于辅助确认对象状态，尚未完全实现复杂场景下自动计量。后续研究应扩大样本项目规模，引入更多历史审计数据，并结合机器视觉、自然语言处理和知识图谱方法提升图纸、表格和现场资料的自动解析能力。

综上，本文面向建筑工程量测算中数据分散、人工效率低、规则口径不统一和变更难追溯等问题，提出并设计了基于多源数据交互与数字孪生赋能的建筑工程量智能测算平台。研究核心在

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

于通过 DTID 统一对象编码和数字孪生映射，将构件实体、空间位置、工程量结果、清单编码和变更版本动态关联，使工程量测算结果具备可计算、可解释、可更新和可审计特征。脱敏案例验证表明，平台在测算效率、错漏控制、变更追踪和清单一致性方面具有应用价值，适用于建筑智能化工程中的多源资料整合、变更影响分析和清单审计复核。

参考文献

[1]Sacks R, Eastman C, Lee G, Teicholz P. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018.

[2]ISO. ISO 19650-1:2018, Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM)-Information management using building information modelling-Part 1: Concepts and principles[S]. 2018.

[3]ISO. ISO 19650-4:2022, Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM)-Information management using building information modelling-Part 4: Information exchange[S]. 2022.

[4] 住房和城乡建设部 . 建设工程工程量清单计价标准 : GB/T 50500-2024[S]. 北京 : 中国计划出版社 , 2024.

[5]Boje C, Guerriero A, Kubicki S, Rezgui Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: directions for future research[J]. Automation in Construction, 2020, 114:103179.

[6]Douglas D, Kelly G, Kassem M. BIM, Digital Twin and Cyber-Physical Systems: crossing and blurring boundaries[J/OL]. arXiv:2106.11030, 2021.

[7]Hosamo H H, Nielsen H K, Alnmr A N, Svennevig P R, Svidt K. A review of the Digital Twin technology for fault detection in buildings[J]. Frontiers in Built Environment, 2022, 8:1013196.

[8]Thelen A, Zhang X, Fink O, Lu Y, Ghosh S, Youn B D, et al. A Comprehensive Review of Digital Twin-Part 1: Modeling and Twinning Enabling Technologies[J/OL]. arXiv:2208.14197, 2022.

[9]Karabulut E, Pileggi S F, Groth P, Degeler V. Ontologies in Digital Twins: A Systematic Literature Review[J/OL]. arXiv:2308.15168, 2023.

[10]Taghaddos H, Mashayekhi A, Sherafat B. Automation of Construction Quantity Take-Off: Using Building Information Modeling (BIM)[J/OL]. arXiv:1906.02400, 2019.

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.