

大跨度钢结构建筑施工过程模拟分析与安装工艺创新研究

高峰 孙骏雄

华能曹妃甸港口有限公司 河北 唐山 063200

摘要：随着现代建筑对空间跨度和结构美感的要求不断提升，大跨度钢结构建筑已成为城市地标和大型公共设施的主要形式。其在结构设计与施工过程中具有复杂性与高风险的双重特征，施工工艺水平直接决定工程质量与安全。在传统施工模式下，施工模拟不足、工艺创新滞后往往导致进度延误和成本增加。本文基于大跨度钢结构建筑施工特点，探讨了施工过程模拟在方案优化与风险管控中的作用，分析了信息化技术支持下的动态模拟方法，并结合实际工程案例，提出了在安装工艺上的创新思路。研究表明，通过科学的施工过程模拟，可以提前识别施工环节中的潜在问题，优化资源配置，提升施工组织效率。同时，创新安装工艺在焊接技术、吊装方法和节点处理等方面的应用，不仅提升了施工精度，还有效降低了安全风险与环境影响。

关键词：大跨度建筑；钢结构施工；过程模拟；安装工艺；创新研究

引言

大跨度钢结构建筑作为现代工程技术的代表，广泛应用于体育场馆、机场航站楼、大型会展中心和桥梁工程等领域。这类建筑以跨度大、荷载复杂和构件精度高为特点，其施工过程涉及构件加工、运输、吊装、焊接和整体稳定控制等多个环节，稍有不慎就可能导致施工偏差甚至结构事故。因此，如何在施工过程中通过科学手段实现可视化、可预测和可优化，成为工程管理与技术人员高度关注的问题。施工过程模拟技术的兴起，为大跨度钢结构的施工组织提供了全新思路，利用信息化平台实现方案预演、进度优化与风险预测，显著提升了工程的可控性。同时，安装工艺的创新不断突破，突破了传统方法在精度、效率和安全方面的限制，使复杂工程的实施更具可行性。本文从大跨度钢结构施工的基本特征出发，结合模拟分析与工艺创新的实际需求，提出系统化的研究与实践路径，旨在为行业发展提供理论支持与实践经验。

1 大跨度钢结构建筑施工的特征与挑战

1.1 结构复杂性与施工难度

大跨度钢结构建筑因其独特的功能性和空间利用效率，被广泛应用于体育场馆、展览中心、机场航站楼以及大型桥梁等工程。然而，这类工程普遍采用拱形、网壳、桁架等复杂的结构形式，结构体系庞大，构件数量众多，构件之间的相互依赖性极强。任何单个构件加工或安装位置上的微小偏差，都可能在整体结构中引发连锁反应，导致力学性能下降甚至引起整体稳定性问题。

在施工过程中，不仅需要确保每一根杆件、每一片板材的精度符合设计要求，还必须兼顾整体结构在不同阶段

的受力与稳定性。例如，在网壳或桁架吊装时，局部结构可能因尚未形成闭合受力体系而产生较大的变形，甚至引发失稳风险。因此，施工方案必须经过反复推演与优化，以保证施工过程中的临时受力状态安全可控。

同时，随着跨度的增大，施工中受到的荷载影响也显著增强。除了施工自重和设备荷载外，风荷载和温度效应对大跨度结构的影响不可忽视。风振效应可能导致未固定结构产生振动甚至局部失稳，而温度变化则可能引发热胀冷缩效应，造成连接部位产生附加内力，影响安装精度。所有这些因素都对施工工艺水平、监测手段以及组织管理提出了更高要求。

1.2 施工环境与风险因素

大跨度钢结构工程多位于城市核心区域或特殊的地理环境中，施工环境复杂多变，对工程实施带来诸多挑战。在城市核心区，如大型体育馆或展览馆的建设，往往受制于场地狭小、施工区域受限、周边交通繁忙等条件。施工机械布置和构件运输受到较大限制，必须通过精细化的组织管理与路径优化来实现高效作业。同时，城市环境对噪声、粉尘和安全文明施工也提出了严格要求，增加了项目的协调和管理难度。

在山区或跨江桥梁等特殊环境下，施工条件则更为复杂。山区桥梁施工可能面临气候多变、雨雪频繁、地质条件不稳定等问题；跨江桥梁则需要应对水流湍急、船舶通航和水下地基复杂的挑战。这些环境因素不仅加剧了施工难度，也对施工人员的安全和施工设备的稳定运行提出了严峻考验。

此外，大跨度钢结构施工过程中包含大量高风险环节。例如，吊装作业往往涉及超长、超重构件的提升与

定位, 极易受到风速和机械状态的影响; 焊接操作需要在高空、大跨度位置进行, 一旦防护不到位, 容易引发坠落事故或焊接火灾; 高空作业本身就具有较大危险性, 若缺乏系统的安全防护措施, 极易导致人员伤亡。施工安全与施工效率之间的矛盾, 在这类工程中尤为突出, 因此必须在安全控制与施工组织间找到合理平衡。

1.3 传统工艺与管理不足

在部分工程实践中, 施工组织仍存在依赖经验主义的现象, 缺乏科学的施工模拟与仿真手段。这种管理模式往往导致进度安排不合理、资源配置不足或过剩, 从而增加施工过程中的风险。例如, 在钢结构安装过程中, 如果未能准确模拟不同阶段的受力与变形情况, 就可能在关键环节出现误差, 进而影响整体结构的精度与稳定性。

传统的安装工艺在应对超大跨度结构时, 往往表现出一定局限性。首先, 在精度控制方面, 传统工艺主要依赖人工测量与经验判断, 受人为因素影响较大, 难以满足毫米级或亚毫米级的高精度要求。其次, 在工期保证方面, 传统工艺效率较低, 难以适应现代工程对施工速度和交付周期的严格要求。最后, 在安全管理方面, 传统工艺缺乏对全过程风险的动态监控与预警, 往往依靠事后检查来弥补, 难以满足大型复杂工程对安全的高标准需求。

因此, 引入先进的施工过程模拟与工艺创新已成为提升大跨度钢结构施工水平的必然选择。通过施工BIM建模、有限元仿真以及虚拟吊装模拟, 可以在施工前预先发现潜在问题, 优化施工方案, 减少实际操作中的不确定性。同时, 利用智能测控技术与信息化管理平台, 可以实时监测施工过程中的受力、位移和温度变化, 确保施工精度和安全性。

2 施工过程模拟的理论基础与应用价值

2.1 施工模拟的基本原理

施工模拟是一种基于计算机建模与仿真技术的工程管理工作, 其核心思想是将复杂的施工过程转化为可视化的动态模型, 以便对施工组织、工艺流程、资源配置和外部环境等多因素进行系统分析。其理论基础主要来源于系统工程和工程管理学, 强调把整个施工过程看作一个动态、开放的复杂系统, 包含施工工序之间的逻辑关系、施工资源的时间与空间分布以及施工环境的随机扰动。

在大跨度钢结构建筑中, 施工模拟尤为重要。由于结构体系复杂、构件数量庞大, 任何一个环节的误差都可能引发连锁反应。通过施工模拟, 项目团队能够在

虚拟环境中完整“预演”施工过程, 直观地观察施工顺序对整体进度与受力状态的影响。同时, 借助动态演算和交互分析, 模拟平台能够实时调整工艺参数与施工顺序, 帮助管理人员提前发现施工组织中的冲突点与风险点, 并进行优化决策。这一过程不仅能够降低施工的不确定性, 还能显著提升施工方案的科学性与可行性。

2.2 模拟技术的应用价值

施工模拟技术在大跨度钢结构工程中具有极高的应用价值, 主要体现在以下三个方面:

第一, 提升方案科学性。传统的施工方案往往依赖经验制定, 难以全面考虑复杂工况下的多因素耦合作用。通过施工模拟, 可以对多种方案进行动态比选和模拟验证, 从而找到最优施工路径。例如, 在确定吊装顺序时, 模拟能够帮助分析不同方案下结构的稳定性和构件应力分布, 确保方案既高效又安全。

第二, 增强风险管控。大跨度钢结构施工过程中存在吊装偏差、节点错位、焊接变形等潜在风险。通过模拟, 可对关键环节进行预测, 提前识别可能出现的偏差或危险, 并制定针对性的应对措施。这样, 不仅能够降低施工过程中的突发事件, 还能为现场管理提供科学依据, 减少安全事故的发生。

第三, 促进信息共享。施工模拟平台具备良好的可视化与交互功能, 能够将施工进度、工序安排、资源调度等信息以直观的三维模型形式呈现出来。设计、施工和监理等多方可以在同一平台上进行协同决策, 避免因信息不对称导致的沟通障碍, 从而提升项目整体的协调效率。

2.3 工程案例的实践验证

在某大型体育场馆的建设过程中, 项目团队充分利用了三维建模与施工模拟技术。该项目的网壳结构跨度极大, 节点数量众多, 吊装环节极为复杂。通过施工模拟, 团队在虚拟环境中完整推演了网壳结构的吊装过程。在模拟中发现, 原有方案在节点拼接环节存在精度难以保证的问题, 若直接按照传统工艺实施, 极有可能导致拼接误差累积, 影响整体稳定性。

基于模拟结果, 项目团队对施工方案进行了优化调整: 一方面修正了吊装顺序, 合理分配吊装节点, 降低了累积误差的风险; 另一方面在关键部位增加了临时辅助支撑点, 以增强结构在吊装过程中的稳定性。经过这一优化, 实际施工中不仅提高了吊装效率, 缩短了工期, 还避免了潜在的安全隐患。该案例充分说明, 施工模拟技术能够在工程实践中发挥实用性与必要性, 为大跨度钢结构施工提供强有力的技术保障。

3 安装工艺的创新路径探索

3.1 吊装工艺的创新与优化

吊装是大跨度钢结构施工中的核心环节,其工艺水平直接决定着施工效率与安全性。传统单机或多机抬吊方式在面对超大、超重构件时,常出现受力不均、同步性不足等问题,容易造成构件变形或吊装事故。近年来,随着施工技术的发展,分段吊装、整体提升和滑移施工等创新工艺逐渐应用于大型工程实践。分段吊装能够将超大构件分解为若干可控单元,逐步吊装并在高空拼接,既降低了单次吊装的难度,也便于精度控制。整体提升工艺则通过在地面完成大规模拼装,再利用大型同步提升设备一次性整体提升就位,从而显著减少高空作业时间,降低施工风险与人员危险暴露度。此外,滑移施工工艺通过设置轨道和牵引系统,实现大跨度结构的整体移动和就位,也在桥梁和大型厂房建设中得到了成功应用。这些创新工艺的推广,极大提升了大跨度钢结构吊装的安全性、精度和施工效率。

3.2 焊接与节点连接技术的改进

在大跨度钢结构中,节点连接是结构受力的关键部位,其质量直接关系到整体的安全与稳定。传统焊接方法在面对大厚度板材或复杂节点时,存在焊接效率低、焊缝质量不稳定等问题。近年来,埋弧焊、窄间隙焊以及全自动焊接技术的应用,有效提升了焊接效率与焊缝质量,能够满足高强度和大厚度板材的焊接需求。与此同时,高强度螺栓连接技术的发展也为节点施工提供了可靠的替代方案,具有施工速度快、连接可靠性高、后期维护方便等优点。部分工程还采用新型节点设计理念,例如通过优化节点形状、增设加劲肋等方式,使受力更加合理,从而提高节点连接的整体性能。焊接与节点技术的持续改进,不仅提高了施工质量和效率,也为大跨度钢结构的安全运行提供了坚实保障。

3.3 测量与精度控制的技术提升

大跨度钢结构施工的精度控制难度极高,稍有误差就可能引发整体受力异常甚至安全隐患。传统的测量方法依赖人工操作,效率低、精度有限,难以满足现代工程毫米级的控制要求。随着新测量技术的推广,激光扫描和高精度全站仪逐渐成为施工现场的主流工具。激光

扫描能够实现对结构表面的全景式高密度测量,快速获取三维点云数据,为构件安装位置与偏差监控提供可靠依据。全站仪则通过自动跟踪与实时测量,大幅提升了精度控制和效率。部分复杂工程还引入了BIM技术与GPS定位系统,实现施工全过程的动态监测与精度管理。施工人员可以在BIM平台中实时比对设计模型与现场数据,及时发现偏差并进行修正。这些先进测控技术的应用,使大跨度钢结构的施工精度控制水平迈上新台阶,为工程的安全性和耐久性提供了有力保障。

结语

大跨度钢结构建筑施工是一项系统性极强的工程任务,其施工过程中的复杂性与高风险性决定了必须依赖科学模拟与工艺创新。本文研究表明,施工过程模拟能够有效提高施工组织的科学性,优化资源配置并增强风险管控;安装工艺的创新则在吊装、焊接和精度控制等方面显著提升了施工质量与效率。未来,应进一步推动BIM与智能装备的深度融合,构建全过程信息化与智能化施工体系。同时,在工艺创新中注重绿色施工与可持续发展,实现环境保护与工程建设的协调统一。只有不断完善施工模拟与工艺创新,才能确保大跨度钢结构建筑在安全、质量与效率上的全面突破,为建筑行业的高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]朱新保.钢结构建筑施工技术要点探讨[J].中国住宅设施,2024,(11):133-135.
- [2]卓伟枫.大跨度连廊钢梁远距离吊装及连接技术[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(32):156-158. DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202432051.
- [3]郭盛,苏超.大跨度钢结构网架施工技术研究[J].建筑技术开发,2024,51(11):4-6.
- [4]杨威.大跨度钢结构厂房插入式双肢钢柱安装施工工法关键技术.湖北省,湖北工建集团第三建筑工程有限公司,2024-10-13.
- [5]王淼.浅析公共建筑大跨度空间钢结构安装施工技术[J].中国建筑装饰装修,2024,(16):175-177.
- [6]茹小琴.大跨度空间钢结构建筑施工技术与控制[J].住宅与房地产,2024,(23):89-91.