

基于ABAQUS的大跨环形钢桁架吊装阶段应力模拟

梅梦钊¹, 姚 鑫¹, 金铭浩^{2*}, 匡 昕², 余船强², 陈伏彬²

¹湖南建工集团有限公司, 湖南 长沙

²长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年1月18日; 录用日期: 2025年2月12日; 发布日期: 2025年2月21日

摘要

本文通过ABAQUS有限元软件, 结合工程实例, 建立了大跨度钢桁架吊装阶段全过程有限元模型, 对杆件内力、结构稳定性、结构变形进行了讨论分析, 为同类工程提供了有益参考。

关键词

大跨钢结构, 分段吊装, 有限元模拟, 极限状态设计法

Stress Simulation of Lifting Stage for Large-Span Circular Steel Truss Based on ABAQUS

Mengzhao Mei¹, Xin Yao¹, Minghao Jin^{2*}, Xin Kuang², Chuanqiang Yu², Fubin Chen²

¹Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha Hunan

²School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: Jan. 18th, 2025; accepted: Feb. 12th, 2025; published: Feb. 21st, 2025

Abstract

This paper utilizes ABAQUS software, combined with an engineering example, to establish a complete finite-element model for the lifting stage of large-span steel trusses. The internal forces in elements, structural stability, hoist capacity, and structural deformation during the lifting phase are discussed

*通讯作者。

and analyzed, providing useful references for similar projects.

Keywords

Large-Span Steel Structure, Segmental Lifting and Installation, Finite Element Simulation, Limit State Design Method

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着我国经济不断发展,对于中大跨度公共建筑的需求逐渐增大,而面对跨度过大的屋盖或特殊的造型,普通钢筋混凝土已无法满足需求。钢桁架结构由于自重较轻、强度理想、施工周期短、运输方便等优点,成为了搭建大跨度屋盖的主要结构[1]。目前国内大跨度钢桁架的安装方法大致分为跨内吊装和跨外吊装两种,其中包括分段吊装高空拼接、高空散拼成形、高空滑移、整体提升、整体吊装、整体顶升等[2]。分段吊装法具有更易于操作,更加安全,节点工期能够得到保证的优点[3],但对于大跨度结构吊装,通常容易出现局部失稳、局部变形及局部破坏等问题。同时,分段吊装施工时提升段的挠度值过大将导致吊装段垂直度不满足要求,此将对合拢产生较不利影响,甚至导致分段结构难以安装或难以合拢[4]。为了保证吊装及拼装合拢阶段的安全性,对于复杂的工程结构,在施工前使用有限元数值模拟已成为必不可少的步骤之一。对于钢结构吊装施工阶段的数值模拟,国内外许多学者已对此展开了系统的研究。周云[5]等通过对某大型冰雪游乐园钢结构项目数值模拟,结合吊装及卸载阶段的应变监测,对比验证了有限元应用于钢结构吊装施工过程中的准确性,保证了吊装施工过程的安全性。王金荣[6]等对民勤文化体育中心吊装过程有限元建模,对比应变监测结果,研究了温度效应下有限元模型中荷载效应放大系数的取值范围。Chunli Zhou[7]等对攀枝花人民政府多层大跨度钢结构廊道项目运用数值模拟,验证了一种新型挠度监测方法的正确性。由此可见,对于大型空间钢结构吊装施工,提前建立有限元模型对于确保施工安全、验证结构健康监测准确性均具有重要意义。

本文结合大泽湖海归小镇研发中心(一期)项目实例,项目位于望城区滨水新城大泽湖片区,潇湘北路以东,环湖路以南,阅江路以西,雅智路以北,采用ABAQUS有限元软件建立吊装阶段非线性模型,对各工况应力、变形分析研究,为项目吊装及合拢阶段提供技术支撑,为同类项目提供参考借鉴。

2. 工程概况

本项目采用分段吊装高空拼接的安装方法,钢桁架结构为整环结构,内径24 m,外径36 m,由内环桁架和外环桁架为骨架,上下弦杆件连接内外桁架,形成一个环状立体空中走廊。根据图一左不同颜色区域,可分为三个吊装段及三个原位区,原位区吊装前已组装完成。梁柱连接主要采用刚性连接,梁梁连接采用刚性连接与铰接连接(外部刚性连接,内部铰接连接),钢材采用Q355B级钢,吊装段及吊点布置见图1右。

3. 吊装段有限元建模及分析

本文通过使用ABAQUS有限元软件,将以上三个吊装段独立建模并模拟吊装时真实受力状态,分析得到吊装时各个杆件的应力、应变及各节点挠度值。

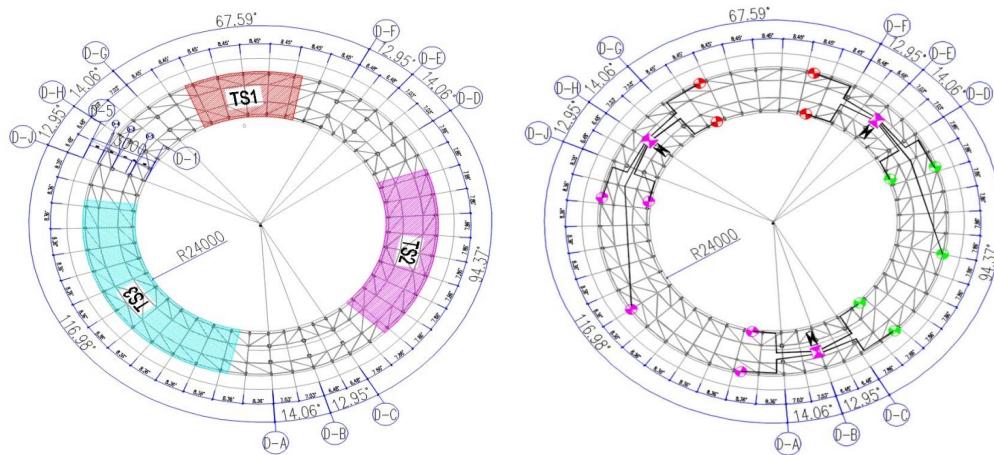


Figure 1. Schematic layout of lifting section and lifting point
图 1. 吊装段与吊点布置示意图

3.1. 建立吊装阶段有限元弹塑性本构模型

本文采用概念建模,以B31梁单元建立本构模型,材料参数取自《钢结构设计标准》GB 50017-2017 [8]标准值,网格尺寸为500 mm。考虑几何非线性、材料非线性对吊装过程影响。通过使用荷载增量法将重力场离散为1000个独立增量步,依次加载,在每个增量步计算完毕后以当前计算的刚度矩阵与节点位移作为下一个增量步的初始条件,迭代分析,以此模拟几何非线性影响;使用各向同性双线性硬化钢材本构模型,硬化斜率取 $0.01E_s$, E_s 为钢材弹性模量,来模拟材料非线性影响。因TS2与TS3自重较大,在结构重心位置(即外环跨中)增加一吊点(图1中的D202、D302),因吊点处需搭建临时塔吊,与部分杆件冲突,吊装前冲突杆件预先去除,吊装完成后再安装。

3.2. 接触设置

在ABAQUS中使用“CONNECTOR”单元将铰接的节点设定为“Hinge”连接,将刚接的节点设定为“Weld”连接。

3.3. 吊装阶段有限元应力位移计算结果

根据图2中有限元计算结果,三个吊装段中应力较大杆件均集中在吊点附近的临时斜撑处,最大应力为TS1的二号吊点临时斜撑,应力大小为49 Mpa。TS1吊装段共四个吊点,最大挠度出现在外环跨中,大小为0.9 cm,最大反力455 kN; TS2与TS3共五个吊点,最大挠度出现在内环跨中,大小分别为40、80 mm。最大反力出现在中间吊点,分别为658 kN与1020 kN。

3.4. 吊装阶段有限元结果分析

3.4.1. 概率极限状态设计法

概率极限状态设计法是一种基于概率理论为基础,用于度量结构可靠度的设计方法。按照概率极限状态设计法,结构的可靠度定义为:结构在规定时间、规定条件下完成预期功能的概率[7]。概率极限状态一般分为承载能力极限状态与正常使用极限状态。其中,承载能力极限状态用于判断结构的安全可靠度,包括构件强度、构件整体或局部稳定性等,本文以此来判断构件内力是否满足规范要求。正常使用极限状态用于判断结构是否满足正常使用要求,如混凝土裂缝、钢结构挠度等,本文以此判断各吊装段的跨中挠度是否满足规范要求。

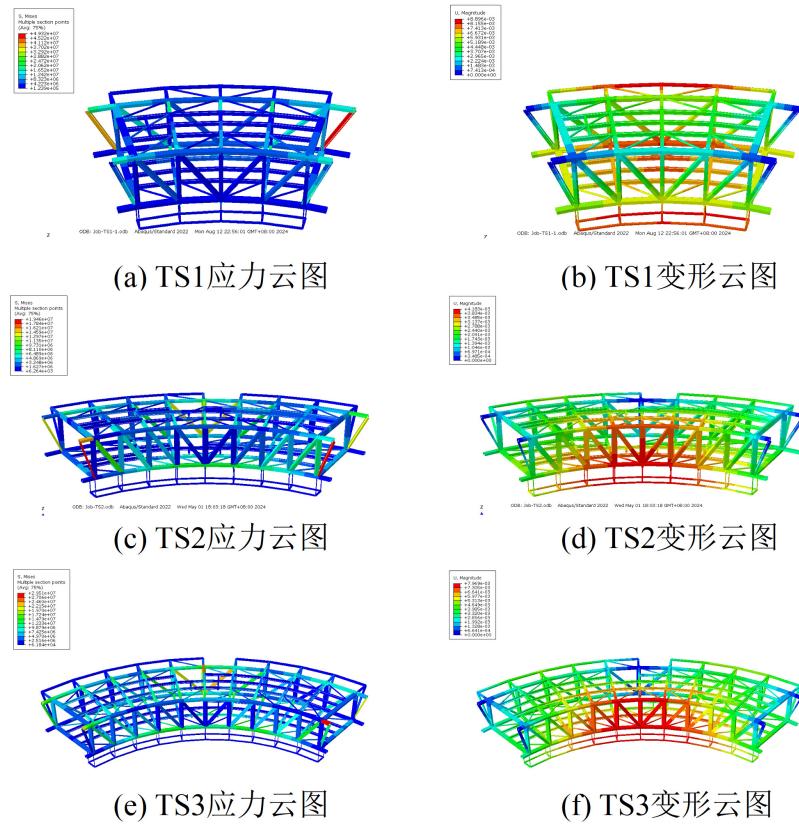


Figure 2. Finite element stress and deformation cloud
图 2. 有限元应力及变形云图

3.4.2. 承载能力极限状态设计

承载能力极限状态设计准则为结构的抗力设计值 R 不应小于荷载组合效应设计值 S ，即 $R \geq S$ [9]。当采用荷载效应的基本组合时，设计表达式可用以下公式：

$$\gamma_0 \left(\sum_{j=1}^m \gamma_{Gj} S_{Gjk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \varphi_{ci} S_{Qik} \right) \leq \frac{R_k}{\gamma_R} \quad (1)$$

1) 杆件强度分析

吊装过程中杆件所受的最大应力为 49 MPa，由施工组织设计可知本项目天空之厅及与其连接楼栋属于一级安全等级，取 $\gamma_0 = 1.1$ ；取永久荷载分项系数 $\gamma_{Gj} = 1.3$ ，取永久荷载内力值 $S_{Gjk} = 49$ MPa，因不考虑风载效应，吊装模拟过程中竖向无其他荷载。吊装段均采用 Q355B 级钢，取杆件屈服强度 $R_k = 355$ MPa，根据《钢结构设计原理》取构件抗力分项系数 $\gamma_R = 1.125$ [10]。将以上数据代入公式(1)可得：

$$1.1 \times (1.3 \times 49) = 70.07 \leq \frac{355}{1.125} = 315 \text{ MPa}$$

吊装段承载力满足要求。

2) 液压提升器承载力分析

根据钢结构施工方案，TS2 与 TS3 跨中吊点(D202, D302)使用吊具 XY-TS-315 (最大提升力 315 吨)，其余吊点使用吊具 XY-TS-195 (最大提升力 195 吨)，吊点详图见图 2。根据承载能力极限状态公式，取液压提升器安全系数 $\gamma_R = 2.0$ ，计算结果见表 1 所示。

Table 1. Hydraulic lifter load capacity results
表 1. 液压提升器承载力分析结果

	提升反力(吨)	提升器承载力(吨)	是否符合规范
TS1	46.42	97.5	是
TS2	67.14	157.5	是
TS3	148.8	157.5	是

3.4.3. 正常使用极限状态设计

对于正常使用极限状态, 应按《建筑结构可靠性设计统一标准》GB 50068 [11]的规定要求, 分别按标准组合、频遇组合和准永久组合设计, 并保证设计结果均满足要求。

钢结构正常使用极限状态设计仅需考虑荷载标准组合, 节点位移计算采用以下公式:

$$\sum_{j=1}^m v_{Gjk} + v_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \varphi_{ci} v_{Qik} \leq [v] \quad (2)$$

1) 吊装阶段结构变形分析

根据《钢结构设计标准》GB 50017-2017 [8]中非抗震组合以受弯为主的桁架结构位移容许表, 挠度允许值为1/250, 对于吊装阶段, 将吊点视为吊装段支座以计算结构跨度, 分析结果见表 2。

Table 2. Finite element displacement results of lifting stage
表 2. 吊装阶段有限元挠度计算结果

	模拟挠度(mm)	允许挠度(mm)	是否符合规范
TS1 外环跨中	9	84.8	是
TS2 外环跨中	40	105.3	是
TS3 外环跨中	80	140	是

2) 垂直度分析

根据《建筑施工起重吊装工程安全技术规范》JGJ 276-2012 [12], 复杂结构整体提升, 合拢前需保证垂直度控制在±5 mm 内。

根据有限元模型结果, 由竖向变形导致结构垂直度偏移最大角度为 0.045 度, 已知结构上下弦净跨为 4.76 m, 根据弧度公式可知偏移量为:

$$0.045 \times \frac{\pi}{180} \times 4.76 \text{ m} = 0.00373 \text{ m} = 3.73 \text{ mm} < 5 \text{ mm}$$

垂直度满足规范要求。

4. 结语

本文结合钢结构吊装施工专项方案, 在经过专业有限元数值模拟分析后, 得到以下结论, 可为海归小镇项目大跨度钢桁架吊装施工及其他类似项目提供参考:

(1) 此类大跨空间钢结构吊装项目, 因吊装合拢后一般仍需大额加载, 故吊装时杆件应力通常满足规范要求, 且冗余较多。对于跨度较大的提升段(如本文中的 TS2 与 TS3), 由于大自重及施工时节点连接处的误差累积等原因, 挠度为需着重考虑的因素, 推荐从两端向跨中预起拱, 从而避免合拢后加载时可能导致挠度过大的问题, 具体起拱值可参考《钢结构设计标准》GB 50017-2017 [8]中相关规定。

(2) 数值模拟中较大应力杆件集中在吊点附近, 临时斜撑处最大。可见在吊装施工时, 适当增加此类临时加固措施可有效缓解吊点区域的局部应力集中现象, 从而显著改善结构的受力性能。

(3) 吊装过程中杆件强度、提升器承载力、吊装段变形、结构垂直度满足规范要求, 可供类似工程借鉴。

参考文献

- [1] 邵建华, 刘宸, 王振田, 等. 大跨度屋面钢桁架吊装施工技术[J]. 四川建筑, 2024, 44(2): 219-222.
- [2] 赵王军. 浅谈 72 米大跨度钢桁架吊装施工技术应用[J]. 石油化工建设, 2021, 43(5): 51-53, 107.
- [3] 张青山, 张永坡, 刘杰. 大跨度钢桁架分段吊装施工工艺的研究[J]. 天津建设科技, 2021, 31(1): 66-68.
- [4] 邓开慧. 大跨钢结构基于精确合拢的提升优化方法与分析[J]. 建筑科学, 2024, 40(3): 32-39, 126.
- [5] 周云, 胡锦楠, 朱正荣, 等. 深坑大跨屋盖重型钢桁架结构吊装施工过程监测研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(4): 41-51.
- [6] 王金荣, 王秀丽, 荀宝龙, 等. 大型复杂体育馆钢结构吊装过程温度影响分析与现场监测研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(8): 96-101, 57.
- [7] Zhou, C., Li, X., Sun, J., Xie, B. and Wu, Y. (2019) Lift Monitoring and Analysis of Multi-Storey Corridors in Buildings. *Automation in Construction*, **106**, Article ID: 102902. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102902>
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50017-2017 钢结构设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [9] 李昌, 张曰果, 赵赤云, 主编. 钢结构设计原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 11.
- [10] 丁阳编, 著. 钢结构设计原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 2004.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50068-2018 建筑结构可靠性设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 276-2012 建筑施工起重吊装工程安全技术规范[S]. 北京: 住房和城乡建设部, 2012.