段志城,吕辉,董石麟,等.多撑杆型铝合金弦支穹顶静力稳定性及自振特性分析[J].地震工程学报,2026,48(5):1156-1168.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250417001
DUAN Zhicheng,LÜ Hui,DONG Shilin,et al.Static stability and natural frequency characteristics of a multi-strut aluminum alloy suspen-dome structure[J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1156-1168.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250417001

多撑杆型铝合金弦支穹顶静力稳定性及自振特性分析

段志城[1],吕 辉[1,2,3],董石麟[2,3],冯若强[4],王世权[5],康玉婷[1],陈钰文[1]
(1.南昌航空大学 土木与交通学院,江西 南昌 330063;
2.浙江大学 空间结构研究中心,浙江 杭州 310058;
3.浙江大学 浙江省空间结构重点实验室,浙江 杭州 310058;
4.东南大学 土木工程学院,江苏 南京 211189;
5.河南省建筑设计研究院,河南 郑州 450003)

摘要:为丰富弦支穹顶结构形式、提高结构稳定性,将多撑杆型索穹顶的预应力索撑体系应用于铝合金单层网壳,形成多撑杆型铝合金弦支穹顶并研究其结构力学性能,分析结构的整体可行性。通过对比鼓蜂窝四撑杆Ⅰ型、Ⅲ型及五边形三撑杆型三种拓扑构型的静力性能、稳定性及经济性确定最优结构拓扑方案。基于ANSYS有限元软件系统分析了各种工况下最优结构索杆内力及节点竖向位移变化情况,并进一步研究矢跨比、厚跨比、预应力水平、下弦节点布置方案及跨度等不同参数对最优结构刚度、稳定承载力及自振特性的影响规律。分析结果表明,鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型结构综合性能最优,其极限承载力较Ⅰ型和五边形构型分别提升8.9%和25.6%,且用钢量最低。该最优结构对温度荷载、半跨均布荷载及节点铰接形式较为敏感,自振频率较为集中且振型多呈对称分布。文章确定了关键设计参数(如矢跨比和厚跨比)的最佳取值范围,为铝合金弦支穹顶结构的选择和稳定性设计提供了理论依据与建议。

关键词:多撑杆型铝合金弦支穹顶;拓扑形式;静力性能;稳定性分析;自振特性
中图分类号:TU394 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1156-13
DOI:10.20000/j.1000-0844.20250417001

收稿日期:2025-04-17
基金项目:国家自然科学基金(52278224);2024年度南昌航空大学研究生省级创新专项资金项目(YC2024-S641);国家自然科学基金(52568028)
第一作者简介:段志城(2000-),男,硕士研究生,主要从事空间结构方面的研究。E-mail:2311085900018@stu.nchu.edu.cn。
通信作者:吕 辉(1982-),男,博士,教授,主要从事空间结构理论与应用方面的研究。E-mail:lvhui@nchu.edu.cn。

Static stability and natural frequency characteristics of a multi-strut aluminum alloy suspen-dome structure

DUAN Zhicheng[1], LÜ Hui[1,2,3], DONG Shilin[2,3], FENG Ruoqiang[4],
WANG Shiquan[5], KANG Yuting[1], CHEN Yuwen[1]

(*1.School of Civil Engineering and Transportation, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;*
2.Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;
3.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Space Structures, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;
4.School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;
5.Henan Architectural Design and Research Institute, Zhengzhou 450003, Henan, China)

Abstract: To expand the structural forms of suspen-domes and improve their structural stability, the prestressed cable-strut system of the multi-strut cable dome was applied to an aluminum alloy single-layer latticed shell to form a multi-strut aluminum alloy suspen-dome. The mechanical properties of this structure were investigated, and its overall feasibility was evaluated. The optimal structural topology was determined by comparing the static performance, stability, and economy of three topological configurations: drum-honeycomb four-strut type Ⅰ, type Ⅲ, and pentagonal three-strut type. Using ANSYS finite element software, the internal forces in cables and struts and the vertical displacements of joints in the optimal structure under various load cases were analyzed. The influence of different parameters, including rise-to-span ratio, thickness-to-span ratio, prestress level, arrangement scheme of lower chord joints, and span, on the stiffness, ultimate bearing capacity, and natural vibration characteristics of the optimal structure was further studied. The results show that the drum-honeycomb four-strut type Ⅲ structure exhibits the best overall performance. Its ultimate bearing capacity is 8.9% and 25.6% higher than that of type Ⅰ and the pentagonal configuration, respectively, and its steel consumption is the lowest. This optimal structure is relatively sensitive to temperature loads, half-span uniformly distributed loads, and pin-jointed connections. Its natural frequencies are relatively concentrated, and most of its vibration modes are symmetric. The optimal ranges of key design parameters (such as rise-to-span ratio and thickness-to-span ratio) were determined, providing a theoretical basis and practical recommendations for the selection and stability design of aluminum alloy suspen-dome structures.

Keywords: multi-strut type aluminum alloy suspen-dome; topological form; static performance; stability analysis; natural vibration characteristics

0　引言

铝合金凭借其强重比高、耐腐蚀性及可塑性强的特点，成为解决空间网壳结构对钢材依赖性的有力材料。近年来，我国先后建成天津平津战役纪念馆(1996年)、南京牛寿山佛顶宫(2015年)、上海世博温室热带雨林馆(2024年)等标志性铝合金空间结构[1-3]，验证了其在百米级跨度工程中的可行性。Tan等[4]将铝合金材料应用到800 m超大跨巨型网格结构，进一步展现了铝合金材料在空间结构领域的巨大潜力。然而，目前铝合金于空间结构领域的研究与应用集中于刚性网壳和网格结构，预应力索撑体系增强性能的相关研究较少，而该体系的引入恰是当前空间结构稳定技术研究的主流。

在预应力空间结构领域，董石麟等[5-10]提出的“多撑杆”构思的索穹顶结构体系对改善刚性网壳结构有着借鉴意义，其V型撑杆的合理布设可显著提升结构稳定性与刚度。臧倩等[11]在K6型单层球面网壳下部引入预应力索撑体系，发现其对铝合金单层网壳稳定承载力的提高率是其对单层钢网壳

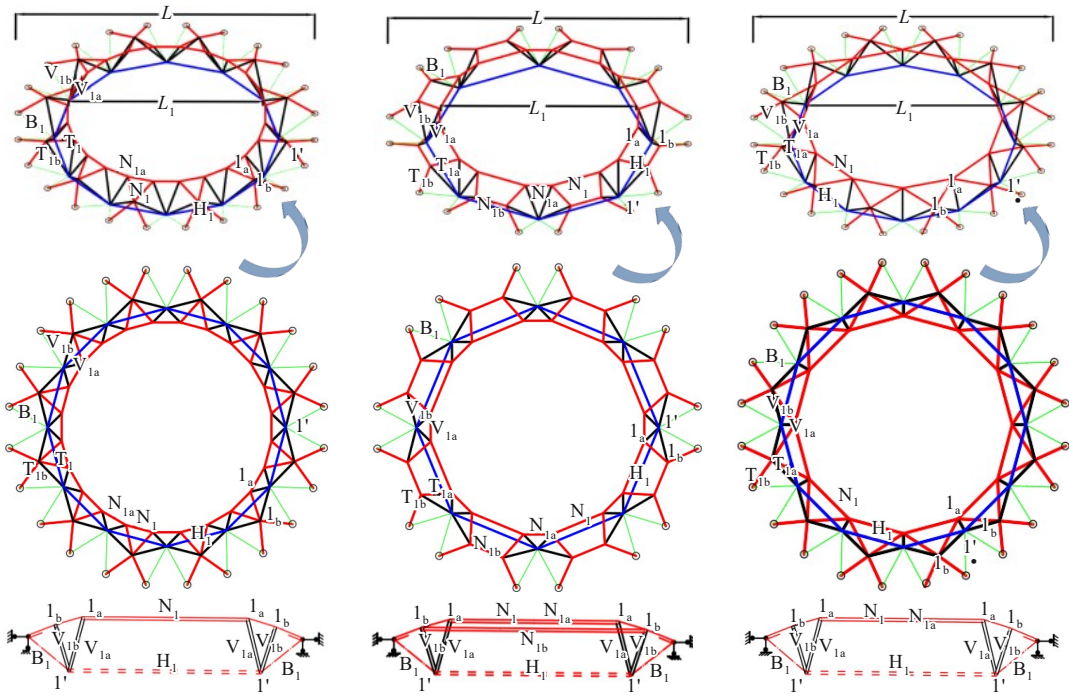
承载力的2.7倍。柳明亮等[12]、He等[13]在大跨网架结构中创新性地引入了预应力索撑体系，有效地提高了结构稳定性，并确定了该结构体系关键布置参数的最优范围。同时，传统铝合金刚性网壳[14]依赖单一壳体承重，刚度储备不足，为控制变形常需增大杆件截面，导致经济性降低；传统钢弦支穹顶[15-16]上部网壳多采用三边形或四边形设计，下部采用单撑杆或双撑杆体系，索撑体系与网壳的协同工作性能较弱。已有研究[17-18]表明，相同结构形式的铝合金弦支穹顶结构耗材量比钢弦支穹顶少60.67%，这更加凸显了发展新型预应力铝合金体系以兼顾刚度优化与轻量化经济优势的必要性。

因此，为丰富弦支穹顶结构的形式和提高结构稳定性，本文在铝合金单层网壳中引入预应力索撑体系，提出由柔性结构领域的索穹顶多撑杆构思和铝合金空间网壳结构组合的“多撑杆类铝合金弦支穹顶”结构。通过综合对比鼓蜂窝四撑杆Ⅰ型、Ⅲ型和五边形三撑杆型三种拓扑结构的静力、稳定性和经济性能，确定最优选型；并进一步采用数值模拟方法对最优结构的静力稳定性及自振特性进行详细分析，给出了相关的设计规律。研究结果可为该类结构选型及实际工程应用提供理论依据。

1 多撑杆型铝合金弦支穹顶结构

1.1 结构拓扑形式

为确定结构性能较优的多撑杆型铝合金弦支穹顶结构拓扑形式，基于具有多撑杆构思的索穹顶结构构型，选取了鼓蜂窝四撑杆Ⅰ型、Ⅲ型和五边形三撑杆型三种代表性的结构拓扑形式。三种结构均由斜索、环索、上弦脊杆、撑杆及刚性环梁组成，结构示意如图1所示。图1中N、T、B、H、V分别表示上弦环向脊杆、上弦径向脊杆、斜索、环索与撑杆，下标a，b和数字1代表构件或节点所在圈数编号，1_a、1_b、$1'$则分别代表上弦节点和下弦节点编号。其中两种鼓蜂窝形结构的2根斜索、4根撑杆与环索连接于下弦节点，在上弦主六边形网格内分别呈满铺布置和跳格布置；五边形结构上弦网格呈五边形，下部索撑体系仅有2根斜索、3根撑杆和环索与下弦节点相连，三种结构下弦节点均设置在结构主六边形径向轴线上。与传统网壳结构相比，该类结构建筑造型新颖，有着独特的建筑美与结构力学美。在下弦节点处设置3根或4根撑杆能够有效提高整体结构的环向刚度和稳定性，从而更好地承受外部荷载和复杂应力分布；其结合了单层网壳的刚性与索撑体系的柔性，兼具高承载效率与轻量化



(a) 鼓蜂窝四撑杆Ⅰ型 (b) 鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型 (c) 五边形三撑杆型

图1 多撑杆型铝合金弦支穹顶结构拓扑形式

Fig. 1 Topological forms of the mutil-strut type aluminum alloy suspen-dome structure

优势。

1.2　有限元模型建立与验证

通过ANSYS建立三种拓扑构型基准模型，跨度L均取180 m，矢跨比、厚跨比分别为0.10、0.10，孔跨比为2/3L。为模拟结构两端节点平动受约束但转动自由的铰接形式，下部索杆支撑体系采用Link180单元，上部网壳结构视为刚接节点形式，采用Beam188三维梁单元模拟。考虑应力刚化效应，最外圈节点为约束节点，均采用周边三向固定铰支座支撑模拟环梁约束。同时本文采用Surf154面单元将外部荷载等效为集中荷载，进而双向导向节点施加给结构。模型各构件材料属性如表1所列。

大跨空间结构的稳定性分析需考虑几何非线性效应。本文在建模时打开大变形效应开关，在后续的结构稳定性研究中采用弧长法进行非线性稳定性分析，确保计算结果准确反映结构在荷载作用下的几何非线性行为。

三种拓扑构型基础模型建立后，通过数值模拟计算各结构初始态内力，采用初始应变法对结构全部构件施加初始预应力。由图2和图3可知，不考虑结构自重及外力荷载作用时，五边形拓扑形式结构的竖向位移最大，为0.141×10^{-4} m[图2(a)]；当施加自重荷载后，该结构竖向位移达到−0.040 893 m[图3(a)]，预应力态下结构位移变化量仅占0.034%，可

表1　材料属性

Table 1　Material properties

构件	弹性模量E/MPa	密度ρ/(kg/mm^3)	屈服强度/MPa	温度膨胀系数	泊松比
拉索B、H	1.90×10^5	7.85×10^{-6}	1 330	1.2×10^{-5}	0.30
撑杆V	2.06×10^5	7.85×10^{-6}	345	1.2×10^{-5}	0.30
脊杆T、N	0.71×10^5	2.65×10^{-6}	242	2.3×10^{-5}	0.30

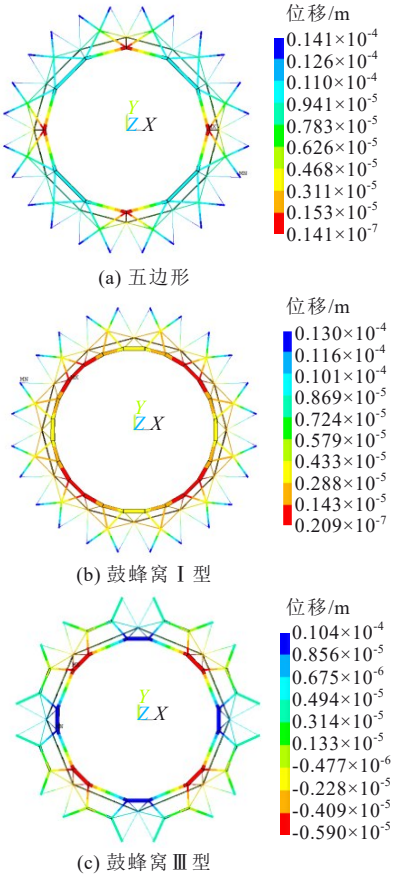


图2　预应力态下各结构Z向位移

Fig. 2　Z-direction displacement of each structure under the prestressed state

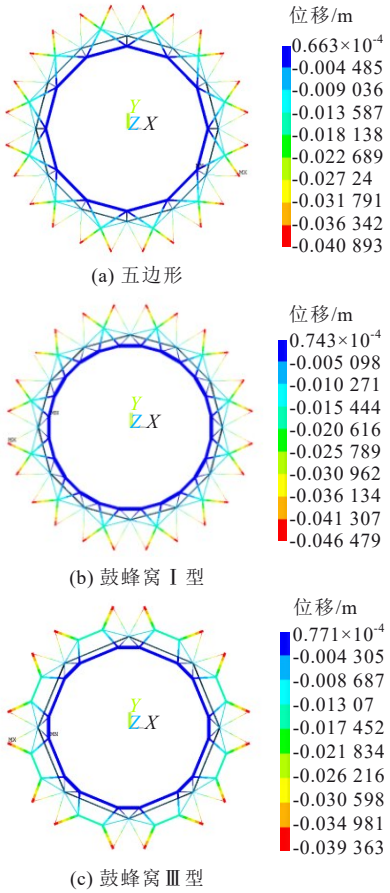


图3　自重荷载态下各结构Z向位移

Fig. 3　Z-direction displacement of each structure under the self-weight load state

忽略不计，由此验证了预应力施加方法与结构模拟方案的可行性。

1.3 结构性能对比研究

结构分析按是否考虑自重分为理想荷载态（不计自重）和实际荷载态（计入自重，节点质量取构件质量的20%）。对比研究三种铝合金弦支穹顶在荷载下的杆件内力、节点竖向位移、极限承载力及总耗材量，综合分析是否考虑自重时的最优结构拓扑形式。

1.3.1 静力性能

分别按照考虑结构自重与否，在1.0倍恒载（0.3 kN/m²）+1.0倍全跨活载（0.7 kN/m²）作用下对三种结构进行静力加载。各结构构件内力及节点竖向位移如图4所示（图中1，3，5分别代表鼓蜂窝四撑杆Ⅰ型，鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型，五边形三撑杆型，*表示静力加载时考虑结构自重）。

图4结果表明：不考虑自重时，相同荷载作用下鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型结构的最大构件内力及最大竖向位移均为最小，并且结构最大竖向位移的降低幅度最为显著，较Ⅰ型与五边形最大竖向位移降幅分别达17.5%和23.3%；考虑自重时，鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型结构最大竖向位移降幅分别达16.6%和15.7%。从结构刚度的角度分析，无论是否考虑自重，鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型铝合金弦支穹顶竖向位移最低，结构刚度相对较优。与不考虑自重相比，考虑自重时三种结构构件内力和节点竖向位移变化明显，上部网壳最大脊杆内力和最大节点竖向位移分别降低21.3%和增加82.9%，证实了自重对结构性能影响显著。因此实际工程中必须考虑自重影响，这是满足设计要求的关键要素。

1.3.2 稳定性

结构的稳定性能可通过屈曲模态、荷载-位移全过程曲线和极限荷载等进行评估。本文对结构施加$L/300$的初始缺陷后，在1.0倍恒载+1.0倍全跨活载作用下对三种铝合金弦支穹顶结构进行非线性稳定性分析，如图5所示。结果表明：三种结构屈曲前节点位移随荷载呈线性增长，表现良好塑性。临界点后曲线拐点显著，微小的荷载增量引发较大的位移，以拐点荷载为极限判据，鼓蜂窝Ⅲ型结构极限荷载倍数最大，鼓蜂窝Ⅰ型和五边形刚度和稳定性相近。无论是否考虑结构自重，对比结构刚度及稳定性均为鼓蜂窝Ⅲ型＞鼓蜂窝Ⅰ型＞五边形，与静力分析结论一致。此外，四撑杆的Ⅲ型和Ⅰ型较三撑杆五边形承载力分别提升25.6%和8.9%，表明撑杆数量的合理增加可有效提高结构整体稳定性。

1.3.3 经济性

由于单纯的索杆比难以全面反映结构经济性能，本文选取结构投影面积用钢量与索杆比作为经济性评价指标。对比表明：鼓蜂窝Ⅰ型结构耗材量最大，达56.82 kg/m²；五边形次之，耗材量为51.17 kg/m²；鼓蜂窝Ⅲ型耗材量最小，为49.04 kg/m²。在索杆数量比方面，鼓蜂窝Ⅲ型结构索杆数量比为0.273∶1，略低于Ⅰ型（0.3∶1）和五边形结构（0.375∶1）。考虑到拉索单价高于撑杆，结合耗材量与构件成本的双重因素，三种结构综合经济性排序为鼓蜂窝Ⅲ型＞鼓蜂窝Ⅰ型＞五边形。

综合结构静力性能、稳定性及经济性分析结果考虑，鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型铝合金弦支穹顶结构为最优结构拓扑方案。该结构荷载作用下位移响应最小，极限承载能力和经济性最高，兼具高刚度、强稳定性与优异经济性，因此本文后续的深入分析均采用此构型。

2 结构静力分析

2.1 工况布设

对鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型铝合金弦支穹顶结构进行

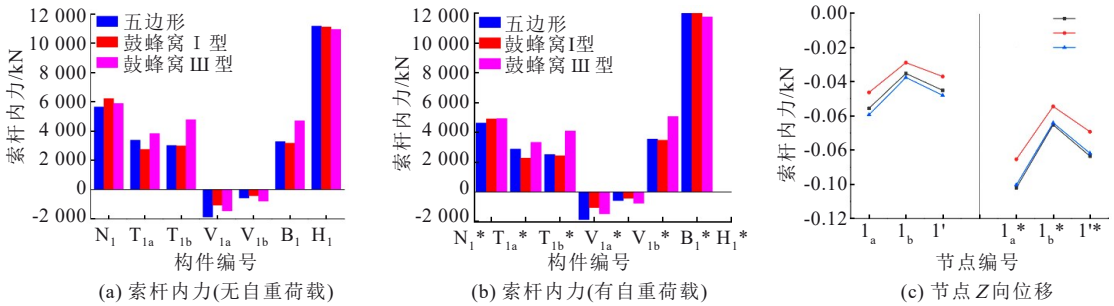
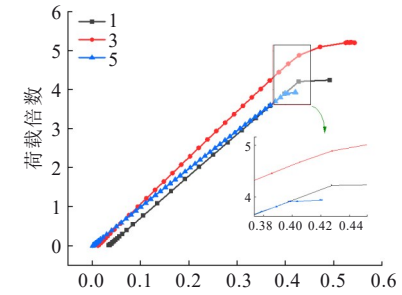
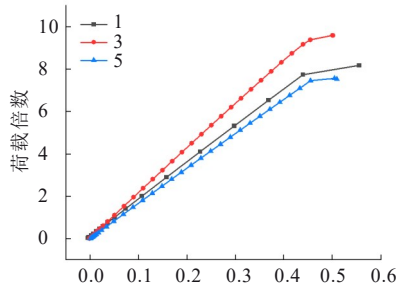


图4 不同荷载情况下结构构件内力和节点Z向位移

Fig. 4 Internal forces of structural members and Z-direction displacement of joints under different load cases



(a) 荷载-位移曲线(有自重荷载)



(b) 荷载-位移曲线(无自重荷载)

图 5　不同荷载情况下结构荷载-位移曲线

Fig. 5　Load-displacement curves of the structure under different load cases

静力加载。恒荷载为 0.3 kN/m²，活荷载 0.7 kN/m²，基本风压取 0.45 kN/m²，温度考虑区间[－60 ℃，60 ℃]，荷载工况组合如表 2 所列。λ为施加的活荷载扩大系数(取 1～9)，以 1 的倍数逐级增加，在整个加载过程中均考虑结构构件及节点自重并假设各索杆都处于弹性状态。

2.2　全跨均布竖向荷载

工况 1 下鼓蜂窝Ⅲ型结构全跨活载增大的响应如图 6 所示：

(1) 随着竖向活荷载的增大，结构上部脊杆内力不断减小后转为负值不断增大，由受拉状态逐渐转为受压状态。环索与斜索内力呈线性增长，其中环索 H_1 增幅显著，主导抵抗环向拉力；而撑杆 V_{1a} 内力呈线性衰减但降幅较小，各构件均处于弹性状态。值得注意的是，内节点圈杆件 N_1、N_{1a}、T_{1a}、V_{1b} 的内力变化速率显著高于外节点圈杆件 V_{1a}、N_{1b}、V_{1b}，说明内节点圈区域杆件在荷载传递中承担主要受力功能，是结构产生局部失稳的敏感区域。

表 2　荷载工况布设表

Table 2　Arrangement of load cases

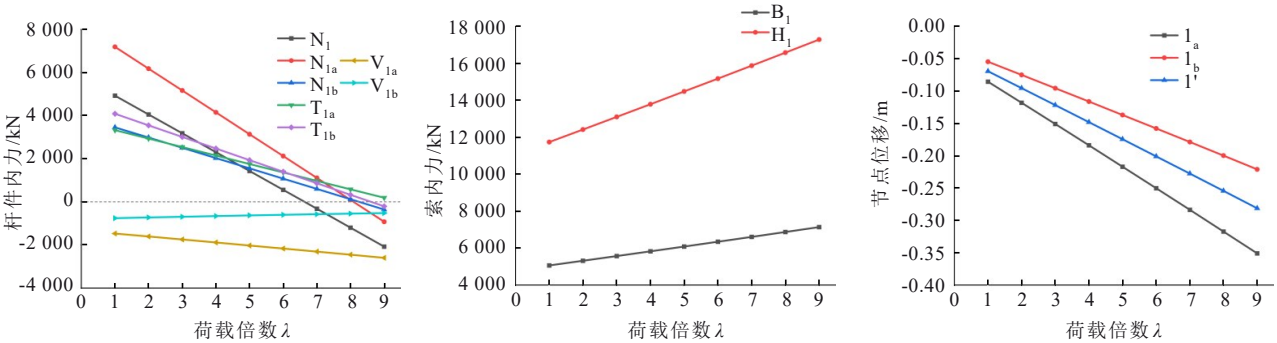
荷载工况	组合系数						
	恒荷载	活荷载	风荷载	温度	初始预应力	自重	分布情况
1	1.0	1.0	-	-	1.0	1.0	全跨
2	1.0	1.0	-	1.0	1.0	1.0	半跨
3	1.3	1.5	-	1.0	1.0	1.0	全跨
4	1.3	1.5	1.5×0.7	1.0	1.0	1.0	全跨
5	1.3	1.5	-	1.5×0.7	1.0	1.0	全跨

(2) 由图 6(c)分析可知，该结构最大节点竖向位移出现在内圈节点 1_a 处，外圈节点 1_b 处位移最小。结构上下弦节点竖向位移均呈线性增大趋势，但均未超过规范限值 $L/250$(0.72 m)，有着较强的承载能力和抗变形能力。

2.3　半跨均布竖向荷载

在工况 2 荷载组合下，活荷载加载区与非加载区各索杆内力及节点竖向位移变化如图 7 和图 8 所示。由图分析可知：

(1) 随着活荷载的增大，加载区杆件内力变化及节点竖向位移同全跨工况 1 变化趋势一致，但由于荷载不对称性引发的内力重分布使得非加载区节点竖向位移先减小后增大。当结构荷载倍数 $\lambda>5$ 时，非加载区节点竖向位移转变为向上并不断增大，结构呈现“一边倒”趋势。



(a) 杆件内力　(b) 索内力　(c) 节点 Z 向位移

图 6　全跨均布荷载作用下构件内力和节点 Z 向位移

Fig. 6　Internal forces of members and Z-direction displacement of joints under full-span uniformly distributed load

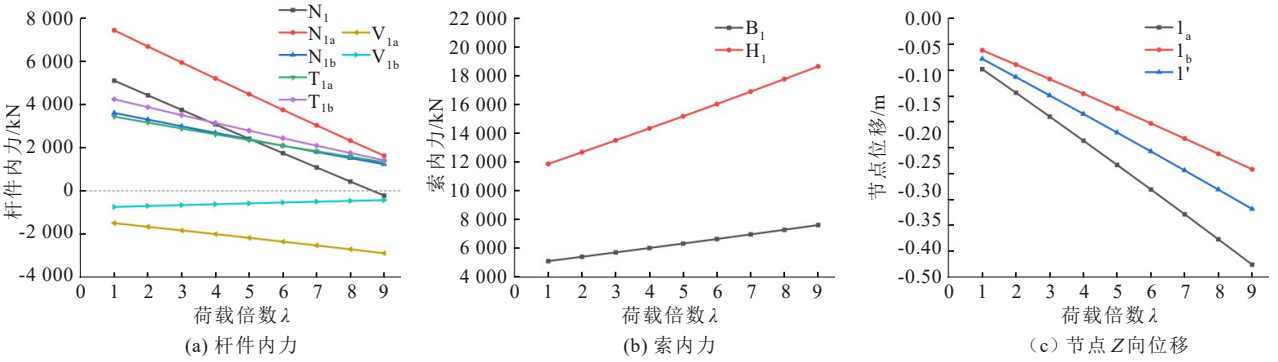


图7 半跨均布荷载作用下构件内力和节点Z向位移(加载区)

Fig. 7 Internal forces of members and Z-direction displacement of joints under half-span uniformly distributed load (loaded area)

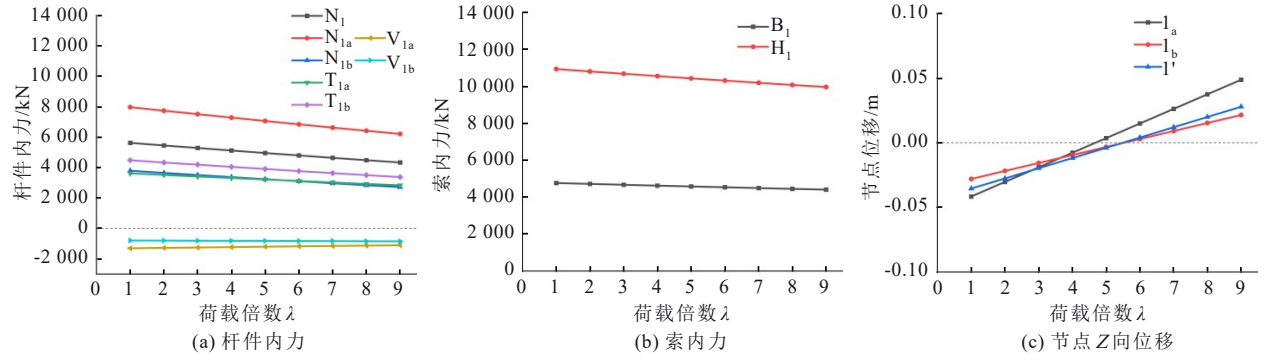


图8 半跨均布荷载作用下构件内力和节点Z向位移(非加载区)

Fig. 8 Internal forces of members and Z-direction displacement of joints under half-span uniformly distributed load (unloaded area)

(2) 对比工况1,在半跨竖向均布荷载作用下,加载区各索杆内力均有不同程度增大,且竖向位移更大,增幅约为37.1%。全跨荷载下结构变形对称均匀,半跨荷载下加载区下沉与非加载区上抬并存,导致变形不均。因此结构设计需重点考量此类不均匀分布荷载的不利影响。

2.4 风荷载

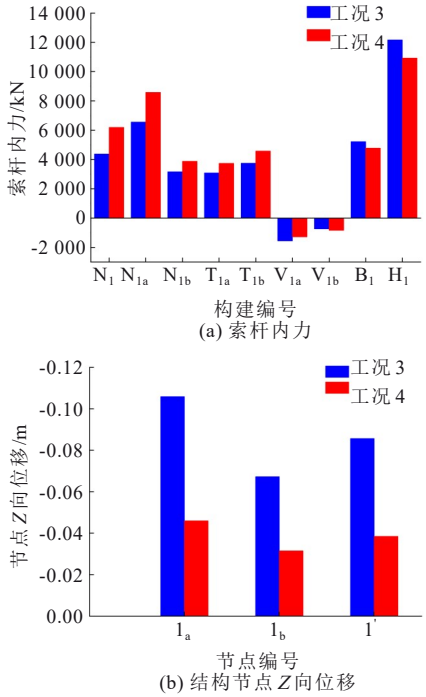
在大跨度结构中,屋顶迎风风压和风吸是影响结构的重要因素,为了研究风荷载作用对鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型铝合金弦支穹顶结构的影响,选取无风荷载和有风荷载两种工况进行分析(即工况3、4)。结构风荷载标准值按照《屋盖结构风荷载标准(JGJ/T 481—2019)》[19]采用平均风荷载与脉动风效应的等效静风荷载之和的形式$w_k=\mu_s\mu_z\omega_0+\mu_d\mu_z\omega_0$计算大小:对旋转壳顶$f/L\leqslant 1/4$的情况,风荷载体型系数按照$\mu_s=-\cos\Phi^2$建议取值($\Phi$为结构表面上某一点的法线方向与主导风向之间的夹角),取地面粗糙度为B类,离地高度为25 m,风压高度系数按规范查表为$\mu_z=1.31$,μ_d脉动风效应等效风压系数2.64,基本风压$\omega_0=0.45\ \mathrm{kN/m^2}$,计算得风荷载标准值后将水平风荷载转化为垂直于结构表面的风吸力施加于模型。图9结果表明:风荷载下结构上弦脊杆内力增大,下弦撑杆及拉索内力减小,最大节点竖向位移1_a为−0.046 m。而无风荷载作用下结构最大节点竖向位移1_a位移为−0.106 m,有风荷载作用时相较于无风荷载结构位移减少近56.6%,结构最大竖向位移减小明显。风荷载的施加等效提升了结构整体刚度,对于该结构来说为有利荷载。

2.5 温度荷载

铝合金弦支穹顶因铝合金网壳与钢索杆之间存在热膨胀系数差异,温度效应不可忽视。本文假定结构温度在某些极端气候中全年变化范围[−60 ℃,60 ℃],在工况5荷载组合下分析温度作用对结构杆件内力分布及节点静力响应的影响规律。由图10可知:

(1) 随着环境温度的升高,结构各构件内力均呈线性减小趋势且趋近于0,预应力刚度减小,材料刚度逐渐主导结构刚度。当温度大于50 ℃时,上部脊杆内力由受拉转为受压状态,继续提高温度可能会引起结构索的松弛。

(2) 在[−60 ℃,0 ℃]时,降温荷载会增大结构



(a) 索杆内力

(b) 结构节点 Z 向位移

图 9　有、无风荷载作用时结构构件内力和节点 Z 向位移

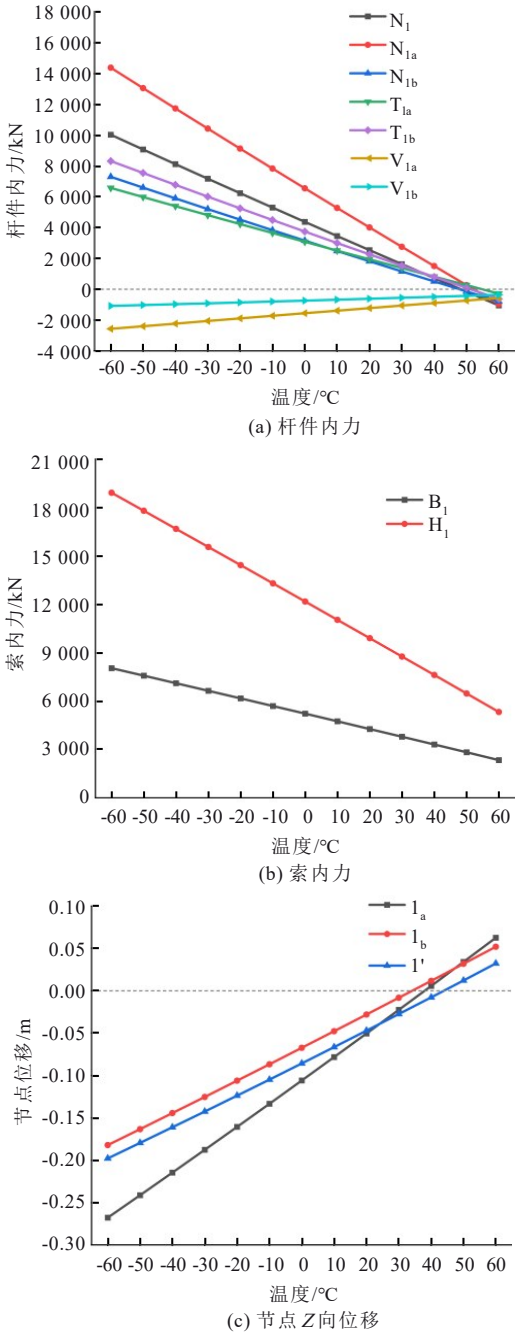
Fig. 9　Internal forces of structural members and Z-direction displacement of joints with and without wind load

节点竖向位移和各构件内力；在[0 ℃，60 ℃]时，升温荷载会减小结构节点竖向位移。温度大于 30 ℃时结构出现最大节点竖向位移向上的转变，但无论升温和降温荷载下结构最大竖向位移为 0.063 m 和 −0.268 m，均未超过规范规定限值。若考虑极端天气的影响，可以提高结构预应力水平以抵挡抵御极端温度的不利影响。

2.6　不同节点形式对结构的影响

铝合金网壳节点多为板式节点、螺栓球或类似焊接节点，实际刚度介于刚接与铰接之间。因此，在工况 1 下研究刚接、铰接及半刚性节点三种节点形式对结构内力及竖向位移的影响。刚接形式采用基准模型模拟，铰接形式根据文献[10]选用 link180 单元进行模拟，同时由抗弯刚度公式 $K=E\eta I$（η 取 0.8）引入刚度折减系数 η，折减单元惯性矩 I 的简化方法来考虑半刚接这一形式。若需更加精细化考虑节点形式，可选择采用 COMBIN39 单元对结构节点 X、Y、Z 三个方向设置独立的扭转弹簧单元进行模拟完全的三维半刚接节点。

由图 11 可知，节点半刚接与刚接时结构索杆内力及变形高度吻合，最大竖向变形仅降低 5.7%；而铰接结构则呈现明显差异，其中以上弦网壳 N、T 类



(a) 杆件内力

(b) 索内力

(c) 节点 Z 向位移

图 10　温度不同时结构构件内力和节点 Z 向位移

Fig. 10　Internal forces of structural members and Z-direction displacement of joints under different temperatures

杆件内力和上弦节点 1_a 最为显著，上部 N_{1b} 杆件内力减小 24.20%，1_a 类节点竖向位移增大 41.27%，表明该结构对于铰接形式较为敏感，铰接节点会削弱该结构整体抗变形能力。上部网壳的刚度对节点约束条件存在着一定的依赖性，在进行结构设计时要充分考虑节点形式的选择，优先采用适用于此类结构的专用节点体系。

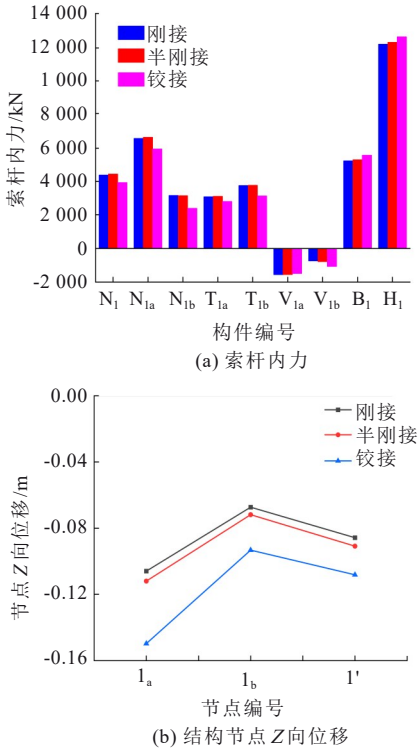


图 11 不同节点连接形式时结构构件内力和节点 Z 向位移

Fig. 11 Internal forces of structural members and Z-direction displacement of joints under different joint connection types

3 稳定性分析

3.1 特征值屈曲分析

线性特征值屈曲分析是非线性稳定性分析的基础。在工况 1 荷载组合下，打开预应力效应开关采用迭代求解方法对结构进行特征值屈曲分析，此时根据《空间网格技术规程(JGJ 7—2010)》[20]可取某一荷载倍数与屈曲荷载系数的乘积变化足够小且第一阶屈曲模态保持不变时的最低阶屈曲模态作为非线性稳定性分析中使用的初始缺陷，对应的屈曲模态如图 12 所示。在全跨均布荷载下该结构的屈曲模式表现为中心对称性，位于 1_a 处的节点间隔的出现凹陷和凸起，变形模式以竖向振动为主，伴随轻微扭转。结构位移最大处集中内圈节点处，在进行结构设计时可提高上弦脊杆的截面刚度来减小上部脊杆发生屈曲后产生的局部变形。

3.2 非线性稳定性分析

由于该结构对半跨荷载较为敏感，因此采用弧长法对该结构进行工况 1 与工况 2 下的非线性稳定性分析，图 13 给出了 2 种荷载组合工况下结构的荷载-位移曲线图。由图可知，不同荷载组合时，结构稳定承载力会有所变化，稳定承载力大小也不同。工况 2 较工况 1 极限承载能力仅提高了 13.3%，原因是工况 1 结构所承受的荷载更大，进而导致结构承载能力降低，更容易破坏，同时工况 2 的半跨荷载引发的非对称效应导致结构刚度退化加速。荷载分布的不均衡性促使应力重分布，削弱了结构的整体抗失稳能力。

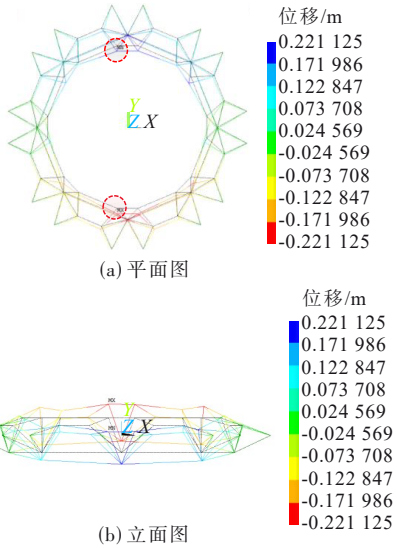


图 12 屈曲模态

Fig. 12 Buckling mode

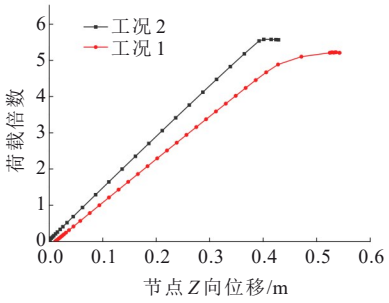
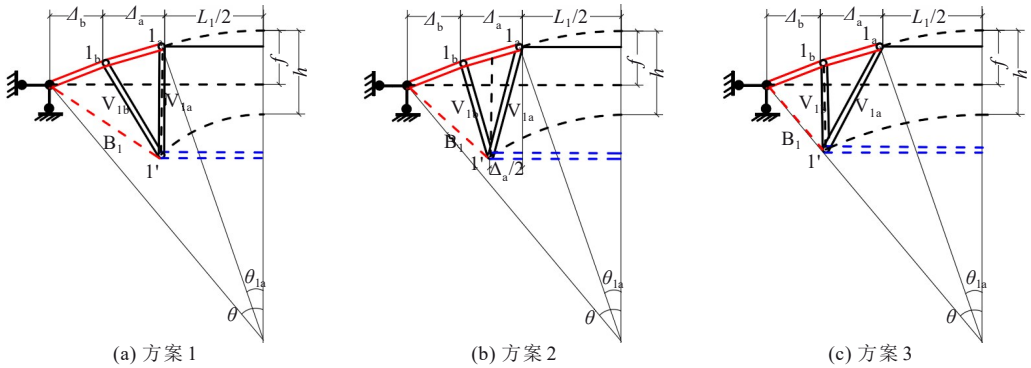


图 13 不同工况下结构荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of the structure under different working conditions

3.3 非线性稳定性参数分析

依据特征值屈曲分析结果，以曲线斜率、拐点处荷载值作为结构刚度和极限荷载判据，在工况 1 荷载组合下对结构进行非线性稳定性参数分析。矢跨比和厚跨比均分别取 0.06、0.08、0.10、0.12、0.15；预应力水平取 0.6P、0.8P、1.0P、1.2P、1.5P；下弦节点布置方案(图 14)共考虑三种(下弦节点分别位于节点 1_a 正下方、1_a 与 1_b 中点正下方和 1_b 正下方)。



(a) 方案 1　　(b) 方案 2　　(c) 方案 3

图 14　下弦节点布置方案

Fig. 14　Layout scheme of lower chord joints

（1）由图 15(a)可知，预应力增大时结构极限承载力提升，曲线前半段近似重叠反映出预应力水平不会直接影响结构的刚度。预应力水平在小于 1.0P 时，初始预应力水平的提高更能有效地提高结构极限承载能力，结构承载力对预应力更为敏感。

（2）由图 15(b)可知，厚跨比的增大会同步增大结构的整体刚度和极限承载力，说明增大厚跨比是提高结构稳定性的有效途径。当厚跨比为 0.15 时，结构承载能力最高，为 8.25，较基准模型增幅最大；厚跨比为 0.12 和 0.1 时，承载力为 5.91 和 4.94，其余低于 4。因此，建议厚跨比取值范围为 [0.1，0.15]。

（3）由图 15(c)可知，相较基准模型而言，矢跨比为 0.06、0.08、0.12、0.15 时的结构承载力分别提高或降低 59.6%、30.77%、32.69%、62.31%。增大矢跨比会引起结构极限承载倍数的减小，表明合理利用壳体的拱形受力有利于结构抵御外部荷载，在满足结构刚度及杆件强度的前提下，矢跨比宜控制在 [0.06，0.08] 区间。

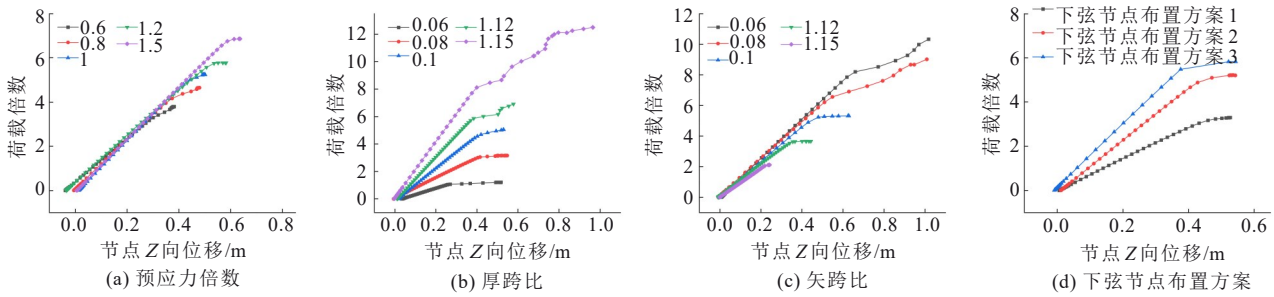
（4）由图 15(d)可知，下弦节点方案 3 性能最优，方案 2 承载力仅低 9.27%，方案 1 降幅达 45.45%，因此建议选用方案 3 进行下弦节点布置。

4　自振特性分析

4.1　结构基本自振特性分析

选取鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型铝合金弦支穹顶基准模型，通过 MASS21 单元将 1.0 倍恒载＋0.5 倍活载转换为节点质量，利用子空间迭代法对结构进行模态分析。由图 16 可知，该结构模态密集分布特征显著，其自振频率出现四段明显的水平段，存在密集区共振风险。选取场地抗震设防烈度为 7 度，设计地震分组为第一组，设计基本地震加速度为 0.1g，Ⅱ类场地类别，根据《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》[21] 可知特征周期 T_g=0.35 s，频率 f=2.857 Hz，与四段水平频率无重叠。但罕遇地震时，特征周期须增加 0.05 s，频率 f=2.5 Hz 接近第一个水平段频率，可能引发长周期共振。因此，在实际工程中可采用设置摩擦摆支座、滑动支座＋阻尼器等一些荷载效应控制方法来进行减震。

由图 17 结构自振振型图可知：结构第 1、2 阶振型基本相同，表现为以最内圈脊杆竖向变形为主导的竖向扭转振动；第 3～6 阶振型主要为竖向振动与较低水平环向的耦合振动。结构总体上呈现周期性和对称性规律，位移最大值均集中于内圈处。由



(a) 预应力倍数　(b) 厚跨比　(c) 矢跨比　(d) 下弦节点布置方案

图 15　不同参数下结构荷载-位移曲线

Fig. 15　Load-displacement curves of the structure under different parameters

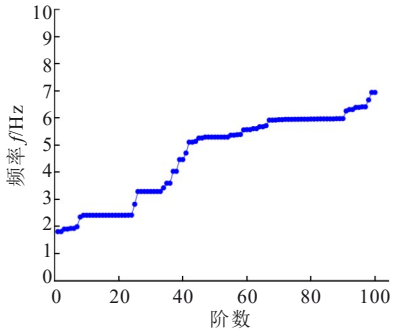


图 16 结构自振频率分布

Fig. 16 Natural frequency distribution of the structure

此可知，该结构的外圈杆件刚度强于内圈杆件刚度，环向刚度强于竖向刚度。

4.2 自振特性参数分析

结构自振特性与结构几何构型及预应力水平等因素密切相关，因此，进一步对结构自振特性进行参数化分析。跨度选取 90、120、150、180、210 m，其余参数取值范围与稳定性参数选取一致。各参数下结构前 100 阶自振频率变化如图 18 所示。由图分析可知：

基于结构基频及各阶自振频率分析，各参数下结构自振频率变化趋势总体一致。基频随着矢跨比增大而减小，随着厚跨比和预应力倍数的增大而增大，三种下弦节点布置方案中方案 3＞方案 2＞方案 1，该参数变化趋势与稳定性分析结果基本一致。在各参数选取范围中，预应力水平变化对结构自振频率影响最小，而结构跨度与自振频率呈负相关且影响最为突出。相较于基准模型跨度 180 m，跨度为 90、120、150 m 的铝合金弦支穹顶结构基频分别增幅 147.13%、83.73%、29.38%，210 m 跨度时降幅 29.43%。综合结构刚度、稳定性及实际工程跨度需求考量，结构跨度取值宜在[90 m，120 m]区间，此范围可在满足跨度要求的同时，充分发挥构件性能。

5 结论

本文将多撑杆型索穹顶结构的下部预应力索撑系统与上部铝合金网壳结构相结合，形成多撑杆型铝合金弦支穹顶结构。通过对该类结构的静力稳定性对比分析及自振特性研究，得到具体结论如下：

（1）撑杆的合理布设能够有效提升结构的整体性能。综合对比结构静力性能、稳定性能及经济指标，三种多撑杆型铝合金弦支穹顶结构中鼓蜂窝

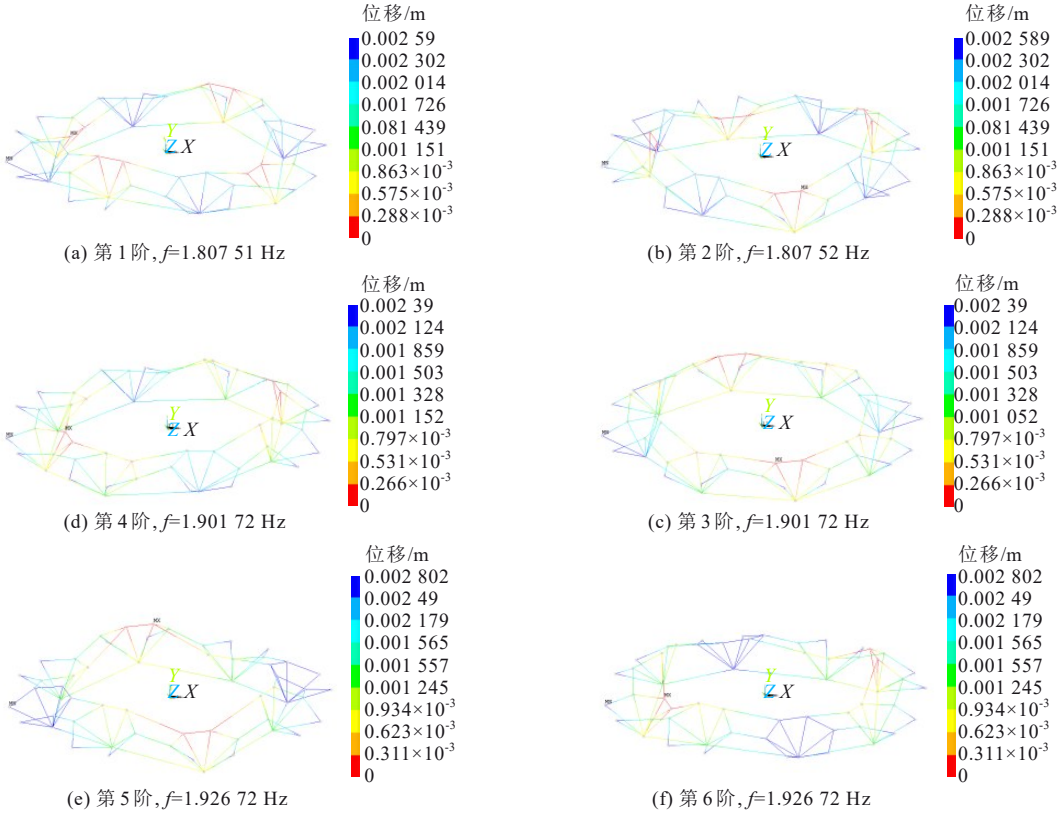


图 17 结构前 6 阶振型

Fig. 17 First six mode shapes of the structure

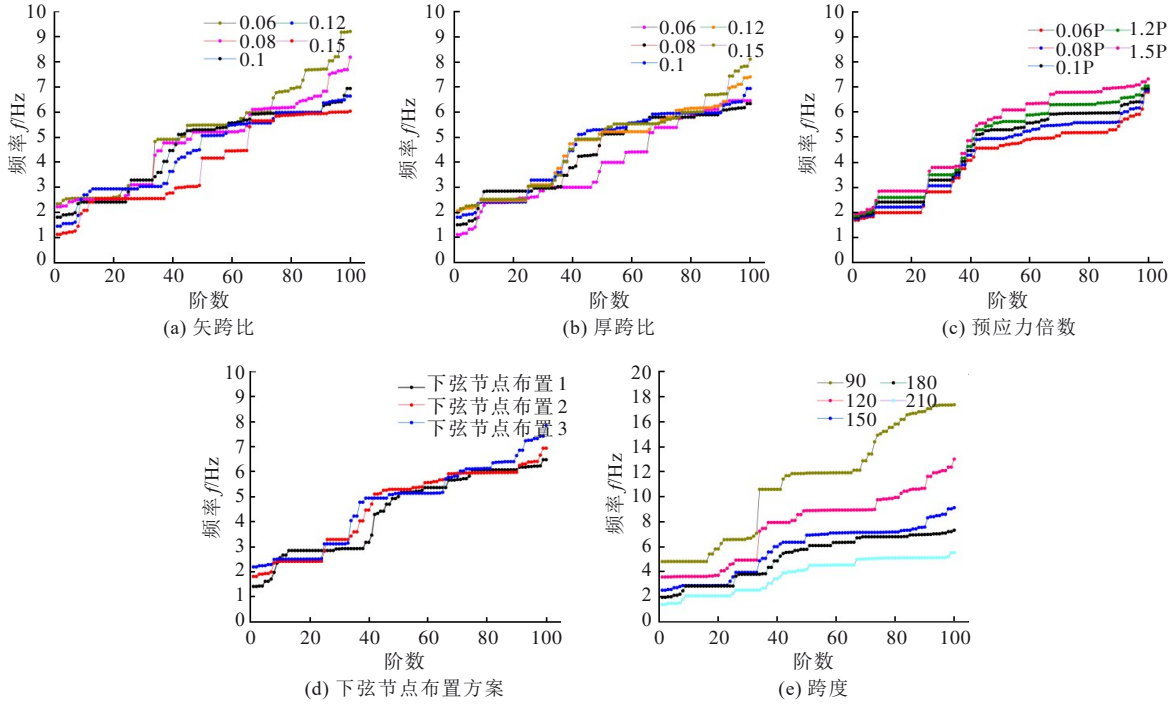


图 18　不同参数下结构自振频率分布

Fig. 18　Natural frequency distribution of the structure under different parameters

四撑杆Ⅲ型结构最优。

（2）鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型铝合金弦支穹顶结构对半跨竖向荷载和温度荷载作用较为敏感，风荷载为有利荷载，可适当提高结构初始预应力水平来抵抗不均匀荷载的能力。铰接节点形式对该结构性能影响显著，实际工程中宜采用刚性节点连接形式来保障结构的整体稳定性。

（3）提高预应力水平可以增强结构的承载能力，较低的矢跨比和较高的厚跨比更有利于结构拱形受力。综合结构性能与经济因素考虑，矢跨比与厚跨比建议分别取 0.06～0.08 和 0.1～0.15，采用下弦节点布置方案 3 时，结构刚度最优，承载能力更好。

（4）鼓蜂窝四撑杆Ⅲ型铝合金弦支穹顶结构自振频率较为集中且振型多呈对称分布，结构竖向刚度弱于环向刚度。各影响参数选取范围中跨度对结构自振频率影响最大，结构跨度比较大时可适当提高撑杆高度来增强结构的刚度和承载能力。

参考文献（References）

[1] 李亚明，贾水钟，李瑞雄. 大跨铝合金结构设计技术研究与工程实践[J]. 建筑结构，2023，53(1)：1-8，42.
LI Yaming，JIA Shuizhong，LI Ruixiong. Research on design technology and engineering practice of large-span aluminum alloy structure[J]. Building Structure，2023，53(1)：1-8，42.

[2] 刘小蔚，欧阳元文. 南京牛首山佛顶宫大穹顶铝合金板式节点试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构，2020，50(11)：59-63.
LIU Xiaowei，OUYANG Yuanwen. Experimental study and finite element analysis on the aluminum alloy gusset-type joints of the large dome in Nanjing Niushou Mountain Fo Ding Palace [J]. Building Structure，2020，50(11)：59-63.

[3] 李瑞雄，贾水钟，李亚明. 上海世博温室张弦铝合金网格结构体系研究与工程应用[J]. 建筑结构，2023，53(1)：16-22.
LI Ruixiong，JIA Shuizhong，LI Yaming. Research and engineering application of string aluminum alloy grid structure system for Shanghai World Expo Greenhouse[J]. Building Structure，2023，53(1)：16-22.

[4] TAN Y，ZHANG Y，ZHANG Q W，et al. Static properties and stability of super-long span aluminum alloy mega-latticed structures[J]. Structures，2021，33：3173-3187.

[5] 董石麟，刘宏创. 鸟巢四撑杆型索穹顶大开口体育场挑篷结构形态确定、参数分析及试设计[J]. 空间结构，2020，26(3)：3-15.
DONG Shilin，LIU Hongchuang. Morphologic determination，parametric analysis and tentative design of a novel bird nest-type cable dome structure with quad-strut layout as stadium canopy[J]. Spatial Structures，2020，26(3)：3-15.

[6] 董石麟，刘宏创，朱谢联. 葵花三撑杆Ⅱ型索穹顶结构预应力态确定、参数分析及试设计[J]. 建筑结构学报，2021，42(1)：1-17.
DONG Shilin，LIU Hongchuang，ZHU Xielian. Initial pre-

stress determination, parametric analysis and tentative design of a novel Levy-type cable dome structure with tri-strut layout[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(1): 1-17.

[7] 董石麟, 吕辉, 陈照全, 等. 鼓蜂窝四撑杆型索穹顶的结构构形及预应力态分析[J]. 空间结构, 2022, 28(4): 3-15.
DONG Shilin, LÜ Hui, CHEN Zhaoquan, et al. Structural form and initial prestress analysis on drum-shaped honeycomb-type cable dome with quad-strut layout[J]. Spatial Structures, 2022, 28(4): 3-15.

[8] 董石麟, 王艺达, 刘宏创. 鼓蜂窝序列多撑杆型索穹顶结构体系创新研究及预应力态分析[J]. 空间结构, 2022, 28(3): 3-15.
DONG Shilin, WANG Yida, LIU Hongchuang. Structural form innovation and initial prestress analysis on drum-shaped honeycomb-type cable domes with multi-strut layout[J]. Spatial Structures, 2022, 28(3): 3-15.

[9] 董石麟, 刘宏创, 王艺达. 葵花三撑杆型弦支网壳大开口体育场罩篷结构形态优化设计及张拉-受荷全过程模拟[J]. 空间结构, 2023, 29(4): 3-17.
DONG Shilin, LIU Hongchuang, WANG Yida. Morphological optimal design and full-process simulation on construction and loading of a novel sunflower-type suspen-dome with tri-strut layout as stadium canopy[J]. Spatial Structures, 2023, 29(4): 3-17.

[10] 董石麟, 涂源. 索穹顶结构体系创新研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 85-92.
DONG Shilin, TU Yuan. Structural system innovation of cable dome structures[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 85-92.

[11] 臧倩, 刘红波, 陈志华, 等. 铝合金弦支穹顶结构稳定性研究[J]. 空间结构, 2024, 30(1): 16-22, 37.
ZANG Qian, LIU Hongbo, CHEN Zhihua, et al. Study on stability behavior of aluminum alloy suspend-dome[J]. Spatial Structures, 2024, 30(1): 16-22, 37.

[12] 柳明亮, 赵均海, 周春娟, 等. 大跨空间桁架弦支穹顶结构静力性能参数化分析[J]. 建筑结构, 2025, 55(3): 1-8.
LIU Mingliang, ZHAO Junhai, ZHOU Chunjuan, et al. Static performance parameter analysis of large-span space truss suspend-dome structure[J]. Building Structure, 2025, 55(3): 1-8.

[13] HE Y J, ZHOU X H, ZHANG X T. Finite element analysis of the elastic static properties and stability of pretensioned cylindrical reticulated mega-structures[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 60: 1-11.

[14] 桂国庆, 王玉娥. 铝合金单层球面网壳的非线性稳定分析[J]. 工程力学, 2006, 23(增刊2): 32-35, 216.
GUI Guoqing, WANG Yu'e. Nonlinear stability analysis of aluminum alloy single-layer reticulated spherical shells[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(Suppl02): 32-35, 216.

[15] 李永梅, 郭磊, 张微敬. 地震作用下开口Kiewitt型弦支穹顶结构的动力稳定[J]. 空间结构, 2011, 17(4): 16-22.
LI Yongmei, GUO Lei, ZHANG Weijing. Dynamic stability of Kiewitt suspen dome with a hole under earthquakes[J]. Spatial Structures, 2011, 17(4): 16-22.

[16] 李宏胜, 薛素铎, 吴逸枫, 等. 圆柱面弦支穹顶Levy型与无环索型索系性能对比研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(1): 41-48, 69.
LI Hongsheng, XUE Suduo, WU Yifeng, et al. Comparative study on the performance of Levy type and loop-free type cable-strut system of cylindrical suspen-dome[J]. Building Structure, 2022, 52(1): 41-48, 69.

[17] ZENG J M, LV H, ZHU Z Y, et al. Static and stability analyses of multi-strut type aluminium alloy suspen-dome structure with large opening[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205: 112529.

[18] ZENG J M, LV H, ZHU Z Y, et al. Seismic performance of pentagonal type aluminum alloy suspen-dome structure with large opening[J]. Structures, 2024, 69: 107312.

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 屋盖结构风荷载标准: JGJ/T 481—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for wind loads on roof structures: JGJ/T 481—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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, 2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for space frame structures: JGJ 7—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of thePRC, State Administration for Market Regulation. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.

(本文编辑: 贾源源)