

基于数字孪生技术的智能建筑全生命周期管理研究

袁媛 王启玲 孟珊珊

(济南工程职业技术学院 山东济南 250200)

摘要:通过对数字孪生技术在智能建筑全生命周期管理中的应用进行了分析,旨在构建一套系统化的管理框架,以提升建筑行业的设计、施工和运维效率。通过文献分析、模型设计和案例研究,深入探讨了数字孪生技术的核心特性和关键技术,并以济南超高层综合体项目为例,验证了该技术在实际应用中的显著成效。研究结果表明,数字孪生技术能够有效整合多源数据,实现实时监控和动态优化,显著提升建筑管理的智能化水平。未来,数字孪生技术有望在智慧城市建设中发挥更大作用,推动建筑行业向智能化、绿色化方向发展。

关键词:数字孪生技术;智能建筑;全生命周期管理;BIM;实时监控;AI优化算法

第一章 引言

1.1 研究背景与意义

在当代信息技术呈指数级迅猛发展的态势下,建筑行业作为国民经济的支柱产业之一,正处于数字化与智能化转型的关键历史节点,被赋予了全新的发展使命与契机。数字孪生技术,作为一项极具创新性与前瞻性的前沿科技手段,通过构建精准且实时交互的物理实体与虚拟模型间的双向映射关系,业已成为驱动智能建筑全生命周期管理迈向新高度的核心力量。^[1]

然而,审视当下建筑行业的现实图景,仍深陷诸多困境与挑战的泥沼之中。一方面,信息孤岛现象普遍存在,不同阶段所产生的数据犹如散落在各个孤立“岛屿”上的信息碎片,难以实现有效的整合与共享,直接导致项目各参与方之间的协同作业效率低下,大量人力、物力资源在无效的沟通协调与重复劳动中被无端消耗。另一方面,随着全球环境问题的日益严峻以及可持续发展理念的深入人心,传统建筑管理模式在应对高能耗与环境压力时显得捉襟见肘。建筑运行过程中的能源消耗居高不下,碳排放远超环境承载阈值,迫切需要借助创新性技术手段实现节能减排目标,以契合绿色发展的时代要求。再者,建筑施工现场环境复杂多变,各类不确定因素交织叠加,传统安全管理方法受限于信息获取的滞后性与风险预判的局限性,无法对潜在安全风险进行实时、精准的监测与防控,极大地威胁着施工人员的生命财产安全以及项目的顺利推进。在此背景下,数字孪生技术的引入仿若一场及时雨,为化解上述难题开辟了全新路径。

第二章 文献综述

2.1 数字孪生技术的发展历程与应用背景

追溯数字孪生技术的滥觞,可精准回溯至2003年,彼时Grieves教授开创性地提出这一前沿概念,其初始应用疆域聚焦于产品全生命周期管理范畴,为产品从创意构思、研发设计、批量制造直至运维服务等一系列环节,赋予了全新数字化管控视域,革新了传统产品管理范式。^[2]从学术研究视角切入项目管理领域,诸多前沿成果表明,数字孪生平台依托其卓越的数据融合与集成能力,如同为施工进程装配上具备实时洞察能力的“智慧天眼”,精准捕捉施工进度动态演进轨迹以及施工设备的实时运行工况,进而驱动施工效率呈指数级增长,为筑牢施工安全防线夯实根基。总体而言,数字孪生技术凭借其独有的技术魅力与创新特质,为智慧建筑从抽象蓝图迈向实体落成,擘画出一条充满无限可能的技术进阶之路。

2.2 数字孪生技术的特点与理论模型

数字孪生技术内涵三大核心特质,即虚拟化、动态化与智能化,此三者仿若稳固基石,强力支撑起其在建筑领域纵深拓展的应用大厦。基于上述特性,数字孪生五维模型(Physical

Entity, Virtual Entity, Service System, Twin Data, Connection)应运而生,并在建筑全生命周期管理实践中得以广泛接纳与深度运用。

具体而言,物理实体(PE)作为建筑项目于现实世界的具象表征,涵盖建筑现场的各类物质资源,诸如建筑原材料、施工机械设备等有形资产,以及投身于一线作业的施工人员、统筹协调的管理人员等人力资源,共同构筑起建筑项目落地实施的底层硬件架构。与之相映成趣的虚拟实体(VE),用先进数字化建模手段,高度还原物理实体的几何外形、动态行为模式以及实时运行状态特征,为后续模拟仿真分析、优化决策制定铺就虚拟蓝本。

第三章 基于数字孪生技术的管理框架设计

3.1 智能建筑全生命周期的需求分析

在当今建筑领域蓬勃发展的浪潮下,智能建筑全生命周期管理成为行业聚焦的关键议题,其核心诉求聚焦于攻克设计、施工以及运维阶段所存在的协同困境,全方位提升资源利用效能,最大程度削减安全风险隐患。深入剖析行业当下现状,可洞察出以下三方面需求尤为凸显。

其一,信息共享与协同管理需求迫在眉睫。现阶段,设计、施工与运维三大阶段宛如彼此孤立的“信息孤岛”,数据流通受阻,多方协作效率深陷泥沼,严重掣肘资源的高效配置与利用。鉴于此,搭建统一且高效的数据平台,破除数据隔阂,达成全生命周期的信息互联互通与协同作业,已然成为化解当前困境的关键密钥。其二,安全管理需求不容小觑。施工现场环境错综复杂、瞬息万变,传统安全管理范式受限于信息滞后性与风险感知局限性。智能建筑亟待借助实时监控、智能分析等前沿技术,构建风险预测与预警体系,全方位提升施工与运维阶段的安全保障水平。^[3]

3.2 数字孪生平台的系统架构设计

为切实迎合智能建筑全生命周期管理的多元诉求,本研究匠心独运,精心擘画一套基于数字孪生技术的系统架构。这是基于数字孪生五维模型(Physical Entity, Virtual Entity, Service System, Twin Data, Connection)的示意图(图1),展示了各维度之间的相互关联和交互关系。

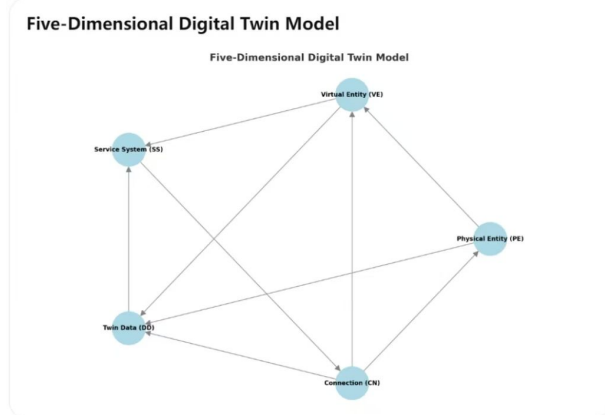


图1 数字孪生五维模型示意图

该模型的核心逻辑是：Physical Entity (PE)：物理实体，包括建筑项目中的资源、设备和人员。Virtual Entity (VE)：虚拟实体，通过三维建模和仿真反映物理实体的几何、行为和状态。Service System (SS)：服务系统，为物理和虚拟实体提供协同、优化和可靠的支持。Twin Data (TD)：孪生数据，包括来自物理和虚拟实体的实时数据及其优化结果。Connection (CN)：连接，将所有维度之间的交互和信息传递联系起来，实现实时动态更新和优化

基于数字孪生技术，设计了一套适用于智能建筑全生命周期管理的平台架构。该架构通过五层结构的有机结合，满足建筑项目从设计到运维的复杂需求。

第一层为用户层，作为直接面向建筑全生命周期各参与方的交互窗口，涵盖建设单位、设计单位、施工单位以及物业管理单位等多元主体。借助移动终端便捷入口或浏览器可视化界面，各参与方能够实时、无障碍访问平台，便捷录入项目数据、精准把控项目进度，并获取智能化决策辅助，进而使多方协作效率实现质的飞跃。

第二层即展示层，创新性地融合 BIM（建筑信息模型）与 GIS（地理信息系统）前沿技术，匠心打造可视化指挥中心。这一中心仿若智能建筑的“智慧大脑”，能够以直观、动态的形式呈现建筑结构细节、施工质量实时状况、设备运行即时状态等多维关键数据，为管理人员提供高时效、精准化的决策依据，助力其运筹帷幄之中，决胜千里之外。

第三层是应用层，作为承上启下的关键枢纽，整合汇聚多个功能各异的专业模块，为建筑设计、施工以及运维各阶段提供靶向性、强有力支持。具体而言，设计管理模块深度赋能 BIM 模型优化迭代与团队协作流程，精准识别并规避设计瑕疵，助力设计效率实现跨越式提升；施工协作模块依托实时数据交互，驱动施工计划动态优化，实现资源的精细化配置与高效利用，切实提高施工效率；运维管理模块聚焦设备状态全天候监测、能耗精细化管理以及预测性维护策略落地，全方位确保运维工作的高效、稳健开展。

第四层谓之核心层，由数据中台与业务中台双轮驱动，构筑起系统稳健运行的核心枢纽。其中，数据中台仿若数据“百宝箱”，肩负整合多元异构数据源重任，实现数据的统一存储、高效治理与精准分发；业务中台则通过标准化服务接口，无缝衔接各功能模块，保障系统运行的稳定性、灵活性与扩展性，使其能够从从容应对复杂多变的业务场景需求。

第五层即基础层，作为整个平台的坚实根基，为系统的平稳运行筑牢硬件与软件双重保障。依托广泛部署的传感器网络，实时采集海量建筑运行数据；借助物联网平台强大的数据传输

与设备管控能力，实现数据的高效流转；依托云计算基础设施提供的弹性计算资源，确保平台在高并发场景下的稳定运行，为上层功能模块的顺畅运行提供坚如磐石的技术支撑。

第四章 关键技术与应用案例分析

4.1 数字孪生技术的关键技术研究

数字孪生技术于建筑全生命周期管理范畴内得以成功落地应用，实则仰赖于多项核心技术间的协同联动与深度融合发展态势。以下将针对主要关键技术展开深入探究，剖析其研究要点及其在实际场景中的应用成效。

4.1.1 BIM 与数字孪生的深度集成

BIM 模型作为承载建筑全生命周期海量数据的关键载体，其与数字孪生技术的深度交融无疑构成了数字孪生平台构建的根基性要素。然而，欲达成这一深度集成目标，亟待攻克一系列复杂的技术难题：^[4]其一，多源数据融合亦是关键挑战。需将源自 BIM 模型的结构化数据，与物联网实时采集的动态数据、传感器所捕捉的现场工况数据以及运维历史沉淀数据进行有机整合，以此驱动虚拟模型的动态实时更新，使其精准反映物理实体的实时状态。其二，平台集成层面，需巧妙将 BIM 模型无缝嵌入数字孪生平台架构之中，赋能其支持多维数据的可视化呈现与交互操作，为管理人员提供直观、便捷的决策辅助界面。

4.1.2 实时监控与动态优化

建筑全生命周期管理的高效能实现，离不开实时监控与动态优化技术的强力支撑。其间涉及的核心技术要点涵盖如下：其一，传感器网络部署是基础环节。通过在建筑施工现场及运维环境中广泛铺设各类环境监测设备，诸如噪声监测仪、粉尘监测器，以及针对建筑设备运行状态的专用传感器，构建起全方位、多层次的数据采集网络，实现对建筑内外环境及设备工况的多维实时数据采集。其二，动态模型更新机制至关重要。依托实时数据流的持续输入，驱动虚拟模型的即时更新迭代，确保其与物理实体的运行状态时刻保持高度同步，精准反映建筑实体的实时变化。

第五章 结论与展望

本研究构建了一套基于数字孪生技术的建筑全生命周期管理框架，并通过理论分析和案例验证其有效性。

本研究构建了数字孪生技术在建筑全生命周期管理中的应用框架，并验证了其在优化设计、提升施工协同、强化智能运维等方面的价值。

未来，随着技术进步和标准化完善，数字孪生技术将在智慧建筑和智慧城市中发挥更大作用，助力建筑行业向智能化、绿色化、高效化发展，推动行业迈向更加可持续的未来。

参考文献：

- [1]丁超,苏政,许城瑜.基于数字孪生的建筑全生命周期管理平台构建[J].建筑经济, 2023, 44(8):73-79.DOI:10.14181/j.cnki.1002-851x.202308073.
- [2]马跃龙,王恬.面临的瓶颈及亟待解决的问题[J].施工企业管理, 2022(11):78-80.
- [3]本刊编辑部.推进 BIM 创新应用 打造智能建造引擎[J].中国建设信息化, 2021, 000(010):P.20-23.
- [4]Grieves M .Product lifecycle management – driving the next generation of lean thinking ; [how GE, Pund G, Ford, Toyota, an other leading companies achieved dramatic increases in productivity and profit][M]. 2006.

作者简介：袁媛（1988.6-），女，汉族，山东淄博人，硕士 研究方向：建筑设计、校园景观、智慧建造