不规则椭圆形弦支穹顶钢屋盖结构设计与分析

黎 玲[1],王红军[1,2],汤明生[1*],晏 伟[3],肖少文[1]
(1.中信建筑设计研究总院有限公司,武汉 430014;2.同济大学 土木工程学院,上海 200092;
3.湖北省电力规划设计研究院有限公司,武汉 430040)

摘 要: 赤壁市体育中心体育馆钢屋盖为大跨度空间结构,平面投影呈椭圆形,整体跨度为137.8 m×97.6 m,由内外两圈钢骨混凝土柱支撑。根据柱的位置将屋盖划分为内场与外场两大区域:内场钢屋盖采用不规则椭圆形弦支穹顶结构,其平面投影跨度为80.7 m×67.2 m;外场钢屋盖主体为单层网壳结构,局部大跨度区域采用张弦梁结构,最大跨度达33.8 m。为保障结构设计合理,本文采用Midas Gen软件对钢屋盖开展杆件应力分析、模态分析、温度作用分析、屈曲分析、变形分析及施工模拟分析。计算结果表明,该钢屋盖各项指标均满足现行规范要求。文中还详细介绍了预应力索的选型与受力分析、计算模型优化过程及关键节点构造做法,相关设计思路与技术措施可为同类工程提供参考。

关键词: 体育馆;弦支穹顶;单层网壳;张弦梁;施工模拟分析;节点构造;预应力索
中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671－9379(2026)08－0094－10
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20250108002

Structural Design and Analysis of an Irregular Elliptical Suspen-Dome Steel Roof

LI Ling[1], *WANG Hongjun*[1,2], *TANG Mingsheng*[1*], *YAN Wei*[3], *XIAO Shaowen*[1]
(1. CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430014, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Hubei Electric Power Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430040, China)
*Corresponding author: tang_mingsheng@outlook.com

Abstract: The steel roof of the Chibi Sports Center Gymnasium is a large-span spatial structure. Its planar projection is elliptical, with a span of 137.8 m × 97.6 m, and it is supported by inner and outer rings of steel-reinforced concrete columns. According to the column positions, the steel roof is divided into inner and outer fields. The steel roof of the inner field adopts a suspen-dome structure with an irregular elliptical plan projection and a span of 80.7 m × 67.2 m. The steel roof of the outer field adopts a single-layer latticed shell structure, and a beam-string structure is used in the local large-span region, with a maximum span of 33.8 m. To ensure the rationality of the structural design of the steel roof, the Midas Gen software was used to conduct member stress analysis, modal analysis , temperature effect analysis, buckling analysis, deformation analysis and construction simulation analysis on the steel roof. The calculation results show that all structural indicators of the steel roof meet code requirements. This paper also elaborately introduces the selection and analysis of prestressed cables, the adjustment process of calculation model, and the key joint configurations. The design methods and measures adopted in this project can serve as a reference for

收稿日期:2025-01-08
作者简介:
黎 玲(1987—),女,硕士,高级工程师,主要从事复杂建筑结构设计方面的工作。E-mail: liling1@citic.com。
通信作者:
汤明生(1999—),男,硕士,助理工程师,主要从事建筑结构设计方面的工作。E-mail: tang_mingsheng@outlook.com。

similar engineering projects.

Keywords: gymnasium; suspen-dome; single-layer latticed shell; beam-string; construction simulation analysis; joint configuration; prestress cable

在国内体育建筑领域，体育馆屋盖结构形式日趋多元，主流类型包括薄壳结构、网架结构、网壳结构、膜结构与张拉结构[1]。薄壳结构的理论研究与工程应用始于上世纪50年代，受施工难度限制，该形式逐步退出体育馆屋盖的应用范畴[2]。同期，网架结构开始普及，首都体育馆是其代表性工程。凭借良好的抗震性能与便捷的施工优势，网架结构在后续体育馆建设中得到广泛应用并沿用至今[3]。但随着建筑功能日趋复杂、建筑造型要求不断提升，网架结构造型单一的短板逐渐凸显，难以适配多样化的设计需求[4]，这种市场需求的变化极大促进了网壳结构、膜结构及张拉结构的快速发展。网壳结构的加工制作体系与网架相近，因此得到快速推广，在大跨度建筑结构选型中占据重要地位。我国膜结构工程应用始于上世纪90年代，国家体育场、国家游泳中心是国内极具代表性的膜结构体育建筑。但受材料特性制约，早期建成的膜结构体育场馆近些年都出现了不同程度的损坏；尽管国产膜材料技术已实现从无到有的突破，但材料耐久性仍是现阶段膜结构发展的主要短板[5]。

张拉结构可细分为悬索结构、张弦梁结构及弦支穹顶结构三类[6]。其中弦支穹顶与张弦梁结构凭借合理的结构体系、高效的传力路径与优美的建筑形态，成为当前大跨度体育馆屋盖的主流应用形式[7-8]。纵观国内已建成的大跨度体育馆屋盖工程，多数项目仅单独采用形态规则的弦支穹顶或张弦梁结构，不规则弦支穹顶结构与张弦梁结构或其他结构组合应用的工程案例较少，一定程度上制约了建筑功能的使用与造型设计的创新。基于此，本文以赤壁市体育中心体育馆为依托，介绍了一种不规则椭圆形弦支穹顶结构和单层网壳结构（局部大跨度采用张弦梁结构）融合运用的钢屋盖结构设计与分析，以期为大跨度体育馆屋盖工程提供优化设计思路，兼顾建筑功能与造型需求。

1　工程概况

赤壁市体育中心位于赤壁市东部，赤壁大道与蒲圻大道交汇处，总用地面积约36.2万m^2。整体规划为“一场两馆”，包括15 000座的体育场、5 000座的体育馆及1 000座的游泳馆[9]，建筑效果如图1所示。

体育场与体育馆已于2021年投入使用，建筑鸟瞰图如图2所示，其中体育场建筑面积为20 676 m^2，地上4层，建筑高度为36.0 m，主体采用混凝土框架结构，屋盖采用悬挑空间桁架网格结构；体育馆建筑面积为19 020 m^2，地上3层，建筑高度为23.9 m，主体采用混凝土框架结构，屋盖采用弦支穹顶结构和单层网壳结构（局部大跨度采用张弦梁结构）。本文主要介绍体育馆钢屋盖结构设计与分析。

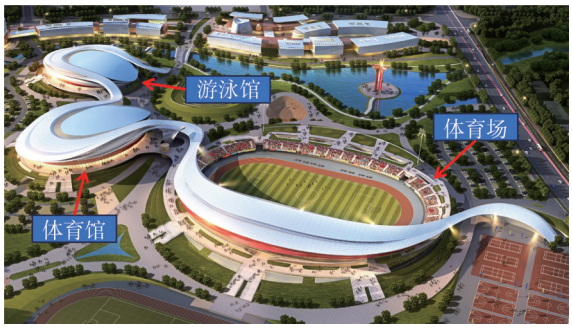


图1　赤壁体育中心建筑效果图

Fig. 1　Architectural rendering of Chibi Sports Center

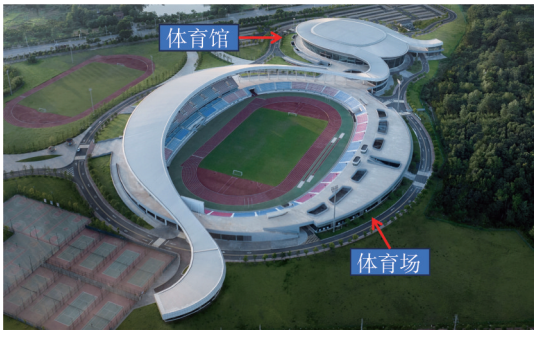


图2　赤壁体育中心鸟瞰图

Fig. 2　Aerial view of Chibi Sports Center

2　钢屋盖结构形式

体育馆钢屋盖为大跨度空间结构，其平面投影为椭圆形，跨度为137.8 m×97.6 m，由内、外两圈钢骨混凝土柱支撑，其中外圈39根、内圈32根，根据柱的位置将钢屋盖划分为内场和外场。内场钢屋盖采用不规则椭圆形弦支穹顶结构；外场钢屋盖采用单层网壳结构，局部大跨度采用张弦梁结构。结构分区如图3所示。

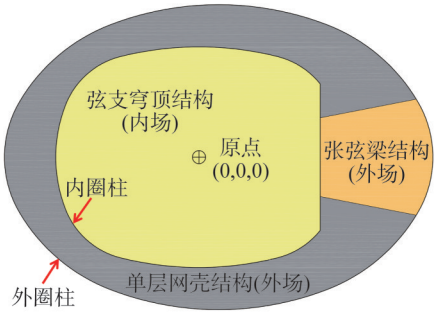


图3　钢屋盖结构分区图

Fig. 3　Structural subdivision of steel roof

钢屋盖结构布置如图4所示，图4h)中所示弦支穹顶区域红色数字1、2、3分别代表弦支穹顶环向索1、2、3，弦支穹顶区域黑色数字1、2、3分别代表弦支穹顶径向索1、2、3，张弦梁区域红色数字1、2、3分别代表张弦梁索1、2、3。内场区域采用不规则椭圆形弦支穹顶结构，南北方向对称、东西方向不对称，短轴方向东侧呈直线形，跨度为80.7 m×67.2 m，中心矢高约4.9 m，长轴矢跨比为1/16.4，短轴矢跨比为1/13.7。上弦网壳由1圈环向梁、2圈环桁架、5圈环向杆和32组径向杆组成。杆件采用Q345B热轧无缝钢管，环向梁截面尺寸为D560 mm×16 mm，环向杆截面尺寸为D245 mm×10 mm，径向杆截面尺寸为D500 mm×13 mm～D560 mm×16 mm；其下弦索撑结构由3圈环向索、3圈径向索和96根受压撑杆组成。环向索和径向索采用1 670级高钒镀层钢绞线，环向索截面尺寸为D44 mm～D100 mm，径向索截面尺寸为D20 mm～ D60 mm。受压撑杆采用Q345B热轧无缝钢管，截面尺寸为D140 mm×8 mm。环桁架三维透视示意图如图5所示，其主要作用是将屋面荷载传递到混凝土结构，同时有效分散屋面结构产生的水平推力，增加结构的整体刚度[10]。

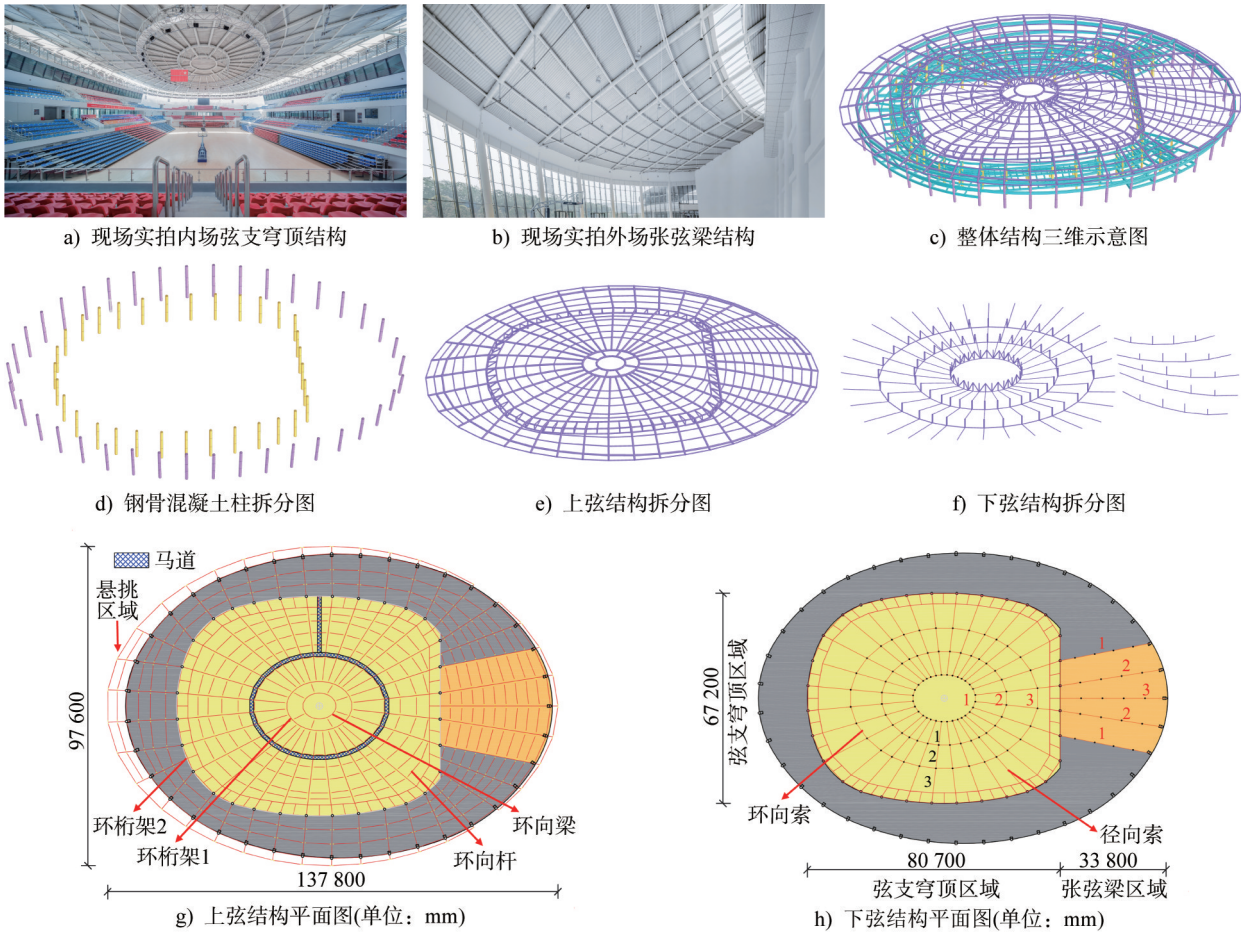
外场区域采用单层网壳结构，图4g)橘色区域局部大跨度采用张弦梁结构，最大跨度为33.8 m，其上弦网壳结构由环向杆和径向杆组成。杆件采用Q345B热轧无缝钢管，径向杆截面尺寸为D500 mm×13 mm～D560 mm×16 mm，环向杆截面尺寸为D245 mm×10 mm～D325 mm×10 mm。从图4g)可以看出，钢屋盖外场区域外沿还存在一段悬挑区域，最大悬挑长度约5.7 m，悬挑部分径向杆由外场网壳径向杆延伸而成，环向杆采用Q345B热轧无缝钢管，截面尺寸为D325 mm×10 mm。张弦梁区域下弦索撑结构由5道张弦梁索和20根受压撑杆组成。张弦梁索采用1 670级高钒镀层钢绞线，截面尺寸为D60 mm。受压撑杆采用Q345B热轧无缝钢管，截面尺寸为D140 mm×8 mm。

3 钢屋盖结构分析

3.1 设计标准与荷载作用

体育馆抗震设防类别为重点设防类[11]，设计基准期为50年，设计使用年限为50年。钢屋盖结构安全等级为一级，抗震等级为三级。

钢屋盖自重根据Midas Gen软件自动计算。钢屋盖荷



a) 现场实拍内场弦支穹顶结构　b) 现场实拍外场张弦梁结构　c) 整体结构三维示意图

d) 钢骨混凝土柱拆分图　e) 上弦结构拆分图　f) 下弦结构拆分图

g) 上弦结构平面图(单位：mm)　h) 下弦结构平面图(单位：mm)

图4 钢屋盖结构布置图

Fig. 4 Layout of steel roof

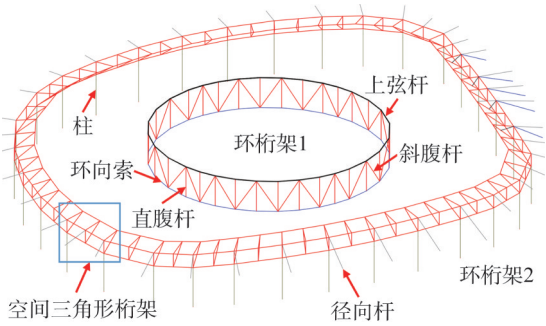


图5　环桁架三维透视示意图

Fig. 5　Three-dimensional perspective diagram of ring truss

载依据我国现行规范《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)[12]确定。屋面活荷载取0.50 kN·m^{-2};屋面恒荷载结合建筑面层、设备及使用功能综合确定;马道和悬挂荷载按实际位置采用线荷载或点荷载施加;基本风压取0.45 kN·m^{-2}(100年重现期),地面粗糙度为C类;基本雪压取0.4 kN·m^{-2}(100年重现期);最低基本气温为−3 ℃,最高基本气温为37 ℃。控制合龙温度为15～25 ℃,最大正温差22 ℃(取30 ℃),最大负温差−28 ℃(取−30 ℃);依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)[13],钢屋盖抗震设防烈度为6度,设计地震分组为第一组,设计基本地震加速度为0.05 g,场地类别为Ⅱ类,特征周期为0.35 s,多遇地震作用下地震影响系数最大值为0.04。

3.2　结构分析

为保证钢屋盖结构设计的合理性,采用Midas Gen软件对钢屋盖进行了杆件应力分析、模态分析、温度作用分析、屈曲分析及变形分析,计算模型如图6所示。其中网壳杆件采用梁单元模拟,撑杆采用桁架单元模拟,索采用受拉单元模拟。

3.2.1　杆件应力分析

钢屋盖设计采用的荷载工况组合形式共计102种,其中荷载考虑自重、恒荷载、活荷载、雪荷载、风荷载、地震作用及温度作用,限于篇幅,本文不做具体介绍。钢屋盖各杆件应力比分布如图7所示。杆件应力比峰值为0.91,满足我国现行规范《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)[14]规定。绝大部分杆件应力比小于0.65;少部分杆件应力比较大,具体位置详见图8红色杆件。

3.2.2　模态分析

钢屋盖前3阶振型模态图如图9所示。可以看出前3阶振型无扭转振动,其中第1、3阶振型为竖向振动,第2阶振型为水平振动,表明钢屋盖整体抗扭刚度较好,结构布置较为合理。具体而言,第1阶振型为竖向振动,表明钢屋盖的竖向刚度较弱;第2阶振型内场区域出现了较为明显的反对称振动,与弦支穹顶结构的动力响应特性相符[15]。

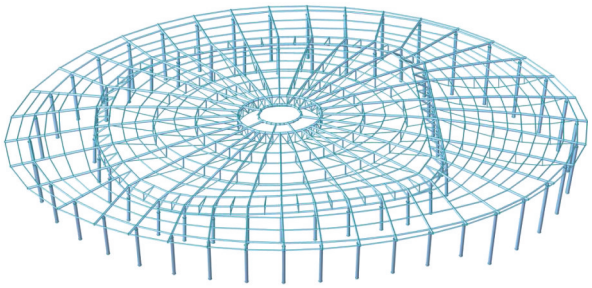


图6　钢屋盖计算模型

Fig. 6　Steel roof calculation model

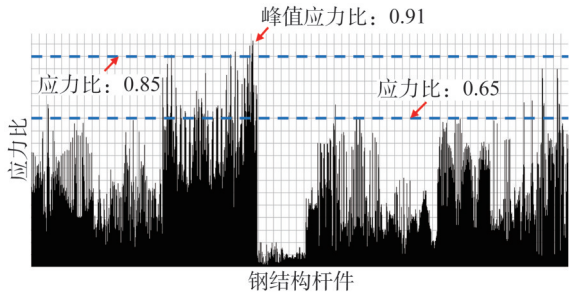


图7　钢屋盖各杆件应力比分布

Fig. 7　Stress ratio distribution of steel roof members

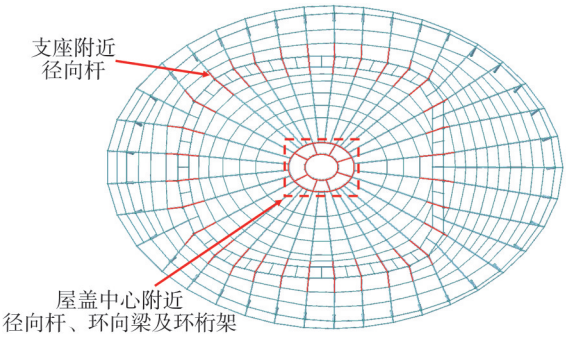


图8　钢屋面应力比较大的位置

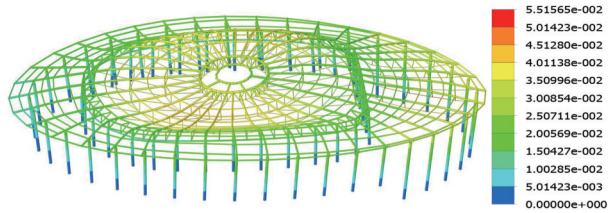
Fig. 8　Positions with relatively high stress ratio of steel roof

3.2.3　温度作用分析

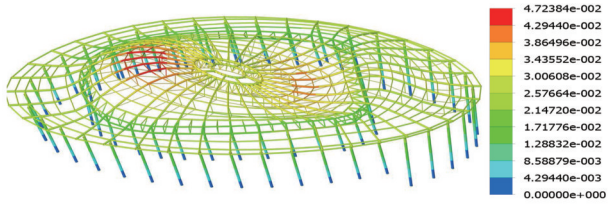
钢屋盖为大跨度空间结构,其长轴跨度为137.8 m,对温度作用具有一定的敏感性,因此需要考虑温度作用对其的不利影响。体育馆钢屋盖温度作用按温差±30 ℃考虑。钢屋盖各杆件在恒荷载作用下、恒荷载+温度作用下应力比分布如图10所示。结合图7可以看出,温度作用的影响较小。

3.2.4　屈曲分析

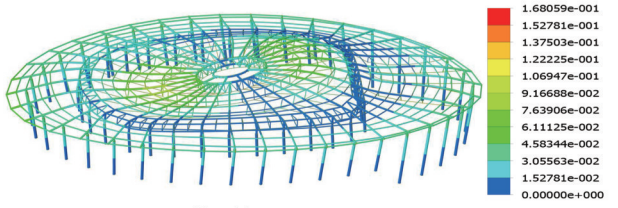
体育馆屈曲分析分两阶段进行[16],第一阶段为线性



a) 第1阶振型T_1=0.709 8 s



b) 第2阶振型T_2=0.688 5 s

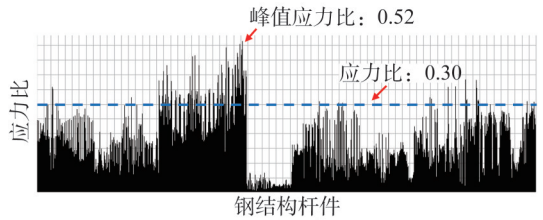


c) 第3阶振型T_3=0.460 7 s

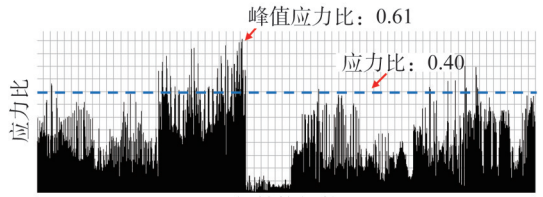
注：图中右侧彩色方格对应的数字无量纲，其代表在该阶振型下，结构各节点振动幅度的相对比值。

图9 钢屋盖结构自振模态

Fig. 9 Natural vibration modes of steel roof



a) 恒荷载作用



b) 恒荷载+温度作用

图10 钢屋盖各杆件不同荷载工况下应力比分布

Fig. 10 Stress ratio distributions of steel roof under different load cases

屈曲分析；第二阶段为非线性屈曲分析。选取恒荷载＋活荷载组合作用作为线性屈曲分析的荷载工况，分析得到钢屋盖前6阶屈曲模态的稳定系数如表1所示。

由于线性屈曲分析并未考虑结构初始缺陷等因素，因此只能初步评估钢屋盖的整体稳定承载力。若要全面评估钢屋盖的整体稳定性能，还需对钢屋盖进行非线性屈曲分析。对于初始几何缺陷，我国现行规范《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)[17]规定，初始几何缺陷分布可采用结构的最低阶屈曲模态，其缺陷最大计算值可按网壳跨度的1/300取值，即67 200/300＝224 mm。钢屋盖的第1阶屈曲模态如图11所示。将变形最大点定义为位移控制点，其荷载-挠度曲线如图12所示。图中所示区段内，曲线没有下降趋势，表明钢屋盖稳定系数不低于图中所示最大荷载因子。综上，线性屈曲分析和非线性屈曲分析的稳定系数均满足我国现行规范JGJ 7—2010[17]规定的稳定系数不小于4.2的要求，表明钢屋盖整体稳定性能良好。

表1 钢屋盖前6阶屈曲模态的稳定系数

Table 1 Buckling mode stability coefficient of the steel roof

屈曲模态	1	2	3	4	5	6
稳定系数	7.59	11.53	17.00	19.65	23.88	26.75

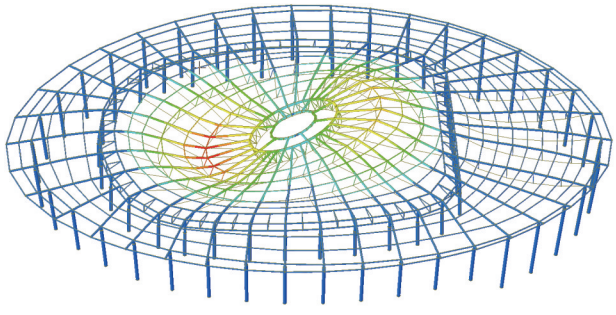


图11 钢屋盖第1阶屈曲模态

Fig. 11 The first-order buckling mode of the steel roof

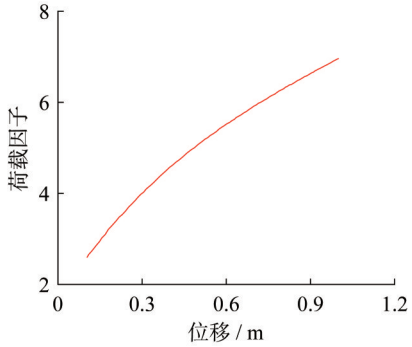


图12 位移控制点的荷载–挠度曲线

Fig. 12 Load-deflection curve of displacement control point

3.2.5 变形分析

我国现行规范JGJ 7—2010[17]规定，单层网壳结构在恒荷载和活荷载标准值作用下的最大挠度不宜超过短跨方向的1/400。对计算模型在恒荷载和活荷载作用下非线性分析的钢屋盖变形如图14f)所示。可以看出内场区

域弦支穹顶结构的最大挠度为 112 mm，为短跨方向跨度的 1/600，其中短跨方向跨度为 67.2 m；外场张弦梁结构的最大挠度为 51 mm，为跨度的 1/663，其中跨度为 33.8 m；单层网壳结构的最大挠度为 73 mm，为短跨方向跨度的 1/274，其中短跨方向跨度为 20.0 m。施工时对挠度较大区域的单层网壳结构预先起拱 40 mm，最终挠度为 33 mm，为短跨方向跨度的 1/606，以上结构挠度均满足规范要求。

3.3　设计关键问题分析

3.3.1　预应力索的选型与分析

在弦支穹顶结构和张弦梁结构的索撑体系中，索的初拉力是调控上部刚性体系内力与变形的核心因素。初拉力过小，无法有效改善上部结构受力与变形；初拉力过大，会导致上部网壳结构向上隆起，屋盖出现过大变形，甚至部分构件出现无法承载的内力。索初拉力的确定方法如下：施加初拉力后，在自重及屋面恒荷载作用下，钢屋盖挠度接近于零，最终确定的索初拉力见表 2，索位置详见图 4h）。

表 2　索的初拉力

Table 2　Initial tension force of cables

索部位	初拉力/kN
弦支穹顶环向索 1	767
弦支穹顶环向索 2	1 140
弦支穹顶环向索 3	2 680
张弦梁索 1	427
张弦梁索 2	344
张弦梁索 3	726

为保证索体系安全，索应满足以下条件：在不同荷载工况下，索始终保持受拉而不出现松弛，且最大索拉力不应超过其破断力的 50%。计算结果表明，不同荷载工况下，环向索、径向索及张弦梁索的安全系数均大于 2，满足设计要求，具体计算结果见表 3。

3.3.2　预应力索的优化调整

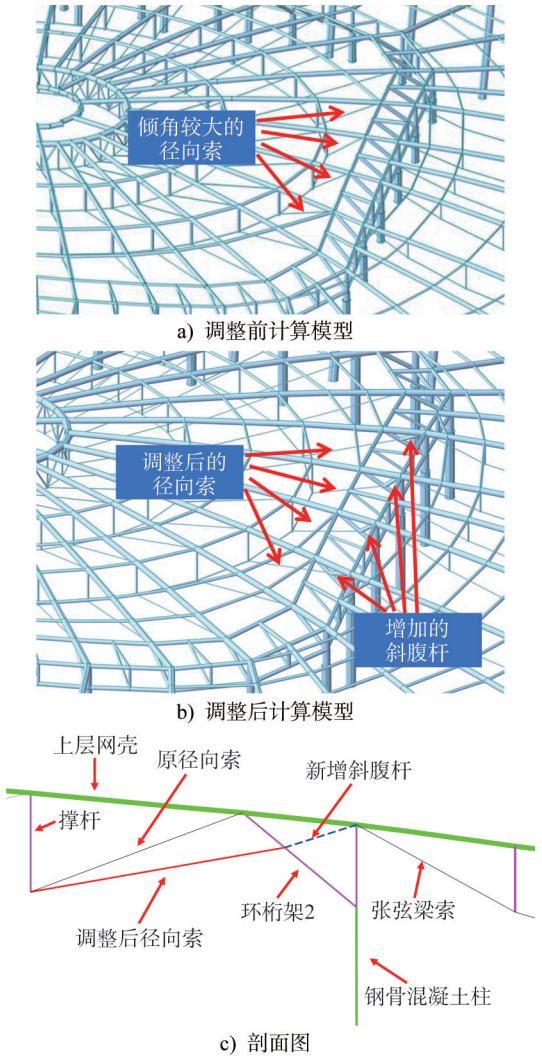
从图 5 可知，内场弦支穹顶屋盖为不规则椭圆形，南北方向对称、东西方向不对称，环桁架 2 靠近张弦梁结构一侧呈直线形，这种造型使得与环桁架 2 直线段区域连接的径向索倾角较大。这种不对称性、不规则性使得钢屋盖的水平自平衡体系的建立受到一定程度的影响，导致钢屋盖杆件及索受力不均匀，靠近环桁架 2 直线段区域的内场网壳明显上挠，对称区域网壳下挠。为改善钢屋盖受力不均匀与变形过大的问题，钢屋盖设计时以结构对称为原则对预应力索进行了如下优化调整：

表 3　索的安全系数

Table 3　Safety factor of cables

索部位	截面/mm	最大索拉力/kN	破断力/kN	安全系数
弦支穹顶环向索 1	D44	639	1 649	2.58
弦支穹顶环向索 2	D60	1 274	3 066	2.41
弦支穹顶环向索 3	D100	3 387	8 517	2.51
弦支穹顶径向索 1	D20	116	343	2.96
弦支穹顶径向索 2	D44	351	1 649	4.70
弦支穹顶径向索 3	D60	923	3 066	3.32
张弦梁索	D60	764	3 066	4.01

调整与环桁架 2 直线段区域相连的径向索倾角，尽量与其对称的径向索倾角一致；在环桁架 2 上增加斜腹杆，将索与环桁架的腹杆相连，计算模型调整过程如图 13 所示。



a）调整前计算模型

b）调整后计算模型

c）剖面图

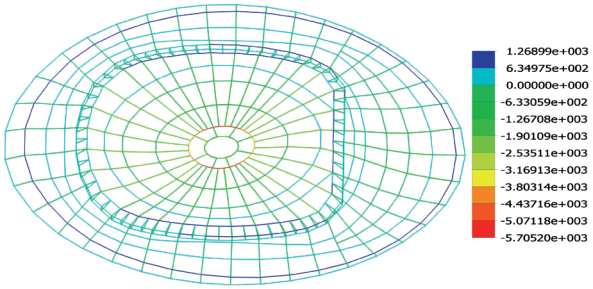
图 13　计算模型调整过程

Fig. 13　Process of calculation model adjustment

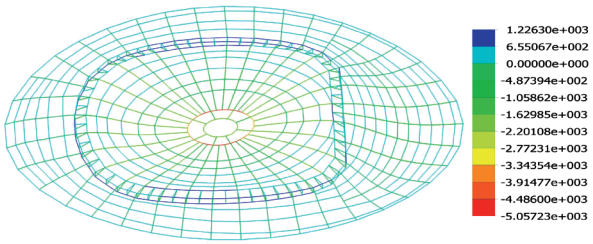
模型调整前后计算结果如图14所示。径向索倾角优化前，上弦网壳结构钢杆件最大拉、压力分别为1 269 kN、−5 705 kN，详见图14a)；下弦弦支穹顶结构环向索3西、东侧索拉力分别为2 265 kN、1 948 kN，详见图14c)；在恒荷载和活荷载作用下，钢屋盖的下挠量(详见图14e))为248 mm，上挠量(由模型提取)为143 mm，两者差值为391 mm。

径向索倾角优化后，上弦网壳结构钢杆件最大拉、压力分别为1 226 kN、−5 057 kN，详见图14b)；下弦弦支穹顶结构环向索3西、东侧索拉力分别为1 971 kN、1 976 kN，详见图14d)；在恒荷载和活荷载作用下，钢屋盖的下挠量(详见图14f))为112 mm，上挠量(由模型提取)为63 mm，两者差值为175 mm。

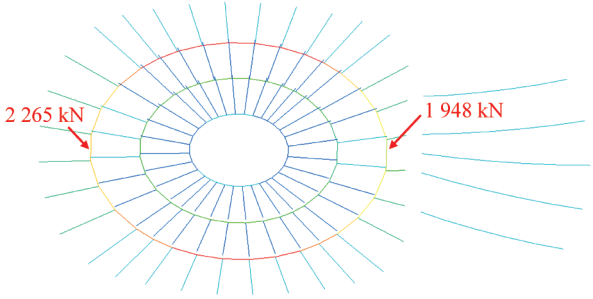
模型优化前后计算结果对比表明，针对不规则椭圆形弦支穹顶结构，按照“结构对称原则”调整预应力索的位置，上弦网壳结构钢杆件最大拉、压力均适当减小，下弦索尤其是弦支穹顶结构环向索拉力分布更为均匀，且有效改善了钢屋盖东、西两侧变形明显不对称的问题。



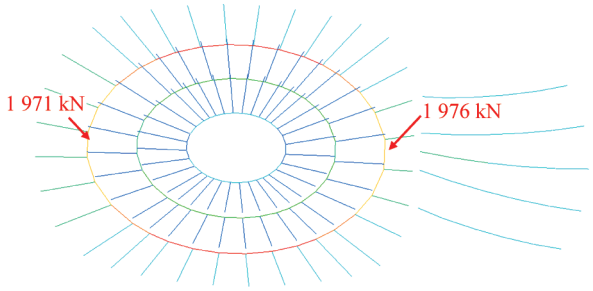
a) 模型调整前上弦网壳结构钢杆件轴力(单位：kN)



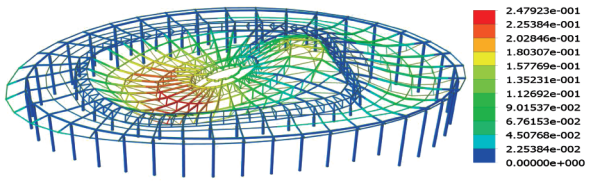
b) 模型调整后上弦网壳结构钢杆件轴力(单位：kN)



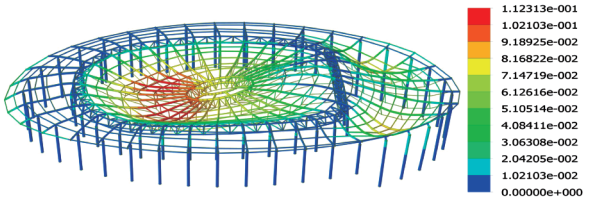
c) 模型调整前下弦索拉力



d) 模型调整后下弦索拉力



e) 模型调整前恒荷载+活荷载作用下钢屋盖变形(单位：m)



f) 模型调整后恒荷载+活荷载作用下钢屋盖变形(单位：m)

图14 计算模型调整前后计算结果

Fig. 14 Calculation results before and after adjustment of calculation model

4 施工模拟分析

4.1 施工方案

钢屋盖施工主要分为三个阶段：1) 钢屋盖施工前准备阶段；2) 钢屋盖吊装阶段；3) 预应力索张拉阶段。施工前准备阶段包括下部主体结构施工、材料进场及验收等工作。

钢屋盖主要分为单层网壳结构、撑杆结构及索结构三个部分。索结构在张拉前，单层网壳及撑杆结构无法形成稳定的受力体系，因此吊装方案采用“分段分批吊装＋胎架支撑”。吊装流程如下：

1) 搭设内场弦支穹顶区域及外场张弦梁区域的胎架支撑；

2) 以一个柱跨为单元同步吊装东、西两侧径向杆与环向杆，为减少高空拼装作业量，每个柱跨内环向杆与径向杆、径向杆与撑杆在地面拼装好再吊装；

3) 从东、西两侧分别向南、北两侧按柱跨逐步吊装径向杆和环向杆；

4) 钢屋盖吊装完毕后，开展索张拉作业；

5) 安装径向和环向马道，拆除胎架支撑。

限于篇幅，本文不做具体介绍。

弦支穹顶的索张拉一般有径向索张拉、环向索张拉及撑杆调节法三种方案，不同的张拉方案所采取的张拉工具、施工费用及制定的施工工期等各不相同。该工程弦支穹顶索张拉采取环向索张拉方案。在张拉环向索时，径向索为被动张拉。张拉遵循由外向内、分批分级的原则，逐步建立整体预应力，控制张拉阶段结构变形。张拉分级流程如下：

1）环向索3张拉至20%设计初拉力；

2）环向索3张拉至65%设计初拉力，同步张拉环向索2至20%设计初拉力；

3）环向索3张拉至100%设计初拉力，同步将环向索2张拉至65%设计初拉力、环向索1张拉至20%设计初拉力；

4）环向索2张拉至100%设计初拉力，同步将环向索1张拉至65%设计初拉力；

5）环向索1张拉至100%设计初拉力，张拉过程中同步完成径向索、索夹的安装就位；

6）内场环向索张拉的同时，同步分级张拉外场张弦梁索（分级比例同环向索：20%、65%、100%）；

7）全部索体张拉完成并静置观测后，拆除临时胎架支撑。

4.2　施工模拟计算

采用Midas Gen软件模拟索张拉的全部过程，具体分为7个步骤，见表4。各步骤计算结果见表5，其中步骤6、步骤7对应的钢屋盖变形如图15所示。可以看出，由于胎架支撑的作用，步骤1～6钢屋盖的最大位移较小，且没有明显的下挠和上挠，最大位移位于外场的张弦梁区域，其值为49.4 mm。拆除胎架支撑后，索结构和钢杆件发生内力重分布，变形随之发生改变，弦支穹顶结构靠近张弦梁区域出现反拱，位移较胎架支撑拆除前有较大变化。整个索结构在张拉过程中，索安全系数均大于2，钢杆件最大应力比均小于0.9，位移均小于规范限值，表明结构有较大安全储备。综上，施工方案合理可行，张拉过程满足安全要求。

5　节点构造

体育馆主要有四种典型节点，具体如下：

1）网壳节点：网壳杆件之间采用刚性连接，全部采用相贯焊接节点。

2）支座节点：内场弦支穹顶支承于内圈32根圆形钢骨混凝土柱顶，外场单层网壳与张弦梁支承于外圈39根圆形钢骨混凝土柱顶，如图16a）所示。支座节点采用平面内可转动的销轴连接，支座耳板与杆件耳板之间预留1 mm缝隙以释放弯矩；支座耳板、节点板、柱内型钢之间采用坡口全熔透焊接，耳板两侧设置加劲肋用以限制侧

表4　索张拉步骤

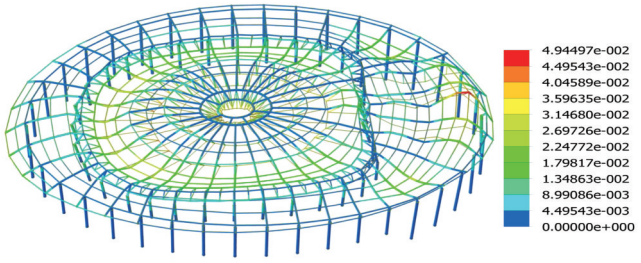
Table 4　Cable tension steps

步骤	施加预拉力/kN					
	环向索1	环向索2	环向索3	张弦梁索1	张弦梁索2	张弦梁索3
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	536	0	0	145
3	0	228	1 742	0	69	472
4	153	741	2 680	85	224	726
5	499	1 140	2 680	278	344	726
6	767	1 140	2 680	427	344	726
7	拆除支撑胎架					

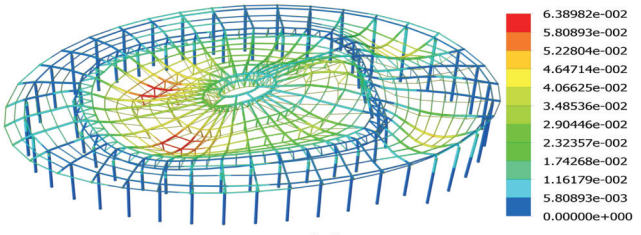
表5　各步骤模拟结果

Table 5　Simulation results of each step

步骤	最大索拉力/kN	索安全系数	钢杆件最大应力比	最大位移/mm
1	153	55.7	0.53	35.6
2	653	13.0	0.51	24.7
3	1 926	4.2	0.46	29.1
4	2 516	3.4	0.57	33.2
5	2 578	3.3	0.60	48.4
6	2 874	3.0	0.61	49.4
7	3 326	2.6	0.89	63.9



a）步骤6



b）步骤7

图15　部分步骤下钢屋盖变形（单位：m）

Fig. 15　Steel roof deformations under partial steps（unit：m）

向位移。销轴材质为42CrMo，耳板、连接板、加劲肋均采用Q345B钢。

3）撑杆上端节点：撑杆与上层网壳杆件连接形成的节点，此为网壳结构径向梁与环向梁交汇处，采用销轴连接，如图16b）所示。

4）撑杆下端节点：撑杆与下层预应力索连接形成的节点，此为径向索与环向索交汇处，采用销轴连接，如图16c）所示。

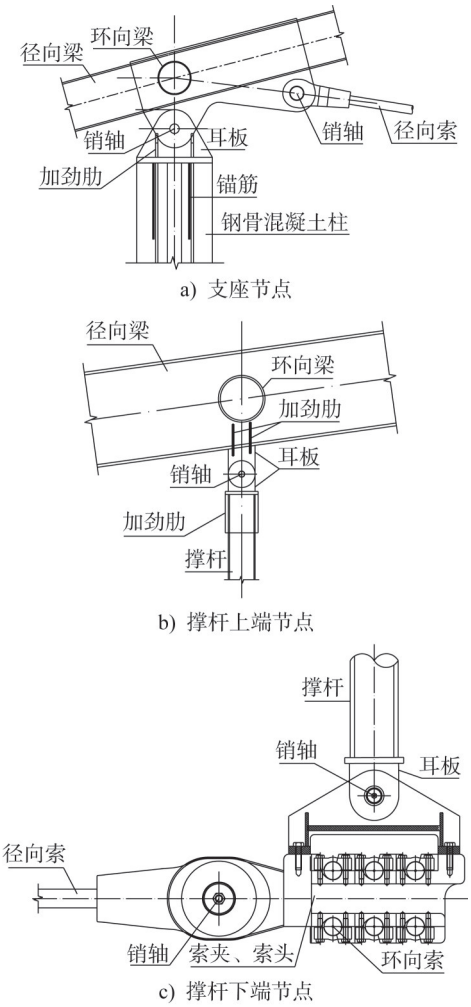


图16 关键节点构造

Fig. 16 Key joint configurations

节点设计过程如下（以支座节点为例）：首先从Midas Gen软件计算结果中提取支座反力，然后依据我国现行规范GB 50017—2017[14]给出的有关销轴连接的公式，对连接耳板进行抗拉、抗剪强度计算，对销轴进行承压、抗剪及抗弯强度计算，确定构件尺寸。最后采用ABAQUS软件对支座节点的销轴连接进行有限元分析验算，计算结果如图17所示，销轴连接的最大应力位于销轴附近，为189 MPa，小于强度设计值，满足规范设计要求，节点安全可靠。

从图16c）可以看出，环向索通过索夹与径向索连接，其中径向索通过销轴与索夹的耳板连接。若环向索与索夹之间产生滑移，将会引起较大的预应力损失，进而影响整个屋盖结构的安全和稳定，因此索夹的抗滑移性能对整个屋盖结构的安全和稳定至关重要，文献[18]介绍了该项目索夹的抗滑移性能试验与有限元分析，两者结果吻合良好，均满足设计要求的抗滑移性能，保证了索夹设计的安全性。

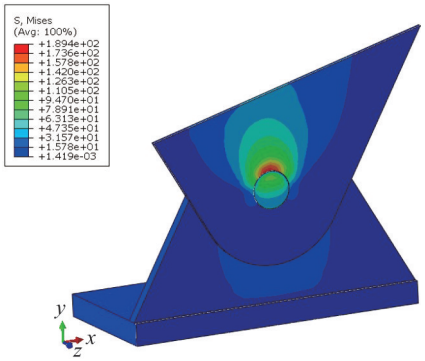


图17 有限元节点分析结果（单位：MPa）

Fig. 17 Finite element analysis results (unit: MPa)

6 结论

本文介绍了一种不规则椭圆形弦支穹顶结构和单层网壳结构（局部大跨度采用张弦梁结构）融合运用的钢屋盖结构的设计与分析过程，主要结论如下：

（1）详细阐述了组合式钢屋盖的结构形式与结构分析过程，计算结果表明钢屋盖各项指标均满足规范要求。

（2）针对不规则椭圆形弦支穹顶的受力与变形特点，按照“结构对称原则”优化预应力索布置与倾角，可有效解决索力分布不均、结构变形较大等问题，是此类异形弦支穹顶结构设计的有效技术手段。

（3）梳理了钢屋盖关键节点的构造形式与设计方法。以支座节点为例，介绍了销轴连接节点的设计过程。采用规范公式设计计算，然后利用有限元软件进行验算复核，可保证销轴类关键节点的安全可靠，可为同类大跨度钢结构节点设计提供参考。

参考文献：

[1] 沈世钊. 大跨空间结构的发展——回顾与展望[J]. 土木工程学报，1998，31(3)：5-14. DOI：10.15951/j.tmgcxb.1998.03.001.
SHEN Shizhao. Development of long-span structures: A review and prospect [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 5-14. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.1998.03.001. (in Chinese)

[2] 蓝天. 中国空间结构六十年[J]. 建筑结构，2009，39(9)：25-27，62. DOI：10.19701/j.jzjg.2009.09.003.

LAN Tian. Sixty years of spatial structures in China[J]. Building Structure, 2009, 39(9): 25-27, 62. DOI: 10.19701/j.jzjg.2009.09.003.(in Chinese)

[3] 刘锡良. 我国平板网架结构的发展现状[J]. 钢结构, 1994, 9(1): 13-20.
LIU Xiliang. Present situation in development of planar space grid structures in China[J]. Steel Construction, 1994, 9(1): 13-20.(in Chinese)

[4] 蓝天. 空间钢结构的应用与发展[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 2-8. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2001.04.001.
LAN Tian. Application and developments of steel spatial structures[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(4): 2-8. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2001.04.001.(in Chinese)

[5] 张其林. 膜结构在我国的应用回顾和未来发展[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 55-64. DOI:10.19701/j.jzjg.2019.19.007.
ZHANG Qilin. Application review and future development of membrane structures in China[J]. Building Structure, 2019, 49(19): 55-64. DOI: 10.19701/j. jzjg. 2019.19.007.(in Chinese)

[6] 刘锡良, 董石麟. 20年来中国空间结构形式创新[C]//第十届空间结构学术会议论文集. 北京:中国建材工业出版社, 2002.
LIU Xiliang, DONG Shilin. Innovation of spatial structure in China form over the past 20 years[C]//Proceedings of the 10th Academic Conference on Spatial Structures. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2002.(in Chinese)

[7] 陈志华. 张弦结构体系研究进展及发展展望[J]. 工业建筑, 2015, 45(8): 1-9, 52. DOI:10.13204/j.gyjz201508001.
CHEN Zhihua. Research progress and prospect of cable-supported structures [J]. Industrial Construction, 2015, 45(8): 1-9, 52. DOI: 10.13204/j. gyjz201508001.(in Chinese)

[8] 陈志华, 刘红波, 牛犇. 弦支穹顶结构的工程应用[J]. 工业建筑, 2010, 40(8): 42-48. DOI:10.13204/j.gyjz2010.08.018.
CHEN Zhihua, LIU Hongbo, NIU Ben. Application of suspen-dome structures in engineering [J]. Industrial Construction, 2010, 40(8): 42-48. DOI: 10.13204/j. gyjz2010.08.018.(in Chinese)

[9] 吴永超. 山水赤壁,凤舞龙盘——基于地域山水文化的赤壁市体育中心建筑设计[J]. 华中建筑, 2024, 42(7): 71-74. DOI:10.13942/j.cnki.hzjz.2024.07.007.
WU Yongchao. The natural landscape of Chibi, phoenix dancing with dragon: Design of Chibi City sports center based on regional natural landscape and culture[J]. Huazhong Architecture, 2024, 42(7): 71-74. DOI: 10.13942/j. cnki. hzjz.2024.07.007.(in Chinese)

[10] 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, 28(6): 10-21, 51. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2007.06.002.
GE Jiaqi, WANG Shu, LIANG Haitong, et al. Design and research of the large-span steel structure of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 10-21, 51. DOI: 10.14006/j. jzjgxb.2007.06.002.(in Chinese)

[11] GB 50223—2008 建筑工程抗震设防分类标准[S].
GB 50223—2008 Standard for classification of seismic protection of building constructions[S].(in Chinese)

[12] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S].(in Chinese)

[13] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S].(in Chinese)

[14] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S].(in Chinese)

[15] 陈进于, 区彤, 谭坚. 肇庆新区体育中心钢结构设计[J]. 建筑结构, 2017, 47(6): 12-18. DOI: 10.19701/j.jzjg.2017.06.003.
CHEN Jinyu, OU Tong, TAN Jian. Steel structure design of Zhaoqing new district sports center[J]. Building Structure, 2017, 47(6): 12-18. DOI: 10.19701/j.jzjg.2017.06.003.(in Chinese)

[16] 孟美莉, 吴兵, 傅学怡, 等. 第26届世界大学生运动会篮球馆弦支穹顶屋盖结构设计[J]. 建筑结构, 2011, 41(4): 24-28, 10. DOI:10.19701/j.jzjg.2011.04.005.
MENG Meili, WU Bing, FU Xueyi, et al. Structural design of suspend-dome structure of Pingshan Basketball Gymnasium for Universidad 2011 Shenzhen [J]. Building Structure, 2011, 41(4): 24-28, 10. DOI: 10.19701/j.jzjg.2011.04.005.(in Chinese)

[17] JGJ 7—2010 空间网格结构技术规程[S].
JGJ 7—2010 Technical specification for space frame structures[S].(in Chinese)

[18] BIONDINI F, FRANGOPOL D M. Life-cycle of structures and infrastructure systems[M]. London: CRC Press, 2023: 3554-3561.