

DOI: 10.7672/sgjs2026040118

大跨度钢屋盖提升全过程模拟分析*

闫亚锋

(中铁建设集团有限公司,北京 100040)

[摘要] 大跨度钢屋盖施工具有提升质量大、结构跨度大、吊点多等技术难题,以郑州中原科技城科技创新园1号楼钢屋盖提升工程为背景,综合考虑施工质量、安全等目标,大跨度钢屋盖采用整体提升施工方案,对提升的具体过程、提升点和提升支架的布置进行了详细阐述。利用结构分析软件SAP2000对钢屋盖和提升支架进行模拟,得到钢屋盖在提升过程、预装段连接过程、卸载过程的应力及位移情况。同时在提升过程中对钢屋盖结构薄弱位置及整体薄弱节点进行实时监测,保证施工全过程安全可控。

[关键词] 钢结构;屋盖;整体提升;有限元分析;监测

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0118-05

Simulation Analysis of the Whole Process of Large-span Steel Roof Lifting

YAN Yafeng

(China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China)

Abstract: The construction of large-span steel roofs poses technical challenges such as high quality improvement, large structural span, and multiple suspension points. Taking the steel roof lifting project of Building 1 of Zhengzhou Zhongyuan Science and Technology City Science and Technology Innovation Park as the background, and considering the goals of construction quality and safety, a comprehensive lifting construction plan is adopted for large-span steel roofs. The specific process of lifting, the arrangement of lifting points and lifting brackets are elaborated in detail. Simulate the steel roof and lifting bracket using structural analysis software SAP2000, and obtain the stress and displacement of the steel roof during the lifting process, pre installation section connection process, and unloading process. At the same time, real-time monitoring is carried out on the weak positions and overall weak nodes of the steel roof structure during the lifting process to ensure the safety and controllability of the entire construction process.

Keywords: steel structures; roofs; integral lifting; finite element analysis; monitoring

1 工程概况

郑州中原科技城科技创新园项目位于郑州市金水区龙湖中环北路,总建筑面积为32.3万 m^2 ,其中地上建筑面积为194700.42 m^2 ,地库建筑面积为128364.75 m^2 ,为框架-剪力墙结构。1号楼钢屋盖平面呈长方形,局部有突出处,南北向长66.400m,东西向宽55.048m,该区域屋面钢结构总重约996t。屋面主体结构为平面钢结构,屋面钢构最上层中心线标高为39.250m,支座中心标高为37.500m。屋面钢架底层立柱为钢筋混凝土结构柱,结构柱柱顶

混凝土面标高为37.500m,屋面钢架主要支撑柱为钢立柱,钢梁截面尺寸主要为B1300 \times 300 \times 20 \times 30, H型1300 \times 300 \times 24 \times 30;钢柱截面尺寸为 \square 500 \times 500 \times 20 \times 20和 \square 500 \times 500 \times 30 \times 30。1号楼建筑效果如图1所示,现场施工如图2所示。



图1 建筑效果

Fig. 1 Building effect

* 陕西省重点研发计划(2020SF-373)

[作者简介] 闫亚锋,高级工程师,E-mail:939067950@qq.com

[收稿日期] 2025-09-25



图2 现场施工

Fig. 2 On-site construction

2 整体提升方案

2.1 提升过程

1) 根据现场结构的平面布置,在地面搭设 7.5m 高的拼装平台支架,并完成钢屋盖的整体拼装工作,起重机在可允许作业区域按规定行车路线行走,配合拼装作业。

2) 按照提升点位置安装提升支架,并与原结构混凝土柱形成有效连接。提升支架上安装液压提升器及泵源系统,在液压提升器垂直对应位置设置提升下锚点,用专用钢绞线连接上下锚点。

3) 在提升前对设备进行检查,确保提升器位置与钢屋盖提升点位垂直对应,检查钢绞线是否扭绞,各类应急措施是否符合提升要求。

4) 对液压提升器、液压泵源、同步控制系统进行整体调试,张拉钢绞线,保证吊点受力均匀。确认无误后开始试提升,依序进行 20%, 40%, 60%, 80%, 100% 分级加载,结构离地约 20cm 后,锁定提升设备,钢屋盖暂停提升并在空中静置 10h。停留期间进行全面检查,如有必要可进行微调。

5) 各方面确认正常后,正式开始提升作业,期间每间隔 8m 测量各吊点提升高度,提升过程中确保提升通道畅通。

6) 钢屋盖提升至原设计位置附近时暂停提升,如图 3 所示。对各吊点进行微调处理后,使钢屋盖缓慢提升到设计标高位置;液压提升系统设备暂停工作,复测各吊点提升高度,确保达到设计要求;将被提升的钢屋盖与预装段进行焊接,使提升单元结构形成整体稳定受力体系。

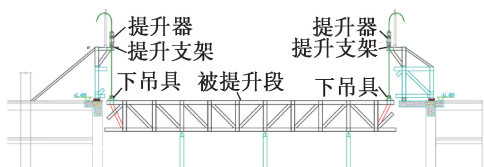


图3 钢屋盖提升

Fig. 3 Lifting of steel roof cover

7) 逐步分级卸载并逐个安装吊点位置处后补杆件,直到所有提升架全部拆除,钢屋盖与主体结构按设计要求完全连接成整体,结构安装完成。

2.2 提升点布置

提升点布置既要兼顾提升结构的安全性,又要保证体系转换与设计状态一致。因此,尽量选取混凝土柱顶部附近区域作为提升吊点,使结构在提升过程中受力均匀,确保钢屋盖平稳上升。本工程共采用 13 个提升点进行整体提升,分别为 D1~D13,具体布置如图 4 所示。

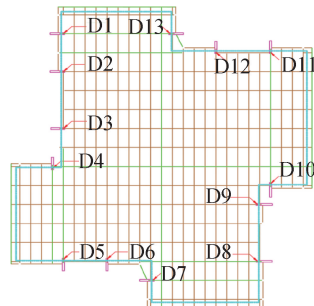


图4 提升点布置

Fig. 4 Arrangement of lifting points

2.3 提升支架设置

在整体提升施工方案中,提升支架的设置直接关系到整个区段能否顺利对接以及现场操作的安全性和可靠性。待提升的钢屋盖桁架需与原结构钢柱顶部相连接,为了能够将钢屋盖桁架提升到设计位置,需在原结构钢柱上部设置提升支架。提升支架也为液压提升提供了工作平台,同时将荷载传递到钢柱。提升支架由后拉杆、立柱、斜撑和提升梁组成,后拉杆规格为 H300×300×10×15,立柱、斜撑和提升梁规格为 □350×350×14×14,其中提升梁均采用箱型结构制作,提升支架材质为 Q355B,如图 5 所示。

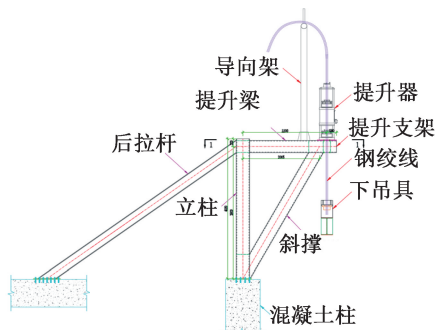


图5 提升支架结构形式

Fig. 5 Structural form of lifting bracket

3 钢屋盖提升全过程模拟分析

钢屋盖在提升过程中,杆件存在二次受力状态,与设计时考虑的受力状态差异较大,在施工中可能存在安全隐患。为了确保钢屋盖在提升过程中的安全性和稳定性,依照钢屋盖的结构设计尺

寸,利用结构分析软件 SAP2000 对钢屋盖和提升支架进行全过程模拟分析,对钢屋盖和提升支架的竖向位移和应力比进行验算。模拟得到的提升吊点反力也为后续提升设备的选型和配置提供数据。

3.1 钢屋盖模型建立

采用结构分析软件 SAP2000 模拟钢屋盖在整体提升过程中结构的受力反应、变形及稳定性。数值模型中网格节点均为刚接,杆件均采用梁单元模拟。在提升过程中,提升点只受到竖直向上的提升力,因此,对提升点设置 z 向固定约束, x,y 向施加刚度无限小的弹簧约束。钢梁和钢柱材质均为 Q420B。计算得出的有限元模型与现场施工基本一致,钢屋盖有限元模型如图 6 所示。

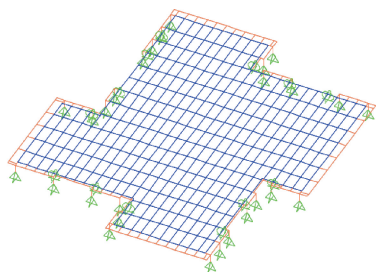


图 6 钢屋盖验算模型

Fig. 6 Calculation model of steel roof cover

3.2 钢屋盖提升全过程模拟分析

3.2.1 提升过程模拟

本工程钢屋盖结构最大跨度 $L = 66\ 400\text{mm}$,提升吊点处的边界条件设置为 z 向固定约束, x 向和 y 向采用弹簧约束。自重为永久荷载 dead ,荷载组合为 $1.3 \times \text{dead}, 1 \times \text{dead}$ 。提升过程竖向位移云图如图 7 所示。钢屋盖结构在提升过程的最大的竖向位移为 106.1mm ,小于 $L/400 = 166\text{mm}$ 。结构的最大应力比为 0.538 ,小于应力比限值 1 ,验算结果表明钢屋盖在提升过程中的结构强度以及稳定性满足施工要求。

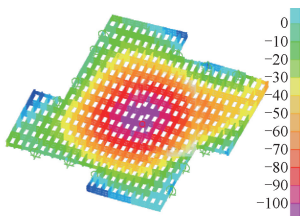


图 7 钢屋盖提升竖向位移(单位:mm)

Fig. 7 Vertical displacement of steel roof lifting(unit:mm)

钢屋盖整体提升过程中,对异形部分增设临时加固构件,旨在补偿其因几何突变导致的局部刚度不足和应力集中现象,防止提升过程中发生屈曲或

塑性变形,确保结构整体稳定性与同步提升精度。钢屋盖临时加固如图 8 所示,图中蓝色杆件为钢屋盖桁架,红色杆件为临时加固杆件,材质为 Q420B,规格为 $H500 \times 300 \times 11 \times 18$ 。

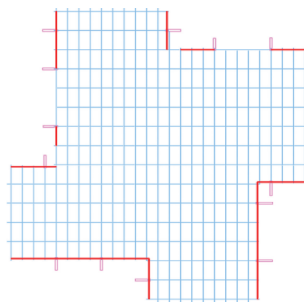


图 8 钢屋盖临时加固

Fig. 8 Temporary reinforcement of steel roof cover

临时加固杆件应力比云图如图 9 所示,由图 9 可知,加固临时杆件的最大应力比为 0.73 ,小于应力比限值 1 。验算结果表明钢屋盖在提升过程中加固临时杆件满足施工要求。

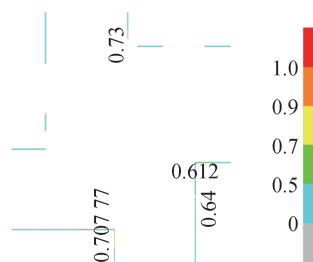


图 9 临时加固杆件应力比云图

Fig. 9 Stress ratio cloud map of temporary reinforcement bar

3.2.2 钢屋盖与预装段连接过程模拟

钢屋盖被提升至设计位置后,需与原结构预装段进行焊接。边界条件从仅提升点受力的悬吊状态转变为提升点主导、接触点局部受压的混合约束状态。自重为永久荷载 dead ,钢屋盖与预装段连接的竖向位移云图如图 10 所示。由图 10 可知,结构最大竖向位移为 104.84mm ,小于 $L/400 = 166\text{mm}$,验算结果表明钢屋盖在与预装段连接过程中结构强度满足施工要求。

3.2.3 钢屋盖卸载过程模拟

卸载过程中,随着临时支撑体系依次拆除,钢屋盖结构的受力状态会发生变化,卸载过程中的竖向位移云图如图 11 所示。钢屋盖结构在卸载过程中,结构最大的竖向位移为 115.13mm ,小于 $L/400 = 166\text{mm}$,验算结果表明钢屋盖结构在卸载过程中结构强度满足施工要求。

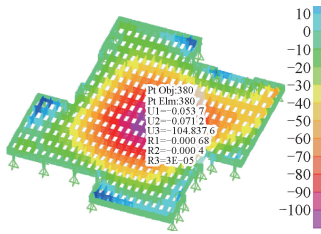


图 10 钢屋盖与预装段连接竖向位移云图(单位:mm)
Fig. 10 Vertical displacement cloud map of the steel roof structure connected to the pre-installed section(unit :mm)

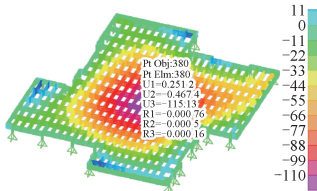


图 11 钢屋盖卸载竖向位移云图(单位:mm)
Fig. 11 Vertical displacement cloud map of steel roof unloading(unit :mm)

3.3 提升支架模拟分析

提升支架作为承重结构,需保证其在提升过程中的稳定性。通过数值模拟分析可以发现提升支架在施工过程中可能出现的问题,从而提前优化设计。提升支架最大下挠吊点悬挑距离 H 为 2 200mm,材质为 Q355B。SAP2000 建立提升支架结构模型,支座均采用刚接,取自重为永久荷载 dead,集中荷载为可变荷载 live,提升吊点反力值及其值的 5% 作为水平风荷载,荷载组合取 $1.3 \times \text{dead} + 1.5 \times \text{live}$, $1 \times \text{dead} + 1 \times \text{live}$,提升支架验算模型如图 12 所示。

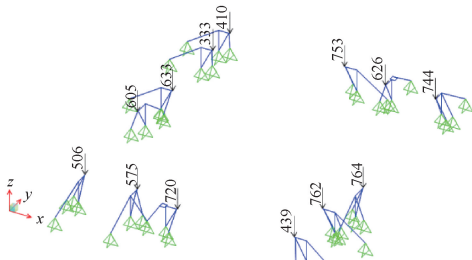


图 12 提升支架吊点反力(单位:kN)
Fig. 12 Lifting point reaction force lifting bracket (unit :kN)

由分析结果可知提升支架最大竖向位移为 4.9mm,小于 $H/400 = 5.5\text{mm}$;结构的最大应力比为 0.591,小于应力比限值 1。验算结果表明提升支架结构强度以及稳定性满足施工要求,提升支架竖向位移云图、应力比云图如图 13 所示。

3.4 提升设备配置

由钢屋盖提升过程模拟的分析结果可得各个

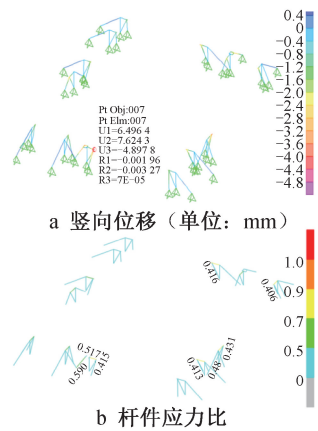


图 13 提升支架验算结果
Fig. 13 Calculation results of lifting bracket

提升点的吊点反力,吊点反力最大处为吊点 D10,约为 764kN。根据各提升点的吊点反力选择对应的提升设备以及钢绞线,主要配置 TJJ-600 型和 TJJ-1100 型液压提升器、TJV-30 型液压泵源系统、YT-6 型计算机同步控制系统。TJJ-600 型液压提升器额定提升能力为 600kN, TJJ-1100 型液压提升器额定提升能力为 1 100kN,钢绞线为 $\phi 15.2$,单根钢绞线破断力为 260kN。最终拟配置的液压提升器的最小安全系数为 1.37,单台液压提升器内钢绞线的最小安全系数为 3.4。提升器及钢绞线配置如表 1 所示。

表 1 提升器及钢绞线配置

Table 1 Lifter and steel strand configuration					
吊点编号	吊点反力/kN	提升器型号	钢绞线数量/根	提升器安全系数	钢绞线安全系数
D1	410	TJJ-600	6	1.46	3.80
D2	333	TJJ-600	5	1.80	3.90
D3	633	TJJ-1100	9	1.74	3.70
D4	605	TJJ-1100	8	1.82	3.44
D5	506	TJJ-1100	7	2.17	3.60
D6	575	TJJ-1100	8	1.91	3.62
D7	720	TJJ-1100	10	1.53	3.61
D8	439	TJJ-600	6	1.37	3.55
D9	762	TJJ-1100	10	1.44	3.41
D10	764	TJJ-1100	10	1.44	3.40
D11	744	TJJ-1100	10	1.48	3.49
D12	626	TJJ-1100	9	1.76	3.74
D13	753	TJJ-1100	10	1.46	3.45

4 施工监测

对钢屋盖结构的薄弱位置和整体薄弱节点进行实时监测,监测内容包括钢屋盖和提升支架的应力、竖向位移监测。选择合适的监测点位和应变片数量,监测点尽可能布置在应力和变形较大处,同时避免施工环境干扰。钢屋盖应力监测点设置在每个提升吊点处,钢屋盖竖向位移监测点设置在钢屋盖中心处,提升支架监测点设置在其端部。在钢

屋盖提升前,获取了各监测点的初始数据,并在脱胎、提升过程中、提升至设计标高等时间节点采集数据,及时测算各个监测点的应力以及竖向位移的变化。

钢屋盖应力监测预警值按照 Q420B 最大屈服应力的 75% 进行验算,竖向位移监测预警值按照模拟得出的竖向位移最大值 106.1mm 进行验算;提升支架应力监测预警值按照 Q335B 最大屈服应力的 75% 进行验算,竖向位移监测预警值按照模拟得出的竖向位移最大值 4.9mm 进行验算。

5 结语

本文依托郑州中原科技城科技创新园 1 号楼钢屋盖提升工程,采用整体提升方案,对提升过程、提升点和提升支架的设置进行了阐述。利用结构分析软件 SAP2000 建立有限元模型进行提升全过程模拟,分析结果表明钢屋盖和提升支架的应力分布以及位移变化均在安全范围内,为现场施工提供了理论依据。同时,在提升过程中对钢屋盖结构薄弱位置及整体薄弱节点进行实时监测,保证施工过程的安全。

参考文献:

- [1] 苏杭,王静峰,丁仕洪,等.基于云监测的大跨度空间异形曲面钢桁架结构多点不对称整体提升技术研究[J].工业建筑,2020,50(8):105-115.
SU H, WANG J F, DING S H, et al. Research on multi-point asymmetric overall lifting technique for long-span space special-shaped curved steel truss structure based on cloud monitoring [J]. Industrial construction, 2020, 50(8): 105-115.
- [2] 吴铭昊.某大厦钢结构连廊施工过程仿真分析及监测[J].福建建设科技,2021(4):25-28.
WU M H. Construction numerical simulation and monitoring of steel gallery of a certian building[J]. Fujian construction science & technology, 2021(4): 25-28.
- [3] 刘文超,张克胜,郭振志,等.大跨度钢结构连廊液压整体提升动态监测试验技术研究[J].建筑结构,2021,51(S1):2265-2268.
LIU W C, ZHANG K S, GUO Z Z, et al. Study on dynamic monitoring test technology of hydraulic integral lifting of long-span steel structure corridor [J]. Building structure, 2021, 51(S1): 2265-2268.
- [4] 黄仲辉.某大跨度空间钢桁架施工全过程模拟分析及监测研究[J].福建建筑,2021(11):97-101.
HUANG Z H. Research on simulation analysis and monitoring of the whole construction process of a long-span spatial steel truss [J]. Fujian architecture & construction, 2021(11): 97-101.
- [5] 谢貽军,吴帅,张海涛,等.大跨度异形钢屋盖施工关键技术[J].施工技术(中英文),2025,54(14):29-34.
XIE Y J, WU S, ZHANG H T, et al. Key construction technology of large-span special-shaped steel roof [J]. Construction technology, 2025, 54(14): 29-34.
- [6] 赵通.大跨度正交索网屋盖结构施工技术及受力分析[J].施工技术(中英文),2025,54(8):17-22.
ZHAO T. Construction technology and stress analysis of large-span orthogonal cable net roof structure [J]. Construction technology, 2025, 54(8): 17-22.
- [7] 范立军,粮学斌,范春生,等.高铁站房大跨度屋盖钢结构整体提升数值模拟及施工安全监测[J].厦门大学学报(自然科学版),2023,62(4):719-724.
FAN L J, LANG X B, FAN C S, et al. Simulation and construction safety monitoring of station building with long-span steel roof during integral lifting [J]. Journal of Xiamen University (natural science), 2023, 62(4): 719-724.
- [8] 张文津,王康,刘贵文,等.大跨度钢屋盖轮辐式索桁架结构施工方法与数值模拟[J].施工技术(中英文),2024,53(8):8-12.
ZHANG W J, WANG K, LIU G W, et al. Construction technology and numerical simulation of wheel-spoke cable truss structure for large-span steel roof [J]. Construction technology, 2024, 53(8): 8-12.
- [9] 王其良,周凌宇,石敬州,等.大跨度钢网壳快速整体提升方法研究及防连续倒塌分析[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(2):538-549.
WANG Q L, ZHOU L Y, SHI J Z, et al. Rapid whole lifting method and analysis of continuous collapse prevention for long span steel mesh shell [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2024, 55(2): 538-549.
- [10] 陈伟,贺子奇,张花杰,等.桁架屋盖整体提升关键施工技术分析[J].河南大学学报(自然科学版),2024,54(5):600-609.
CHEN W, HE Z Q, ZHANG H J, et al. Analysis of key construction techniques for integral lifting of truss roof [J]. Journal of Henan University (natural science), 2024, 54(5): 600-609.
- [11] 焦国民,蒋翰林,冯若强,等.苏州阳澄湖大酒店大跨度连廊整体提升施工仿真与监测[J].空间结构,2024,30(1):79-86.
JIAO G M, JIANG H L, FENG R Q, et al. Numerical simulation and monitoring of overall lifting of the long-span connecting corridor in Suzhou Yangcheng Lake Hotel [J]. Spatial structures, 2024, 30(1): 79-86.