

大型机场航站楼带大悬挑复杂钢屋盖施工工序研究 及工程应用

吴楚桥¹, 宗 荣², 邢遵胜¹, 吴 迪^{1*}, 杨 飞²

(1. 浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江 绍兴 312030; 2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

摘要: 大型机场航站楼钢屋盖一般包含屋盖大跨度桁架以及陆侧大悬挑桁架两部分, 其施工工序的选定不仅影响钢屋盖在施工阶段、服役阶段的结构安全性, 还影响项目建设过程中的施工工期和施工成本。本文通过对大型机场航站楼钢屋盖的结构形式以及安装和卸载方式进行研究, 归纳出3种施工工序。通过建立航站楼简化模型对3种施工工序进行对比分析, 结合杆件应力、结构变形、支座反力等分析数据, 考虑施工工期、成本等影响因素, 最终给出推荐的施工工序方案。本文的研究成果指导了呼和浩特盛乐国际机场、西安咸阳国际机场T5航站楼的钢屋盖施工, 同时也通过健康监测验证了简化模型分析结果的准确性, 可为后续大型机场航站楼项目的钢屋盖施工提供参考。

关键词: 大型机场航站楼; 陆侧悬挑桁架; 施工工序; 卸载顺序; 健康监测; 简化模型

中图分类号: TU758.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)02-0065-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240820002

Research and Engineering Application of Construction Process for Large Airport Terminal Buildings with Large Cantilever Complex Steel Roofs

WU Chuqiao¹, ZONG Rong², XING Zunsheng¹, WU Di^{1*}, YANG Fei²

(1. Zhejiang Jinggong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing 312030, China; 2. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China)

*Corresponding author: 771594262@qq.com

Abstract: The steel roof of a large airport terminal generally consists of a large-span roof truss and a large cantilever truss on the landside. The construction process affects not only the safety of the steel roof during the construction and service stages but also affects the duration and cost during construction. In this study, three construction processes were summarized by investigating the structural form, installation and unloading sequence of the large airport terminals. By using a simplified analytical model of the airport terminal, a recommended process scheme was ultimately presented by conducting a comprehensive evaluation of the analytical results such as member stress, structural deformation, and support reactions, as well as other influence factors such as duration and cost during construction. The findings in this study successfully guided the steel roof construction of the Hohhot Shengle International Airport and the T5 terminal of Xi'an Xianyang International Airport. Furthermore, the accuracy of the analytical results obtained from the simplified model has been verified by health monitoring, which can serve as a reference for the construction of other

收稿日期: 2024-08-20

作者简介:

吴楚桥(1990—), 男, 学士, 工程师, 主要从事钢结构设计和施工技术方面的研究。E-mail: 466683286@qq.com。

通信作者:

吴 迪(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事钢结构设计和施工技术方面的研究。E-mail: 771594262@qq.com。

large airport terminal projects in the future.

Keywords: large airport terminal; land-side cantilever truss; construction process; unloading sequence; health monitoring; simplified model

为满足使用功能和建筑外形美观的需求,大型机场航站楼屋盖结构一般呈现为航站楼内部跨度大、陆侧雨棚悬挑长的结构特征,如:呼和浩特盛乐国际机场^[1]航站楼进深177 m,陆侧屋盖悬挑38 m;西安咸阳国际机场^[2]T5航站楼进深286 m,陆侧屋盖悬挑30 m。此类结构施工工序的选定一直以来是钢结构施工的难点,采用不同的施工工序对建筑物屋面系统、幕墙系统甚至结构安全有较大影响。随着中国钢结构建造技术的发展,目前针对仅涉及大跨度的结构(如航站楼、体育馆等)和仅涉及大悬挑的结构(如体育场罩棚等),其施工工序均较为成熟,安装过程与卸载过程相对独立。北京大兴机场^[3]最大跨度125 m,采用整体提升以及沙箱整体卸载的施工方法;海湖体育场等大型开放式体育场罩棚悬挑长^[4-5],罩棚端部卸载量大,结构整体成型后需进行分级卸载。针对施工工序中安装及卸载的全过程施工模拟以及结构杆件应力、附件应力的安全评估^[6-8],目前有较多研究成果。

对于同时涉及大跨度和长悬挑的大型航站楼钢屋盖结构,这两部分的安装及卸载一般穿插进行,而安装和卸载顺序不同会导致结构应力和变形的不同,而目前此类结构的整体施工工序尚无针对性研究成果。本文通过施工模拟分析研究不同施工工序对航站楼钢屋盖结构应力和变形的影响,总结了不同施工工序方案的优缺点,并通过呼和浩特盛乐国际机场航站楼和西安咸阳国际机场T5航站楼建造经验对研究成果进行验证。

1 航站楼模型简化

大型航站楼钢屋盖一般分为两部分:一部分为航站楼室内区域上部大跨桁架,一部分为陆侧悬挑桁架。大跨桁架两侧或四周设置有结构支撑柱,跨中根据传力要求布置结构柱或摇摆柱;陆侧悬挑桁架与航站楼大跨桁架相连。

大跨桁架部分安装方法一般采用累积提升法或分块吊装法,安装时大跨桁架四周通常利用结构柱作为安装支点,跨中区域则利用结构柱、临时支撑架或临时提升架作为安装支点,如图1a)所示。陆侧悬挑桁架一般采用分段、分块吊装法进行安装,悬挑端设置临时支撑架,如图1b)所示。

为便于对比分析,根据航站楼结构特点以及常用施工方法,对航站楼结构进行简化(图2):将航站楼钢屋盖整体简化为单榀平面桁架,其中大跨桁架长度 L 与悬挑



a) 屋盖提升实景图 b) 分段吊装实景图

图1 航站楼屋盖安装实景图

Fig. 1 Realistic pictures of terminal roof installation

桁架长度 l 比值根据以往航站楼结构经验取 $L/l=2.2$,将屋盖下部结构柱支撑点简化为铰接支撑,将大跨桁架跨中及悬挑端施工支撑措施简化为临时支撑点。

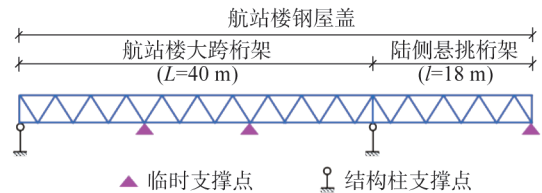


图2 分析简图

Fig. 2 Analysis diagram

本文中仅对航站楼简化模型 L/l 取固定值的情况进行研究,针对 L/l 取不同值时结构杆件应力和变形的变化规律还需做进一步研究。

2 施工工序对比

2.1 施工工序简介

通过对以往航站楼钢屋盖施工顺序及卸载顺序进行统计分析,归纳出以下三种施工工序方案。

(1) 方案1:局部成型、局部卸载

如图3所示,首先进行大跨桁架安装,桁架跨中设临时支撑点,安装就位后完成各分块之间以及桁架与钢柱之间的补杆,大跨桁架补杆完成后,卸载下部临时支撑点;然后进行悬挑桁架的安装,端部设临时支撑点,最后卸载悬挑桁架临时支撑点。

(2) 方案2:整体成型、大跨先卸载

如图4所示,首先进行大跨桁架安装,桁架跨中设临时支撑点,安装就位后完成各分块之间以及桁架与钢柱之间的补杆;然后进行悬挑桁架安装,端部设临时支撑点;所有钢结构安装完成后先进行大跨桁架临时支撑点卸载,最后进行悬挑桁架临时支撑点卸载。

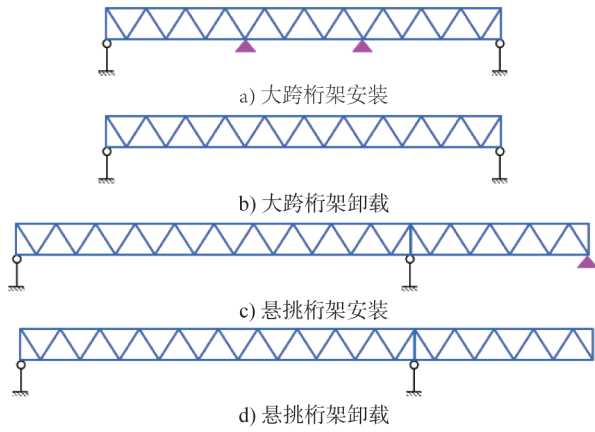


图3 方案1示意图

Fig. 3 Schematic diagram of scheme 1

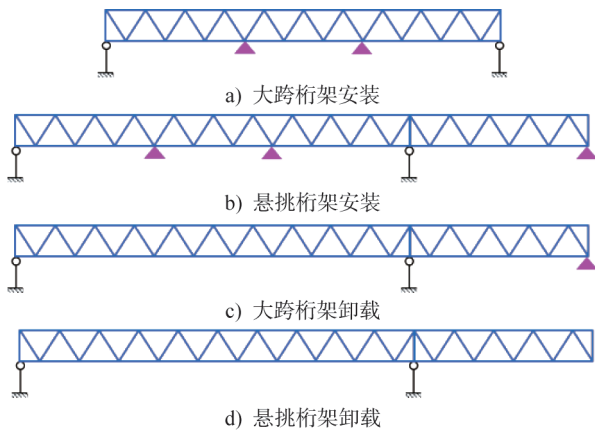


图4 方案2示意图

Fig. 4 Schematic diagram of scheme 2

(3) 方案3:整体成型、悬挑先卸载

如图5所示,首先进行大跨桁架安装,桁架跨中设临时支撑点,安装就位后完成各分块之间以及桁架与钢柱之间的补杆;然后进行悬挑桁架安装,端部设置临时支撑点;所有钢结构安装完成后先进行悬挑桁架临时支撑点卸载,最后进行大跨桁架临时支撑点卸载。

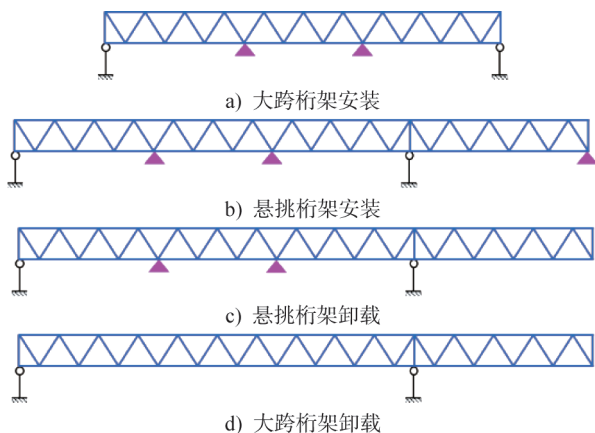


图5 方案3示意图

Fig. 5 Schematic diagram of scheme 3

2.2 施工工序仿真分析

上述3种施工工序方案对结构杆件应力、附加应力及变形等均有不同影响,采用midas Gen对3种方法分别进行简化模型施工全过程模拟分析。简化模型如图6所示,其中桁架上下弦杆杆件类型为梁单元,腹杆为桁架单元;结构支撑柱下端刚接,上端铰接;桁架临时支撑点均采用只受压边界;荷载为结构自重。

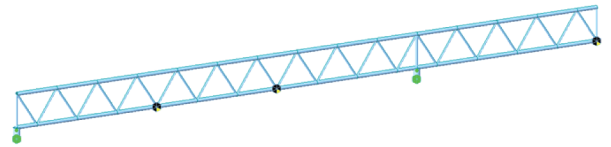
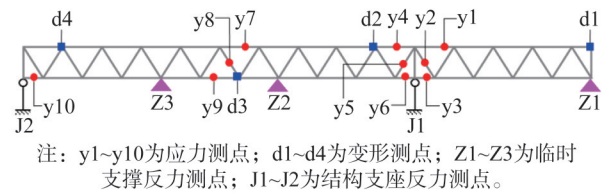


图6 简化模型

Fig. 6 Simplified model

施工过程中主要对跨中、悬挑部分的关键杆件应力及变形和支座及临时支撑反力进行横向对比分析,具体测点布置如图7所示。



注: y1~y10为应力测点; d1~d4为变形测点; Z1~Z3为临时支撑反力测点; J1~J2为结构支座反力测点。

图7 应力、变形测点布置

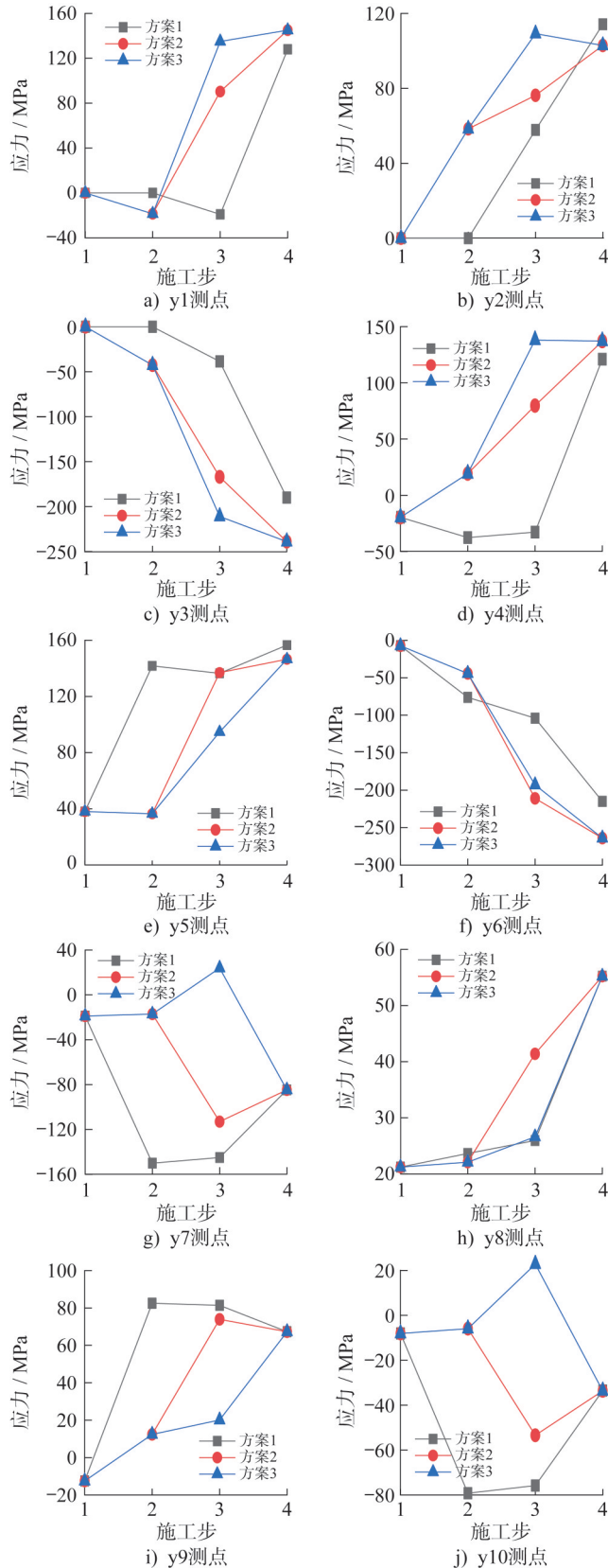
Fig. 7 Arrangement of stress and displacement measuring points

2.2.1 应力分析

图8a)、b)、c)给出了悬挑桁架根部上弦杆y1测点、腹杆y2测点及下弦杆y3测点的应力变化特征。方案2、方案3的整体安装顺序相同、卸载顺序不同,由图可知卸载后杆件应力相同,但方案3中的构件应力峰值大于方案2中的构件应力峰值;方案1中上下弦杆y1、y3测点的应力值在安装以及卸载过程中均低于方案2、3中上下弦杆y1、y3测点的应力值,特别是卸载结束后,应力水平均有较大降幅;方案1中腹杆y2测点在安装过程中应力水平较低,但卸载后应力水平略高于方案2、3中腹杆y2测点的应力水平。

图8d)、e)、f)给出了大跨桁架悬挑侧上弦杆y4测点、腹杆y5测点及下弦杆y6测点的应力变化特征;整体变化特征与y1、y2、y3测点相似,即方案2、方案3卸载完成后杆件应力水平相同;方案1中上下弦杆y4、y6测点的应力值在安装以及卸载过程中均低于方案2、3中上下弦杆y4、y6测点的应力值,特别是卸载结束后,应力水平均有较大降幅;方案1中腹杆y5测点卸载后应力水平略高于

方案2、3中腹杆y5测点卸载后的应力水平。



注:图中的4个施工步为图3~图5中的a)~d)4个施工步。

图8 关键杆件应力变化

Fig. 8 Stress variation of key members

图8g)、h)、i)给出了大跨桁架跨中上弦杆y7测点、腹杆y8测点及下弦杆y9测点的应力变化特征。由图可知三种卸载方案最终完成卸载后三个测点处杆件应力水平相同;方案1中上下弦杆y7、y9测点处应力在第2个施工步中出现最大应力。

图8j)给出了大跨桁架端部(远离悬挑侧)下弦杆y10测点应力变化特征,由图可知三种卸载方案最终完成卸载后y10测点处的杆件应力水平相同,采用方案1施工时y10测点处应力在第2个施工步出现最大应力。

综上,3种方案卸载完成后应力水平趋于一致,但安装过程中方案1大部分杆件应力水平较高,局部杆件附加应力大。

2.2.2 变形分析

图9a)给出了悬挑桁架端部d1测点处竖向变形值的变化情况,由图可知方案2、3卸载后d1测点处变形一致,方案3在跨中卸载后,因大跨桁架端部负弯矩增大,d1测点处竖向变形逐渐减小至与方案2中d1测点处竖向变形一致;方案1中因大跨桁架已变形完成,端部负弯矩已释放,故卸载后大跨桁架端部弯矩对其端部变形影响减弱,最末端部变形较大。

图9b)、c)、d)给出了大跨桁架端部及跨中d2、d3、d4测点处竖向变形值的变化情况。由图可知,桁架卸载过程中位移变化趋势均不相同,但最终卸载完成,各测点变形一致;卸载过程中3处测点的最大变形均在方案1中,在悬挑桁架卸载后,在端部桁架弯矩作用下,方案1中3个测点处的变形逐渐减小至与方案2、3中3个测点处的变形一致。

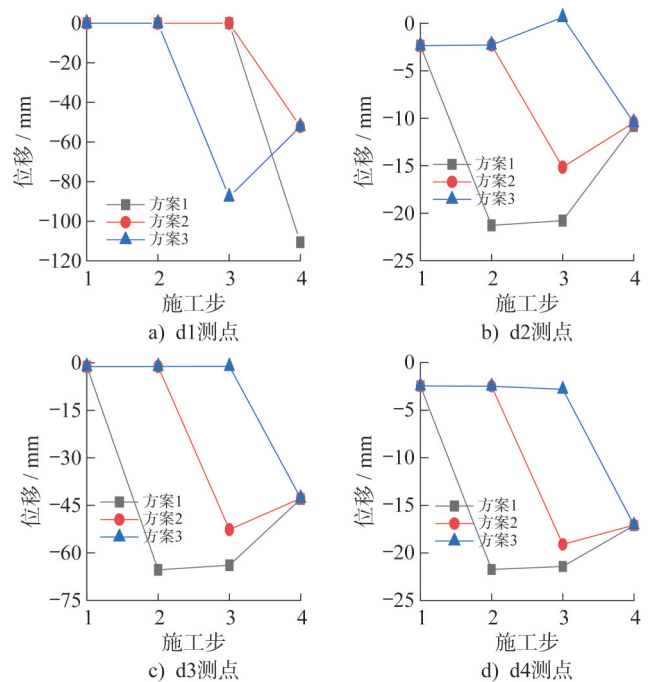


图9 关键测点变形

Fig. 9 Deformation of key measuring points

综上,3种方案桁架跨中变形趋于一致,采用方案1卸载完成后结构的悬挑端变形大于采用方案2、3后结构的悬挑端变形。

2.2.3 支座反力分析

图10给出了结构自身支座J1、J2的水平反力 F_x (沿桁架方向)、竖向反力 F_z 的变化特征,3种方案支座反力在安装及卸载过程中差异较大,但卸载完成后反力一致;各支座反力在卸载过程中的峰值均出现在方案1中。

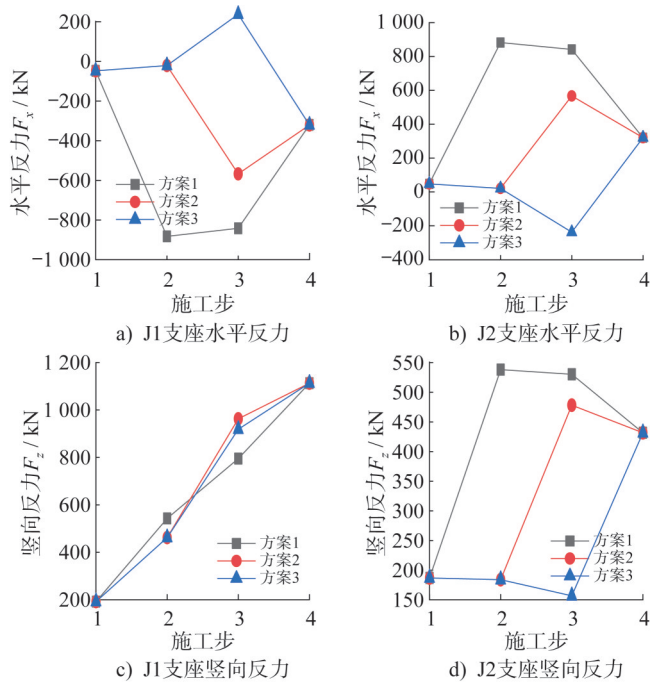


图10 支座反力

Fig. 10 Support reaction force

表1给出了临时支撑点Z1、Z2、Z3卸载过程中最大竖向反力,临时支撑点为只受压边界,仅有竖向反力 F_z ,各临时支撑点卸载过程中最大竖向反力相近。

表1 临时支撑点竖向反力

Table 1 Vertical reaction force of temporary support points

编号	方案1/kN	方案2/kN	方案3/kN
Z1	219.30	215.69	215.69
Z2	349.91	349.91	349.91
Z3	352.07	352.41	369.13

2.2.4 附加应力分析

施工过程改变了结构设计状态下的支撑条件和边界条件,并使构件内部产生附加应力,使得构件实际应力比设计状态的构件应力大,从而影响结构安全,因此

需对施工过程中结构杆件内产生的附加应力大小进行分析。

施工过程产生的附加应力 $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$, σ_1 为最后1个施工步杆件应力值, σ_2 为一次成型态杆件应力值。图11给出了3种方案附加应力对比图,由图可知,方案2、3对应的曲线完全重合;除支座处杆件外,3种方案杆件附件应力均相同,且附加应力值趋于0;但方案1中支座处杆件的附加应力值大于方案2、3中支座处杆件的附加应力值。

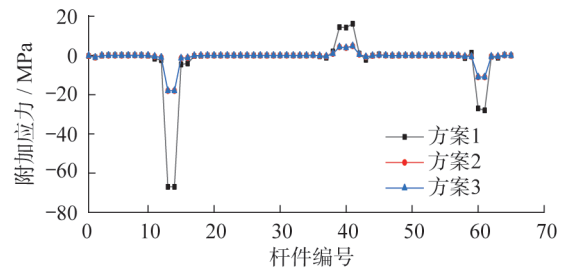


图11 附加应力对比

Fig. 11 Comparison of additional stress

2.2.5 关键指标汇总

根据上述分析结果,将关键指标汇总于表2、3。

表2 应力比汇总

Table 2 Summary of stress ratio

对比项	方案1	方案2	方案3	一次成型
最大应力比	0.921	0.921	0.921	0.921
最终步应力比	0.921	0.921	0.921	0.921
最终步附加应力	67 MPa	18 MPa	18 MPa	—

表3 变形汇总

Table 3 Summary of deformation

对比项	方案1	方案2	方案3	一次成型
最大跨中变形	64.07	53.97	45.14	—
最后1个施工步跨中变形	45.28	45.14	45.14	45.06
最大悬挑变形	110.63	52.50	88.33	—
最后1个施工步端部变形	110.63	52.50	52.50	49.53

2.2.6 仿真分析小结

(1) 方案1中杆件在卸载过程中应力水平高,且悬挑桁架端部变形大,施工前需采取局部杆件加强、桁架预变形等措施;方案2、3结构变形小,卸载过程附加应力水平低,需要采取的加强措施少。

(2) 各方案中多数杆件最不利工况在安装过程中产生,施工模拟需关注安装工序中杆件应力情况。

(3) 各方案卸载过程中存在结构应力与变形变化幅度较大的情况,考虑实际卸载过程中一般采用分级卸载,应力与位移实际为缓慢变化,故文中未作进一步分析。

2.3 施工组织影响分析

2.3.1 施工工序对施工工期的影响

施工工序对施工工期的影响主要有两方面,一方面是钢结构是否连贯施工,此部分影响钢结构分项工程的绝对工期;另一方面是钢结构施工是否占用其他分项工程作业面,此部分影响的是项目的总体工期。

方案1中大跨屋盖与悬挑桁架施工不连续,关键线路被打断,钢结构分项工程绝对工期变长,需提前提供大跨桁架下部作业面,便于其他分项工程作业,总工期较短;方案2、3大跨屋盖与悬挑桁架连续施工,钢结构分项工程工期缩短,但是大跨屋盖与悬挑桁架的支撑架占用了其他分项工程作业面,影响其他分项工程及时进场施工,总工期较长。

2.3.2 施工工序对施工成本的影响

施工成本主要在于提升设备、临时支撑架使用时间的长短,提升设备使用时间越短,支撑架租赁时间越短,则施工成本越低。

方案1在进行大跨桁架施工后,立即卸载各提升器或支撑架,提升设备、支撑架体等施工措施机具可立即退场,成本较低。方案2、3需等结构整体成型后才进行卸载,临时措施使用时间长,施工成本较高。

2.3.3 关键指标汇总

表4给出了3种施工工序对施工组织的影响。

表4 不同方案对施工的影响

Table 4 The effect of different schemes on construction

影响方面	方案1	方案2	方案3
钢结构施工连贯性	不连贯	连贯	连贯
航站楼作业面	小	一般	大
陆侧作业面	小	大	小
施工措施占用时间	短	一般	长
项目总工期	短	长	长

3 项目案例实践

为验证上述结论,分别对呼和浩特盛乐国际机场和咸阳国际机场T5航站楼(图12)选择不同施工工序时结构的内力及变形进行对比分析以及施工健康监测,以下分别进行描述。



a) 盛乐机场效果图 b) 咸阳机场效果图

图12 机场效果图

Fig. 12 Renderings of airports

3.1 呼和浩特盛乐国际机场航站楼项目实践

3.1.1 工程概况

呼和浩特盛乐国际机场为4F级国际干线机场、西部地区大型区域性枢纽机场,航站楼总建筑面积约260 000 m²、航站楼平面宽约440 m,进深约177 m,指廊宽约42 m,结构最大标高为43.000 m。

如图13所示,航站楼屋盖分为屋盖大跨桁架、空侧悬挑桁架、陆侧悬挑桁架以及悬挑桁架端部拱形哈达桁架,屋盖沿中轴对称分布。大跨桁架区采用斜交平面桁架,四周通过支座与钢柱连接,内部设置8根摇摆柱。

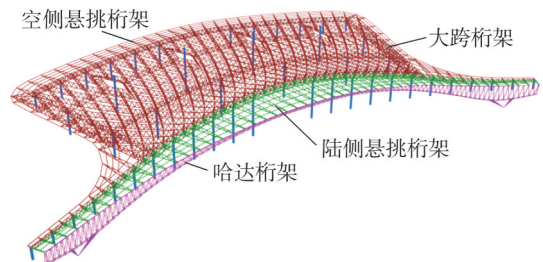


图13 呼和浩特盛乐国际机场航站楼钢屋盖轴测图

Fig. 13 Terminal steel roof axonometric drawing of Hohhot Shengle International Airport

如图14所示,陆侧悬挑桁架端部与拱形哈达桁架连接,使航站楼陆侧立面呈现为层叠起伏的哈达造型,悬挑桁架最大悬挑38 m。

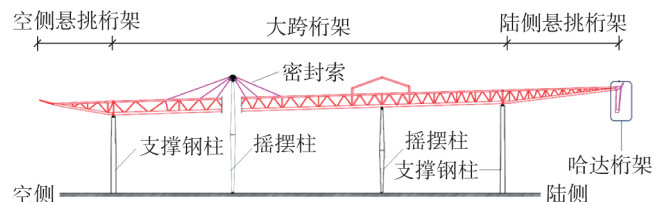


图14 航站楼钢屋盖剖面图

Fig. 14 Profile of terminal steel roof

3.1.2 施工工序介绍

结合土建作业面移交特点,航站楼屋盖大跨桁架及

空侧悬挑桁架采用“桁架楼面拼装、分块累积提升”的安装方法。屋盖共分为5个提升分区(图15),按照由两侧向中间的顺序进行提升施工,提升时在桁架四周区域利用已有结构柱设置柱顶提升架,跨中位置设置临时提升架。

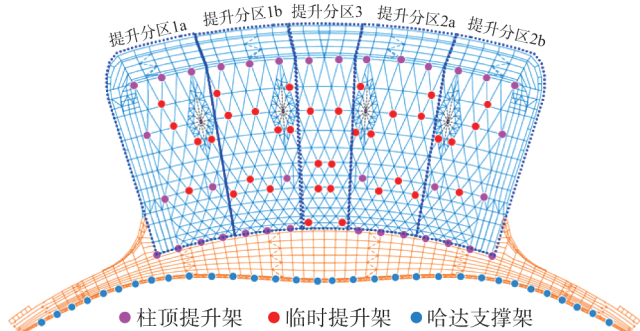


图15 施工分区及支撑布置

Fig. 15 Construction zoning and support arrangement

空侧悬挑桁架及哈达桁架采用“下设临时支撑、履带吊分段吊装”的安装方法。安装时先进行哈达桁架分段吊装,桁架下部设临时支撑(图16),哈达桁架形成稳定体系后补装悬挑桁架,悬挑桁架采用整榀吊装的方式。

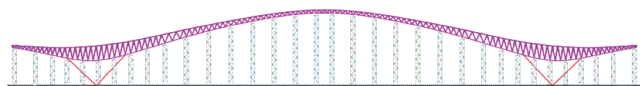
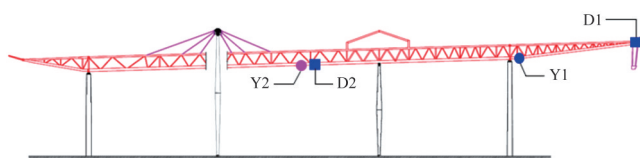


图16 哈达桁架支撑架立面布置图

Fig. 16 Elevation of Hada truss support frame

3.1.3 施工仿真分析

采用上文所述3种施工工序分别进行盛乐机场施工全过程模拟分析,其中悬挑桁架端部采用分级分区逐级卸载,并对图17所示的屋盖对称轴断面关键杆件应力、变形作对比分析。



注: Y1、Y2为应力测点; D1、D2为变形测点。

图17 屋盖对称轴断面应力、变形测点布置图

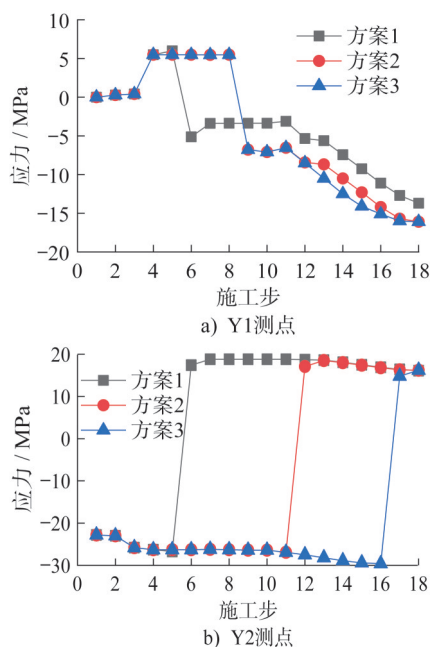
Fig. 17 Arrangement of stress and deformation measuring points on the symmetrical axis section of the roof

(1) 应力分析

图18a)给出了悬挑桁架根部下弦杆Y1测点应力变化特征,整体变化趋势与上文所述y3测点处应力变化特征相符。方案1中Y1测点处在第5、6施工步大跨桁架卸

载后杆件由拉应力转变为压应力,然后随着悬挑桁架的分级卸载,悬挑桁架弯矩传递至支座处,Y1测点处压力进一步增大,但最终方案1中Y1测点处的应力水平低于方案2、3中Y1测点处的应力水平。

图18b)展示了跨中下弦杆Y2测点处应力变化特征,在第5~6个施工步大跨桁架卸载后,方案1中Y2测点处应力达到最大值,随着悬挑桁架的安装及卸载,Y2测点处应力小幅下降,3种方案最终卸载完成后Y2测点处应力趋于一致,整体趋势与上文y9测点处杆件应力相同。



注:图中的18个施工步为实际项目中的施工步。

图18 应力变化

Fig. 18 Stress variation

(2) 变形分析

图19a)给出了悬挑桁架端部D1测点处变形特征,整体趋势与上文d1测点处的变形一致,最终卸载完方案1中结构端部变形大于方案2、3中结构端部变形,但结构端部变形差异较小,主要原因为悬挑桁架端部设有拱形哈达桁架提供竖向刚度。图19b)给出了大跨桁架跨中D2测点处变形特征,与上文中d3测点对应,3种方案大跨桁架卸载完成后跨中D2测点处的最终变形值趋于一致,与上文中d3测点情况吻合。

(3) 结论分析

按2.2节所述3种方案分别对本案例进行施工仿真分析,分析结果与2.2节所述结论一致;同时航站楼桁架悬挑端下部设置有哈达桁架,该哈达桁架可提供竖向刚度,在本案例模拟分析结果中,方案1桁架变形值与方案2、3变形值接近,通过预起拱即可抵消此变形增量。

根据上述分析,盛乐机场最终优选上文2.2节所述方

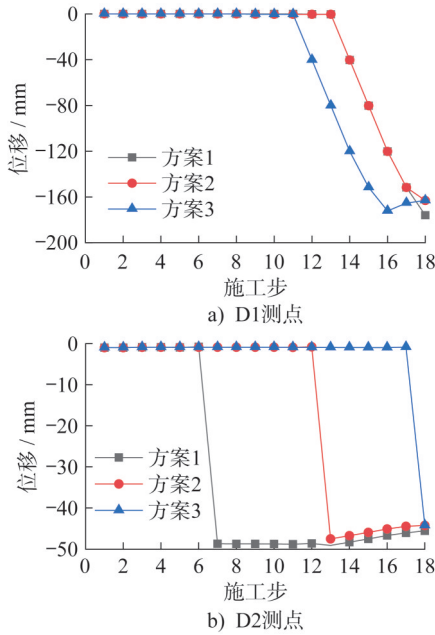


图 19 位移变化

Fig. 19 Displacement variation

案1作为实施方案,即大跨桁架安装完成后即进行卸载,然后进行陆侧哈达悬挑桁架安装及卸载;按方案1施工可提前提供航站楼作业面和陆侧作业面,保证总工期最优;同时3.1.3节模拟结果也验证了该施工工序过程中结构的安全性。

3.1.4 健康监测

为验证盛乐机场实际卸载过程中杆件应力是否与方案1理论分析结果一致,对该项目中关键杆件进行应力应变监测,监测采用振弦式表面应力传感器以及无线数据采集仪(图20)进行应力监测及数据采集,可实现全天的数据实时监测。

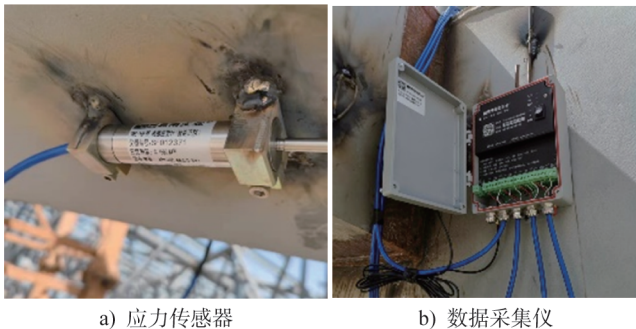


图 20 应力传感器及数据采集仪

Fig. 20 Stress sensor and data acquisition device

图21a)、b)分别为Y1、Y2测点监测值与理论值对比分析图。图中监测值大小和整体变化趋势与理论值相符,实测过程中应力值个别点位数值偏离较大,初步分析为焊接导致。同时现场实测也发现构件的日照面与背阴面对结构应力分布也有较大影响。

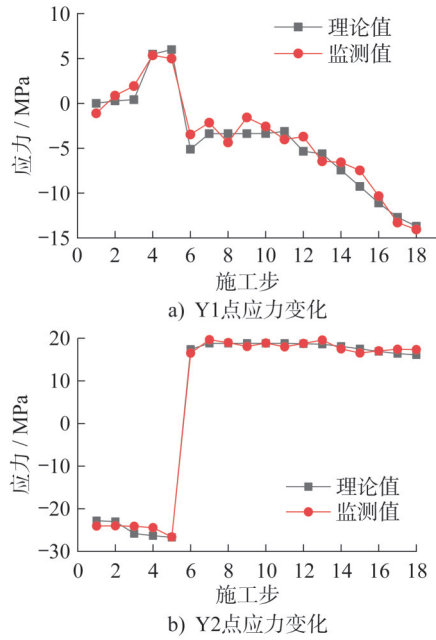


图 21 Y1、Y2 测点监测值与理论值对比

Fig. 21 Comparison between monitoring values and theoretical values at measuring points Y1 and Y2

3.2 西安咸阳国际机场 T5 航站楼项目实践

3.2.1 工程概况

西安咸阳国际机场^[9-10]为我国西北地区最大的机场,新建 T5 航站楼平面尺寸为 1 239 m×832 m,总建筑面积为 700 000 m²,最大标高为 45.000 m。

T5 航站楼屋盖为仿古坡屋面双曲造型(图 22),平面尺寸为 522 m×286 m,分为高区、中区和低区,均为焊接球网架结构,网架厚度约 3.5 m;网架下部设置多排 Y 形柱和斜柱支撑,最大跨度 58 m;陆侧悬挑 30 m(图 23),下部为机场高架桥。

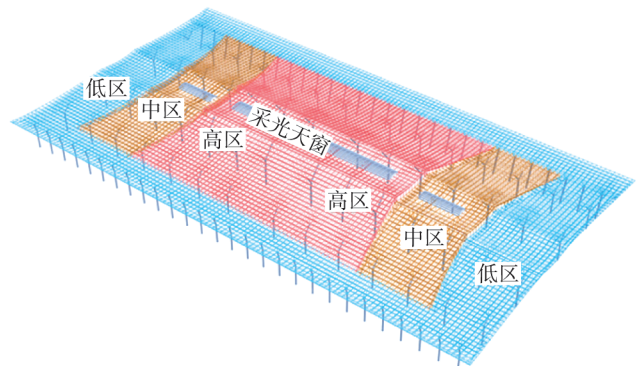


图 22 西安咸阳国际机场 T5 航站楼钢屋盖轴测图

Fig. 22 T5 terminal steel roof axonometric drawing of Xi'an Xianyang International Airport

3.2.2 施工工序介绍

如图 23 所示,航站楼屋盖网架根据结构特点分为 3

个区域,其中航站楼大跨网架采用累积提升和旋转提升的施工方法,空侧悬挑网架采用原位散装的施工方法,陆侧悬挑网架采用分块吊装的施工方法。

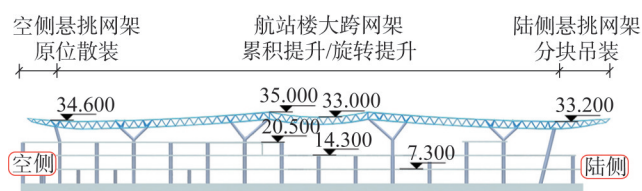


图 23 T5 航站楼钢屋盖剖面图(单位:m)

Fig. 23 Sectional drawing of T5 terminal steel roof (unit: m)

该项目陆侧机场高架施工工期与航站楼施工工期重叠,航站楼施工时下部高架桥已同步进行施工,航站楼陆侧有 20 m 范围内的网架位于高架桥上部(图 24),高架桥施工时无法搭设临时支撑,需在高架桥贯通后再行施工。根据本文第 2 节分析,方案 1 即可满足上述施工条件要求,即首先完成航站楼大跨网架提升和卸载,并移交作业面,待高架桥施工完毕后,继续进行陆侧悬挑网架的分块吊装及卸载。此施工工序可同时兼顾航站楼钢屋盖和机场高架桥的施工需求。

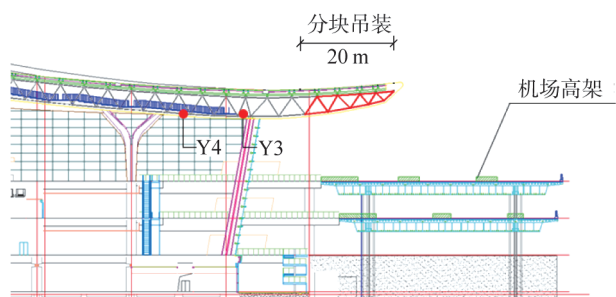


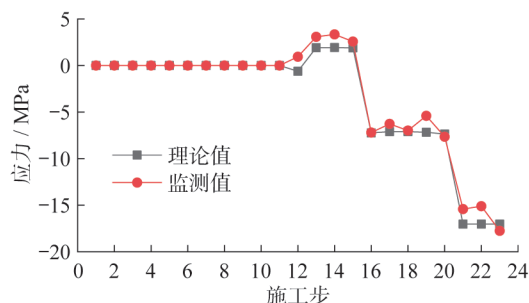
图 24 机场高架立面布置图

Fig. 24 Elevation of elevated bridge

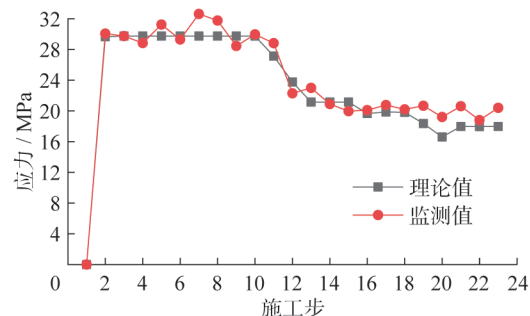
3.2.3 施工仿真分析与监测

按上述施工工序对屋盖结构进行全过程仿真分析,并在施工过程中对关键构件的应力进行健康监测。图 25a)、b)分别为图 24 所示 Y3、Y4 测点处杆件应力监测值与理论值对比分析图。随着各分区的卸载完成,Y3 测点处杆件压应力不断增大,与上文中 y6 测点处应力变化趋势相同;网架提升阶段 Y4 测点处杆件应力达到最大值,随着各分区卸载,在负弯矩作用下应力逐渐减小,最终陆侧悬挑网架卸载后,应力最小,这与上文中 y9 测点处应力变化特征相符。

图中各测点处应力施工模拟数值与监测结果偏离较小,总体趋势一致,证明理论分析结果可指导实际工程。



a) Y3 应力变化



b) Y4 应力变化

注:图中的 24 个施工步为实际项目中的施工步。

图 25 Y3、Y4 测点监测值与理论值对比

Fig. 25 Comparison between monitoring values and theoretical values at measuring points Y3 and Y4

4 结论

本文通过简化结构模型对航站楼 3 种施工工序进行仿真模拟分析,并将模拟分析指标与两机场项目施工实测指标进行对比分析,得到如下结论:

(1) 针对同时涉及大悬挑、大跨度的空间结构,不同的施工工序会导致结构在安装及卸载过程中呈现不同的应力和变形变化特征;但最终卸载完成后结构的应力与变形特征仅与结构安装成型状态相关,在相同的成型状态下,即使卸载顺序不同,结构卸载完成后呈现相同的应力与变形特征;不同的成型状态呈现完全不同的应力与变形特征。

(2) 不同的施工工序对施工组织的影响也各不相同,在保证结构应力及变形可控的前提下,提前进行部分结构的卸载,可加快现场总体施工进度,降低施工成本。

(3) 通过对呼和浩特盛乐机场采用 3 种施工工序模拟对比分析,验证了文中 2.2 节航站楼简化模型分析结果的准确性;按方案 1 工序对西安咸阳机场进行施工模拟,模拟结果也与 2.2 节结果一致;两个项目案例验证了上文第 2 节所述方案 1 既可保障结构安全,也有利于现场施工作业。

(4) 理论分析数据与健康监测数据基本一致,数据偏差较小,说明施工模拟结果具有较高的准确性,可为后续大型机场航站楼项目的钢屋盖施工提供参考。

参考文献:

- [1] 周健, 张耀康, 李彦鹏, 等. 航站楼建筑的不同尺度结构表达[J]. 建筑结构, 2022, 52(10): 96-103. DOI:10.19701/j.jzjg.HDY2233.
ZHOU Jian, ZHANG Yaokang, LI Yanpeng, et al. Different degrees of structural expression in terminal buildings [J]. Building Structure, 2022, 52(10): 96-103. DOI:10.19701/j.jzjg.HDY2233.(in Chinese)
- [2] 扈鹏, 曹莉, 李贞, 等. 西安咸阳国际机场东航站楼钢结构设计[J]. 建筑结构, 2022, 52(11): 8-14, 63. DOI:10.19701/j.jzjg.XBY2206.
HU Peng, CAO Li, LI Zhen, et al. Steel structural design of east terminal building of Xi'an Xianyang international airport [J]. Building Structure, 2022, 52(11): 8-14, 63. DOI:10.19701/j.jzjg.XBY2206.(in Chinese)
- [3] 苏英强, 王留成, 段先军, 等. 北京新机场航站楼屋盖钢结构卸载技术研究[J]. 建筑技术, 2018, 49(9): 951-955. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2018.09.012.
SU Yingqiang, WANG Liucheng, DUAN Xianjun, et al. Research on unloading technology of steel roof structure for Beijing new airport terminal [J]. Architecture Technology, 2018, 49(9): 951-955. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2018.09.012.(in Chinese)
- [4] 李正华, 邱小军, 周元, 等. 大悬挑结构临时支撑卸载施工技术[J]. 建筑钢结构进展, 2012, 14(5): 59-64.
LI Zhenghua, QIU Xiaojun, ZHOU Yuan, et al. Unloading construction technology for temporary support of large cantilever steel structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2012, 14(5): 59-64. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 崔嘉慧, 邵冰, 邹海涛, 等. 不同施工工艺下周边支承网架结构附加应力分布及安全性研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(6): 85-96. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.010.
CUI Jiahui, SHAO Bing, ZOU Haitao, et al. A study on the additional stress distribution and safety of peripheral supporting grid structure under different construction technologies [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(6): 85-96. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.06.010.(in Chinese)
- [7] 叶冬晨, 宗荣, 贾尚瑞, 等. 基于整体提升施工技术的高层连体结构塔楼复位研究[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(8): 96-103. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.08.011.
YE Dongchen, ZONG Rong, JIA Shangrui, et al. Tower centering of high-rise connected structure based on integral lifting construction technology [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(8): 96-103. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.08.011.(in Chinese)
- [8] 宗荣, 叶冬晨, 杨飞, 等. 分阶段卸载在连体提升施工中的应用分析[J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(1): 114-122. DOI:10.13969/j.jzgjg.20230809001.
ZONG Rong, YE Dongchen, YANG Fei, et al. Application analysis of multi-stage unloading in the lifting construction of connected structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2025, 27(1): 114-122. DOI:10.13969/j.jzgjg.20230809001.(in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 杜泽琪, 卢福生, 韩凌, 等. 西安咸阳机场主航站楼钢屋盖施工方案分析[J]. 建筑技术, 2023, 54(23): 2847-2850. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2023.23.008.
DU Zeqi, LU Fusheng, HAN Ling, et al. Construction scheme analysis of steel roof of main terminal building of Xi'an Xianyang airport [J]. Architecture Technology, 2023, 54(23): 2847-2850. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2023.23.008.(in Chinese)