

DOI: 10.7672/sgjs2026130001

采光顶钢结构选型研究与工程应用*

刘峰¹, 闻陈宝^{2,3}, 莫亚光¹, 杨宗孝¹, 李晓永¹, 朱博莉⁴, 张栋梁¹

(1. 北京城建集团有限责任公司, 北京 100088; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084;
3. 中国联合工程有限公司, 浙江 杭州 310052; 4. 北京科技大学未来城市学院, 北京 100088)

[摘要] 采光顶作为融合采光功能与建筑美学的关键外围护结构,在现代公共建筑中得到了广泛应用。常见的结构形式包括刚性结构(梁系、单层/双层网格)、柔性结构(索桁架、索网)以及杂交结构(张弦梁、索穹顶等)。梳理了采光顶钢结构的主要组成形式,分类阐述了各类体系的受力特性与设计要点,并重点分析了斜拉索及车辐式采光顶结构的受力机理。同时,介绍了风荷载、地震作用及温度效应等关键设计技术,并结合典型工程案例,综述了其在结构设计与施工方法方面的研究进展。在此基础上,展望了采光顶钢结构的未来研究方向与发展趋势。

[关键词] 钢结构;采光顶;斜拉索;风荷载;温度效应;设计;施工技术

[中图分类号] TU391

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0001-11

Type Selection Research and Engineering Application of Steel Structures for Skylights

LIU Feng¹, WEN Chenbao^{2,3}, MO Yaguang¹, YANG Zongxiao¹, LI Xiaoyong¹,
ZHU Boli⁴, ZHANG Dongliang¹

(1. Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. China United Engineering Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310052, China;
4. School of Future Cities, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100088, China)

Abstract: As a key envelope structure integrating daylighting functionality and architectural aesthetics, skylights have been widely used in modern public buildings. Common structural forms include rigid structures (beam systems, single-layer/double-layer grids), flexible structures (cable trusses, cable nets), and hybrid structures (beam-string structures, cable domes, etc.). This paper reviews the main composition forms of steel skylight structures, classifies and elaborates the load-bearing characteristics and design essentials of various structural systems, and focuses on the mechanical mechanisms of cable-stayed and spoke-type skylight structures. Meanwhile, key design considerations such as wind loads, seismic actions, and temperature effects are introduced. Based on several typical engineering cases, the research progress in structural design and construction methods is summarized. On this basis, future research directions and development trends of steel skylight structures are prospected.

Keywords: steel structure; skylights; stay cable; wind load; temperature effect; design; construction

0 引言

采光顶是安装在建筑屋面,以透光面板(通常为玻璃)与支承体系构成的外围护结构^[1],其根本作用在于引入自然光并抵御风雨,在现代建筑中已成为融合采光需求、美学与使用功能的关键构件。随着点支式玻璃技术的成熟与推广,玻璃采光顶与

幕墙系统的应用场景越来越广泛。

在办公楼、酒店及商业综合体中,采光顶常与中庭空间结合形成共享区域。除基本的防护与采光功能外,这类空间往往承担着人员流通、休闲交流的复合功能。从建筑设计角度,采光顶需要保证充足而均匀的自然光照,同时呈现简洁大气的视觉效果;从结构设计角度,则需兼顾轻量化、耐久性和安全性。

本文将围绕采光顶的组成特点、传力机制、工

* 国家自然科学基金面上项目(52378164)

[作者简介] 刘峰,工程师,E-mail:1249217830@qq.com

[收稿日期] 2026-04-10

程应用、适用场景、设计方法与施工技术展开讨论,以期对相关工程实践提供参考。

1 采光顶钢结构的组成特点与应用

1.1 采光顶结构选型基本准则

采光顶是集采光、围护与结构承载于一体的建筑构件,其首要功能是实现高效的自然采光。由于建筑功能与形态需求的多样性,采光顶的平面与空间形式往往较为复杂,这对支承体系的承载能力、变形控制及整体稳定性提出了较高要求。钢材因其轻质高强、力学性能稳定、施工便捷且造型适应性好等特点,成为采光顶支承体系的主流选择。

采光顶的结构选型应遵循采光遮挡最小化、透光效率最大化的基本原则,在此基础上统筹考虑结构自重、材料利用效率、受力合理性与长期安全耐久性,并兼顾建筑形态的美学表达。根据受力特性差异,采光顶支承结构可分为刚性结构、柔性结构与杂交结构 3 类。

采光顶平面形状多样,常见的有矩形、圆形和椭圆形等;空间形态包括平面、拱形、椭球壳、马鞍形和多面体等。矩形采光顶多采用单向或双向受力体系,支座可选用简支滑移或简支固定支座;圆形与椭圆形采光顶则常采用双向或三向单层网格结构,支座设计时宜允许径向滑移或有限滑移,必要时可以设置阻尼器以增强抗震性能。

具体选型时,需综合考量结构跨度、外部荷载、建筑造型、气候条件、后期维护及工程造价等因素,以实现安全、经济、适用与美观的协调统一。

1.2 刚性结构

刚性结构体系依靠构件自身的弯曲和轴压刚度承载力,整体刚度大、传力路径明确、稳定性好。常见的刚性结构包括梁系结构、单层网格结构和双层网格结构。

梁系结构由主、次梁组成,构造简单、施工便捷,适用于中小跨度、平面规则的采光顶。其中,主梁承担主要荷载,次梁划分网格并传递面板荷载;节点多采用刚性连接以保证整体刚度。当需要减轻自重、提高通透性时,主次梁也可以采用桁架形式^[2-3]。如图 1 所示,典型项目包括四川大学前沿医学研究中心项目、深圳腾讯全球总部“企鹅岛”云楼、沈阳万象城项目等^[4]。

单层网格(壳)结构通过杆件交汇于节点形成空间受力体系^[5-7],具有自重轻、通透性好的特点,常见于圆形、椭圆形采光顶,网格可采用三角形、四边形、六边形等形式。单层网格刚度相对较弱,跨度较大时需优化网格划分并加强节点构造。如图

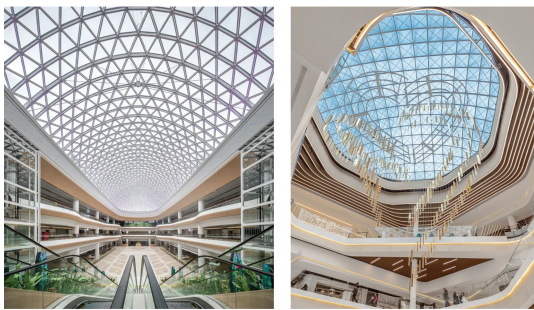


a 四川大学前沿医学研究中心 b 深圳腾讯“企鹅岛”

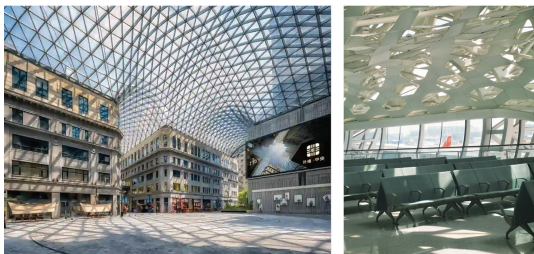
图 1 梁系结构采光顶

Fig. 1 Skylight with beam structure

2a~2c 所示,典型项目有广州白云机场 3 期、法国 Creteil Soleil 购物中心、上海南京东路 179 街坊顶盖等。



a 广州白云机场3期 b 法国Creteil Soleil购物中心



c 上海南京东路179街坊顶盖 d 深圳宝安国际机场

图 2 网格结构采光顶

Fig. 2 Skylight with grid structure

双层网格(壳)结构由上、下层网格及腹杆组成^[8],整体刚度显著提高,抗变形、抗失稳能力增强,适用于大跨度采光顶(如机场、会展中心)。网格划分可结合建筑造型设计,通过优化腹杆和弦杆的布置,降低用钢量并提升承载效率。如图 2d 所示,典型项目有深圳宝安国际机场、北京老山自行车馆等。

实际工程中,梁系结构与网格结构可以组合使用,形成协同受力体系。如四川成都某医院采用空间单层网壳和平面钢架组合的采光顶^[7],乐华城特拉福德中心一期采用平面桁架与单层网壳组合结构^[9]。

1.3 柔性结构

柔性结构以拉索、索网及张拉膜等为主要受力构件,通过施加预张力获得稳定受力形态^[10],具有自重轻、跨越能力强、造型适应性好等显著优势,但刚度相对较小,对预张力控制、风振响应及整体稳定性设计要求较高。依据拉索布置方式,可分为单向索桁架、双向/三向索桁架、马鞍面单层索网及双层索网等类型。

1) 单向索桁架由主索、副索及撑杆组成单向受力体系,构造简单、张拉便捷,适用于狭长型采光顶。主索承担主要拉力,副索与撑杆形成稳定桁架控制结构变形,可通过调整预应力满足不同跨度需求。

2) 双向/三向索桁架由拉索沿 2 个或 3 个方向交叉布置,形成空间受力网格,刚度与稳定性优于单向索桁架,适配方形、多边形平面采光顶。索网交叉节点设夹具或节点板,保证力的有效传递,预应力均匀施加后可形成稳定曲面,透光率高。

3) 马鞍面单层索网是由两组曲率相反的拉索交叉组成马鞍形曲面,通过预应力形成自平衡体系,依靠边缘构件支承,造型简洁,适用于大跨度异形采光顶。通过精准控制预应力,可在保证结构效能的同时满足建筑形态需求。

4) 双层索网通过上、下两层索系协同受力,刚度与抗风振性能大幅提升,适用于风荷载复杂、超大跨度场景。

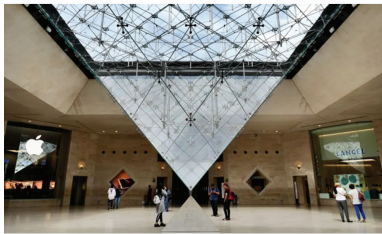
柔性结构采光顶典型项目包括巴黎卢浮宫金字塔、济南黄河体育中心专业足球场、国家速滑馆、广东顺德德胜体育中心游泳馆、三亚市体育中心体育场等,如图 3 所示。

1.4 杂交结构

杂交结构通过刚性承重构件与柔性拉索、撑杆协同工作,实现刚柔受力互补,既具备较好的整体刚度与稳定性,又能有效减轻自重、提高跨越能力,可较好适配中大跨度及复杂曲面造型的采光顶工程。

预应力自平衡索桁架在传统桁架中引入预应力拉索而形成,通过拉索预张力抵消部分荷载应力,提升刚度与承载能力,同时降低用钢量。该体系可实现自平衡,减少对主体结构的推力^[10]。

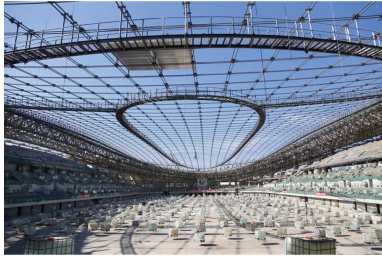
索承空间结构以拉索为主要承重体系,搭配少量刚性杆件(如环梁、撑杆)形成空间结构,如索穹顶、索网-桁架组合体系。索穹顶通过径向索、环向索及撑杆组成,自重轻、跨度大,采光效果极佳,适用于大型公共建筑采光顶。



a 巴黎卢浮宫金字塔



b 济南黄河体育中心专业足球场



c 国家速滑馆

图 3 柔性结构采光顶

Fig. 3 Skylight with cable structure

张弦梁由刚性上弦梁、柔性下弦索及中间撑杆组成,通过张拉下弦索为上弦梁提供反拱,提升承载性能;空间张弦梁将平面体系扩展为三维空间体系,适配曲面采光顶。张弦梁结构传力直接、形态简洁,广泛应用于中庭、场馆采光顶工程^[11]。

如图 4 所示,广州艺术博物馆采用索承网壳采光顶、伦敦 Portcullis House 采用木-钢-索组合式索桁架杂交结构采光顶、柏林中央合作银行采用预应力自平衡索承空间网壳采光顶、汉堡历史博物馆采用了刚性交叉索加劲单层网壳采光顶。

1.5 其他结构形式

采光顶的竖向支撑对建筑视觉效果影响显著。低位采光顶可采用梭形柱、分叉柱、树状柱等特色竖向支撑形式,在满足结构需求的同时提升建筑表现力,如图 5 所示。梭形柱柱身呈变截面形式,可有效传递竖向荷载并减少视觉遮挡。叉形柱通过改变柱子的几何形态,在柱身中间分叉,在柱顶与采光顶网格节点连接,分散荷载、提升稳定性,同时形成特定的空间视觉效果。树状柱模仿树枝形态,多级分叉延伸至采光顶网格,适用于强调自然主题的商业综合体等场景。

在超大跨度采光顶研究方面,冯远等^[12]以寒冷地区 800m 跨度城市穹顶为背景,针对 800m 超大型

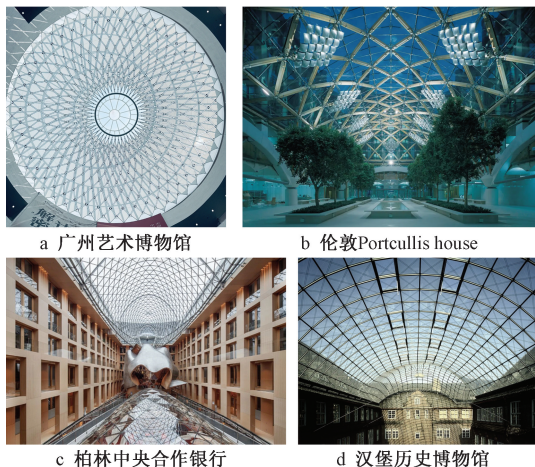


图 4 杂交结构采光顶

Fig. 4 Skylight with hybrid structure



图 5 特殊竖向支撑采光顶

Fig. 5 Skylight with special vertical support structure

城市穹顶展开了研究,对刚性、柔性、混合及组合结构 4 大类共 13 种方案进行了对比分析,研究了刚度、稳定性及经济性等指标,如图 6 所示。

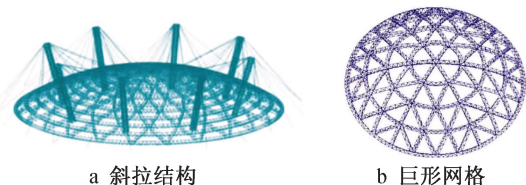


图 6 800m 超大型穹顶结构

Fig. 6 Super-large 800m-span dome structure

除此之外,可折叠开启单元式采光顶的设计为建筑空间带来了新的可能性,使屋面能够随外部环境变化在封闭与敞开状态间切换,显著优化了室内舒适度与使用灵活性^[13],如图 7a 所示。孙佳兴等^[14]开发出一种拉压刚度差异化的弹性吊杆构件(见图 7b),并成功将其嵌入北京城市副中心综合交通枢纽“京帆”屋盖工程,实现了大跨度空间的轻盈覆盖。

北京大兴国际机场航站楼大厅的设计中,C 形

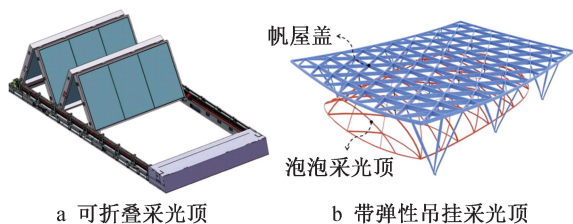


图 7 其他特殊采光顶结构

Fig. 7 Other special skylight structure

支撑柱与屋盖的交接区域被巧妙规划为采光顶结构,成为建筑功能与结构设计融合的典范,如图 8 所示。

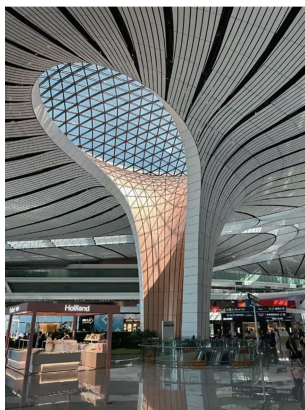


图 8 北京大兴国际机场 C 形柱与采光顶

Fig. 8 C-shaped columns and skylight of Beijing Daxing International Airport

2 采光顶钢结构设计

2.1 采光顶结构选型

在建筑与结构设计中,采光顶需满足建筑采光的功能要求,同时应结合当地气候环境及采光顶跨度等因素,尽可能实现美观、通透、轻量化的建筑效果。本文对斜拉索及车辐式采光顶结构的组成与受力机理进行分析,供采光顶结构设计选型参考。

中心斜拉索采光顶由刚性屋顶结构、内外斜拉索与中心撑杆组成(见图 9),屋盖轻巧、受力合理,适用于平面为矩形或圆形的采光顶设计。屋面外侧斜拉索主要承担屋面恒荷载,内侧拉索平衡屋盖支座处的推力,中心撑杆常与刚性屋盖固定,其高度由承载效率与视觉效果确定。由于屋盖上下均设置斜拉索,该结构属于自平衡受力体系;在施工顺序合理的前提下,其对主体结构以竖向支座压力为主,支座处侧向推力较小。

屋顶斜拉索采光顶由刚性屋盖与斜拉索组成(见图 10),后者为前者提供弹性支撑,使采光顶能够跨越较大空间,适用于平面为方形或矩形的采光顶。屋顶两侧的桅杆下端与主体结构采用铰接连

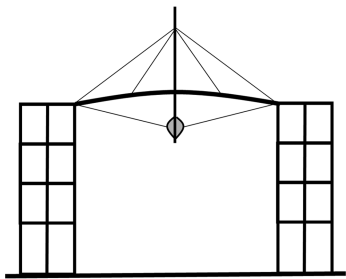


图 9 中心斜拉索采光顶
Fig. 9 Central cable-stayed skylight

接,形成自适应轴力结构。

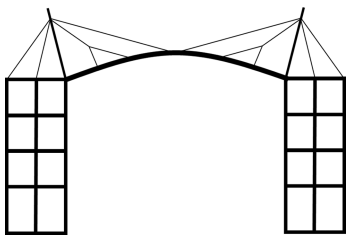


图 10 屋顶斜拉索采光顶
Fig. 10 Roof cable-stayed skylight

平面车辐式或空间车辐式采光顶如图 11 所示。前者拉索呈平面布置,适合矩形平面;后者拉索呈辐射状布置,可形成穹顶空间结构。车辐式屋盖或穹顶结构利用车辐拉索的拉拽受力机理,能有效提高结构的刚度与承载力。在索球高度与拉索布置合理的情况下,可将结构刚度与承载力提高 2 倍以上。

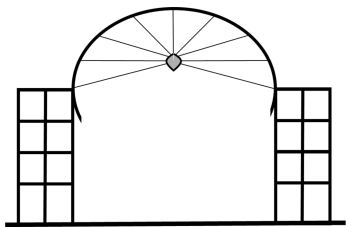


图 11 平面车辐式或空间车辐式采光顶
Fig. 11 Planar spoke-type or spatial spoke-type skylight

2.2 风荷载效应计算

采光顶结构自重较轻,通常位于建筑顶部,风绕流作用会在屋面产生显著的动力响应,风荷载往往成为设计的控制因素。

采光顶钢结构的设计应依据 JGJ 255—2012《采光顶与金属屋面技术规程》及 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》执行。基本风压按地区取值,结合采光顶体型系数、风振系数计算风荷载标准值;负压(上吸风)标准值 $\geq 1.0\text{kN/m}^2$,正压标准值 $\geq 0.5\text{kN/m}^2$ 。

采光顶钢结构设计可采用有限元软件(如

SAP2000,MIDAS 等)建立整体模型,分析风荷载下的内力与变形,重点验算迎风面、背风面及边角区域的构件强度与稳定性;柔性结构需考虑风振响应,可通过增设阻尼装置或优化预应力水平改善振动特性。大跨度、造型复杂的采光顶风荷载分布规律复杂,宜通过风洞试验或 CFD 模拟确定风压分布^[15]。孙瑛等^[16]借助风洞试验手段,对广州中洲中心车辐式预应力索桁架结构的风致动力特性展开研究,结果表明下部开敞式布置可有效削弱气流阻塞效应,改善结构风荷载响应。江勇^[17]以频域分析理论为基石,构建了风致响应时域分析框架及等效静力风荷载求解算法,并依托上海世茂中庭采光顶工程实例验证了这一技术路线的有效性。舒猛等^[18]在成都福田 TOD 树状群伞结构的风洞试验中观察到,该结构风压分布呈现“迎风面负压、背风面正压”的双模态特征,与现行规范假定存在明显偏离;受群伞气动干扰影响,局部区域风吸力峰值远超规范取值,如图 12 所示。陆俊等^[6]采用有限元软件对杭州下沙大剧院网格结构进行风荷载作用下的对比建模分析,如图 13 所示。王之宏等^[19]考虑了群体效应,探讨了上海世茂北外滩商务楼中庭采光顶在塔楼群绕流环境下的风压分布规律。

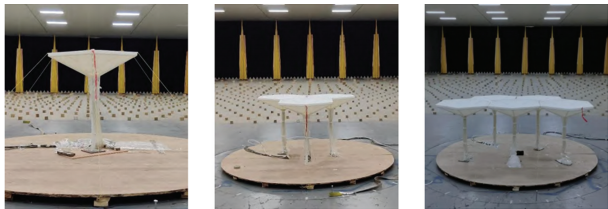


图 12 成都福田 TOD 树状群伞风洞试验
Fig. 12 Chengdu Futian TOD tree-like cluster canopy wind tunnel test

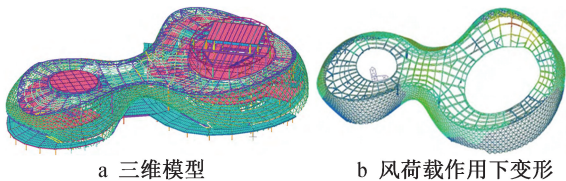


图 13 杭州大剧院风荷载分析
Fig. 13 Wind load analysis of Hangzhou Grand Theater

2.3 地震作用

重力荷载和风荷载是屋面结构承受的主要荷载,由于采光顶自重较轻,因此其面板和次结构可以忽略地震作用,但应该进行节点抗拔和防脱落设计。然而,采光顶支承体系与主体结构刚性连接,当支承构件刚度较大时,二者间动力耦合效应显著。因此,采光顶钢结构在设计时需考虑与主体结

构协同工作,地震作用计算参照 GB/T 50011—2010《建筑抗震设计标准》执行。

林政等^[20]以杭州萧山国际机场三期弦支穹顶为对象,采用 YJK 软件提取结构动力特性;弹塑性时程分析显示,罕遇地震下结构层间变形与构件损伤均处于可控范围。张涛等^[21]针对北京某商业项目椭球形采光顶的抗震性能展开了研究,前二阶振型如图 14 所示。陆俊等^[6]验算了杭州下沙大剧院网格结构在多遇地震作用下的内力和变形。

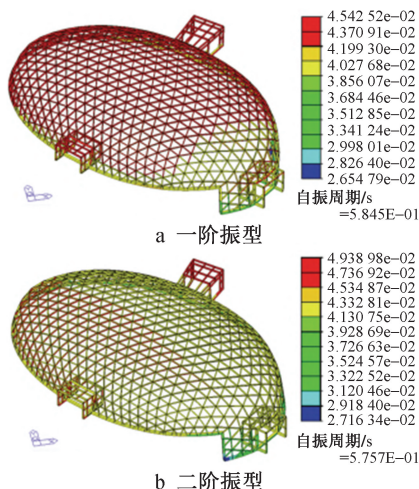


图 14 椭球形采光顶抗震分析

Fig. 14 Seismic analysis of ellipsoidal skylight

现代减震技术为采光顶抗震性能优化提供了思路,支座部位布设黏滞或摩擦型阻尼器,可有效耗散输入能量,抑制相对位移^[22]。除此之外,柔性结构通过拉索与撑杆的优化布置,提升结构延性,避免地震下发生脆性破坏。

2.4 温度作用

温度梯度会在采光顶中产生变形与次生内力,设计需采取有效措施释放温度应力,避免构件开裂或节点破坏。

张清允等^[23]指出,温度荷载为该类型结构服役期的关键控制因素,设计阶段应予以重点关注,如图 15 所示。林政等^[21]进一步分析了杭州机场多塔超长结构的温度效应,提出混凝土筒体间楼板及周边区域应按温度计算结果实施配筋加强。石家庄国际展览中心采用双向索桁架屋盖,横向由承重索、稳定索及吊索组成索桁架,纵向则由空腹桁架与主悬索协同受力;旷文杰等^[24]研究超长结构温度应力问题时发现,中部梁板受拉与端部梁柱弯剪为典型响应特征,且约束刚度与温度应力呈正相关。

采光顶钢结构常用的应对温度作用的措施有:

①采用侧向或径向滑动支座,释放温度变形,减少

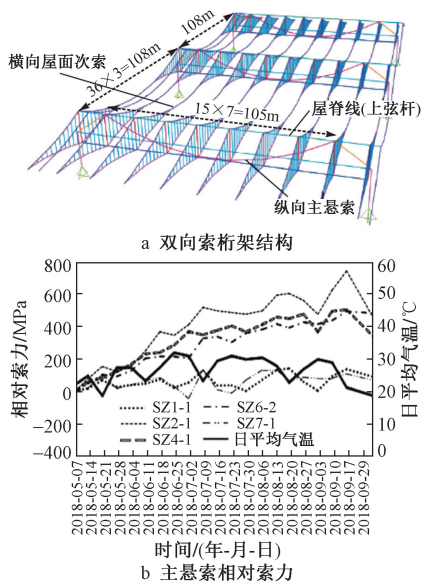


图 15 石家庄国际展览中心温度作用分析

Fig. 15 Thermal effect analysis of Shijiazhuang International Exhibition Center

内力;②小跨度采光顶可通过增大构件截面、加强节点刚度,降低对温度荷载的敏感度;③在连接部位可以设置温度缝或柔性连接节点,适应变形需求;④柔性体系可以通过预应力张拉值调节,抵消温度引起的索力变化。

2.5 边界条件与处理措施

采光顶的边界条件是影响结构受力特征与变形响应的关键因素,需结合结构类型、跨度参数及荷载工况进行针对性选取。边界节点须作精细化构造处理,确保约束可靠、滑移面平顺。预应力索结构需要依赖边界提供支撑力^[25-26],柔性体系周边应配置刚性环梁或边桁架,以平衡索网环向拉力,规避局部应力集中。

工程中常用的边界约束形式主要包括以下 4 类:①完全固定约束,支座可限制结构所有方向的位移与转动自由度,具备刚度强、传力路径直接的特点,多用于小跨度刚性采光顶结构;②完全释放约束,支座仅对竖向位移进行限位,水平位移与转动自由度均予以释放,适用于大跨度柔性结构,可有效消解温度变化与地震作用引发的变形;③有限滑移约束,允许支座在水平方向产生限定范围的位移(如径向滑移),能够兼顾结构受力平衡与变形协调需求,常见于圆形、椭圆形网格采光顶结构;④阻尼约束与减震作用,通过在滑移支座中增设阻尼器装置,既实现径向变形释放水平推力,又能耗散地震(振动)能量,呈现出明显的减隔震效果。建议在采光顶支座沿径向设置黏滞阻尼器或阻尼弹簧等

装置,且应在采光顶结构安装完成、支座径向位移完全释放后,再进行阻尼装置的安装。在空间张弦梁采光顶滑移支座外侧设置黏滞阻尼器,可有效降低水平地震作用下采光顶对主体结构的不利影响,如图 16 所示。

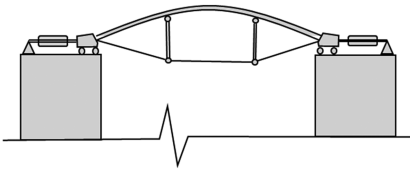


图 16 增设阻尼器
Fig. 16 Adding damper

苏州奥体中心体育场钢屋盖采用马鞍形轮辐式单层索网结构^[27],设计中对 V 形柱采用了铰接套筒节点,弱化了刚度,减小了基础沉降差异对钢屋盖受力的不利影响,如图 17 所示。



图 17 苏州奥体中心节点设计

Fig. 17 Joint design of Suzhou Olympic Sports Center

第 10 届中国花卉博览会竹藤馆采用空间钢框架-双层索网组合体系(见图 18),其人行桥悬挑端部布设两组调谐质量阻尼器(TMD),黄永强等^[28]比较了安装 TMD 前后人行桥悬挑端竖向加速度,研究发现,TMD 可以减小 56% 的加速度响应,展现出了较高的减振效率。

3 采光顶钢结构施工

钢结构采光顶施工须紧扣设计方案与结构特性,遵循“安全高效、精度可控、质量达标”的管控原则。当前工程实践中,采光顶钢结构常用的施工方案有原位拼装、高位整体滑移或累积滑移、整体提升。

3.1 原位拼装

原位拼装指构件在设计标高位置直接组焊成型,适用于中小跨度、低架空作业的采光顶工程,具有施工便捷、几何精度易控的优势。原位拼装通常将梁或桁架拆解为运输单元,依托塔式起重机或汽车式起重机分段吊运就位,于高空完成栓焊连接;须重点校核分段质量与起重能力的匹配性。起吊阶段应优化吊点布置,抑制构件弹性变形;拼装过

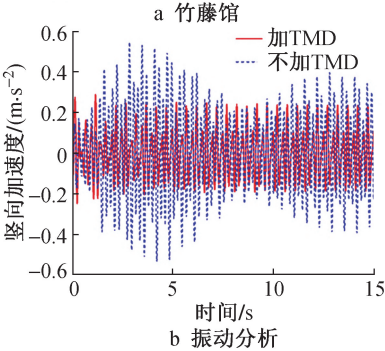


图 18 竹藤馆振动分析

Fig. 18 Vibration analysis of Bamboo and Rattan Pavilion

程须布设临时支撑体系,确保结构未成整体前的几何稳定性。

近年来,学界与工程界持续探索原位拼装的技术优化。朱玉林^[29]针对安徽省六安第一中学图书馆采光顶,开发了钢网架支撑平台体系,采用既有塔式起重机完成安装,免去了大型起重设备的额外投入。动臂式塔式起重机因臂架可竖向变幅、对密集空间适应性强,在受限场地中的应用逐渐变多。戴苏敏等^[30]采用动臂式塔式起重机完成了深圳某既有商业建筑裙楼采光顶施工。胡正平等^[31]在中国海洋大学船体及采光顶项目中,实施了“先拼后张、分级卸载”的工序组织,如图 19 所示。邓林峰等^[32]在巴南万达广场穹顶施工中,以圆心操作平台为核心,配合高空分段及中拼单元吊装,实现了无胎架作业。阎红伟等^[33]则将椭圆形采光顶拆解为模块化单元,依托自升降装备完成高空施工。

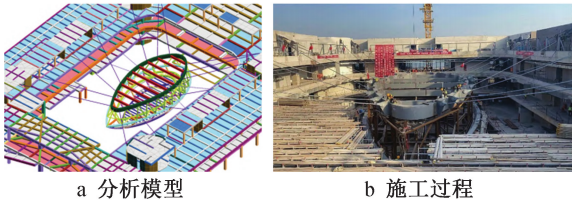


图 19 中国海洋大学船体及采光顶施工

Fig. 19 Construction of the ship-shaped steel structure and skylight at Ocean University of China

3.2 高位整体滑移或累积滑移

高位整体滑移系指结构于拼装平台整体成型后,经由液压顶推系统一次性水平顶推至设计位置

的工法。累积滑移则呈单元化、渐进式特征:前序单元拼装完毕即滑移让位,后续单元于后方续拼,按照“拼装-滑移-再拼装”的循环推进直至合龙。两类滑移技术均适用于大跨度、高空采光顶,可借用周边主体结构作为拼装平台,无需满堂脚手架搭设,兼具经济性与安全性。施工阶段须确保轨道刚度与平整度指标,防止偏位;滑移单元间设置临时连接件,保障整体稳定性。

陈志祥等^[34]在贵阳国际会议中心商业区中庭采光顶施工中,借助 MIDAS 软件完成施工全过程仿真,以累积滑移技术化解高空作业风险,工期缩短 30%。张富国^[35]探讨了场地受限条件下的张弦梁滑移工法。周丹^[36]则将单元滑移技术引入椭圆形采光顶施工。

3.3 整体提升

整体提升系指结构于地面或低空胎架整体拼装成型后,通过液压提升系统同步、匀速、垂直顶升至设计标高的安装技术,适用于大跨度、大吨位屋盖,可显著削减高空作业风险,提升施工效率。

整体提升施工流程包括:①低位拼装,地面搭设胎架,完成采光顶整体组焊;②提升系统布设,于主体结构锚固提升架,布设同步液压千斤顶、传感网络及控制终端;③试提升,分级加载验证设备同步精度与结构稳定性;④正式提升,同步分级顶升至设计标高,校准就位后与支座锚固。

单层网格结构抗侧刚度薄弱,提升阶段处于无支座约束状态,须增设临时刚度强化措施(如临时拉索、侧向支撑),防止顶升过程失稳或过度变形;全程实时监测结构位移、杆件应力及设备同步性,确保施工安全可控。

郑州奥林匹克中心体育场通过胎架优化布局,采用“吊装-提升”组合工艺完成屋盖施工,如图 20 所示^[37]。武汉东西湖体育中心体育场为车辆式索承网格结构,按照“整体组合提升-斜撑早装-拉索张拉”的工序组织施工^[38]。乐山体育场大跨度轮辐式单双层索网结构则采用“低空低应力组装-整体提升-分批成组锚固”的方式^[39]。

3.4 索结构预应力张拉

预应力张拉成形为索结构采光顶施工的核心环节^[40],柔性索体按设计形态定位安装后,通过精准施加预应力,促使体系由几何可变机构转化为具有承载刚度的稳定结构。

袁野等^[41]对乐山体育场轮辐式索网的研究表明,该结构体系对索长制造误差、索夹定位偏差及支座安装偏差不敏感,但索长误差将直接影响索力

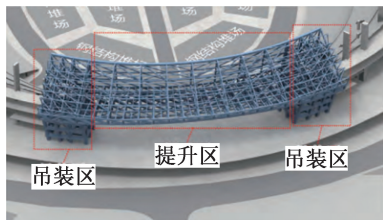


图 20 郑州奥林匹克中心体育场施工
Fig. 20 Construction of Zhengzhou Olympic Sports Center Stadium

分布,须作为施工质量控制的重点。吴小宾等^[42]发现车辆式单双层组合索网的竖向刚度主要由预应力水平主导。区彤等^[43]对比了双层索网与张弦梁的竖向刚度及索力敏感性。董彪等^[11]分析了预张力水平与垂跨比对力学性能的影响规律。杨霄等^[44]以成都金沙遗址博物馆轮辐式双层索网结构为对象,研究了矢跨比与预应力度对内力及变形的影响。西安国际足球中心内圈柔性索网屋面呈“马鞍形曲面”建筑意象,其结构体系由外压环、内拉环及双层双向马鞍形索网构成;柳明亮等^[45]开展了 1:10 缩尺模型试验,如图 21 所示,结合有限元仿真完成了施工全过程分析。

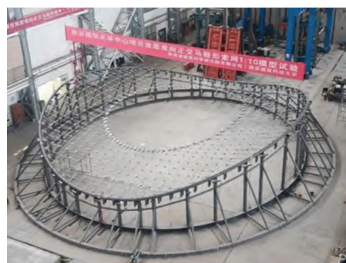


图 21 马鞍形索网结构试验
Fig. 21 Experimental on saddle-shaped cable-net structure

刘怡吟等^[46]基于 ANSYS 平台,对某体育中心轮辐式索承网格结构实施了张拉过程逆向跟踪模拟。张伟等^[47]验证了整体同步张拉工艺在大悬挑椭圆形索承网格屋盖径向索施工中的可行性。

除了常规的张拉成型方案,重力荷载成形法也是索结构预应力施加的有效途径。该方法无需复杂张拉设备,具体流程为:先完成索结构安装(此时不施加预应力或仅施加少量初始预应力),随后逐步安装玻璃面板等屋面荷载,利用重力作用使结构产生预设变形,通过机构转换自动为拉索施加预张力,最终使预应力值达到设计要求。该方法具有预应力分布均匀的优势,适用于马鞍面索网、张弦梁等柔性结构;施工前需通过有限元分析,确保施工成型后的结构位型与设计方案一致。

4 结语

1) 采光顶支承体系可分为刚性结构、柔性结构与杂交结构 3 类。刚性结构(梁系、单层/双层网壳)刚度大、稳定性好,适用于中小跨度及规则平面;柔性结构(索桁架、索网)自重轻、跨越能力强,适用于大跨度及异形曲面;杂交结构通过刚柔组合实现受力互补,兼顾刚度与经济性。选型时应遵循采光遮挡最小化原则,综合考虑跨度、荷载、造型及气候条件。

2) 风荷载是采光顶设计的控制因素,复杂体型宜通过风洞试验或 CFD 模拟确定风压分布;地震作用下需考虑支承体系与主体结构动力耦合效应,可通过阻尼器优化抗震性能;温度作用可通过滑动支座、柔性连接及预应力调节等措施有效释放。鉴于采光顶结构的风振敏感性,深入开展采光顶结构的风振效应和减振技术研究,对于进一步提升采光顶结构的安全与适用能力具有重要工程价值。

3) 原位拼装适用于中小跨度工程,高位滑移与整体提升技术可显著降低高空作业风险,是大型采光顶的主流施工方案;索结构预应力张拉是柔性体系施工的核心环节,重力荷载成形法为预应力施加提供了新途径。未来研究中,应着力研发面向复杂采光顶结构的高精度、自适应智能化施工装备,进一步提升施工质量的可控性。

4) 随着建筑技术的持续迭代,形态别致、传力合理的采光顶体系在各类工程实践中的应用日趋广泛。针对不同功能场景的使用需求与多元性能目标,引入高强钢、碳纤维复合材料、铝合金及不锈钢等轻质高强材料,不仅能够有效减轻结构自重,还可显著拓展跨越能力并增强耐候性能,推动采光顶钢结构向更大跨度、更优效能的方向发展以及更多工程场景的应用。

参考文献:

[1] 中国建筑科学研究院,中国新兴建设开发总公司. 采光顶与金属屋面技术规程:JGJ 255—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

China Academy of Building Research, China Xinxing Construction and Development General Corporation. Technical specification for skylight and metal roof: JGJ 255—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[2] 石瑛莉. 某大跨异形超高支撑曲面采光顶设计[J]. 结构工程师, 2020, 36(3): 229-235.

SHI Y L. Design of a large-span special-shaped super-high support surface daylight roof[J]. Structural engineers, 2020, 36 (3): 229-235.

[3] 吴社. 大跨度采光顶钢结构设计[J]. 中国建筑金属结构, 2021, 20(2): 128-129.

WU S. Design of steel structure for large-span lighting roof[J]. China construction metal structure, 2021, 20(2): 128-129.

[4] 陈丽华. 大体量公共建筑采光顶设计——营口客运南站采光天窗设计探讨[J]. 北方交通, 2014(S2): 119-122.

CHEN L H. Daylighting roof design of huge body public building—Yingkou South Bus Station roof light design discussion [J]. Northern communications, 2014(S2): 119-122.

[5] 曹源,陶志雄,龙浩,等. 某自由曲面单层网壳结构设计 with 节点分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 591-596.

CAO Y, TAO Z X, LONG H, et al. Structural design and node analysis of the free-form single-layer reticulated shell [J]. Building structure, 2022, 52(S1): 591-596.

[6] 陆俊,曹学锋,王鹏飞,等. 杭州下沙大剧院结构设计重点及难点分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(6): 59-67, 91.

LU J, CAO X F, WANG P F, et al. Analysis of key points and difficulties of structural design of Hangzhou Xiasha Grand Theater [J]. Building structure, 2021, 51(6): 59-67, 91.

[7] 李洲,刘育博,唐元旭. 成都某医院屋面采光顶盖设计分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 397-403.

LI Z, LIU Y B, TANG Y X. Design and analysis of roof daylighting roof of a hospital in Chengdu[J]. Building structure, 2023, 53(S1): 397-403.

[8] 杨建鹏,侯学勇. 大跨度双层网壳安装技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(5): 63-67.

YANG J P, HOU X Y. Research on installation technology of large-span double-layer grid shells[J]. Construction technology, 2025, 54(5): 63-67.

[9] 吴博,陈小晶,刘成,等. 平面桁架与单层网壳组合结构采光顶施工技术[J]. 山西建筑, 2021, 47(5): 95-97.

WU B, CHEN X J, LIU C, et al. Construction technology of the plane truss and single-layer lattice shell combined structure lighting roof[J]. Shanxi architecture, 2021, 47(5): 95-97.

[10] 郭彦林,田广宇. 索结构体系、设计原理与施工控制[M]. 北京:科学出版社,2014.

GUO Y L, TIAN G Y. Cable structure system, design principle and construction control[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[11] 董彪,孟晓明,殷兵利. 张弦梁采光顶结构设计关键技术分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 471-476.

DONG B, MENG X M, YIN B L. Analysis of key technologies in the structural design of the daylighting roof with beam string structure[J]. Building structure, 2023, 53(S2): 471-476.

[12] 冯远,向新岸,张恒飞,等. 跨度 800m 穹顶结构选型研究与相关问题[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(1): 21-31.

FENG Y, XIANG X A, ZHANG H F, et al. Structural selection and discussions on 800m span city domes[J]. Journal of building structures, 2017, 38(1): 21-31.

[13] 王焕伟,郭忠庆. 可折叠开启的单元式采光顶在超高层中的应用[J]. 建筑实践, 2025(S1): 140-145.

WANG H W, GUO Z Q. Application of foldable unitized skylight systems in super high-rise buildings[J]. Architectural practice, 2025(S1): 140-145.

[14] 孙佳兴,邢遵胜,张强,等. 带弹性吊挂的张弦网壳结构设计施工一体化研究[J/OL]. 建筑钢结构进展, 1-11 [2026-

- 04-03].
- SUN J X,XING Z S,ZHANG Q, et al. Research on the integration of design and construction of string-supported latticed shell structures with elastic suspension [J/OL]. Progress in steel building structures, 1-11[2026-04-03].
- [15] 蒋家园. 基于风洞试验的双曲面超高层建筑风压特性分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(21): 123-127.
- JIANG J Y. Wind pressure characteristics analysis on hyperbolic super tall building based on wind tunnel test [J]. Construction technology, 2024, 53(21): 123-127.
- [16] 孙瑛, 陈波, 武岳, 等. 车辐式预应力索桁架结构的风振响应研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(9): 73-76, 80.
- SUN Y, CHEN B, WU Y, et al. Research on wind loads and wind-resist behavior for a rung-shape prestressed cable truss [J]. Building structure, 2006, 36(9): 73-76, 80.
- [17] 江勇. 大跨柔性点支式幕墙及采光顶等效风荷载和风致响应研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- JIANG Y. A Study on equivalent static wind load and wind-induced response of large span flexible point supported glass curtain wall and skylight [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [18] 舒猛, 施刚, 赵仕兴, 等. 成都福田 TOD 树状群伞结构设计与研究[J/OL]. 建筑钢结构进展, 1-13[2026-04-03].
- SHU M, SHI G, ZHAO S X, et al. Structural design and research of the tree-like group umbrella structure for Chengdu Futian TOD [J/OL]. Progress in steel building structures, 1-13[2026-04-03].
- [19] 王之宏, 江勇, 王肇民. 考虑群体效应中庭幕墙及采光顶风洞试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(2): 116-119.
- WANG Z H, JIANG Y, WANG Z M. Test and study on wind loads and responses of glass curtain wall and skylight influenced by group of structures [J]. Building structure, 2008, 38(2): 116-119.
- [20] 林政, 杨学林, 陈劲, 等. 杭州萧山国际机场三期工程陆侧交通中心及上盖结构设计[J]. 建筑结构, 2022, 52(15): 115-122.
- LIN Z, YANG X L, CHEN J, et al. Structural design of landside traffic center and upper cover of III project of Hangzhou Xiaoshan International Airport [J]. Building structure, 2022, 52(15): 115-122.
- [21] 张涛, 王立超, 蔡一栋, 等. 某椭圆形采光顶支承结构稳定性与抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2024, 54(9): 95-101, 133.
- ZHANG T, WANG L C, CAI Y D, et al. Study on stability and seismic performance of ellipsoidal single-layer grid shell [J]. Building structure, 2024, 54(9): 95-101, 133.
- [22] 郑宇. 消能减震技术在结构抗震设计中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(14): 114-117.
- ZHENG Y. Application of energy dissipation technology in structural seismic design [J]. Construction technology, 2024, 53(14): 114-117.
- [23] 张清允, 陈志华, 刘红波. 服役期双向索桁架屋盖结构性能监测与分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(8): 807-815.
- ZHANG Q Y, CHEN Z H, LIU H B. Monitoring and analysis of bidirectional cable truss structural characteristics during a service period [J]. Journal of Tianjin University (science and technology), 2021, 54(8): 807-815.
- [24] 旷文杰, 周浩, 卜丹, 等. 超长跨度商业综合体结构关键问题分析与设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(S2): 459-464.
- KUANG W J, ZHOU H, BU D, et al. Analysis and design of key problems of super long span commercial complex structure [J]. Building structure, 2023, 53(S2): 459-464.
- [25] 卫少阳, 邬晓光. 钢-混凝土组合箱梁桥空间网格计算模型研究[J]. 科技通报, 2024, 40(9): 87-92, 115.
- WEI S Y, WU X G. The space mesh analysis model for steel-concrete composite girder box bridge [J]. Bulletin of science and technology, 2024, 40(9): 87-92, 115.
- [26] 刘子牛, 许巧. 观音寺长江大桥索塔静力性能研究及其基础等效刚度计算[J]. 科技通报, 2025, 41(2): 98-105.
- LIU Z N, XU Q. Study on static performance of cable tower of Guanyinsi Changjiang River Bridge and calculation of equivalent stiffness of its foundation [J]. Bulletin of science and technology, 2025, 41(2): 98-105.
- [27] 徐晓明, 张士昌, 高峰, 等. 苏州奥体中心体育场屋盖结构设计[J]. 建筑结构, 2019, 49(23): 1-6.
- XU X M, ZHANG S C, GAO F, et al. Structural design on steel roof of stadium of Suzhou Olympics Sports Center [J]. Building structure, 2019, 49(23): 1-6.
- [28] 黄永强, 闫泽升, 傅晋申, 等. 第十届中国花卉博览会世纪馆结构设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(21): 1-6.
- HUANG Y Q, YAN Z S, FU J S, et al. Structural design of Century Pavilion in 10th China Flower Expo [J]. Building structure, 2023, 53(21): 1-6.
- [29] 朱玉林. 预应力钢结构采光顶施工平台的设计和实现[J]. 工程与建设, 2022, 36(5): 1298-1300, 1306.
- ZHU Y L. Prestressed steel structure daylighting roof construction platform design and implementation [J]. Engineering and construction, 2022, 36(5): 1298-1300, 1306.
- [30] 戴苏敏, 肖腾胶, 吴芝泽, 等. 动臂吊在既有建筑采光顶钢结构施工中的应用与研究——以某既有商业建筑裙楼商场为例[J]. 中国建筑装饰装修, 2026(1): 177-179.
- DAI S M, XIAO T J, WU Z Z, et al. Application and research of boom crane in the construction of steel structure of lighting roof of existing building: taking the podium shopping mall of an existing commercial building as an example [J]. Interior architecture of China, 2026(1): 177-179.
- [31] 胡正平, 张婀娜, 董皓雪, 等. 中国海洋大学船形钢结构及采光顶施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(10): 120-124.
- HU Z P, ZHANG E N, DONG H X, et al. Key construction technology of ship-shaped steel structure and daylighting roof of Ocean University of China [J]. Construction technology, 2024, 53(10): 120-124.
- [32] 邓林峰, 孙媛, 杨吉, 等. 钢结构采光穹顶无胎架安装技术[J]. 施工技术, 2018, 47(11): 42-46.
- DENG L F, SUN Y, YANG J, et al. Installation construction of steel daylighting dome without jig [J]. Construction technology,

2018,47(11):42-46.

[33] 阎红伟,石路也,刘向阳,等. 椭圆形采光顶钢结构模块化施工技术[J]. 钢结构,2015,30(12):80-82.

YAN H W, SHI L Y, LIU X Y, et al. Modular construction technology for the steel structure of elliptical day-lighting roof[J]. Steel construction,2015,30(12):80-82.

[34] 陈志祥,吴挺前. 贵阳国际会议中心 a1 商业区中庭采光顶屋面钢结构滑移施工分析[J]. 建筑结构,2013,43(2):51-55.

CHEN Z X, WU T Q. Slipping construction analysis on atrium lighting roof steel structure of a1 business area in Guiyang International Conference Center[J]. Building structure,2013,43(2):51-55.

[35] 张富国. 超大跨度张弦梁滑移法施工技术研究[J]. 建筑施工,2025,47(8):1306-1311.

ZHANG F G. Study on sliding construction technique for super-long span cable-stayed beams[J]. Building construction,2025,47(8):1306-1311.

[36] 周丹. 椭圆型大跨度采光顶幕墙的施工技术创新与应用[J]. 北方建筑,2025,10(4):130-133.

ZHOU D. Innovation and application of construction technology for elliptical large span skylight curtain wall [J]. Northern architecture,2025,10(4):130-133.

[37] 曹江,李永明,苑庆涛,等. 郑州奥林匹克中心体育场钢结构施工技术[J]. 钢结构,2018,33(11):127-131.

CAO J, LI Y M, YUAN Q T, et al. Construction technique of Zhengzhou Olympic Sports Center Stadium steel structure [J]. Steel construction,2018,33(11):127-131.

[38] 曹江,刘瑞金,张林萌,等. 武汉东西湖体育中心体育场辐式索承网格结构施工技术[J]. 施工技术,2019,48(20):70-73.

CAO J, LIU R J, ZHANG L M, et al. Construction technology of Wuhan Dongxihu stadium spoke cable-supported grid structure [J]. Construction technology,2019,48(20):70-73.

[39] 袁野,张其林,张舒翔,等. 大跨度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 for large-span wheel-spoke single-double-layer cable net structures[J]. Construction technology,2023,52(20):15-20.

[40] 熊鼎飞,郭奇,陈学朋,等. 索承网格结构设计、施工与性能研究进展[J]. 施工技术(中英文),2025,54(20):1-11.

XIONG D F, GUO Q, CHEN X P, et al. Research progress on design, construction and performance of cable-supported grid structure[J]. Construction technology,2025,54(20):1-11.

[41] 袁野,张其林,张舒翔,等. 单双层索网混合结构屋架误差敏感性分析[J]. 建筑技术,2023,54(23):2924-2931.

YUAN Y, ZHANG Q L, ZHANG S X, et al. Error sensitivity analysis of single-double-layer cable-net hybrid roof frame[J]. Architecture technology,2023,54(23):2924-2931.

[42] 吴小宾,陈强,冯远,等. 乐山奥体中心体育场辐式单、双层组合索网罩棚结构设计[J]. 建筑结构学报,2022,43(1):182-191.

WU X B, CHEN Q, FENG Y, et al. Design of Leshan Olympic Center Stadium dome of spoke tension structure with single-double-combined layer cable[J]. Journal of building structures,2022,43(1):182-191.

[43] 区彤,林全攀,姜正荣,等. 双层索网与张弦梁结构对竖向刚度及索力敏感程度差异化分析[J]. 钢结构(中英文),2021,36(11):1-7.

OU T, LIN Q P, JIANG Z R, et al. Differentiation analysis of vertical stiffness and cable force sensitivity of double-layer cable net and beam string structure[J]. Steel construction (Chinese & English),2021,36(11):1-7.

[44] 杨霄,张国军,管志忠,等. 成都金沙遗址博物馆辐式双层索网结构设计研究[J]. 建筑结构,2009,39(10):85-89.

YANG X, ZHANG G J, GUAN Z Z, et al. Design and research of spoke double layer cable-net structure [J]. Building structure,2009,39(10):85-89.

[45] 柳明亮,李存良,刘博东,等. 大开洞正交双层索网结构施工缩尺试验研究[J]. 工业建筑,2025,55(3):176-180.

LIU M L, LI C L, LIU B D, et al. Experimental research on the scale models of an double-layer orthogonal cable networks with large openings during the construction [J]. Industrial construction,2025,55(3):176-180.

[46] 刘怡吟,张其林,罗晓群. 体育场辐式索承网格结构施工模拟分析[J]. 建筑结构,2021,51(S1):2213-2218.

LIU Y Y, ZHANG Q L, LUO X Q. Construction simulation analysis of spoke-type cable-supported grid structure in a stadium [J]. Building structure,2021,51(S1):2213-2218.

[47] 张伟,高玉兰,董巍,等. 椭圆形大悬挑索承网格屋盖结构的整体同步张拉成型过程研究[J]. 建筑技术,2013,44(1):45-48.

ZHANG W, GAO Y L, DONG W, et al. Research on integral synchronous tensioning and forming processes of large elliptic suspended cable-stayed lattice roof structure [J]. Architecture technology,2013,44(1):45-48.