

# 大跨空间网格结构旋转提升施工数值分析

戴俊辉<sup>1\*</sup>, 童宇超<sup>2</sup>, 邹海涛<sup>2</sup>, 姚绪辉<sup>2</sup>, 吕燕霞<sup>1</sup>

(1. 浙江工业职业技术学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 中铁建工集团有限公司, 北京 100160)

**摘要:** 将旋转提升施工技术应用于大跨空间网格结构施工中,可大幅降低拼装胎架的高度和高空作业工作量。本文对某大跨空间网格结构的旋转提升施工全过程进行数值模拟,并通过建立拼装胎架用量的函数对旋转角度进行优化分析,采用反分析法确定结构最终的拼装位形;分析了被提升结构脱胎后在空中旋转提升至设计位形以及整体提升至设计标高的施工全过程;最终得到旋转提升过程各阶段钢绞线索力与结构位移,该数值分析结果与实测值基本一致。研究表明,通过反分析法确定结构拼装位形,可有效避免脱胎时被提升结构的刚体位移;本文提出的数值分析方法可以准确地模拟屋盖钢结构旋转提升施工全过程,数值模拟方法得到的结构全过程的受力及变形值与施工实测值基本一致,对实际工程的精细化分析和施工精度控制具有指导意义。

**关键词:** 空间网格结构; 旋转提升; 旋转角度优化; 反分析法; 全过程分析; 数值模拟

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0100-08

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240311001

## Numerical Analysis of Rotational Lifting Construction for Long-Span Spatial Reticulated Structures

DAI Junhui<sup>1\*</sup>, TONG Yuchao<sup>2</sup>, ZOU Haitao<sup>2</sup>, YAO Xuhui<sup>2</sup>, LYU Yanxia<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China;

2. China Railway Construction Engineering Group, Beijing 100160, China)

\*Corresponding author: 18057528906@163.com

**Abstract:** The application of rotational lifting construction technology in the construction of long-span spatial reticulated structures can significantly reduce the height of assembly jigs and the workload of high-altitude operations. This paper conducts numerical simulations of the entire process of rotational lifting construction for a long-span spatial reticulated structure. By establishing a function for the quantity of jigs, optimization analysis of the rotation angle is performed, and the final assembly configuration of the structure is determined using the reverse analysis method. The entire construction process, including the detachment of the lifted structure from the jigs, its rotational lifting into the designed posture in the air, and its overall lifting to the designed elevation, is analyzed. The cable forces and structural displacements of the steel strand at various stages of the rotational lifting process are obtained, and the measured values are basically consistent with the numerical analysis results. The research shows that determining the structure's assembly configuration through the reverse analysis method can effectively avoid rigid body displacement of the lifted structure during detachment. The numerical analysis method proposed in this paper can accurately simulate the entire process of rotational lifting construction for roof steel structures. The force and deformation values of the structure

收稿日期: 2024-03-11

作者简介:

戴俊辉(1987—),男,硕士,讲师,主要从事钢结构抗震性能设计、智能监测技术及绿色建造方面的研究。

E-mail: 18057528906@163.com。(通信作者)

童宇超(1996—),男,硕士研究生,主要从事BIM技术应用及智能建造方面的研究。

throughout the process obtained by the numerical simulation method are consistent with the actual measured values during construction, providing practical guidance for the refined analysis and construction accuracy control of actual projects.

**Keywords:** spatial reticulated structure; rotational lifting; rotation angle optimization; reverse analysis method; full-process analysis; numerical simulation

随着数字化设计技术的发展,建筑设计师设计了大量造型美观、形式新颖、具有艺术表现力的大跨自由曲面网格结构,并在大型高铁站房屋盖中得到应用。自由曲面钢屋盖结构往往具有构件数量多、跨度大、标高起伏大、空间位置复杂多变和对现场安装精度要求较高的特点<sup>[1]</sup>,这为结构施工带来了挑战。

目前,空间结构施工技术与施工力学分析方面的研究与应用已取得了一定的进展<sup>[2-7]</sup>。液压提升施工技术大量的空间项目上得到应用,如首都国际机场A380机库屋盖<sup>[8]</sup>、广州新白云国际机场维修机库钢屋盖<sup>[9]</sup>、广州新白云国际机场维护车库<sup>[10]</sup>以及澳门综合体育馆<sup>[11]</sup>等。对于结构标高起伏大的钢屋盖结构,为减少拼装胎架的用量,部分工程采用了旋转提升施工技术,选择胎架用量少的结构位形进行拼装,结构脱胎后在空中旋转至设计位形,最终整体提升至设计位形,如青岛新机场T1航站楼<sup>[12]</sup>、海南会展中心和上海体育中心比赛馆等。

整体提升技术已相当成熟,旋转提升也在多个实际工程中得到应用,但关于旋转提升的数值分析方法还不完善。常用的分析方法为将整个旋转提升过程分为多个子步骤,再分别进行独立的静态分析。这种计算方法未考虑变形和内力的累积以及提升过程中变形与内力的动态连续变化,无法精确指导现场实际操作<sup>[13]</sup>。

本文针对国内某大型钢屋盖结构的旋转提升施工,进行了全过程分析的数值模拟。通过建立胎架用量函数对被提升结构拼装位形的旋转角度进行优化,得到拼装胎架用量最少时对应的旋转角度;通过反分析法确定结构最终的拼装位形,有效避免脱胎时结构出现刚体位移;最后以拼装位形为起始态进行旋转提升分析,通过给提升钢绞线施加数值不同的温度作用模拟结构旋转提升过程。该分析方法可以获取旋转提升过程中任意时刻的钢绞线索力和结构位形,精确指导现场施工。

## 1 旋转提升施工方法

### 1.1 旋转提升的概念

旋转提升施工如图1所示,首先将下弦层整体倾斜布置的空间网格结构“旋转放平”作为拼装位形,使得结构拼装高度降低,减少临时措施用量和拼装机机械型号;拼装完成后再通过对不同位置吊点的液压提升器施加不同的提升速率,使得被提升结构发生旋转,结构位形旋转至与设计位形一致后将各吊点调整为同一提升速率,结构

被整体提升至设计标高。

各下吊点在设计位形下的纵坐标为 $Z_{01} \sim Z_{0n}$ ,拼装位形下的纵坐标为 $Z_{11} \sim Z_{1n}$ 。定义旋转阶段各吊点提升行程为 $D_i = Z_{0i} - Z_{1i} (i=1 \sim n)$ ,最大提升行程 $D_{\max} = \max\{Z_{0i} - Z_{1i}\}$ ,对应的提升速率设为 $V_b$ ,则其余吊点对应的提升速率为:

$$V_i = \frac{V_b D_i}{D_{\max}} \quad (1)$$

将各吊点对应的提升速率及单位行程输入液压计算控制系统,通过多吊点不同速率提升,实现被提升结构的旋转提升。

### 1.2 旋转角度优化

旋转提升主要目的在于降低拼装高度,从而减少施工措施投入,结构拼装位形的优化分析是一大重点。拼装位形的优化主要是确定旋转角度,本文通过建立胎架用量函数进行优化计算。

将旋转提升区域结构下弦球竖向标高最低的点作为旋转点,设旋转点为原点O,胎架支撑点为O, A, B, C, ..., 其距地面的高度为 $h_j (j=1, 2, 3, \dots, n)$ 。满足拼装施工要求的胎架最小高度为 $h_{\min}$ ,假定结构的拼装状态为: $h_1 = h_n = h_{\min}$ ,此时,由于结构整体造型为自由曲面,存在部分下弦球拼装胎架高度 $h_i (1 < i < n) < h_{\min}$ 。有两种方式可以解决此问题:

(1) 结构竖直向上平动,使所有下弦球拼装胎架满足最小高度要求;

(2) 结构绕原点O旋转,设旋转角度为:

$$\theta = \arcsin \frac{h_{\min} - h_{i, \min}}{L} \quad (2)$$

$L$ 为拼装胎架高度最小点与原点O连线的水平投影长度。

胎架用量的最优解为两种方法的耦合,建立胎架用量函数:

$$C_{\text{ost}} = \sum_{1 < j < n}^j h_j(x, \theta) \quad (3)$$

求解函数最小值即可得到胎架用量最省的旋转角度。得到旋转角度后,采用反分析法使被提升结构由设计位形 $S_0$ 绕旋转点O旋转 $\theta$ 角度,即得到胎架用量最少的拼装位形 $S_c$ 。

### 1.3 旋转提升施工

在被提升结构拼装位形 $S_c$ 确定之后,进行深化设计

并建立BIM模型。BIM模型包括土建结构、拼装阶段被提升结构、提升系统、临时措施及已安装的钢结构;提升系统包括提升架、液压提升器和临时支撑体系。采用BIM进行旋转提升的可视化模拟,分析旋转提升过程中与既有结构和临时措施发生碰撞的结构杆件,这部分杆件作为后补杆,在结构提升就位后安装。

现场按照拼装位形 $S_e$ 进行拼装,并安装临时措施和提升系统;提升系统调试完成之后,结构整体提升至一定高度完成脱胎,高度需保证旋转提升过程中结构不与拼装胎架发生碰撞。结构静置24 h后开始旋转提升,通过程序控制不同提升吊点以不同的提升速率 $V_i$ 进行提升,过程中采用三维扫描仪或全站仪进行位形监测,必要时对关键杆件进行应力应变监测,当结构旋转至设计位形 $S_0$ 时停止提升。确认结构位形和提升吊点反力与理论的偏差在合理范围内,将各吊点调整为同一提升速率,把结构整体提升至设计标高,之后完成补杆和卸载,结构施工完成。

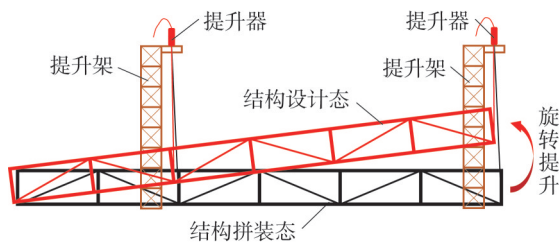


图1 旋转提升施工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rotating lifting construction

## 2 旋转提升施工全过程分析

### 2.1 有限元模型

以某大跨屋盖钢结构模型为例进行旋转提升施工数值分析,屋盖模型如图2所示,平面尺寸为123 m×147 m,屋盖标高为44.94 m~55.95 m,主要选用Q355B钢。采用斜放四角锥网架和桁架,结构整体沿四周向中央区域向上倾斜布置,下弦最大高差达8 m。选用旋转提升施工方法,可节省拼装胎架约230 t。考虑结构的对称性,计算时仅取屋盖的四分之一模型进行分析。

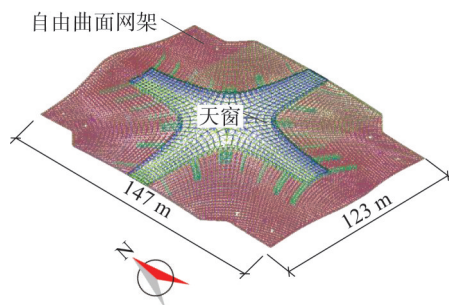


图2 屋盖模型

Fig. 2 Roof model

采用有限元分析软件ANSYS,通过APDL二次开发,完成被提升结构旋转提升施工全过程分析。分析模型由钢屋盖结构、提升架、胎架和提升钢绞线组成,屋盖杆件和提升架采用梁单元Beam188模拟,钢绞线和胎架采用杆单元Link10模拟,提升架立杆采用刚接边界条件,计算时考虑几何非线性。

在有限元分析模型中,构件材料属性如下:

(1) 屋盖结构和提升架采用Q355B钢,且为理想弹性体,各杆件的截面按照设计图纸和施工方案确定。

(2) 钢绞线的弹性模量设为160 GPa,取为理想弹性体,截面积由施工单位提供。

在对拼装位形反分析时,模型处于设计位形 $S_0$ ,对不同索单元施加不同的温度作用,控制各吊点的运动速率,实现结构的“旋转放平”,从而获得结构最终的拼装位形 $S_e$ ,结构的旋转角度 $\theta$ 通过胎架用量函数求解。拼装位形反分析的有限元模型如图3所示。

结构旋转提升过程同样通过给索单元施加降温的方式来实现,从而获取提升全过程索力、结构变形和杆件应力等数据<sup>[14-16]</sup>。模型初始位形为拼装位形 $S_e$ ,约束临时提升架立杆和拼装胎架下节点的所有自由度。为避免数值分析时结构发生刚体位移而出现不收敛,在模型外侧设置虚约束,虚约束采用弹簧单元Combin14模拟<sup>[16-17]</sup>。虚约束的主要目的是避免结构出现刚体位移,因此,需要约束被提升结构水平面内的平动及扭转,至少要在3个点设置虚约束,且3个虚约束不得交于一点,从而约束结构平面内的扭转。为避免计算结果失真,虚约束的弹簧刚度应尽可能小,可取 $1 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。旋转提升分析的有限元模型如图4所示。

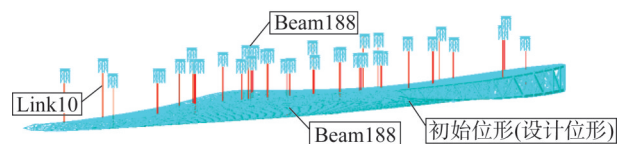


图3 反分析计算模型

Fig. 3 Reverse analysis calculation model

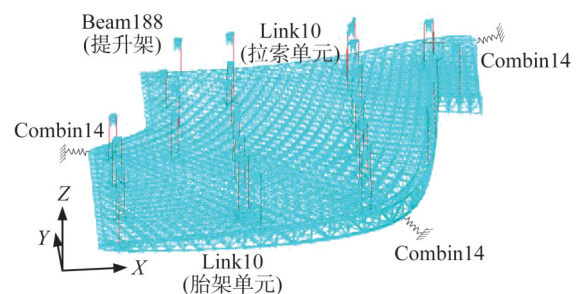


图4 旋转提升分析模型

Fig. 4 Rotating lifting analysis model

## 2.2 拼装位形反分析

通过胎架用量函数求解出旋转角度 $\theta$ 后,即可得到结构拼装阶段下弦点的纵坐标。在设置提升吊点时,以整体提升阶段钢绞线铅垂为原则,所以在拼装阶段钢绞线需与铅锤方向呈一定夹角,根据提升设备要求,此夹角需小于 $2^\circ$ 。此时被提升结构在钢绞线索力的水平分力作用下可能出现刚体位移,存在与拼装胎架和既有结构碰撞的风险。所以还需确定拼装阶段结构下弦点的水平坐标,使得结构脱胎时处于静力平衡状态,避免产生刚体位移。

寻找不出现刚体位移的拼装位形的过程,实际就是在已知边界条件和结构初始位形的前提下,求解脱胎阶段平衡状态的过程。本文以被提升结构的设计位形 $S_0$ 作为分析的初始位形,通过给钢绞线施加温度作用 $\Delta T_i$ 来实现结构的旋转, $\Delta T_i$ 的计算公式为:

$$\Delta T_i = \frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{D_i}{\alpha} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon$ 为钢绞线的形变, $\alpha$ 为钢绞线的线膨胀系数。

采用ANSYS进行迭代计算,第一次计算完成后,提取下吊点竖向坐标 $Z_i$ ,下吊点计算竖向坐标 $Z_i$ 与设计位形下节点理论竖向坐标 $Z_{li}$ 的差值 $\Delta Z = \max\{Z_i - Z_{li}\}$ ,当 $\Delta Z$ 大于5 mm时,重新调整温度值:

$$\Delta T_i' = \Delta T_i + \frac{\Delta z}{\alpha} \quad (5)$$

重新对钢绞线施加温度作用 $\Delta T_i'$ ,进行迭代计算,直到竖向坐标差值 $\Delta Z$ 不大于5 mm时停止迭代,此时的结构计算位形即为最终的拼装位形 $S_c$ 。

## 2.3 旋转提升分析

将屋盖旋转提升施工分为5个阶段:①准备提升。结构楼面拼装完成,安装提升设施,此时屋盖自重全部由拼装胎架承担;②结构脱胎。预提升完成后先整体提升 $H$ 高度以避免旋转过程中屋盖与胎架碰撞,此时屋盖自重逐渐转换为由钢绞线承担;③屋盖旋转提升。通过对提升吊索施加不同的降温值来实现结构的旋转,结构旋转 $\theta$ 角度至设计位形时停止;④结构整体提升。结构旋转至设计位形后,对钢绞线施加相同的温度作用,使结构整体提升至设计标高;⑤安装完成。结构提升至设计标高后安装后补杆、卸载,结构施工完成。

本文以2.2节中求解得到的结构拼装位形 $S_c$ 作为分析的初始位形,给钢绞线施加负的温度作用 $\Delta T_{ei}$ 实现结构的旋转提升, $\Delta T_{ei}$ 的计算公式为:

$$\Delta T_{ei} = \frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{-D_i}{\alpha} \quad (6)$$

采用ANSYS进行迭代计算,由于各钢绞线施加的温度作用不同,结构绕1.2节求解的旋转点进行旋转。第

一次计算完成后,提取下吊点坐标 $Z_{ei}$ ,下吊点计算坐标 $Z_{ei}$ 与理论 $Z_{oi}$ 差值 $\Delta Z_e = \max\{Z_{ei} - Z_{oi}\}$ ,当 $\Delta Z$ 大于2 mm时,调整温度值

$$\Delta T_{ei}' = \Delta T_{ei} + \frac{\Delta z_e}{\alpha} \quad (7)$$

重新对钢绞线施加温度作用 $\Delta T_{ei}'$ ,进行迭代计算,直到 $\Delta Z_e$ 不大于2 mm时停止迭代,认为结构旋转至设计位形。

经计算,结构的旋转角度为 $4^\circ$ 。将旋转提升过程分为8个步骤,即每旋转 $0.5^\circ$ 为一个施工步,来提取索力、位移和杆件应力等数据。施工步设置如表1所示。

表1 旋转提升施工步骤

Table 1 Rotating lifting construction steps

施工阶段	施工内容
1	结构拼装完成
2	结构脱胎
3	旋转 $0.5^\circ$
4	旋转 $1^\circ$
5	旋转 $1.5^\circ$
6	旋转 $2^\circ$
7	旋转 $2.5^\circ$
8	旋转 $3^\circ$
9	旋转 $3.5^\circ$
10	旋转 $4^\circ$ 至设计位形

旋转提升施工过程中不仅要控制索力,还需严格控制结构位形,理论上,对于连续移动的结构,每一个位形都对应着唯一的索力,即“力”与“形”的一一对应。通过数值迭代法进行全过程分析,细化施工步从而获取各步骤的钢绞线索力和结构位移,当施工步划分的足够多时即可保证计算的精度。提取节点位移与索力数据,与现场监测数据实时对比,及时对数据偏差较大的情况进行处理,保证结构顺利旋转至设计位形。

## 3 结果分析

按照上述方法进行屋盖的旋转提升全过程数值模拟,以反分析法确定的拼装位形作为数值模拟初始态进行分析,图5给出了结构脱胎阶段水平位移云图。从图中可以看出,结构最大水平位移仅11.8 mm,未出现刚体位移,虚约束反力最大为0.1 kN,表明结构处于自然的重力平衡状态,与实际情况吻合。在钢绞线降温、结构逐渐脱离胎架的过程中,屋盖不会出现刚体位移,图5中所示水平位移主要由结构自身变形引起。在钢绞线水平分力作用下,提升架水平位移小于5.0 mm,表明提升架抗侧

刚度较大,其变形满足施工精度要求。

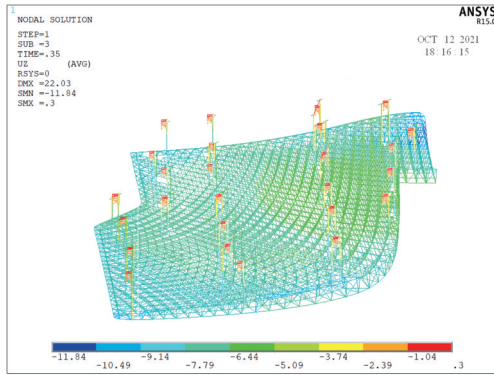
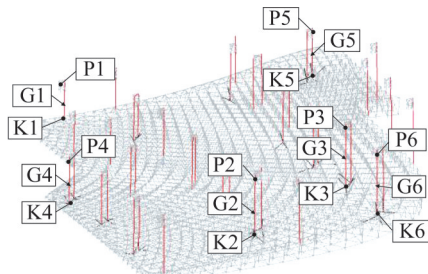


图5 钢屋盖脱胎后的水平位移(单位:mm)

Fig. 5 Horizontal displacement of steel roof after detachment (unit:mm)

结构脱胎后逐步旋转至设计位形,钢绞线与吊点编号如图6所示。图7给出了结构拼装完成到旋转至设计位形的钢绞线索力变化曲线。从图7中可以看出,在拼装完成阶段屋盖自重全部由胎架承担,钢绞线仅承担索体自重,索力很小;随着结构脱胎,结构自重逐渐由钢绞线承担,索力增加;当屋盖完全脱离胎架后进入旋转提升阶段,结构东南角位置G6钢绞线索力最大,约1 147.0 kN,其原因是结构厚度沿倾斜方向逐渐增加,东南角为结构厚度和重量分布最大的区域。



G-钢绞线编号 P-上吊点编号 K-下吊点编号

图6 钢绞线与吊点编号

Fig. 6 Steel strand and lifting point numbers

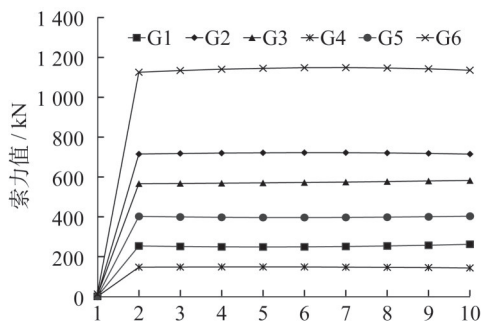


图7 旋转提升过程中钢绞线的索力

Fig. 7 Cable force of steel strand during rotation lifting process

为研究旋转提升过程中钢绞线索力和结构位移变化规律,从8个子步骤中提取旋转过程中的部分索力数据和下吊点位移。表2选取了旋转提升阶段中6根钢绞线索力进行统计,从表中可以看出,旋转过程中索力均出现不同程度的变化。这是由于屋盖角度的不断变化导致内力重分布,但总体变化幅度较小,最大变化幅度约5.1%,出现在屋盖西北角G1钢绞线位置。通过液压千斤顶油压表读数,可换算得到对应位置钢绞线的索力。实测索力与计算索力最大偏差为5.9%,出现在G5钢绞线第8个施工步(旋转3°);结构旋转4°至设计位形时,钢绞线索力最大偏差仅-3.7%。由此可知,旋转提升施工数值分析结果准确度较高,分析参数设置合理,分析方法适用于空间网格结构旋转提升施工分析。

表2 钢绞线索力计算值与实测值比较

Table 2 Comparison between calculated and measured cable force of steel strand

施工步	钢绞线索力/kN					
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
1 计算	254	714	566	148	402	1 124
2 实测	261	707	556	143	411	1 143
误差	-2.6%	1.0%	1.8%	3.6%	-2.2%	-1.7%
3 计算	251	717	567	149	399	1 132
3 实测	255	737	584	141	418	1 115
误差	-1.4%	-2.7%	-2.9%	5.5%	-4.4%	1.5%
4 计算	250	719	568	149	398	1 139
4 实测	246	703	553	157	412	1 150
误差	1.5%	2.3%	2.8%	-5.1%	-3.5%	-1.0%
5 计算	249	720	570	149	397	1 143
5 实测	242	752	561	145	415	1 132
误差	3.0%	-4.2%	1.6%	2.8%	-4.4%	1.0%
6 计算	250	721	572	149	396	1 146
6 实测	255	745	597	156	414	1 137
误差	-2.1%	-3.2%	-4.2%	-4.6%	-4.2%	0.8%
7 计算	251	721	574	148	397	1 147
7 实测	257	707	559	145	384	1 162
误差	-2.2%	2.0%	2.7%	2.2%	3.4%	-1.3%
8 计算	254	720	577	147	398	1 145
8 实测	241	702	598	155	376	1 132
误差	5.4%	2.5%	-3.6%	-5.0%	5.9%	1.1%
9 计算	258	717	579	146	400	1 141
9 实测	250	723	588	139	381	1 149
误差	3.1%	-0.8%	-1.5%	4.9%	5.1%	-0.7%
10 计算	262	714	582	144	403	1 134
10 实测	273	691	567	150	391	1 141
误差	-3.9%	3.3%	2.6%	-4.1%	3.1%	-0.6%

图8给出了表2中钢绞线下吊点的竖向位移变化曲线。从图8中可以看出,各节点的竖向位移变化均呈线性变化,表明旋转过程屋盖结构位形变化平稳,与理论放样得到的位形基本一致。其中,K1点为旋转点,旋转提升过程中该位置的提升器不提升,所以钢绞线G1索力和节点K1位移基本不变。各节点竖向位移曲线斜率不同,这取决于节点距旋转点的距离,距旋转点越远的节点竖向位移曲线的斜率越大。表3给出了结构旋转至设计位形后吊点的水平反力值。从表中可以看出,钢屋盖旋转至设计位形后吊点仍存在水平反力,但反力值较小,最大约4.6 kN,说明提升钢绞线并未处于理想的铅锤状态,主要原因为结构自身变形导致钢绞线与铅锤方向存在一定夹角,但夹角远小于提升施工允许的最大角度 $2^\circ$ 。

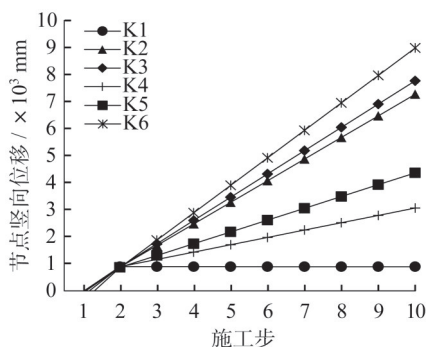


图8 旋转提升过程中的节点位移

Fig. 8 Node displacement during rotation lifting process

表3 吊点水平反力

Table 3 Horizontal reaction force of lifting point

节点	$F_x/kN$	$F_y/kN$
K1	0.2	-0.2
K2	0.1	-2.3
K3	0.4	-1.9
K4	0.2	-0.3
K5	1.3	-0.6
K6	-0.6	-4.6

将屋盖旋转至设计位形整体提升至设计标高,然后进行补杆和支座安装。旋转及提升过程中的结构变形和施工误差可能导致提升就位后后补杆件无法安装,故应分析屋盖提升至设计标高后支座附近的节点变形,必要时采取预偏措施保证后期支座的安装。该项目采用三维激光扫描,获取提升就位后结构的点云模型,采用NAVISWORKS软件分析屋盖节点与设计位形的偏差值,分析结果如图9所示。屋盖89%的节点坐标偏差在

32.5 mm 以内,支座附近由于杆件抽空,且为提升下吊点布置位置,受力较大,节点坐标最大偏差62.2 mm,支座位置后补杆件的尺寸根据现场监测数据在工厂进行调整,保证后补杆安装精度。

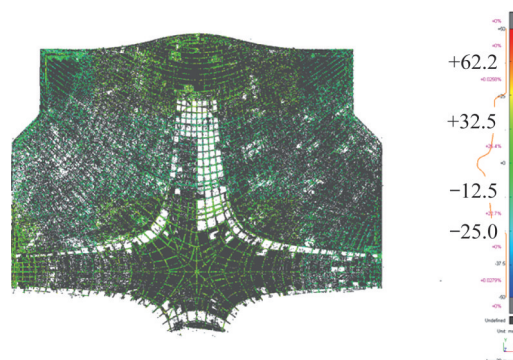


图9 屋盖节点位形偏差统计图(单位:mm)

Fig. 9 Configuration deviation statistics of roof nodes (unit: mm)

后补杆件和支座安装完成后进行结构卸载,钢屋盖提升吊点数量多,大多数吊点布置在结构柱顶位置,图10为提升点分布和卸载顺序。提升点反力同样呈现出由中央桁架区向角部递减的趋势,与结构自重的分布规律是一致的,故采用分批卸载的方式进行钢屋盖提升吊点卸载。

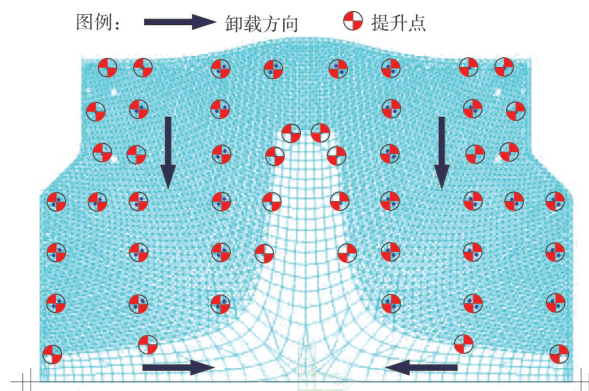


图10 屋盖提升吊点布置与卸载方向

Fig. 10 Arrangement and unloading direction of roof lifting points

根据现场实际情况,每批次卸载6~8个点位,屋盖自重荷载逐渐转移至结构支座。表4给出了各施工步对应的杆件最大应力比,从表中可以看出最大杆件应力比为0.69,出现在第3个施工步,此时结构旋转 $0.5^\circ$ 。除控制施工过程中杆件最大应力比不超过0.8外,还需考虑施工过程中对结构服役阶段受力的影响,本文对这部分内容不再探讨。

表4 施工过程中杆件最大应力比

Table 4 Maximum stress ratio of members during construction

施工步	最大应力比	施工步	最大应力比
1	0.12	6	0.67
2	0.67	7	0.66
3	0.69	8	0.66
4	0.65	9	0.65
5	0.65	10	0.67

## 4 结语

旋转提升施工技术作为一种新颖的施工技术在大跨度自由曲面钢屋盖结构施工中已逐渐得到应用,本文通过建立胎架用量函数来进行结构旋转角度的优化计算,采用反分析法确定结构拼装位形,并对钢屋盖结构旋转提升施工全过程进行了数值模拟,最后获取了钢绞线索力与结构位移。对比索力计算数据和现场实测数据,并利用三维激光扫描获取屋盖结构施工成型态的点云模型,分析成型态结构实际坐标与理论坐标的偏差,得出以下几点结论:

(1) 建立胎架用量函数对结构旋转角度进行优化,可保证拼装胎架用量最优。

(2) 通过反分析法确定结构的拼装位形,可以有效避免结构脱胎时产生刚体位移,保证施工安全。

(3) 通过施加虚约束的方式克服了结构分析时的不收敛问题,虚约束反力最大为0.1 kN,表明结构处于自然的重力平衡状态,与实际情况吻合。

(4) 通过全过程分析可以准确获得旋转提升过程任意时刻的索力和结构位形,计算结果与实测数据基本一致,分析方法可靠。

(5) 数值分析的数据可指导现场施工,精确控制结构旋转提升时的索力和吊点位移,使得旋转完成后结构位形与设计位形基本一致,保证屋盖一次性提升就位。

## 参考文献:

- [1] 皮淑萍,朱江,邵鹏鸣,等.裙摆形单层自由曲面钢网壳施工技术[J].建筑施工,2020,2(8):1403-1406. DOI:10.14144/j.cnki.jzsg.2020.08.017.
- PI Shuping, ZHU Jiang, TAI Pengming, et al. Construction technology of skirt-shaped single-layer free-form surface steel grid [J]. Building Construction, 2020, 42 (8) : 1403-1406. DOI: 10.14144/j.cnki.jzsg.2020.08.017. (in Chinese)
- [2] XIANG S, CHENG B, KOOKALANI S, et al. An analytic approach to predict the shape and internal forces of barrel vault elastic gridshells during lifting construction[J]. Structures, 2021, 29:628-637. DOI:10.1016/j.istruc.2020.11.032.
- [3] ZHANG W L, WU Z X, CHEN B H. Simulation study on construction process of complex spatial steel structure based on the construction mechanics [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 226/227/228: 1209-1213. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.226-228.1209.
- [4] WANG Li. Construction mechanics and time-varying mechanics in civil engineering analysis[C]// Proceedings of the 2016 4th International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications. Amsterdam: Atlantis Press, 2017.
- [5] 张建华,张毅刚,王振清.大跨度空间结构施工过程力学行为的研究[J].重庆建筑大学学报,2008,30(4):105-108. ZHANG Jianhua, ZHANG Yigang, WANG Zhenqing. Mechanical behaviors of large-span space structures in the construction process [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(4):105-108. (in Chinese)
- [6] 田黎敏,郝际平,郑江,等.大跨度复杂钢结构施工力学模拟的研究与应用[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2012,44(3):324-330. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2012.03.020. TIAN Limin, HAO Jiping, ZHENG Jiang, et al. Study and application of mechanical simulation of large-span complex steel structure in construction process [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2012, 44 (3) : 324-330. DOI: 10.15986/j. 1006-7930.2012.03.020. (in Chinese)
- [7] 田黎敏,郝际平,李存良,等.大跨度钢屋盖结构整体提升施工过程力学模拟分析[J].建筑结构学报,2013,34(11):33-39. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.11.006. TIAN Limin, HAO Jiping, LI Cunliang, et al. Simulation analysis on integral lifting of large-span steel roof structures during construction process [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (11) : 33-39. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2013.11.006. (in Chinese)
- [8] 郭彦林,王永海,刘学武,等.首都国际机场A380机库屋盖整体提升一体化建模分析[J].工业建筑,2007,37(9):35-40,15. DOI: 10.13204/j.gyjz200709006. GUO Yanlin, WANG Yonghai, LIU Xuewu, et al. Integrated model analyses of the whole lift of steel roof for A380 air craft hangar in Beijing capital international airport [J]. Industrial Construction, 2007, 37 (9) : 35-40, 15. DOI: 10.13204/j.gyjz200709006. (in Chinese)
- [9] 郭彦林,邓科,王宏,等.广州新白云国际机场维修机库屋盖整体提升技术[J].工业建筑,2004,34(12):6-11. GUO Yanlin, DENG Ke, WANG Hong, et al. The integral hoisting technology of China southern airlines gu angzhou aircraft hangar [J]. Industrial Construction, 2004, 34(12) : 6-11. (in Chinese)
- [10] ZHENG Jiang, HAO Jiping, WANG Hong, et al. The deformation and static research of hydraulic synchronizing lifting construction technology[C]//International Symposium on Thin Shells and Space Structures and Asia Pacific

- Conference on Thin Shells and Space Structures. Beijing: China Civil Engineering Society, 2006.
- [11] 郭彦林, 缪友武, 娄俊杰, 等. 澳门综合体育馆主桁架整体提升及提升塔架分析[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(1): 17-24. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2005.01.003.
- GUO Yanlin, MIAO Youwu, LOU Junjie, et al. Integral lift design of the main trusses in Macao Gymnasium and analysis of the latticed hoist tower[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26 (1) : 17-24. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6869.2005.01.003.(in Chinese)
- [12] 丁党盛, 卢宁, 周浩. 大跨度大体量复杂空间网架钢结构双向旋转提升施工技术[J]. 住宅与房地产, 2017(32): 168-169. DING Dangsheng, LU Ning, ZHOU Hao. Construction technology of bidirectional rotation lifting for large span and large volume complex space grid steel structure[J]. Housing and Real Estate, 2017(32): 168-169. (in Chinese)
- [13] 刘钝. 铁路站房钢结构施工过程监测与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013. LIU Dun. Construction monitoring and analysis for the steel structure of railway station building[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [14] 王涛. 大跨空间钢结构整体提升施工关键技术研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013. WANG Tao. Research on key construction technology for integral lifting of large span spatial steel structure [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013. (in Chinese)
- [15] 李浩. 大吨位钢结构多吊点非对称整体提升中姿态控制技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015. LI Hao. Large tonnage of steel to enhance the overall point asymmetric attitude control technology multi-hanging [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] 郭彦林, 赵思远, 张博浩. 某钢屋盖结构整体提升技术数值模拟方法及一体化有限元分析[J]. 施工技术, 2014, 43(14):1-5. DOI:10.7672/sgjs2014140001. GUO Yanlin, ZHAO Siyuan, ZHANG Bohao. Numerical simulation and analysis of the whole lifting technology for a steel roof structure [J]. Construction Technology, 2014, 43(14): 1-5. DOI: 10.7672/sgjs2014140001.(in Chinese)
- [17] 纪哈. 大跨度网壳结构施工过程数值模拟与监测[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. JI Han. Numerical simulation and monitoring on the construction process of large span reticulated shell structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)