

DOI: 10.7672/sgjs2025200001

索承网格结构设计、施工与性能研究进展*

熊鼎飞¹, 郭奇¹, 陈学朋¹, 姚成冲¹, 罗宗礼¹, 赵绪华¹, 孙侨博¹,
麦慧琳², 朱彪², 吴尚斌²

(1. 中国建筑第四工程局有限公司, 广东 广州 510630; 2. 广州新中轴建设有限公司, 广东 广州 510623)

[摘要] 索承网格结构作为大跨度空间建筑领域的高效结构形式,通过拉索与网格构件的协同受力实现以拉代压的力学优化,显著降低自重 30%~50% 并提升材料利用率 40% 以上,已成为跨度 150~300m 建筑的优选方案。系统阐述该结构近 10 年研究进展,在设计理论层面,重点解析找形找力耦合机制,阐明几何非线性效应对大跨度结构稳定性的显著影响,揭示有限元分析与预应力优化在提升结构承载力中的核心作用;在施工技术方面,对比支架法与无支架法的适用场景,强调无支架施工在成本与工期控制中的优势及其对毫米级精度控制的严苛要求,剖析三维激光扫描、全站仪等监测手段在误差管理中的应用瓶颈;在性能分析维度,系统梳理静力性能、稳定性、动力与抗震性能的研究成果,指出施工误差耦合效应与关键节点非线性行为对结构性能的影响机制。研究表明,现有技术在 300m 以上超大跨度结构的复杂力学行为模拟、施工动态响应调控等方面仍存在挑战。未来应聚焦多物理场耦合的精细化力学模型构建,发展智能化施工监测与自适应调控技术,推动碳纤维复合材料等新型材料的工程应用,以突破当前技术瓶颈,为索承网格结构在超大跨度建筑中的创新应用提供理论支撑与技术指引。

[关键词] 索承网格结构;设计;性能;优化;施工技术

[中图分类号] TU391

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0001-11

Research Progress on Design, Construction and Performance of Cable-supported Grid Structure

XIONG Dingfei¹, GUO Qi¹, CHEN Xuepeng¹, YAO Chengchong¹, LUO Zongli¹,
ZHAO Xuhua¹, SUN Qiaobo¹, MAI Huilin², ZHU Biao², WU Shangbin²

(1. China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510630, China;

2. Guangzhou New Central Axis Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510623, China)

Abstract: As an efficient structural form in the field of large-span space architecture, cable-supported grid structure realizes the mechanical optimization of tension instead of compression through the synergistic force of cable and grid components, which significantly reduces the self-weight by 30% ~ 50% and improves the material utilization rate by more than 40%. It becomes the preferred scheme for the buildings with a span of 150~300m. The research progress of the structure in the past ten years is systematically expounded. At the level of design theory, the coupling mechanism of form-finding and force-finding is mainly analyzed, and the significant influence of geometric nonlinear effect on the stability of large-span structure is clarified, and the core role of finite element analysis and prestress optimization in improving the bearing capacity of the structure is revealed. In terms of construction technology, the application scenarios of support method and non-support method are compared, the advantages of non-support construction in cost and construction period control and its strict requirements for millimeter-level precision control are emphasized, and the application bottlenecks of monitoring technologies such as 3D laser scanning and total station in error management are analyzed. In the dimension of performance analysis, the research results of static performance, stability, dynamic and seismic performance are

* 中国建筑第四工程局有限公司科技研发课题:轮辐式索承网格结构施工创新技术研究(CSCEC4B-2025-KTA-18)

[作者简介] 熊鼎飞,助理工程师,E-mail:154721510@qq.com

[收稿日期] 2025-06-20

systematically sorted out, and the influence mechanism of construction error coupling effect and nonlinear behavior of key joints on structural performance is pointed out. The research shows that the existing technology still has challenges in the simulation of complex mechanical behavior and construction dynamic response control of super large-span structures above 300m. In the future, the construction of refined mechanical models with multi-physical field coupling should be focused on, intelligent construction monitoring and adaptive control technology should be developed, the engineering application of new materials such as carbon fiber composite materials should be promoted, the current technical bottleneck should be broken through, and theoretical support and technical guidance for the innovative application of cable-supported grid structures in super large-span buildings should be provided.

Keywords: cable-supported grid structure; design; performance; optimization; construction

0 引言

随着城镇化进程的加速与大型公共建筑功能需求的升级,大跨度空间结构成为建筑工程领域的研究热点。传统钢结构、混凝土结构因自重较大、材料利用率低等问题,在跨度 $>150\text{m}$ 的建筑中逐渐显现局限性^[1]。索承网格结构通过拉索(受拉)与网格构件(受压)的协同工作,实现了以拉代压的力学优化,较传统钢结构自重降低 30%~50%,材料利用率提升 40% 以上,成为跨度 150~300m 建筑的优选方案。

索承网格结构概念最早由德国工程师 Frei Otto 于 20 世纪 70 年代提出,其核心思想是通过预应力调节实现结构形态与力学状态的匹配。自 2000 年以来,我国先后在徐州奥体中心、郑州奥体中心等重大工程中实现技术突破,推动了该结构形式的理论研究与实践。然而,随着跨度向 300m 以上突破,如巴西利亚国家体育场跨度达 309m,结构非线性效应、施工过程动态响应、极端荷载作用下的安全性等问题日益突出。

本文基于近 10 年国内外文献(检索自 Web of Science, CNKI 等数据库,检索关键词为“索承网格结构”“cable-supported grid structure”“form-finding and force-finding”等),结合 12 个典型工程案例的技术总结,从设计、施工、性能 3 个维度展开论述:①设计理论,重点解析找形找力耦合机制与非线性分析方法;②施工技术,对比支架法与无支架法的适用场景,聚焦施工模拟与精度控制技术;③性能分析,系统梳理静力、动力、稳定性及施工误差影响的研究成果。

通过分析,明确索承网格结构的技术瓶颈与发展方向,为大跨度空间结构的创新应用提供理论支撑。

1 设计理论研究进展

1.1 设计原理

如图 1 所示,索承网格结构通常由拉索、网格结构和支撑系统共同构成。拉索主要承受拉力,网格结构和支撑系统起约束作用。

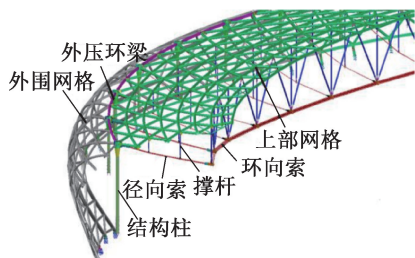


图 1 索承网格结构构成

Fig. 1 Composition of cable-supported grid structure

由于索承网格结构多为大跨结构,几何非线性效应对结构稳定性影响显著。在大跨度设计中,必须考虑索变形和结构非线性行为。这种非线性效应会导致结构受力和变形不再符合线性关系,增加了设计复杂性。

为突出重点,后续可增加典型大跨度索承网格结构设计时考虑几何非线性效应的具体案例,通过实际案例数据说明非线性效应对结构稳定性的影响程度,以及在设计中如何考虑和处理这些影响。

1.2 力学模型与优化方法

索承网格结构力学分析需考虑结构整体与局部响应。近年来,有限元分析(FEA)方法被广泛应用于索承网格结构设计优化。通过对索网几何形状、索预应力水平、网格布局方式等参数进行优化,大幅度提升结构承载力与稳定性^[1-2]。

设计索承网格结构时,需解决形态与力学状态的匹配问题(找形找力分析),即如何通过预应力控制索杆和网格力学行为,以达到所需的位形与荷载响应。在设计过程中,通常会采用迭代分析方法,通过调整初始预应力值确保结构在预定荷载作用下的性能^[3]。找形找力设计流程如图 2 所示。由图 2 可知,索承网格结构形态受预应力的影响,通过

控制环向索与径向索的预张力,可保证结构达到理想形态。在恒荷载状态下,设计目标通常是确保外压环梁轴心受压状态,并使环向索节点位于设计标高^[4]。

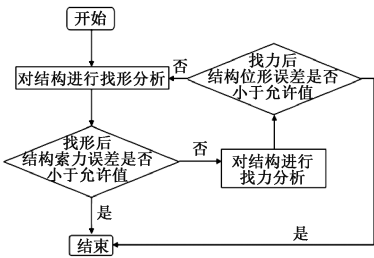


图2 找形找力设计流程

Fig. 2 Design process of form-finding and force-finding

2 施工技术研究进展

2.1 施工方法分类及对比

根据不同索承网格结构形式,常见施工方法可分为支架法与无支架法。如图 3a 所示,支架法^[5-6]依赖于搭建独立塔架,然后分块吊装屋盖网格,最后安装和张拉拉索。此方法使用大量支架,虽然结构相对稳定,但会增加施工成本并延长工期。如图 3b 所示,无支架法^[7-8]是一种通过不使用传统支撑系统(如满堂支架或独立塔架)完成大型结构施工的技术。这种方法的核心原理是依靠结构本身自重、预应力及合理的施工顺序,实现结构自平衡和稳定,从而减少对临时支撑体系的依赖。无支架法先安装索网,通过增设的下拉工装索施加预应力,然后安装屋盖网格结构。

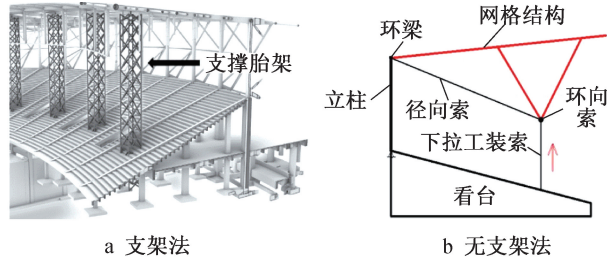


图3 2种施工方法

Fig. 3 Two construction methods

2 种施工方法对比如表 1 所示。支架法的优势在于施工过程中结构稳定性能得到有效保障,尤其在索网安装初期阶段,支架可提供额外支持,防止张拉不均匀或局部索力过大而导致结构失稳^[9-10]。然而,支架法也存在明显不足。支架的搭建与拆除需消耗大量时间和成本,尤其在大规模项目中,支架使用往往占用很大一部分预算;支架体系的安装及拆除对施工安全和精度要求较高,且会影响工期;支架设置和调整过程中易产生误差,特别是在

复杂结构中,支架精度直接关系到后续施工进度和质量^[9-10]。与支架法相比,无支架法的优点在于能降低大量支架成本,缩短施工工期,同时提升施工效率。然而,其对施工技术和精度的要求极高,任何小的误差均可能影响整体结构稳定性和安全性^[11-12]。

表1 2种施工方法对比

Table 1 Comparison of two construction methods		
项目	支架法	无支架法
施工顺序	先搭设支架,然后安装屋盖网格结构,最后安装和张拉拉索	先安装索网,通过增设的下拉工装索施加预应力,然后安装屋盖网格结构
位形调控性	受下部看台、分配梁、支架等刚度影响大,且存在不可控的非弹性变形	过程中可随时调整标高,保证在设计标高拼装,干扰因素少
拉索安装	由于支架的阻挡,环向索的铺设和径向索的安装困难,效率低	无任何阻挡,效率高
拉索张拉	分批分级循环张拉	整体牵引提升和一次张拉到位
下部看台	支架支承在下部看台结构上,重力荷载增加了看台结构负担	下部看台已完成施工,下拉工装索锚固在下部看台结构上,看台自重可平衡下拉工装索拉力
措施费	需搭设支架,措施费高	需临时下拉工装索,措施费低
工期	由于支架安装、展索受阻及需分批分级张拉拉索等原因,导致工期长	由于无需支架、展索无阻挡且可整体牵引提升和张拉等,工期较短

2.2 施工关键问题

2.2.1 施工方法选择

1) 支架法适用场景。支架法适用于结构复杂、对施工精度要求极高的项目。例如,一些具有特殊造型的文化艺术场馆,其索承网格结构形状不规则,采用支架法能更好地保证施工过程中的结构稳定性。在这类项目中,工程预算充足和工期相对宽裕是选择支架法的前提条件。

2) 无支架法适用场景。无支架法适用于工期紧且施工团队技术水平和管理水平较高的项目。例如,一些商业建筑对施工工期有严格要求,在具备专业施工团队的情况下,无支架法能在保证结构质量的同时有效缩短工期。

2.2.2 精度控制与误差管理

2.2.2.1 现有精度控制手段

目前,主要采用高精度的张力计和三维激光扫描测量仪等设备控制拉索张拉精度。通过张力计监测,可将拉索张力误差控制在 $\pm 3\%$ 以内。三维激光扫描测量仪能实时获取结构空间形态,测量精度可达 $\pm 5\text{mm}$,有助于及时发现和纠正施工误差。

在某试点项目中,通过在拉索和关键节点设置

传感器,实时监测和自动调整系统每 10~15min 采集 1 次数据,自动计算并调整拉索张力。

2.2.2.2 现有精度控制手段的不足

在复杂大跨度结构施工中,单一精度控制手段往往难以满足要求。例如,在某大跨度索承网格结构桥梁施工中,由于仅依赖三维激光扫描测量仪,未考虑环境温度对结构变形的影响,导致在夏季高温施工时,结构整体变形误差达 20~30mm。

实时监测和自动调整系统在极端天气或复杂环境下的稳定性和可靠性欠佳。例如,在沿海地区施工时,强风、高湿度和盐雾环境对传感器和控制系统的性能有较大影响,导致系统数据采集误差增大,调整效果不佳。

2.2.3 施工过程中的安全管理

2.2.3.1 现有安全管理措施

1)施工前,对现场开展全面风险评估并制订相应应急预案。例如,针对某位于地震带上的索承网格结构建筑项目,在风险评估中重点考虑地震风险,并制订详细的地震应急预案,包括人员疏散路线、结构应急加固措施等。

2)在施工监控与实时数据反馈方面,通过在拉索张拉过程中设置视频监控和应力、位移传感器,能实时监测施工现场安全状况。在某高层建筑索承网格结构施工中,当拉索张拉应力超过设计值的 105% 时,监控系统会立即发出警报,并提出相应的调整措施。

3)分阶段进行安全检查,确保各施工环节符合安全规范。在每个关键施工节点,如索网安装完成、屋盖网格吊装完成等阶段,均要进行严格的安全检查,检查内容包括结构连接可靠性、临时支撑稳定性等。

2.2.3.2 现有安全管理措施的不足

1)高风险作业控制难度大,尤其是在高空吊装和大跨度施工等极限情况下。例如,在某大跨度体育场索承网格结构施工的高空吊装作业中,尽管采取了多种安全防护措施,但由于风力突然增大,仍存在一定的吊装风险,对施工人员和结构安全构成威胁。

2)监测与预警系统在小规模或技术水平较低的项目中普及度不高。在一些小型场馆索承网格结构施工中,由于成本限制,未安装完善的监测与预警系统,增加了施工过程中的安全隐患。

3 性能分析研究进展

索承网格结构性能分析主要包括设计阶段和施工阶段的性能分析,其中设计阶段性能分析主要包括静力分析、稳定性分析、动力性能和抗震性能

分析,施工阶段性能分析主要包括关键节点性能分析、施工误差影响分析等。

3.1 静力分析

静力分析主要用于研究结构在各种荷载作用下的变形、应力分布及承载力,常用分析方法包括有限元分析法和力密度法。有限元分析法采用有限元软件(如 ANSYS,ABAQUS 等)建立索承网格结构有限元模型(见图 4),通过计算得到结构在静态荷载下的变形、应力和应变分布;这一方法可考虑结构几何非线性、材料非线性及预应力索的作用,是目前最广泛使用的静力分析方法^[10]。力密度法通过将每根索拉力与长度的比值(力密度)代入平衡方程,求解结构静力平衡状态;该方法相对简便,适用于较为简单的结构,能快速获得结构初步受力情况^[13-18]。

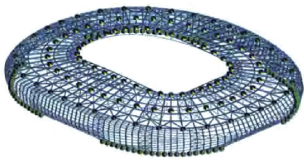


图 4 索承网格结构有限元模型
Fig. 4 Finite element model of cable-supported grid structure

尽管有限元分析法已成为主流的静力分析方法,但在实际应用中也存在一些不足:①计算资源需求大,对于大跨度、复杂的索承网格结构,有限元模型规模往往非常大,需要大量计算资源和时间;②模型简化的局限性,尽管有限元分析法可模拟结构非线性行为,但在实际建模时,很多细节会被简化,如节点刚度、接头非线性特性等,这可能导致分析结果的误差;③对预应力状态的依赖,静力分析结果高度依赖预应力精确控制,任何预应力的误差均可能导致结构性能的较大变化。索承网格结构静力分析如图 5 所示。

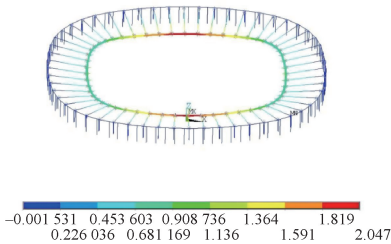


图 5 索承网格结构静力分析(单位:mm)
Fig. 5 Static analysis of cable-supported grid structure(unit:mm)

3.2 稳定性分析

稳定性分析主要用于研究结构在荷载作用下

是否发生失稳现象,特别是在大跨度结构中尤为重要。常用的稳定性分析方法包括特征值屈曲分析和非线性屈曲分析^[19-20]。特征值屈曲分析通过求解结构的特征值,判断在不同荷载条件下结构是否发生屈曲失稳。此方法通常用于初步的稳定性分析,通过计算特征值可得到结构临界荷载。考虑到结构在受荷过程中可能发生大变形,非线性屈曲分析可更准确地反映结构在屈曲后表现出的真实行为。此方法能模拟结构几何非线性效应及材料非线性效应^[21-24]。索承网格结构稳定性分析如图 6 所示。

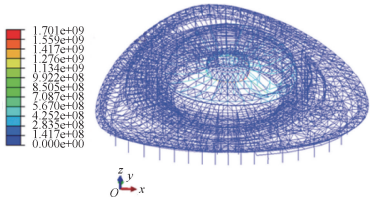


图 6 索承网格结构稳定性分析(单位:N)
Fig. 6 Stability analysis of cable-supported grid structure(unit: N)

特征值屈曲分析假设结构在屈曲前的变形是线性的,这对于高度非线性的索承网格结构而言,可能会导致误差,特别是在大变形或非线性材料行为的情况下。传统的稳定性分析往往忽略了施工过程中的变化,如预应力的逐步施加、施工误差的影响等,这些因素可能在实际应用中起到重要作用。对于复杂结构,如大开口的索承网格结构,稳定性分析需综合考虑多个因素,如几何非线性、边界条件、荷载路径等,导致分析方法较复杂,计算量大。

3.3 动力性能和抗震性能分析

动力性能和抗震性能分析用于研究结构在动态荷载作用下的响应,尤其是在地震荷载作用下的表现,主要分析方法包括模态分析和地震响应分析^[25-29]。模态分析通过计算结构固有频率和振型,评估结构动力特性。模态分析能揭示结构在振动荷载作用下的固有响应,是研究结构抗震性能的基础。地震响应分析通过考虑地震波的传播特性,模拟地震荷载对结构的作用;常用方法包括时程分析法和反应谱分析法,这些方法可模拟结构在地震作用下的实际动态响应。索承网格结构动力性能及抗震性能分析分别如图 7,8 所示。

现有动力性能和抗震性能分析研究方面的不足主要包括:①振动频率的低估,模态分析可能低估了实际振动频率,尤其对于大跨度结构,许多高阶模态可能被忽略,导致对结构动力响应评估不够

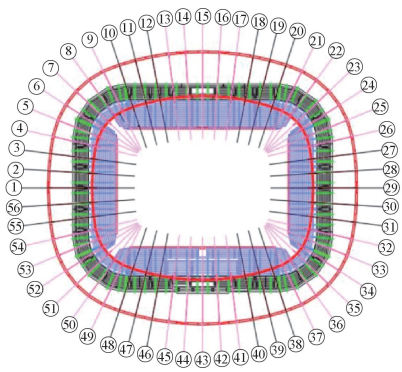


图 7 索承网格结构动力性能分析模型
Fig. 7 Dynamic performance analysis model of cable-supported grid structure

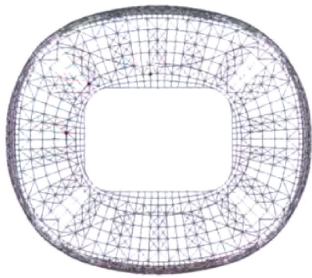


图 8 索承网格结构抗震性能分析模型
Fig. 8 Seismic performance analysis model of cable-supported grid structure

全面;②地震响应分析的简化,常用的反应谱分析法和时程分析法常基于简化的假设,忽略了结构与土壤间的相互作用、非线性效应等因素,可能会导致抗震性能的低估;③非线性动态分析的困难,对于复杂结构,尤其是高预应力索承网格结构,非线性动力学分析非常困难,需要大量计算资源,并且结果的准确性很大程度上取决于模型精细程度。

3.4 关键节点性能分析

关键节点性能分析用于研究结构中关键连接部位的受力情况(见图 9)。对于索承网格结构,关键节点通常包括拉索与支座的连接、拉索与索夹的连接等,主要方法包括局部有限元分析和节点力流分析。局部有限元分析对结构关键节点进行局部建模,进行细致的力学分析,评估节点应力、变形和强度;节点力流分析通过分析节点处力的传递路径,评估节点对结构整体稳定性和承载力的贡献^[23]。

现有关键节点性能分析主要面临两大难题:①局部建模的精度问题,局部有限元分析要求对节点进行非常精确的建模,任何简化都会导致分析结果的偏差,特别是在节点接头处存在复杂几何和接触条件时;②节点连接处的非线性行为,大部分节点性能分析方法基于线性假设,但实际节点连接往

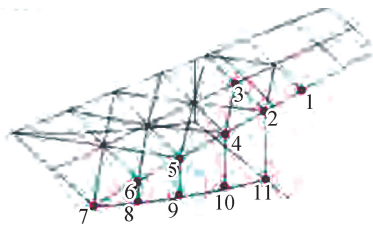


图 9 关键节点布置
Fig.9 Layout of key joints

往具有显著的非线性行为,这在很多情况下被忽视。

3.5 施工误差影响分析

施工误差影响分析主要用于评估施工过程中的误差对结构性能的影响(见图 10)。常用分析方法包括蒙特卡罗法和误差耦合分析。蒙特卡罗法通过模拟施工误差的随机分布,评估误差对结构性能的影响;误差耦合分析考虑多个施工误差因素的耦合效应,分析其对结构的综合影响^[30]。

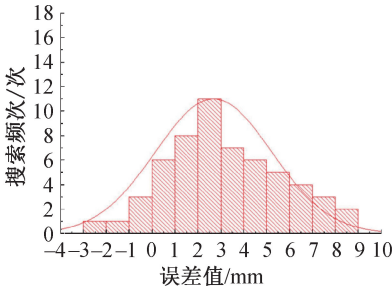


图 10 施工误差影响检测分析

Fig.10 Analysis of construction error influence detection

施工误差影响分析目前存在的问题包括:①误差分布模型的简化,蒙特卡罗法和误差耦合分析通常假设误差是独立且服从某种分布,但实际施工中的误差可能存在相关性,这种假设简化可能导致结果不准确;②施工阶段动态性不足,很多误差分析方法主要基于静态假设,未能充分考虑施工过程中不断变化的动态因素,如结构的逐步加载和节点位置的调整等。

索承网格结构性能分析方法涵盖了从静力性能到动力响应,从结构稳定性到施工误差的多方面内容。尽管现有分析方法在理论和技术上取得了一定进展,但仍存在一定不足,尤其是在处理大跨度结构复杂行为、施工过程中动态变化的影响及节点连接的非线性行为时。未来的研究应更加关注这些方面的完善,并探索更精确、高效的分析工具。

4 平衡模式研究进展

按水平拉力平衡模式的不同,索承网格结构基本类型包括内压环平衡、上层网格平衡、外压环平衡等。目前世界范围内典型的索承网格结构如表 2

所示。

表 2 典型索承网格结构

Table 2 Typical cable-supported grid structures							
名称	长轴/ m	短轴/ m	最大 悬挑/ m	水平拉 力平衡 模式	竖撑 数量/ 根	斜撑 数量/ 根	施工 方法
上海浦东 足球场	211.0	173.0	50.0	内压 环	0	2	支架 法
徐州奥体中 心体育场	263.0	243.0	40.0	外压 环	3	1	
乌鲁木齐 体育场	263.5	227.5	40.8		3	1	
郑州奥体中 心体育场	257.9	237.0	54.1	上层 网格	3	1	
巴中 体育场	266.6	230.0	44.5		3	2	
武汉东西湖 体育中心	237.7	205.9	48.2		4	0	
泰州体 育场	263.0	233.0	47.8		3	1	无支 架法
青岛青春 足球场	218.0	178.0	55.0		4	2	
巴西利亚 国家体育场	309.0	309.0	103.0		—	—	
南非开普敦 体育场	290.0	265.0	48.0		—	—	
巴西新水源 体育场	250.0	250.0	63.0	外压环	4	0	
卡塔尔阿图 玛玛足球场	240.0	240.0	—		5	2	
卡塔尔教育 城体育场	225.0	196.0	55.0		0	2	

上海浦东足球场采用内压环平衡的索承网格结构(见图 11),是典型的内压环平衡结构形式。该项目屋盖采用大跨度结构形式,设计和施工中考虑了结构稳定性和抗震性能;在施工方法上,采用了支架法,这种方法可有效控制结构变形和施工误差,保证施工精度。在该项目中,拉索布置和预应力设计是确保结构稳定的关键。通过优化拉索布置和施加适当的预应力,能最大限度地减小结构自重并提高承载力。此外,该项目还采用了迭代法进行找形分析,确保了结构在张拉过程中的位移和应力分布符合设计要求^[31]。

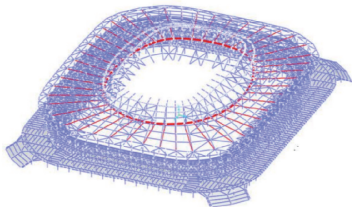


图 11 上海浦东足球场三维模型

Fig.11 3D model of Shanghai Pudong Football Stadium

徐州奥体中心体育场采用了外压环平衡的索承网格结构,是典型的外压环平衡类型^[2]。该项目屋盖结构跨度较大,采用3根竖撑和1根斜撑的支撑方式。精确的施工计划和适当的张拉方案,保证了整个结构的稳定性和安全性。

郑州奥体中心体育场采用上层网格平衡的索承网格结构(见图12),这种结构形式通过上层网格的平衡作用抵抗径向索产生的水平力。该项目屋盖最大悬挑达54.1m,是一项具有挑战性的施工任务。为确保结构稳定性,采用3根竖撑和1根斜撑的支撑方式,此外,还进行了结构稳定性分析和优化。在施工过程中,采用支架法,以确保在索网提升和张拉过程中结构能稳定并避免过度变形。此外,该项目还结合了静力性能分析和动态监测系统,通过实时数据反馈,确保了结构安全和施工精度^[32]。



图12 郑州奥体中心体育场施工现场

Fig. 12 Construction site of Zhengzhou Olympic Sports Center Stadium

巴西利亚国家体育场作为具有特殊结构需求的体育场,其屋盖结构采用外压环平衡的索承网格结构。在该项目中,使用了大量腹杆桁架增强结构刚度,并通过精细化施工模拟分析,优化每个阶段的施工方法。该项目的关键技术之一是如何确保预应力的正确施加,特别是在大跨度结构张拉过程中,必须确保每根拉索张力保持在合理范围内,以防止结构在张拉过程中发生不均匀变形。

武汉东西湖体育中心采用车辐式索承网格结构,在结构设计中充分考虑了抗风性能和地震安全性。由于该地区常受到强风影响,结构抗风设计成为该项目的核心技术之一。通过优化拉索布置和增加支撑结构数量,成功提高了整体稳定性。

无支架法适用于由外压环平衡径向索索力的索承网格结构。外压环索承网格结构受力机制与前2种有很大差别,因此有必要对其受力性能和成型方法进行深入研究。结合结构特点提出最佳施工方法,降低施工难度和施工成本,如巴西利亚国家体育馆、卡塔尔教育城体育场(见图13)等。巴中体育场屋盖结构采用大开口车辐式索承网格结构。

该项目对施工误差进行了详细分析,特别是在张拉过程中,如何有效控制每根拉索长度和张力是保证结构稳定的关键。为确保施工过程中的安全性和精度,该项目使用了大量动态监测设备,实时监测结构变形和应力变化。通过这些技术手段顺利完成了张拉施工,并确保了结构的高效性能。

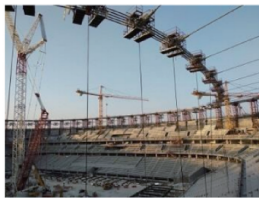


图13 卡塔尔教育城体育场施工现场

Fig. 13 Construction site of Qatar Education City Stadium

通过以上典型案例分析可看出,索承网格结构作为一种大跨度空间结构形式,具有广泛的应用前景。不同类型索承网格结构在设计和施工过程中面临的挑战各不相同,但通过精细化施工方法、合理的支撑设计和精确的误差控制,能确保其在实际工程中的成功应用。

5 挑战与未来发展

5.1 设计方面

5.1.1 复杂的力学行为与结构分析

索承网格结构凭借其独特的几何构型,得以在大跨度建筑领域大放异彩;然而,这些复杂的力学行为与不规则几何形态的存在,使设计阶段的精准分析面临诸多难题。特别是在超大跨度、非对称布局或造型极为复杂的结构中,如何精准预估并有效掌控结构内部应力重分布与变形发展,成为当下亟待攻克的关键科学问题。以大型体育场馆为例,其不规则的空间曲面与大悬挑结构,致使结构在风荷载、雪荷载等复杂工况下力学响应呈现高度非线性与不确定性。

近年来,高效数值模拟方法成为解决这一难题的核心手段。有限元法(FEM)在索承网格结构分析中广泛应用,结合多物理场耦合分析技术,能全面考量结构在力学、热学、流体力学等多场作用下的响应。例如,在沿海地区的大跨度建筑设计中,通过流固耦合分析可精准模拟风荷载对结构的作用,为抗风设计提供可靠依据。同时,伴随云计算与大数据技术的蓬勃发展,基于云端的并行计算框架得以构建,可实现大规模有限元模型的快速求解,大幅度提升计算效率与精度。例如,利用云计算平台对超大型索承网格结构进行全尺度模拟,计

算时间可缩短至原来的 1/10。此外,智能优化算法在结构设计中崭露头角,遗传算法、粒子群优化算法等通过对设计变量的全局寻优,能在保障结构安全性能的前提下,实现材料用量的精准控制与结构经济性的显著提升,为可持续建筑设计提供有力支撑。

5.1.2 力学性能的不确定性

索承网格结构力学性能的不确定性,主要源于几何形态偏差、材料性能离散及施工精度波动等因素。在施工过程中,索的张拉误差、节点安装偏差等,均可能致使结构实际几何形态与设计模型产生偏离,进而改变结构受力路径与力学性能。在材料性能方面,钢材、拉索材料强度、弹性模量等参数存在一定离散性,在长期荷载作用下,还可能出现性能劣化现象,增加了结构力学性能的不确定性。

针对这一问题,可从误差分析与控制、可靠性设计方面着手。在施工阶段,引入高精度传感器与实时监测系统,对索力、节点位移等关键参数进行全程动态监测,运用卡尔曼滤波、最小二乘法等数据处理算法实时修正施工误差,确保结构建造过程始终处于可控状态。例如,在某大型索承网格结构工程中,通过分布式光纤传感技术实现了对索力变化的毫米级精度监测,有效避免了误差累积导致的结构失效。在可靠性设计领域,基于概率论与数理统计方法,建立结构可靠性分析模型,考虑材料性能、几何参数、荷载等不确定性因素,通过蒙特卡洛模拟、响应面法等手段量化结构失效概率,据此优化设计安全系数,合理设置结构冗余度,提升结构在复杂多变环境下的可靠性与稳健性。

5.1.3 非线性行为与大变形

索承网格结构在服役期间,尤其是遭遇极端荷载(如强风、地震)或处于特殊工况(如施工张拉阶段)时,结构极易呈现出显著的非线性行为,包括材料非线性(钢材屈服、拉索松弛)与几何非线性(大变形、结构几何构型改变),传统线性设计方法难以契合实际需求。在大跨度索承穹顶结构中,在强风作用下,结构可能产生较大位移与变形,导致结构内力重分布,若仍采用线性分析方法,将严重低估结构实际受力,危及结构安全。

为有效应对结构非线性行为与大变形问题,大变形分析技术与自适应控制技术成为研究热点。在大变形分析方面,采用基于更新拉格朗日法、Total Lagrangian 法的非线性有限元分析软件,能精确追踪结构在荷载历程下的变形轨迹,充分考虑材料非线性与几何非线性耦合效应。例如,对某大型索承

网格结构进行地震响应分析时,通过非线性有限元模拟,准确揭示了结构在地震作用下的塑性发展与破坏模式,为抗震设计优化提供了关键依据。自适应控制技术则借助实时监测数据,通过智能算法对结构施工参数、索力调整策略等进行动态优化与反馈控制。在施工过程中,利用位移、应力传感器实时采集结构变形与内力数据,经控制器分析处理后,自动调整张拉设备的张拉速率与张拉力,实现对结构大变形的精准控制,有效规避结构失稳与过度变形风险,保障施工过程安全、高效推进。

5.2 施工方面

5.2.1 高精度施工技术

索承网格结构施工精度要求极高,预应力施加与拉索张力控制稍有偏差便可能引发结构变形失控,严重危及结构长期稳定性。在超大跨度索承网格结构工程中,拉索索力偏差达 1%,可能导致结构关键部位位移变化>10%,对结构安全影响巨大。

为满足高精度施工要求,智能化施工技术与先进张拉技术成为核心解决方案。智能化施工技术依托三维激光扫描测量仪、全站仪等高精度测量设备,结合 BIM(建筑信息模型)技术,构建施工过程实时监测与反馈系统。通过三维激光扫描获取结构实时三维模型,与设计 BIM 模型进行比对分析,快速精准识别施工偏差,指导现场施工及时调整。例如,在某大型体育场馆索承网格结构施工中,利用三维激光扫描技术实现了对节点位置毫米级精度监测,确保施工精度满足设计要求。在先进张拉技术方面,研发自动化、智能化张拉设备,如基于智能控制算法的自动张拉系统,能依据预设张拉程序精确控制每根拉索张拉顺序、张拉力与加载速率,实现拉索张拉力的均匀施加,有效避免因张拉不均匀导致的结构变形。同时,借助压力、位移传感器等设备,对张拉过程进行全程闭环控制,实时校准张拉力,确保张拉精度达 0.5% 以内,为索承网格结构高精度施工提供坚实技术保障。

5.2.2 多阶段施工过程协同控制

索承网格结构施工流程复杂,涵盖节点组装、索网张拉、预应力施加等关键阶段,各阶段施工过程相互关联、相互影响,任一环节出现失误均可能对后续施工及结构整体性能产生严重影响。在索网张拉阶段,若张拉顺序不合理,可能导致索力分布不均,进而影响结构成型后的受力性能。

为实现多阶段施工过程的高效协同控制,可采用分阶段控制与调整策略,并深度融合施工信息化管理技术。在分阶段控制方面,依据施工进度与结

构受力特点,将整个施工过程划分为若干关键阶段,针对每个阶段制订详细的施工方案、质量控制标准与监测计划。通过施工模拟技术,利用有限元软件对各施工阶段进行数值模拟,提前预判可能出现的问题,制订相应应急预案。例如,在某大型索承网格结构施工模拟中,发现预应力施加阶段结构局部应力集中问题,通过优化预应力施加顺序与加载速率,有效解决了这一隐患。在施工信息化管理方面,引入 BIM 技术构建施工全过程数字化管理平台,将施工进度、质量、安全等信息集成于 BIM 模型中,实现对施工过程的可视化、精细化管理。借助该平台,施工人员可实时获取施工信息,合理调配资源,优化施工时间安排,确保各施工阶段紧密衔接、协同推进,提高施工效率与质量。

5.2.3 极端环境施工面临的挑战

部分索承网格结构项目位于极端自然环境区域,如强风频发的沿海地区、地震活跃带、严寒酷热地区等,恶劣的自然条件给施工过程与结构安全带来严峻挑战。在沿海强风地区施工时,强风可能导致施工设备晃动、结构构件产生位移,增加施工难度与安全风险;在地震带施工时,需防范地震对在建结构的破坏。

针对极端环境施工难题,可从环境适应性设计与实时环境监测系统两方面入手。在环境适应性设计方面,充分结合项目所在地的地理、气候条件,优化结构设计方案。在强风地区,采用流线型结构外形设计,降低风阻系数,提高结构抗风稳定性;选用高强度、耐腐蚀材料,增强结构在恶劣环境下的耐久性。在地震带,通过优化结构布置、设置耗能减振装置等措施,提升结构抗震性能。实时环境监测系统则通过搭建传感器网络,对环境参数(如风速、风向、温度、湿度、地震动参数等)进行实时采集与分析。一旦环境参数超出预设阈值,系统立即发出预警,并依据预先制订的应急预案,调整施工进度、暂停施工或采取相应加固措施,确保施工安全与结构质量。例如,在某沿海索承网格结构项目中,通过实时风速监测,在强风来临前及时停止高空作业,避免发生安全事故。

5.3 新材料、新技术应用

5.3.1 新型材料应用

伴随材料科学的飞速发展,一系列高性能新型材料不断涌现,为索承网格结构性能提升与创新发展注入新动力。超高强度钢材凭借其优异的强度与韧性,可有效减小结构构件截面尺寸,减小结构自重,在大跨度索承网格结构中具有广阔应用前

景。采用屈服强度达 1 000MPa 的超高强度钢材,相比于传统钢材,可使结构用钢量降低 20%~30%。智能纤维材料如形状记忆合金纤维、压电纤维等,具备自感知、自修复、自适应调节等独特性能,将其引入索承网格结构,可实现结构健康监测与性能主动调控。在结构关键部位植入形状记忆合金纤维,当结构出现损伤或变形时,纤维可通过自身形状记忆效应产生恢复力,对结构进行修复与加固。碳纤维复合材料以其高比强度、高比模量、耐腐蚀、耐疲劳等卓越性能,成为索承网格结构拉索、杆件等构件的理想替代材料。使用碳纤维复合材料拉索,可显著提高拉索承载力与使用寿命,降低维护成本。例如,在某大型体育场馆索承网格结构中,采用碳纤维复合材料拉索,拉索自重减小约 70%,而承载力提升 30%以上。

5.3.2 数字化与智能化设计和施工

数字化与智能化技术的蓬勃发展,正深刻变革索承网格结构的设计与施工模式。BIM 技术贯穿索承网格结构全生命周期,实现从设计、施工到运维的信息集成与协同管理。在设计阶段,借助 BIM 三维信息模型,设计师可直观展示结构复杂几何形态,进行多方案比选与优化设计;通过碰撞检查、虚拟施工模拟等功能,提前发现设计与施工中的问题,减少设计变更与施工返工。在施工阶段,基于 BIM 模型构建施工进度管理、质量管理、安全管理等信息化平台,实现施工过程可视化、精细化管理。利用 BIM 与物联网技术融合,对施工设备、材料、人员等资源进行实时监控与动态调配,提高施工效率与质量。大数据与人工智能(AI)技术为索承网格结构设计与施工提供强大的数据处理和智能决策支持。通过对大量工程案例数据、监测数据的挖掘与分析,利用机器学习算法建立结构性能预测模型、施工风险评估模型等,实现结构性能精准预测与施工风险智能预警。在设计优化中,AI 算法可快速搜索设计空间,自动生成最优设计方案,提高设计效率与质量。例如,利用生成对抗网络(GAN)技术可在短时间内生成多种索承网格结构布局方案,供设计师参考选择。

5.3.3 可持续发展与环保

在全球可持续发展理念深入人心的背景下,索承网格结构在节能、减排、环保等方面的表现备受关注。在设计环节,遵循绿色设计原则,选用可回收、可循环利用材料,减少不可再生资源消耗。采用高效节能的结构体系与构造设计,降低建筑使用阶段的能源消耗。在某大型索承网格结构中,通过

优化结构采光设计,充分利用自然采光,减少人工照明能耗约 30%。在施工过程中,推广绿色施工技术,采用装配式施工方式减少施工现场建筑垃圾的产生与环境污染;通过合理规划施工流程,降低施工能耗与碳排放。在结构运维阶段,利用智能监测系统实时掌握结构健康状况,及时进行维护保养,延长结构使用寿命,减少资源浪费。同时,积极探索将太阳能、风能等可再生能源技术与索承网格结构相结合,实现建筑能源自给自足,为可持续建筑发展提供新路径。例如,在索承网格结构屋面铺设太阳能光伏板,不仅可为建筑提供部分电力,还能有效降低屋面温度,减少空调制冷能耗。

6 结语

1)索承网格结构的设计核心在于通过找形找力耦合机制实现力流与形态的最优匹配。依托有限元分析技术,设计中需充分纳入几何非线性效应,通过预应力精准调控拉索与网格构件的协同受力,使结构在恒荷载与活荷载作用下保持稳定形态。当前,形态与力学状态的迭代优化方法已显著提升设计精度,但面对 300m 以上超大跨度结构,多物理场耦合(如温度、风荷载与结构响应的交互)的精细化建模仍需突破,以更精准预测复杂工况下的力学行为。

2)支架法以稳定性优势适用于复杂造型结构,但成本与工期劣势显著;无支架法则通过预应力自平衡原理大幅度降低了成本,但其毫米级精度要求对施工管控提出极高挑战。当前,三维激光扫描、实时传感等技术已实现施工误差的动态监测,但极端环境下(如强风、高温)的自适应调整能力仍显不足。未来需结合 BIM 与人工智能技术,构建施工全过程数字孪生系统,实现从被动纠偏到主动调控的升级。

3)性能分析已从传统的静力、稳定性研究,拓展至动力响应、抗震性能及施工误差耦合效应的全维度评估。非线性屈曲分析有效提升了失稳预测精度,蒙特卡罗法与误差耦合模型则量化了施工偏差对结构性能的影响。然而,关键节点的非线性行为(如索夹滑移、节点疲劳)及长期荷载下的材料劣化效应研究仍显薄弱,需建立涵盖设计、施工、运维的全生命周期性能评估体系,为结构安全提供长效保障。

参考文献:

- [1] 李治,王红军,涂建,等.第七届世界军运会主赛场车辆式索承网格钢结构屋盖设计[J].建筑结构,2019,49(12):53-58.
LI Z, WANG H J, TU J, et al. Steel roof design of spoke-typed cable supported lattice structure for the main stadium of the

- Seventh World Military Games [J]. Building structure, 2019, 49(12):53-58.
- [2] 司波,王丰,向新岸,等.环向悬臂索承网格结构预应力设计关键技术研究 and 应用[J].建筑结构,2014,44(15):36-40.
SI B, WANG F, XIANG X A, et al. Research and application of critical technology for the prestressed design of ring cantilever cable supported latticed structures [J]. Building structure, 2014, 44(15):36-40.
- [3] 朱峰.基于无支架施工的环形索承网格结构设计与施工一体化研究[D].南京:东南大学,2018.
ZHU F. Research on the integration of design and construction of ring cable-supported grid structure based on scaffoldless construction [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [4] 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 800-meter span city domes [J]. Journal of building structures, 2017, 38(1):21-31.
- [5] 刘怡吟,张其林,罗晓群.体育场轮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 cable-supported grid structure in stadium [J]. Building structure, 2021, 51(S1):2213-2218.
- [6] 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.
ZHAO W Y, MA T, LUO B, et al. Construction technology of large opening spoke-wheel-type cable supported grid structure [J]. Journal of building structures, 2020, 41(5):23-33.
- [7] 顾浩.环形索承网格结构的无支架施工关键技术研究[D].南京:东南大学,2019.
GU H. Research on key technology of non-bracket construction of annular cable-supported grid structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [8] 王秀丽,吴凯凯,赵鑫磊.大开口索承网格结构施工过程断索分析[J].建筑结构,2023,53(11):130-136,148.
WANG X L, WU K K, ZHAO X L. Analysis of cable breaking in construction of large opening cable supported grid structure [J]. Building structure, 2023, 53(11):130-136, 148.
- [9] 张宁远,罗斌,张曼权,等.内压环索承网格结构张拉完成态稳定性分析及支撑方案优选[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(5):776-782.
ZHANG N Y, LUO B, ZHANG M Q, et al. Stability analysis on tension completion state and support scheme optimization for cable-supported grid structure with internal compression ring [J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2021, 51(5):776-782.
- [10] 刘海霞.内置压力环索承网格结构的力学性能及施工全过程分析研究[D].南京:东南大学,2020.
LIU H X. Research on the mechanical properties and construction process analysis of the internal pressure ring cable supported grid structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [11] 张曼权.内压环索承网格结构施工精细化分析及索夹抗滑试验[D].南京:东南大学,2020.

ZHANG M Q. Fine analysis of internal pressure ring cable supported grid structure construction and anti slip test of cable clamps[D]. Nanjing:Southeast University,2020.

[12] XU J S, DING M M, LIN Y, et al. Study on error influence analysis of an annular cable bearing-grid structure[J]. Buildings, 2024,14(12):3750.

[13] 袁超林. 光纤传感器及其在索承网格结构应变及变形监测中的应用[D]. 大连:大连理工大学,2019.

YUAN C L. Fiber optic sensor and its applications in strain and deformation monitoring of cable-supported grid structures [D]. Dalian:Dalian University of Technology,2019.

[14] KIM H, RIGO B, WONG G, et al. Advances in wireless, batteryless, implantable electronics for real-time, continuous physiological monitoring [J]. Nano-micro letters, 2023, 16(1):52.

[15] 李治,王红军,涂建,等. 第七届世界军运会主赛场钢结构屋盖施工模拟分析[J]. 建筑结构,2019,49(12):59-62.

LI Z, WANG H J, TU J, et al. Construction simulation analysis on steel structure roof for the main stadium of the Seventh World Military Games[J]. Building structure,2019,49(12):59-62.

[16] 冯远,向新岸,王恒. 大开口车辐式索承网格结构静力性能影响因素分析[J]. 建筑结构学报,2019,40(3):81-91.

FENG Y, XIANG X A, WANG H. Static performance parameter analysis of large opening spoke-wheel-type cable supported grid structure[J]. Journal of building structures,2019,40(3):81-91.

[17] 武岳,苏岩. 弦支式互承网格结构受力性能试验及有限元分析[J]. 建筑结构学报,2021,42(7):65-75.

WU Y, SU Y. Experimental study and finite element analysis on mechanical behavior of suspended reciprocal grid structures[J]. Journal of building structures,2021,42(7):65-75.

[18] 李强,周绪红,冯远,等. 800m 超大跨巨型斜拉下穿索承网格结构拉索布置及参数分析研究[J]. 空间结构,2018,24(2):29-35,28.

LI Q, ZHOU X H, FENG Y, et al. Cable arrangement and parameter analysis for cable-stayed and underneath-cable supported megagrid structure [J]. Spatial structures, 2018, 24(2):29-35,28.

[19] 李强. 800m 超大跨度巨型斜拉下穿索承网格结构静力及稳定性研究[D]. 重庆:重庆大学,2017.

LI Q. Study on static and stability of 800m super large span cable-supported latticed structure [D]. Chongqing: Chongqing University,2017.

[20] 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.

YANG S Q, ZHANG H Y, FANG Y Q, 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.

[21] 单艳玲,吴慧,高博青. 自由曲面索承网格结构的合理布索位置研究[J]. 计算力学学报,2015,32(6):739-744.

SHAN Y L, WU H, GAO B Q. Rational cable location study on cable supported lattice structure of free form surface[J]. Chinese journal of computational mechanics,2015,32(6):739-744.

[22] ZU K, LUO B, HU Y H. Research on mechanical property and construction technology of spoke tension structure with single-double-combined layer cable [C]//Proceedings of IASS Annual Symposia,2022.

[23] 冯远,向新岸,王恒,等. 大开口车辐式索承网格结构构建及其受力机制和找形研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(3):69-80.

FENG Y, XIANG X A, WANG H, et al. Mechanical behavior and form-finding research on large opening spoke-wheel-type cable supported grid structure[J]. Journal of building structures,2019,40(3):69-80.

[24] HUANG D W, WU F, ZHAO Y L, et al. Application of high-credible statistical results calculation scheme based on least squares Quasi-Monte Carlo method in multimodal stochastic problems [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering,2024,418:116576.

[25] 余进江. 大开口车辐式索承网格结构设计与施工一体化研究[D]. 重庆:重庆大学,2020.

YU J J. Research on integration of structural design and construction of large-opening spoke-type cable-supported grid structure [D]. Chongqing:Chongqing University,2020.

[26] 吴凯凯. 大开口索承网格结构施工张拉模拟分析与监测[D]. 兰州:兰州理工大学,2021.

WU K K. Simulation analysis and monitoring of construction tension of large opening cable-supported grid structure [D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology,2021.

[27] SHOAEE M, NOOROLLAHI Y, HAJINEZHAD A, et al. A review of the applications of artificial intelligence in renewable energy systems: an approach-based study [J]. Energy conversion and management,2024,306:118207.

[28] LUO C Q, ZHU S P, KESHTEGAR B, et al. Active Kriging-based conjugate first-order reliability method for highly efficient structural reliability analysis using resample strategy [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering,2024,423:116863.

[29] GONG H M, XUE Y G, HAN M, et al. Large deformation characteristics and mechanism analysis of excavating shallow buried tunnel in reclamation areas [J]. Bulletin of engineering geology and the environment,2024,84(1):26.

[30] GUNASEGARAM D R, BARNARD A S, MATTHEWS M J, et al. Machine learning-assisted in situ adaptive strategies for the control of defects and anomalies in metal additive manufacturing [J]. Additive manufacturing,2024,81:104013.

[31] ALATHAMNEH S, COLLINS W, AZHAR S. BIM-based quantity takeoff: current state and future opportunities [J]. Automation in construction,2024,165:105549.

[32] FAN Q H, DUAN H Q, XING X J. A review of composite materials for enhancing support, flexibility and strength in exercise[J]. Alexandria engineering journal,2024,94:90-103.