

大开口轮辐式索承网格钢结构预应力施工技术研究

贾尚瑞, 刘洋*, 邢遵胜, 胡建华
(浙江精工钢结构集团有限公司, 浙江 绍兴 312030)

摘要: 新疆乌鲁木齐奥林匹克体育中心体育场采用了大开口轮辐式索承网格钢结构体系, 该结构作为刚柔结合的新型空间结构, 兼具受力稳定、用钢量低等优势, 但存在安装难度大、预应力计算复杂、构件协同要求高等技术难点。针对施工过程中的技术难点, 本文介绍了张拉施工方案和施工过程中的相关预应力关键技术; 对斜撑杆、幕墙、檩条的安装时机、屋盖安装误差、环向索下料误差和环境温度等因素对预应力张拉施工的影响开展了相关分析, 最终确定了幕墙与檩条均在张拉前同步安装的施工方案。考虑檩条施工工艺的可行性和经济性, 以及后续使用过程中的安全性, 提出了高效的檩条低应力安装施工技术, 保障了乌鲁木齐奥体中心体育场张拉施工的顺利进行。

关键词: 张弦结构; 索承网格; 预应力张拉分析; 檩条低应力安装施工技术; 屋盖安装误差; 环向索下料误差
中图分类号: TU758.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2025)12-0111-12
DOI: 10.13969/j.jzgigjz.20240702002

Prestressed Construction Technology for Large-Opening Spoke-Wheel Type Cable-Supported Steel Grid Structures

JIA Shangrui, LIU Yang*, XING Zunsheng, HU Jianhua
(Zhejiang Jinggong Steel Building Group Co., Ltd., Shaoxing 312030, China)
*Corresponding author: liuyangln@jgsteel.cn

Abstract: A large-opening spoke-wheel type cable-supported steel grid structure is adopted by the XinJiang Urumqi Olympic Sports Center Stadium. As a new type of spatial structure that combines rigidity and flexibility, this structure has the advantages of stable stress and low steel consumption. However, there are technical difficulties such as difficult installation, complex prestress calculation, and high requirements for component coordination. Aiming at the technical difficulties during construction, the tension construction scheme and several key tension techniques are introduced herein. The impact of different factors such as installation timing of diagonal braces, curtain walls, and purlins, roof installation errors, ring cable cutting errors, and temperature on the tension construction is studied. The final construction plan has been determined to install both the curtain walls and purlins synchronously before tensioning. Taking the feasibility and economic efficiency of the purlin installation process, as well as the safety during subsequent using stage, a low-stress high-efficiency installation technique for purlins is proposed, which guarantees the tension construction of the Urumqi Olympic Sports Center Stadium successfully.

Keywords: tension structure; cable-supported grid structure; tension construction analysis; low-stress purlin installation technology; roof installation error; ring cable cutting error

收稿日期: 2024-07-02

作者简介:

贾尚瑞(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事钢结构设计、加工制作及现场施工等方面的研究。E-mail: jiashangr@jgsteel.cn。

通信作者:

刘洋(1994—), 男, 博士, 工程师, 主要从事钢结构设计、钢结构施工及结构分析等方面的研究。E-mail: liuyangln@jgsteel.cn。

近年来,随着我国经济的发展,对大跨度建筑的需求不断增加,为满足建筑功能的要求,体育场、足球场屋盖一般采用四周环绕、中间大开口的建筑形式,四周结构常采用悬臂网架、桁架结构,此类结构形式在传统体育场屋盖建设中为主导。但随着结构跨度的增加,屋盖自重迅速增大,支座设计难度提高;另一方面,此类网架、桁架结构体系杆件密集而材料利用效率有限,且随跨度增加结构稳定性降低。

而轮辐式索承网格作为刚、柔结构的新型杂交空间结构,具有受力稳定、用钢量低等优点,近年来在大型体育场馆中得到了较多应用^[1-5]。该结构体系属于张弦结构体系,以刚性网格作为上弦,以轮辐式索杆体系作为下弦。上弦单层网格形成一个宽度很大的压力环,可有效抵抗径向索在外环梁处产生的水平力,并通过内环桁架进行径向拉结,形成了一种新型的自平衡体系,充分利用了预应力高强构件的强度优势,结构整体轻巧美观,能满足跨度大的需求,且自身能够满足自平衡不易失稳,但缺点在于结构安装难度大,预应力结构计算分析过程复杂,而且十分依赖构件间配合,若预应力有损失,或某个构件退出工作,结构便会发生灾难性破坏^[6]。索承网格结构体系预应力的建立是一个非线性且不可逆的过程,张拉施工时索力间的相互影响较大,而且由于环索结构的施工特点,斜撑杆需在张拉过程中安装,如果斜撑杆的安装时机不当,可能导致后续张拉力无法有效建立。因此,在进行预应力张拉之前,需要确定合理的张拉顺序和张拉力控制值,对整个施工过程进行详细的模拟分析,研究张拉过程中结构内力和位移的变化,对体系的形成过程进行安全控制^[7],在屋盖结构的设计和施工中至关重要。

针对上述设计和施工过程中预应力张拉分析和构件协同配合等存在的问题,本文以乌鲁木齐奥体中心为研究对象,通过索力和杆件内力分析确定了张拉施工方案,提出了斜撑杆安装和檩条低应力安装施工技术等多项预应力施工关键技术,并进行了施工多维度影响因素分析,从而可为此类大跨度预应力索承网格结构体系的设计和施工提供参考。

1 工程概况

新疆乌鲁木齐奥林匹克体育中心位于乌鲁木齐市米东区喀什路东延以南、会展大道二期以北,占地约615亩,总建筑面积约30.5万 m^2 。其中体育场为大开口轮辐式索承网格钢结构体系,下方主体结构为钢筋混凝土框架-剪力墙-支撑体系。屋盖整体造型呈马鞍形曲面,平面投影为椭圆形,平面尺寸为263.5 $\text{m} \times 227.5\text{m}$,屋盖中心洞口尺寸为195.4 $\text{m} \times 127.4\text{m}$,最高点标高为40.000 m ,

整体结构分解模型如图1所示。结构主要采用的材料为Q460GJC、Q420GJC、Q345GJC、Q345B和Q345C等。

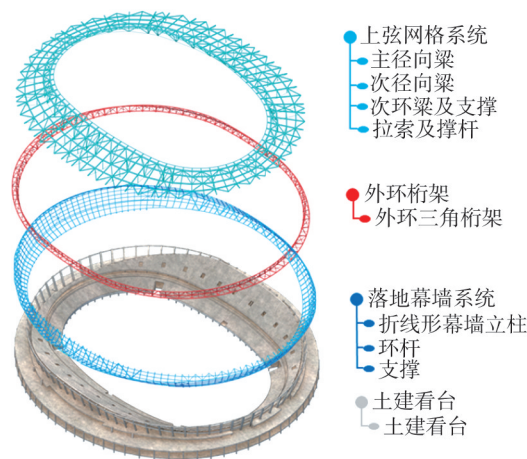


图1 体育场结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of stadium structure

如图1所示,体育场结构以外环三角环桁架为界,分为外部落地幕墙系统和内部索承网格系统两个部分。中间三角桁架两端连接幕墙系统和索承网格系统,支承于下方土建混凝土柱顶的72套成品铰支座上。内部索承网格系统由拉索和撑杆、主/次径向梁、次环梁以及各种支撑组成,其中上弦为刚性网格面,包含72道径向杆件和5道环向杆件,与封边环桁架采用销轴连接,如图2所示。下弦为轮辐式索杆体系,下弦径向索系与上弦径向杆位置对应。径向索共计72根,包含100 mm 和120 mm 两种直径规格;环向索有1根,包含上下两排共计8根128 mm 直径的索。拉索均为高钒索,索夹为铸钢件,材质为G20Mn5,索头采用热铸锚头。径向杆与径向索之间设置三根垂直撑杆,撑杆两端采用销轴与节点连接。径向索与环向索相交位置,沿环向和径向分别设置1根斜撑杆,其中径向斜撑杆上方屋盖网格最大悬挑长度为13.5 m 。节点细部构造如图3所示。

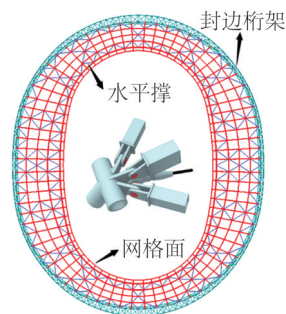


图2 屋盖结构布置

Fig. 2 Layout of roof structure

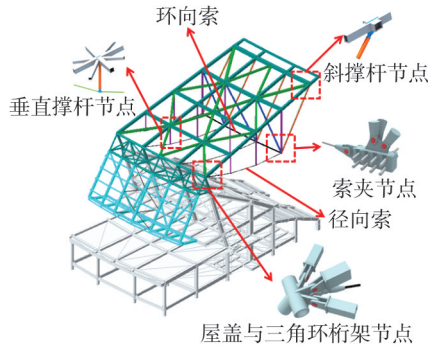


图 3 索承网格节点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the cable-supported grid joints

2 项目预应力施工重难点分析

索承网格体系中索系体量大,环向索包含 8 根并排设置的 128 mm 直径高钒索,径向索共计 72 根,张拉工程量较大。结构未成型前上弦网格屋盖刚度较弱;张拉施工时体系内预应力的建立也是非线性不可逆的过程;拉索分批张拉时因张拉先后顺序的不同引起结构内力变化,索力间相互影响大,且部分杆件需在张拉过程中安装。因此如何控制张拉批次、张拉级数、斜撑杆安装顺序等,并考虑结构特点、经济性和便利性,避免或减小各因素对结构成型的影响,是该工程张拉施工过程控制的重难点。

3 张拉方案选择

3.1 张拉方案初选

考虑到采用环向索张拉方法时索力较大,张拉设备

难以支持,故采用张拉径向索的施工方式。根据结构特点,综合考虑张拉过程中空间的对称性、工期和成本等因素,将体育场 72 根径向索划分为对称的 4 个区域,分 6 个批次进行张拉,每个区域每批次张拉 3 根径向索,径向索张拉分批情况如图 4 所示。

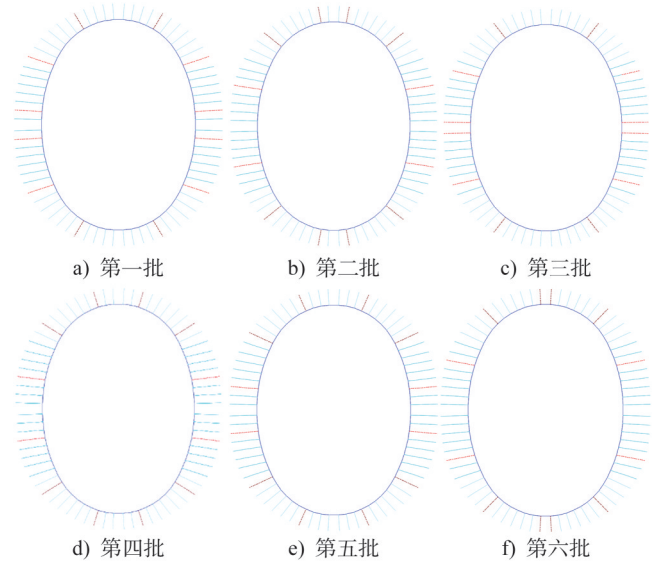


图 4 分批张拉示意图

Fig. 4 Schematic diagram of batch tensioning

根据张拉批次顺序,初步选取了如表 1 所示的 3 种分级张拉方案,其中设计预张力为张拉完成时对应的目标索力。

表 1 分级张拉方案

Table 1 Batch tensioning scheme

分级方案	张拉方案
一级张拉	预紧→100% 设计预张力
二级张拉	预紧→50% 设计预张力→100% 设计预张力
三级张拉	预紧→35% 设计预张力→75% 设计预张力→100% 设计预张力

3.2 不同张拉方案索力对比分析

考虑到径向索的布置和张拉均对称进行,图 5 中选取了 1/4 结构中的 18 根径向索,分别给出了三种张拉方案情况下径向索的索力变化情况。根据图 5 可知,随着张拉级数的增加,一方面张拉施工结束后索力峰值逐渐降低,三种方案对应的最大索力分别为 3 755 kN、3 202 kN 和 3 001 kN;另一方面张拉施工结束后的索力与目标索力也更加接近,三种方案对应的最大索力偏差分别为 140.1%、72.4% 和 36.6%,索力变化更趋于平缓,相比之下采用三级张拉方案,张拉施工结束后的径向索索力与目标索力更加接近。

3.3 结构杆件应力对比分析

图 6 给出了三种张拉方案下,屋盖结构在整个张拉过程中杆件的最大应力情况。由图 6 可知,分级越少,拉索张拉力分布越不均衡,对结构杆件应力的影响也越大。一级张拉时杆件最大应力达到了 $326 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,二级张拉时杆件的最大应力为 $238 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,如果考虑恒荷载设计的安全系数 1.3,则张拉过程中的最大设计应力已经达到 $309 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$,两种方案杆件应力均已超过了 Q345 钢材的强度设计值。

综合考虑下,最终确定采用三级张拉方案,即预紧→35% 设计预张力→75% 设计预张力→100% 设计预张

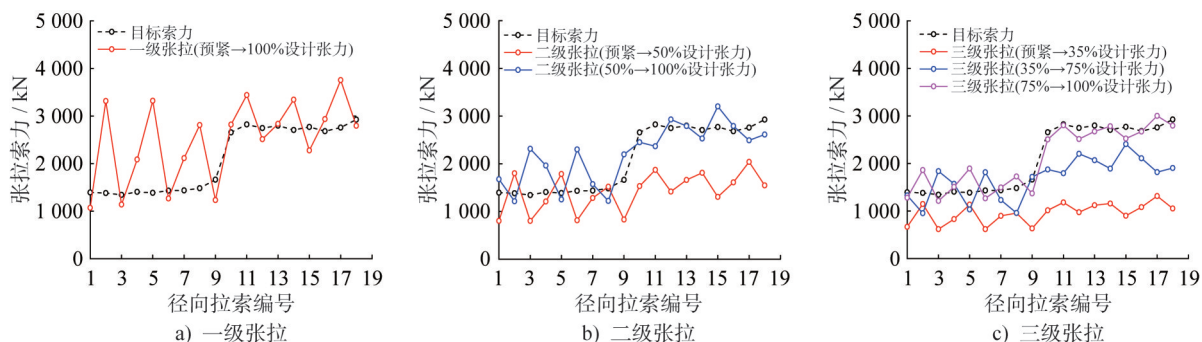


图5 不同张拉方案下的索力

Fig. 5 Cable force under different tensioning schemes

力,张拉过程中屋盖杆件最大应力仅为 $198 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$, 仅相当于前两种张拉方案中杆件最大应力的 60.9% 和 83.3%, 能够满足结构的安全性要求; 另一方面随张拉级数增加, 该方案能够实现较为均匀的索力变化, 且能够较好地控制拉索索力与目标索力间的偏差。

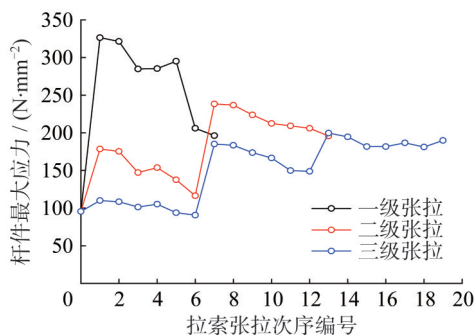


图6 不同张拉方案下的杆件应力

Fig. 6 Stress of members under different tensioning schemes

4 预应力关键技术

4.1 斜撑杆安装

4.1.1 径向斜撑杆安装时机分析

斜撑杆的安装一直是大开口索承网格施工的重难点, 因其结构形式较为特殊, 若安装时机不当, 可能导致后续张拉力无法有效建立。因此斜撑杆一般需在张拉过程中安装, 斜撑杆安装时机的选择至关重要。乌鲁木齐奥体中心体育场索承网格斜撑为径向和环向均有斜撑杆的双向斜撑杆结构形式, 斜撑杆两端为销轴连接节点, 如图7所示。

由于在张拉施工前索呈松弛悬垂状态, 撑杆底端和环向索均处于内偏状态, 如果此时安装斜撑, 则竖向撑杆和两侧斜撑构成一个稳定三角锥体, 张拉时会抵消大部分的张拉力, 导致仅有部分径向索力传递至环向索^[4]。因此径向斜撑杆一般不能在张拉施工前安装, 而如果在张拉完成后安装, 撑杆两端销轴连接容许偏差仅为 5 mm

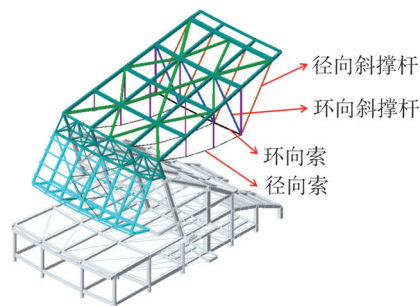


图7 斜撑杆示意图

Fig. 7 Schematic diagram of diagonal braces

左右, 远小于撑杆的安装偏差控制水平, 将导致径向斜撑杆无法按照原长度安装。

因此为实现径向斜撑杆安装时顶升荷载尽量小且易于操作, 经过有限元模拟, 在径向索张拉至 80% 目标索力时, 此时各径向斜撑杆两端点之间的安装长度与理论长度非常接近, 偏差在 $\pm 15 \text{ mm}$ 之内, 为避免径向斜撑杆安装长度超过理论长度, 实际张拉施工时, 在张拉力达到 75% 目标索力时进行径向斜撑杆的安装。当单根径向斜撑杆实测值与理论值偏差较大时, 可通过单点微调张拉设备进行调整。

由于在张拉力达到 80% 目标索力时完成径向斜撑杆安装, 故其形成的三角锥刚度区域将对后面 20% 径向张拉索力产生一定影响, 但由于该工程是带檩条进行张拉施工的, 檩条荷载的存在对环向索索力产生了一定的补充效应 (原设计檩条荷载为张拉完成后施加), 通过有限元分析发现张拉完成后索力相比目标索力仅减小 4% 左右, 能够满足《索结构技术规程》(JGJ 257—2012)^[8] 中张拉力允许偏差不宜大于设计值 10% 的要求。

4.1.2 环向斜撑杆安装时机分析

对于环向斜撑杆, 通过计算对比分析, 张拉前和张拉后安装对于结构变形、杆件应力和索力的影响分别如图8、图9和图10所示, 相关指标汇总如表2所示。

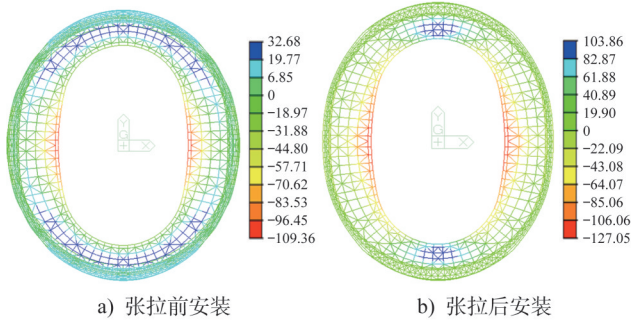


图 8 环向斜撑杆不同安装时机屋盖竖向变形对比 (单位: mm)

Fig. 8 Comparison of roof vertical deformation with different installation times of circumferential diagonal braces (unit: mm)

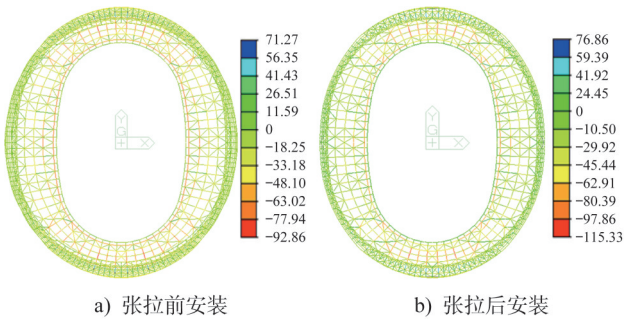


图 9 环向斜撑杆不同安装时机屋盖杆件应力对比 (单位: $N \cdot mm^{-2}$)

Fig. 9 Stress comparison of roof members with different installation times of circumferential diagonal braces (unit: $N \cdot mm^{-2}$)

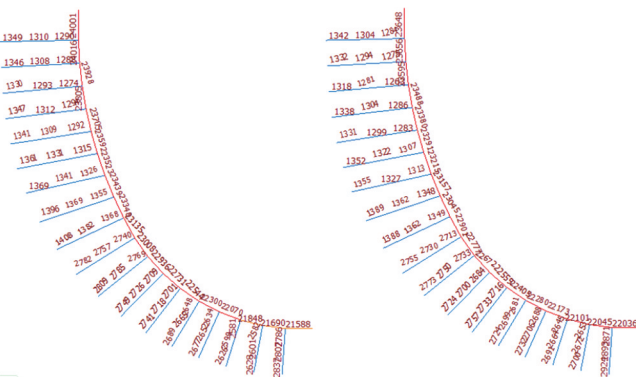


图 10 环向斜撑杆不同安装时机张拉索力对比 (单位: kN)

Fig. 10 Cable force comparison with different installation times of circumferential diagonal braces (unit: kN)

由表 2 可知,当张拉前安装环向斜撑杆时,长轴和短轴位置结构屋盖的变形最小,屋盖变形趋缓;环向斜撑杆

的安装时机对索力影响较小,两种情况下径向索索力和环向索索力偏差仅为 3.2% 和 2.1%,但对杆件应力影响较大,张拉后施工环向斜撑杆时最大杆件压应力由 $92.86 N \cdot mm^{-2}$ 提高到 $115.33 N \cdot mm^{-2}$ 。这主要是由于环向斜撑杆与环向索垂直撑杆组成的平面与径向拉索基本呈垂直关系,在张拉径向索时,不会形成三角刚度区域;此外,环向斜撑杆、环向索的垂直撑杆、环向索以及环向索上部屋盖环向连系杆组成了如图 11 所示的闭合环向桁架,此环向桁架连接了长轴和短轴,对结构整体刚度的建立起到了至关重要的作用。因此综合考虑后,采用了环向斜撑杆在张拉施工前进行安装的施工方式。

4.2 多维度影响因素分析

轮辐式索承网格结构作为刚柔结合的新型杂交空间结构,其深化设计过程和施工过程中对结构体系成型的影响因素众多,如何避免或减小各因素对结构成型的影响,是工程施工过程控制的重难点之一,采用有限元软件对各因素进行参数分析能够为施工提供指导性意见。

考虑到目前大多数工程预应力施工均以索力控制为主,形控为辅,因此采取对张拉索力的控制原则,本节分别从幕墙安装时机、檩条安装时机、屋盖安装误差、环向索下料误差、环境温度等多个维度,评估了各项影响因素对于张拉施工中结构成型和受力的影响。

4.2.1 幕墙安装时机影响分析

乌鲁木齐奥体中心体育场幕墙结构上端与屋盖环桁架相贯焊接,下端与土建结构采用销轴节点连接。幕墙结构的施工主要有以下两种方式:(1) 随屋盖主体结构一起在张拉施工前安装;(2) 结构张拉施工完成后再安装。通常情况下张拉施工可能对已经施工完成的幕墙结构造成不利影响,幕墙提供的额外刚度也可能影响屋盖张拉成型,而张拉完成后再施工幕墙又会导致整个工程施工工期延长。因此在施工方案的选择上,有必要对幕墙结构的安装时机进行分析。

图 12 和图 13 分别给出了张拉前后进行幕墙安装对于结构变形和杆件应力的影响,相关特征指标汇总对比结果如表 3 所示。

由图 12、图 13 以及表 3 结果可知,在张拉索力不变的情况下,张拉前或张拉后安装幕墙结构,对于结构成型的影响均较小,张拉前或张拉后安装幕墙结构屋盖最大变形相差低于 10%。此外对于杆件应力而言,仅杆件拉应力变化较为明显,张拉后安装幕墙相比张拉前安装幕墙杆件最大拉应力由 $71.27 N \cdot mm^{-2}$ 增加至 $99.20 N \cdot mm^{-2}$,出现在位于长轴环桁架对应屋盖主径向梁位置的直腹杆上,如图 14 所示,其余杆件没有明显的应力增加。考虑到应力增加幅度不大,且这些直腹杆的设计应力较低,因

表2 环向斜撑杆不同安装时机结构特征指标汇总

Table 2 Characteristic index summary with different installation times of circumferential diagonal braces

安装时机	短轴最大位移/mm	长轴最大位移/mm	径向索力偏差	环向索力偏差	屋盖杆件应力/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)
张拉前安装	-109.36	32.68	3.2%	2.1%	-92.86~71.27
张拉后安装	-127.05	103.86			-115.33~76.86

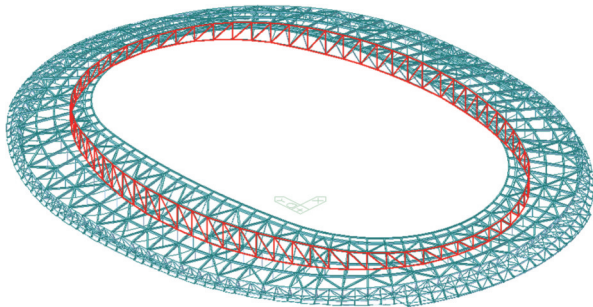
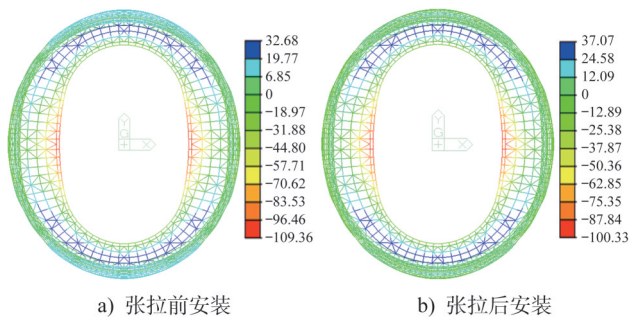


图11 索承网格环向桁架示意图

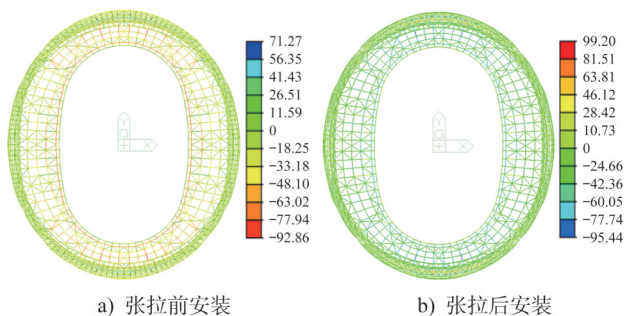
Fig. 11 Schematic diagram of cable-supported grid circumferential truss



a) 张拉前安装 b) 张拉后安装

图12 幕墙结构不同安装时机屋盖竖向变形对比
(单位: mm)

Fig. 12 Comparison of roof vertical deformation with different installation times of curtain wall structure (unit: mm)



a) 张拉前安装 b) 张拉后安装

图13 幕墙结构不同安装时机屋盖杆件应力对比
(单位: $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)Fig. 13 Stress comparison of roof members with different installation times of curtain wall structure (unit: $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)

此两种安装方式对于结构杆件应力和结构成型影响十分有限。综合考虑后幕墙结构采用张拉前随屋盖主结构同步安装的方式,结构杆件应力更小,变形增加相对较小,能够满足施工安全性和精度要求。

4.2.2 檩条安装时机影响分析

与幕墙结构安装类似,檩条安装时机也存在张拉前施工和张拉后施工两种情况。檩条作为次要构件,设计状态下一般按照荷载考虑,对主体结构无刚度贡献,不参与主结构受力。而在实际施工过程中,为避免张拉施工对檩条结构产生附加内力,影响后期使用过程中的安全性,一般均要求檩条张拉后施工。但檩条张拉后施工,有如下两个缺点:一方面由于檩条安装工期较长,不利于控制整体工期;另一方面,主结构施工完成后由于结构限制,机械吊装不便,需要更大的吊装半径和机械型号,导致机械费用提高。如果在张拉前施工檩条结构,檩条会在结构上表面引发蒙皮效应,进而影响索承网格体系的张拉成型。因此在施工方案的选择上,有必要对檩条结构安装时机的影响进行分析。

图15、图16和图17分别给出了檩条不同安装时机对结构变形、杆件应力和张拉索力的影响,相关特征指标汇总如表4所示。由此可见檩条结构在张拉前后安装,对于结构变形和杆件应力的影响均较小。此外对于张拉前安装檩条结构的情况,由于屋盖结构整体重量增加,张拉时最大张拉索力由2 741.34 kN提高到2 822.64 kN,增加幅度仅为2.97%,基本上可忽略不计。综合考虑后采用了檩条结构在张拉前安装的方式。

4.2.3 屋盖安装误差影响分析

结构的矢高直接决定了常规张弦结构刚度的大小。乌鲁木齐奥体中心体育场屋盖主体结构呈马鞍状,在撑杆长度不变的情况下,体育场长、短轴屋盖标高变化对应了屋盖索承网格矢高的变化。考虑到屋盖钢结构安装过程中可能存在的误差,假定将短轴悬挑端部下挠500 mm进行分析。为保证屋盖结构位形的平滑过渡,图18阴影范围内屋盖以悬挑端部最大位移点为基准,按照线性平滑过渡的方式下挠。

图19给出了屋盖安装误差对于结构变形和杆件应力的影响计算结果,与原结构变形和杆件应力的对比结

表3 幕墙结构不同安装时机结构特征指标汇总

Table 3 Characteristic index summary with different installation times of curtain wall structure

工况	短轴最大竖向变形/mm	长轴最大竖向变形/mm	杆件最大应力(负)/(N·mm ⁻²)	杆件最大应力(正)/(N·mm ⁻²)
张拉前安装	-109.36	32.68	-92.86	71.27
张拉后安装	-100.33	37.07	-95.44	99.20

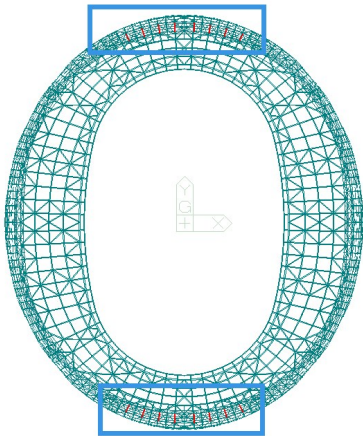
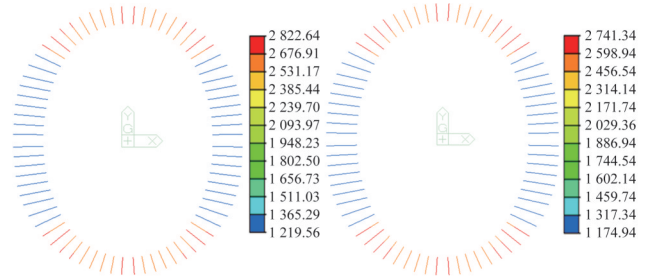


图14 张拉后安装幕墙时应力增加杆件位置

Fig. 14 Location of the stress-increased members when installing the curtain wall after tensioning

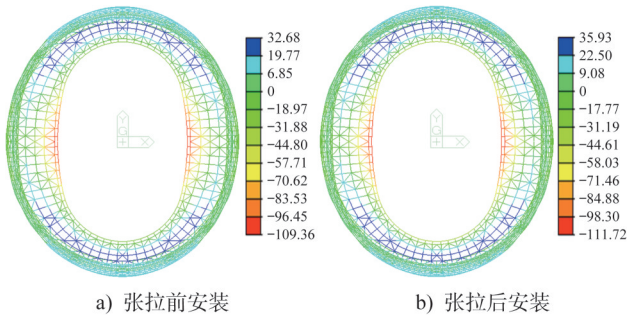


a) 张拉前安装 b) 张拉后安装

图17 檩条不同安装时机张拉索力对比(单位:kN)

Fig. 17 Cable force comparison with different installation times of purlins (unit: kN)

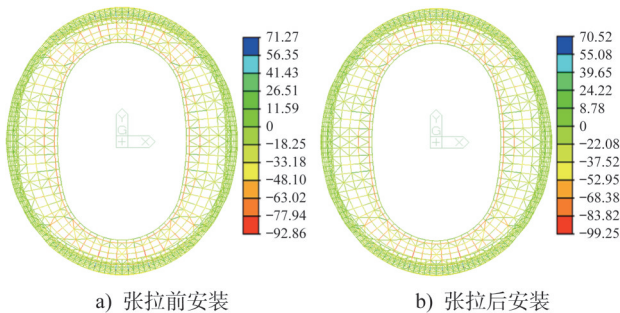
果如表5所示。可见在张拉索力不变的情况下,屋盖安装误差对结构变形和杆件应力影响均很小,基本上可忽略不计。



a) 张拉前安装 b) 张拉后安装

图15 檩条不同安装时机屋盖竖向变形对比(单位:mm)

Fig. 15 Comparison of roof vertical deformation with different installation times of purlins (unit: mm)



a) 张拉前安装 b) 张拉后安装

图16 檩条不同安装时机屋盖杆件应力对比(单位:N·mm⁻²)

Fig. 16 Stress comparison of roof members with different installation times of purlins (unit: N·mm⁻²)

4.2.4 环向索下料误差影响分析

对于索承网格张弦结构体系,拉索的形态和索力对结构的刚度和承载力有着十分重要的影响。其中环向索为被动索,作为连接索网与屋盖的桥梁,承担着传递径向索(主动索)张拉预应力的功能。索承网格环向索一般整体长度较长,需分为若干段进行加工,然后运输到现场组装,加工及现场施工不可避免地会产生偏差;对于长度特别长的索,温度变化也会影响环向索长度。乌鲁木齐奥体中心环向索长度达584 m,环境温度变化10℃时,环向索长度变化达70 mm。参考《建筑工程用锌-5%铝-混合稀土合金镀层拉索》(YB/T 4543—2016)^[9],对于长度大于100 m的索,其允许偏差为±L/5 000=±117 mm,综合考虑环境温度变化影响以及现场实际情况,取环向索下料误差为±300 mm进行影响分析,张拉施工过程中环向索变形情况如图20所示。

环向索施工误差对结构变形和杆件应力的影响如图21所示,相关参数指标对比结果汇总如表6所示。如果采用形控为主的张拉控制标准,±300 mm的环向索下料误差将导致±27.3%左右的张拉索力偏差,严重影响体系的安全性。而该工程中采用力控为主、形控为辅的张拉施工方式,在控制索力不变的情况下,对于屋盖变形基本没有影响,虽然会导致张拉完成后索承网格竖向撑杆垂直度产生约50 mm的偏差,但仍可满足撑杆垂直度偏差不大于L/200的控制标准,符合规定的安装精度要求。

表4 檩条不同安装时机结构特征指标汇总

Table 4 Characteristic index summary with different installation times of purlins

工况	短轴最大竖向变形/mm	长轴最大竖向变形/mm	杆件最大应力(负)/($N \cdot mm^{-2}$)	杆件最大应力(正)/($N \cdot mm^{-2}$)
张拉前安装	-109.36	32.68	-92.86	71.27
张拉后安装	-111.72	35.93	-99.25	70.52

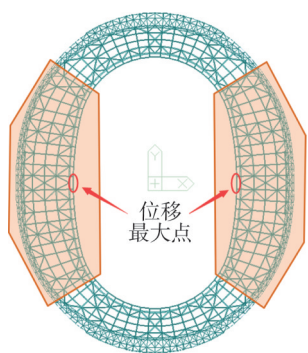
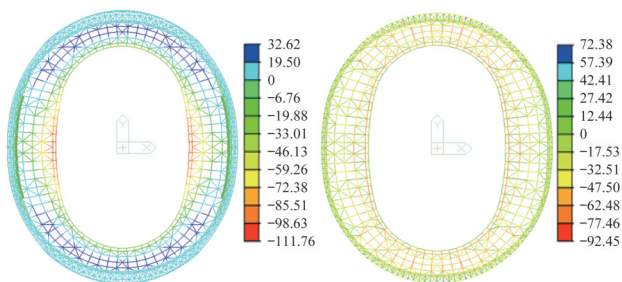


图18 屋盖安装误差调整区域示意图

Fig. 18 Schematic diagram of adjustment region of roof installation error



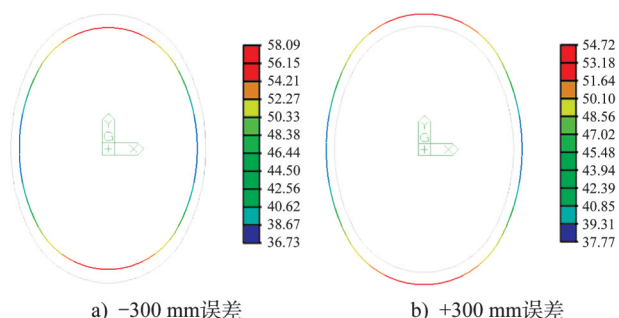
a) 竖向位移(单位: mm) b) 杆件应力(单位: $N \cdot mm^{-2}$)

图19 屋盖安装误差对屋盖结构的影响

Fig. 19 The effect of installation error on roof structure

4.2.5 环境温度的影响分析

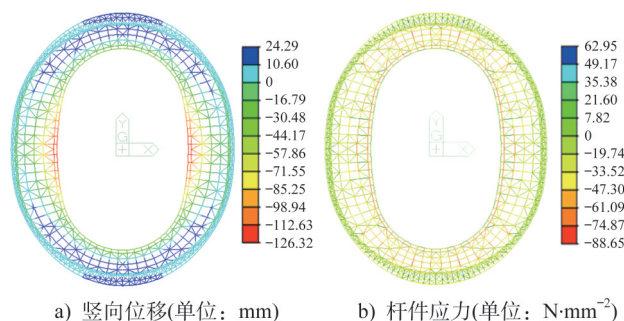
一般而言,结构设计会根据建筑物所在地区一年内的平均气温、最高和最低气温,确定一个参考的平均温度作为结构设计基准温度,并设定相应的合拢温度,以期施工完成后,结构使用过程中的温度能够与设计温度吻合,避免出现因温度影响而产生的附加应力。但由于工程不确定因素较多,特别考虑到实际施工工期与计划工期发



a) -300 mm误差 b) +300 mm误差

图20 环向索变形(单位: mm)

Fig. 20 Deformation of ring cable (unit: mm)



a) 竖向位移(单位: mm) b) 杆件应力(单位: $N \cdot mm^{-2}$)

图21 环向索误差对屋盖结构影响

Fig. 21 The effect of ring cable error on roof structure

生变化时,经常会出现张拉温度不在设计要求的合拢温度范围内的情况。

一般工程中的预应力补偿施工,均考虑在同一时间段进行拉索张拉和钢结构施工,针对整体结构进行温度敏感性分析并提出补偿措施,鲜有将钢结构与预应力两个施工阶段在不同施工温度下进行影响分析的情况。已有研究中虽然提出了不同施工阶段温度影响下的索力修正补偿理论,但均是以形控为张拉控制标准的索力控制研究^[10-11],而大多数工程中预应力施工的控制标准均以

表5 屋盖安装误差对结构影响特征指标汇总

Table 5 Characteristic index summary under the effect of roof installation error

工况	短轴最大竖向变形/mm	长轴最大竖向变形/mm	杆件最大应力(负)/($N \cdot mm^{-2}$)	杆件最大应力(正)/($N \cdot mm^{-2}$)
原结构屋盖	-109.36	32.68	-92.86	71.27
偏差后屋盖	-111.76	32.62	-92.45	72.38

表6 环向索下料误差对结构影响特征指标汇总

Table 6 Characteristic index summary under the effect of ring cable cutting error

工况	短轴最大 竖向变形/mm	长轴最大 竖向变形/mm	杆件最大应力(负)/ ($N \cdot mm^{-2}$)	杆件最大应力(正)/ ($N \cdot mm^{-2}$)
原结构屋盖	-109.36	32.68	-92.86	71.27
环向索下料-300 mm	-126.32	24.29	-88.65	62.95
环向索下料+300 mm	-126.32	24.29	-88.65	62.95

索力控制为主,形控为辅,故难以应用于实际操作。此外,目前预应力结构的施工更关注整个屋盖钢结构的合拢温度,而对预应力施工环境温度却不够重视,当预应力结构对温度敏感时,可能导致预应力施工时结构因温度变化而产生较大的附加应力,进而影响结构后期使用安全。

以乌鲁木齐奥体中心体育场为例,钢结构施工能够满足设计要求的合拢温度($20 \pm 5^\circ C$),但预应力张拉施工与钢结构施工在不同阶段完成,温度差可能高达 $20^\circ C$ 左右,难以满足设计合拢温度的要求。为了评估体育场整体结构对于施工温度的敏感性,进而确定低温张拉施工条件下对拉索索力的补偿措施,考虑结构在 $0^\circ C$ 时进行张拉施工,然后结构整体升温至常温 $20^\circ C$ 条件下,结构变形、结构杆件应力和索力的变化情况分别如图22、图23和图24所示,表7给出了理想施工情况、张拉施工完成和升温完成三种状态下的结构特征指标汇总。

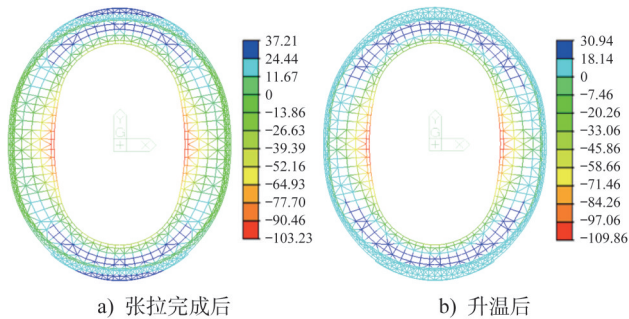


图22 环境温度影响下屋盖竖向变形对比(单位:mm)
Fig. 22 Comparison of vertical deformation under the effect of environment temperature (unit:mm)

从图22~图24可以看出,在 $0^\circ C$ 时张拉完成再升温

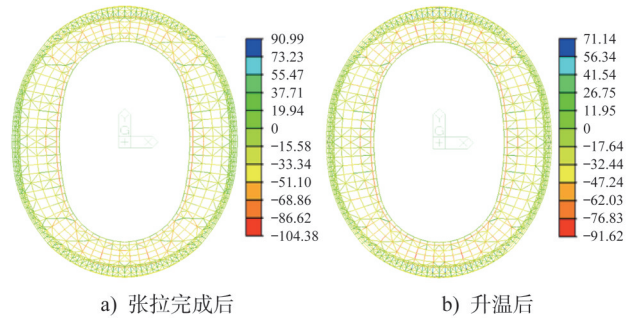


图23 环境温度影响下结构杆件应力对比
(单位: $N \cdot mm^{-2}$)

Fig. 23 Stress comparison of members under the effect of environment temperature (unit: $N \cdot mm^{-2}$)

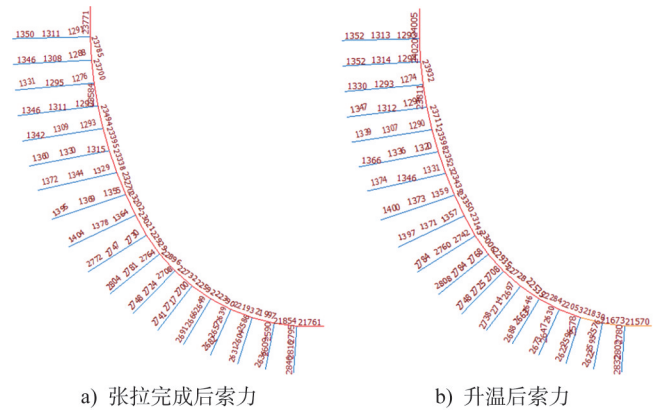


图24 环境温度影响下索力对比(单位:kN)

Fig. 24 Comparison of cable force under the effect of environment temperature (unit:kN)

至 $20^\circ C$,屋盖整体变形变化幅度不大,最大仅为6.63 mm,升温后杆件应力相比 $0^\circ C$ 张拉施工时明显降低。升温后环向索和径向索索力相比张拉完成后稍有提高,环向索索力提高幅度高于径向索索力提高幅度,环向索索力相

表7 施工温度对结构影响特征指标汇总

Table 7 Characteristic index summary under the effect of environment temperature

工况	短轴最大 竖向变形/mm	长轴最大 竖向变形/mm	杆件最大应力(负)/ ($N \cdot mm^{-2}$)	杆件最大应力(正)/ ($N \cdot mm^{-2}$)
原结构屋盖	-109.36	32.68	-92.86	71.27
降温至 $0^\circ C$ 张拉完成	-103.23	37.21	-103.23	90.99
升温至常温	-109.86	30.94	-91.62	71.14

比张拉后提高约1.0%，整体而言索力变化不大。按照施工完成后拉索索力相同的控制原则，0℃时进行张拉施工后再升温至常温，结构成型状态和杆件应力与理想施工状态下基本一致，影响基本上可忽略不计。

4.3 檩条低应力安装施工技术

在前文的分析中已经明确，在分析过程中将檩条简化为屋面恒荷载的情况下，檩条安装时机对屋盖结构变形和杆件应力的影响很小，基本上可忽略不计，但并未分析施工过程中檩条的受力情况。这主要是由于在初步设计阶段，设计模型需要不断调整优化，而檩条密集、杆件数量多，建模过程繁琐；另一方面，在进行檩条设计时，一般将其仅作为独立的附属构件单独设计，不考虑支撑边界条件变化对檩条自身受力的影响。这种简化假定是考虑檩条结构在主体结构张拉完成之后施工的情况，与张拉前施工檩条的方案并不对应。因此为保证檩条设计与施工方案一致，分别考虑了如下两种工况进行施工过程模拟分析：(1) 檩条重量以檩条荷载的形式进行计算；(2) 根据檩条布置，在计算模型中建立檩条模型进行计算。

图25、图26和图27分别给出了将檩条作为荷载和进行檩条建模两种情况下，结构变形、杆件应力和索力的对比，图28给出了檩条实际建模情况下檩条的应力图。

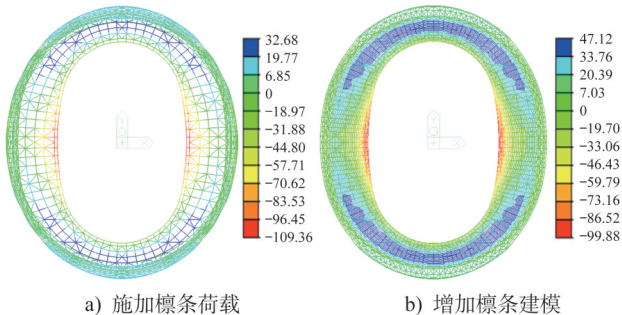


图25 檩条作用下屋盖竖向变形对比 (单位: mm)
Fig. 25 Comparison of roof vertical deformation under the effect of purlins (unit: mm)

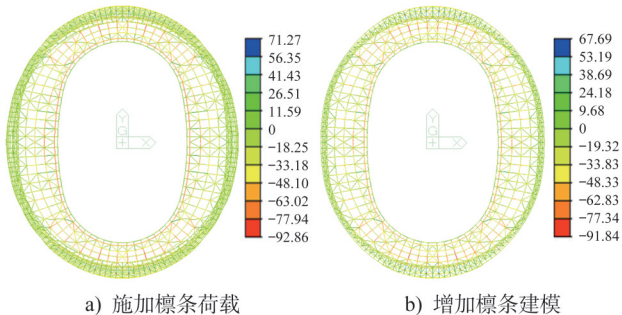


图26 檩条作用下结构杆件应力对比 (单位: N·mm⁻²)
Fig. 26 Stress comparison of members under the effect of purlins (unit: N·mm⁻²)

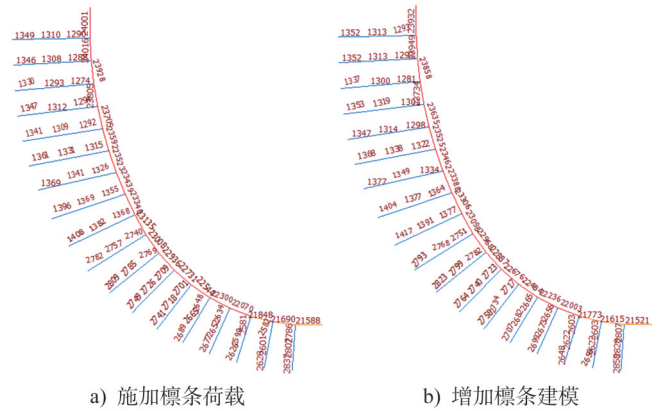


图27 檩条作用下索力对比 (单位: kN)

Fig. 27 Comparison of cable force under the effect of purlins (unit: kN)

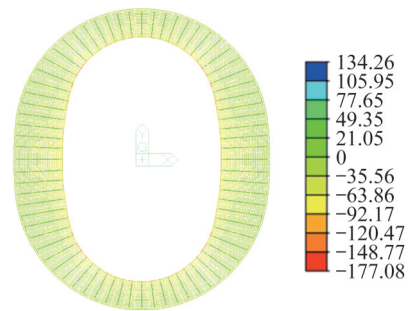


图28 檩条应力 (单位: N·mm⁻²)

Fig. 28 Purlin stress (unit: N·mm⁻²)

由计算结果可知，两种情况对应的屋盖结构杆件应力和拉索索力计算结果基本一致，相对偏差并不大。而考虑檩条建模后，由于檩条结构自身面内刚度对结构整体刚度的贡献，使结构会出现一定的蒙皮效应，结构最大竖向变形相比将檩条按照荷载考虑时结构最大竖向变形减小9.48 mm，降低了8.7%；此外，张拉施工对檩条结构产生了额外的轴向力和弯矩，导致此时檩条最大应力达到了177.08 N·mm⁻²，超过了檩条承载力的50%，严重影响了檩条在后期使用过程中的安全性。

基于上述情况，为保证檩条设计与施工方案一致，且在张拉施工前完成檩条安装，该工程中檩条安装采用了如下方式：檩条结构随主结构流水作业施工，同时将檩条杆件两端的全焊接连接改为仅一端焊接，檩条另一端通过快速松钩安装用的卡板临时焊接固定于檩条支撑短柱上，如图29所示。此时檩条临时固定端与支撑短柱间存在一定的间隙，在张拉施工时可以完全释放因张拉施工产生的内力，进而实现低应力安装，同时可将檩条的临时固定端集中到同一个支撑短柱上，以便后续檩条焊接。通过上述方式，消除了张拉施工对檩条内力的不利影响，极大地缩短了施工工期，同时也给钢结构施工带来了较大的灵活性。



图29 檩条低应力安装现场施工

Fig. 29 On-site construction of the low-stress installation for purlins

5 结论

本文基于乌鲁木齐奥体中心体育场索承网格结构的预应力施工,介绍了预应力施工过程中张拉方案的确定原则和该工程中应用的预应力关键技术。根据本文结果,得出主要结论如下:

(1) 通过对张拉过程的施工模拟分析,最终确定了六批次三阶段张拉方案,可保证较小的索力变化和较低的杆件应力,能够满足结构的安全性要求。为保证较高的安装精度,径向斜撑杆宜在张拉预应力达到80%索力左右时进行安装,环向斜撑杆则宜在张拉前完成安装。

(2) 通过多维度施工影响因素分析发现,按照对张拉索力的控制原则,幕墙和檩条的不同安装时机对于结构变形和杆件应力的影响相对有限,因此选择在张拉前进行幕墙和檩条施工;而屋盖安装误差、环向索下料误差和环境温度的影响同样有限,对于张拉施工的影响较小。

(3) 檩条的存在使主体结构可以考虑一定的受力蒙皮效应,不采取措施的情况下,在张拉前施工檩条将严重影响檩条在使用状态下的承载能力。而通过本文提出的檩条低应力安装方法,可有效消除张拉施工对檩条受力的不利影响,并缩短工期,给钢结构施工带来了较大的灵活性和选择空间。

参考文献:

- [1] 杨素钦,张恒业,方运强,等.郑州奥体中心体育场车辐式索承网格结构分析[J].建筑结构,2020,50(21):31-37.DOI:10.19701/j.jzjg.2020.21.006.
YANG Suqin, ZHANG Hengye, FANG Yunqiang, et al. Analysis of spoke-typed cable-supported grid structure roof of Zhengzhou Olympic Sports Center Stadium [J]. Building Structure, 2020, 50(21): 31-37. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.21.006. (in Chinese)
- [2] 冯远,向新岸,王立维,等.郑州奥体中心体育场钢结构设计研究[J].建筑结构学报,2020,41(5):11-22.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0501.

- FENG Yuan, XIANG Xin'an, WANG Liwei, et al. Steel structural design of Zhengzhou Olympic center stadium [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 11-22. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0501. (in Chinese)
- [3] 王丰,徐刚,吕品,等.徐州奥体中心体育场环向悬臂索承网格预应力施工关键技术[J].施工技术,2014,43(14):78-82.
WANG Feng, XU Gang, LYU Pin, et al. Prestressed construction of the ring cantilever cable supported latticed structure in Xuzhou Olympic sports center stadium [J]. Construction Technology, 2014, 43(14): 78-82. (in Chinese)
- [4] 赵文雁,马滔,罗斌,等.大开口车辐式索承网格结构预应力施工技术研究[J].建筑结构学报,2020,41(5):23-33.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2019.0438.
ZHAO Wenyang, MA Tao, LUO Bin, et al. Construction technology of large opening spoke-wheel-type cable supported grid structure [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 23-33. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0438. (in Chinese)
- [5] 强旭红,张至毅,张猛,等.轮辐式索承网格屋盖钢结构单道胎架施工技术[J].建筑钢结构进展,2024,26(8):87-95,114.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.08.010.
QIANG Xuhong, ZHANG Zhiyi, ZHANG Meng, et al. Key construction technology of the single jig frame for spoke-type cable-supported steel roof grid structure [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(8): 87-95, 114. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.08.010. (in Chinese)
- [6] 苏英强,全书敬,俞福利,等.第十三届冬运会速滑馆屋盖结构预应力施工仿真分析[J].建筑钢结构进展,2016,18(1):80-88.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.01.010.
SU Yingqiang, TONG Shujing, YU Fuli, et al. Simulation of construction process of the roof structure in Urumchi speed-skating gymnasium [J]. Progress in Steel Building Structures, 2016, 18(1): 80-88. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2016.01.010. (in Chinese)
- [7] 阮杨捷.新型拉梁-弦支穹顶结构力学性能分析及施工关键技术研究[D].南京:东南大学,2021.
RUAN Yangjie. Research on analysis of mechanical performance and construction key technologies of a new type of tensile beam suspendome structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.索结构技术规程:JGJ 257—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Cable Structures: JGJ 257—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部.建筑工程用锌-5%铝-混合稀土合金镀层拉索:YB/T 4543—2016[S].北京:冶金工业出版社,2016.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Zinc-5% Aluminum-Mixed Mischmetal Alloy-Coated Cable for Building Engineering:

- YB/T 4543—2016[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [10] 娄荣. 空间钢结构施工力学及其优化控制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- LOU Rong. Researches on mechanics and optimal control of spatial steel structure construction [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)
- [11] 田广宇. 车辐式张拉结构设计理论与施工控制关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- TIAN Guangyu. Research on key technology of design theory and construction control in spoke tension structures [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)