

DOI: 10.7672/sgjs2025080017

大跨度正交索网屋盖结构施工技术及受力分析

赵通

(北京市政集团有限公司,北京 100024)

[摘要] 某大跨度屋盖结构由大跨度马鞍形环桁架、正交索网组成,其拉索数量多、内力大,拉索的合理张拉工序需从结构受力、现场实际等多方面进行分析而确定。介绍环桁架、正交索网及幕墙柔性拉索总体施工工艺,采用有限元软件分析幕墙柔性拉索张拉对环桁架及正交索网受力及变形的影响,并开展正交索网安装全过程施工仿真分析。分析结果表明,幕墙柔性拉索张拉对环桁架及正交索网的受力及变形影响较小,实际施工时可根据现场实际情况灵活确定幕墙柔性拉索张拉时机;正交索网结构安装工序合理,成型后索力较好地满足了设计索力要求。

[关键词] 屋盖;正交索网;环桁架;拉索;张拉;索力;变形

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)08-0017-06

Construction Technology and Stress Analysis of Large-span Orthogonal Cable Net Roof Structure

ZHAO Tong

(Beijing Municipal Construction Group Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: A large-span roof structure is composed of large-span saddle-shaped ring truss and orthogonal cable net. The number of cables is large and the internal force is large. The reasonable tensioning process of cables needs to be analyzed and determined from the aspects of structural force and field practice. The overall construction technology of ring truss, orthogonal cable net and flexible cable of curtain wall is introduced. The influence of flexible cable tension of curtain wall on the stress and deformation of ring truss and orthogonal cable net is analyzed by finite element software, and the construction simulation analysis of the whole process of orthogonal cable net installation is carried out. The analysis results show that the tension of the flexible cable of curtain wall has little influence on the stress and deformation of ring truss and the orthogonal cable net. In the actual construction, the tension time of the flexible cable of curtain wall can be flexibly determined according to the actual situation of the site. The installation process of orthogonal cable net structure is reasonable, and the forming cable force meets the design cable force requirements well.

Keywords: roofs; orthogonal cable net; ring truss; cables; tensioning; cable force; deformation

1 工程概况

某工程建筑面积约 8.1 万 m²,屋盖结构由大跨度马鞍形环桁架与单层双向正交索网结构组成,屋盖结构跨度约 150m×210m,东西向承重索共 49 对,南北向稳定索共 30 对,均采用 1570 级高钒封闭索。场馆外围幕墙采用天坛形玻璃幕墙,幕墙面材包括弯弧玻璃、平板玻璃、圆管玻璃灯带,共 3 360 块玻璃,面积约 17 896m²。幕墙承力结构由钢龙骨、柔

性拉索、钢横梁及钢横管组成。柔性拉索上端固定于顶部环桁架,下端固定于主体结构首层顶板外圈悬挑梁,共 120 根,外围护幕墙结构剖面如图 1 所示。由于屋盖结构跨度大,矢跨比小,故正交索网张拉力较大,张拉过程中正交索网位形变化大,同时考虑到索夹安装精度要求,正交索网张拉对精细化施工有较高要求,而外圈幕墙柔性拉索直径较大,上端与环桁架连接,张拉幕墙柔性拉索对正交索网结构张拉力及变形也会产生影响。本文介绍了大跨度屋盖结构总体施工工艺,利用有限元模型分析幕墙柔性拉索张拉顺序对环桁架及正交索网

索力及变形的影响,并对正交索网安装全过程进行施工仿真模拟,验证施工工序的合理性,为类似工程施工提供参考。

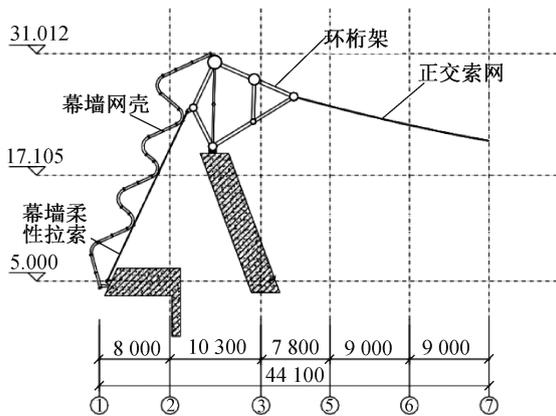


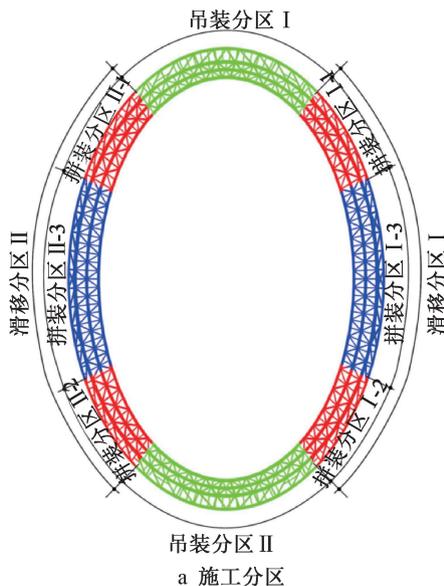
图1 幕墙结构剖面

Fig. 1 Structural profile of curtain wall

2 总体施工工艺

2.1 环桁架安装

大跨度马鞍形环桁架平面投影为椭圆形,南北向长轴约200m,东西向短轴约130m,环桁架截面为组合式桁架,由7根弦杆及12根腹杆组成,桁架断面尺寸约15m×11m,最大截面杆件为 $\phi 1\ 600\times 60$ 圆管,环桁架总重约8 500t。为充分利用现场场地空间,缩短施工工期,按施工工艺对环桁架进行分区,其中南北区节段采用整体吊装,东西区节段采用高空拼装后整体滑移就位。综合考虑吊装机械起重性能,每个分区中的7根弦杆进行分段安装,环桁架分区、分段如图2所示。



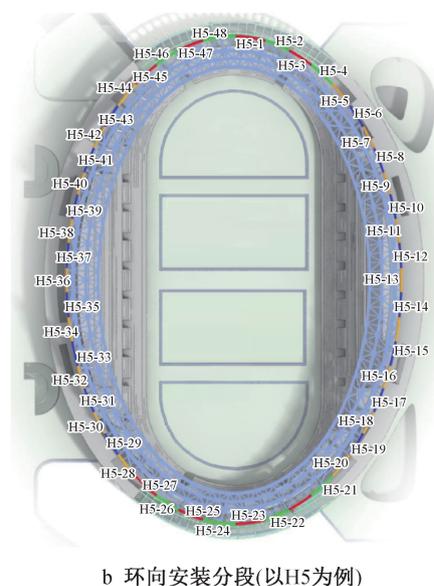
吊装分区 II
a 施工分区

各分区均采用从中间向两端、从桁架内环向桁架外环的施工顺序进行桁架结构安装,拼装区域均设置装配式临时支撑,确保每个节段安装定位时均有2个临时定位支点。各桁架节段利用250t履带式起重机吊装就位后进行焊接连接。东西区环桁架拼装完毕后采用二次滑移工艺安装就位,单侧滑移体长181.9m、宽40.5m、重约2 500t,单侧设置8条滑移轨道、4组框架式滑移胎架,每组滑移胎架设置1台液压泵站,每条轨道设置4个TX-60-J型滑移油缸,每个液压油缸设置1个压力传感器及1个位移传感器,施工过程中通过计算机总控实时监控各油缸工作状态。东、西侧环桁架总滑移距离分别为47.87m。

2.2 正交索网安装

屋盖正交索网采用地面拼装后整体提升的方案。利用汽车式起重机配合放索盘将承重索铺放在场地内,随后铺设稳定索,利用索夹连接承重索与稳定索,索夹安装位置应考虑预偏,确保索网成型后网格位置准确。承重索共49对,东、西两端各设置1个提升点,共98个提升点。提升点设置在对应承重索与环桁架连接耳板上,通过提升工装连接千斤顶与拉索。整体提升前应复测环桁架承重索和稳定索连接耳板空间位置,根据测量结果调整承重索和稳定索调节螺杆长度,从而控制施工误差。提升点设计如图3所示。

中间43对承重索安装索力较小,采用A类工装进行提升就位后利用销轴实现与环桁架耳板的连接;南北向两端各3对承重索自重较小,可采用B



b 环向安装分段(以H5为例)

图2 环桁架施工分区、分段

Fig. 2 Construction zoning and segmentation of ring trusses

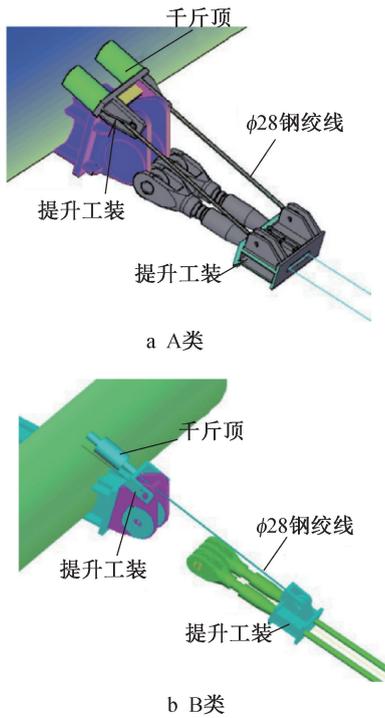


图3 提升点设计

Fig. 3 Design of lifting points

类工装进行提升,由于成型状态下端头3对承重索曲率较小,采用提升就位后索端头无法抵达环桁架耳板,因此提升前需预先调节螺杆旋出30mm,提升就位后需安装承重索张拉工装,将两端3对承重索张拉就位后调节螺杆再旋回30mm。

施工时,先完成承重索的提升与张拉,其间已用倒链牵引稳定索索头。待承重索安装就位后,通过锁夹连接使稳定索索头靠近环桁架耳板,随后在操作平台上利用张拉设备将稳定索与耳板连接,并进行张拉,最终形成稳定的预应力体系。稳定索共30对,索两端均设置张拉点,共60个张拉点。每个张拉点设置2台250t张拉千斤顶和2根直径65mm钢拉杆。稳定索张拉分为初张拉和稳定张拉2个阶段,原则上采用对称张拉^[7]。张拉点设计如图4所示。

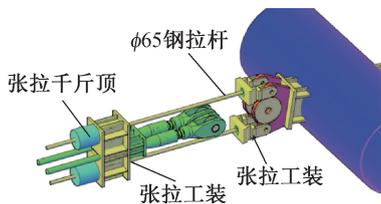


图4 张拉点设计

Fig. 4 Design of tensioning points

2.3 幕墙结构安装

幕墙结构主要承力结构由S形钢龙骨、柔性拉

索、钢横梁及钢横管组成。完成环桁架施工后进行幕墙结构施工,首先进行柔性拉索安装。柔性拉索沿场馆外围分布,索间距为4m,共120根,上端固定于顶部环桁架,下端固定于主体结构首层顶板外圈悬挑梁。柔性拉索最大张拉力为768kN,采用单台100t千斤顶进行张拉,张拉时利用承力套筒作为着力点,φ48精轧螺纹钢通过转换螺母与拉杆连接,从而实现索力的施加。柔性拉索张拉工装如图5所示。

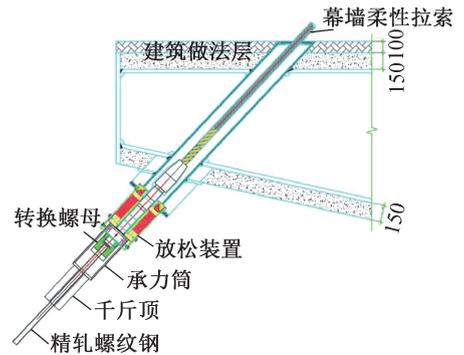


图5 柔性拉索张拉工装

Fig. 5 Tensioning tooling of flexible cable

S形钢龙骨共160根,长度为17.9~32.6m。考虑运输限制及高空对接焊接的困难,钢龙骨采用分段制作、现场地面拼装后整体吊装的安装工艺。钢龙骨运输至现场后进行节段焊接及防火涂料的涂装,随后搭设落地支架,逐榀吊装钢龙骨。完成2榀钢龙骨吊装后安装钢横管及钢横梁,按以上工序逐次完成全部幕墙结构的安装。

3 幕墙柔性拉索张拉影响分析

由于场馆外围幕墙柔性拉索上端固定于环桁架,柔性拉索张拉直接影响环桁架的受力性能,进而影响屋面正交索网受力与变形,需进一步分析柔性拉索安装与张拉工序。利用ANSYS软件建立有限元模型,环桁架及拉索均采用link180单元模拟。计算结果表明,幕墙柔性拉索在成型后最大索力为1440kN(见图6),部分拉索处于松弛状态,待后续屋面正交索网施工完成后全部形成预应力体系。

为明确幕墙柔性拉索张拉对屋面正交索网受力及变形的影响,计算先安装正交索网而未安装幕墙柔性拉索状态下各承重索与稳定索索力及变形,与成型状态下的索力及变形进行比较,计算结果如表1,2所示。所选取的对比点位分布如图7所示,其中C1,C2,C3位于承重索,W1,W2,W3位于稳定索,N1,N2,N3为正交索网近环桁架位置,N4为索网中心。对比分析可知,成型状态与先安装正交索网状态下承重索与稳定索的索力相差较小,基本控

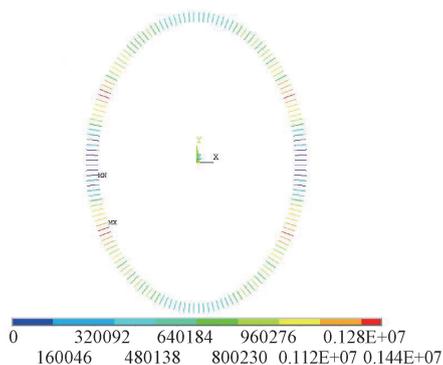


图6 成型状态下幕墙柔性拉索索力(单位:N)

Fig. 6 Flexible cable force of curtain wall in forming state(unit :N)

制在10%以内;N1,N3变形相差较小,N2靠近正交索网索力最大位置故其变形较大,N4平面内偏移较小,竖向变形变化较大。此外,计算结果表明,2种状态下环桁架均处于弹性受力状态,最大压应力仅为21.4MPa。

表1 索力对比

Table 1 Comparison of cable force

点位	成型状态/kN	先安装索网状态/kN	差值/kN	变化率/%
C1	2 377	2 267	110	4.9
C2	1 603	1 440	163	11.3
C3	1 418	1 450	-32	-2.2
W1	3 504	3 440	64	1.9
W2	3 251	3 065	186	6.1
W3	2 890	2 670	220	8.3

综上所述,幕墙柔性拉索张拉对正交索网、环桁架的受力影响较小,其张拉可能根据具体施工现场情况合理安排。实际上在正交索网提升过程中考虑了支撑斜柱的受力,环桁架支座约束处于完全释放状态,为确保环桁架整体稳定需在正交索网提升前安装部分幕墙柔性拉索,幕墙柔性拉索索力可进行后期张拉或放张以达到设计值。

4 正交索网安装受力分析

综合正交索网安装对称性、经济性、安全性原则,确定屋面正交索网施工工序,在支撑柱浇筑完成并达到强度要求后进行环桁架拼装与滑移施工,

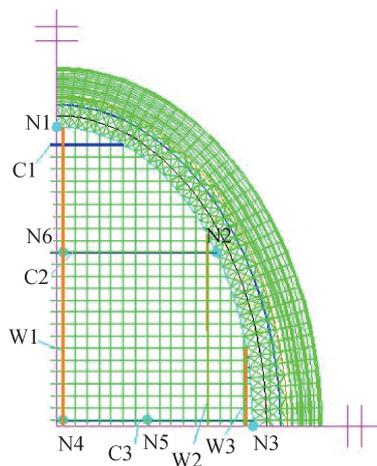


图7 点位分布

Fig. 7 Distribution of points

由于后续正交索网安装过程中环桁架支座约束处于放开状态,为确保正交索网安装、张拉过程中结构稳定性,需先进行幕墙柔性拉索安装。幕墙柔性拉索采用无应力索长法进行安装,各索无应力长度根据建筑要求状态下索力设计值确定。通过无应力索长法对正交索网结构进行正装分析,可获得各施工阶段拉索施工索力,幕墙柔性拉索MQS-1~MQS-30布置如图8a所示,南北向端部柔性拉索安装索力较大,东西向中心位置索力较小,随着后续正交索网的安装与张拉,所有柔性拉索索力达到设计索力。中间43对承重索采用无应力索长法进行安装,利用提升工装提升就位后即可通过销轴连接环桁架耳板与索头,端头6对承重索需利用张拉工装进行张拉,承重索CZS-1~CZS-24布置如图8b所示。稳定索WDS-1~WDS-15布置如图8c所示。为避免引起正交索网结构局部应力集中,稳定索张拉时应同步、对称张拉。

为准确获取正交索网结构施工各阶段的拉索索力以指导现场施工,采用MIDAS Gen有限元软件对整体索网结构施工过程进行全过程仿真分析。分析中,环桁架结构采用梁单元模拟,拉索采用仅受拉单元模拟,并通过设置无应力长度实现施工过程的正装分析,有限元模型如图9所示。选取部分典型位置拉索,分析其在施工过程中索力变化情

表2 变形对比

Table 2 Comparison of deformation

点位	成型状态			先安装正交索网状态			差值		
	x向	y向	z向	x向	y向	z向	x向	y向	z向
N1	-0.2	-20.2	1.1	-0.3	-16.2	-22.9	-0.1	4.0	-24.0
N2	-8.2	-15.6	-23.8	-26.6	-28.3	-52.9	-18.4	-12.7	-29.1
N3	-17.0	0.5	-62.5	-21.7	1.0	-55.5	-4.7	0.5	7.0
N4	-2.0	0.2	211.5	-1.8	0.2	155.2	0.2	0	-56.3

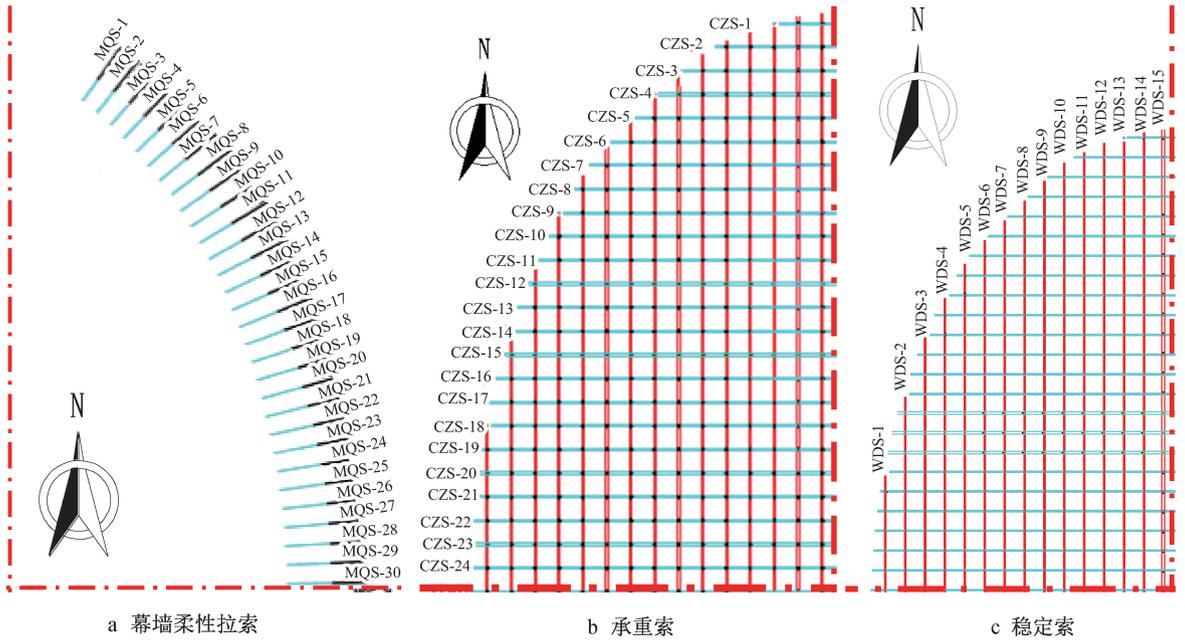


图 8 索布置

Fig. 8 Arrangement of cables

况,各施工阶段索力变化如图 10 所示,其中施工步 1~20 为提升承重索工况,第 20 步为承重索提升就位并完成端头 6 对索张拉,施工步 21~36 为张拉稳定索工况,第 37 步为屋面加配重。

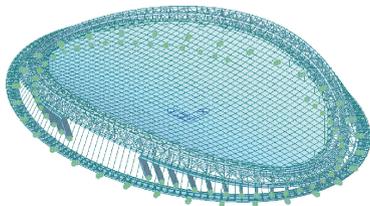


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

由图 10 可知,中部承重索在提升过程中索力增大较缓慢,最大索力约 400kN,随着稳定索张拉,中部承重索索力快速增大;端部承重索在提升就位后进行张拉,张拉完成且索力达约 1 434kN 后,随着稳

定索的张拉,环桁架产生变形使端部承重索放张,索力有所减小,稳定索张拉完毕并形成预应力体系后各承重索索力相近。在正交索网提升、张拉过程中,中部幕墙柔性拉索索力缓慢增大;承重索提升时环桁架产生南北向的拉伸变形使端部幕墙柔性拉索有所放张,但维持在预紧状态,稳定索张拉时环桁架产生南北向的紧缩变形从而使端部幕墙柔性拉索进一步张紧,索力迅速增大,最终正交索网结构安装完毕并施加屋面配重后各幕墙柔性拉索索力相近,达到设计值。

5 结语

本文介绍了大跨度屋盖结构相关施工工艺,并采用有限元模拟方法进行对比分析,主要结论如下。

1) 针对幕墙柔性拉索张拉对正交索网及环桁架受力和变形的影响开展对比分析。分析结果表明,幕墙柔性拉索张拉对于正交索网及环桁架受力

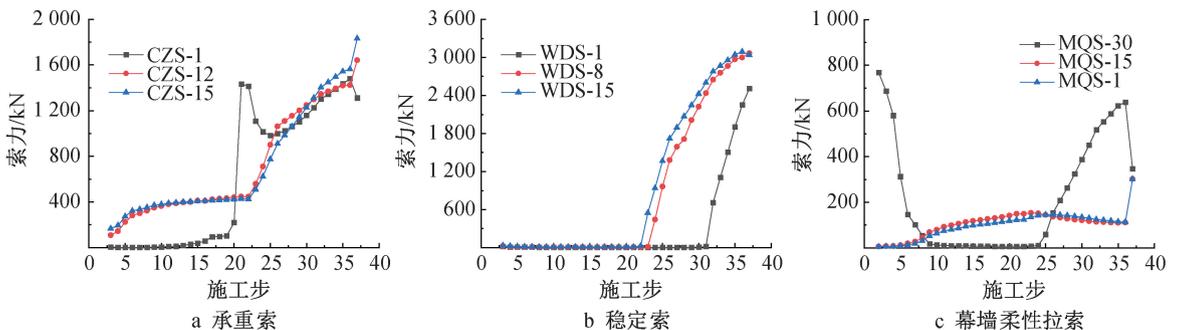


图 10 索力变化曲线

Fig. 10 Changing curves of cable force

和变形的影响较小。

2)利用有限元模型对实际正交索网施工过程进行全过程模拟分析。分析结果表明,正交索网安装工艺合理,成型状态下索力较好地满足设计索力要求。

参考文献:

- [1] 狄增辉,罗斌,阮杨捷,等. 立面悬索-钢框架混合结构施工方法及全过程模拟分析 [J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(2): 83-90.
DI Z H, LUO B, RUAN Y J, et al. Construction method and whole process simulation analysis of elevation suspension-steel frame hybrid structure [J]. Construction technology, 2025, 54(2): 83-90.
- [2] 罗惠平,张怡,苏振华,等. 国家速滑馆项目天坛轮廓曲面玻璃幕墙钢网壳施工技术[J]. 施工技术, 2020, 49(10): 16-19.
LUO H P, ZHANG Y, SU Z H, et al. Construction technology of steel reticulated shell of temple-shaped glass curtain wall of National Speed Skating Oval project [J]. Construction technology, 2020, 49(10): 16-19.
- [3] 袁野,张其林,张舒翔,等. 大跨度轮辐式单双层索网结构施工过程模拟 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(20): 15-20.
YUAN Y, ZHANG Q L, ZHANG S X, et al. Simulation of construction process of large-span spoke-type single and double-layer cable-net structure [J]. Construction technology, 2023, 52(20): 15-20.
- [4] 高树栋,张晋勋,王泽强,等. 国家速滑馆大跨度马鞍形单层正交索网整体提升张拉施工关键技术[J]. 建设机械技术与管理, 2021, 34(1): 64-71.
GAO S D, ZHANG J X, WANG Z Q, et al. Key technology of integral lifting and tensioning construction of large-span saddle-shaped single-layer orthogonal cable net in National Speed Skating Oval [J]. Construction machinery technology & management, 2021, 34(1): 64-71.
- [5] 支超,周生部,刘鲁,等. 日照奎山体育中心轮辐式索网施工技术 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(5): 73-77.
ZHI C, ZHOU S B, LIU L, et al. Spoke-type cable net construction technology of Rizhao Kuishan Sports Center [J]. Construction technology, 2023, 52(5): 73-77.
- [6] 周储君. 大跨度马鞍形单层正交索网结构施工关键技术研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2020.
ZHOU C J. Study on the key technology of construction of large span saddle shaped orthogonal monolayer cable net structure[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
- [7] 邓华,宋荣敏. 面向控制随机索长误差效应的索杆张力结构张拉分析[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(5): 71-78.
DENG H, SONG R M. Pretensioning analysis of cable-strut tensile structures for controlling effect of random cable length errors[J]. Journal of building structures, 2012, 33(5): 71-78.
- [8] 秦顺全. 斜拉桥安装无应力状态控制法[J]. 桥梁建设, 2003(2): 31-34.
QIN S Q. Control method of stress-free status for erection of cable-stayed bridges[J]. Bridge construction, 2003(2): 31-34.