

# 武汉光谷国际网球中心可开启钢屋盖 施工全过程模拟分析

徐春丽\*

(上海宝冶集团有限公司, 上海 200941)

**摘要:** 武汉光谷国际网球中心15 000座网球馆主体为钢筋混凝土框架结构,上部为可开启钢屋盖,由主次桁架、网架、可滑动钢桁架及外围的气旋组成。该结构具有建筑造型复杂、结构体系多样、需要进行高空安装等特点。针对结构体系多样和施工难度大的特点,本文采用有限元分析软件Midas Gen对该钢结构屋盖的安装和卸载过程进行数值计算分析。结果表明,构件安装和卸载过程中都有可能出现最大应力,模拟分析时要考虑钢构件的安装和卸载顺序,保证结构变形、挠度和杆件应力变化均在合理范围,保证施工安全。

**关键词:** 可开启钢屋盖; 安装和卸载顺序; 数值分析; 应力; 变形

中图分类号: TU758.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0108-07

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240315001

## Simulation Analysis on the Entire Construction Process of the Wuhan Optics Valley International Tennis Center

XU Chunli\*

(Shanghai Baoye Group Corp., Ltd., Shanghai 200941, China)

\*Corresponding author: c1216@163.com

**Abstract:** The main body of 15 000-seat tennis courts at the Wuhan Optics Valley International Tennis Center is reinforced concrete frame, and its upper part is a retractable steel roof which is made up of primary and secondary trusses, grid frames, retractable steel trusses and peripheral cyclones. This structure has the characteristics of complex architectural design, diverse steel structure systems, and the need for high-altitude installation. In the view of diverse structural systems and construction difficulties, this paper uses the finite element analysis software Midas Gen to simulate and analyze the installation and unloading process of the steel structure roof. The results show that maximum stress may occur during the installation or unloading of components. During simulating analysis, the installation and unloading sequence of steel components should be considered to ensure that structural deformation, deflection, and stress changes of members are within a reasonable range, thereby meeting construction safety requirements.

**Keywords:** retractable steel roof; installation and unloading sequence; numerical analysis; stress; deformation

武汉国际网球中心15 000座网球馆主体为钢筋混凝土框架结构,上部屋盖为可开启钢屋盖,由主次桁架、网架、可滑动钢桁架及外围的气旋组成。网球馆平面俯视图呈圆形,观众席沿比赛场地环形布置,内场直径72 m,斜看台顶部直径123 m,总建筑面积54 340 m<sup>2</sup>,建筑总高

度46 m,地上5层,平台层标高6.6 m,斜看台顶部标高25.5 m。该工程外立面造型独特,由64根倾斜的三角形主立柱和反向斜交的次圆杆件焊接形成了弧面菱形空间大网格结构,该结构既充当了外幕墙结构的主支架,又形成了“旋风”的造型意象。网球馆外墙檐口以下由玻璃幕

收稿日期:2024-03-15

作者简介:

徐春丽(1978—),女,博士,正高级工程师,主要从事大跨、高层钢结构设计方面的研究。E-mail:c1216@163.com。

墙构成,总面积约7 000 m<sup>2</sup>,为菱形分格,采用钢化中空夹胶Low-E玻璃,工程效果如图1所示。

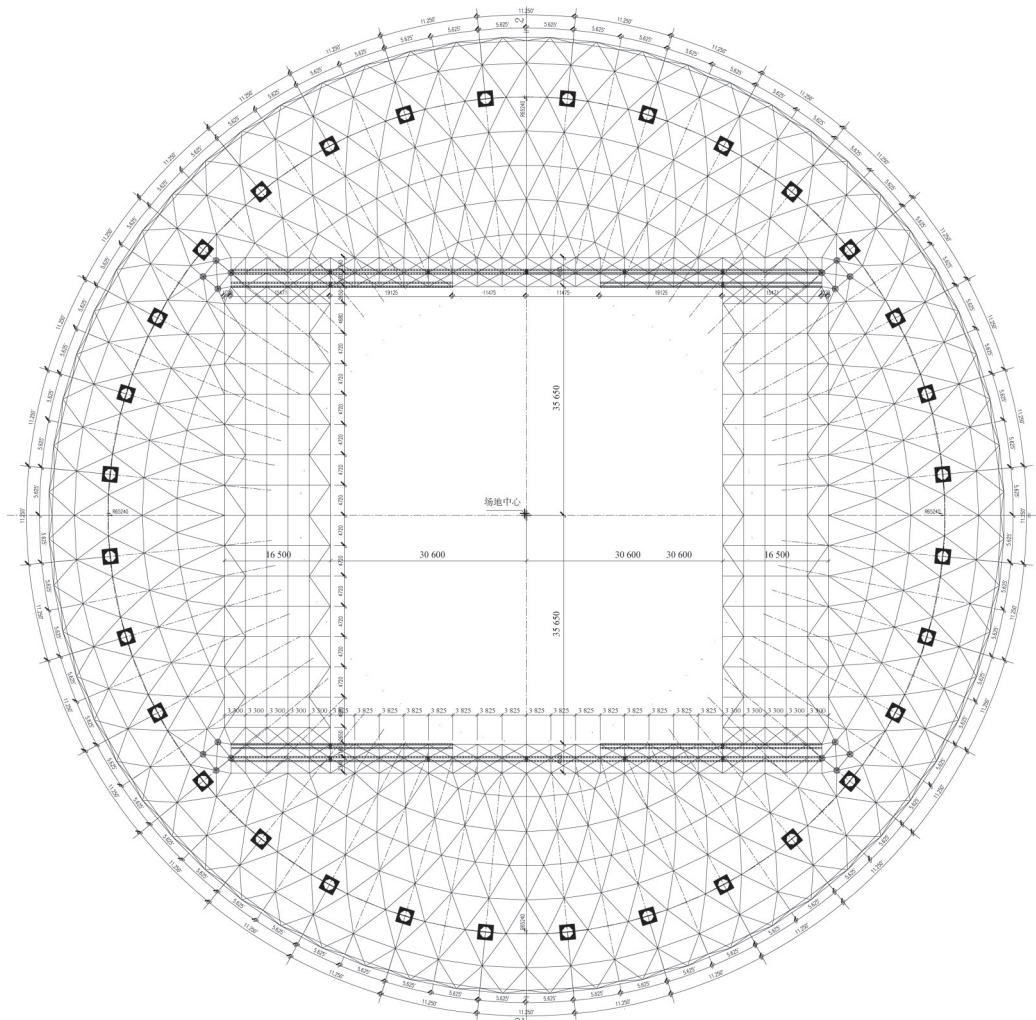


图1 工程效果图

Fig. 1 Project rendering

该工程钢结构屋盖总用钢量达4 300 t,由固定屋盖和活动屋盖组成,结构平面和剖面如图2、图3所示。固定屋盖采用大跨度管桁架和焊接球网架杂交结构,管桁架作为轨道桁架,最大跨度96 m,屋盖部分采用三层(局

部两层)焊接球网架结构,网架杆件尺寸 $\Phi 114 \times 6 \sim \Phi 650 \times 40$ ,焊接球直径为 $\Phi 400 \times 18 \sim \Phi 800 \times 30$ ,网架通过下部主体32榀框架顶部的32个抗震球型固定铰支座以及四部垂直电梯处的四个钢管混凝土格构柱来支撑,共设48个抗震球型固定铰支座,支撑形式为下弦支撑;活动屋盖由两层四单元双向开启结构组成,即上层屋盖两个单元结构总高度10.47 m、下层屋盖两个单元结构总高度6.67 m,每个单元均能独立运动,在两条独立的轨道上水平运动,实现打开或关闭。活动屋盖开启尺寸为60 m $\times$ 70 m,采用平行移动的开闭方式。结构屋盖均采用预应力拱形桁架结构,桁架高度为2.4 m,每个单元均由六榀弦张桁架构成,通过一端固定铰支座,一端滑动支座支撑于台车上,活动屋盖荷载通过台车传到下部桁架上。该工程外立面造型独特,由64根倾斜的三角形立柱与反向斜交的次圆杆件焊接形成了弧面菱形空间大网格结构,该结构既充当外幕墙结构的主支架,又形成了“旋风”的造型意象。



注:  $\square$  表示看台框架上支座,共32个;  $\odot$  表示轨道梁;  $\ominus$  表示轨道梁断缝15 mm。

图2 固定钢屋盖平面图(单位:mm)

Fig. 2 Fixed steel roof plan(unit:mm)

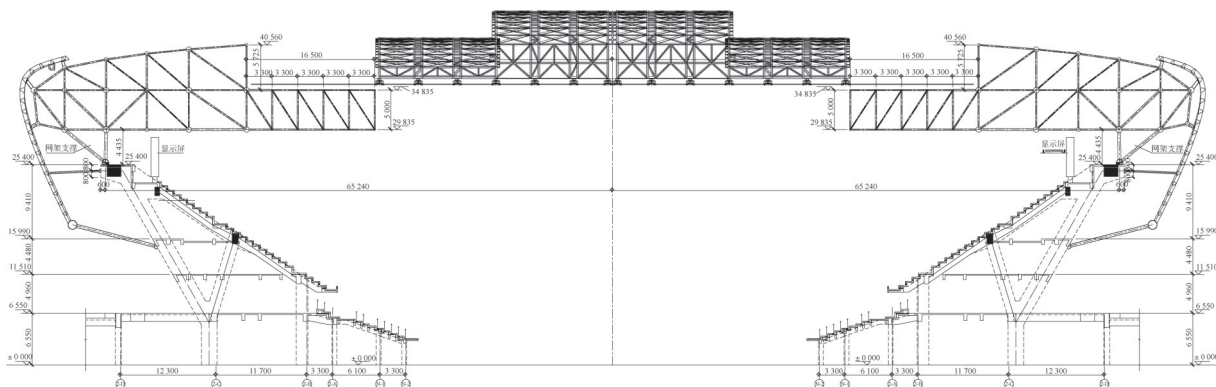


图3 屋盖剖面图(单位:mm)

Fig. 3 Roof section diagram(unit:mm)

## 1 屋盖钢结构的全过程施工阶段分析<sup>[1-4]</sup>

网球中心屋面钢结构是大型空间结构,特点是建筑造型复杂、钢结构体系多样、主桁架跨度大、单榀重量大、需要进行高空安装、空间定位困难等,结构安装和卸载顺序对结构的变形和内力分布影响较大。施工过程按不同的结构形式和安装卸载顺序可以分成若干阶段,在每个阶段,结构形式、受力体系、施工荷载都可能会发生变化,因此需要对处于不同阶段的结构进行全过程的施工验算,保证施工过程的安全性。

### 1.1 屋盖钢结构的安装过程分析

网球馆钢屋盖安装流程为:安装主桁架—安装次桁架—安装曲面网架—安装活动屋盖拱桁架—安装气旋。

### 1.2 主次桁架和曲面网架安装

本工程采用了地面拼装、分块吊装的施工工艺。场内设一台400 t履带吊,场外设320 t和260 t履带吊各1台。主次桁架在工厂下料、切割,以散件的形式运至现场。现场拼装成整榀后分段吊装、补档。主桁架分为8个单元(1~8),次桁架分为4个单元(A~D),曲面网架分为32个单元,如图4所示。主桁架两端与电梯格构柱相连,GG5-1~4表示5轴线格构柱4个球铰支座,GG12、21、28依次类推,共计16个支座;主桁架中间通过塔架临时支撑,次桁架两端与主桁架相连,以数字开头的支座1~7表示施工支撑塔架,后缀字母表示塔架安装位置编号,共20个,如图5所示。

### 1.3 活动屋盖拱桁架安装

首先在次桁架上弦上设置H型钢转化梁,间距2.0 m,格构式支撑塔架平面尺寸1.6 m×2.0 m,塔架支座布置如图6所示,其中S1~S4为固定铰支座(表示塔架与活动屋盖桁架下弦连接,塔架可提供竖向约束和水平约束),W1~W4和N1~N4为滑动支座(表示塔架与活动屋盖桁架下弦采用滚轴连接,塔架仅提供竖向约束,不提供

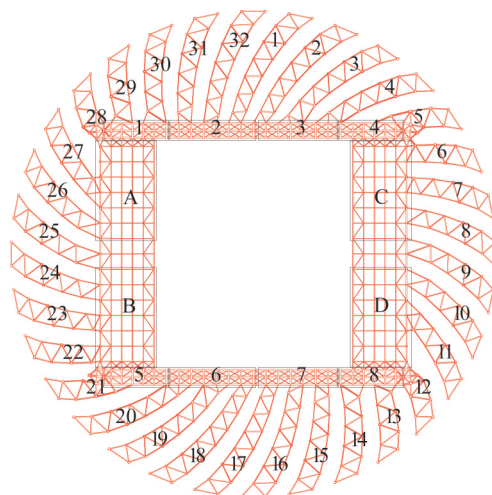


图4 主次桁架和曲面网架编号图

Fig. 4 Number diagram of trusses and grid structures

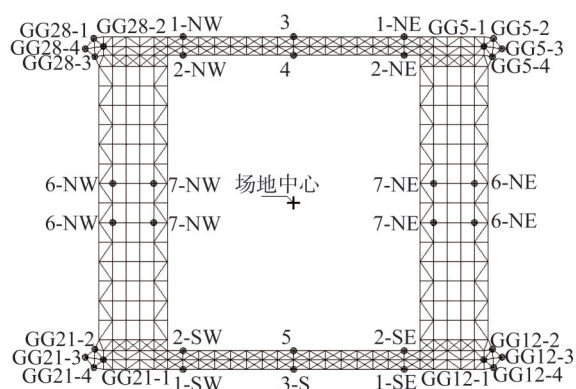


图5 塔架编号布置图

Fig. 5 Layout diagram of tower number

水平约束),然后按先下层屋盖、再上层屋盖的顺序进行地面拼装后分段吊装,焊接完成后穿入预应力拉索,张拉、锚固,然后完成卸载和整体落位到台车设备上,最后开始运行调试。活动屋盖考虑全开、半开和全闭的工况,将其三种状态下的反力分别施加在支撑点进行验算,活动屋盖安装完成后立面如图7所示。

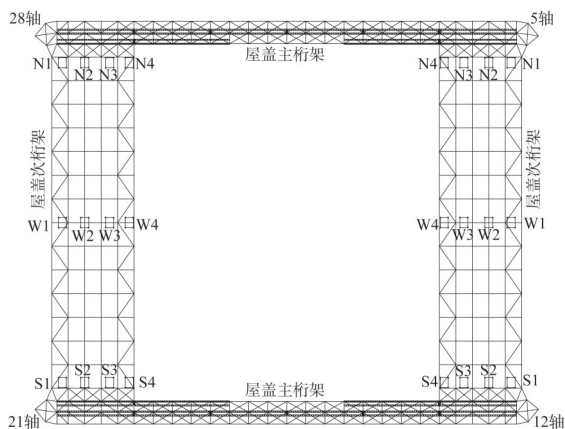


图6 活动屋盖塔架支座编号布置图

Fig. 6 Layout diagram of tower support number

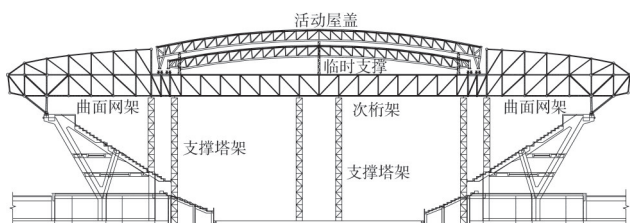


图7 活动屋盖安装完成后立面图

Fig. 7 Elevation view after installation of the movable roof

### 1.4 气旋网格结构安装

网球馆钢气旋结构采用双向斜交的菱形空间曲面大网格钢结构,采用三角形钢管双向布置主肋,逆时针布置次肋,钢结构高度最高达17.000 m。场内最大悬挑长约为6.8 m,外围钢网格顶口直径为82.6 m,与固定屋盖形成一个整体共同受力,同时兼具外立面玻璃幕墙龙骨和网球馆造型作用。三角形钢管截面规格为 $\Delta 400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ ,上部连接在曲面网架的焊接球上,下部结构分别在平台层和看台顶层环梁处通过V形撑杆与主体结构铰接。气旋结构底部的曲线拱分为20个单元,通过8根矩形柱和16个临时塔架支撑,矩形柱编号为轴线号-数字编号(例:5-1),塔架编号为方位+数字(例N8~N11),塔架编号布置如图8所示。气旋构件按单个构件在工厂加工,共计约6 500个杆件,然后在现场进行单元拼装,采用“大型履带式起重机场外分片吊装、汽车式起重机单元拼装及散件补装”方式进行安装,钢气旋构件安装完成后立面如图9所示。

## 2 钢屋盖安装过程数值模拟

网球馆钢屋盖结构采用Q345GJB和Q420GJC钢材,材料材质均匀、强度高,施工模拟计算时不考虑材料非线性,但需要考虑施工过程中的几何非线性,采用有限元分析软件Midas Gen对施工过程进行变形及应力验算。根据不同施工步骤,对结构边界和荷载进行分组设

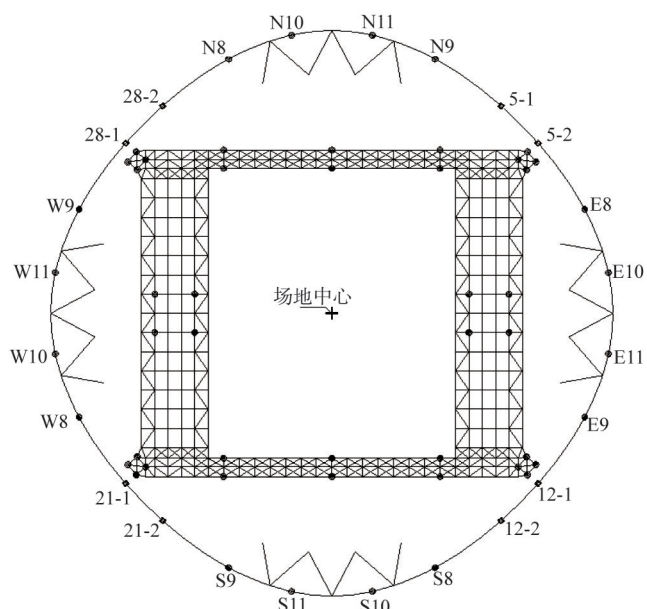


图8 气旋塔架编号布置图

Fig. 8 Layout diagram of cyclone tower number

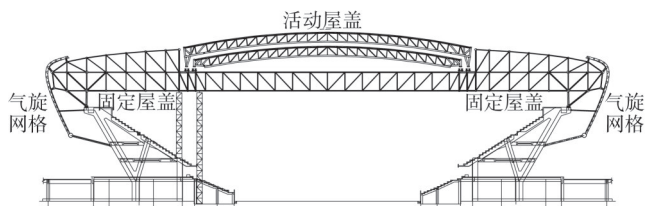


图9 钢气旋构件安装完成后立面图

Fig. 9 Elevation view after installation of steel cyclone components

置,通过不同施工步骤间的“激活”和“钝化”来模拟网球馆钢屋盖结构的安装和卸载。施工模拟过程中,主要考虑结构自重和风荷载,临时支撑通过设置铰接支座进行模拟,按照安装主桁架—安装次桁架—安装曲面网架—安装活动屋盖拱桁架—安装气旋的顺序进行模拟计算,活动屋盖按安装初完成—预应力张拉—落位台车三个安装阶段进行模拟计算,三阶段支撑点N1~N4、W1~W4、S1~S4的反力及结构变形由南京东大现代预应力工程有限公司提供,钢屋盖安装完成后的有限元模型如图10所示,各安装过程的模拟分析结果见表1。

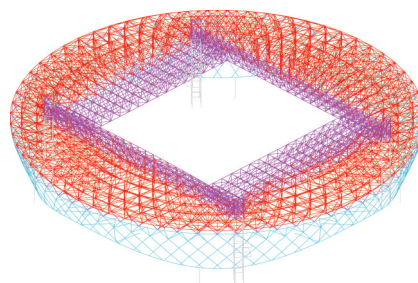


图10 钢屋盖有限元模型

Fig. 10 Finite element model of steel roof

表1 安装过程的模拟分析结果

Table 1 Simulation analysis results of the installation processes

| 安装过程      | 最大支座反力/kN | 支座处杆件最大应力比 | 最大竖向位移/mm | 位移限值/mm |
|-----------|-----------|------------|-----------|---------|
| 主桁架安装完成   | 1 117     | 0.24       | 2.10      | 67.00   |
| 次桁架安装完成   | 318       | 0.84       | 4.26      | 76.00   |
| 曲面网架安装完成  | 643       | 0.93       | 4.55      | 76.00   |
| 活动屋盖安装初完成 | 745       | 1.85       | 10.60     | 76.00   |
| 活动屋盖预应力张拉 | 548       | 0.98       | 13.17     | 76.00   |
| 活动屋盖落位台车  | 375       | 0.81       | 55.62     | 178.00  |
| 气旋安装完成    | 927       | 0.66       | 57.90     | 178.00  |

由表1可知,活动屋盖的上下层屋盖安装完成后,其支撑反力均作用在次桁架上,次桁架支撑处腹杆的应力比为1.85,超过规范限值。对不满足设计要求的次桁架

支撑处腹杆采用增大截面尺寸的调整方案,增大截面后,结构次桁架支撑处的最大应力比为0.95,满足设计要求,截面的替换情况如表2所示。

表2 不足截面位置和替换尺寸

Table 2 Replace section positions and dimensions

| 支撑点编号 | 6-NW   | 6-SW   | 7-NW             | 7-SW             | 6-NE   | 6-NS   | 7-NE             | 7-NS             |
|-------|--------|--------|------------------|------------------|--------|--------|------------------|------------------|
| 原不足杆件 | D140×6 | D140×6 | D140×6<br>D127×6 | D140×6<br>D127×6 | D140×6 | D140×6 | D140×6<br>D127×6 | D140×6<br>D127×6 |
| 替换杆件  | D168×6 | D168×6 | D168×6<br>D159×6 | D168×6<br>D159×6 | D168×6 | D168×6 | D168×6<br>D159×6 | D168×6<br>D159×6 |

整个安装过程中,除活动屋盖初完成阶段,其他安装阶段的结构应力保持在合理水平,构件应力小于材料的屈服强度。安装过程中最大应力出现在临时支撑处,因此进行安装过程的有限元模拟能够最大限度地保证施工安全。考虑到结构构件在压力下会发生屈服或屈曲失稳,控制构件最大应力比更符合实际需要,安装过程中最大应力比为0.98,为临时支撑的腹杆,非支座处的其余杆件在安装过程中的应力比均在0.4以下,可知结构具有一定的安全储备。安装过程中的屋盖最大挠度值为57.9 mm,小于《空间网格技术规程》(JGJ 7—2010)中规定的容许挠度值 $l/250=178$  mm。钢屋盖整个安装过程完成后的结构杆件应力比和挠度如图11所示。

### 3 屋盖钢结构的卸载过程分析<sup>[5-8]</sup>

卸载过程是主体结构和临时支撑体系相互作用的复杂过程,是两个系统之间内力逐渐转移和重分布的过程,临时支撑由承载状态变为无承载状态,同时主体结构由安装状态过渡到正常使用状态。随着支撑结构的卸载,主结构的跨度增大,受力也逐渐增大,某一支承卸载时,相邻支承加载,加载值的大小及影响范围主要与结构的刚度分布相关。当支撑结构完全卸载后,结构便处于最不利状态,因此需分析在卸载全过程中,主结构和支撑结构的响应,确保结构安全。

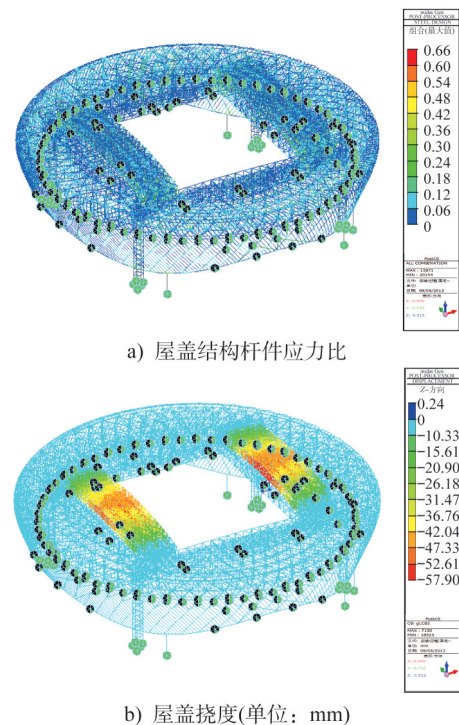


图11 整体安装完成后结构应力和变形

Fig. 11 Structural stress and deformation after installation

合理的卸载顺序能够保证结构从支撑状态过渡到工程实际状态的安全性,根据对该结构的受力分析,确

定先卸载外圈受力和变形较小的气旋区域,再卸载次桁架结构,最后卸载主桁架结构,各卸载过程的模拟分析结果见表3。屋盖卸载完成后的结构应力和位移如图12所示。

表3 卸载过程的模拟分析结果

Table 3 Simulation analysis results of the unloading processes

| 卸载过程  | 卸载区构件最大应力比 | 整体结构构件最大应力比 | 卸载区结构最大竖向位移/mm | 整体结构最大竖向位移/mm | 位移限值/mm |
|-------|------------|-------------|----------------|---------------|---------|
| 气旋卸载  | 0.39       | 0.70        | 9.6            | 74.0          | 178.0   |
| 次桁架卸载 | 0.41       | 0.70        | 11.2           | 72.0          | 178.0   |
| 主桁架卸载 | 0.29       | 0.77        | 44.6           | 87.0          | 178.0   |

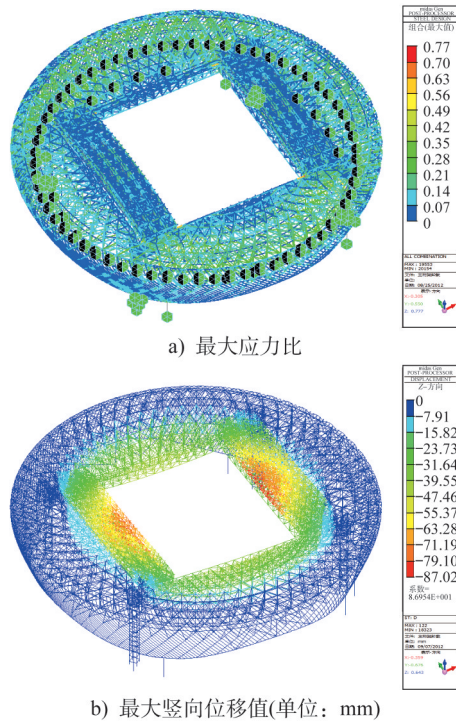


图12 卸载完成后结构应力和变形

Fig. 12 Structural stress and deformation after unloading

从表3和图12中可以看出,随着临时支撑的逐渐拆除,结构的最大竖向变形先减小,达到稳定状态后有所增大,结构构件应力在拆除过程中有升有降。这是因为卸载过程中出现了内力的重分布,当拆除某些受力较大的临时支撑时,会对周围支撑处杆件的受力产生影响,引起杆件应力变化。结果显示整体结构在卸载过程中,构件应力和变形满足设计要求,结构处于安全状态。

#### 4 临时支撑胎架的稳定性验算

为安全起见,对支撑胎架的设计均采用最大荷载作用于最高胎架的原则。支撑胎架平面尺寸为1.6 m×2.0 m,如图13所示,标准节由2 m高的两小节加设一道水平缀条组成。承担的主体结构最大重量为1 145 t(标准值),考虑

到塔架连接和爬升栏杆等设备的重量,取塔架承受的活荷载为1 146 t。该塔架主肢采用钢管D219 mm×8 mm,所有缀条均采用D83 mm×6 mm,标准节顶部圈梁为HM390 mm×300 mm×10 mm×16 mm。上部非标准节塔架主肢采用HW200 mm×200 mm×8 mm×12 mm,缀条均采用L80 mm×6 mm,顶部受荷梁采用型钢HN700 mm×300 mm×13 mm×24 mm,分配梁采用型钢HM390 mm×300 mm×10 mm×16 mm,杆件均采用Q235B钢。考虑到塔架有18 m高,且塔架主肢间距较小,需进行稳定性验算<sup>[9]</sup>。

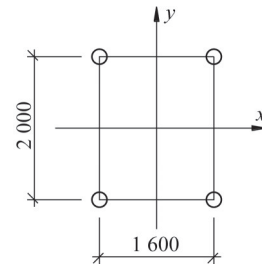


图13 支撑胎架平面布置图(单位:mm)

Fig. 13 Layout plan of support frame(unit:mm)

根据上文,该临时支撑胎架为轴心受压构件,其换算

$$\text{长细比为: } \lambda_{ox} = \sqrt{\lambda^2 + 40 \frac{A}{A_{1x}}} \quad \lambda_{oy} = \sqrt{\lambda^2 + 40 \frac{A}{A_{1y}}}$$

由计算得到的支撑截面特性为:  $I_x = I_y = 7.55 \times 10^9 \text{ mm}^4$ ,  $i_x = i_y = 604.644 \text{ mm}$ ,  $\lambda_x = \lambda_y = 59.54$ ,  $\lambda_{ox} = \lambda_{oy} = 61.9$ 。

通过查阅《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)b类截面表C-2,得到稳定系数  $\phi = 0.797$ ,根据数值模拟结果中临时支撑所受的最大竖向压力,得出临时支撑胎架的整体稳定承载力:

$$\sigma = \frac{N}{\phi A} = 98.2 \text{ MPa} < f = 215 \text{ MPa}$$

根据临时支撑胎架分支的节间长度:  $l_1 = 4 \text{ m}$ ,得出分支长细比为:

$$\lambda_1 = \frac{\mu l}{i_{y1}} = 26.8 < 0.7\lambda_{ox} = 0.7 \times 61.9 = 43.3$$

因此,该临时支撑的整体稳定性和局部稳定性皆满足规范要求。

## 5 结语

本文通过对武汉光谷国际网球中心可开启钢屋盖施工全过程进行有限元模拟分析,得出以下结论:

(1) 施工过程按不同的结构形式和安装卸载顺序可以分成若干阶段,在每个阶段,结构形式、受力体系、施工荷载都可能会产生变化,因此需要对处于不同阶段的结构进行全过程的施工验算,确保施工过程的安全性。

(2) 钢屋盖的安装过程中,次桁架支撑处腹杆的应力出现突变,采用了增大相应截面尺寸的方案,增大截面后,整个结构的应力和变形始终保持在合理的水平。

(3) 合理的卸载顺序能够保证结构从支撑状态过渡到工程实际状态的安全性,该项目根据结构的受力分析确定合理的卸载顺序,结构整体变形、挠度和杆件应力均在合理区间,能够实现施工全过程安全可靠、性能可信、质量可控的目标。

(4) 该工程施工时,临时支撑胎架高度较大,基于数值模拟结果验算了临时支撑的稳定承载力,其整体稳定性和局部稳定性都满足规范要求。

## 参考文献:

- [1] 吴晶晶. 某体育场钢结构顶升与卸载全过程分析及运用[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(12): 119-128. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.013.
- WU Jingjing. Analysis and application of a stadium steel structure propping and de-propping process[J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(12): 119-128. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.12.013. (in Chinese)
- [2] 朱磊, 常永波, 崔晓龙, 等. 体育场大跨空间钢桁架结构施工力学性能研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(10): 120-124, 129. DOI: 10.7672/sgjs2023100120.
- ZHU Lei, CHANG Yongbo, CUI Xiaolong, et al. Study on construction mechanical properties of large-span space steel truss structure of stadium [J]. Construction Technology, 2023, 52(10): 120-124, 129. DOI: 10.7672/sgjs2023100120. (in Chinese)
- [3] 王秀丽, 冯竹君, 任根立, 等. 大型复杂体育馆钢结构施工过程模拟分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(6): 17-24. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.20200091.
- WANG Xiuli, FENG Zhujun, REN Genli, et al. Simulation analysis of steel structure construction process of large complex

gymnasium[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(6): 17-24. DOI: 10.11860/j.issn.1673-0291.20200091. (in Chinese)

- [4] 吴穷, 王乾坤, 任志刚, 等. 大跨度钢结构施工过程仿真分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(3): 127-131. DOI: 10.13204/j.gyjz201803024.
- WU Qiong, WANG Qiankun, REN Zhigang, et al. Simulation analysis of construction process of a long-span steel structure[J]. Industrial Construction, 2018, 48(3): 127-131. DOI: 10.13204/j.gyjz201803024. (in Chinese)
- [5] 吴晶晶, 郭静. 2022世界杯主场馆钢结构卸载过程分析[J]. 施工技术, 2021, 50(8): 52-55. DOI: 10.7672/sgjs2021080052.
- WU Jingjing, GUO Jing. Analysis of unloading process of lusail stadium for 2022 World Cup[J]. Construction Technology, 2021, 50(8): 52-55. DOI: 10.7672/sgjs2021080052. (in Chinese)
- [6] 佟克龙. 大型会展中心大跨度异形双曲钢桁-网架结构与施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(8): 33-38. DOI: 10.7672/sgjs2023080033.
- TONG Kelong. Design and construction technology of large-span special-shaped hyperbolic steel truss-grid structure of large exhibition center [J]. Construction Technology, 2023, 52(8): 33-38. DOI: 10.7672/sgjs2023080033. (in Chinese)
- [7] 陈建锋, 董权锋, 郭孟华, 等. 铜仁市奥体中心体育馆钢屋盖施工模拟分析[J]. 空间结构, 2022, 28(4): 64-71, 63. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2022.04.064.
- CHEN Jianfeng, DONG Quanfeng, GUO Menghua, et al. Construction simulation of long-span steel roof of Tongren olympic sports center gymnasium [J]. Spatial Structures, 2022, 28(4): 64-71, 63. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2022.04.064. (in Chinese)
- [8] 陈良, 徐宏亮. 盐城体育中心游泳馆钢屋盖施工及仿真模拟分析[J]. 特种结构, 2022, 39(2): 120-124. DOI: 10.19786/j.tzjg.2022.02.020.
- CHEN Liang, XU Hongliang. Construction and simulation analysis on steel roof of Yancheng sports center natatorium [J]. Special Structures, 2022, 39(2): 120-124. DOI: 10.19786/j.tzjg.2022.02.020. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)