

西安咸阳国际机场 T5 航站楼超大面积异形曲面网架 提升关键技术研究

张之浩^{1*}, 李晓威², 马洁烽¹, 杨熙华¹

(1. 浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江 绍兴 312030; 2. 西部机场集团有限公司, 西安 710018)

摘要: 大跨异形曲面网架常用于高铁站房、机场航站楼等公共建筑的屋盖结构, 考虑其结构特点一般采用提升方式进行施工。然而, 对于超大面积异形曲面网架, 由于建筑造型各有不同且下部土建结构错层散布, 无法采用单一的提升方式进行施工。本文以西安咸阳国际机场 T5 航站楼项目为背景, 介绍了屋盖钢结构的施工思路。针对局部屋盖网架下弦高差大的特点, 提出了异速等比同步旋转提升技术, 该技术通过理论分析最大化降低了结构的拼装高度, 使结构能够绕单轴旋转, 减小了旋转提升的操作难度。根据项目实际情况介绍了具有较强实用性的空腹式提升架的形式与设计方法, 对空腹式提升架不同构造形式对结构性能的影响进行了分析与对比, 并给出推荐的提升架构造类型。此外, 本文还提出了一种新型的装配式提升梁, 并从受力性能、实用价值等方面将其与传统提升梁进行对比分析, 为后续钢结构提升梁的设计与施工提供参考。

关键词: 超大面积异形曲面网架; 异速等比同步旋转提升技术; 空腹式提升架; 装配式提升梁

中图分类号: TU758.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)02-0056-09

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240819001

Research on Key Technologies for Ultra-Large-Area Irregular Curved Space Grid Structures: Xi'an Xianyang International Airport Terminal 5

ZHANG Zhihao^{1*}, LI Xiaowei², MA Jiefeng¹, YANG Xihua¹

(1. Zhejiang Jingong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing 312030, China; 2. China West Airport Group Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

*Corresponding author: 815492579@qq.com

Abstract: Large-span irregular curved space grid structures are commonly used in the roof structures of public buildings such as high-speed railway stations and airport terminals. Due to their structural characteristics, they are generally constructed using lifting methods. However, for ultra-large-area irregular curved space grid structures, due to the diverse distribution of building shapes and the staggered distribution of lower civil structures, a single lifting method cannot be used for construction alone. This paper introduces a construction idea of the roof steel structure based on the terminal 5 (T5) project of Xi'an Xianyang International Airport. In response to the large difference in chord height under the local roof truss, a synchronous rotation lifting technology with equal speed ratio is proposed. This technology minimizes the structural assembly height through theoretical analysis, completes rotation around a single axis, and simplifies the operation difficulty of rotation lifting. Based on the actual conditions of the project, this paper introduces the practical form and design method of the spaced built-up lifting frame without intermediate lacing or battens, analyzes and compares the influence of different construction forms of the lifting frame, and provides recommended

收稿日期: 2024-08-19

作者简介:

张之浩(1997—), 男, 学士, 工程师, 主要从事钢结构设计与施工技术研发方面的工作。E-mail: 815492579@qq.com。(通信作者)

types of lifting frame construction. At the same time, a new type of prefabricated lifting beam is proposed and compared with traditional lifting beams in terms of stress performance and practical value, providing a reference for the design and construction of steel structure lifting beams in the future.

Keywords: ultra-large-area irregular curved space grid structure; synchronous rotation lifting technology with equal speed ratio; spaced built-up lifting frame; prefabricated lifting beam

随着我国经济的快速发展,近十年来,国内兴建了大量的机场、高铁站等交通枢纽工程,这些工程的屋盖结构造型新颖,且多为自由曲面形式,并具有超大面宽、超大进深和较大高差等特点。由于网架布置灵活、易于找形,在工程实际中,异形屋盖常常采用网架结构形式。提升施工技术由于高空作业量少、施工效率高等特点被广泛应用于大面积异形曲面钢屋盖项目的施工中。

目前,在国内外大面积异形曲面钢屋盖提升施工工程实例较多,提升技术也相对成熟。由于工程结构形式和施工条件的不同,需按照实际情况制定不同的提升方案,如北京新机场航站楼核心区钢屋盖^[1]采用分块累积提升施工;潮汕南站核心区屋盖^[2]采用整体提升施工;郑州南站站房钢屋盖^[3]采用分区提升施工;杭州西站钢屋盖^[4]、济青铁路红岛站钢屋盖^[5]采用旋转提升施工。

对于超大面积且结构高差较大的钢屋盖结构,本文提出了一种组合式提升施工技术,该技术包含了整体提升、累积提升、旋转提升等多种提升施工工艺,能够克服混凝土楼盖结构错层散布、施工工期短等困难。以西安咸阳国际机场 T5 航站楼项目为例,介绍了“分区旋转+累积提升+整体提升”方案及提升关键施工技术。此外,本文研究了具有较强实用性的空腹式提升架的形式与设计方法,并对空腹式提升架不同构造形式对结构性能的影响进行分析与对比,给出了推荐的提升架构造类型;设计了一种装配式提升梁,该提升梁制作简单、可重复利用;提出了超大面积异形曲面网架提升的关键技术,并围绕关键技术与提升措施的设计要点展开重点论述。

1 工程概况及方案简述

西安咸阳国际机场 T5 航站楼长 522 m、宽 286 m、高 46 m,投影面积达 149 000 m²,下部为错层散布楼盖,上部为仿歇山顶造型的超大面积钢网架屋盖(网格尺寸 4.5 m×4.5 m,网架高度约 3.5 m),由 4 列 Y 形柱和边缘 2 列幕墙斜柱支撑,支座主要跨度为 58 m。项目建筑效果如图 1 所示,屋盖平面图和立面图如图 2 所示。

西安咸阳国际机场 T5 航站楼独特的宫殿式曲面造型导致屋盖相较于常规屋盖存在较大的高差,最大高差值达 14.3 m,故屋盖划分为高、中、低三区进行施工。作为屋盖网架拼装主要场地的下部土建楼层错综复杂,包括 7.3 m、14.3 m 及 20.5 m 三个土建标高层,且局部区域还存在大量洞口、连桥及房中房结构。Y 柱支撑体系



图 1 咸阳机场建筑效果图

Fig. 1 Architectural rendering of Xianyang Airport

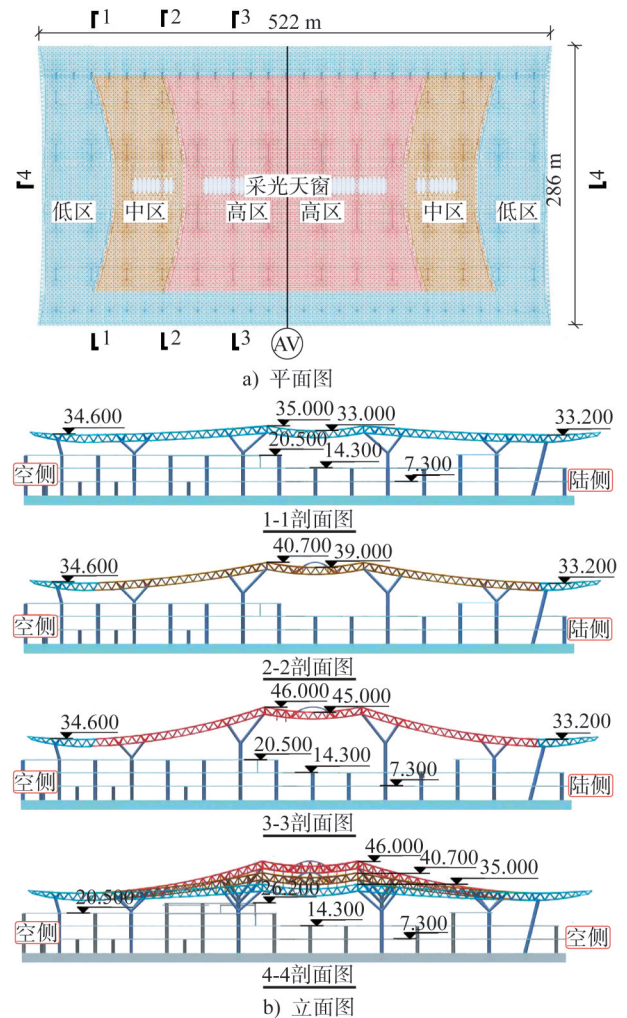


图 2 咸阳机场钢网架屋盖示意图(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of the steel grid roof of Xianyang Airport (unit:m)

与结构屋盖间存在大面积干涉区域,这对结构屋盖提升方案的制定与实施带来了很大的干扰。

根据项目复杂的现场施工条件和双曲异形的结构特点,本文提出了一种适用于超大面积异形曲面网架组合提升的施工工艺,即采用整体提升、累积提升及旋转提升相结合的施工方法。首先依据混凝土楼层分布和高、中、低区分界线,将航站楼屋盖分为7个施工大区,单个大区又根据楼层标高细分为3~4个小区,共32个区域,如图3所示。其中,北/南区一区主要采用累积提升的施工工艺,施工三区采用“旋转提升+累积提升+分块吊装”组合的施工工艺,施工四区采用旋转提升的施工工艺,其他分区主要采用楼面拼装、整体提升的施工工艺。全场共设置了201个提升点,合计263台提升器。

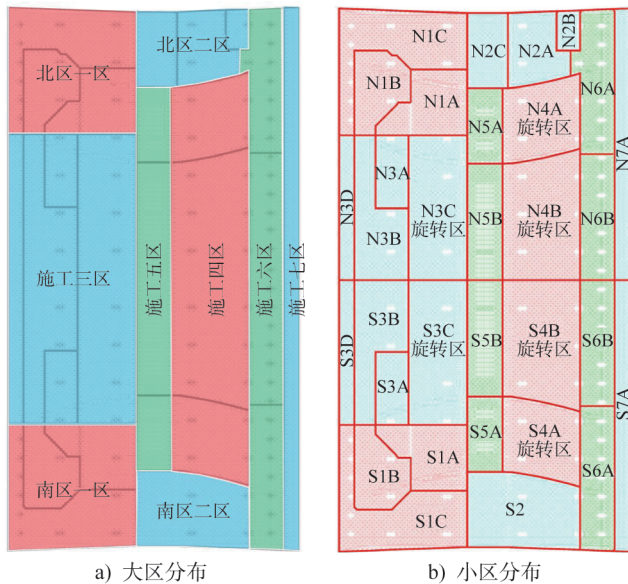


图3 屋盖施工分区

Fig. 3 Roof construction zonings

2 施工关键技术

2.1 异速等比同步旋转提升施工技术

有别于传统的原设计位形拼装后提升的施工方法,异速等比同步旋转提升施工技术^[6]将屋盖钢结构以综合拼装高度最小为原则,绕特定旋转轴旋转一定角度后进行拼装,分块单元以“异速、等比、同步”为提升施工控制原则,即各吊点需按不同速率等比例平稳提升。采用新型旋转提升数字化控制技术将屋盖旋转至设计位形后再整体提升就位,完成屋盖钢结构施工,如图4所示。

2.1.1 项目旋转提升方案

屋盖结构网架分块高差最大达到14.3 m,为解决拼装胎架过高导致的措施费高、拼装效率低、安全性差等问题,部分网架分块采用旋转提升方式进行施工。

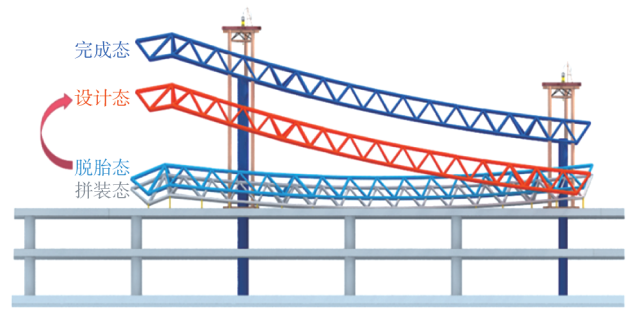


图4 旋转提升示意

Fig. 4 Rotating lifting diagram

项目旋转提升主要应用于4个分区,分别为3-3区、4-1区、4-2区及4-3区,如图5所示,其中4-1区和4-2区高差为9.0 m,3-3区高差为11.6 m,4-3区高差为14.3 m。

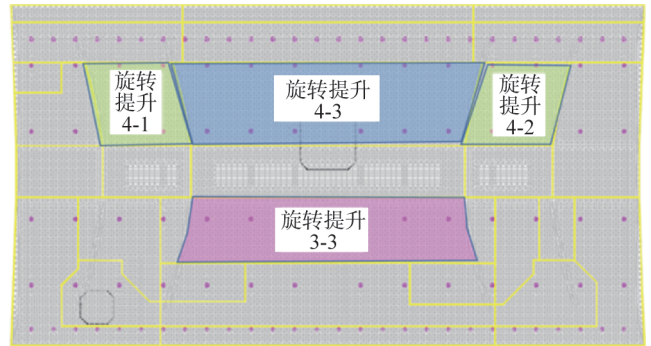


图5 旋转提升分区

Fig. 5 Rotating lifting zonings

2.1.2 旋转轴及旋转角度确定^[7]

旋转提升的首要步骤为确定理论最优的拼装胎架卧拼位形,而常规网架拼装采用下弦球支撑,因此最优拼装位形为下弦球距地面之和最小位形。

以上述旋转提升3-3区为例,定义一平面E,使得下弦球点至该平面的距离和最短。基于最小二乘法理论,根据网架下弦点坐标通过大型通用有限元程序完成线性回归计算,获得平面方程(1)。

$$0.2459x - (2.1509 \times 10^{-7})y - z + 2644.8 = 0 \quad (1)$$

式中: x, y, z 为网架下弦点的三维坐标 (x, y, z) 。

拟合结果如图6所示,图中黑色圆点表示异形曲面结构的下弦球点位,平面表示所拟合的下弦平面。

由此平面E与地面的表达式 $(Z=0)$ 获得旋转轴的方向向量,转轴方向向量 \vec{R} 的计算结果如图7所示,两个平面的交线方向即为向量 \vec{R} 的转动方向,如公式(2):

$$\vec{R} = (-2.1509 \times 10^{-7}, -0.2459, 0) \quad (2)$$

结合重心坐标 (x_g, y_g, z_g) 和式(2),可推导出旋转轴所在直线的表达式见式(3):

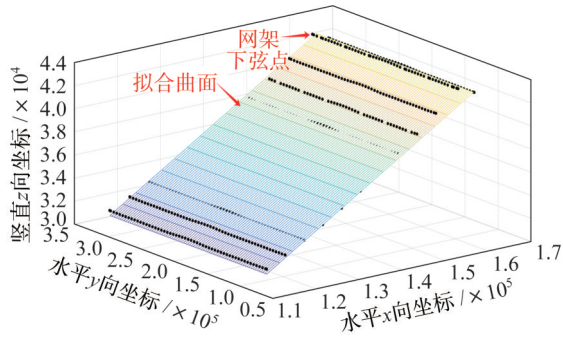


图6 拟合结果

Fig. 6 Fitting results

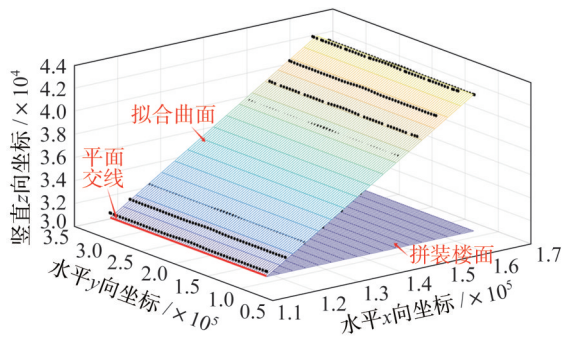


图7 平面交线图

Fig. 7 Plane intersection line diagram

$$\begin{cases} \frac{x-x_g}{0.2459} = \frac{y-y_g}{-2.1509 \times 10^{-7}} \\ z = z_g \end{cases} \quad (3)$$

旋转角度 α 的表达式见式(4):

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{0.2459^2 + (-2.1509 \times 10^{-7})^2 + 1}} = 0.971 \quad (4)$$

$$\Rightarrow \alpha = 13.8^\circ$$

2.2 新型旋转提升数字化控制系统

目前常规液压提升控制技术只能实现多个提升点的单一行程内的同步速率控制,而分块结构各吊点旋转过程中的提升高度均不同,为实现旋转过程中从拼装态到设计态平稳均衡过渡的目标,各吊点需按不同速率进行提升。因此,项目工作人员开发了一套新型旋转提升数字化控制系统,如图8所示。其基本原理如下:

定义所有提升吊点的提升总行程量为 $h_1 \sim h_{\max}$, h_{\max} 为旋转过程中提升高度最大的点,假设所用提升器基本行程为 s ,提升 n 个标准行程后,剩余提升高度为非标准行程 l ,其小于 s ,则 h_{\max} 的表达式见式(5):

$$h_{\max} = ns + l \quad (5)$$

每个提升点需提升次数 N 的表达式见式(6):

$$N = n + 1 \quad (6)$$

提升高度最大点单行程的提升高度 h'_{\max} 的表达式见式(7):

$$h'_{\max} = \frac{h_{\max}}{n + 1} \quad (7)$$

第 i 点提升总行程为 h_i ,共计提升 $n + 1$ 次,则每次提升高度 h'_i 的表达式见式(8):

$$h'_i = \frac{h_i}{n + 1} \quad (8)$$

提升过程中,提升控制系统实时监测各点单位行程提升高度,以各点实时提升高度与最大提升高度之比为恒定值、以各提升点同步偏差不超过限定值(图9)为控制准则,对提升过程进行调控。对提升速度快的点进行减速,对于提升速度慢的点进行加速,以此实现各吊点异速等比同步提升。

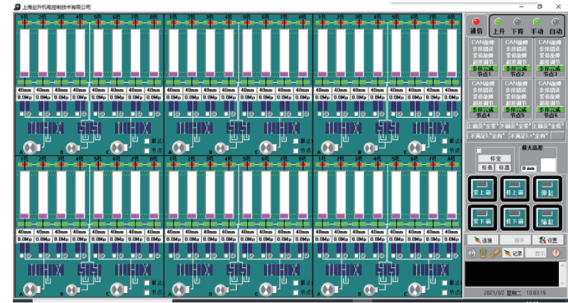


图8 旋转提升数字化控制系统界面

Fig. 8 Rotating lifting digital control system interface



图9 各提升吊点单位行程设置界面

Fig. 9 Unit distance setting interface for all lifting points

将旋转提升分块绕上文旋转轴旋转 13.8° 得到卧拼位形进行拼装,后利用新型旋转提升数字化控制技术逆向旋转至设计位形,项目应用照片如图10所示。

3 提升措施设计

3.1 提升架设计

3.1.1 提升架选型

提升架作为提升施工的关键措施,其设计是否合理对现场施工有着较大的影响。通常提升架设计时往往依托于主结构(图11a),需主结构提供可靠的边界条件,然而针对大跨空间结构,为了控制提升过程中结构的跨中挠度,需要额外设置独立提升架。目前独立提升架常采

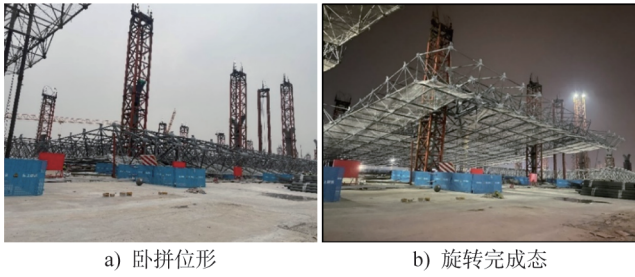


图 10 项目应用

Fig. 10 Project application

用四肢格构式提升架(图 11b)),该形式的提升架存在构造复杂、现场安拆不便等问题。因此,本文给出了一种空腹式独立提升架的设计形式及方法。



图 11 提升架

Fig. 11 Lifting frame

以该工程某提升区块为例,其提升点布置如图 12 所示,提升点包括单吊点提升点和双吊点提升点两种类型,每个吊点需设置一个提升器。

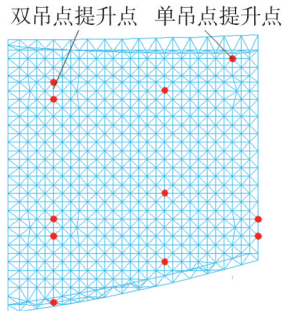


图 12 某分区提升点布置

Fig. 12 Arrangement of lifting points in a certain zone

综合考虑可行性、实用性和经济性,单吊点提升点拟采用3根钢管、底座和顶部标准节组成的3柱空腹式提升架,双吊点提升点采用4根钢管、底座和顶部标准节组成的4柱空腹式提升架(图 13)。采用此种形式提升架有如下几个优势:

(1) 构造简单、综合成本低:提升架主体仅采用3根

或4根钢管,组成构件数量少,传力路径明确。虽然在同等刚度下,空腹式提升架用钢量较传统四肢格构式提升架用钢量大,但由于其构造简单,组装及安拆等人工费相对较低,总体经济性上更为优越。

(2) 加工和安拆方便;工厂仅需加工顶部标准节,其他组拼工作可在现场完成,工期紧急时提升架也可全部在现场完成组拼;构件数量少,相比四肢格构式提升架安装更为方便。

(3) 施工效率高;立柱可以从网架空隙中穿过,只需保证顶部标准节标高高于结构设计标高,提升施工过程中提升架就不会与结构产生干涉,无需拆除结构杆件而产生后补杆件,施工便利性高。

(4) 加固杆件少;因不存在与提升架干涉杆件,无需拆除结构杆件并后装,对结构刚度无削弱,提升施工中替换杆件(或临时加固杆件)少。

然而空腹式提升架也存在着一些不足:

(1) 主构件粗大,堆放场地需求大:空腹式提升架由于主立管基本没有侧向约束,导致构件截面粗大,对于工厂及现场堆放场地需求大,占用空间。

(2) 应用上存在局限性:由于主构件粗大,对网格尺寸有一定要求,否则会因与网格杆件大量干涉而无法安装。

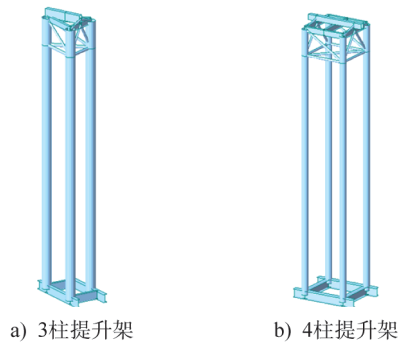


图 13 提升架示意图

Fig. 13 Schematic diagram of lifting frames

3.1.2 空腹式提升架的稳定设计方法

提升架设计时需要保证其在施工过程中的承载力和变形满足要求,此外,由于空腹式提升架立柱没有侧向支撑,还需特别注意其整体稳定性是否满足要求。

空腹式提升架的强度、刚度可通过有限元软件进行分析验算,其稳定性也可采用有限元软件进行屈曲分析来验证。但由于空腹式桁架立柱边界条件难以界定,计算长度系数的选取是空腹式提升架设计的一个难题。以下给出一种确定计算长度系数的建议方法。

以3柱提升架为例,采用midas Gen软件进行屈曲分析,得到空腹式提升架两个方向的临界荷载系数 k_1 、 k_2

(图 14)。

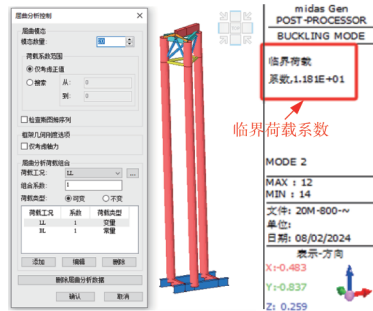


图 14 临界荷载系数计算示意图

Fig. 14 Schematic diagram of critical load factor calculation

根据欧拉公式^[8](9)反推计算长度系数 μ :

$$F_{cri} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad (9)$$

式中： $F_{cri} = k_i$ ； I 为提升架的计算惯性矩； E 为提升架的弹性模量； l 为提升架的高度。

再根据实际提升荷载对提升架进行强度和刚度验算,并进行屈曲分析,其中屈曲分析得出的临界荷载系数一般大于 4.2^[9]。考虑到现场施工时,提升架立柱与底座转换梁之间的连接可能做不到纯刚接,故建议提升架立柱计算长度系数取值时,考虑一定的安全系数,其取值需根据提升架立柱与底座转换梁之间的具体连接构造确定,若采用坡口全熔透连接构造则安全系数取 1.0;若采用连接板或角焊缝连接则需根据节点有限元分析进一步确定。

3.1.3 空腹式提升架稳定性分析对比

空腹式提升架由于长细比较大,通常稳定性起控制作用。其中提升架构造形式的差异对其稳定性影响较大。以 20 m 高度的 3 柱提升架为例,分别对提升架顶部和底部是否进行格构式连接进行屈曲分析和对比,根据研究结果给出建议构造形式。

屈曲分析采用 midas Gen 软件进行,提升架立柱(P700 mm×12 mm)和提升横梁(B606 mm×312 mm×12 mm×20 mm)采用梁单元模拟,腹杆(P180 mm×6 mm)采用桁架单元模拟,在提升横梁中部施加 800 kN 的竖向荷载(图 15),立柱计算长度系数按第 3.1.2 节中的方法根据实际计算得出,钢材均采用 Q345 钢。

首先,在底部、顶部均无格构措施和仅底部有格构措施时,对提升架进行验算分析,得到的结果如图 16 所示。根据结果可知,两种工况下结构立柱最大应力比分别为 0.22 和 0.29,均小于 1,满足承载力要求且富余量较大;而临界荷载系数分别为 0.933 和 3.903,均小于 4.2,无法满

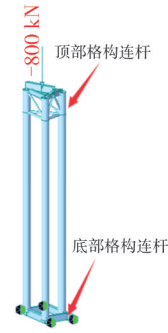
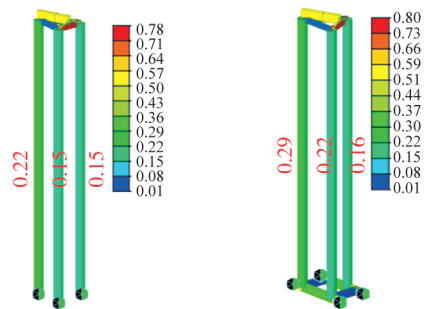


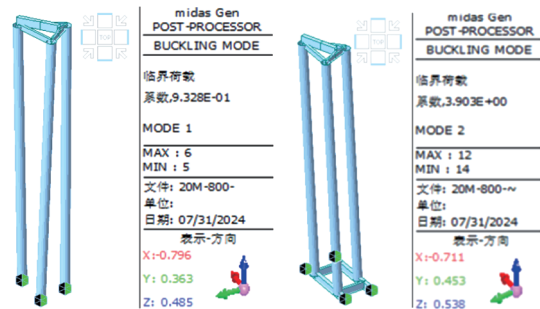
图 15 计算模型

Fig. 15 Calculation model

足稳定性要求。结合现场实际情况,提升架立柱底部与土建结构连接通常采用后植埋件的形式,其连接性能往往达不到刚接设计要求,只能按铰接考虑,且三柱底部相互独立,容易发生整体扭转失稳。而在提升架底部设置一圈连梁,增加了底部的整体刚度,可起到相互约束作用,相较于前者,临界荷载系数较高,整体稳定性更好,但提升效果不明显,仍需改进。



a) 两种构造形式下结构应力比结果



b) 两种构造形式下结构屈曲分析结果

图 16 无格构措施和仅底部设置格构措施验算结果
Fig. 16 Verification results of no grid measures and only bottom grid measures

基于上述分析,在提升架底部设置格构措施的基础上,在架体顶部设置格构措施,其屈曲分析结果如图 17 所示,临界荷载系数达到了 11.810,大于 4.2,相较于仅底部设置格构措施的情况(临界荷载系数 3.903),整体稳定性的提升效果较为明显,这是由于通过增强顶部各支柱

间的约束,降低了各支柱的计算长度系数,提高了稳定承载力。因此,实际工程应用时,建议按照顶部、底部均设有格构措施的方式来设计空腹式提升架,以保证整体稳定性。

3.2 提升梁设计

传统提升梁通常采用单根箱形构件,由工厂加工制作并开设穿锁孔,此工艺较为成熟但也具有一定的缺点,如箱形构件需要工厂加工,周期长;需要开孔,加工工艺相对复杂,同时不便于用于其他用途,较难重复使用等。本节以经济、实用为目标导向,创新地提出了一种实用性较强的装配式提升梁,其构造由传统箱形提升梁优化而来,采用两根H型钢梁及数块连接缀板组合而成,如图18所示。通过将其与传统的提升梁在受力性能及构造经济性

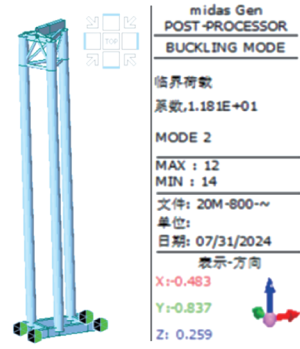


图17 顶、底部均设置格构措施验算结果

Fig. 17 Verification results of grid measures both at top and bottom

两方面进行对比分析,以验证装配式提升梁的优越性。

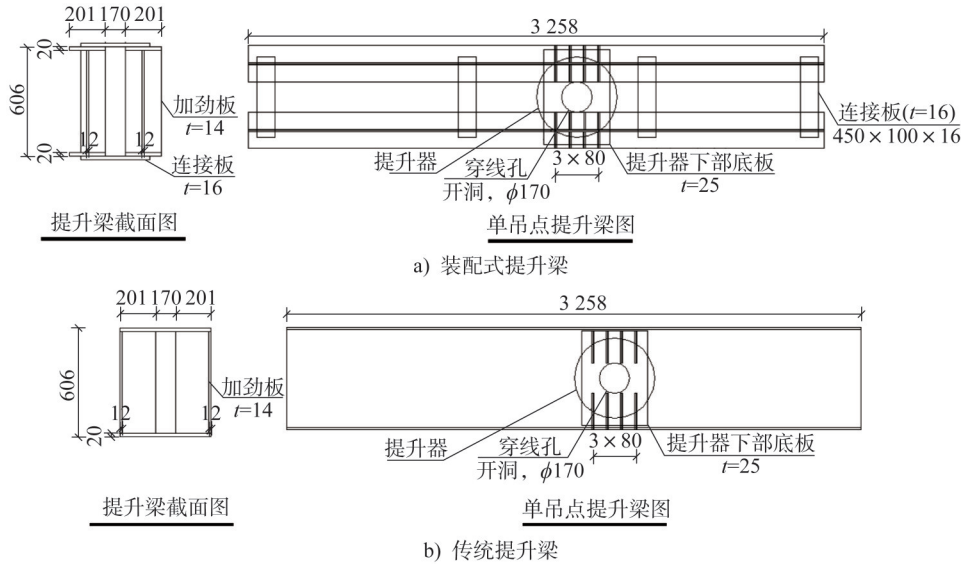


图18 装配式提升梁与传统提升梁(单位:mm)

Fig. 18 Prefabricated lifting beam and traditional lifting beam (unit: mm)

3.2.1 装配式提升梁与传统提升梁受力及变形对比分析

通过有限元软件ABAQUS建立装配式提升梁与传统提升梁模型,单元方面采用修正的二次四面体单元C3D10M模拟,荷载方面,取施工模拟中提取的提升反力,边界条件则根据提升梁实际放置位置在下部设置铰接约束,二者除构造形式不同外,截面尺寸、材质、加劲板规格等参数均保持一致,计算模型如图19所示。

由图20~图21可知(其中图20中左图为提升梁整体应力云图,右图为左图红色箭头最大应力处横切断面的应力云图),在应力方面,传统提升梁最大应力为472.73 MPa,装配式提升梁最大应力为393.08 MPa,后者相较于前者降低17.3%。最大应力均位于支座部位,

即产生应力集中^[10]现象。两者应力整体上不存在超过钢材屈服强度(345 MPa)的情况,均满足承载力要求。在变形方面,传统提升梁最大变形为1.43 mm,装配式提升梁为1.35 mm,两者相差不到0.1 mm。产生上述结果的原因是装配式提升梁腹板更靠近提升点位,此处局部刚度较大,传力路径更为直接,受力性能更好,由图22荷载-位移曲线图中也可看出,在相同荷载作用下,装配式提升梁的刚度比传统提升梁的刚度略大。

3.2.2 装配式提升梁与传统提升梁经济实用性对比

(1) 装配式提升梁可重复利用。装配式提升梁可通过调整连接缀板及补强盖板的规格及位置适应不同提升器型号及提升工况,而传统提升梁因无法调整开孔位置,不但局限性较大且对现场安装精度要求较高。

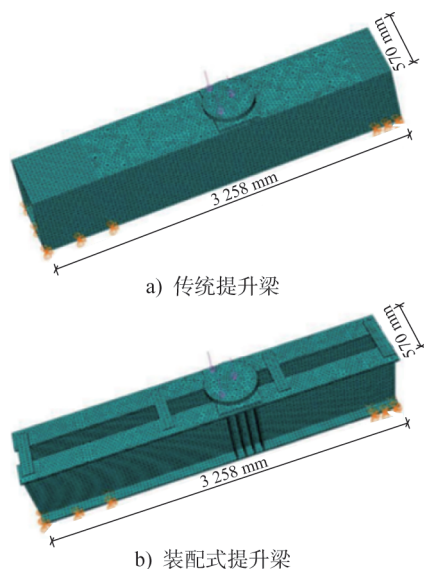


图 19 提升梁计算模型

Fig. 19 Lifting beam calculation models

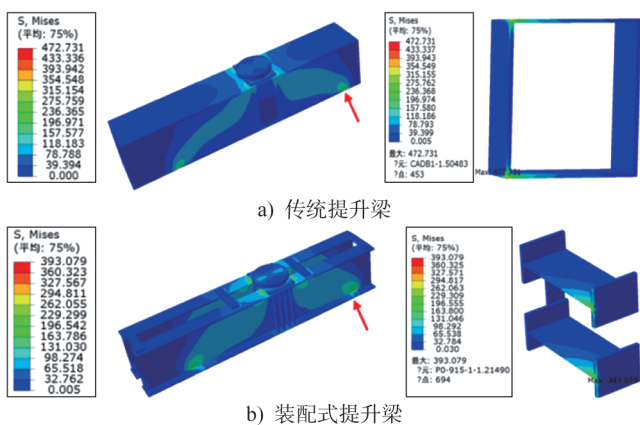


图 20 提升梁 Mises 应力云图 (单位: MPa)

Fig. 20 Mises stress contour of lifting beams (unit: MPa)

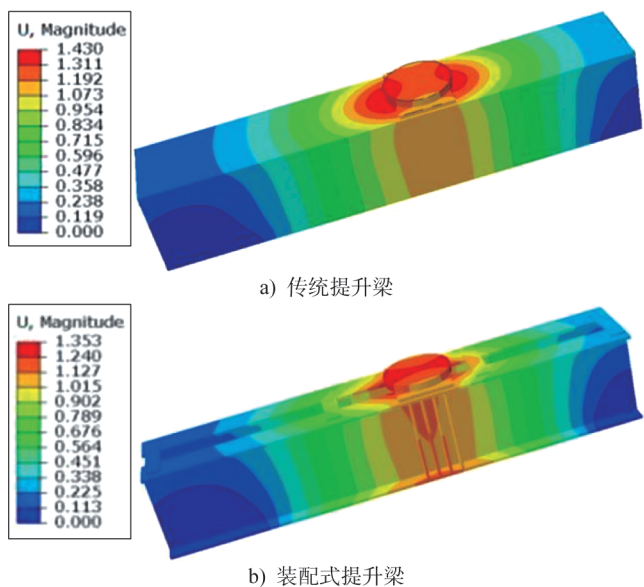


图 21 提升梁位移云图 (单位: mm)

Fig. 21 Displacement contour of lifting beams (unit: mm)

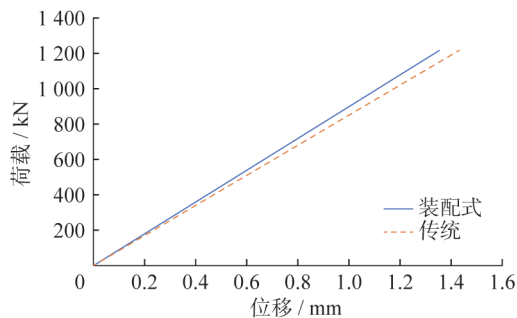


图 22 提升梁荷载-位移曲线

Fig. 22 Load-displacement curves of lifting beams

(2) 装配式提升梁加工简便。装配式提升梁主要构件为两根工字钢和若干连接缀板,现场即可加工制作。而传统提升梁由于对开孔精度要求高,往往只能在工厂制作完毕后运输到现场使用。

(3) 装配式提升梁用钢量更低,以本项目为例,单根传统提升梁需用钢 1 003 kg,装配式提升梁需用钢 879 kg,较传统提升梁用钢量降低 13%,具有更好的经济效益。装配式提升梁实际照片如图 23 所示。



图 23 装配式提升梁照片

Fig. 23 Photo of prefabricated lifting beam

4 结论

(1) 针对超大面积异形曲面网架局部结构下弦高差较大的特点,提出了异速等比同步旋转提升技术,该技术以拼装胎架用量最少和一次旋转到位为原则,通过优化设计调整分块的卧拼位形,最大化降低结构拼装高度,使屋盖结构能够绕单轴完成旋转,简化了旋转提升的操作难度。并以西安咸阳机场项目为例,对旋转提升分块采用此技术来确定旋转轴及旋转角度进行了说明。

(2) 基于可行性、实用性和经济性的原则,给出了提升架采用空腹式构造的形式及其设计方法。通过对提升架顶部和底部是否进行格构式连接进行屈曲分析和对比,结果表明,提升架顶部及底部均设有格构措施连接对提升架稳定性改善效果最明显;提升架仅底部设置格构措施连接对提升架稳定性提升效果较弱。

(3) 设计了一种新型装配式提升梁,并将其与传统

提升梁进行对比分析,结果表明,装配式提升梁在局部受力方面比传统提升梁更优,而在整体受力性能上两者差别不大,均可满足施工需求;与传统提升梁相比,装配式提升梁具备用钢量低、加工简便且可重复使用、适用范围更广等优势。

参考文献:

- [1] 陈君,王留成,雷素素,等.北京新机场航站楼核心区钢屋盖提升关键技术[J].施工技术,2018,47(15):126-129. DOI:10.7672/sgjs2018150126.
CHEN Jun, WANG Liucheng, LEI Susu, et al. Lifting construction technology of steel structure roof in core area of Beijing new airport terminal[J]. Construction Technology, 2018, 47(15): 126-129. DOI: 10.7672/sgjs2018150126. (in Chinese)
- [2] 范立军,稂学斌,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. DOI:10.6043/j.issn.0438-0479.202204021.
FAN Lijun, LANG Xuebin, FAN Chunsheng, 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. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202204021. (in Chinese)
- [3] 蔡蕾,张翔宇,苏芳洲,等.郑州南站站房屋盖钢桁架提升施工技术分析[J].施工技术(中英文),2022,51(6):143-146. DOI:10.7672/sgjs2022060143.
CAI Lei, ZHANG Xiangyu, SU Fangzhou, et al. Analysis on lifting construction technology of steel truss for station building roof of Zhengzhou south railway station [J]. Construction Technology, 2022, 51(6): 143-146. DOI: 10.7672/sgjs2022060143. (in Chinese)
- [4] 杜理强,邹海涛,童宇超,等.杭州西站大跨屋盖钢结构三维激光扫描变形监测技术[J].土木工程信息技术,2022,14(4):41-47. DOI:10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2022.04.07.
DU Liqiang, ZOU Haitao, TONG Yuchao, et al. 3D laser scanning in deformation monitoring for large span roof steel structure of hangzhouxi railway station [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2022, 14(4): 41-47. DOI: 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2022.04.07. (in Chinese)
- [5] 崔嘉慧,王强,邵冰,等.某铁路站房异形屋盖钢结构施工关键技术研究[J].建筑钢结构进展,2022,24(10):80-88. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.10.009.
CUI Jiahui, WANG Qiang, SHAO Bing, et al. Research on key construction technology of steel structure construction of special-shaped roof of a railway station building [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(10): 80-88. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.10.009. (in Chinese)
- [6] 张之浩,贾尚瑞,叶冬晨,等.基于最优化理论的大跨异形曲面结构单轴旋转法[J].钢结构(中英文),2024,39(4):10-16. DOI:10.13206/j.gjgS22121901.
ZHANG Zhihao, JIA Shangrui, YE Dongchen, et al. Uniaxial rotation method for long span special-shaped curved surface structures based on optimization theory [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2024, 39(4): 10-16. DOI: 10.13206/j.gjgS22121901. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 单祖辉.材料力学I[M].北京:高等教育出版社,2000.
SHAN Zuhui. Mechanics of materials I [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [9] 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)
- [10] 梁佳俊,赵小林,刘红军,等.复杂钢管空间节点应力集中系数研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(5):63-72. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.05.008.
LIANG Jiajun, ZHAO Xiaolin, LIU Hongjun, et al. A study on the stress concentration factor of complex steel tubular space joints [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(5): 63-72. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.05.008. (in Chinese)