

DOI: 10.7672/sgjs2026080009

钢结构环梁支撑螺栓球网架体外张弦结构 加固设计与施工*

秦杰^{1,2},任旭朗^{1,2},卫赵斌^{1,2},金文一³,李开国⁴,王怡宁^{1,2}

(1. 河北省土木工程灾变控制与灾害应急重点实验室,河北 廊坊 065201;

2. 华北科技学院,河北 廊坊 065201; 3. 北京房地中天建筑设计研究院

有限责任公司,北京 100010; 4. 江苏飞天膜结构公司,江苏 徐州 221000)

[摘要] 螺栓球网架存在易锈蚀腐蚀、老化等问题,随着服役时间增加,伴随维护不到位的情况会大幅度影响结构承载力。最新建筑结构荷载规范更新了荷载分项系数,对网架结构承载力提出了更高要求,因此大多数网架结构需重新进行计算校核,对不满足规范要求的网架结构进行加固处理。对北京市某中学美术教室屋面螺栓球网架采用外接钢结构节点方式结合索撑协同机制进行加固,使用三维扫描设备对加固前网架点云数据进行采集并处理,对节点设计及施工技术进行详细说明,采用有限元软件对加固后结构和节点进行受力分析,结果表明加固改造极大地改善了该网架承载力与形变,满足相关规范要求。

[关键词] 钢结构;加固;三维激光扫描;设计;施工技术

[中图分类号] TU973

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0009-06

Strengthening Design and Construction of Externally Beam String Structure for Bolt-ball Grid with Steel Ring Beam Support

QIN Jie^{1,2}, REN Xulang^{1,2}, WEI Zhaobin^{1,2}, JIN Wenyi³, LI Kaiguo⁴, WANG Yining^{1,2}

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Disaster Mitigation and Emergency Response in Civil Engineering,

Langfang, Hebei 065201, China; 2. North China Institute of Science and Technology,

Langfang, Hebei 065201, China; 3. Beijing Fangdi Zhongtian Architectural Design and

Research Institute Co., Ltd., Beijing 100010, China; 4. Jiangsu Feitian Membrane

Structure Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221000, China)

Abstract: The bolt-ball grid has problems such as easy corrosion and aging. As the service time increases, the lack of maintenance will greatly affect the bearing capacity of the structure. The load factor is updated in the latest building structure load code putting forward higher requirements for the bearing capacity of grid structures. Therefore, most grid structures need to be recalculated and checked, and those that do not meet the code requirements should be strengthened. This paper describes the strengthening of the bolt-ball grid in the art classroom raf of a middle school in Beijing by using the external steel structure joint method combined with the cable support synergy mechanism. The point cloud data of the grid before strengthening was collected and processed using a 3D scanning device. The design and construction technology of the joints were elaborated in detail. The finite element software was used to analyze the stress of the structure and joints after strengthening. The results show that the strengthening and renovation greatly improves the bearing capacity and deformation of the grid, making it ultimately meet the relevant code requirements.

Keywords: steel structures; reinforcement; three-dimensional laser scanning; design; construction

* 河北省自然科学基金(E2024508038)

[作者简介] 秦杰,博士,教授,E-mail: qjcumt@263.net

[通信作者] 卫赵斌,硕士,讲师,E-mail: davidwdb@ncist.edu.cn

[收稿日期] 2026-01-30

0 引言

随着建筑结构多样化发展,多材料组合体系在

现代建筑中得到广泛应用。空间网格结构作为多材料组合结构体系也得到了大力发展,其主要由网架、空间桁架和网壳 3 种结构形式构成^[1]。最为常见的网架结构以其卓越的大跨度能力、高强度、高施工效率及优异的空间集成性已成为现代建筑屋盖结构的首选结构方案之一^[2]。螺栓球网架广泛应用于大型体育馆、机场航站楼、展览中心等建筑屋面构造中,该结构对于螺栓球、螺母、杆件等构件强度和稳定性要求较高,从而保证结构安全^[3]。

网架结构的应用有诸多优势,但在某些条件影响下也容易出现安全问题。近年来,大跨度钢网架民用和工业建筑安全事故多发,例如齐齐哈尔三十四中学体育馆坍塌事故、黑龙江省佳木斯体育馆坍塌事故、河南某煤棚网架坍塌事故^[4-5],造成了严重的人员伤亡与经济损失,这些事故多由于构件老化、支座生锈、荷载集中导致结构失稳等引起^[6-8]。因此,对大跨度屋盖网架结构开展定期的结构检测,及时排查消除存在的安全性能隐患,对服役时间较长、出现结构强度退化的网架结构提出并实施改造加固方案,对于提升网架结构整体安全性能具有重要意义。

本文基于北京市某中学美术教室屋面的双层正放四角锥螺栓球网架,详细参考现行相关规范与加固方法^[9],结合三维激光扫描点云模型和现场实际情况,针对边跨受限位置采用外接钢结构节点的方式进行索头固定,并采用体内张弦方式结合索撑协同机制对网架整体进行加固。结果表明,本文所采用方案有效提升了其安全性,使网架满足规范要求并达到了预防潜在事故的发生和提升结构安全稳定性的目的。

1 工程概况

北京市某中学美术教室屋面网架始建于 2013 年,建筑面积为 228m²。其结构形式为双层正放四角锥螺栓球网架,由上弦、下弦和腹杆组成,杆件截面均采用钢管布置,钢管材料强度等级以 Q235 为主,最大尺寸为 $\phi 59.9 \times 3$,节点形式为螺栓球节点。网架平面尺寸为 21.6m \times 13.5m,采用下弦周边支承,支撑均布置在房屋梁、柱位置处,平面布置如图 1 所示。在对网架进行安全鉴定后,网架鉴定结论均为 Du 级,极不符合国家现行标准规范的安全性要求,严重影响整体安全性能,建议依据 GB 51367—2019《钢结构加固设计标准》对其进行改造加固处理。

2 三维激光扫描

三维激光扫描技术的核心原理电测距^[10],通过

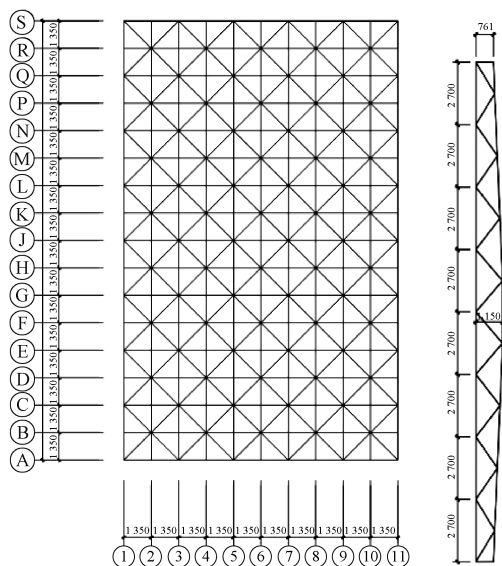


图 1 网架平面布置

Fig. 1 Plan layout of grid

发射激光脉冲信号同返回的时间计算激光发射点至被测点位的距离,并凭借激光测角获得发射点与被测点间的方位关系,通过每个工况架设位置的打点获取每个点位与仪器的相对位置,从而在工作坐标系中确定具体坐标^[11]。

在扫描任务的准备阶段,扫描设备的扫描范围和分辨率须根据目标的具体形状和精度要求合理配置,可有效避免扫描点云数据的冗余带来过大的工作量,提升扫描效率。在工作阶段,必须针对目标形状、位置和附近人员散布情况进行周密的测量点布置,包括点位选择及其数量确定。所选测量点应位于结构稳定、地势平坦、视野清晰的地带,以便扫描区域尽可能地涵盖被测对象^[12]。在工作过程中,仪器尽量在相对位置布置站点测量,脚架高度也要根据目标高度灵活调整,以确保所有测点覆盖任务目标整体并方便各测站点云图像重叠,保证后续点云模型的真实性与整体结构三维建模的精度。

在项目现场共布设 8 个站点对网架进行点云数据采集。使用 Leica 三维激光扫描仪进行扫描工作,配套运用专用点云数据处理软件(Cylone)对点云数据进行去噪、拼接、合并等工作。针对梁柱位置处布置网架支撑有断续的特殊情况,重点检查网架两侧梁柱部位节点的点云密度是否满足要求及是否存在扫描死角,最终获得带有精确坐标的点云数据。

3 原结构模型重构

通过三维激光扫描采集的点云数据,能全面并精准地反映网架结构形态。经过配套软件对点云

数据的预处理,可将模型精度精确到各杆件直径、长度及节点坐标等几何参数。

在点云模型充分处理后,运用 Rhino(犀牛)搭建的三维建模平台对项目实际呈现的网架结构三维模型进行模型复现。Rhino 软件现已在建筑领域被广泛采用,因其强大的造型能力和细节构件建模能力适合建筑结构的设计要求^[13-14]。本文运用 Rhino 进行模型复现后,不仅能准确反映网架几何特征与空间关系,还可结合有限元软件对加固设计进行数值分析,可实现网架结构精准重现与数字化表达,Rhino 模型复现如图 2 所示。

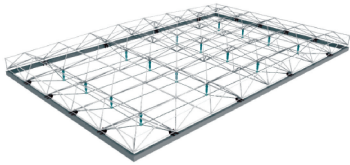


图 2 原结构模型复现

Fig. 2 Reproduction of original structure model

4 结构加固

4.1 加固设计

为提高网架结构整体协同性、刚度与承载性能,采用预应力索撑协同加固技术,该加固结构体系由拉索、撑杆、钢结构节点等组成,布置方式如图 3 所示。在网架下弦平面横向均匀布置 4 根承重索,纵向中部位置对称布置 3 根稳定索,分别起到有效减小网架跨中弯矩与挠度和约束承重索侧向位移的作用。撑杆上端采用焊接方式固定在上弦螺栓球节点,下端则与直接焊接于两侧钢梁位置钢结构节点上的承重索连接。在施工过程中,该方案通过对承重索施加 30kN 的预应力,使撑杆处于向上的受压状态,有效降低网架结构挠度。承重索直接焊接在网架边跨钢梁梁柱位置,其上施加的预应力在网架上弦受弯区域产生反向弯矩,有效抵消部分恒荷载与活荷载引起的正弯矩,防止局部杆件进入塑性屈服状态,起到加固作用。

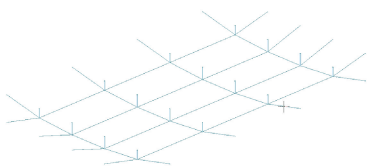


图 3 预应力索加固布置

Fig. 3 Prestressed cable reinforcement arrangement

该方案中所采用的拉索材料保证了拉索在服役期间满足《钢结构加固设计标准》对承载力与变形控制的要求,即强度 $\geq 1\ 860\text{MPa}$,弹性模量 \geq

210GPa。承重索和稳定索分别选取 $\phi 24$, $\phi 36$ 高钒索,以确保主要荷载的有效传递。撑杆采用 Q235B 钢材,选用规格为 $\phi 59.9 \times 3$ 圆钢管。拉索和撑杆采用锁夹锚固连接,包括网架支座及节点的连接处均用铰接连接定义,避免多余约束条件影响理论计算结果。

4.2 有限元分析及计算

为评估加固方案的合理性,采用数值模拟对方案设计中拉索布置方式、撑杆长度与尺寸、拉索截面尺寸等关键参数进行分析,并评估方案的安全性。模拟计算软件为 MIDAS Gen。为降低建模工作量,将 Rhino 重构模型以点线 DXF 格式导入 MIDAS,进行参数设置及构件属性定义。

根据建筑结构位置、建筑荷载规范及结构构造确定荷载值。屋面恒荷载 0.5kN/m^2 ,无人屋面活荷载 0.5kN/m^2 。风荷载方面,在实际受力中屋面主要受风吸,而风吸对网架本身为有利荷载,故不予以考虑,计算荷载组合为 1.3 倍恒荷载 + 1.5 倍活荷载。

经计算显示,加固前网架竖向位移为 17.3mm,经过加固改造后网架竖向位移为 11.06mm,同比减小 32.9%。加固前后短跨挠度比由 $L/173$ 优化至 $L/259$,依据结构刚度与挠度的反比关系推算网架整体等效抗弯刚度提升幅度约为 51.5%。位移计算结果如图 4 所示。结合 GJ 7—2010《空间网格结构技术标准》关于挠度不大于最短向跨度 $1/250$ 的规定^[15],判定本文网架结构加固方案满足规范要求。

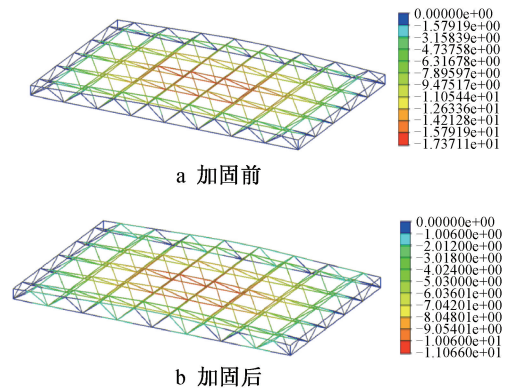


图 4 加固前后位移计算结果(单位:mm)

Fig. 4 Displacement calculation results before and after reinforcement(unit:mm)

因为本模型杆件单元为桁架单元,构件仅承受沿杆件轴向的应力,因此最大主应力即为 Mises 应力,故仅讨论结构的最大主应力即可。在承载能力极限状态下,由加固后结构模型计算结果不难看出,最大主应力由原结构的 128MPa 降至 95MPa。

该应力极值出现在跨中上弦关键杆件区域且其应力水平已由严重超限状态降至设计强度允许范围内,满足 GB 50017—2017《钢结构设计标准》对材料强度设计值的要求。同时,应力云图显示原结构中存在的局部高应力集中区域明显弱化、荷载沿网架杆件的内力重分布更均匀、腹杆与弦杆间的协同工作性能得以改善。加固前后应力变化如图 5 所示。

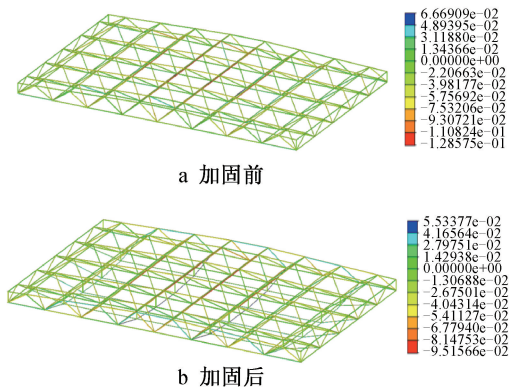


图 5 加固前后应力计算结果(单位:GPa)

Fig. 5 Stress calculation results before and after reinforcement(unit: GPa)

5 节点设计

5.1 节点施工方案

本文网架结构为下弦周边支承的双层正放四角锥网架,其支承节点固定在边跨位置的钢梁,在现场勘察与结构现状评估过程中发现网架边跨区域施工空间严重受限,且有一部分节点在最初施工时已被封入墙面内,因此边跨节点不具备将加固体系与螺栓球进行连接的条件。现场网架情况及节点处受限情况如图 6 所示。

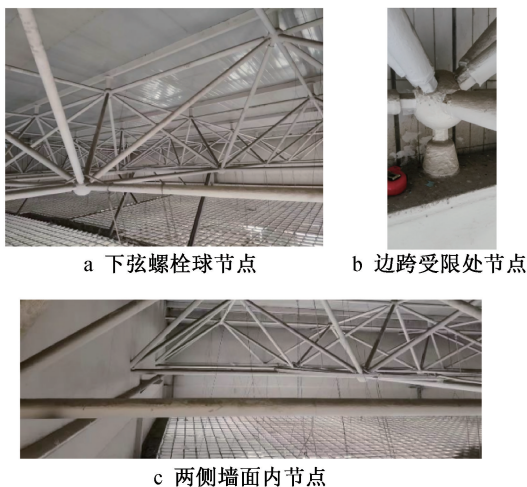


图 6 施工空间受限

Fig. 6 Limited construction space

根据该工程支承位置空间受限的实际问题提出相应解决方案:针对梁柱支承位置空间狭窄的问

题,决定在边跨位置采用在梁位置外接钢结构的方式进行索头固定,网架支承节点位置为箱形钢梁,因此选择将外接钢结构焊接在原有箱形钢梁,将加固结构受力传导至原有结构,增强整体安全性。节点形式如图 7 所示。

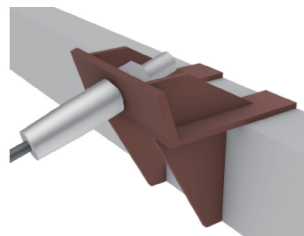


图 7 外接钢结构节点

Fig. 7 Additional steel structure joint

撑杆节点布置方式则在相应位置采取直接焊接的方式将上端固定于上弦螺栓球上。螺栓球通常采用 45 号钢锻造成型,45 号钢属于中碳钢且含碳量接近中碳钢上限,焊接性能较差。因此,在焊接前中后阶段需要进行特殊工艺焊接:①焊接前,选取低氢型焊条,防止焊接后的氢致裂纹,并对焊条进行烘干处理;②在焊接过程中,对于螺栓球构件,要采取多层道焊;③焊接后,立即利用石棉布等保温材料覆盖焊缝,使其缓慢冷却至室温,辅助焊缝内氢的溢出。节点下端与拉索连接固定,确保将加固结构受力传递至原有结构,以提升网架结构受力性能与结构安全性。撑杆节点布置方式如图 8 所示。

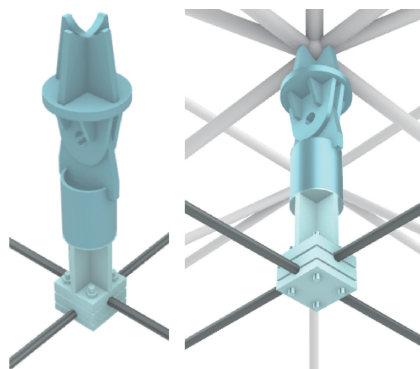


图 8 撑杆节点布置方式

Fig. 8 Layout mode of supporting pole joint

5.2 节点计算

两侧箱梁上通过焊接固定的外接钢结构节点作为索头固定的唯一构件,对其上受力进行有限元分析是验证方案可行性的重要环节,在 Solidworks 中建立 1:1 还原实际模型,导入 ABAQUS 软件中进行计算,节点材料为 Q235 钢。

模型建立完成后,为模拟实际模型中的焊接效

果,需要对焊缝处接触面物体添加绑定接触,使模型在 Solidworks 中完成整体化。柱顶节点在受力时,索头孔为主要受力位置,因此在该孔处施加节点荷载,方向为斜撑板法线方向,同时也是沿着索朝向。在数值模拟过程中,承重索施加 30kN 预应力,节点计算时也考虑 30kN 拉力,构件模型如图 9 所示。

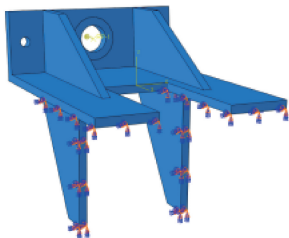


图 9 构件模型

Fig. 9 Component model

模型前处理完成后,进行计算分析,节点应力与位移结果如图 10 所示。

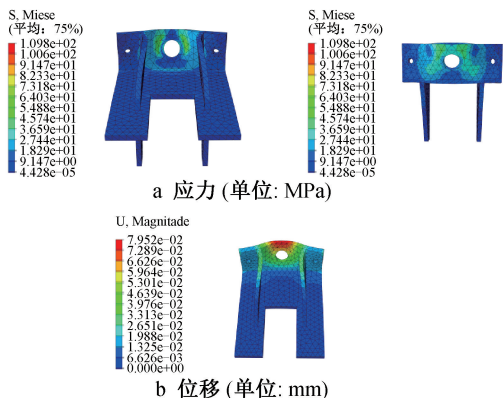


图 10 节点计算结果

Fig. 10 Calculation results of joints

计算结果显示,节点最大应力为 109.8MPa,低于 Q235 钢屈服强度;最大位移为 0.079 5mm,节点满足要求。

对于在钢箱梁上外接钢结构的节点形式,索力对于下方固定的箱梁属于新增荷载,评估其对钢箱梁的影响是确定整体结构安全性的重要环节。因此,在钢结构节点基础上,采用 Solidworks 将钢梁外接钢构件整体结构形式补充完整,近似将钢结构节点及钢箱梁作为一个整体进行建模,结构模型如图 11 所示。

对结构整体进行计算分析,其应力与位移计算结果如图 12 所示。

计算结果显示,节点最大应力为 106.9MPa,低于 Q235 钢屈服强度;最大位移为 0.346mm,节点满足要求。

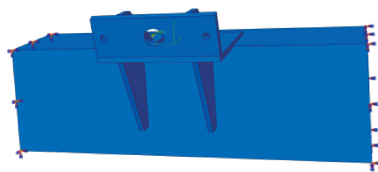


图 11 结构模型

Fig. 11 Structure model

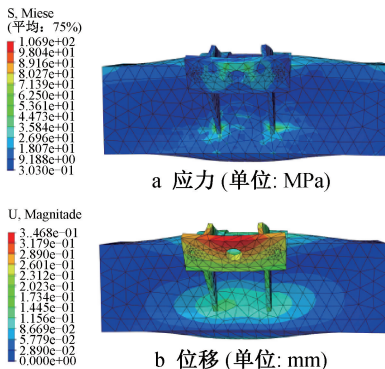


图 12 结构整体计算结果

Fig. 12 Overall calculation results of the structure

6 现场施工

6.1 测量定位与钢节点焊接

在施工准备阶段,须基于前期三维激光扫描建立的点云模型用全站仪对加固体系关键节点(含索锚固点、钢连接件安装位)进行三维坐标放样,将外接钢结构节点的定位精度控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内,在外围箱形钢梁标记焊接点位。将工厂预制的钢结构节点构件按照标记位置准确焊接在两侧钢梁上,并确保节点平面位置的的水平。现场外接钢结构节点焊接成形后示例如图 13 所示。

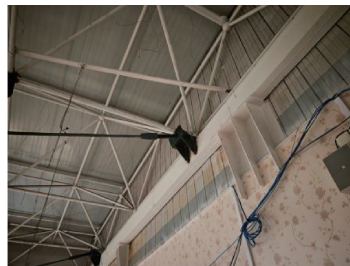


图 13 钢结构节点焊接成型

Fig. 13 Welding forming of steel structure joints

6.2 索撑体系安装及预应力张拉

将加工完成的撑杆直接焊接于网架螺栓球节点处。加固结构安装完成后,需对拉索施加相应预应力。张拉过程应严格遵循既定的张拉顺序,分级、同步加载,确保结构受力均匀、变形协调,保障整个加固过程中结构稳定性与施工安全。按照如下顺序进行张拉:①同步张拉短轴方向的 2 根拉索;②同步张拉长轴方向的 2 根拉索;③循环重复上述

步骤,直至完成整体张拉。张拉完成后,需对网架结构整体状态、撑杆垂直度及索夹坚固情况等进行全面检查,如发现异常,及时调整处理。索头固定、索撑连接、预应力张拉及整体索撑协同体系安装完成效果如图14所示。



图14 整体安装效果

Fig. 14 Overall installation effect

6.3 施工验收阶段

在整体索撑加固体系完成且结构趋于稳定后,需复核拉索索力是否达到设计值。为克服单一检测方法的局限性,采用弓式测力仪和索力动测仪进行相互校核。弓式测力仪基于液压原理,可直接测量拉索对锚座的顶压力,结果可靠,但对现场操作空间有一定要求。索力动测仪基于“弦振动理论”,通过测量拉索自振频率反算索力,具有操作便捷、非接触测量的优势,但其测量精度会受边界条件、索体弯曲刚度等因素影响。通过两种方法的对比验证,可提高索力检测的准确性与可靠性。

2种测试结果表明,拉索索力与设计值一致,索力检测数据为整个网架结构的安全性 with 可靠性提供了有力支撑。

7 结语

1)对于类似结构的加固设计,三维激光扫描技术结合CAD, Rhino软件,能对结构实际几何模型进行高效、精确重建,尤其是经过处理的高精度点云模型对于网架的加固方案制定及节点优化设计具有重要的参考价值。

2)外接钢结构节点与索撑协同体系结合的加固方案,将原结构从纯网架体系转换为预应力网格结构,形成张弦结构体系,改善了结构受力性能,满足变形控制要求,显著提升了结构安全性,使局部高应力集中区域明显弱化、荷载沿网架杆件的内力分布更均匀、腹杆与弦杆间的协同工作性能得以改善。

3)外接钢结构节点设计简洁、受力路径明确、施工便利,尤其针对支承位置空间受限的问题提出了合理的解决方案,同时该方案能减少钢材用量,具有良好的经济性。

参考文献:

[1] 薛素铎. 中国空间结构的应用发展与展望[J]. 钢结构(中英文), 2024, 39(10): 32-45.

XUE S D. Application developments and prospects of spatial structures in China[J]. Steel construction, 2024, 39(10): 32-45.

[2] 白晓月, 赵雪绮, 冯兰君. 某监控大厅屋面网架结构设计[J]. 城市建筑空间, 2024, 31(S2): 205-206.

BAI X Y, ZHAO X Q, FENG L J. Structural design of steel grid structure on the roof of a monitoring hall[J]. Urban architecture space, 2024, 31(S2): 205-206.

[3] 徐万磊, 李杰, 胡君霞. 大面积屋面网架结构逐步外扩顶升施工技术——以某体育馆网架屋盖施工工程为例[J]. 福建建材, 2025(1): 92-95, 99.

XU W L, LI J, HU J X. Construction technology of gradual expansion and jacking-up of large-scale roof steel grid structures: a case study of a sports stadium grid roof construction project[J]. Fujian building materials, 2025(1): 92-95, 99.

[4] 周乐. 大跨度网架结构加固设计及抗垮塌能力分析[D]. 北京: 北京建筑大学, 2024.

ZHOU L. Reinforcement design and collapse resistance analysis of largespan grid structure[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2024.

[5] 王霄翔, 倪扬, 张明亮, 等. 某煤炭储备基地储煤棚钢结构施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(8): 6-11.

WANG X X, NI Y, ZHANG M L, et al. Key technology of steel structure construction for coal storage shed in a coal reserve base[J]. Construction technology, 2025, 54(8): 6-11.

[6] 聂祺, 赵卫忠, 罗开海, 等. 用于网架结构加固的索撑、套管集成加固法及工程应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(1): 148-153.

NIE Q, ZHAO W Z, LUO K H, et al. Cable brace and outer sleeve integrated reinforcement method for grid structure and its engineering application[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2021, 43(1): 148-153.

[7] 李满枝. 某大型网架结构检测与鉴定[J]. 低温建筑技术, 2019, 41(5): 88-91, 94.

LI M Z. Detection and appraisal for a large grid structure[J]. Low temperature architecture technology, 2019, 41(5): 88-91, 94.

[8] 贾丽欣, 吕文浩, 裴兴旺, 等. 既有大跨度网架结构体育馆安全性评定[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(4): 173-180.

JIA L X, LÜ W H, PEI X W, et al. Safety assessment of existing stadiums with large-span steel grid structures[J]. China safety science journal, 2025, 35(4): 173-180.

[9] 冶金工业部建筑研究总院. 钢结构工程施工质量验收规范: GB 50205—2001[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.

Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group. Code for acceptance of construction quality of steel structures: GB 50205—2001[S]. Beijing: China Planning Press, 2002.

[10] 魏伟, 卢昱杰. 面向建筑施工场景的进度智能化识别方法综述[J]. 施工技术(中英文), 2026, 55(1): 4-12, 48.

WEI W, LU Y J. Review of intelligent progress recognition methods for building construction[J]. Construction technology, 2026, 55(1): 4-12, 48.

除受力以外,分离式支架设计可以减小由下横梁分批浇筑混凝土带来的合龙口相对高差,采用整体式支架时下横梁合龙口存在 4.2mm 的高差,分离式支架可使此合龙口高差减至 0.1mm。分离式支架对于下横梁线形的严格控制更加符合涉铁桥梁对线形的要求。

5 结语

1) 双重单元法可以较精确计算结构内力和下横梁混凝土浇筑线形。

2) 空间 4 塔肢索塔下横梁不同的混凝土浇筑顺序对于结构内力与下横梁变形的影响较小,可根据现场施工布置合理设置浇筑顺序。

3) 下横梁采用一次性浇筑,下横梁支架采用分离式支架设计可以有效减小浇筑过程中塔肢所受内力,同时消除下横梁合龙口处的相对高差。

4) 下横梁施工采用了分离式支架,浇筑顺序为 ③→④→①→②,采用双重单元法对下横梁施工过程进行模拟,综合考虑计算设置预拱度后,下横梁线形与设计线形最大误差 $\leq 3\text{mm}$ 。

参考文献:

- [1] 秦顺全,张金涛,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥桥塔方案研究[J].桥梁建设,2021,51(4):1-9.
QIN S Q,ZHANG J T,LU Q F, et al. Research on pylon types for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge construction,2021,51(4):1-9.
- [2] 胡勇.常泰长江大桥主航道桥桥塔基础选型研究[J].桥梁建设,2021,51(2):1-9.
HU Y. Research on pylon foundation types for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge construction,2021,51(2):1-9.
- [3] 秦顺全,徐伟,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥总体设计与方案构思[J].桥梁建设,2020,50(3):1-10.

QIN S Q, XU W, LU Q F, et al. Overall design and concept development for main navigational channel bridge of Changtai Changjiang River Bridge[J]. Bridge construction, 2020, 50(3): 1-10.

- [4] 高有德.云南江底河特大桥索塔下横梁支架设计与施工[J].山西建筑,2021,47(18):141-145.
GAO Y D. Design and construction of beam support under the cable pylon of Jiangdi River Bridge in Yunnan Province[J]. Shanxi architecture, 2021, 47(18): 141-145.
- [5] 王汉章,曹振杰,兰晴朋.宜昌伍家岗长江大桥下横梁施工过程中内力分配模式研究[J].中外公路,2021,41(3):135-140.
WANG H Z, CAO Z J, LAN Q P. Study on internal force distribution mode of lower crossbeam of Yichang Wujiagang Yangtze River Bridge during construction stages[J]. Journal of China & foreign highway, 2021, 41(3): 135-140.
- [6] 刘智.大跨径悬索桥塔下横梁施工关键技术研究[D].西安:长安大学,2011.
LIU Z. Construction technical analysis of long-span suspension bridge tower lower cross-member [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [7] 周乐木,孙开武,殷源,等.棋盘洲长江公路大桥南塔下横梁施工关键技术[J].土木工程与管理学报,2019,36(6):56-60.
ZHOU L M, SUN K W, YIN Y, et al. Lower cross beam construction technology of the south tower of Qipanzhou Yangtze River Highway Bridge [J]. Journal of civil engineering and management, 2019, 36(6): 56-60.
- [8] 罗显平,翁方文,郑建新.大跨斜拉桥索塔施工及控制技术研究[J].公路,2017,62(5):86-90.
LUO X P, WENG F W, ZHENG J X. Research on construction and control technology of tower of long-span cable-stayed bridge[J]. Highway, 2017, 62(5): 86-90.
- [9] 张博.铁路劲性骨架钢管混凝土拱桥施工过程仿真分析[D].天津:河北工业大学,2017.
ZHANG B. The Construction simulation of railway concrete-filled steel tube skeleton arch bridge[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.

(上接第 14 页)

- [11] 许梁.基于三维激光扫描技术的结构检测方法研究[D].济南:山东建筑大学,2024.
XU L. Research on structural detection method based on 3d laser scanning technology[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2024.
- [12] 宋玉喜.三维激光扫描技术在室内三维实景模型重建中的应用[J].科技创新与应用,2025,15(15):165-168.
SONG Y X. Application of 3D laser scanning technology in the reconstruction of indoor 3D real-scene models [J]. Technology innovation and application, 2025, 15(15): 165-168.
- [13] 朱鸣,王春磊.使用犀牛软件及 Grasshopper 插件实现双层网壳结构快速建模[J].建筑结构,2012,42(S2):424-427.
ZHU M, WANG C L. Applying of Rhinoceros software and

Grasshopper plug-in for quick structural modeling of double-layer reticulated shells [J]. Building structure, 2012, 42(S2): 424-427.

- [14] 孙晓阳,张博玮,张有志,等.基于 Rhino 的中国传统建筑大木结构 BIM 技术应用[J].施工技术(中英文),2025,54(13):135-139.
SUN X Y, ZHANG B W, ZHANG Y Z, et al. Application of BIM in wooden structures in traditional Chinese architecture based on Rhino[J]. Construction technology, 2025, 54(13): 135-139.
- [15] 中国建筑科学研究院.空间网格结构技术规程:JGJ 7—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
China Academy of Building Research. Technical code for spatial grid structures: JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.