

DOI: 10.7672/sgjs2025020037

肋环型弦支球面网壳结构施工技术*

王洪¹, 张文津^{1,2}, 李向冰¹, 张昊¹, 陈军¹, 胡香港¹, 韩伟¹, 王战士¹

(1. 中建八局浙江建设有限公司, 浙江 杭州 311200; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

[摘要] 肋环型弦支球面网壳结构由径向主梁、环向次梁、预应力拉索和受压撑杆组成,其刚度与稳定承载力较肋环型球面网壳结构更优越,被广泛应用于各类体育设施和文旅工程。提出对称施工方法,采用 ANSYS 软件建立结构有限元模型,复核结构施工过程与成型状态下的位移和应力,并对内圈下环梁异形节点承载力进行评估。研究表明,对称施工过程中结构最大位移 $<4\text{mm}$,构件应力比 <0.05 ,安全可靠;预应力拉索张拉力能满足结构形态需要与建筑要求;内圈下环梁异形节点满足设计需求,承载力安全储备较高;节点耳板两侧设置加劲肋,可显著提高其刚度和承载力,抑制节点塑性发展范围和深度。

[关键词] 钢结构;网壳;拉索;预应力;节点;有限元分析;变形;应力

[中图分类号] TU758.11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)02-0037-06

Construction Technology of Ribbed-ring String-supported Spherical Reticulated Shell Structure

WANG Hong¹, ZHANG Wenjin^{1,2}, LI Xiangbing¹, ZHANG Hao¹, CHEN Jun¹,
HU Xianggang¹, HAN Wei¹, WANG Zhanshi¹

(1. Zhejiang Construction Co., Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division, Hangzhou, Zhejiang 311200, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The ribbed-ring string-supported spherical reticulated shell structure is composed of radial main beam, circumferential secondary beam, prestressed cable and compression strut. Its stiffness and stability bearing capacity are superior to those of the ribbed-ring spherical reticulated shell structure, and it is widely used in various sports facilities and cultural tourism projects. The symmetrical construction method is proposed, and the finite element model of the structure is established by ANSYS software. The displacement and stress of the structure during the construction process and the forming state are checked, and the bearing capacity of the special-shaped joint of the inner lower ring beam is evaluated. The research shows that the maximum displacement of the structure is less than 4mm and the stress ratio of the component is less than 0.05, which is safe and reliable. Prestressed cable tension can meet the needs of structural form and architectural requirements. The special-shaped joints of the inner lower ring beam meet the design requirements, and the bearing capacity safety reserve is high. Stiffening ribs are set on both sides of the ear plate of the joint, which can significantly improve its stiffness and bearing capacity, and inhibit the plastic development range and depth of the joint.

Keywords: steel structures; reticulated shell; cables; prestressing; joints; finite element analysis; deformation; stress

0 引言

单层肋环型球面网壳结构由径肋和环杆组成^[1-3],径肋在球顶相交,环杆常采用刚度较大的实

腹构件。多根径肋在结构顶部交汇,节点构造形式较复杂,非球顶位置的节点均由4根杆件正交,构造形式较简单。单层肋环型球面网壳结构面内和面外刚度相对有限,一般适用于中、小跨度建筑^[2-3]。

肋环型弦支球面网壳结构由上部的单层肋环型球面网壳结构与下部的预应力张拉结构组合而

*上海市2024年度“科技创新行动计划”启明星项目(24QB2707500)
[作者简介] 王洪,高级工程师,E-mail: 136416787@qq.com
[收稿日期] 2024-09-01

成。预应力张拉结构包括预应力拉索(杆)及受压撑杆等构件,在外荷载和预应力作用下可为整体结构提供几何刚度。施加预应力能减小上部网壳竖向挠度及外周边环梁侧向位移,进而降低外周环梁内力。同时,上部单层肋环型球面网壳具有一定面外刚度,易于预应力张拉结构的施工^[3]。

肋环型弦支球面网壳结构相比于单层肋环型球面网壳结构,结构刚度与稳定性更优越,充分发挥了预应力拉索材料性能,降低结构自重的同时可实现更大跨度。因此,该类结构能实现轻盈灵动的建筑美感,被广泛应用于各类体育设施和文旅工程,如北京2008奥运会羽毛球馆^[4-5]、济南奥体中心体育馆^[6]、武汉体育中心体育馆等^[7]。

针对某肋环型弦支球面网壳结构,提出对称施工方法,采用 ANSYS 软件建立有限元分析模型,对施工过程和成型状态下结构安全性进行评估。分析内圈下环梁异形节点承载力,验证其在不同荷载工况下均具备较高安全富余,安全可靠。

1 工程概况

某围棋道场建筑位于大型文旅工程室内,屋盖采用肋环型弦支球面网壳结构。屋盖下方空间用于建筑使用,屋盖上方种植绿植、布设树池、供人行走,如图1所示。



图1 建筑效果

Fig. 1 Effect of the building

肋环型弦支球面网壳结构组成如图2所示。屋盖结构平面呈圆形,半径为20m,沿径向均匀布置16根放射状主梁,沿环向设有5道次梁。钢屋盖结构外周边设1道圈梁,屋盖结构由外侧16根劲性钢柱支承。

径向主梁通过内圈刚性结构(包含内圈上环梁、内圈下环梁和竖向撑杆)分别与网壳下方16根钢拉索相连,径向主梁、拉索与内圈刚性结构间的连接如图3所示。

肋环型弦支球面网壳结构上部铺设钢筋桁架楼承板,板厚为150mm,混凝土强度等级为C35。钢材均为Q355B,径向拉索选用 $\phi 110$ 型锌-5%铝-稀

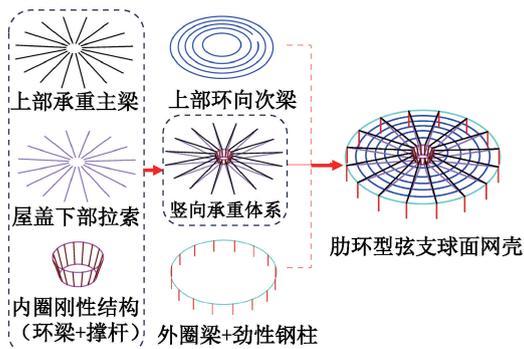


图2 结构组成

Fig. 2 Structural components

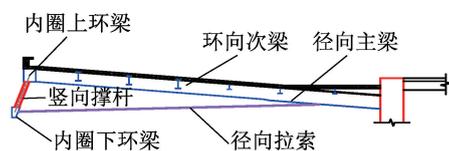


图3 径向构件连接

Fig. 3 Connection of radial structural components

土合金镀层钢绞线。内圈刚性结构围合区域为天窗,附加恒荷载为 1.5kN/m^2 ,活荷载为 1.0kN/m^2 ;第1~3道环向次梁围合区域为种植上人屋面,附加恒荷载为 7.0kN/m^2 ,活荷载为 3.5kN/m^2 ;第3道环向次梁与外周边圈梁围合区域为上人屋面,附加恒荷载为 3.5kN/m^2 ,活荷载为 3.5kN/m^2 。

2 肋环型弦支球面网壳施工技术

为完成肋环型弦支球面网壳结构施工,采用2台型号7020塔式起重机,1台80t汽车式起重机及1台200t汽车式起重机。200t汽车式起重机用于内圈刚性结构吊装就位,80t汽车式起重机通过4次站位满足所有无盖主梁的吊装需求,塔式起重机用于其他钢构件吊装就位。径向构件方向编号为1~16,如图4所示。

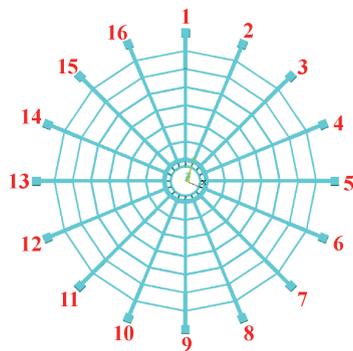


图4 径向构件方向编号

Fig. 4 Direction numbering of radial structural components

针对肋环型弦支球面网壳结构特点,提出对称

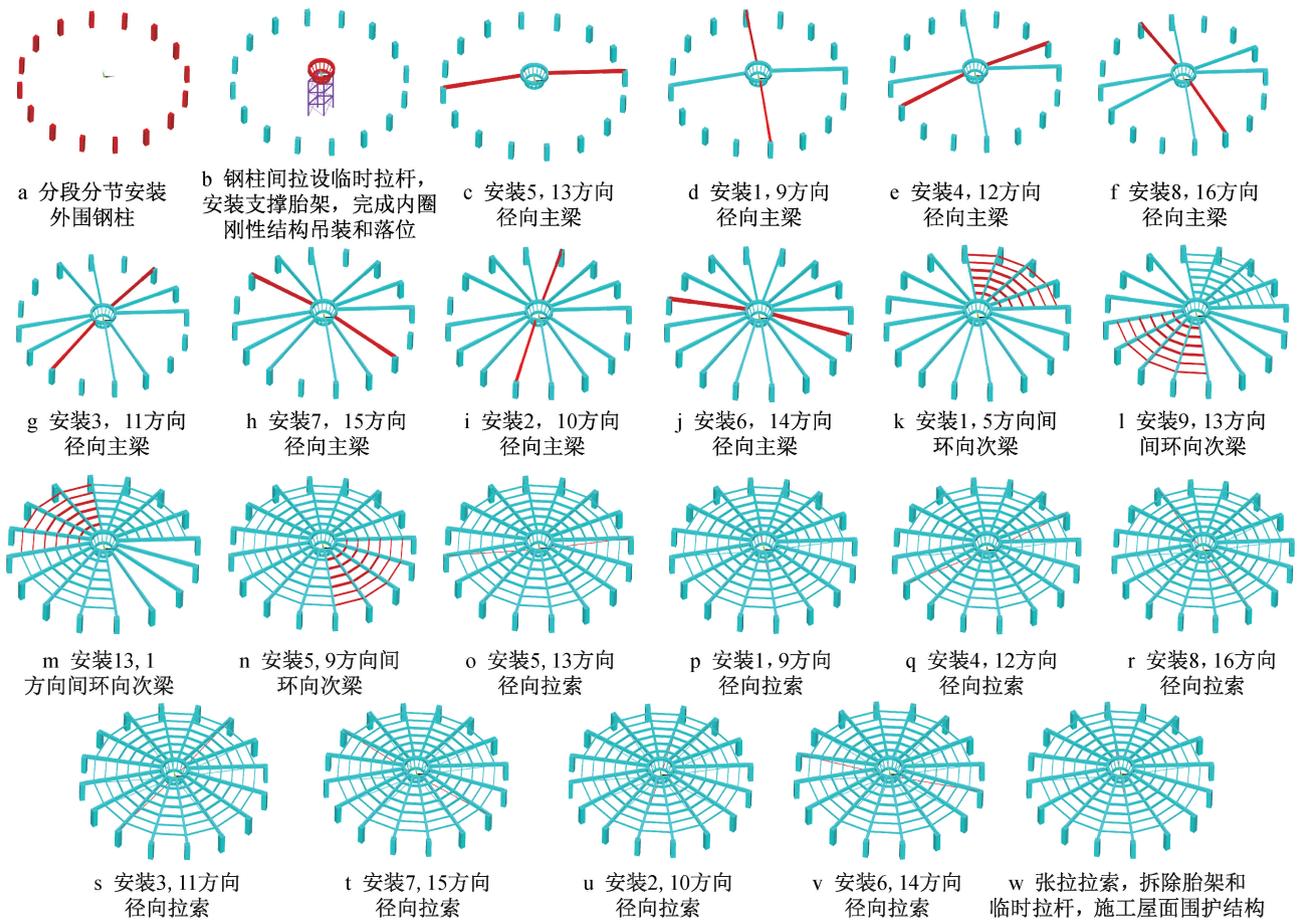


图5 施工步骤

Fig. 5 Construction steps

施工方法,可划分为23个施工步骤,如图5所示。

3 施工过程数值模拟

在张拉过程中,结构平衡状态^[8-9]定义为:①放样态。无自重、无荷载、未施加预应力时的结构状态。②初始态。预应力拉索张拉完成后,整体结构在自重和预应力共同作用下的状态。③荷载态。预应力拉索张拉完成后,同时考虑结构自重和外荷载作用下的结构状态。

针对弦支网壳结构,施工过程中直接张拉的索杆为主动张拉单元,其他单元(含网壳中的杆件)为被动张拉单元。根据文献[9]的方法求解主动张拉单元零状态时应施加的初始应变 ε^* (j 为预应力拉索数量), $\varepsilon^* = \{\varepsilon_1^*, \varepsilon_2^*, \dots, \varepsilon_{j-1}^*, \varepsilon_j^*\}$ 。

3.1 有限元分析模型

为评价肋环型弦支球面网壳结构施工过程力学性能,采用ANSYS建立其精细化有限元分析模型^[10],如图5w所示。

有限元分析模型同时考虑结构几何非线性与材料非线性。钢材弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比取0.3,密度为 7850 kg/m^3 ,Q355钢材屈服强度

为 355 MPa ,假定钢材采用理想弹塑性本构模型(屈服后刚度比为0),服从随动强化滞回规则。

外周劲性钢柱、径向主梁、环向次梁、内圈刚性结构采用beam188单元模拟,划分为3段;下部拉索采用link10单元模拟,划分为1段,通过施加初应变实现预应力的施加;支撑胎架采用link8单元模拟,划分为1段。结构恒荷载、活荷载、风荷载等效为节点荷载,施工过程中的动力放大系数取 $1.3^{[11]}$ 。

在ANSYS各类单元中,beam188^[12]为三维二次有限应变单元。基于铁摩辛柯梁理论,考虑剪切变形影响,节点默认具有6个自由度,通过参数定义考虑梁翘曲影响。

3.2 成型过程中结构受力状态

不同施工步骤下结构最大位移和最大等效应力如图6所示,关键施工步骤下结构位移如图7所示。

1)由图6可知,结构最大位移在 4 mm 以内,最大等效应力在 15 MPa 以内,最大等效应力增长趋势与结构最大位移增长趋势一致,且构件应力比 < 0.05 ,结构安全。

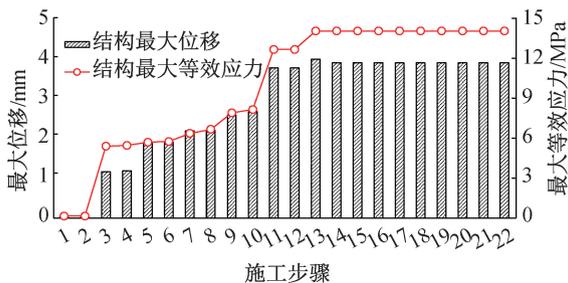


图 6 不同施工步骤下结构最大位移及最大等效应力
Fig. 6 The maximum displacement and maximum equivalent stress of structure under different construction steps

2) 径向主梁施工前,内圈刚性结构由胎架支承,未成型状态下结构位移极小 (<0.1mm);径向主梁与环向次梁施工完成后,结构最大位移集中于径向主梁,且在 4mm 以内,结构安全。

3.3 成型后结构受力状态

以结构内圈上环梁与 16 根径向主梁相交的节点作为变形观测点。当完成拉索张拉、支撑胎架和临时拉杆拆除、屋面围护结构施工后,结构成型状态下 16 个变形观测点竖向位移和 16 道拉索应力比如图 8 所示。

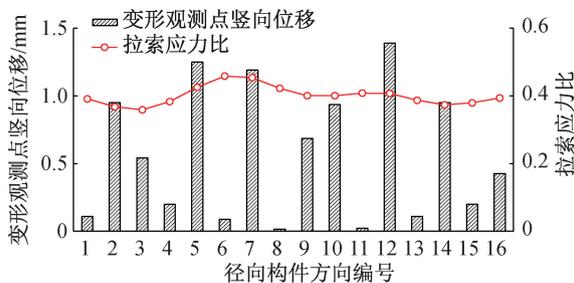


图 8 成型状态下结构位移和拉索应力比
Fig. 8 Displacement and stress ratio of cables in the forming state

在成型状态下,结构变形观测点最大竖向位移在 1.5mm 以内,预应力拉索张拉力能满足结构形态需要与建筑要求。预应力拉索应力比在 0.5 以内,具有较高安全储备。

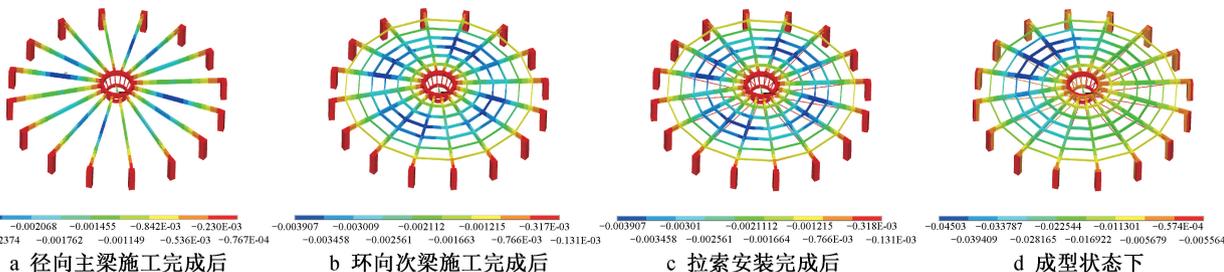


图 7 关键施工步骤下结构位移(单位:m)
Fig. 7 Structural displacement under main construction steps(unit:m)

图 7d 为在成型状态下结构位移。在不均匀荷载作用下,结构最大挠度(45.0mm)集中于径向主梁,符合规范限值的要求^[13]。综上,在成型状态下结构安全。

4 异形节点承载力分析

内圈下环梁为不规则梯形截面,沿 16 个方向均设置耳板,并与钢拉索相连。采用 ANSYS 软件建立节点有限元分析模型(见图 9),以 shell181 单元模拟钢板件。

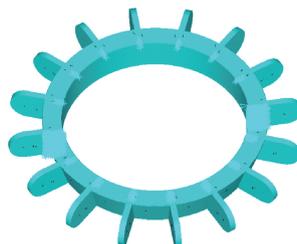


图 9 异形节点
Fig. 9 Irregular joint

4.1 节点分析工况

根据对称性,取半结构进行计算。考虑两种边界条件,如图 10 所示。

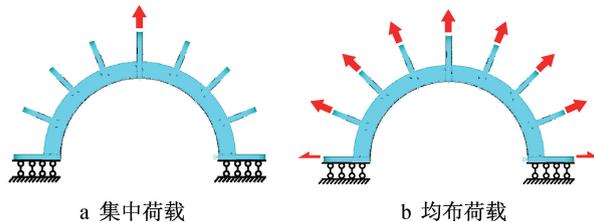


图 10 两类边界条件
Fig. 10 Two types of boundary conditions

1) 集中荷载。结构在不均匀荷载作用下,内圈下环梁所受拉力不均匀。通过对半结构中央的单块耳板施加集中力,模拟该工况,如图 10a 所示。

2) 均布荷载。结构在均布荷载作用下,拉索内力相同。通过对半结构各耳板施加相同径向集中力,模拟该工况,如图 10b 所示。

按设计要求,在所有耳板两侧 100mm 位置布置

加劲肋(厚 30mm),如图 11 所示。为评估加劲肋对节点承载力的影响,考虑设置加劲肋及不设置加劲肋两种情况。

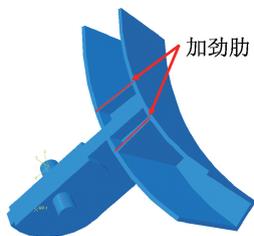


图 11 加劲肋位置示意

Fig. 11 Location of stiffening ribs

综上,计算分为 4 种工况:集中荷载下布置加劲肋、均布荷载下布置加劲肋、集中荷载下不设加劲肋、均布荷载下不设加劲肋。

4.2 节点分析结果

以半结构中央耳板 y 向位移和外荷载作用力为观测指标,4 种工况下荷载-位移关系曲线如图 12 所示。

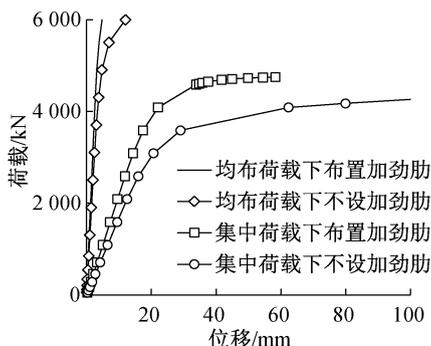


图 12 节点分析结果

Fig. 12 Analysis results of joints

由计算结果可知:

1)4 种工况下节点屈服承载力均>2 000kN,节点力学性能满足设计要求,节点承载力安全储备较高。

2)在均布荷载作用下,结构受力均匀,塑性区域分布较均匀,节点承载力显著高于集中荷载工况。

3)在均布荷载作用下,结构受力均匀,各板件以受拉为主。节点刚度显著高于集中荷载工况。

4)设置加劲肋可显著提高节点刚度和承载力。以集中荷载工况为例,设置加劲肋后,节点刚度提高了 23.5%,承载力提高了 24.5%。

4 种工况下节点进入塑性变形时对应的等效应力如图 13 所示。可知,加劲肋能显著抑制节点塑性发展范围和深度,对于保障结构承载力的正常发挥具有积极作用。

5 结语

针对某肋环型弦支球面网壳结构施工过程、成型状态和节点承载性能进行分析,结论如下。

1)采用对称施工方法,能保证结构在施工过程中具有较高安全储备。最大施工位移在 4mm 以内,构件应力比<0.05。

2)预应力拉索张力满足结构形态需要与建筑要求。在成型状态下,结构变形观测点最大竖向位移在 1.5mm 以内,预应力拉索应力比在 0.5 以内,具有较高安全储备。

3)内圈下环梁与预应力拉索连接节点满足设计需求,节点承载力安全储备较高。耳板两侧设置加劲肋,可显著提高节点刚度和承载力,抑制节点塑性发展范围和深度。

参考文献:

[1] 董石麟,赵阳. 论空间结构的形式和分类 [J]. 土木工程学报, 2004,37(1): 7-12.
DONG S L, ZHAO Y. On the form and classification of spatial structures [J]. China civil engineering journal, 2004,37(1): 7-12.

[2] 王慧芳,朱博莉,马晓晖,等. 单层网壳屋盖整体滑移施工关键技术 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(2): 15-21.
WANG H F, ZHU B L, MA X H, et al. Key technology of integral sliding construction of single-layer reticulated shell roof [J]. Construction technology,2024,53(2): 15-21.

[3] 伍锦鹏,马晓晖,侯彦果,等. 超大面积单层网壳结构滑移施工桅杆-斜拉索加强方案研究 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(2): 27-31,86.
WU J P, MA X H, HOU Y G, et al. Research on strengthening

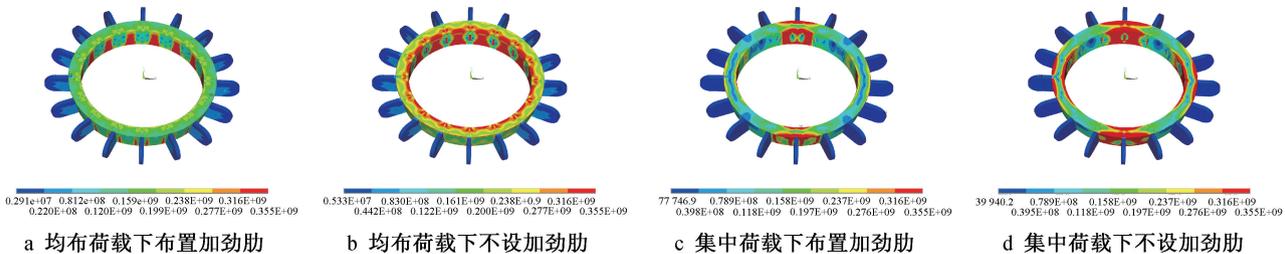


图 13 屈服状态下等效应力云图(单位:Pa)

Fig. 13 Equivalent stress in yield state(unit:Pa)

- scheme of mast-cable for sliding construction of super-large area single-layer reticulated shell structure [J]. Construction technology, 2024, 53(2): 27-31, 86.
- [4] 葛家琪, 王树, 梁海彤, 等. 2008 奥运会羽毛球馆新型弦支穹顶预应力大跨度钢结构设计研究[J]. 建筑结构学报, 2007(6): 10-21, 51.
GE J Q, WANG S, LIANG H T, et al. Design and research on prestressed large-span steel structure of new suspen-dome in 2008 Olympic Badminton Gymnasium [J]. Journal of building structures, 2007(6): 10-21, 51.
- [5] 张国军, 葛家琪, 秦杰, 等. 2008 奥运会羽毛球馆弦支穹顶预应力张拉模拟施工过程分析研究[J]. 建筑结构学报, 2007(6): 31-38.
ZHANG G J, GE J Q, QIN J, et al. Study on construction process of prestressed tension simulation of suspen-dome in 2008 Olympic Badminton Gymnasium [J]. Journal of building structures, 2007(6): 31-38.
- [6] 李志强, 张志宏, 袁行飞, 等. 济南奥体中心弦支穹顶结构施工张拉分析[J]. 空间结构, 2008, 14(4): 14-20.
LI Z Q, ZHANG Z H, YUAN X F, et al. Construction tension analysis of suspen-dome structure of Jinan Olympic Sports Center[J]. Spatial structures, 2008, 14(4): 14-20.
- [7] 支家强, 陈志华, 金海, 等. 天津体育中心自行车馆施工监测技术[J]. 施工技术, 2015, 44(8): 45-48.
ZHI J Q, CHEN Z H, JIN H, et al. Construction monitoring technology of Tianjin Sports Center bicycle pavilion [J]. Construction technology, 2015, 44(8): 45-48.
- [8] 郭佳民, 董石麟. 弦支穹顶施工张拉的理论分析与试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(2): 65-71.
GUO J M, DONG S L. Theoretical analysis and experimental study on construction tension of suspen-dome [J]. China civil engineering journal, 2011, 44(2): 65-71.
- [9] 郭佳民, 董石麟, 袁行飞. 弦支穹顶结构的形态分析问题及其实用分析方法[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 1-7.
GUO J M, DONG S L, YUAN X F. Shape analysis of suspen-dome structures and its practical analysis method[J]. China civil engineering journal, 2008, 41(12): 1-7.
- [10] 张文津, 王康, 刘贵文, 等. 大跨度钢屋盖辐式索桁架结构施工方法与数值模拟[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(8): 8-12.
- [11] ZHANG W J, WANG K, LIU G W, et al. Construction method and numerical simulation of large-span steel roof spoke cable truss structure [J]. Construction technology, 2024, 53(8): 8-12.
- [11] 崔晓强, 郭彦林, 叶可明. 大跨度钢结构施工过程的结构分析方法研究[J]. 工程力学, 2006(5): 83-88.
CUI X Q, GUO Y L, YE K M. Research on structural analysis method of large-span steel structure construction process [J]. Engineering mechanics, 2006(5): 83-88.
- [12] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
WANG X M. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [13] 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 specification for space frame structures: JGJ 7—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.