

BIM 在建筑施工中整合数字孪生的作用及发展

穆湫原^{1,2}

1. 同济大学 土木工程学院 上海 200092

2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室 上海 200092

【摘要】：建筑行业长期面临生产力低下、沟通效率低以及信息碎片化等挑战。随着数字化技术的发展，建筑信息模型（BIM）和数字孪生（Digital Twin, DT）作为促进行业转型的关键技术，受到了广泛关注。本文基于最新文献，系统性探讨了 BIM 与 DT 在概念起源、核心特征及应用维度的差异。研究表明，BIM 是创建高价值 DT 的最佳基础，而 DT 通过集成物联网（IoT）与实时数据，弥补了 BIM 在建筑运营阶段动态交互能力的不足。本文总结了两者融合在建筑生命周期中的应用潜力、面临的标准化及数据安全等挑战，并对未来的韧性数字孪生发展方向进行了展望。

【关键词】：建筑信息模型；数字孪生；物联网；建筑运营管理

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.101

1 引言

建筑业对全球经济具有重要意义，它不仅雇佣了大量工人，还对国内生产总值（GDP）做出了显著贡献。然而，由于缺乏研究、生产力低下以及对先进技术采用缓慢，其效率数十年来一直落后于其他行业。当前，建筑行业面临着整合数字世界与物理世界的严峻挑战。数据分析与相应行动之间往往缺乏有效的连接，导致在整个建筑生命周期中出现信息碎片化、数据重复以及效率低下等问题。这种脱节不仅降低了管理效率，还经常导致施工干系人之间的协作发生延迟。

施工现场的动态特性极强，设施、设备、材料、人员、设计以及其他多个组成部分在不同阶段频繁变动，极大增加了多方协调与协作的难度。在涉及复杂岩土力学与大体积土方调度的大型基础设施项目（如港口工程建设）中，这种动态变化带来的挑战尤为显著。数字孪生（DT）^[1]作为物理资产的虚拟副本，能够提供实时数据与分析，从而优化资产性能并为解决上述难题提供有效的解决方案。特别是通过构建数字孪生平台，利用实时监测数据来不断更新和校准预测模型，对于掌控长期的工程位移与结构安全至关重要。

然而，在各种建筑环境研究中，学术界和工业界常常将“数字孪生”技术仅仅视为在设计 and 施工阶段生成的建筑信息模型（BIM）的同义词，从而混淆了两者的概念。本质上，BIM 是用于在整个建筑项目中创建、管理和交换信息的协作过程。为了在微观（施工现场）和宏观（城市街区）层面采用更完整的集成方法，BIM 必须融入 DT 范式。事实上，BIM 是创建准确、高价值 DT 并支持整个建筑行业转型的最有效途径。整合 BIM 与 DT 技术的综合平台，不仅能够改善建筑、工程和施工（AEC）领域的建筑设计和施工流程，还能极大地优化最终的建筑性能。

2 核心概念与技术演进

2.1 建筑信息模型（BIM）

BIM 的概念起源于 20 世纪 70 年代 Charles Eastman 博士的研究^[2]。它通过取代传统的纸质管理系统和 2D 图纸，将包含几何与语义信息的建筑元素集成到 3D 数字模型中。BIM 涵盖了项目从启动到完成的整个过程。其主要价值在于加强设计可视化、冲突检测、成本和时间估算，并促进项目干系人之间的协作。

2.2 数字孪生（DT）与 BIM 向 DT 的演进

DT 的概念最早可追溯至 20 世纪 60 年代的 NASA 阿波罗计划，后在 2000 年代由 Michael Grieves 博士进一步完善。DT 不仅仅是数字再现，它需要虚拟与物理实体之间的双向交互与实时数据更新^[3]。

BIM 在提供建筑环境动态信息方面存在局限性，其模型无法在没有外部资源辅助的情况下自动更新实时数据。物联网（IoT）和无线传感器网络（WSN）的引入使得将实时感知信息与 BIM 静态数据结合成为可能，从而推动了 BIM 向完整数字孪生（DT）的演进。

3 BIM 与 DT 的多维度对比分析

为了明晰两者的差异，现有文献提出了十个维度的对比标准，以指导建设项目的技术选择。以下为几个核心维度的对比：

首先是目的与生命周期阶段，BIM 主要用于在设计 and 施工阶段提高效率，其涵盖的生命周期阶段包括设计、施工、使用（维护）以及拆除^[4]。DT 则侧重于在使用（运营和维护）阶段，通过预测性维护和资产监控来提高运营效率^[5]。BIM 侧重于设计可视化、一致性检查、碰撞检测、时间与成本估算以及促进利益相关者的协作。DT 则聚焦于预测性维护、假设（What-if）

作者简介：穆湫原（2001—），女，硕士研究生。

分析、居住者满意度、资源消耗效率以及闭环设计。在特征与数据流方面，BIM不一定需要实时数据流。相比之下，DT严重依赖来自嵌入式传感器的实时数据，以预测未来结果并优化性能。

BIM通常受限于底层技术和数据处理存储资源，多用于中小型项目。而DT能够处理海量信息并提供实时更新，因此更适合大规模项目（如智慧城市）的复杂系统管理^[6]。DT的细节层次则围绕建筑运营阶段的实时性能监控和优化展开。BIM依赖于3D模型、通用数据环境（CDE）、工业基础类（IFC）和COBie等技术，与开放数据标准。DT除了3D模型外，还高度依赖无线传感器网络（WSN）、数据分析和机器学习，并在与IoT设备的实时数据交换方面具有明显优势。

此外，在目标用户群方面，BIM具有较高的控制和定制复杂性，主要面向建筑师、工程师、承包商和建筑专业人员。DT则更加精简和直观，除了建筑师和工程师，更是为设施经理和运营商提供实时数据和监控能力。

在实施工具上，BIM常使用Autodesk Revit、ArchiCAD和MicroStation等提供全面的3D建模工具。DT则使用Autodesk Tandem、Predix、Bentley iTwin等专用平台，利用实时数据在运营阶段运行资产的数字副本。

4 BIM对数字孪生的促进与融合应用

BIM在近年来取得了显著进步，为创建和全面改进DT奠定了坚实基础。具体而言，BIM技术提高了平台间的互操作性，允许在不同系统、软件和平台（如结合CityEngine或Civil3D等进行复杂三维地理空间数据处理时）之间实现无缝的数据交换。此外，BIM能够提供关于建筑蓝图、施工过程和维护的精确洞察，从而有效提高模型的数据准确性。通过更逼真的交互式可视化和高级仿真功能（例如为PLAXIS 3D等数值模拟软件参数化分析提供精细的静态几何基础），BIM不仅使得对复杂系统的实时分析成为可能，还进一步促进了多学科团队之间的紧密协作与科学决策^[7]。

随着物联网（IoT）的引入，将BIM提供的静态固定数据与实时传感信息相融合成为现实。这种深度的技术整合从根本上改变了传统的工程交付模式，使得建筑项目能够在整个生命周期内实现不同团队之间的高度无缝协同。

通过整合BIM与DT平台，建筑项目能够在整个生命周期内实现高度协同DT的构建并非一蹴而就，数据收集过程从初期的BIM模型就应当开始。在此阶段，DT不仅作为静态展示，更能模拟整个生命周期过程，测试不同设计参数下的结构表现，并为设计师提供直观的性能反馈以辅助决策优化^[8]。整合平台通过融合无线传感器网络（WSN），能够对施工过程和建筑环境进行实时动态监控。针对那些涉及复杂岩土力学、对沉降或最大位移控制有极其严格要求的大型基础设施（如港口工

程），DT可以即时识别并解决施工中的潜在问题或物理偏差，从而显著提升工程质量并降低整体施工难度^[9]。在运营和维护阶段，基于BIM构建的DT在这一阶段演变成一个动态响应的决策中心。它能够收集来自各种底层传感器（如压力、热量等）的海量运行数据。通过引入大数据、云计算以及机器学习算法（例如，通过结合多层感知机（MLP）处理静态特征，并利用长短期记忆网络（LSTM）处理动态时间序列数据，甚至引入贝叶斯模型进行长期不确定性分析），DT能够执行高级的数据挖掘与行为预测。这不仅使设施管理者能够实现高精度的预测性维护，还允许物理实体与虚拟模型之间进行双向通信，确保设备故障得到即时响应并维持资产的最佳性能。

5 面临的挑战与局限性

尽管DT和BIM的整合在推动建筑行业转型方面展现出巨大潜力，但其实际应用与全面落地仍面临多重实质性障碍^[10]：

（1）技术与标准化缺失：成功执行DT遇到的主要障碍之一是缺乏可获取的成熟技术以及数据标准的不一致。不仅如此，围绕数据保护和所有权的担忧也日益凸显。BIM和DT在发展和采用过程中有着相似的历程，缺乏通用的数据标准和工具是这两项概念共同面临的严峻挑战。数据的互操作性、安全性和信息标准化构成了当前实施DT的主要技术瓶颈。

（2）人才与组织文化：有效实施DT不仅需要从业人员学习并掌握全新的数字化技能，还面临着对资金支持和高技能专业人才的迫切需求。此外，仅靠技术本身不足以完成行业转型，建筑行业组织文化和思维方式（cultural mindset）的根本性转变是一项至关重要的要求。

（3）发展阶段受限：据对现有文献的分类，当前的许多研究和实际应用大多只停留在“数字影子（Digital Shadow）”的层面。这表明，虽然BIM方法正在借助数字模型向设计和施工阶段之外扩展，但它提供的往往仍然是相对静态的模型。为了充分利用DT的优势，未来的孪生模型必须具备自我依赖、自我更新和自我学习的能力。目前行业亟需向完全集成的DT转变，这种真正的数字孪生不仅能够监控和收集数据，还能自主采取纠正措施并预测潜在的紧急情况。

6 未来研究方向

在未来几年内，支持DT的底层技术（如传感器、机器视觉、数据治理、建模和可视化技术）将不断成熟，使得DT的创建和维护变得更加强大、实用且易于实现。包含增强现实（AR）和虚拟现实（VR）的“元宇宙”概念也有望成为这一技术演进的重要组成部分。然而，当前行业的趋势仍较多侧重于在设计和施工中使用数字模型，未来的迫切需求是向完全集成的DT迈进^[11]——这种孪生系统不仅要能够收集数据，还必须能采取自主纠正措施并准确预测潜在的紧急情况。基于BIM提供的数据集成能力与基础，未来的研究应重点关注以下核心

领域:

(1) 韧性数字孪生 (Resilient Digital Twins): 未来的研究应致力于将韧性原则和实践深度融入 DT 框架中^[12]。通过结合可持续设计、能源管理、气候适应和韧性控制, 韧性 DT 能够显著助力实现低碳和具备气候适应型的未来。特别是在面对受海洋气候、复杂地质条件影响的大型港口工程或关键基础设施时, 韧性数字孪生能够通过持续评估环境的长期影响, 为结构安全与可持续运行提供坚实保障。

(2) 利用先进数据分析、机器学习和人工智能, 使孪生模型能够自主监控建筑控制系统、优化能源效率并支持科学决策。为了从静态模型向具有前瞻预测能力的完全集成 DT 转变, 未来的研究可以探索融合多层感知机 (MLP) 与长短期记忆网络 (LSTM) 等混合神经网络架构。通过此类算法框架, DT 平台能够高效并行处理工程的静态物理特征与动态时间序列数据, 并利用实时监控数据不断更新模型预测。这种方法将极大提升系统在长期位移监测、结构健康诊断等复杂场景中的

智能化预警与管理能力。

(3) 除了技术层面的深化, 研究还应探索以人为本的设计原则和提升用户体验。通过将单体建筑物层面的 DT 与更宏观的智慧城市系统相集成, 能够显著提高项目在全生命周期内的沟通效率、协作水平和整体成功率。

7 结论

BIM 和 DT 虽然在概念起源和技术特征上存在重叠, 但它们在建筑工程中的应用重点具有本质差异。BIM 最适合于建筑的设计和施工管理, 而 DT 则侧重于动态监控、实时反馈及运营维护。BIM 是生成准确、高价值 DT 的最有效途径。通过两者的深度整合, AEC 行业可以实现设计、施工和性能评估的全面升级, 从而优化能源利用、降低成本并减轻环境影响。随着建筑行业的数字化转型, 研究人员和从业者需进一步探索克服数据集成与互操作性挑战的方法, 以在建筑全生命周期中释放数字孪生的全部潜能。

参考文献:

- [1] Grieves, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication; Michael W. Grieves, LLC: Cocoa Beach, FL, USA, 2015.
- [2] Adhikari, S.; Collins, J.; Loreto, G.; Nguyen, T.D. The Use of Parametric Modeling to Enhance the Understanding of Concrete Formwork Structures. In Proceedings of the 2021 ASEE Virtual Annual Conference Content Access, Virtual, 26 - 29 July 2021.
- [3] Khajavi, S.H.; Motlagh, N.H.; Jaribion, A.; Werner, L.C.; Holmström, J. Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings. IEEE Access 2019, 7, 147406 - 147419.
- [4] Feng, H.; Chen, Q.; García de Soto, B. Application of Digital Twin Technologies in Construction: An Overview of Opportunities and Challenges. In Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2021), Dubai, United Arab Emirates, 4 August 2021.
- [5] Sobhkhiz, S.; El-Diraby, T. Developing BIM-Based Linked Data Digital Twin Architecture to Address a Key Missing Factor: Occupants; ASCE Library: Reston, VA, USA, 2022; pp. 11 - 20.
- [6] Quirk, D.; Lanni, J.; Chauhan, N. Digital Twins: Details Of Implementation. ASHRAE J. 2020, 62, 20 - 24.
- [7] Hosamo, H.H.; Imran, A.; Cardenas-Cartagena, J.; Svennevig, P.R.; Svidt, K.; Nielsen, H.K. A Review of the Digital Twin Technology in the AEC-FM Industry. Adv. Civ. Eng. 2022, 2022, e2185170.
- [8] Boje, C.; Guerriero, A.; Kubicki, S.; Rezgui, Y. Towards a Semantic Construction Digital Twin: Directions for Future Research. Autom. Constr. 2020, 114, 103179.
- [9] Shahzad, M.; Shafiq, M.T.; Douglas, D.; Kassem, M. Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. Buildings 2022, 12, 120.
- [10] Bolpagni, M.; Gavina, R.; Ribeiro, D. Industry 4.0 for the Built Environment: Methodologies, Technologies and Skills; Springer Nature: Berlin/Heidelberg, Germany, 2021; ISBN 978-3-030-82430-3.
- [11] IoT for All. ThoughtWire Blog. Digital Twins vs. Building Information Modeling (BIM). 2020.
- [12] Alonso, R.; Borrás, M.; Koppelaar, R.H.E.M.; Lodigiani, A.; Loscos, E.; Yöntem, E. SPHERE: BIM Digital Twin Platform. Proceedings 2019, 20, 9.