

大跨空间钢结构施工过程中时变分析及变形控制技术

廖有昌

万载县万投建筑设计有限公司 江西宜春 336100

摘要: 大跨空间钢结构凭借跨度大、造型新颖、空间利用率高的优势,广泛应用于大型场馆、交通枢纽等工程。其施工过程受多重时变因素影响,易产生累积变形与内力重分布,直接关系工程安全与施工质量。本文围绕大跨空间钢结构施工过程中时变分析及变形控制技术展开研究,首先阐述施工过程的时变特性,包括结构体系与边界条件、荷载与环境、材料性能与构件行为的时变性;进而分析时变效应的核心分析方法,涵盖施工阶段划分与状态模拟、关键工序力学行为分析、累积变形与内力变化追踪;最后提出针对性的变形控制技术,包括预变形技术应用、施工监测与反馈控制、关键工序精度控制措施。研究旨在为大跨空间钢结构施工提供理论支撑与技术参考,保障工程施工安全与质量。

关键词: 大跨空间钢结构; 施工过程; 时变分析; 变形控制

引言

随着建筑行业发展,大跨空间钢结构凭借独特结构优势,成为大型公共建筑等工程首选。其跨度超60米、造型多样,要满足功能美观需求,承受多重荷载。但施工工具复杂性和不确定性,从构件加工到卸载各环节,结构体系等处于动态变化,形成时变过程。时变效应引发的变形与内力重分布是影响施工安全关键。若对时变特性认识分析不足、变形控制措施不到位,易引发安全事故或影响使用功能。传统施工分析基于静力平衡假设,难反映动态变化规律,无法满足高精度施工要求。因此,开展大跨空间钢结构施工过程中时变分析及变形控制技术研究意义重大。通过分析时变特性、建立分析方法、制定控制技术,可精准把控施工过程,确保结构安全质量。

一、大跨空间钢结构施工过程的时变特性

(一) 结构体系与边界条件的时变性

大跨空间钢结构施工过程是结构体系逐步形成、边界条件持续变化的动态过程。与竣工后的完整结构体系不同,施工阶段结构处于未成型状态,随着构件的逐步吊装、拼装,结构的组成部分不断增加,受力体系从分散的单个构件逐步过渡到整体结构。例如,桁架结构施工时,先吊装的弦杆、腹杆靠临时支撑稳定,后续构件吊装完成,结构形成完整受力体系,临时支撑受力改变,卸载后结构独立承载。边界条件时变性体现在约束形式和刚度动态变化。施工初期,构件靠临时支撑、缆风绳约束,刚度小且分布不均;施工推进,临时支撑拆除,

结构与基础连接节点成型,约束从临时变永久,刚度提高。同时,基础沉降、支座变形等也会使边界条件变化,如大跨网架施工中,基础不均匀沉降会改变支座约束,影响结构受力与变形。结构体系与边界条件动态变化,使施工中结构受力机制不断调整,形成复杂时变特性^[1]。

(二) 荷载与环境的时变性

大跨空间钢结构施工周期长,施工过程中面临的荷载与环境条件具有显著的时变特征。荷载的时变性主要体现在荷载类型、大小和分布的动态变化。施工阶段荷载包括构件自重、施工设备和人员重量、吊装荷载等,随施工进度不断变化。如吊装时吊点荷载实时变,拼装阶段已安装构件自重逐步累积、荷载分布范围扩大。此外,临时堆载、风雪荷载等也随时间和环境变,增加荷载时变复杂性。

环境时变性表现为温度、湿度、风力等环境因素动态变化。温度变化影响大跨空间钢结构变形,昼夜温差、季节更替使构件热胀冷缩,引发结构变形和内力变化,如高温时钢桁架构件伸长、低温时收缩。风力对施工阶段大跨空间钢结构影响显著,此时结构抗风性能弱,不同风速、风向影响结构稳定性。湿度变化可能导致钢结构表面腐蚀,影响材料性能和结构时变响应。

(三) 材料性能与构件行为的时变性

材料性能的时变性是大跨空间钢结构施工过程中时变特性的重要组成部分。钢结构常用的钢材在施工过程中,其力学性能会受到加工工艺、环境条件等因素的影响而发生变化。例如,构件加工过程中的焊接、热弯等工艺

会产生残余应力，残余应力的分布和大小会随着后续工序的开展的逐步释放或重分布；长期暴露在室外环境中的钢材，会受到氧化、腐蚀等作用，表面性能发生变化，长期下来可能影响钢材的强度和韧性。此外，钢材力学参数会随温度略有波动，高温或低温下材料性能变化会影响结构受力与变形。构件行为时变性体现为其变形和受力状态随施工动态变化。施工中，构件从加工到吊装就位再到拼装连接，受力状态不断改变，如吊装时主要承受轴向拉力和弯矩，就位连接后变为轴心或偏心受力，后续构件安装会使已安装构件受力进一步调整、变形累积。同时，构件几何形状和尺寸会因加工、运输、安装等因素变化且逐步累积，影响结构整体性能。构件行为时变性与结构体系、荷载环境时变性相互作用，构成大跨空间钢结构施工复杂时变特性^[2]。

二、施工过程时变效应的分析方法

（一）施工阶段划分与状态模拟

施工阶段划分是开展大跨空间钢结构时变效应分析的基础，通过合理划分施工阶段，能够准确反映结构体系、受力状态的逐步形成过程。施工阶段划分应结合结构类型、施工工艺和施工组织设计，遵循连续性、独立性和代表性原则。通常按施工流程，将施工过程分为构件加工运输、现场吊装等多个阶段，各阶段再依具体施工内容细分若干子阶段。如大跨网壳结构施工分基础施工等阶段，明确各阶段起止时间、施工内容和关键控制节点。

状态模拟基于施工阶段划分，用数值计算法模拟各阶段结构受力和变形状态。常用数值模拟法有有限元法、离散元法等，有限元法因通用性强、精度高应用广泛。状态模拟中，需据各施工阶段结构体系、边界条件和荷载情况建有限元模型。如吊装阶段模型考虑吊点位置等因素；拼装阶段模型模拟构件连接和受力传递；卸载阶段模型逐步解除临时支撑约束，模拟结构受力转移。通过各阶段状态模拟，获取结构关键数据，为后续时变效应分析打基础。

（二）关键施工工序的力学行为分析

关键施工工序的力学行为分析是时变效应分析的核心，通过深入分析对结构安全和变形影响较大的关键工序，能够精准把握时变效应的主要来源和影响规律。大跨空间钢结构关键施工工序包括构件吊装、拼装连接、临时支撑拆除、卸载等，其施工质量和力学行为决定结构最终性能。构件吊装力学行为分析关注吊装中构件受力与变形，考虑吊点数量、位置、吊装速度等因素对构件应力和位移的影响，以确定合理吊装方案，避免构件

受损。拼装连接力学行为分析重点是连接节点受力传递和变形协调，考虑连接方式、焊接质量、螺栓预紧力等因素，确保节点有效传力，防止节点破坏或变形过大。临时支撑拆除和卸载是结构受力状态转变的关键环节，力学行为分析很重要。临时支撑拆除时，分析拆除顺序和速度对结构内力重分布和变形的影响，避免结构局部应力集中或整体失稳。卸载时模拟荷载移除过程中结构变形和内力变化，确保卸载平稳，结构变形在允许范围内^[3]。

（三）累积变形与内力变化的追踪

累积变形与内力变化的追踪是施工过程时变效应分析的重要内容，通过持续追踪各施工阶段的变形和内力变化，能够全面掌握时变效应的累积规律。累积变形指结构各施工阶段变形逐步叠加的总变形，包括弹性、塑性和温度变形等。内力变化指施工中因荷载、边界条件、结构体系等因素导致的内力重分布。累积变形追踪基于各施工阶段状态模拟，用增量分析法，以前阶段变形为后阶段初始变形逐步累积。如大跨桁架施工，吊装弦杆有变形，后续吊装腹杆要考虑其初始变形算附加变形，最终得累积变形。通过追踪可预测施工完成后变形是否达标，超范围则调整方案。内力变化追踪结合各阶段力学分析，记录关键部位内力值，分析变化趋势规律。如追踪桁架关键杆件在吊装等阶段的轴力、弯矩变化，识别内力集中处和阶段并采取措施。同时要考虑温度、残余应力等影响确保结果准确。通过累积变形与内力变化追踪，能掌握大跨空间钢结构施工时变效应，为变形控制技术提供依据。

三、大跨空间钢结构施工变形控制技术

（一）预变形技术的应用

预变形技术是大跨空间钢结构施工中控制最终变形的有效手段，通过在施工过程中预先设置反向变形，抵消施工和使用阶段产生的累积变形，确保结构竣工后达到设计形状和尺寸。预变形技术的核心是基于施工过程时变效应分析结果，准确预测结构的累积变形量，然后根据变形规律设置反向预变形值。预变形值的确定需综合考虑施工阶段的累积变形、使用阶段的荷载变形和温度变形等因素。通过数值模拟计算得到结构在各阶段的变形量，叠加后得到总变形预测值，预变形值的大小通常与总变形预测值相等，方向相反。预变形技术的应用需结合具体施工工艺，常用的实施方式包括构件预加工变形、拼装过程预起拱等。构件预加工变形是在构件加工阶段，通过机械加工或热加工等方式，使构件产生与累积变形方向相反的初始变形；拼装过程预起拱是在在现

场拼装时,通过调整临时支撑的高度,使结构形成预设的预变形^[4]。

(二) 施工监测与反馈控制技术

施工监测与反馈控制技术是保障大跨空间钢结构施工安全、控制变形的关键手段,通过实时监测施工过程中结构的变形、应力等参数,及时反馈给施工管理和技术人员,调整施工方案,实现变形的动态控制。施工监测应覆盖整个施工过程,重点监测关键部位和关键工序,确保监测数据的实时性、准确性和完整性。施工监测的内容主要包括变形监测、应力监测、温度监测等。变形监测采用全站仪、水准仪、激光测距仪等设备,监测结构关键节点的位移、沉降和结构整体的线形变化;应力监测通过在关键杆件和节点处布设应变片或应力传感器,实时监测结构的应力分布和变化情况;温度监测采用温度传感器,记录环境温度和结构表面温度,为分析温度变形提供数据支持。监测点的布设应根据结构类型和施工特点,选择变形和应力较大的关键部位,如结构跨中、支座、节点连接处等,确保监测数据能够全面反映结构的受力和变形状态。反馈控制是根据监测数据进行分析判断,及时调整施工方案。建立监测数据实时分析平台,对监测数据进行实时处理和分析,与预设的预警值进行对比,若监测数据超出预警值,及时发出预警信号,技术人员结合时变分析结果,分析变形超标的原因,调整施工参数或采取加固措施。例如,某大跨度钢结构空间张弦桁架施工过程中,通过实时监测发现跨中变形接近预警值,技术人员及时调整吊装顺序,放慢后续构件的安装速度,同时加强临时支撑的刚度,有效控制了变形的进一步发展。施工监测与反馈控制技术实现了施工过程的动态管控,确保结构变形始终处于可控范围内。

(三) 关键工序的精度控制措施

关键工序的精度控制是大跨空间钢结构施工变形控制的重要环节,通过对构件加工、吊装、拼装、卸载等关键工序实施高精度控制,从源头减少变形误差的产生和累积。构件加工精度控制是基础,钢结构构件的加工误差会直接影响现场安装精度,进而导致结构变形。在构件加工过程中,严格控制构件的几何尺寸、焊接质量和表面平整度,采用高精度加工设备和先进的加工工艺,减少加工误差。例如,对桁架弦杆、腹杆等关键构件,采用数控切割、高精度焊接等工艺,确保构件的长度、截面尺寸和直线度偏差控制在设计允许范围内。吊装工序的精度控制重点在于吊点设置、吊装设备选择和吊装过程控制。合理设置吊点,确保构件吊装过程中受

力均匀,避免因吊点位置不当导致构件变形;选择起重能力和精度符合要求的吊装设备,确保构件能够准确就位;吊装过程中采用实时监测设备,控制吊装速度和姿态,避免构件碰撞或受力过大产生变形。拼装工序的精度控制核心是保证构件连接的准确性和协调性,采用高精度测量仪器进行实时定位和调整,确保构件的安装位置、标高和轴线偏差符合设计要求。例如,大跨网壳结构拼装时,采用全站仪进行三维坐标测量,实时调整构件位置,确保节点连接的精度。卸载工序的精度控制直接影响结构的最终变形,卸载过程应遵循“分级卸载、缓慢平稳”的原则,制定详细的卸载方案,明确卸载顺序、卸载量和卸载速度。采用同步卸载设备,确保各支撑点的卸载量保持一致,避免因卸载不均导致结构内力重分布过大,产生过大变形^[5]。

结语

大跨空间钢结构施工过程的时变特性决定了其变形控制的复杂性和重要性,时变效应引发的累积变形与内力重分布直接关系工程施工安全和使用功能。本文通过对大跨空间钢结构施工过程时变特性、时变效应分析方法及变形控制技术的系统研究,明确了结构体系与边界条件、荷载与环境、材料性能与构件行为的时变性是施工过程时变特性的核心组成部分。施工阶段划分与状态模拟、关键工序力学行为分析、累积变形与内力变化追踪构成了完整的时变效应分析体系,为变形控制技术的制定提供了科学依据。预变形技术、施工监测与反馈控制技术、关键工序精度控制措施。

参考文献

- [1]王少纯,徐磊,龚伟东,等.大跨度桁架钢结构变形释放安全控制技术研究[C]//2021年工业建筑学术交流会.上海建工一建集团有限公司,2021.
- [2]马鑫.钢结构屋面整体滚装施工技术及应用[D].西安建筑科技大学,2020.
- [3]翟雷,李文涛,王永生,等.大跨度钢结构空间张弦桁架施工全过程监测与分析[J].施工技术,2022(014):051.DOI:10.7672/sjgs2022140077.
- [4]王建勋,马朋朋.大跨度钢桁架拱桥施工过程受力性能分析[J].公路,2022.
- [5]常乐,李瑞峰,李志伟.跨度120m三角锥体空间钢结构施工卸载监测技术研究[J].建筑结构学报,2020,41(2):8.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2018.0106.