

某综合教学实训基地屋盖弦支马鞍形网壳结构 分析与设计

闫翔宇^{1,2,3}, 郭凯旋¹, 王彬², 王丹妮², 杨艳¹, 陈志华¹, 于敬海², 张锡治²

(1 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2 天津大学建筑设计规划研究总院有限公司,

天津 300073; 3 天津理工大学海洋能源与智能建设研究院, 天津 300384)

摘要: 河北对外经贸职业学院多功能综合教学实训基地工程建筑造型独特,屋盖呈马鞍面,跨度大而矢跨比小。通过对三种现有屋盖结构方案的定性分析,提出采用弦支马鞍形网壳作为屋盖结构形式。采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立了结构分析模型,通过计算得到了各工况和组合下的杆件应力和结构变形;通过结构自振特性分析得知结构自振频率较为密集,刚度分布均匀;通过稳定性分析并选取关键节点绘制荷载-位移曲线,发现该结构稳定性较好。选取垂跨比、拉索预应力、撑杆高度和环梁截面面积等关键参数对结构进行参数化分析,同时考虑半跨活载布置的影响,探究了各参数对弦支马鞍形网壳结构变形、构件内力、支座反力的影响规律。最后对该新型结构的关键节点进行了设计,并给出了不同工况下拉索张拉施工过程的控制索力。

关键词: 大跨屋盖; 弦支马鞍形网壳结构; 小矢跨比; 稳定性分析; 参数化分析; 垂跨比

中图分类号: TU393.3, TU318 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-848X(2026)01-0066-09

[引用本文] 闫翔宇,郭凯旋,王彬,等. 某综合教学实训基地屋盖弦支马鞍形网壳结构分析与设计[J]. 建筑结构, 2026,56(1): 66-74. YAN Xiangyu, GUO Kaixuan, WANG Bin, et al. Analysis and design of saddle-shaped cable supported latticed shell roof in a comprehensive teaching and training base[J]. Building Structure, 2026,56(1): 66-74.

Analysis and design of saddle-shaped cable supported latticed shell roof in a comprehensive teaching and training base

YAN Xiangyu^{1,2,3}, GUO Kaixuan¹, WANG Bin², WANG Danni², YANG Yan¹, CHEN Zhihua¹,
YU Jinghai², ZHANG Xizhi²

(1 School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2 Tianjin University Research Institute of Architectural Design and Urban Planning Co., Ltd., Tianjin 300073, China; 3 Institute of Ocean Energy and Intelligent Construction, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: The multi-functional comprehensive teaching and training base of Hebei Institute of International Business and Economics features a unique architectural shape, with a saddle-shaped roof characterized by a large span and a small rise-span ratio. Through the qualitative analysis of the three selection schemes of roof structure, it was proposed to adopt the saddle-shaped cable supported latticed shell structure as the roof structure form. The structural analysis model was established by using large general finite element software ANSYS, and the stress of the member and structural deformation under various working conditions and combinations were obtained. Through the analysis of structural natural vibration characteristics, it is found that the natural vibration frequency of the structure is relatively dense and the stiffness distribution is uniform. Through stability analysis, key nodes were selected to draw load-displacement curves, and it is found that the structure has good stability. Key parameters such as the rise-to-span ratio, cable prestress, strut height and cross-sectional area of the ring beam were selected for a parametric analysis of the structure. Considering the influence of half-span live load arrangement, the effects of these parameters on the deformation, internal forces of members and support reactions of the cable-supported saddle-shaped latticed shell were investigated. At last, the key nodes of the new structure were designed, and the control cable forces in the construction process of cable tension under different working conditions were given.

Keywords: large-span roof; saddle-shaped cable supported latticed shell structure; small rise span ratio; stability analysis; parametric analysis; vertical-span ratio

1 工程概况

河北对外经贸职业学院多功能综合教学实训基地位于秦皇岛市北戴河新区河北对外经贸职业学院内东部,整体采用“河海欢歌”的设计理念,借助独特的建筑造型,寓意秦皇岛这座美丽的海滨旅游城市为一颗由海浪烘托而起的“明珠”,其建筑效果图如图 1 所示。该工程总建筑面积约 17 655m²,建筑高度约 24.6m,主体结构采用由 36 根呈外倾 11°布置的箱形柱、圆钢管柱和 H 形钢梁组成的框架结构。



图 1 多功能综合教学实训基地建筑效果图

该工程屋盖建筑造型呈马鞍形,水平投影呈椭圆形,长轴 108.44m、短轴 84.66m,长轴矢跨比为 1/27、短轴垂跨比为 1/42,跨度大且矢跨比小,给屋盖结构方案选型带来了一定的技术难度。

2 屋盖结构选型

根据屋盖建筑造型需求及主要尺寸,初步可考虑的现有结构形式有单层马鞍形网壳、双层马鞍形网壳、马鞍形索网。

目前工程中采用的大跨度马鞍形网壳(也即双曲抛物面网壳)多采用双层网壳,这是由于单层双曲抛物面网壳结构要求矢跨比大,且跨度较大时在外荷载作用下容易发生整体失稳,因此《空间网格技术规程》(JGJ 7—2010)^[1]提出建议“单层双曲抛物面网壳的跨度不宜大于 60m”。采用双层网壳可以增强结构刚度,一定程度上解决了较大跨度的马鞍形网壳结构稳定性不足的问题,但是双层网壳用于马鞍面屋盖时,马鞍面形状的不规则可能导致网格划分不均匀、杆件种类较多等问题。同时已有研究发现,矢跨比大小对马鞍形网壳的刚度也具有较大影响,矢跨比增大可以提高网壳结构的极限承载力,与之相对的,矢跨比减小会使网壳结构的稳定性下降,为保证单层网壳结构的安全性,《空间网格技术规程》(JGJ 7—2010)建议“单块双曲抛物面壳体的矢跨比取跨度的 1/4~1/2”。由此可知,单层的双曲抛物面网壳不适用于大跨度小矢跨比的结构。此外,索网结构由于是柔性结构,其刚度绝大部分来自合理的拉索预应力,对施工精度要求高,

且施加预应力之后需要刚度较大的边界环梁抵抗拉索的拉力,《索结构技术规程》(JGJ 257—2012)规定承重索的垂跨比宜为 1/20~1/10,稳定索的拱跨比宜为 1/30~1/15,因此其用于小矢跨比屋盖结构时存在一定局限性。

针对上述现有结构体系的适用性,并结合本项目大跨度小矢跨比的需求,提出了一种适用于大跨度小矢跨比马鞍面的弦支单层网壳结构专利技术^[2],实现了通过施加预应力,为整个结构提供反向的变形,提高结构的整体受力性能,使结构在较大跨度和较小矢跨比下依然具有较强的稳定性。结合本项目的具体尺寸,最终确定采用的结构形式为弦支马鞍形网壳结构,该结构由上部单层网壳、周圈环梁、下部双向拉索、撑杆组成。上部单层网壳及环梁平面布置图、下部拉索平面布置图分别见图 2、3。

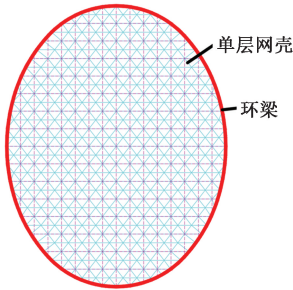


图 2 上部单层网壳及环梁平面布置图

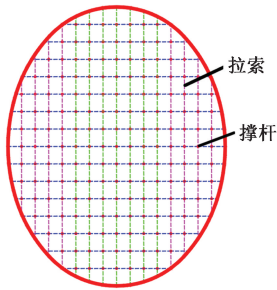


图 3 下部拉索平面布置图

3 结构静力性能分析

3.1 有限元模型建立

采用大型通用有限元软件 ANSYS 建立结构分析模型,其中单层网壳杆件、环梁杆件采用 Beam188 单元模拟,撑杆采用 Link8 单元模拟,材料均为 Q355B;双向拉索采用 Link10 单元模拟,材料抗拉强度为 1 670MPa;弦支马鞍形网壳支承在周圈环梁的 36 个铰支座上。计算模型如图 4 所示。

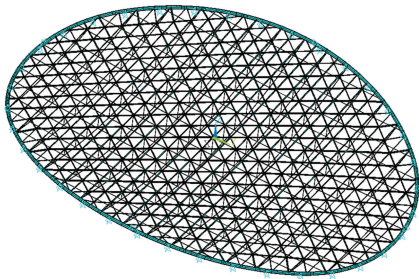


图 4 计算模型

所有单层网壳和撑杆截面均为圆钢管,单层网壳杆件计算长度系数平面内取 0.9,平面外取 1.5,

撑杆计算长度系数取 1.0,截面规格通过计算确定。

3.2 荷载工况与组合

结合屋面建筑构造和当地的自然环境条件,分析计算时考虑的主要荷载工况包括:

(1) 恒载 (DL): 结构构件自重; 屋面恒载 1.0kN/m^2 ; 焊接球节点重量按照自重的 25% 考虑; 拉索初拉力根据拉索布置位置, 分别设置初拉力为 300、750、1 200、1 350、1 600、2 000kN, 其分布如图 5 所示。

(2) 活载 (LL): 不上人屋面活载 0.5kN/m^2 , 预留吊挂活载 0.2kN/m^2 。

(3) 风荷载 (WL): 0.5kN/m^2 (重现期 100 年), 地面粗糙度类别为 A 类。

(4) 雪荷载: 基本雪压 0.3kN/m^2 , 并考虑不均匀雪荷载分布系数 (重现期 100 年)。

(5) 温度作用: 升温 (TL^+) 30°C 、降温 (TL^-) 30°C 。

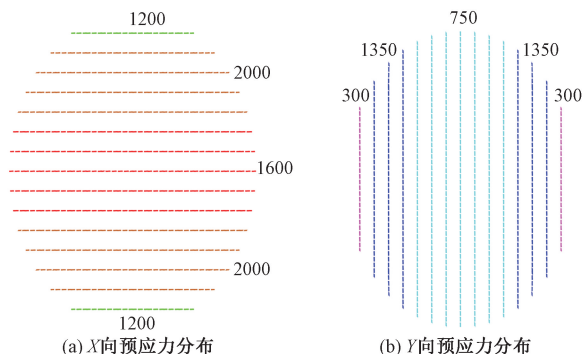


图 5 初拉力分布规律图/kN

结构分析和计算时按照《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[3] 规定选择相应的基本组合和标准组合。

3.3 静力分析结果

3.3.1 构件应力

在 ANSYS 中依据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[4] 编写杆件截面验算的 APDL 程序^[5], 经反复调整验算后各部位杆件规格为: 单层网壳杆件截面包括 $\phi 168 \times 6$ 、 $\phi 180 \times 8$ 、 $\phi 219 \times 8$ 、 $\phi 245 \times 10$ 、 $\phi 273 \times 10$ 、 $\phi 325 \times 12$ 、 $\phi 351 \times 14$ 、 $\phi 377 \times 16$; 环梁杆件截面包括 $\phi 900 \times 18$ 、 $\phi 900 \times 25$; 撑杆截面为 $\phi 168 \times 6$, 构件材质均为 Q355B。进行截面验算后应力比大于 0.7 的杆件分布如图 6 所示, 各应力比构件占总数量的比例见图 7。从图 7 可以看出, 杆件应力比在 0.4~0.8 之间的占 93.5%。网壳杆件最大应力比为 0.87, 满足《钢结构设计标准》(GB 50017—2017) 要求。

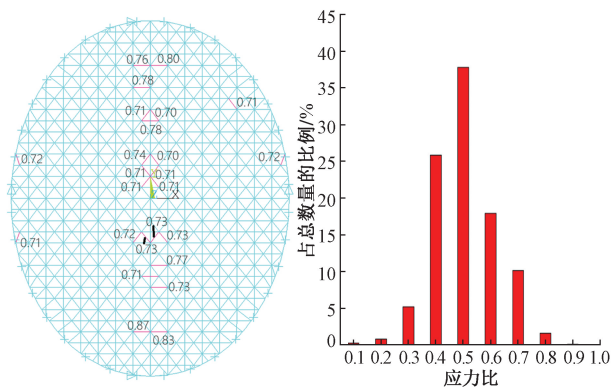


图 6 应力比大于 0.7 杆件分布图

图 7 各应力比构件占总数量的比例

根据拉索索力选取三种拉索规格, 拉索截面分别为 $D70$ 、 $D95$ 、 $D115$, 均采用抗拉强度为 $1\,670\text{MPa}$ 的 GALFAN 索。

3.3.2 结构变形

经计算, 屋盖结构在各静力工况下的变形云图如图 8 所示。由图 8 可见, 结构在 $DL+LL$ (荷载的分项系数均为 1.0, 余同) 工况下最大变形为 138mm, 小于 338.4mm, 即不大于短轴跨度的 $1/250$, 满足《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010) 的要求。结构在 $DL+WL$ 风吸工况下最大变形为 133mm, 风吸力对结构变形影响较大。结构在 $DL+TL^+$ 工况下最大变形为 -51.294mm , $DL+TL^-$ 工况下最大变形为 -51.062mm , 温度效应对结构变形影响较小。

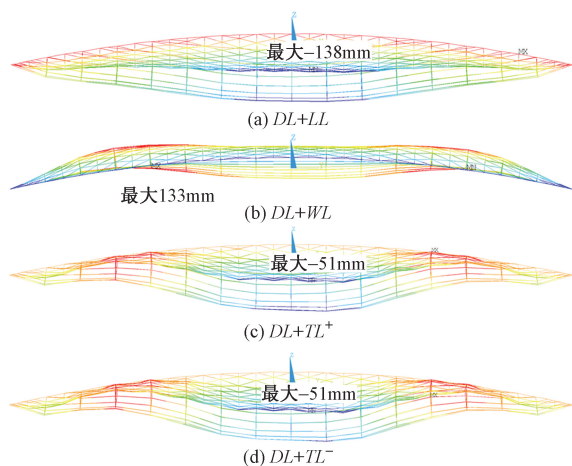


图 8 静力工况下屋盖结构变形云图

4 结构自振特性分析

结构自振特性是其本身固有的重要力学性能, 影响结构在风荷载、地震作用等动力荷载下的反应^[6-7]。采用 Lanczos 算法对结构进行模态分析, 研究其自振特性, 结构前 20 阶自振周期和自振频率统计结果见表 1, 结构前 300 阶振型的自振频率分布情况见图 9, 结构前 6 阶振型见图 10。

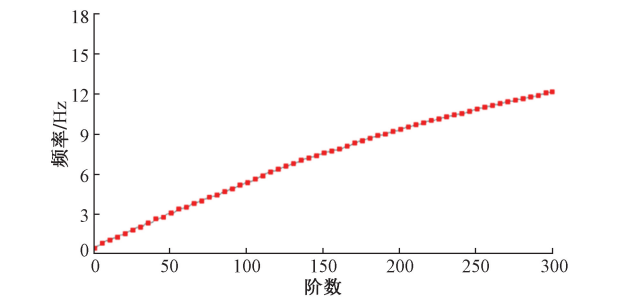


图 9 结构前 300 阶振型的自振频率分布

结构前 300 阶振型的质量参与系数为 88.71% (X 向)、94.87% (Y 向)、86.19% (Z 向),从图 9 可以看出,结构频率变化较为平缓,结构刚度分布较为合理,这与结构的双轴对称特性有关。从图 10 可以看出,结构前 6 阶模态以整体竖向振动为主,伴随竖向弯曲,呈轴对称或反对称变形,这与其空间对称性相符。

表 1 结构前 20 阶自振周期及频率					
振型	周期/s	频率/Hz	振型	周期/s	频率/Hz
1 阶	2.14	0.47	11 阶	0.95	1.05
2 阶	2.12	0.47	12 阶	0.94	1.07
3 阶	1.52	0.66	13 阶	0.93	1.08
4 阶	1.47	0.68	14 阶	0.81	1.23
5 阶	1.42	0.70	15 阶	0.80	1.25
6 阶	1.19	0.84	16 阶	0.78	1.29
7 阶	1.12	0.89	17 阶	0.77	1.29
8 阶	1.00	1.00	18 阶	0.69	1.45
9 阶	0.96	1.04	19 阶	0.69	1.46
10 阶	2.14	0.47	20 阶	0.68	1.47

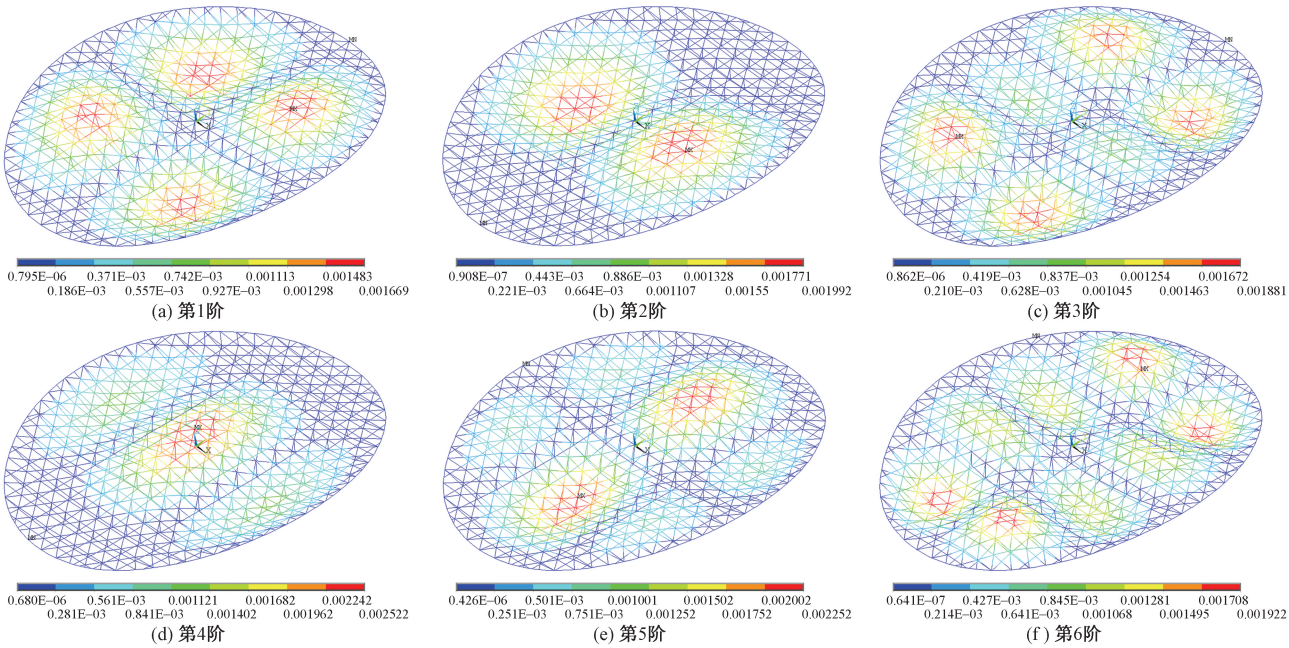


图 10 结构前 6 阶振型

5 结构稳定性分析

5.1 特征值屈曲分析

选取 $DL+LL$ 作为特征值屈曲分析工况,利用 ANSYS 消除预应力对特征值影响的方法得到结构前 10 阶屈曲模态特征值,如表 2 所示。

表 2 结构前 10 阶屈曲模态特征值			
屈曲模态	特征值	屈曲模态	特征值
1	6.46	6	7.53
2	6.70	7	7.56
3	6.84	8	7.74
4	7.21	9	8.08
5	7.36	10	8.16

5.2 非线性屈曲分析

针对弦支马鞍形网壳的稳定性^[8-19],采用一致缺陷模态法,以第 1 阶屈曲模态(图 11)为初始缺陷分布模式,初始缺陷最大值设为短轴长度的 1/300 (即 0.282 2m)。通过等比例缩放第 1 阶屈曲向量并加于原节点坐标上,选择模态位移最大点作为位移控制点。使用弧长法分析,得出几何非线性和双重非线性下的关键节点荷载系数-位移曲线,见图 12,其中,点 616、615 和 536 分别代表第 1 阶屈曲模态位移的上下最大点和结构跨中点。从图 12 中可以看出,只考虑几何非线性时,荷载系数超过 8.0 后仍未出现下降段,大于《空间网格结构技术规程》(JGJ 7—2010)要求的安全系数 4.2;同时考虑几何非线性和材料非线性时,满足整体稳定系数不小于 2.0 的要求,故结构稳定性较好,满足规范要求。

6 参数化分析

为了研究垂跨比、初拉力大小、撑杆高度和环

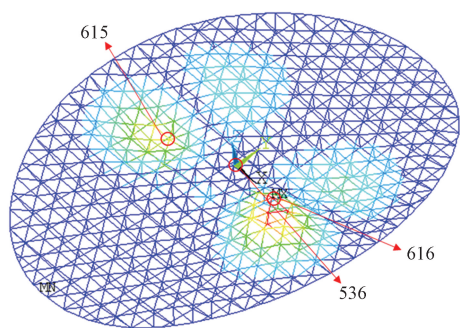
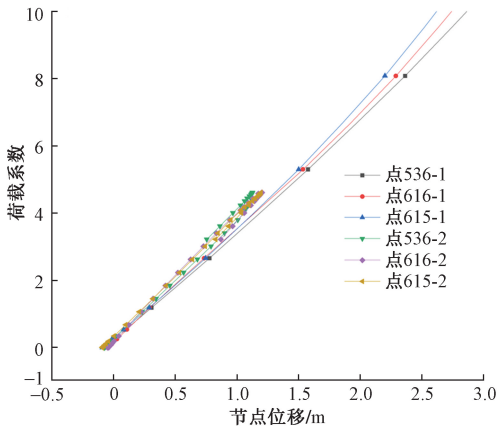


图 11 弦支马鞍形网壳结构第 1 阶屈曲模式



注：“1”表示几何非线性，“2”表示双重非线性。

图 12 关键节点全过程荷载系数-位移曲线

梁尺寸等参数对弦支马鞍形网壳结构性能的影响,为今后类似设计提供参考,对本文提出的新型结构进行了参数化分析^[20-22]。 m 为垂度, L 为短轴方向跨度,现定义结构垂跨比为 m/L ; h 为撑杆高度, T 为拉索初拉力, A 为环梁截面面积。结构参数示意图见图 13,跨度单位为 mm 。结构计算参数选取见表 3。

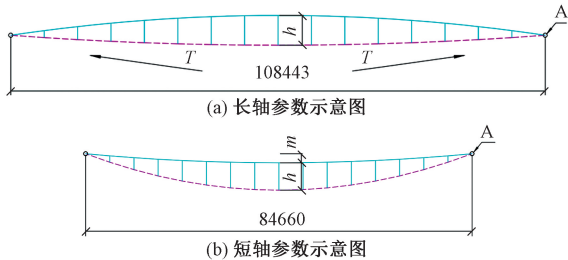


图 13 结构参数示意图

表 3 结构计算参数选取

参数选取	垂跨比	拉索初拉力	撑杆高度	环梁截面面积
初始参数	2/84	T	h	A
考虑参数	1/84、3/84、4/84	0.5T、0.75T、1.25T、1.5T	0.5h、0.75h、1.25h、1.5h	0.5A、0.75A、1.25A、1.5A

参数化分析时考虑如下四种分析工况^[23]: $DL+LL$ 、 $DL+LL1$ (长轴半跨活载)、 $DL+LL2$ (短轴半跨活载)、 $DL+LL+WL$ 。活载布置方式见图 14。

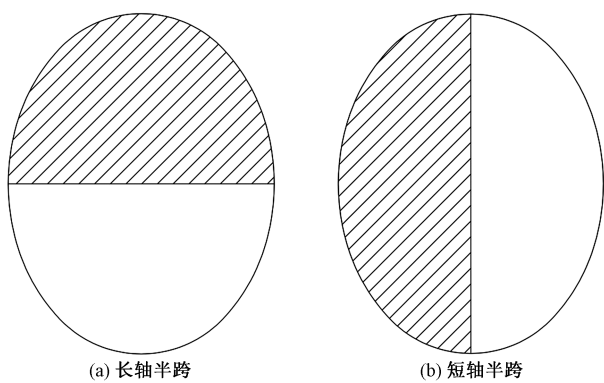


图 14 活载布置方式

6.1 垂跨比的影响

6.1.1 垂跨比对结构变形的影响

垂跨比对结构最大竖向位移的影响见图 15。由图 15 可知, $DL+LL$ 、 $DL+LL1$ 和 $DL+LL+WL$ 工况下结构最大竖向位移随垂跨比变化不显著。 $DL+LL2$ 工况下结构最大竖向位移随垂跨比增大先减后增,这是因为上部单层网壳短轴方向为凹面,是结构的受力方向。 $DL+LL2$ 工况下结构短轴方向受力不均,且垂跨比改变影响结构短轴方向受力状态,故而 $DL+LL2$ 工况下结构变形对垂跨比变化较敏感。

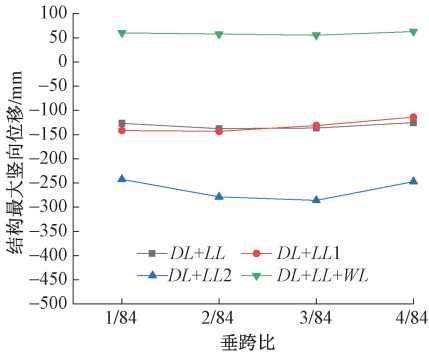


图 15 垂跨比对结构最大竖向位移的影响

$DL+LL1$ 工况下结构最大竖向位移与 $DL+LL$ 工况下结构最大竖向位移相比变化不明显,结构变形对长轴半跨活载布置情况不敏感; $DL+LL2$ 工况下最大竖向位移相比 $DL+LL$ 工况下显著增大,结构变形对短轴半跨活载布置情况较敏感。分析其原因是因为:上部单层网壳短轴方向为凹面,是结构的受力方向,主要负责承受竖直向下的荷载;长轴方向为凸面,是结构的稳定方向,主要负责维持结构稳定。 $DL+LL2$ 工况下网壳短轴方向受力不均,进而影响结构承载能力,导致结构竖向位移增大;而 $DL+LL1$ 工况对结构短轴受力方向影响较小,故竖向位移与 $DL+LL$ 工况相比无明显变化。 $DL+LL+WL$ 工况下最大竖向位移由向下的位移变为向上的位移,这是由于风吸作用的影响。

6.1.2 垂跨比对构件内力的影响

垂跨比对网壳杆件最大轴力、撑杆及拉索内力最值的影响见图 16~18。从图 16 可以看出:随垂跨比增大,网壳杆件最大轴力在 $DL+LL$ 、 $DL+LL1$ 、 $DL+LL2$ 工况下呈线性增大;但在 $DL+LL+WL$ 工况下线性减小。由图 17 可知,撑杆内力最值随着垂跨比增大而线性增加。由图 18 可知,拉索内力最大值随垂跨比变化不明显,拉索内力最小值随垂跨比的增大基本呈线性减小,变化幅度较小。

6.1.3 垂跨比对支座竖向反力的影响

垂跨比对支座竖向反力的影响如图 19 所示。由图 19 可知,短轴垂跨比增大时,支座竖向反力最大值略微降低,而支座竖向反力最小值略微增大; $DL+LL$ 工况下反力较大。

6.2 撑杆高度的影响

6.2.1 撑杆高度对结构变形的影响

撑杆高度对结构最大竖向位移的影响见图 20。由图 20 可知,撑杆高度增加时,结构最大竖向位移显著减小,原因是撑杆高度越大,拉索与撑杆之间的夹角越小,拉索预应力在竖向的分力越大,竖向的抵抗力越大,因此结构最大竖向位移减小。

$DL+LL2$ 工况下撑杆高度从 $1.25h$ 变化到 $1.5h$ 时结构变形较大,这是因为撑杆高度增大到 $1.5h$ 时结构最大竖向位移由向下的位移突然变为向上的位移。 $DL+LL1$ 工况和 $DL+LL$ 工况下结构最大竖向位移差别不大;短轴半跨活载布置和风荷载对最大竖向位移影响较大,在 $DL+LL2$ 工况下最大竖向位

移增大, $DL+LL+WL$ 工况下最大竖向位移发生变号,由向下的位移变为向上的位移。

6.2.2 撑杆高度对构件内力的影响

撑杆高度对网壳杆件最大轴力、撑杆及拉索内力最值的影响见图 21~23。由图 21 可以看出,撑杆高度增加时,网壳杆件最大轴力减小明显,且最大轴力均发生在 $DL+LL1$ 工况;在 $DL+LL+WL$ 工况下轴力最小。由图 22 可以看出,随着撑杆高度的增大,撑杆的内力最大值减小,内力最小值则增大。由图 23 可知,拉索内力最大值和最小值随着撑杆高度的增加逐渐减小。

6.2.3 撑杆高度对支座竖向反力的影响

撑杆高度对支座竖向反力的影响见图 24。由图 24 可知,随着撑杆高度的增加, $DL+LL$ 、 $DL+LL1$ 、 $DL+LL2$ 工况下支座竖向反力最大值略微减小; $DL+LL+WL$ 工况下支座竖向反力最大值先减后增。随着撑杆高度的增加,各工况下支座竖向反力最小值整体减小。

6.3 拉索初拉力的影响

6.3.1 拉索初拉力对结构变形的影响

拉索初拉力对结构最大竖向位移的影响见图 25。由图 25 可知,拉索初拉力增加时,结构出现反拱,结构最大竖向位移先减后增。进一步分析不同工况可以发现,在拉索初拉力从 $0.5T$ 增大至 $1.25T$ 的过程中, $DL+LL1$ 工况下最大竖向位移与 $DL+LL$ 工况下相似;拉索初拉力增大到 $1.5T$ 时,最大竖向位移由向下的位移变为向上的位移; $DL+LL2$ 工况

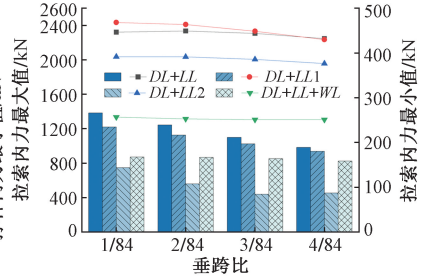
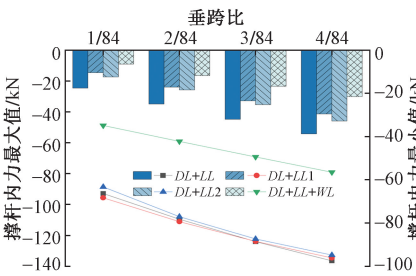
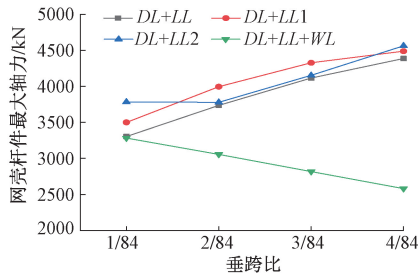


图 16 垂跨比对网壳杆件最大轴力的影响 图 17 垂跨比对撑杆内力最值的影响 图 18 垂跨比对拉索内力最值的影响

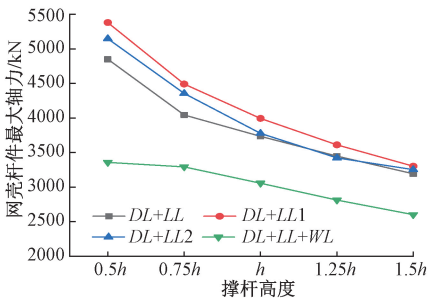
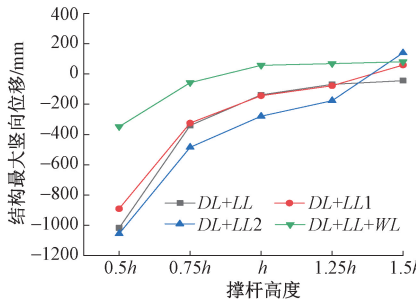
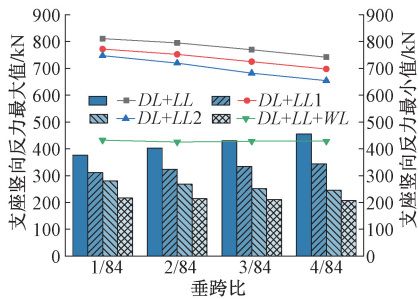


图 19 垂跨比对支座竖向反力的影响 图 20 撑杆高度对结构最大竖向位移的影响 图 21 撑杆高度对网壳杆件最大轴力的影响

下最大竖向位移显著增大。总体上 $DL+LL+WL$ 工况下的结构变形小于其他荷载工况。

6.3.2 拉索初拉力对构件内力的影响

拉索初拉力对网壳杆件最大轴力、撑杆及拉索内力最值的影响见图 26~28。从图 26 中可以看出：拉索初拉力增加时，网壳最大轴力增大，不同拉索初拉力时最大轴力均发生在 $DL+LL1$ 工况下，在 $DL+LL+WL$ 工况下最大轴力显著减小。从图 27 和图 28 可以看出，撑杆内力和拉索内力的最大值随初拉力变化不显著，最小值随初拉力增大逐渐增大，但变化幅度较小。

6.3.3 拉索初拉力对支座竖向反力的影响

拉索初拉力对支座竖向反力的影响见图 29。由图 29 可知：拉索初拉力增大时，除 $DL+LL+WL$ 工况下支座竖向反力最大值先减后增，其余工况下支座竖向反力最值均减小；总体上 $DL+LL$ 工况下的反力大于其他荷载工况。

6.4 环梁截面面积的影响

6.4.1 环梁截面面积对结构变形的影响

环梁截面面积对结构最大竖向位移的影响如图 30 所示。不难看出， $DL+LL$ 、 $DL+LL1$ 、 $DL+LL+WL$ 工况下结构最大竖向位移随环梁截面面积变化不显著； $DL+LL2$ 工况下结构最大竖向位移随环梁截面面积增大呈减小趋势，这是因为网壳短轴方向为结构受力方向，短轴半跨工况导致结构受力方向受力不均，降低了结构的承载能力，进而导致结构位移增大。当环梁刚度增大时，结构整体刚度增大，使结构位移减小。而在 $DL+LL$ 、 $DL+LL1$ 、 $DL+LL+WL$ 工况下，网壳结构未出现明显受力不均现象，故环梁刚度增大对结构变形影响较小。

整体来看， $DL+LL2$ 工况下最大竖向位移显著增大，结构受短轴半跨荷载影响较大。 $DL+LL+WL$ 工况下的结构最大竖向位移方向与其他工况不同，为向上的位移。

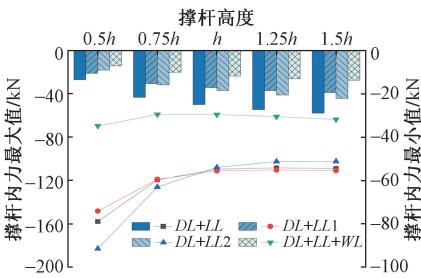


图 22 撑杆高度对撑杆内力最值的影响

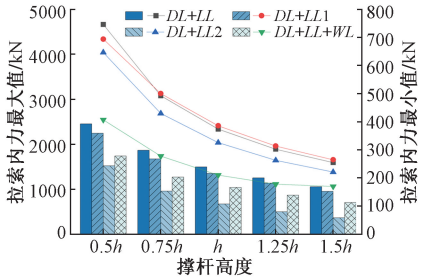


图 23 撑杆高度对拉索内力最值的影响

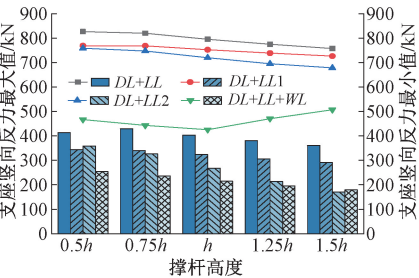


图 24 撑杆高度对支座竖向反力的影响

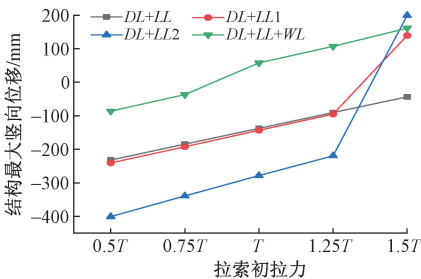


图 25 拉索初拉力对结构最大竖向位移的影响

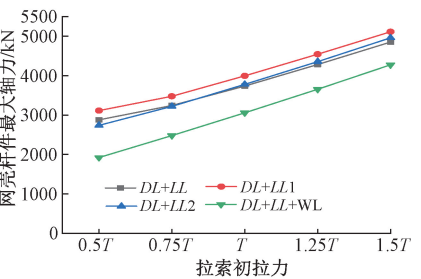


图 26 拉索初拉力对网壳杆件最大轴力的影响

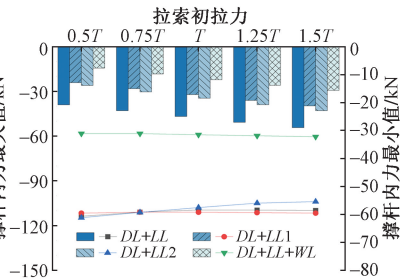


图 27 拉索初拉力对撑杆内力最值的影响

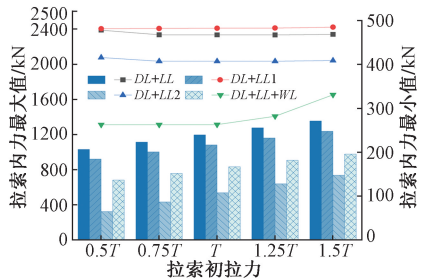


图 28 拉索初拉力对拉索内力最值的影响

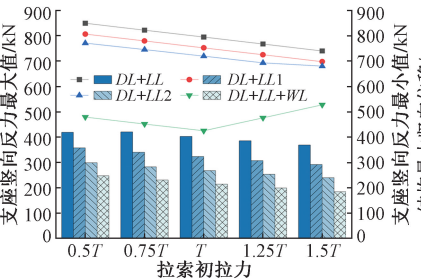


图 29 拉索初拉力对支座竖向反力的影响

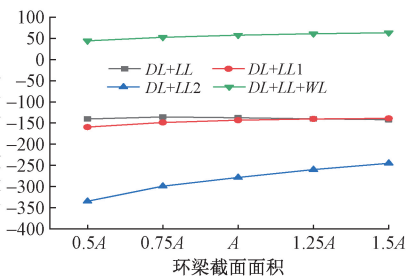


图 30 环梁截面面积对结构最大竖向位移的影响

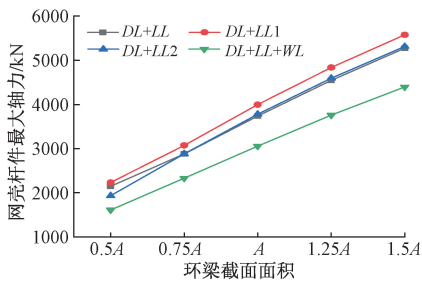


图 31 环梁截面面积对网壳杆件最大轴力的影响

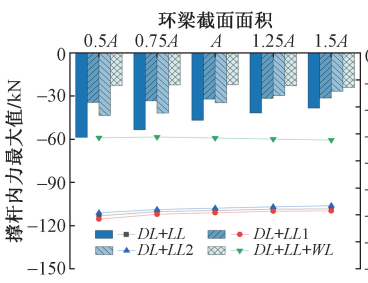


图 32 环梁截面面积对撑杆内力最值的影响

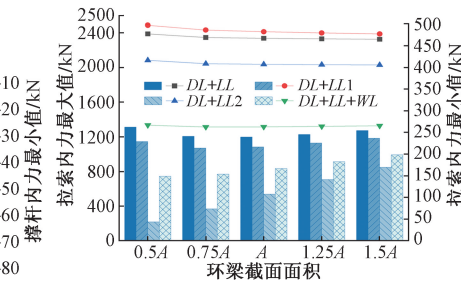


图 33 环梁截面面积对拉索内力最值的影响

6.4.2 环梁截面面积对构件内力的影响

环梁截面面积对网壳杆件最大轴力、撑杆及拉索内力最值的影响见图 31~33。从图 31 可以看出：网壳最大轴力随环梁截面面积增大而增大；不同环梁截面面积下网壳杆件最大轴力均发生在 $DL+LL1$ 工况下。由图 32、33 可知，撑杆内力和拉索内力随环梁截面面积的增大基本不变，撑杆内力和拉索内力对环梁截面面积的变化不敏感。

6.4.3 环梁截面面积对支座竖向反力的影响

环梁截面面积对支座竖向反力的影响见图 34。由图 34 可知：支座竖向反力的最值随环梁截面面积增加而增大，但最大值变化较小。 $DL+LL$ 工况下反力较大。

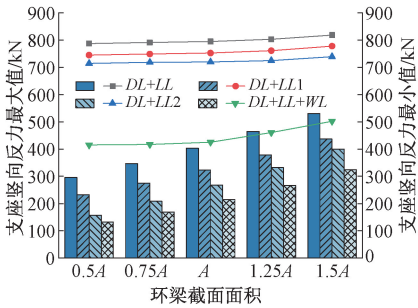


图 34 环梁截面面积对支座竖向反力的影响

7 关键节点构造设计

节点是结构体系承载和传力的的重要组成部分，节点构造设计的合理性直接影响着整个结构的性能。根据节点受力及构造方面的要求，对结构关键的支座节点和撑杆上下端节点进行了设计，以期类似结构设计提供参考，典型节点构造示意图 35。

8 预应力拉索张拉控制力

结合本结构拉索双向正交分布的特点，同时考虑到结构的双轴对称性，对两个方向的拉索进行编号（图 36）。通过在不同工况下进行分析，得到了在结构自重、结构自重+屋面恒载等工况下的每根拉索预应力张拉控制值（表 4），为实际拉索张拉施工提供了参考。

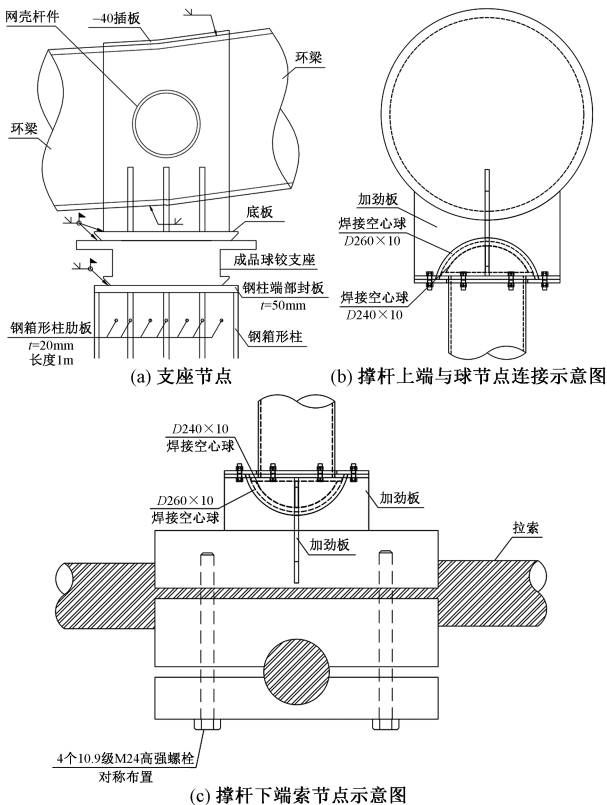


图 35 典型节点构造示意

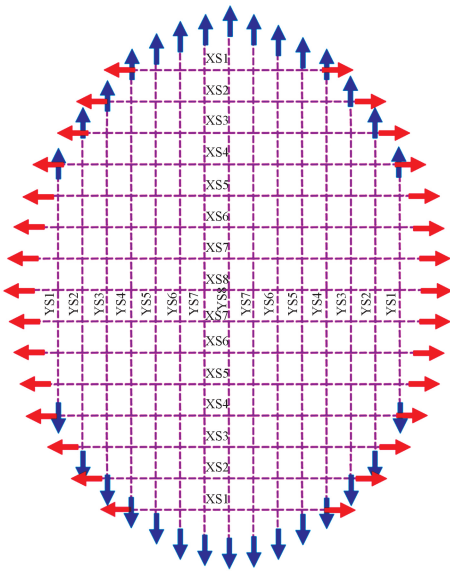


图 36 拉索张拉顺序图

表 4 拉索预应力张拉控制值

拉索 编号	结构自 重/kN	结构自重+ 屋面恒载 /kN	拉索 编号	结构自 重/kN	结构自重+ 屋面恒载 /kN
XS1	580	948	YS1	134	197
XS2	947	1 566	YS2	1 107	1 218
XS3	766	1 474	YS3	1 069	1 213
XS4	779	1 525	YS4	1 063	1 235
XS5	874	1 659	YS5	263	607
XS6	684	1 489	YS6	269	642
XS7	755	1 569	YS7	270	661
XS8	756	1 573	YS8	269	664

9 结 语

(1)结合河北对外经贸职业学院多功能综合教学实训基地弦支马鞍形网壳工程跨度大、矢跨比小的特点,通过不同结构形式的分析,确定采用一种大跨度小矢跨比马鞍面的弦支单层网壳结构专利技术。

(2)采用 ANSYS 软件建立结构分析模型,对结构进行静力分析,经截面验算确定杆件规格后,杆件应力比均符合标准要求,在 1.0 恒载+1.0 活载组合下结构最大挠度为 138mm,满足要求。

(3)通过模态分析得到了结构频率和振型的分布特征,结构刚度分布较为均匀。

(4)对结构进行特征值分析,得到了结构的前 10 阶特征值;分别进行了考虑初始缺陷的几何非线性和双重非线性的全过程分析,得到了关键节点的荷载-位移曲线,结构稳定性较好,满足规范要求。

(5)撑杆高度、拉索初拉力对结构变形影响较大;垂跨比、撑杆高度、拉索初拉力和环梁截面面积对网壳杆件最大轴力影响均较大,垂跨比、撑杆高度对撑杆内力影响较大,撑杆高度对拉索内力影响较大;环梁截面面积对支座反力最小值影响较大。

(6)根据节点受力及构造的要求,对结构关键的支座节点和撑杆上下端节点进行设计,以期为类似结构设计提供参考。

(7)通过分析,给出了每根拉索在不同工况下的张拉控制值,给实际张拉施工提供了参考。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 闫翔宇,杨艳,陈志华,等. 一种适用于大跨度小矢跨比马鞍面的弦支单层网壳结构:CN213204469U[P]. 2021-05-14.

[3] 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.

[4] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建

筑工业出版社,2018.

[5] 陈志华,刘红波,周婷,等. 空间钢结构 APDL 参数化计算与分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[6] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 2016 年版. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[7] 李永梅,张毅刚. 凯威特型索承网壳结构的自振特性及参数分析[J]. 世界地震工程,2007,23(1):91-97.

[8] 沈世钊,陈听. 网壳结构稳定性[M]. 北京:科学出版社,1999.

[9] 罗斌,郭正兴,冯远,等. 常州市体育馆椭圆抛物面弦支穹顶稳定性研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(6):148-154.

[10] 郭佳民,董石麟,袁行飞. 随机缺陷模态法在弦支穹顶稳定性计算中的应用[J]. 工程力学,2011,28(11):178-183.

[11] 赵均,徐金蓓,甘明,等. 椭球面弦支穹顶结构的稳定性[J]. 北京工业大学学报,2013,39(12):1821-1826.

[12] 曹正罡,孙瑛,范峰,等. 单层双曲椭圆抛物面网壳弹塑性稳定性能[J]. 建筑结构学报,2009,30(2):70-76.

[13] 闫翔宇,于敬海,于泳,等. 河北北方学院体育馆屋盖弦支穹顶结构分析与设计[J]. 建筑结构,2015,45(16):6-10,95.

[14] 于敬海,胡相宜,陈彦,等. 弦支穹顶初始几何缺陷分布及稳定安全系数取值研究[J]. 空间结构,2017,23(3):3-10,20.

[15] 蔡健,贺盛,姜正荣,等. 单层网壳结构稳定性分析方法研究[J]. 工程力学,2015,32(7):103-110.

[16] 姜正荣,王仕统,石开荣,等. 厚街体育馆大跨度椭圆抛物面弦支穹顶结构的非线性屈曲分析[J]. 土木工程学报,2013,46(9):21-28.

[17] 葛家琪,张国军,王树,等. 2008 奥运会羽毛球馆弦支穹顶结构整体稳定性能分析研究[J]. 建筑结构学报,2007,28(6):22-30,44.

[18] 杜文凤,喻福东. 沁阳市体育馆椭圆抛物面弦支穹顶稳定性研究[J]. 建筑结构,2013,43(22):39-42,38.

[19] 徐加初,区潮益. 双层双曲抛物面网壳结构的非线性稳定性[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版),2008,29(5):434-437.

[20] 刘人杰,邹瑶,薛素铎,等. 去索对无环索弦支穹顶静力性能的影响规律研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(S1):1-9.

[21] 闫翔宇,巩昊,张起舞,等. 一种适用于非圆形建筑平面的新型球面弦支穹顶结构静力性能研究[J]. 钢结构(中英文),2021,36(4):1-10.

[22] 蔡军,张俊清,杨雨青,等. 低矢跨比弦支穹顶的经济性分析[J]. 建筑结构,2025,55(17):31-36.

[23] 刘树堂,黄卫林. 弦支穹顶结构环索预应力设计方法对比研究[J]. 建筑钢结构进展,2018,20(6):87-96.