

大跨空间钢结构施工过程的数字孪生仿真

贺壬人

冕宁县职业技术学校 四川凉山

【摘要】大跨空间钢结构施工具有跨度大、构件复杂和施工环境不确定性强的特点，传统施工管理方式难以满足精细化和实时化的需求。数字孪生技术通过虚实融合和数据驱动，实现施工过程的多维度映射与动态仿真，为结构安装精度控制、施工进度优化和安全风险预测提供了有力支撑。通过构建施工现场与虚拟模型的双向交互系统，可实现状态实时感知、过程动态模拟和方案优化迭代，从而提高整体施工效率与可靠性。该研究为大跨空间钢结构工程的智能建造与智慧管理提供了技术路径和实践参考。

【关键词】大跨空间钢结构；施工过程；数字孪生；仿真

【收稿日期】2025年5月14日

【出刊日期】2025年6月20日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250061

Digital twin simulation of large-span space steel structure construction process

Renren He

Mianning vocational and technical school, Liangshan, Sichuan

【Abstract】 Large-span spatial steel structure construction is characterized by extensive spans, complex components, and highly unpredictable working conditions. Traditional construction management methods struggle to meet the demands for precision and real-time monitoring. Digital twin technology, through virtual-real integration and data-driven approaches, enables multi-dimensional mapping and dynamic simulation of construction processes, providing robust support for structural installation accuracy control, schedule optimization, and safety risk prediction. By establishing a bidirectional interaction system between physical sites and virtual models, real-time condition monitoring, dynamic process simulation, and iterative solution optimization can be achieved, thereby enhancing overall construction efficiency and reliability. This study provides technical pathways and practical references for intelligent construction and smart management in large-span spatial steel structure engineering.

【Keywords】 Large-span spatial steel structures; Construction process; Digital twin; Simulation

引言

大跨空间钢结构因其宏大的跨度和复杂的受力体系而成为现代工程建设的重要类型。随着工程规模的不断扩大，施工过程中的精度、安全与效率问题日益突出。数字孪生作为融合物理实体与虚拟模型的前沿技术，能够在施工阶段实现状态同步与过程仿真，为复杂工况下的决策与控制提供可视化支撑。通过引入该技术，施工过程不仅具备了实时性与可追溯性，还为解决大跨度钢结构施工的高风险和高难度问题提供了新的思路。

1 大跨空间钢结构施工过程的复杂性与挑战

大跨空间钢结构在施工过程中所面临的复杂性，来源于结构体系的特殊性与施工环境的不确定性。

跨度的增加使得结构在受力传递上表现出显著的空间效应，构件之间的连接节点多而复杂，任何安装误差都可能在整体结构中被放大，从而影响整体稳定性和承载性能^[1]。在现场作业中，构件尺寸巨大、重量超常，运输、吊装和拼装过程往往需要高精度的协同与控制，这使得施工组织与机械布置面临极高难度。施工空间通常受限于既有环境和周边条件，场地狭窄、设备受限等情况会进一步加剧施工的复杂性。大跨空间钢结构不仅在设计阶段需要高水平的计算分析，在施工阶段更需要解决诸多实际问题。

在施工实施过程中，挑战还体现在多工序、多环节的动态协调。钢构件的加工、运输、吊装、定位、焊接和紧固等环节，必须按照严格的工艺顺序展开，

但现场环境的不确定因素,如风荷载、温度变化和基础沉降,都会对施工精度与进度造成影响。尤其是在高空作业条件下,施工安全风险更为突出,人员与设备操作的任何微小偏差都有可能引发连锁反应。此外,复杂的施工周期与大型项目的交叉作业要求,使得各施工单元之间的协调更加困难,若缺乏科学的调度与动态调整能力,容易导致资源浪费与进度延误。这些因素叠加,使得大跨空间钢结构施工成为典型的复杂系统工程。

在面对这些挑战时,传统的施工管理方式往往难以实现精准的控制和全面的优化。依赖经验的人工判断难以满足大跨度空间结构对精度与安全的高要求,施工中一旦出现偏差,修正成本极高且影响范围广^[2]。由于数据采集不足、过程信息滞后,施工状态无法在第一时间被准确反映,管理者很难进行科学决策和及时干预。同时,施工方案与现场条件往往存在差异,预先制定的施工计划在实际执行中经常需要调整,而缺乏动态反馈机制会使调整过程滞后并带来额外风险。因此,大跨空间钢结构施工过程中的复杂性不仅表现为物理层面的高难度,也体现为管理与控制层面的巨大挑战,这正是亟需新技术介入的重要原因。

2 数字孪生技术在施工过程中的应用价值

数字孪生技术在大跨空间钢结构施工过程中展现出独特的价值,其核心在于通过虚拟模型与物理实体的动态映射,实现施工状态的实时感知与反馈。施工过程中涉及的构件种类繁多、几何形态复杂,任何细微的安装误差都可能引发整体偏差^[3]。通过数字孪生模型,可以在虚拟环境中对构件的空间位置、受力状态和连接精度进行多维度模拟与验证,从而在施工前预测潜在问题并提出优化方案。这种虚实互动不仅提高了施工的前瞻性,也在一定程度上避免了返工与延误,确保了结构安装的高精度与高可靠性。

在工程实际中,数字孪生技术能够将现场采集的传感器数据与BIM模型相结合,形成一个动态更新的施工数字空间。吊装过程中的荷载变化、构件变形以及焊接温度场等信息可以实时映射到虚拟模型中,管理人员能够通过数字孪生平台直观地掌握施工状态并及时调整操作策略。这种实时性大大提升了施工的安全性,尤其是在高空、大跨度的复杂工况下,能够提前发现异常并进行干预。更为重要的是,

该技术还为施工调度提供了科学依据,使得多工序并行施工中的资源配置更加合理,从而提升整体施工效率,降低管理成本。

数字孪生的应用价值不仅体现在施工精度与安全控制上,更在于推动施工过程向智能化与信息化方向发展。通过构建与物理现场高度一致的虚拟环境,施工方案可以在模型中不断迭代与优化,实现不同工况下的对比分析与风险评估。在这一过程中,施工管理者能够基于仿真结果进行科学决策,确保计划与实际的高度契合^[4]。此外,数字孪生还具备数据沉淀与追溯功能,为后续运维与管理提供了完整的信息链条。这种从施工阶段延伸至全生命周期的价值,使大跨空间钢结构施工不仅是一次建造过程,更成为数字化与智能化建造体系的重要组成部分。

3 基于数字孪生的施工过程仿真方法与实现

基于数字孪生的施工过程仿真方法,是通过将建筑信息建模与实时数据采集相融合,建立与物理施工现场同步的虚拟环境。在大跨空间钢结构的施工中,构件吊装路径、连接节点精度以及受力状态变化均可以在虚拟模型中提前推演,以便找到最优的施工工序与操作方案^[5]。通过对施工现场进行激光扫描、传感器监测和无人机巡检,获取包括构件位置、温度场、风荷载等多源信息,并将这些数据映射到数字孪生模型中,能够形成动态更新的虚拟场景。在该场景中,施工过程不仅可以可视化展示,还可以通过算法模拟进行多轮迭代,从而降低因经验不足带来的不确定性风险。

仿真方法的实现依赖于多种技术的集成与协同。首先需要建立高精度BIM模型作为物理实体的数字基底,随后通过物联网技术与传感器网络实时采集施工过程中的关键参数,形成数据驱动的反馈链路。在这一过程中,有限元分析和动力学仿真被用于预测构件在吊装与拼装中的应力分布和位移变化,确保操作的可行性和安全性。同时,虚拟现实与增强现实技术的应用,使施工人员能够在沉浸式环境中直观感知复杂工序,并进行操作演练,这不仅提高了施工培训的效果,还在一定程度上减少了现场试错成本。通过这种方式,数字孪生仿真方法将传统的线性施工规划转变为动态、交互与可调节的智能流程。

在具体实现过程中,数据融合与模型迭代是关键环节。来自不同监测系统的数据往往存在格式差异和采样精度不一致的情况,需要通过数据清洗与

融合算法实现统一处理，使虚拟模型能够保持与物理现场的高度一致性。在施工进展中，仿真结果会不断与实际状态进行比对与校正，实现模型的迭代优化与反馈闭环。通过这一机制，不仅能够对施工进度进行动态调整，还可以对风险进行提前预判与规避^[6]。当监测系统发现吊装构件受风荷载影响产生偏移时，仿真系统能够即时推演不同调整策略的结果，从而为管理者提供科学的决策依据。这种方法的实现，使大跨空间钢结构施工真正具备了数字化、智能化和可控化的特征，为复杂工程项目的顺利实施提供了坚实保障。

4 数字孪生仿真对施工精度安全与效率的提升

数字孪生仿真在大跨空间钢结构施工中的应用，使精度控制获得了前所未有的提升。传统施工依赖经验与手工测量，难以保证在复杂空间结构下的高精度定位，而数字孪生通过实时数据驱动的虚拟模型，能够对构件的安装误差、节点拼装偏差以及整体结构的空间形态进行动态校核^[7]。施工过程中产生的激光扫描数据、传感器信息与全站仪监测结果被同步映射至虚拟环境，使偏差在早期即可被发现并得到修正。这种虚实融合的反馈机制，使得误差能够在毫米级范围内得到控制，有效避免了因积累性偏差导致的结构变形问题，为大跨度钢结构的稳定性与安全性提供了坚实保障。

在安全方面，数字孪生仿真展现了强大的风险预测与预警功能。大跨空间施工往往涉及高空作业、重物吊装和多工序交叉，任何细小失误都可能引发严重事故。通过数字孪生仿真，可以对施工环境进行实时监控，并在虚拟模型中对潜在危险进行推演。例如，当风荷载或温度变化超过设定阈值时，系统能够通过模拟预测构件受力和变形情况，从而提前调整吊装方案或作业计划。这种基于仿真的动态干预，有效降低了人为因素对施工安全的影响。同时，仿真平台还能进行应急预案演练，使施工人员在虚拟环境中熟悉突发状况下的应对措施，进一步提升现场安全管理的主动性与有效性。

在效率方面，数字孪生技术通过优化施工流程与资源配置，实现了多维度的提升。大跨空间钢结构施工涉及大量构件与繁杂工序，传统管理往往面临调度不畅与资源浪费的问题。借助数字孪生仿真，可以对施工方案进行多轮迭代分析，找到最优的吊装路径与施工顺序，从而缩短工期并减少设备待机时

间^[8]。实时数据与仿真模型的互动，使得资源分配更加精准，施工进度调整更加灵活。通过这种动态优化，施工组织能够在保证精度与安全的前提下，实现整体效率的显著提升，真正实现了大跨空间钢结构施工的数字化、智能化和高效化转型。

5 结语

大跨空间钢结构施工的复杂性决定了其管理与控制需要更高水平的技术支撑，数字孪生的引入为这一难题提供了全新解法。虚实融合的动态仿真不仅在施工精度上实现了毫米级控制，也在安全保障和效率提升方面展现出突出优势。实时感知与智能反馈机制使施工状态更加透明，风险得以及时预判与规避，施工流程得到全面优化。数字孪生仿真为大跨空间钢结构工程建立了可视化、可预测与可追溯的施工体系，推动了施工方式的数字化与智能化转型，并为复杂工程项目的顺利实施奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 王拴珠. 房建施工过程中混凝土浇筑工艺改进方法探讨[J]. 中国水泥, 2025, (09): 104-106.
- [2] 陈天龙, 包誉, 寇恩宇, 等. 隧道施工过程中管棚超前支护作用效果的研究[J]. 四川建筑, 2025, 45(04): 110-112.
- [3] 肖波. 既有铁路声屏障挖孔桩施工过程及保障措施[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2025, 15(04): 34-37.
- [4] 苏伟强. 发电厂电气施工过程中的继电保护系统设计与实现[J]. 电气技术与经济, 2025, (08): 165-167.
- [5] 杨明, 胡娜. 大跨空间钢结构稳定性设计与施工技术研究[J]. 砖瓦, 2025, (07): 162-164.
- [6] 李晔暄. 综合交通枢纽换乘中心大跨空间钢结构设计研究[J]. 中国建筑金属结构, 2024, 23(01): 28-30.
- [7] 周海兵, 刘美霞, 杨大彬, 等. 大跨空间钢结构数字化建模关键技术与应用[J]. 建设科技, 2023, (19): 70-74.
- [8] 甘凌. 大跨空间钢结构施工卸载仿真分析与测试技术研究[J]. 福建建设科技, 2023, (02): 88-91.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS