

# 合肥新桥国际机场 T2 航站楼累积提升关键技术研究

孙佳兴\*, 张敏, 贾尚瑞, 邢遵胜  
(浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江 绍兴 312030)

**摘要:** 合肥新桥国际机场 T2 航站楼钢结构屋盖为大跨空间曲面立体管桁架结构体系, 采用了分区累积提升的施工工艺。该屋盖具有结构高差大、主次桁架交叉布置密度大、施工体量大等特点, 给结构施工带来了诸多技术挑战。施工过程中, 提升分区划分、提升措施设计、施工过程模拟和提升点卸载等环节均对结构的受力状态和成型质量产生影响。对此, 本文提出了一种基于结构等高线的分区规划方法, 能够保证施工质量和效率的同时, 也保证了分区屋盖荷载水平传递的合理性; 针对不同的结构布置形式采用多种提升架组合方式, 确保屋盖荷载竖向传递的合理性; 在精细化施工模拟时, 采用提升措施整体建模方法, 并考虑拼装初始缺陷的影响, 极大提高了模拟结果的准确性, 并为提升措施的设计和施工安全的复核提供了指导; 重点分析了临时提升点卸载顺序不同对结构的影响, 指出应在结构形成稳定体系后再卸载临时提升点, 从而保证荷载向结构柱传递的路径合理。通过对关键技术的分析与应用, 最终实现了钢屋盖的顺利提升, 进一步完善了大跨空间曲面管桁架结构累积提升施工的关键技术理论体系, 并增加了实践经验。

**关键词:** 大跨空间曲面立体管桁架; 累积提升; 提升分区; 措施设计; 施工模拟; 卸载顺序

中图分类号: TU758.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)02-0075-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240822001

## Key Technologies for Cumulative Lifting of Hefei Xinqiao International Airport Terminal 2

SUN Jiaying\*, ZHANG Min, JIA Shangrui, XING Zunsheng  
(Zhejiang Jingong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing 312030, China)  
\*Corresponding author: 294928143@qq.com

**Abstract:** The steel structure roof of Hefei Xinqiao International Airport Terminal 2 (T2) is a large-span spatially curved three-dimensional tubular truss structure system, which adopts a zonal cumulative lifting method. This roof is characterized by significant structural height differences, densely interwoven primary and secondary trusses, and a high workload, posing numerous technical challenges during structural construction. During the construction process, factors such as zonal lifting planning, lifting measure design, construction process simulation, and lifting point unloading closely impact the structural stress state and final quality. To address these, a zonal planning method based on structural contour lines was proposed, which ensured both construction quality and efficiency while maintaining the rationality of horizontal load transfer across the zoned roof. Various combinations of lifting frames were employed for different structural layouts to ensure the rationality of vertical load transfer from the roof to the structural columns. In the detailed construction simulation, the lifting measures were modelled integrally, and initial assembly defects were considered, significantly enhancing the accuracy of simulation results and providing guidance for the design of lifting measures and construction safety verification. Emphasis was placed on analyzing the impact of the unloading sequence of temporary lifting points, with the recommendation to unload temporary lifting points only after the structure formed a stable system, thereby ensuring a reasonable load transfer path to the structural columns. Through the analysis and

收稿日期: 2024-08-22

作者简介:

孙佳兴(1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事钢结构施工方面的研究。E-mail: 294928143@qq.com。(通信作者)

application of these key technologies, the steel roof was successfully lifted, further enriching and refining the theoretical framework and practical experience of cumulative lifting construction techniques for large-span spatially curved tubular truss structures.

**Keywords:** large-span spatially curved three-dimensional tubular truss; cumulative lifting; lifting zoning; measure design; construction simulation; unloading sequence

随着现代建造技术的蓬勃发展,大跨空间钢结构体系在大型公共建筑的设计与施工领域中应用越来越广泛。

合肥新桥国际机场 T2 航站楼主楼的高区钢结构屋盖采用了大跨空间曲面管桁架结构体系,造型新颖独特,但存在结构高差大、主次桁架交叉布置密度大等特点,施工中采用了累积提升的施工工艺。目前在大跨空间钢结构领域,提升施工技术的应用已日趋成熟<sup>[1-6]</sup>,但关于累积提升的分区规划方法缺乏系统研究,对于提升措施的选择与组合应用的研究不够全面,施工模拟的精细化程度较低,针对卸载顺序的分析也需根据项目实际情况而定。在大型空间结构的累积提升施工中,上述问题的存在对结构的施工安全和质量有着直接影响。

因此本文以该项目的高区屋盖钢结构工程为研究对象,分析其累积提升分区规划的合理性、提升措施设计的有效性、施工模拟的准确性以及卸载顺序的安全性等,验证施工方案的可行性,为同类型的复杂大跨空间钢结构累积提升施工提供借鉴与参考。

## 1 工程概况

合肥新桥国际机场 T2 航站楼总建筑面积 369 800 m<sup>2</sup>,采用“双港湾+双 L 形”的建筑造型(图 1),是为满足航空业务量快速增长需求、发挥合肥机场区域航空枢纽功能、促进长三角区域一体化发展的国家重大建设工程。

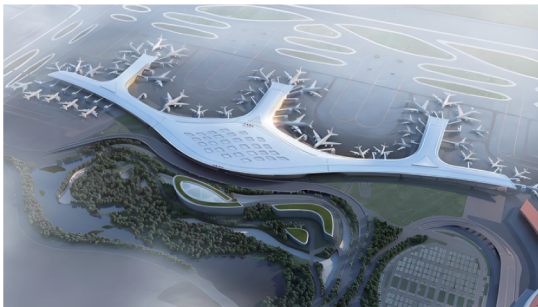


图 1 合肥新桥国际机场 T2 航站楼效果图

Fig. 1 Rendering of T2 Terminal at Hefei Xinqiao International Airport

T2 航站楼主楼钢结构包括结构柱及钢屋盖(图 2)。结构柱为大截面圆管柱、锥形柱和梭形柱,采用 Q355B 和 Q460B 钢,内部填充 C40 混凝土。柱顶最大标高为 36.000 m,典型柱距为 54 m。

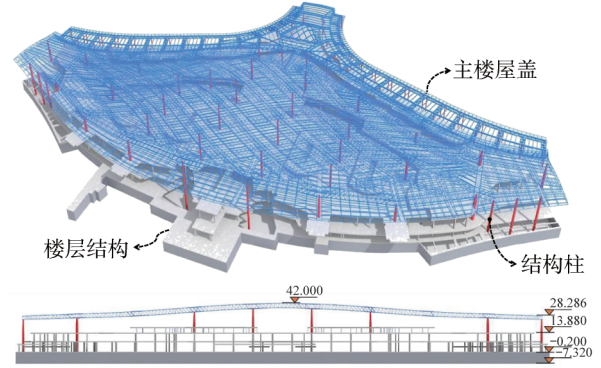


图 2 主楼钢结构效果图(单位:m)

Fig. 2 Rendering of main building steel structure(unit:m)

主楼屋盖平面尺寸为 477 m×290 m,投影面积为 86 000 m<sup>2</sup>,分为高区和低区(图 3)。其中低区位于主楼空侧,为框架结构体系;高区位于主楼陆侧,为双向斜交的立体桁架组成的大跨空间曲面结构体系。高低区屋盖间通过悬链梁组成的垂帘天窗连接。本文以高区屋盖为研究对象,高区投影面积约 62 000 m<sup>2</sup>,最大高度为 42 m,与最低点高差约 19 m,最大跨度达 64 m,陆侧最大悬挑长 27 m,空侧最大悬挑长 20 m,屋盖总重量约为 11 380 t。

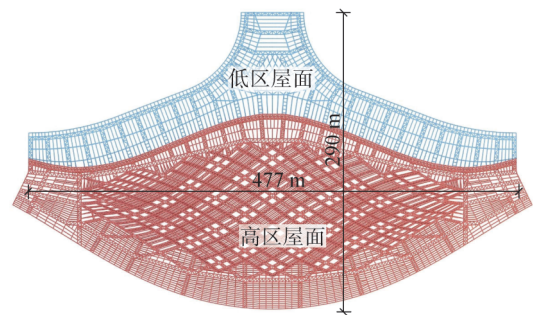


图 3 主楼屋盖平面图

Fig. 3 Plan of main building roof

主桁架为四边形管桁架,宽 3.0 m,高 3.6 m;杆件截面范围为 P121 mm×8 mm 至 P500 mm×25 mm;次桁架为倒三角形管桁架,宽 3.5 m,高 3.5 m,杆件截面范围为 P121 mm×8 mm 至 P245 mm×10 mm,均采用 Q355B 钢。主次桁架分布情况见图 4。桁架相交位置以相贯节点为主,局部主桁架交汇区域设置焊接球节点;结构柱支承处杆件交汇数量多且受力较大,为避免焊缝较多而采

用了铸钢节点。

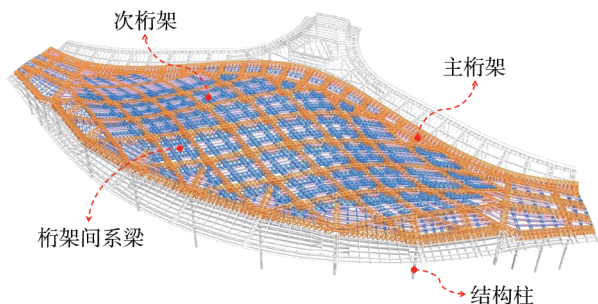


图4 主次桁架分布图

Fig. 4 Distribution of primary and secondary trusses

## 2 基于结构等高线的分区规划方法

采用累积提升工艺施工时,分区规划的合理性尤为重要。分区面积过大会导致拼装高度过大,随之带来高空作业量大、拼装胎架措施量大、拼装质量精度差和作业安全性低等一系列问题;分区面积过小则导致累积提升次数多、分区间嵌补杆件数量多、提升措施量大,施工降效明显。分区规划边界不当,还可能改变结构受力状态,影响结构性能,带来施工风险。

针对该问题,本文提出了一种基于结构等高线的合理分区规划方法,根据结构高差变化和最优拼装高度确定分区的合理范围,然后根据结构受力特征确定分区的精确边界,确保分区在施工过程中的几何不变性和受力合理性。

以该项目为例,首先采用三维建模软件Rhino对高区屋盖结构下弦表面进行等高线的绘制(图5),然后根据下弦面的标高情况从下弦最高点开始依次向下,将高差变化在一定范围内的屋盖区域划分为若干提升分区,以土建楼面为作业基准面将分区下降至楼面以上的适宜高度范围内即可进行拼装作业。本文中,将高差变化每4 m范围内的屋盖区域划分为一个分区,共5个分区,结构分区拼装高度在1~5 m之间。

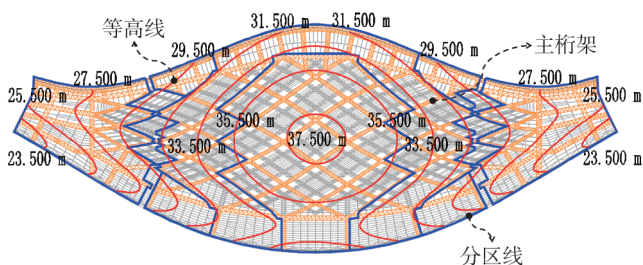


图5 屋盖等高线布置图

Fig. 5 Roof contour layout diagram

根据高区屋盖的主次桁架分布形式(图4)可知,设计状态下的屋盖荷载是按照桁架间系梁→次桁架→主桁架

→结构柱的路径进行传递的,为保证屋盖分区在施工过程中的传力路径不变且屋盖分区始终维持几何不变体系,应以主桁架为边界来作为分区的精确界线,即分区内部荷载最终均应传递至主桁架。

综合上述原则得到结构的提升分区情况如图6所示。本文选择了标高14.000 m的土建楼面作为基准作业面,A区、B区和C区相对于设计标高分别下降18.9 m、15.2 m和13.7 m后在楼面拼装,D区、E区相对于设计标高下降10.6 m后在楼面拼装。

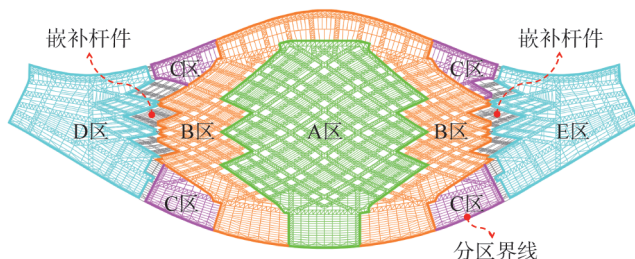


图6 屋盖施工分区图

Fig. 6 Construction zones of the roof

考虑到屋盖面积较大,全部分区均采用累积提升工艺施工时需要长时间连续拼装、提升作业,场地占用面积大、周期长,且大面积累积提升施工的同步性控制难度大,对施工组织要求过高。因此A区、B区和C区采用了累积提升施工,D区、E区采用了分块提升施工。

结构分区信息如表1所示。根据提升分区的划分可确定施工的关键步骤为:① A区先提升3.7 m;② B区与A区对接后共同提升1.5 m;③ C区和A区、B区对接后共同提升13.7 m;④ D区、E区分别提升10.6 m;⑤ D区、E区与A区、B区、C区高空对接。累积提升最大高度为18.9 m,最大面积为44 200 m<sup>2</sup>,最大重量为7 920 t。

表1 提升分区信息表

Table 1 Information of lifting zones

分区	面积/m <sup>2</sup>	重量/t	最大拼装高度/m	提升高度/m
A	18 700	3 660	4.6	3.7/1.5/13.7
B	19 500	3 360	4.3	1.5/13.7
C	6 000	900	3.8	13.7
D	8 900	1 730	4.9	10.6
E	8 900	1 730	4.9	10.6
合计	62 000	11 380	—	—

## 3 基于结构设计形态的提升措施设计

分区的合理规划实现了荷载在分区内部的水平传递路径与设计路径一致的目的。同样地,施工过程中荷载

的竖向传递路径也应与设计路径一致。

但实际提升过程中,屋盖与结构柱相互独立直至施工完成才形成稳定的结构体系,分区荷载实际是传递至提升措施之中的。因此,提升措施的设计应综合考虑点位的布置、措施结构形式的选择等问题,保证分区荷载的传力路径符合设计要求。否则,施工过程中屋盖的受力状态将会改变,影响结构成型质量,增加风险。

### 3.1 提升点布置

考虑到分区内部荷载最终传递至主桁架,再由主桁架继续向下传递,故提升点位布置在结构柱的支承点是最合理的,需要通过措施设计来实现荷载由主桁架传递至结构柱的目的。

同时,提升点的布置还应使结构在提升过程中的应力和变形处于设计要求和相关规范的可控范围内,尤其是当结构分区提升过程中未能形成设计状态下的完整体系时,可能会使结构局部变形过大,影响分区间对接的精度和质量。此时应增加临时提升点从而对变形加以控制<sup>[3]</sup>。

基于上述原则得到提升点的布置情况如图7所示。其中布置在非结构柱位置的提升点为临时提升点,见图7中位置①和②处,位置①处临时提升点用于控制该位置主桁架提升时的跨中挠度,同时承担B区拼装时传递至A区的荷载,但应在B区同A区对接后第二次提升时拆除。位置②处为累积提升区与分块提升区之间的临时提升点,用于控制分区对接位置的竖向变形,避免相对变形过大影响分区对接精度和质量。

其余提升点则均布置在结构柱位置,为施工过程中屋盖荷载向结构柱内竖向传递奠定基础,之后需通过提升架的合理选型实现荷载的有效传递。

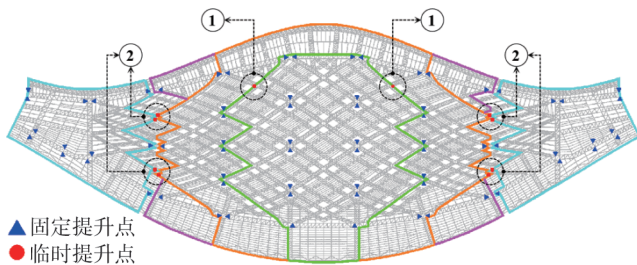


图7 提升点位布置图

Fig. 7 Arrangement of lifting points

### 3.2 提升架选型

提升架需根据结构布置、荷载及变形情况综合考虑,提升架选型时的主要问题如下:

(1) 提升反力较大、提升高度较大时,对于提升架体的强度和稳定要求较高,措施用量显著提高。

(2) 由于屋盖造型复杂以及主次桁架密集交叉布置

等因素导致提升架的布置空间严重受限,提升架无法直接固定在结构柱顶。

(3) 结构分区提升时未能形成设计状态下的完整体系,局部区域变形过大,影响分区间对接的精度和质量。

本文分别采用了柱顶提升架、抱柱提升架和独立提升架这三类提升架来逐一解决上述问题,具体如下:

针对问题(1),采用柱顶提升架,利用结构柱作为支撑,由牛腿、立杆、腹杆、平台梁和提升梁组成提升架(图8),既大幅减少了措施用量,又能够直接地将屋盖荷载通过架体传递至结构柱顶,符合结构的设计受力状态。

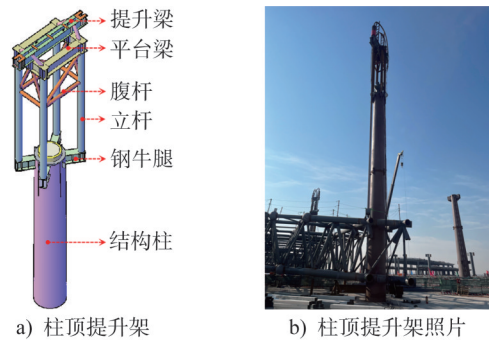


图8 柱顶提升架

Fig. 8 Lifting frame on the column top

针对问题(2),采用抱柱提升架,另设独立架体与结构柱拉结加固,由底部转换梁、立杆、腹杆、平台梁和提升梁组成提升架(图9)。结构柱为提升架提供侧向刚度,减小了立杆的计算长度,加强架体稳定性。屋盖荷载一部分通过提升架体传递至结构柱中,另一部分则通过底部转换梁传递至楼层梁中,进而通过楼层梁传递至下一层结构柱中,传力路径仍然符合设计要求。

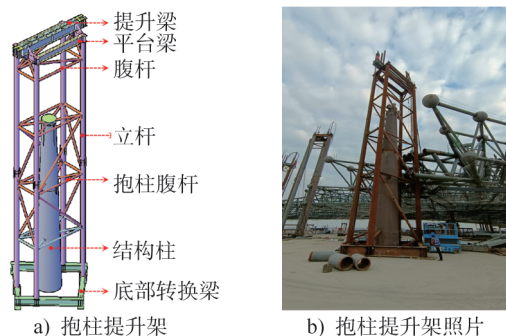


图9 抱柱提升架

Fig. 9 Lifting frame tying column

针对问题(3),在局部变形过大位置设置独立提升架,由底部转换梁、立杆、腹杆、平台梁和提升梁组成提升架(图10)。荷载同样是通过底部转换梁传递至楼层梁和下一层结构柱中,但此类提升架独立高度较大,可通过增

加顶部和底部腹杆等方法减小立杆的计算长度,加强稳定性。

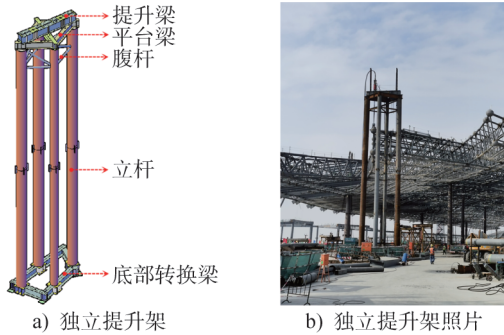


图 10 独立提升架

Fig. 10 Independent lifting frame

三类提升架的组合应用较好地保证了屋盖施工过程中的荷载传递路径与设计状态一致,使屋盖处于合理的受力状态,同时使结构变形得到有效控制。提升架的选型和布置如图 11 和表 2 所示。

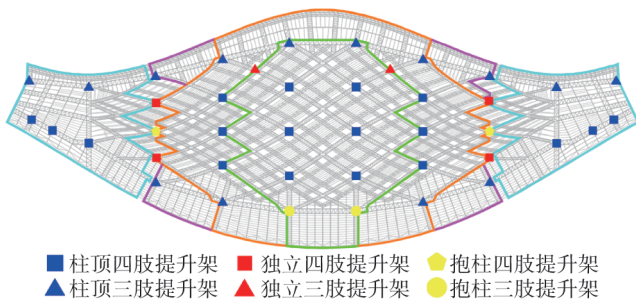


图 11 提升架布置图

Fig. 11 Arrangement of lifting frames

表 2 提升架分类

Table 2 Classification of lifting frames

提升架类型	提升架数量/套	提升点类型	提升点数量/个
柱顶四肢提升架	18	双吊点	36
柱顶三肢提升架	14	双吊点	28
独立四肢提升架	4	双吊点	8
独立三肢提升架	2	单吊点	2
抱柱四肢提升架	2	双吊点	4
抱柱三肢提升架	2	单吊点	2
总计	42	—	80

## 4 基于精细化模拟的施工过程分析

### 4.1 提升措施整体建模的精细化模拟

以往项目在进行提升施工模拟时多采用在提升点处施加弹性支承边界的方式来模拟提升措施对被提升结构

的边界约束作用,忽略了提升措施和结构柱的刚度、强度等影响,计算结果的准确性有待考量。

针对此问题,本文采用了提升措施整体建模<sup>[7-9]</sup>的方法对结构施工过程进行精细化模拟,建模时采用实际措施中使用构件的材质、规格和边界条件,将提升架等施工措施与结构模型同步建立,提升措施与结构共同受力,协调变形。

以分区 A 为例,提升点编号如图 12 所示。分别采用整体建模方法和边界模拟方法得到各提升点反力的模拟值。同时,现场采用计算机控制的液压提升监测系统可实时监测各个提升点处的提升器油压值,根据液压提升器的性能标定参数可得到油压与提升力间的函数关系,从而计算得到提升反力的实测值。模拟值与实测值的对比情况如表 3 和图 13 所示。

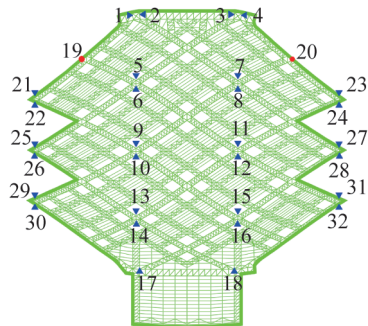


图 12 分区 A 提升点编号

Fig. 12 Lifting point numbers of zone A

与边界模拟的反力结果相比,整体建模情况下同一提升架的两个吊点间的反力更加接近,如点位 A-21/A-22,说明提升架体的存在会使两个吊点间的反力趋于平衡,更接近真实受力状态。而且,对于分区边界附近的提升点,采用边界模拟时会出现提升点受压的情况,如点位 A-1,该情况与事实不符,从而说明了边界模拟方法是有局限性的。总体而言,采用整体建模方法时提升反力的模拟值与实测值偏差范围在  $-13.3\% \sim 13.7\%$  之间,采用边界模拟方法时提升反力模拟值与实测值偏差范围在  $-121.8\% \sim 135.3\%$  之间。图 13 也可清晰反映,整体建模结果与实测结果总体趋势一致,吻合较好,而边界模拟结果与实测结果在少数点位存在较大偏差且波动剧烈,吻合情况较差,尤其是在分区边界附近的吊点位置,模拟结果失真。

考虑到节点实际重量与计算模型存在偏差等因素的影响,采用整体建模方法的提升反力模拟值已具备较高的准确性。对被提升结构进行验算和对提升措施进行设计时,采用整体建模方法计算结果能够满足验算和设计的要求。对于边界模拟方法,个别点位提升反力计算值与实际值的偏差过大,可能导致施工安全隐患。

表3 分区A部分提升反力  
Table 3 Partial lifting force of zone A

提升点位	整体建模反力/kN	边界模拟反力/kN	实测提升反力/kN	整体建模偏差	边界模拟偏差
A-1	785.5	-155.5	713.0	10.2%	-121.8%
A-2	771.3	1 677.7	713.0	8.2%	135.3%
A-5	1 404.4	1 486.6	1 311.0	7.1%	13.4%
A-6	1 389.8	1 373.9	1 300.0	6.9%	5.7%
A-9	1 757.0	1 758.3	1 664.0	5.6%	5.7%
A-10	1 749.3	1 751.1	1 664.0	5.1%	5.2%
A-13	1 122.5	1 446.1	1 008.0	11.4%	43.5%
A-14	1 128.7	874.9	1 008.0	12.0%	-13.2%
A-17	3 319.9	3 323.3	3 370.0	-1.5%	-1.4%
A-19	833.5	902.6	860.0	-3.1%	5.0%
A-21	387.1	9.8	346.0	11.9%	-97.2%
A-22	364.7	633.2	388.0	-6.0%	63.2%
A-25	472.6	276.6	456.0	3.6%	-39.3%
A-26	411.7	492.7	445.0	-7.5%	10.7%
A-29	393.8	346.9	454.0	-13.3%	-23.6%
A-30	472.2	412.2	454.0	4.0%	-9.2%

注:整体建模偏差=(整体建模反力-实测提升反力)/实测提升反力×100%;边界模拟偏差=(边界模拟反力-实测提升反力)/实测提升反力×100%。

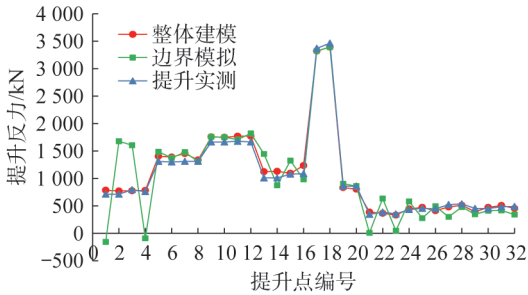


图13 分区A提升反力对比图

Fig. 13 Comparison of lifting force in zone A

### 4.2 考虑拼装初始缺陷的精细化模拟

桁架结构拼装时支撑点的数量一般是有限的,桁架结构在拼装阶段将发生变形且不可逆,拼装变形的存在对结构提升施工而言是一种初始缺陷。以往项目在进行施工模拟时,出于对建模方便简易和计算效率的考虑,大多会忽略结构拼装阶段初始缺陷的影响。本文通过设置拼装施工步的方式对结构施工进行精细化模拟,按照实际拼装步骤建模,来反映结构的拼装变形对提升施工的影响。

以累积提升A区为例,考虑拼装变形影响后得到A区提升时的变形及应力比云图(图14)。结构提升阶段的累积最大变形为156 mm,发生在陆侧悬挑区端部;提升

时最大应力比为0.76,发生在受力集中较大的提升吊点处,如A-5~A-12位置。

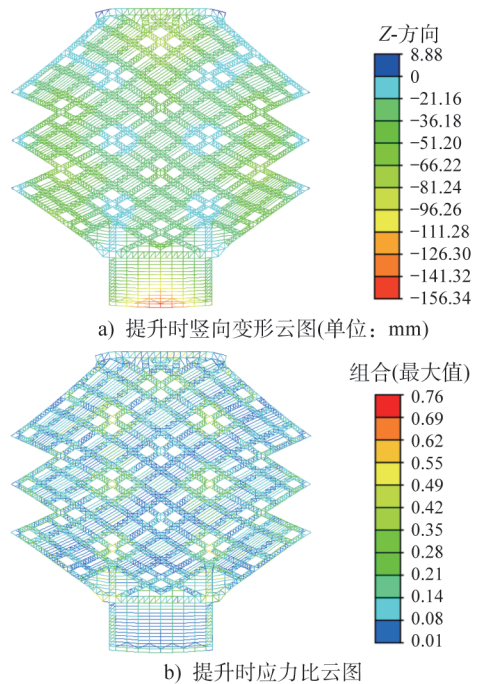


图14 分区A提升施工计算结果云图

Fig. 14 Contour of calculation results for zone A

结构在考虑拼装缺陷后的变形及受力结果与未考虑拼装缺陷时的结果之差值如图15所示。考虑拼装初始缺陷后,结构提升时的最大竖向位移明显较未考虑拼装初始缺陷影响时大,整体差值在2~8 mm之间,陆侧悬挑区竖向变形增大更加明显,最大差值达16 mm。结合《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)<sup>[10]</sup>与《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205—2020)<sup>[11]</sup>中相关要求,结构施工完成时的挠度值不应超过当前荷载作用下挠度值的1.15倍。考虑拼装初始缺陷影响后的结构变形最大增加值对于分区提升时的最大变形占比达10.2%,拼装初始缺陷对结构变形的影响已不可忽略。

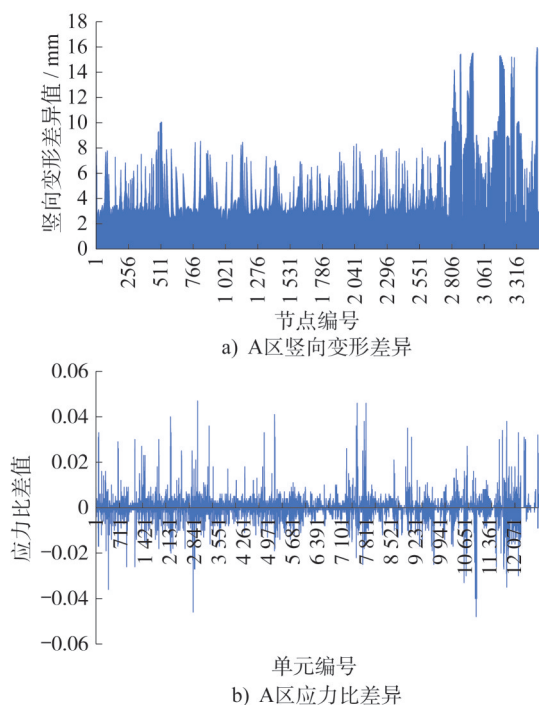


图15 分区A提升施工计算结果差异

Fig. 15 Difference in calculation results for zone A

而考虑拼装影响后分区结构的杆件应力比变化是较小的,整体变化幅度在-0.02~0.02之间,个别杆件应力比变化较大但最大值仅为±0.05,杆件应力变化幅度不超过15 MPa,可认为拼装初始缺陷对分区结构提升时的受力影响是有限的。

另外,如果累积提升分区之间设有临时提升架,如图7中位置①处,其最不利荷载工况发生在B区与A区对接时的拼装阶段。此类提升点在分区累积提升时较为常见,该点位承担的相邻分区拼装荷载往往容易被忽略,可能导致该类提升架的设计承载力不足,带来安全风险。若采用考虑拼装初始缺陷的精细化模拟,则能够模拟该类提升架的所有最不利工况,规避施工风险。

### 4.3 施工过程模拟结果分析

采用精细化模拟的方法进行全过程施工分析,并与结构一次成型态进行对比,结果如图16所示。

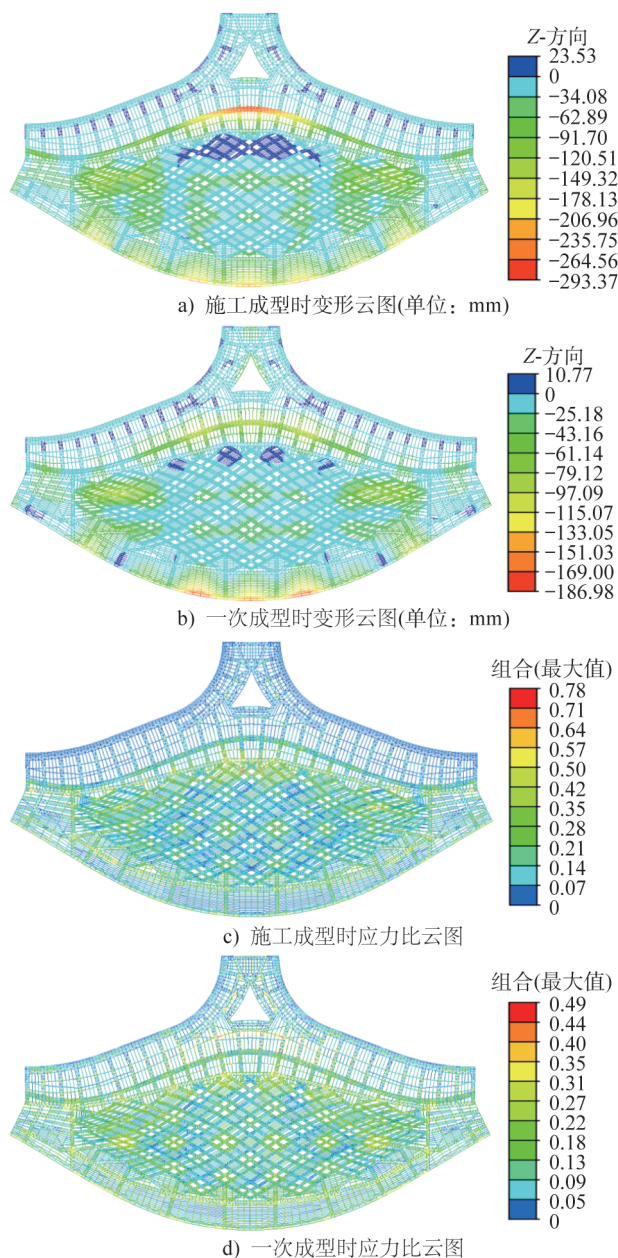


图16 施工全过程模拟结果

Fig. 16 Simulation results of the entire construction process

从变形角度,屋盖一次成型时最大变形发生在陆侧悬挑区,最大值为187 mm,而施工成型时最大变形发生在高低屋盖连接位置的悬挑区,最大值为293 mm。结构施工完成时的位形状态与设计状态不符,因此必须在施工前对该结构进行预起拱处理,从而抵消施工附加变形的影响。利用结构施工成型时的竖向变形值减去一次成型时的竖向变形值(图17a)),剔除正向变形差后确定结

构预起拱值(图17b))。结构的整体预起拱值在30~50 mm之间,但在屋盖的陆侧、空侧悬挑端部预起拱值较大,最大值达190 mm,可见屋盖的超长悬挑构件在施工过程中的变形是非常值得注意的。根据预起拱值在结构深化设计阶段可将对应杆件及节点位置整体抬高,届时可与施工过程中产生的变形相互抵消,确保施工成型时的结构最大挠度值不超过设计挠度值的1.15倍。

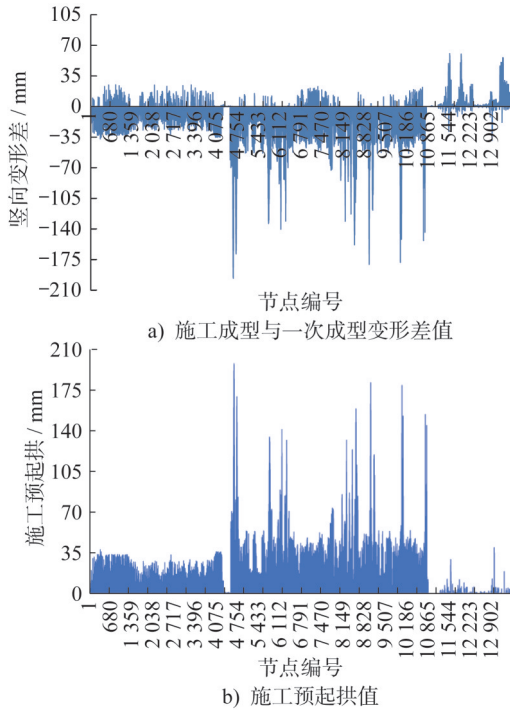


图17 施工预起拱计算结果

Fig. 17 Calculation results of pre-arching construction

从受力角度,屋盖一次成型时的最大应力比为0.49,而施工成型时最大应力比为0.78,说明施工过程导致结构杆件产生了附加内力,可能影响结构的设计安全冗余度。因此,施工全过程模拟不仅要保证施工过程中的各个阶段结构是安全的,还需要保证结构投入使用后的受力安全。根据设计信息得到结构的设计应力比如图18a)所示,杆件最大应力比不超过0.85,设计安全冗余度充足。施工成型后叠加使用荷载得到结构的综合应力比如图18b)所示,可见杆件应力比总体略有增加,最大应力比不超过0.90,其中应力比超过0.85的单元仅30根,整体而言,施工成型后的结构仍具有足够的安全冗余度。

### 5 卸载过程分析

卸载的过程是屋盖荷载由提升架体承担逐渐转向由支座杆件承担的过程。

结构提升点数量多,卸载工作量大,需要合理安排卸载批次和顺序,符合工程施工实际情况的同时不影响结

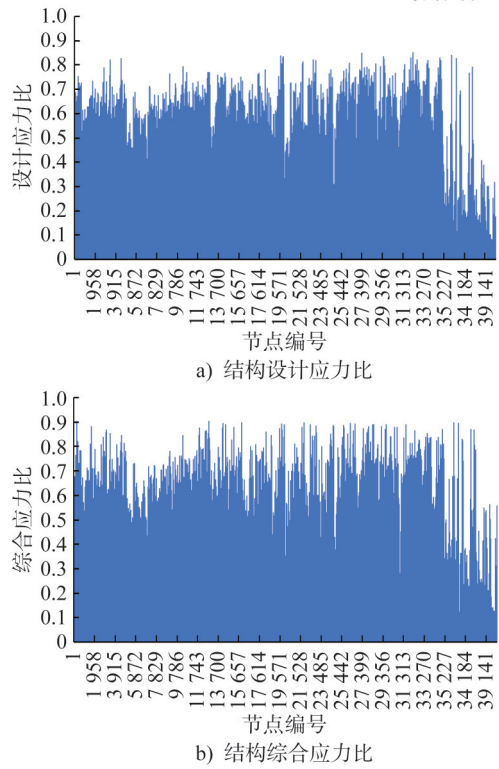


图18 结构综合应力比计算

Fig. 18 Calculation of comprehensive stress ratios of structure

构设计受力要求<sup>[12]</sup>和位形状态。本文采用了总体由中间向两侧、由空侧向陆侧方向对称卸载的卸载顺序(图19),共三个批次,每批次按图示序号依次卸载。

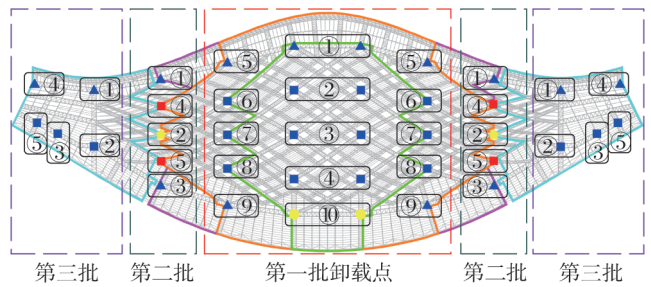


图19 屋盖卸载顺序

Fig. 19 Unloading sequence of the roof

对于存在临时提升点的工程,应特别注意临时提升点的卸载顺序。如图19所示,第二批卸载时应先卸载固定提升点再卸载临时提升点,与先卸载临时提升点再卸载固定提升点的方式进行对比,不同卸载顺序下各个卸载点的平均反力变化情况如图20所示。

当优先卸载临时提升点时,每卸载一个点位都将导致其他提升点的平均反力出现明显变化,最大变化值达146 kN,最大变化率为18.8%。提升点反力明显变大会使结构和提升架在卸载阶段处于不利状态甚至发生破

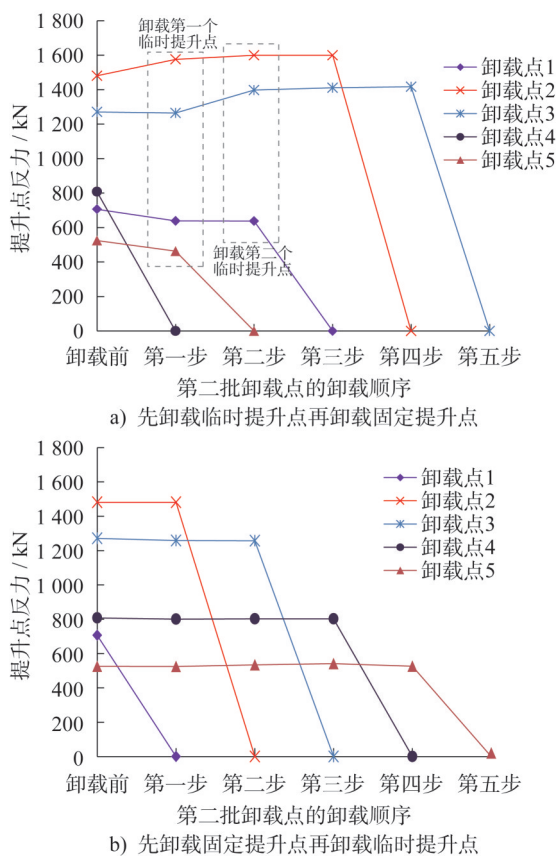


图20 不同卸载顺序的对比

Fig. 20 Comparison of different unloading sequences

坏。当优先卸载固定提升点时,每个提升点的反力在卸载过程中变化幅度都很小,最大变化率仅为3.2%,说明该卸载顺序对结构和提升架受力的影响最小。

当优先卸载临时提升点时,其荷载将传递至相邻的提升架上导致其他点位提升反力的变化明显,而荷载未能直接传递至支座杆件,卸载传力路径与结构理想受力状态不符。先将固定提升点卸载,使屋盖与结构柱形成稳定的受力体系后再卸载临时提升点,此时该点位的荷载将传递至相邻的支座杆件上,传力路径更加合理。

## 6 结论

本文针对合肥新桥机场T2航站楼钢结构屋盖的累积提升工艺进行了研究,验证了施工方案的可行性,具体结论如下:

(1) 本文提出了一种基于结构等高线和受力特性的累积提升分区规划方法,先根据分区的最优拼装高度结合等高线形状确定分区大致轮廓,再根据结构自身的受力特性保证分区结构几何不变性,进而确定分区的精确界线。

(2) 对于结构形式复杂、累积提升面积大,提升重量大的工程,通过柱顶提升架、抱柱提升架和独立提升架的组合应用可较好地保证结构在施工过程中传力路径的合

理性,并最大化减少措施用钢量,解决施工过程中的结构干涉问题。

(3) 在大跨空间结构提升施工模拟时,应采用提升措施整体建模和考虑拼装缺陷的精细化模拟方法,前者直接影响结构和提升措施的受力情况,后者可使结构的变形模拟更为精确,否则将会增加安全风险并影响结构的成型状态。

(4) 对于同时存在固定提升点和临时提升点的情况,应先卸载固定提升点再卸载临时提升点,临时提升点的荷载在结构形成稳定体系后由支座杆件承担,从而不会影响其他提升架体和结构的受力状态,传力路径更加合理。

## 参考文献:

- [1] 蔡柳鹤, 成精, 邹海涛, 等. 成都万达城水雪综合体中、高区钢结构工程施工方案比选[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(4): 135-140, 148. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.04.016. CAI Liuhe, CHENG Jing, ZOU Haitao, et al. Construction scheme comparison for the central and upper steel structure of wanda paradise for swimming and skiing in Chengdu [J]. Progress in Steel Building Structures, 2020, 22(4): 135-140, 148. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2020.04.016. (in Chinese)
- [2] 张胜杰, 贾宝荣, 陈颖. 超高重型大跨度室内滑雪场钢屋盖建造技术[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(9): 100-106. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.09.011. ZHANG Shengjie, JIA Baorong, CHEN Ying. Construction technology of steel roof for ultra-high heavy-duty and large-span indoor ski resorts [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(9): 100-106. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.09.011. (in Chinese)
- [3] 王洽亲, 张其林, 罗晓群, 等. 重庆江北机场T3B航站楼大厅屋盖钢结构提升施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(2): 1-6. DOI:10.7672/sjgs2024020001. WANG Qiaqin, ZHANG Qilin, LUO Xiaoqun, et al. Construction technology of steel structure lifting for the hall roof of Chongqing Jiangbei airport terminal T3B [J]. Construction Technology, 2024, 53(2): 1-6. DOI:10.7672/sjgs2024020001. (in Chinese)
- [4] 李家帅, 任浩旭, 李超, 等. 厦门翔安国际机场航站楼三重檐屋盖提升施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(5): 11-16, 50. DOI:10.7672/sjgs2024050011. LI Jiashuai, REN Haoxu, LI Chao, et al. Lifting construction technology of Xiamen Xiang'an international airport terminal triple eaves roof [J]. Construction Technology, 2024, 53(5): 11-16, 50. DOI:10.7672/sjgs2024050011. (in Chinese)
- [5] 杜立春. 刚度不均匀重载钢结构分区域累积提升及测控技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(16): 115-119. DOI:

- 10.7672/sgjs2022160115.
- DU Lichun. Sub-regional cumulative lifting and measurement and control technology of heavy-duty steel structure with uneven stiffness [J]. Construction Technology, 2022, 51 (16) : 115-119. DOI: 10.7672/sgjs2022160115. (in Chinese)
- [ 6 ] 马洁烽, 邢遵胜, 吴楚桥, 等. 西安咸阳国际机场 T5 航站楼钢屋盖旋转提升施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(2): 7-14. DOI:10.7672/sgjs2024020007.
- MA Jiefeng, XING Zunsheng, WU Chuqiao, et al. Rotating lifting construction technology of steel roof for Xi'an Xianyang international airport terminal T5 [J]. Construction Technology, 2024, 53 (2) : 7-14. DOI: 10.7672/sgjs2024020007.(in Chinese)
- [ 7 ] 柏海, 李红现, 曹海良, 等. 大型机场航站楼钢结构屋盖提升架与吊点模拟分析[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(8): 10-15. DOI:10.7672/sgjs2023080010.
- BAI Hai, LI Hongxian, CAO Hailiang, et al. Lifting frame and lifting point simulation analysis of steel structure roof for large airport terminal [J]. Construction Technology, 2023, 52(8): 10-15. DOI:10.7672/sgjs2023080010.(in Chinese)
- [ 8 ] 邹海涛, 冯萍, 蔺军, 等. 某体育场大悬挑钢屋盖支撑卸载过程分析[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(12): 94-101. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.12.010.
- ZOU Haitao, FENG Ping, LIN Jun, et al. Analysis for support unloading process of large cantilevered steel roof of a stadium [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(12) : 94-101. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.12.010.(in Chinese)
- [ 9 ] 田黎敏, 郝际平, 方敏勇, 等. 提前卸载临时支撑对大跨度空间结构施工过程的影响分析[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(2): 52-56.
- TIAN Limin, HAO Jiping, FANG Minyong, et al. Analysis on the effect of unloading temporary supports in advance on construction for large-span spatial structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(2): 52-56. (in Chinese)
- [10] JGJ 7—2010 空间网格结构技术规程[S].
- JGJ 7—2010 Technical specification for space frame structures [S]. (in Chinese)
- [11] GB 50205—2020 钢结构工程施工质量验收标准[S].
- GB 50205—2020 Standard for acceptance of construction quality of steel structures[S]. (in Chinese)
- [12] 范重, 刘先明, 范学伟, 等. 大跨度空间结构卸载过程仿真计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4): 19-25. DOI:10.19815/j.jace.2011.04.003.
- FAN Zhong, LIU Xianming, FAN Xuewei, et al. Simulation and calculation method of unloading process of long-span spatial structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28 (4) : 19-25. DOI: 10.19815/j.jace.2011.04.003.(in Chinese)