

门式刚架吊装稳定性控制技术研究

王 辉 冉云兴 李永飞

中国建筑第六工程局有限公司 安徽 安庆 246000

摘 要：门式刚架属于轻型钢结构，具备跨度大、刚度小、易变形的特点，吊装施工中极易发生侧向偏移、扭转及倾覆失稳，严重制约施工安全与质量。本文依托实际厂房工程，深入分析门式刚架吊装失稳机理与各类影响因素，借助 MidasGen 有限元软件开展多工况数值模拟，确定吊装施工临界参数与高风险节点。针对施工痛点构建全流程稳定性控制技术体系，经工程实践验证，该技术可有效抑制构件变形、规避失稳风险，可为同类钢结构吊装施工提供可靠参考。

关键词：门式刚架；吊装；稳定性；控制技术

引言：门式刚架结构凭借施工便捷、空间利用率高的优势，被广泛应用于各类工业建筑工程。但该结构构件薄壁轻质、整体稳定性薄弱，露天吊装作业易受风力、施工工艺、临时支撑等因素干扰，频繁出现失稳病害，易引发安全事故与质量隐患。传统吊装管控方式较为粗放，难以适配大跨度门式刚架的高精度施工要求。基于此，本文通过理论分析与数值模拟结合的方式，探究失稳规律，制定专项控制技术，助力提升吊装施工的安全性与规范性。

1 门式刚架吊装施工及稳定性失稳机理分析

1.1 门式刚架结构特点与吊装施工工艺

(1) 门式刚架结构核心特点：该结构属于轻型钢结构，核心特征为构件薄壁轻质、整体跨度大、截面刚度偏小，天然整体稳定性较弱。相较于重型钢结构，其抗变形、抗侧移能力差，吊装作业中极易产生弹性变形、扭转及侧向偏移，对吊装工艺精度和临时稳定防护措施的要求更为严苛。(2) 常规吊装施工工艺流程：整体施工流程标准化，依次为施工准备、构件进场检验、吊装设备与吊具选型、吊点定位与绑扎、试吊作业、正式吊装、对位安装、临时支撑固定、吊具拆除、后续构件安装，各工序衔接紧密，直接影响吊装整体稳定性。(3) 主流吊装施工方式：主要包含整体吊装、分片吊装、分段吊装三种。整体吊装整体性好、安装效率高，适用于小型小跨度刚架；分片吊装适配中等跨度结构，施工灵活性强，但临时稳定管控难度大；分段吊装多用于大跨度、超大型刚架，可降低单次吊装荷载，但拼接对位精度要求极高^[1]。

1.2 门式刚架吊装失稳主要类型

(1) 侧向失稳：吊装过程中，构件受水平风荷载、吊点受力不均衡影响，易出现侧向偏移、倾斜问题，当变形量超出构件允许范围时，会引发整体侧向失稳。(2) 扭转失稳：吊点绑扎不对称、构件自重分布不均、吊装受力失衡，是引发扭转变形的核心原因，严重时会造成构件扭曲破损、安装错位，影响后续施工质量。(3) 竖向倾覆失稳：作为危害性最大的失稳类型，多由临时支撑体系薄弱、地基承载力不足、吊装瞬时受力突变导致，会引发刚架竖向沉降、整体倾覆，易造成重大施工安全事故。

1.3 吊装稳定性核心影响因素与失稳机理

(1) 构件自身因素：刚架截面规格、构件壁厚、跨度尺寸及加工精度偏差，会造成构件自重分布不均，直接改变吊装受力状态，是影响吊装稳定性的基础内因。(2) 施工工艺因素：吊点数量、位置设置不合理，绑扎操作不规范，吊装速度过快、构件对位偏差过大等工艺问题，会打破构件受力平衡，直接诱发各类失稳病害。(3) 外部环境因素：风荷载是核心外部影响因素，阵风、侧风会大幅增大构件水平荷载；低温、雨雪天气会造成构件湿滑、吊装设备性能衰减，间接降低吊装作业稳定性。(4) 辅助设施因素：临时支撑刚度不足、搭设位置偏差、缆风绳张拉力度不均，无法有效约束构件变形与位移，难以形成稳定防护体系，最终引发失稳问题。

2 门式刚架吊装稳定性数值模拟分析

2.1 数值模拟方案设计

(1) 模拟软件选取：本次模拟采用 MidasGen 有限元分析软件，该软件针对轻型钢结构具备高精度力学计算

能力,可精准适配门式刚架吊装过程中动态受力、弹性变形、扭转偏移及整体稳定性的模拟分析需求,能够有效解决吊装瞬时受力不均、风荷载耦合作用等复杂工况的计算难题,契合本次施工模拟的精度要求。(2)模型建立:依托实际工程跨度 24m、高度 8.5m 的门式刚架实体参数建立三维精细化有限元模型,严格还原钢梁、钢柱截面尺寸、Q355 钢材材质、构件自重及弹性模量等核心参数。对屋面零星辅件、连接件等次要结构进行合理简化,网格划分精度控制为 50mm,确保模型贴合实际施工状态,保障模拟数据真实有效。(3)模拟工况设定:为全面探究吊装稳定性影响规律,设置多组对比工况,包含无风静态标准吊装工况、3 级~6 级不同风速风荷载耦合工况、双吊点与四吊点不同布置工况、无临时支撑与常规型钢支撑防护工况,通过多工况对比,系统分析不同变量下构件的受力与稳定性能。

2.2 不同工况下吊装稳定性模拟结果分析

(1)静态无风工况模拟分析:在标准吊装工艺、无风静态工况下,刚架最大应力值为 126MPa,远低于 Q355 钢材屈服强度,构件竖向最大变形 8.2mm、侧向变形 3.1mm,整体应力分布均匀、变形规整,无局部应力集中现象,可作为门式刚架吊装的基准稳定状态。(2)风荷载耦合工况模拟分析:模拟结果显示,3~4 级风荷载作用下,构件侧向位移增幅较小,整体处于安全状态;当风速达到 5 级(8.0~10.7m/s)时,刚架扭转角度增至 1.8°,侧向变形骤增至 16.5mm;风速超 6 级后,构件应力接近屈服临界值,变形超出规范允许范围,确定该工程安全吊装风速阈值为 5 级风以内^[2]。(3)吊点参数工况模拟分析:双吊点吊装时,构件跨中最大变形达 22.3mm,存在轻微扭转现象;对称四吊点布置工况下,构件整体变形控制在 9mm 以内,应力分布均衡,无偏移、扭转问题,对比可知对称四吊点为本次工程最优吊点布置方案。

2.3 吊装失稳临界条件与风险点确定

(1)失稳临界参数界定:结合模拟数据及《钢结构工程施工质量验收标准》,界定本次吊装核心临界参数:构件竖向、侧向变形允许最大值为 $L/1000$,应力临界值为 345MPa,安全吊装临界风速为 10.7m/s,超出该参数范围极易发生失稳病害。(2)高风险施工阶段识别:通过工况模拟可知,试吊受力调整阶段、高空对位微调阶段、临时支撑拆除初期为三大高风险节点,此三个阶段构件受力状态不稳定,约束防护较弱,是侧向偏移、扭转失稳的高发阶段。(3)核心风险点总结:综合所有模拟工况,梳理出四大核心失稳风险点,分别为现

场风荷载超标、吊点数量及位置布设不合理、临时支撑体系刚度不足、吊装升降速度过快导致受力失控,也是现场吊装稳定性管控的重点内容。

3 门式刚架吊装稳定性控制关键技术与工程应用

3.1 吊装前期稳定性预控技术

(1)构件预处理与检验控制:门式刚架轻型构件壁厚较小,加工偏差极易造成吊装受力失衡,因此需严格把控构件加工制作精度。构件进场后,需开展全方位质量核查,重点检测构件平面尺寸、侧弯变形、扭曲偏差及焊缝平整度,严格对照钢结构施工规范验收标准。针对存在轻微弯曲、变形的钢梁、钢柱构件,采用机械校正、热校正工艺提前处理,彻底消除构件初始缺陷。同时清理构件表面杂物、锈蚀,保证构件自重分布均匀、截面刚度符合设计要求,从源头规避因构件自身缺陷引发的吊装失稳问题。(2)吊装设备与吊具选型优化:结合依托工程门式刚架跨度、构件自重及吊装高度参数,精准匹配吊装设备与吊具。优先选用额定起重量富余系数 ≥ 1.25 的汽车起重机,杜绝设备超负荷、超幅度作业。根据构件吊点受力计算结果,选型适配的钢丝绳、卸扣及专用吊装吊具,保证吊具承载力、刚度与构件受力需求匹配。同时施工前全面检查设备运行状态、吊具磨损情况,对老化、变形吊具及时更换,确保吊装系统整体稳定性与安全性^[3]。(3)施工工况预判与方案优化:施工前对现场工况进行全面勘测预判,重点核查施工场地平整度、地基承载力及周边风环境条件。针对门式刚架吊装受风荷载敏感的特点,提前统计施工周期内气象数据,规避六级及以上大风、雨雪、低温霜冻等恶劣天气施工。结合现场实际工况,针对性优化专项吊装方案,明确吊点布设、吊装流程、临时支撑搭设标准,细化高风险施工节点管控措施,为吊装施工提供精准技术依据。

3.2 吊装施工过程动态稳定控制技术

(1)吊点精准布设与绑扎控制:依托前期数值模拟得出的最优吊点参数,确定吊装吊点的数量与精准位置,摒弃传统经验化布设方式。施工中优先采用对称式吊点绑扎工艺,保证构件受力对称、均衡。同时在绑扎位置增设防滑垫块、紧固卡扣,避免吊装过程中钢丝绳滑移、错位,杜绝因吊点受力不均、绑扎松动引发的构件扭转、侧向偏移等失稳问题,保障吊装初始姿态稳定^[4]。(2)吊装速度与姿态动态调控:全程采用低速、平稳的吊装作业模式,严格控制起吊、回转、移位、对位全过程速度,其中起吊速度控制在 0.5m/s 以内,空中对位微调速度放缓,杜绝急停、急转、加速等违规操

作。安排专职监测人员全程值守,实时观测构件空中姿态,针对轻微侧向偏移、扭转现象及时通过人工牵引微调,保证构件始终处于规范允许变形范围内,实现全过程动态稳定管控。(3)风荷载实时防控措施:在施工现场布设智能风速监测设备,实时采集现场风速、风力数据,实现风荷载动态监测预警。当现场风速超过 10.7m/s 的安全阈值时,立即停止吊装作业,将构件临时固定稳妥。常规施工工况下,对大跨度刚架构件增设双向缆风绳与临时拉结装置,通过均匀张拉缆风绳抵消水平风荷载产生的侧向推力,有效抑制构件侧向变形与扭转晃动,提升风荷载作用下的吊装稳定性。

3.3 临时支撑体系稳定控制技术

(1)临时支撑结构选型与设计:根据大跨度门式刚架吊装受力特性与数值模拟受力数据,优先选用型钢与钢管组合支撑体系。通过力学验算确定支撑搭设间距、高度及截面规格,保证支撑体系刚度、承载力满足临时受力要求,可有效约束钢柱侧移、刚架竖向沉降及整体晃动,从结构防护层面规避倾覆、侧向失稳风险。(2)支撑搭设与固定工艺控制:严格按照设计点位精准搭设临时支撑,保证支撑立杆垂直、横杆连接牢固,整体无松动、倾斜现象。支撑底部提前做好场地硬化、铺垫钢板处理,提升地基承载力,防止支撑受力沉降。所有连接节点采用螺栓紧固、点焊加固方式处理,形成完整稳定的支撑防护体系,全方位提升刚架吊装及安装完成后的临时约束能力。(3)支撑拆除时序控制:支撑拆除严格遵循“先永久固定、后临时拆除、对称分层拆除”的核心原则,严禁提前拆除、无序拆除、单侧拆除。待刚架主体连接节点全部焊接固定、螺栓终拧完成且验收合格后,按照从跨中向两端的对称顺序逐步拆除支撑,有效规避因支撑拆除不当导致的结构受力突变、局部变形及后期整体失稳风险^[5]。

3.4 工程实例应用与效果验证

(1)工程概况:本次依托某工业厂房门式刚架钢结构工程,厂房单跨跨度 24m,刚架柱高 8.5m,主体采用 Q355 钢材,单榀刚架自重 2.8t。施工现场为露天作业,周边无遮挡,风力影响显著,且构件薄壁、刚度偏小,吊装过程易发生扭转、侧向失稳,高空对位精度管控难

度大,是本工程钢结构施工的核心重难点。(2)控制技术现场应用:将前文成套稳定性控制技术全面应用于该工程吊装施工,施工前完成构件校验预处理、设备精准选型、工况预判及方案优化;施工中采用四吊点对称吊装工艺,动态调控吊装速度与构件姿态,落实风荷载实时防控措施;施工后严格按照规范时序搭设、验收、拆除临时支撑,形成前期预控、过程严控、后期防护的全流程稳定管控体系。(3)应用效果检测与分析:现场对多榀刚架吊装过程进行全程监测,数据显示,采用本文控制技术后,构件最大侧向偏移量仅 4.2mm,最大扭转变形 0.3°,竖向变形控制在 8mm 以内,所有变形指标均优于规范标准。相较于传统施工工艺,构件失稳隐患发生率大幅降低,吊装对位精度、施工安全性显著提升,有效解决了轻型门式刚架吊装易变形、易失稳的难题,充分验证了该套控制技术的科学性与工程实用性。

结束语

本文系统探究了门式刚架吊装失稳类型与作用机理,通过多工况数值模拟确定施工临界风险参数,形成全流程吊装稳定性控制技术体系。经实际工程验证,该技术可精准管控构件变形、规避施工失稳风险,显著提升门式刚架吊装施工质量与安全系数。研究成果有效解决了轻型大跨度刚架吊装稳定性差的难题,可为同类钢结构吊装工程的施工优化、风险管控提供可靠的理论与实践支撑。

参考文献

- [1] 何锐. 超大跨度门式刚架梁吊装施工稳定性控制技术[J]. 钢结构,2026,41(02):78-82.
- [2] 王浩,李建峰,张宇. 大跨度轻型门式刚架吊装侧向失稳机理与防控技术[J]. 施工技术,2025,54(12):96-100.
- [3] 刘阳,陈鑫. 双机抬吊模式下门式刚架整体稳定性仿真分析与控制策略[J]. 建筑科学与工程学报,2025,42(03):156-162.
- [4] 郑军委,桑兆龙,孙治民. 大跨度钢结构门式刚架吊装施工技术 with 稳定性优化[J]. 工程建设与设计,2023,13(20):210-212.
- [5] 周凯,吴峰. 施工阶段门式刚架临时支撑体系对吊装稳定性的影响研究[J]. 钢结构工程研究,2024,32(05):45-50.