

大跨度空间钢结构屋盖吊装方案优化 与施工力学行为分析

马腾¹, 王栋²

1. 中建三局集团有限公司工程总承包公司山东公司, 山东 济南 250100

2. 山东发展智慧园区投资有限公司, 山东 济南 250100

DOI:10.61369/ERA.2025110005

摘 要 : 本文聚焦大跨度空间钢结构屋盖吊装方案优化与施工力学行为, 概述了常见的吊装工艺, 分析了各工艺的优势与局限, 探讨了吊装方案的影响因素, 并构建了综合评价指标体系。在施工力学分析方面, 阐述了施工力学基本理论, 重点介绍了有限元法在施工模拟中的应用及施工全过程精细化有限元模型的构建方法, 为力学行为分析提供了理论与技术支撑。通过数值模拟技术, 对比分析了不同吊装方案在构件应力分布、变形及设备受力等方面的力学行为差异; 基于多目标决策方法, 综合考量施工安全、成本与效率等目标, 实现了吊装方案的优化。研究成果可为大跨度空间钢结构屋盖吊装方案的科学制定与施工安全控制提供参考, 以保障工程施工的安全、高效与经济。

关 键 词 : 大跨度空间钢结构; 屋盖吊装; 方案优化; 施工力学行为

Optimization of Hoisting Schemes and Analysis of Construction Mechanical Behavior for Long-Span Spatial Steel Structure Roofs

Ma Teng¹, Wang Dong²

1.Shandong Branch of the Engineering General Contracting Company, China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100

2.Shandong Development Smart Park Investment Co., Ltd., Jinan, Shandong 250100

Abstract : This paper focuses on the optimization of hoisting schemes and the analysis of construction mechanical behavior for long-span spatial steel structure roofs. It provides an overview of common hoisting techniques, analyzes the advantages and limitations of each technique, explores the influencing factors of hoisting schemes, and constructs a comprehensive evaluation index system. In terms of construction mechanical analysis, the paper elaborates on the basic theory of construction mechanics, emphasizes the application of the finite element method in construction simulation, and introduces the method for constructing a refined finite element model throughout the entire construction process, providing theoretical and technical support for mechanical behavior analysis. Through numerical simulation techniques, the paper compares and analyzes the differences in mechanical behavior among various hoisting schemes in terms of component stress distribution, deformation, and equipment loading. Based on a multi-objective decision-making approach, it comprehensively considers objectives such as construction safety, cost, and efficiency to achieve the optimization of hoisting schemes. The research findings can provide references for the scientific formulation of hoisting schemes and construction safety control for long-span spatial steel structure roofs, ensuring the safety, efficiency, and economy of engineering construction.

Keywords : long-span spatial steel structure; roof hoisting; scheme optimization; construction mechanical behavior

引言

大跨度空间钢结构屋盖往往具有结构形式复杂、构件重量大、跨度超长等特点, 这使得吊装施工面临着诸多挑战。近年来尽管国内外学者在大跨度钢结构吊装技术与施工力学分析方面已开展了不少研究, 提出了多种吊装工艺和数值模拟方法, 但针对具体工程的方案优化仍缺乏系统的理论指导与量化分析手段, 如何在保证施工安全的前提下, 实现吊装方案的经济性与高效性, 仍是当前工程实践中亟

待解决的问题。基于此,本文聚焦大跨度空间钢结构屋盖吊装方案优化与施工力学行为分析,旨在通过系统研究吊装技术与方案评价体系,结合施工力学理论与有限元模拟方法,揭示不同吊装方案下的结构力学行为规律,并基于多目标决策实现方案的科学优化。研究成果期望为同类工程的吊装施工提供理论参考与技术支持,推动大跨度空间钢结构施工技术的进一步发展。

一、大跨度空间钢结构屋盖吊装技术与方案评价体系

(一) 常见大跨度屋盖吊装工艺概述

初期,我国主要以拱式结构和框架结构为主,其缺点就是只能起到层层传递荷载的作用,不能很好地承受荷载。随着我国技术和材料的不断发展,大跨度的空间体系结构也获得了加快的发展^[1]。大跨度屋盖吊装工艺的选择需结合结构形式、跨度大小、现场环境等因素,常见工艺各有特点。整体吊装工艺是在地面整体拼装后一次性吊装到位,其优势在于减少高空作业、降低风险且便于保证结构整体精度,但对起重设备要求高,需要详细的受力和加固。分块吊装工艺则是将屋盖分成若干单元分别吊装后进行拼接,对起重设备要求较低,施工灵活性高,不过会增加高空作业量和难度,拼接精度控制也较为复杂^[2]。滑移吊装工艺利用轨道和设备将屋盖逐步滑移到位,滑移时结构受力平稳、变形易控,但需要铺设高标准轨道,且设备同步性控制至关重要。提升吊装工艺通过下方提升设备将屋盖逐步提升到位,提升时结构受力明确、变形和位移易控,还可多点同步作业提高效率,只是提升设备布置和承载能力需精确计算,同步性和稳定性控制也比较复杂。

(二) 吊装方案影响因素分析

吊装方案制定受多种因素综合影响,充分考量这些因素是方案科学合理的前提。结构自身因素最为关键,结构形式如网架、网壳、桁架等不同,受力特点和吊装要求差异大;结构的跨度、重量直接决定起重设备选择和工艺采用,大跨度、重重量结构对设备要求更高,可能需特殊工艺;结构刚度和稳定性也有影响,刚度小的易变形,需加固保障安全^[3]。现场环境因素同样重要,场地大小和形状限制设备布置、移动及拼装场地;地形条件如坡度、地基承载力影响设备稳定性和作业安全,地基不足需处理;周边环境中的障碍物会限制设备作业半径和高度,增加难度与风险,交通状况则影响设备和材料运输^[4]。起重设备因素起关键作用,其起重量、起升高度、作业半径等参数需满足要求,不同类型设备适用范围和特点不同,需依情况选择;设备数量影响方案,工程量大、工期紧时可能需多台协同,要考虑配合协调;设备的可靠性和安全性也很重要,性能不稳定可能导致作业中断或事故。施工组织因素影响方案实施效果,施工进度计划要求方案满足工期,合理安排作业顺序和时间;施工人员技术水平和经验关乎作业质量与安全,需配备合格人员;施工组织管理水平如方案执行、现场协调指挥等,也影响方案顺利实施^[5]。成本因素衡量方案经济性,在满足质量、安全和进度的前提下,应选成本较低方案,但不能牺牲质量和安全。安全因素必须优先考虑,吊装属高危作业,方案需符合安全规范标准,采取有效防护措施,保障人员和设备安全。

(三) 吊装方案综合评价指标体系构建

为科学客观评价大跨度空间钢结构屋盖吊装方案,需构建涵

盖技术可行性、经济合理性、安全可靠性和施工效率的综合评价指标体系^[6]。技术可行性是方案实施的基础,包括吊装工艺成熟度、结构受力合理性、起重设备匹配度及施工难度。经济合理性用于衡量成本效益,涉及总成本、单位面积成本及成本控制难易程度。安全可靠性是安全保障关键,包含安全防护措施完善性、结构吊装安全性、起重设备安全性及作业人员安全保障。施工效率反映对工程进度的影响,有吊装工期、吊装作业连续性和施工组织合理性。构建体系时,需结合具体工程特点赋予指标相应权重,可采用层次分析法、模糊综合评价法等进行综合评价,以选出最优方案。

二、施工过程力学行为分析理论与建模方法

(一) 施工力学基本理论

施工力学是研究结构施工过程中力学行为的学科,综合结构力学、材料力学、土力学等理论方法,旨在揭示施工中结构受力、变形、稳定性等力学特性的变化规律。其核心内容包括施工阶段结构体系转换、荷载传递与分布、材料力学性能随时间变化及结构动态响应等^[7]。施工中结构体系随步骤逐步形成最终体系,如大跨度钢结构屋盖分块吊装时,每吊装连接一块构件,受力体系就会变化,导致内力和变形重新分布^[8]。施工力学强调时间因素的影响,施工中结构承受的自重、施工荷载等会随时间变化,材料力学性能也会改变,因此需考虑时间维度动态分析不同施工阶段的力学状态。同时它注重施工工艺与结构力学行为的相互作用,不同工艺会使结构经历不同受力路径和变形过程,需依具体工艺建立力学分析模型以准确预测。施工力学基本理论为施工中结构安全控制提供依据,通过分析可提前发现过大变形、应力集中、失稳等安全隐患,进而采取预防控制措施,保障施工安全可靠。

(二) 有限元法在施工模拟中的应用

有限元法是高效的数值分析方法,通过将连续结构离散为有限个单元,建立并组装单元力学方程,求解结构内力、变形等参数。在大跨度空间钢结构屋盖施工模拟中,因其适应性强、计算精度高而被广泛应用^[9]。其优势主要是能准确模拟复杂结构形式和施工过程,可通过选择合适单元类型精确描述结构特征,还能模拟吊装、滑移等多种工艺的结构行为;可考虑多种因素影响,能将自重、施工荷载、风荷载等纳入模型,分析综合影响;能对施工过程进行可视化展示和动态分析,借助软件直观显示不同阶段内力、变形等,便于发现问题和调整方案,还可进行关键参数敏感性分析,为优化方案提供依据^[10]。应用步骤包括建立几何模型、划分有限元单元、选择材料本构关系、施加边界条件和荷载、求解计算及分析评估结果。实际应用中需结合工程具体情况,合理选择单元类型、网格密度和计算参数,以保证模拟结果

准确可靠。

（三）施工全过程精细化有限元模型构建

施工全过程精细化有限元模型是大跨度空间钢结构屋盖施工精确力学分析的基础，能真实反映施工中结构几何形态、材料性能、荷载作用和边界条件的变化，为施工安全控制和质量保障提供可靠依据。模型构建的精细化体现在多方面，几何建模需精确描述构件尺寸、形状、连接方式及节点构造细节，复杂结构采用三维建模，确保与实际高度一致；材料本构关系选取要契合材料实际性能和施工受力特点，以及材料损伤和破坏准则；荷载和边界条件需精细化处理，准确施加各类荷载并考虑其分布与作用时间，边界条件设置符合实际，包括支撑特性及可移动支撑的运动状态；还应精细化模拟施工步骤，按顺序分解为若干阶段，每个阶段对应分析步，依施工要求激活或钝化构件、施加或移除荷载等；同时要优化网格划分，关键部位用较密网格提高精度，次要部位减小密度提升效率，且保证网格质量。构建该模型是复杂系统工程，需工程师专业知识、工程经验及先进软件技术支持，模型能准确预测施工中结构力学行为，为优化方案、制定安全措施提供科学依据，保障施工顺利进行。

三、基于数值模拟的吊装方案优化与力学行为分析

（一）不同吊装方案的施工力学行为对比分析

不同的吊装方案在施工过程中，其力学行为存在显著差异，这些差异主要体现在构件的应力分布、变形情况、吊装设备的受力状态等方面。通过数值模拟，我们可以对多种吊装方案进行虚拟施工演练。在模拟过程中，重点监测构件在起吊、平移、就位等各个阶段的应力变化。单点吊装时，构件往往会在吊点处产生较大的应力集中，如果应力超过构件材料的许用应力，就可能导致构件变形甚至损坏。而多点吊装通过合理分配吊点，可以有效分散应力，降低应力集中现象的发生概率。同时构件的变形情况也是对比分析的重要指标。在吊装过程中，构件若发生过大的变形，不仅会影响安装精度，还可能对周边结构或设备造成干扰。数值模拟能够精确计算出不同方案下构件的挠度、转角等变形参数。此外，吊装设备的受力状态同样不容忽视，不同的吊装方案会使起重机等设备的起重臂受力、支腿反力等发生变化。通过数值模拟，可得到各种方案下吊装设备关键部位的受力数据，若设备受力超过其额定承载能力，就会存在安全隐患。通过对不同吊装方案的施工力学行为进行全面对比分析，能够清晰地掌握各方

案的优势与不足，为后续的方案优化提供有力支撑。

（二）基于多目标决策的吊装方案优化

在吊装方案优化过程中，往往需要考虑多个目标，基于多目标决策的吊装方案优化就是在综合权衡这些目标的基础上，选出最优方案。施工安全方面，可选取构件最大应力、吊装设备最大受力、构件最大变形等指标，这些指标直接关系到施工过程中人员和设备的安全；施工成本主要包括吊装设备租赁费用、人工费用、材料费用等，不同的吊装方案在成本投入上会有明显差异；施工效率则可通过吊装作业时间、工序衔接顺畅程度等指标来衡量，高效的吊装方案能缩短施工工期，加快工程进度。利用数值模拟技术获取各吊装方案在不同评价指标下的具体数值，将这些数值进行标准化处理，消除不同指标量纲的影响，使各指标具有可比性。采用合适的多目标决策方法进行方案优选，常用的方法有层次分析法、模糊综合评价法、TOPSIS 法等。以层次分析法为例，先建立层次结构模型，将吊装方案优化目标作为顶层，评价指标作为中间层，各备选方案作为底层；然后通过两两比较确定各指标的权重，权重大小反映了该指标在决策中的重要程度；最后计算各备选方案的综合得分，得分最高的方案即为最优方案。在多目标决策过程中，还需要考虑各目标之间的相互关系和约束条件。通过多目标决策，能够在这些相互矛盾的目标之间找到平衡点，使优化后的吊装方案在满足安全要求的前提下，尽可能降低成本、提高效率。基于多目标决策的吊装方案优化，充分考虑了工程实际中的各种因素，能够选出兼顾多个目标的最优方案，为吊装施工提供科学、合理的指导。

四、结束语

本文围绕大跨度空间钢结构屋盖吊装方案优化与施工力学行为展开了系统性研究，通过对吊装技术、方案评价体系、施工力学分析理论及数值模拟应用的深入探讨，形成了一系列具有实践意义的成果。研究表明，科学的吊装方案优化与施工力学行为分析，能够有效平衡大跨度空间钢结构屋盖施工中的安全、成本与效率，为工程实践提供可靠的技术支撑。然而本文的研究仍存在一定局限，例如在有限元模拟中对某些复杂施工环境因素的考虑尚不够全面，后续研究可进一步完善模型的精细化程度，结合更多实际工程案例进行验证与优化。

参考文献

[1] 范凯. 某大跨度钢屋盖结构施工技术的研究 [D]. 江西：南昌大学，2020.
[2] 武浩鹏. 大跨度空间钢结构施工过程监测分析与结构安全性评估 [D]. 甘肃：兰州理工大学，2017.DOI: 10.7666/d.D01248497.
[3] 张胜杰，贾宝荣，陈颖. 超高重型大跨度室内滑雪场钢屋盖建造技术 [J]. 建筑钢结构进展，2024，26(9): 100–106.DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.09.011.
[4] 汪韦韦，王强. 大跨度空间钢结构铸钢件和梭形斜柱逆施工技术 [J]. 铁路技术创新，2020(5): 40–45.DOI: 10.19550/j.issn.1672-061x.2020.05.040.
[5] 赵跃港. 某大跨度钢结构施工过程力学模拟及关键技术研究 [D]. 河南：河南大学，2023.
[6] 杨平，罗军伟，汪兴文. 大跨度钢结构建筑改造中的安装施工技术研究 [J]. 建筑技术开发，2023，50(9): 23–25.DOI: 10.3969/j.issn.1001-523X.2023.09.007.
[7] 张富强. 大跨度空间网架结构施工过程优化分析及应用研究 [D]. 陕西：西安理工大学，2011.DOI: 10.7666/d.y2117401.
[8] 柯江华，张宏磊，谢心谦，等. 某改造项目大跨度高空钢结构安装施工技术 [J]. 施工技术（中英文），2022，51(17): 82–85.DOI: 10.7672/sgjs2022170082.
[9] 洪彩玲. 大跨度预应力空间钢结构施工过程分析与索力优化研究 [D]. 河南：郑州大学，2013.
[10] 乔永强，郭泰源，胡清，等. 大跨度屋面桁架吊点布置和支承卸载有限元模拟分析 [J]. 钢结构，2021，36(7): 29–34.DOI: 10.13206/j.gjgS20031801.