

葵花双撑杆型索穹顶预应力及多参数敏感度分析

董石麟¹, 陈伟刚^{1,2}, 涂源¹, 郑晓清^{1,3}

(1. 浙江大学空间结构研究中心, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江东南网架股份有限公司, 浙江 杭州 311200;
3. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028)

摘要: 提出了一种新颖的葵花双撑杆型索穹顶结构, 具有斜索数量少、施工张拉成形方便、可有效防止环索滑移等显著特点; 基于节点平衡方程, 给出了全套预应力态索杆内力的递推计算公式, 对结构的下弦环索数、矢跨比、下弦节点位置、是否开设内孔等参数做了 72 个算例, 并验证了预应力态索杆内力计算公式是精确解。分析结果表明, 结构预应力态时索杆内力从内圈向外围是成倍递增的; 下弦节点位置沿竖向与水平向发生改变后, 均使预应力态索杆内力发生较大的变化; 矢跨比在 0.1~0.2 范围内时, 矢跨比对索杆内力的影响较小; 说明了结构矢跨比、结构中部是否开孔属非敏感性参数, 而下弦环索数、下弦节点位置则属敏感性参数, 在进行结构设计时应重点考虑。该结构形式的提出为索穹顶的选型、设计计算和施工提供了新方案、新思路。

关键词: 葵花双撑杆型索穹顶; 结构构形; 预应力态; 简捷分析法; 敏感度分析; 算例计算

中图分类号: TU393.3

文献标志码: A

Analysis of Multi-parameter Sensitivity and Prestressing Force Distribution of Sunflower-type Cable Dome with Double Struts

DONG Shilin¹, CHEN Weigang^{1,2}, TU Yuan¹, ZHEN Xiaqing^{1,3}

(1. Space Structures Research Center, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhejiang Southeast Space Frame Co., Ltd., Hangzhou 311200, China; 3. The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China)

Abstract: A new type of sunflower-type cable dome with double struts, which has the characteristics of fewer number of inclined cables, convenient tensioning forming and effective prevention of ring slip, is proposed in this paper. Based on the nodal equilibrium equation, a recursive calculation formula for the internal force of the prestressed cable strut is given. 72 examples are given, including the

number of lower chord cables, the ratio of sagittal span and the position of lower chord joint of the structures. It is verified that the formula for calculating the internal force of prestressed cables is exact solution. The analysis results show that the internal force of the cable strut increases exponentially from the inner ring to the periphery. When the position of the lower chord joint changes vertically or horizontally, the internal force of the prestressed cable strut is changed greatly. When the rise-span ratio is within the range of 0.1~0.2, the influence of it is less. It is shown that rise-span ratio and the opening in the middle of the structure are non-sensitive parameters, while the number of the lower chord cable and the position of the lower chord joint are sensitive parameters, and should be considered in the design of the structure. The proposed structure provides new forms and new concept for the selection, design and construction of cable dome.

Key words: sunflower-type cable dome with double struts; structural configuration; prestressing state; simple analysis method; sensitivity analysis; calculated examples

从索穹顶的结构形体而言, 1986 年在韩国汉城亚运会, 建成了首例肋环型索穹顶^[1]; 十年后, 1996 年在美国亚特兰大奥运会, 建成了创新的乔治亚葵花型索穹顶^[2]; 又隔十年后, 在 2005 年~2006 年, 我国提出并研究了鸟巢型、Kiewiff 型索穹顶, 同时也提出葵花型与肋环型可构成组合形式索穹顶^[3-6]; 再隔十年, 2016 年~2017 年, 我国建成了两座葵花型——肋环型组合形式索穹顶, 即平面尺寸为 82 m × 103 m 的天津理工大学体育馆^[7]和跨度为 77.3 m 的四川雅安天全体育馆。但以上所涉及的均是基于传统意义上“拉索海洋和压杆孤岛”Fuller 构想^[8]的张拉整体式索穹顶结构, 其上、下弦节点间都只设有

收稿日期: 2018-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(51478420)

第一作者: 董石麟(1932—), 男, 教授, 中国工程院院士, 工学博士, 主要研究方向为空间结构。E-mail: kjjgzz@163.com

通信作者: 陈伟刚(1986—), 男, 高工, 工学博士, 主要研究方向为空间钢结构、铝合金结构。E-mail: wgchen@zju.edu.cn

一根垂直于水平面的撑杆,结构形体比较单一。

近几年来,我国不采用“拉索海洋和压杆孤岛”的 Fuller 构想,通过在索穹顶的下弦节点设置 2 根、3 根、4 根等多根撑杆,且不再局限于将撑杆和水平面保持垂直,提出了创新的 3 种肋环序列索穹顶,即肋环单撑杆型索穹顶(包括肋环型索穹顶)、肋环双撑杆型索穹顶和肋环四撑杆型索穹顶,以及 4 种葵花序列型索穹顶,即葵花单撑杆型索穹顶(包括葵花型索穹顶)、葵花双撑杆型索穹顶、葵花三撑杆 I 型索穹顶和葵花三撑杆 II 型索穹顶,并作了若干对比分析研究^[9]。

本文着重对葵花双撑杆型索穹顶的预应力态的简捷算法及多参数敏感度进行研究,以了解这种索穹顶结构的预应力态分布规律、受力特点和多种参数对预应力态分布的敏感度。

1 葵花双撑杆型索穹顶构形及特点

设有开孔的葵花双撑杆型索穹顶的三维图和剖面示意图如图 1 所示,图中 A、B 分别表示上、下弦节点。它的结构构形由上弦脊索、斜索、下弦环索、交于上、下弦节点的二根撑杆、上弦内环索和刚性外环梁组成。图中,脊索、上弦内环索和刚性外环梁均位于结构上弦层,因此采用了同种线型表示。

交于上、下弦节点 A、B 的杆件总数为相交上弦杆件数、下弦杆件数、斜杆数以及撑杆数的总和,即:

$$A_{\text{num}} = 4 + 0 + 1 + 2 = 7 \quad (1)$$

$$B_{\text{num}} = 0 + 2 + 1 + 2 = 5 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: A_{num} 、 B_{num} 分别表示交于上、下弦节点 A、B 的杆件总数。

整个索穹顶的节点总数 T 和索杆总数 M 分别为(以图 1 圆形平面开孔的索穹顶为例,但不计刚性环梁):

$$T = n[(m+1) + m] = n(2m+1) \quad (3)$$

$$M = n[(2m+1) + m + m + 2m] = n(6m+1) \quad (4)$$

式(3)~(4)中: n 为多边形数; m 为环索数。

与传统符合 Fuller 构想的葵花型索穹顶相比,由图 1 及式(1)~(4)可以看出,葵花双撑杆型索穹顶的结构形体具有如下一些特色和优势:

(1) 交于上、下弦节点的杆件数分别为 7 和 5,平均数为 6;杆件布置匀称,每个节点均有两根撑杆相交,撑杆的稳定性以及整体结构的稳定性可得以提高。

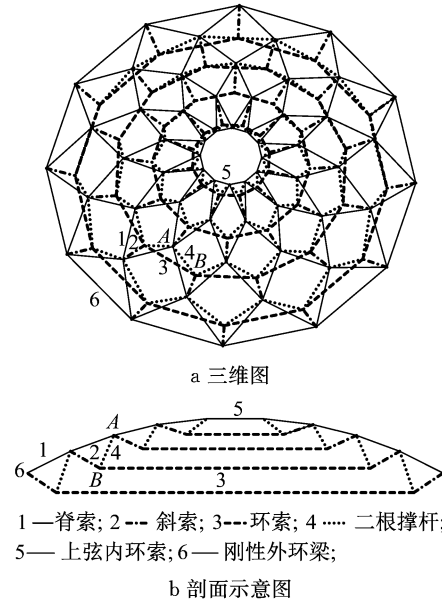


图 1 葵花双撑杆型索穹顶三维图及剖面示意图
Fig. 1 3D schematic drawing and cross-section of sunflower-type cable dome with two struts

(2) 斜索是跳格错位布设的,每个上、下弦节点均只有一根斜索相交,比葵花型索穹顶的斜撑数减少了 50%,有利于减少索材用量,降低工程造价。

(3) 由于节点的斜索数只有一根,在采用斜索主动施加预应力成形时,比具有二根斜索时张拉成形更为方便,而且可有效防止左右二根张拉索内力不等时环索产生滑移的不利影响。

以上三点表明,葵花双撑杆型索穹顶的构形优于一般葵花型索穹顶结构。

2 索穹顶预应力态的简捷算法

2.1 设有内孔的结构

设有内孔的圆形平面葵花双撑杆型索穹顶结构,当环向分为 n 等份时,利用轴对称条件,通常仅可分析研究其中一枝半榀空间桁架即可。由于索穹顶均设有刚度很大的外环梁,故可认为结构是支承在周边不动铰支座上。 $1/n$ 结构分析示意图和计算简图如图 2 所示,节点 $1, 2', 3, \dots, i', \dots, j$ 在同一对称平面内,而节点 $2, 3', \dots, i, \dots$ 在相邻的另一个对称平面内。实际上,所有上、下弦节点都位于某一个对称平面内。由结构力学方法可判定,该结构为一次超静定结构。

索穹顶结构分析计算用的剖面图和平面图如图 3 所示。图中上弦脊索用实线“—”表示,下弦环索用虚线“_ _ _”表示,斜索用点划线“_ · _ · _”表示,撑杆用点线“_ · · · _ · · · _”表示(下同)。

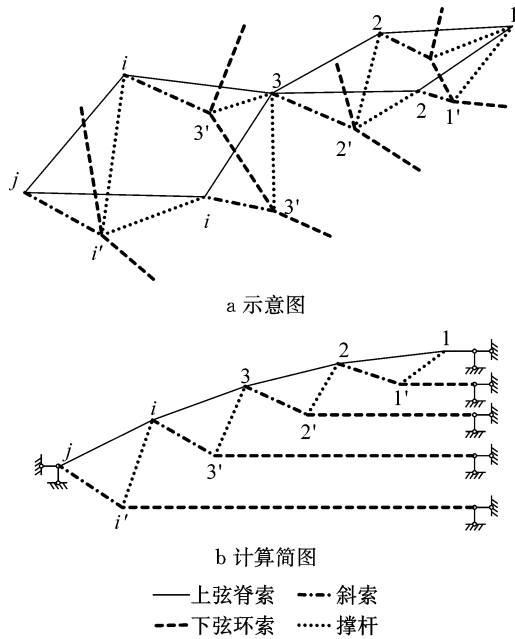


图 2 设有内孔时 1/n 结构分析示意图和计算简图
Fig.2 Calculation diagram and computing model of 1/n structure with inner hoop

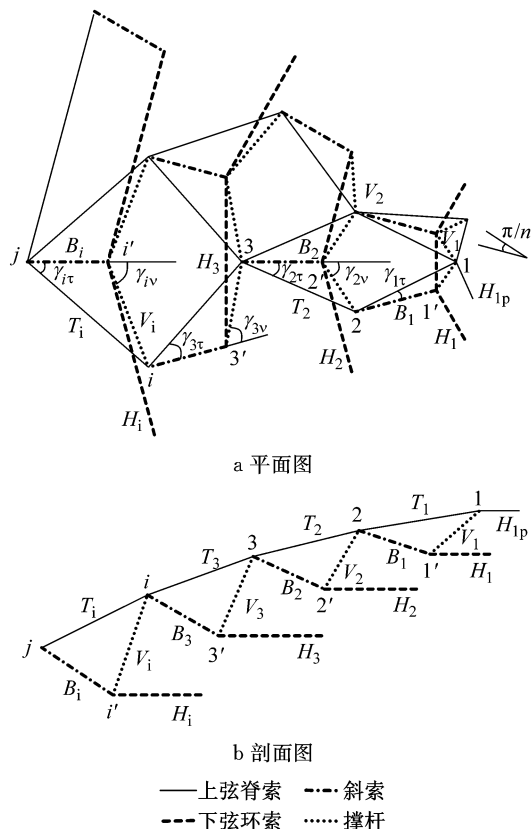


图 3 设有内孔时结构分析计算用剖面图和平面图
Fig.3 Sectional and plan diagrams for calculation with inner hoop

索穹顶结构的脊索、环索、斜索、撑杆以及上弦内环索的内力分别用 T_i 、 H_i 、 B_i 、 V_i 、 H_{1p} 表示 ($i=1, 2, \dots, i, \dots, j$); α_i 、 β_i 、 ϕ_i 分别表示脊索、斜索、撑杆

与水平面的倾角; γ_{it} 、 γ_{iv} 分别表示脊索、撑杆的水平投影与通过下弦节点 i 的对称面的水平投影轴线之间的夹角。

以上弦内环索处的脊索内力 T_1 为基准, 由内向外对各节点建立平衡方程, 可逐次推导求得各索杆内力的计算公式:

节点 1:

$$V_1 = -\frac{\sin \alpha_1}{\sin \phi_1} T_1 \quad (5)$$

$$H_{1p} = \left[\cos \alpha_1 \cos \left(\gamma_{1\tau} + \frac{\pi}{n} \right) - \sin \alpha_1 \cot \phi_1 \cos \left(\gamma_{1v} + \frac{\pi}{n} \right) \right] T_1 / (\sin \pi/n) \quad (6)$$

节点 $i' (i \geq 1)$:

$$B_i = -\frac{2 \sin \phi_i}{\sin \beta_i} V_i \quad (7)$$

$$H_i = -\frac{\cos \phi_i \cos \gamma_{iv} + \sin \phi_i \cot \beta_i}{\sin \pi/n} V_i \quad (8)$$

节点 $i (i \geq 2)$:

$$T_i = \left\{ 2 \left[\sin \alpha_{i-1} \cos \phi_i \cos \left(\gamma_{iv} + \frac{\pi}{n} \right) - \cos \alpha_{i-1} \sin \phi_i \right] T_{i-1} - \left[\sin \beta_{i-1} \cos \phi_i \cos \left(\gamma_{iv} + \frac{\pi}{n} \right) + \cos \beta_{i-1} \sin \phi_i \right] B_{i-1} \right\} / \left\{ 2 \left[\sin \alpha_i \cos \phi_i \cos \left(\gamma_{iv} + \frac{\pi}{n} \right) - \cos \alpha_i \sin \phi_i \cos \left(\gamma_{it} + \frac{\pi}{n} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

$$V_i = \left\{ 2 \left[\cos \alpha_{i-1} \cos \gamma_{(i-1)\tau} \sin \alpha_i - \sin \alpha_{i-1} \cos \alpha_i \cos \left(\gamma_{it} + \frac{\pi}{n} \right) \right] T_{i-1} + \left[\cos \beta_{i-1} \sin \alpha_i + \sin \beta_{i-1} \cos \alpha_i \cos \left(\gamma_{it} + \frac{\pi}{n} \right) \right] B_{i-1} \right\} / \left\{ 2 \left[\sin \alpha_i \cos \phi_i \cos \left(\gamma_{iv} + \frac{\pi}{n} \right) - \cos \alpha_i \sin \phi_i \cos \left(\gamma_{it} + \frac{\pi}{n} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

由式(5)~(10)可以看出, 若内环处脊索内力 T_1 已知, 则索穹顶所有索杆预应力的分布便可确定。

2.2 不设内孔结构

在对圆形平面不设内孔的葵花双撑杆型索穹顶预应力态分析时, 其 1/n 结构示意图和计算简图如图 4 所示, 图中孔内结构仅由上弦脊索 $O1$ 、斜索 $O'1$ 和中心竖杆 OO' 组成。

结构分析计算用的剖面图和平面图如图 5 所示, 孔内结构的上弦脊索、斜索和中心竖杆的内力分

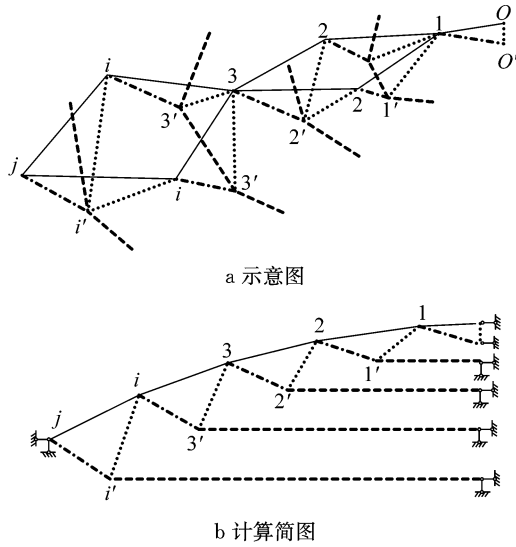


图 4 不设内孔时 1/n 结构分析示意图和计算简图
Fig.4 Calculation diagram and computing model of 1/n structure with inner hoop

别用 T_0 、 B_0 和 V_0 表示, α_0 、 β_0 为相应上弦脊索和斜索的倾角。

同样,可采用节点平衡方程,逐次推导求得不设内孔的葵花双撑杆型索穹顶预应力态各索杆内力计算公式(以 T_1 为基准)。

节点 O 、 O' :

$$T_0 = \frac{-V_0}{n \sin \alpha_0} \quad (11)$$

$$B_0 = \frac{-V_0}{n \sin \beta_0} \quad (12)$$

节点 1:

$$V_1 = \frac{-2 \sin \alpha_1}{\sin \phi_1} T_1 \quad (13)$$

$$V_0 = \left\{ 2n \left[\sin \alpha_1 \cos \phi_1 \cos \left(\gamma_{1v} + \frac{\pi}{n} \right) - \cos \alpha_1 \cos \left(\gamma_{1\tau} + \frac{\pi}{n} \right) \right] \right\} T_1 / (\cot \alpha_0 + \cot \beta_0) \quad (14)$$

节点 i' ($i \geq 1$) 的内力 H_i 和 B_i 以及节点 i ($i \geq$

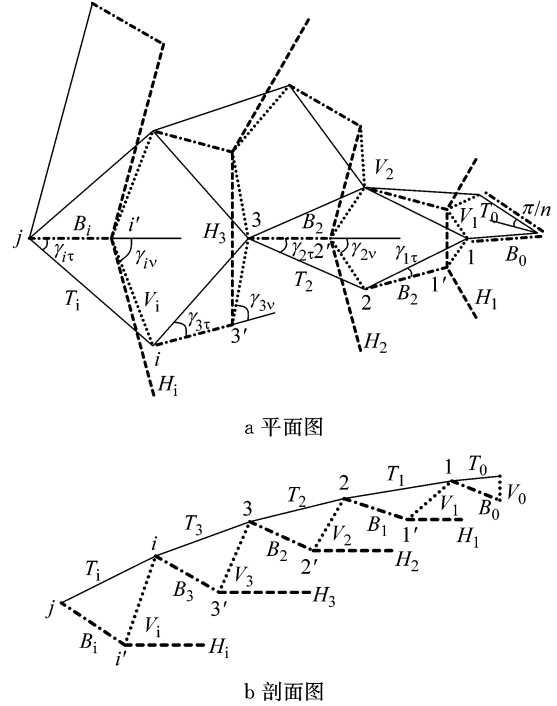


图 5 不设内孔时结构分析计算用剖面图和平面图
Fig.5 Sectional and plan diagrams for calculation without inner hoop

2) 内力 T_i 和 V_i 与 2.1 节开孔时的计算公式(5)~(10)完全相同,可直接应用. 因此,若预应力 T_1 已知,则整个不开孔的索穹顶结构的索杆预应力分布也可确定。

3 预应力索杆内力的参数分析

3.1 设有内孔结构

设有内孔的葵花双撑杆型索穹顶,跨度 L 、孔跨 L_1 、矢高 f 、球面穹顶半径 R ,简化的半榀平面桁架尺寸如图 6 所示。

各圈上弦节点水平投影构成各圈圆半径间满足下列条件:

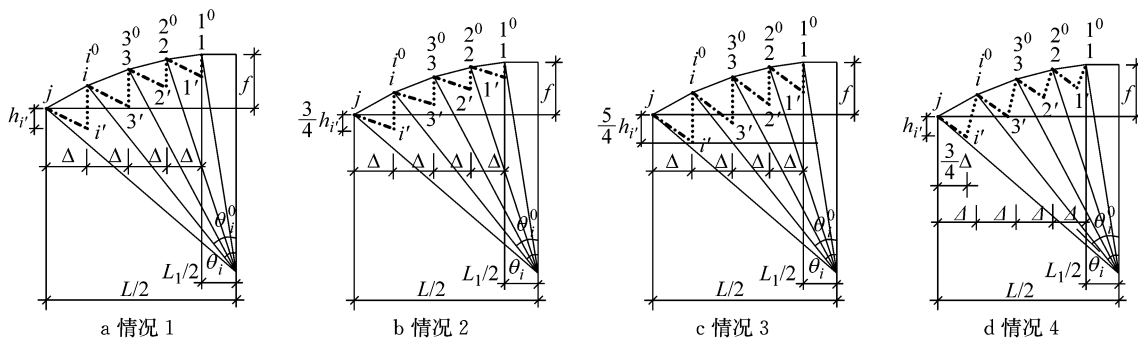


图 6 设有内孔时结构简化半榀平面桁架图
Fig.6 Simplified semi-structure of plane truss with inner hoop

$$r_i - r_{i-1} = \Delta \quad (15)$$

由几何关系可计算确定:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{L^2}{8f} + \frac{f}{2} \\ \Delta &= \frac{L-L_1}{2(j-1)} \\ r_i &= R \sin \theta_i = \frac{L_1}{2} + (i-1)\Delta \\ r_{i'} &= R \sin \theta_i^0 \\ h_i &= R(\cos \theta_i - \cos \theta_{i+1}) \\ h_{i'} &= R(\cos \theta_i^0 - \cos \theta_{i+1}) \\ h_{\phi} &= h_{i'} + h_i \\ S_i &= \sqrt{\left(r_{i+1} - r_i \cos \frac{\pi}{n}\right)^2 + \left(r_i \tan \frac{\pi}{n}\right)^2} \\ S_{i'} &= r_{i+1} - r_{i'} \\ S_{\phi} &= \sqrt{\left(r_i' - r_i \cos \frac{\pi}{n}\right)^2 + \left(r_i \tan \frac{\pi}{n}\right)^2} \\ \alpha_i &= \tan^{-1} \frac{h_i}{S_i} \\ \beta_i &= \tan^{-1} \frac{h_{i'}}{S_i} \\ \phi_i &= \tan^{-1} \frac{h_{\phi}}{S_{\phi}} \\ \gamma_{iv} &= \tan^{-1} \frac{r_i \tan \frac{\pi}{n}}{r_{i+1} - r_i \cos \frac{\pi}{n}} \\ \gamma_{i'v} &= \tan^{-1} \frac{r_i \tan \frac{\pi}{n}}{r_i' - r_i \cos \frac{\pi}{n}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式(16)中: h_i 、 $h_{i'}$ 、 h_{ϕ} 为上弦 T_i 、斜索 B_i 和撑杆 V_i 的高度; S_i 、 $S_{i'}$ 、 S_{ϕ} 为相应索杆的水平投影长度。

根据下弦节点 i' 的位置不同,分 4 种情况分析:情况 1, $r_{i'} - r_i = 0$, 即 i 、 i' 、 i 所构成的三角形平面垂直于水平面,如图 6a 所示。根据几何关系式(16),由式(5)~(10),在当 $f/L = 0.10, 0.15, 0.20, j = 2, 3, 4, L_1/2 = \Delta, n = 12$, 相对内力 $T_1 = 1.0$ 时,可求得各索杆预应力态的内力见表 1 所示;情况 2, $r_{i'} - r_i = 0$ 且 $h_{i'} = 0.75R(\cos \theta_i^0 - \cos \theta_{i+1})$, 如图 6b 所示,这表示与情况 1 相比, i' 的水平位置不变,而斜索竖向高度减少了 25%;情况 3, $r_{i'} - r_i = 0$ 且 $h_{i'} = 1.25R \cdot (\cos \theta_i^0 - \cos \theta_{i+1})$, 如图 6c 所示,与情况 1 相比, i' 的

水平位置不变,斜索竖向高度则增加了 25%;情况 4, $r_{i+1} - r_i = 0.75\Delta$ 且 $h_{i'} = R(\cos \theta_i^0 - \cos \theta_{i+1})$, 如图 6d 所示,这表示与情况 1 相比, i' 的竖向高度不变,斜索的水平长度减少了 25%。类同于情况 1, 同样可求得情况 2、情况 3 和情况 4 时各索杆预应力的计算结果,详见表 1。

3.2 不设内孔结构

不设内孔结构的葵花双撑杆型索穹顶的简化半楹平面桁架图仍可用图 6 表示,但应考虑顶部孔洞处由图 5 的剖面图替代,并可认为:

$$\beta_0 = \alpha_0 = \tan^{-1} \frac{R(1 - \cos \theta_1)}{\Delta} \quad (17)$$

此时,根据几何关系式(16)、(17),由式(5)~(14)同样可求得不设内孔时葵花双撑杆型索穹顶 4 种情况下的预应力态索杆内力(相对内力 $T_1 = 1.0$ 时)的计算结果,详见表 2。

由表 1、表 2 的数表分析可知,通过对索穹顶结构进行总计 72 个算例的多参数分析,葵花双撑杆型索穹顶预应力态分布规律、受力特性和敏感度可归纳如下几点:

(1) 对于索穹顶结构,当相对内力 $T_1 = 1.0$ 时,除开孔时孔边内力 H_{1p} , 以及不开孔时顶部内力 T_0 、 B_0 和 V_0 各有自己的独特数值外,节点 i' ($i \geq 1$) 的内力 H_i 和 B_i 以及节点 i ($i \geq 2$) 内力 T_i 和 V_i 不受索穹顶结构开孔与否的影响。二者索杆内力的计算公式完全相同,索杆内力的计算结果也完全相同。

(2) 当结构矢跨比在 0.1~0.2 范围内变化时,索穹顶结构预应力态索杆内力的变化幅度不足 10%,表明矢跨比对索杆内力变化的敏感度甚差,几乎可忽略不计。

(3) 预应力态的索杆内力从内圈向外围是成倍递增的。这也说明工程设计时应尽量减少下弦环索数,一般设三道环索已足够了。

(4) 下弦节点 B 的位置设置对预应力态索杆内力的分布比较敏感。文中 72 个算例中,在斜索水平长度不变情况下,分别将其高度分别缩短和增高 25%,索杆最大内力分别约增大 1.0 倍和减小 0.4 倍;在斜索高度不变情况下,将水平长度缩短 25% 时,索杆最大内力可增大约 0.6 倍。因此,合理选取下弦节点 B 的位置是结构优化的重点。

表 1 设有内孔时葵花双撑杆型索穹顶预应力态索杆内力计算表

Tab.1 Pretressing force distribution and struts' internal force of two-struts sunflower-type cable dome with inner hoop

f/L	j	i	情况 1: $r'_i - r_i = 0, h'_i = R(\cos \theta'_i - \cos \theta_{i+1})$					情况 2: $r'_i - r_i = 0, h'_i = 0.75R(\cos \theta'_i - \cos \theta_{i+1})$					
			T_i	V_i	B_i	H_i	H_{1p}	T_i	V_i	B_i	H_i	H_{1p}	
0.1	3	1	1.00	-0.16	1.95	3.76	3.56	1.00	-0.17	2.59	5.00	3.57	
		2	2.44	-0.79	4.35	8.21		2.83	-0.96	6.60	12.65		
	4	1	1.00	-0.13	1.95	3.78	3.58	1.00	-0.13	2.59	5.03	3.59	
		2	2.40	-0.63	4.27	8.25		2.78	-0.78	6.54	12.72		
		3	6.38	-2.26	9.85	18.72		8.49	-3.24	17.15	33.23		
	5	1	1.00	-0.11	1.95	3.79	3.59	1.00	-0.11	2.60	5.04	3.60	
		2	2.39	-0.56	4.24	8.27		2.77	-0.70	6.51	12.75		
		3	6.38	-2.26	9.85	18.72		8.49	-3.24	17.15	33.23		
	0.15	3	1	1.00	-0.23	1.95	3.71	3.52	1.00	-0.23	2.57	4.94	3.52
			2	2.53	-1.09	4.56	8.10		2.93	-1.30	6.75	12.49	
		4	1	1.00	-0.17	1.95	3.75	3.56	1.00	-0.17	2.59	5.00	3.57
			2	2.44	-0.81	4.36	8.20		2.83	-0.97	6.60	12.65	
3			6.63	-2.93	10.49	18.60		8.83	-4.09	17.78	33.02		
5		1	1.00	-0.14	1.95	3.77	3.58	1.00	-0.14	2.59	5.02	3.58	
		2	2.41	-0.67	4.29	8.24		2.79	-0.83	6.55	12.71		
		3	6.63	-2.93	10.49	18.60		8.83	-4.09	17.78	33.02		
0.2		3	1	1.00	-0.28	1.95	3.66	3.47	1.00	-0.28	2.56	4.87	3.47
			2	2.66	-1.42	4.86	7.99		3.08	-1.67	6.99	12.31	
		4	1	1.00	-0.20	1.95	3.73	3.54	1.00	-0.21	2.58	4.96	3.54
			2	2.49	-0.98	4.48	8.14		2.89	-1.17	6.69	12.56	
	3		7.02	-3.74	11.42	18.47		9.35	-5.13	18.74	32.79		
	5	1	1.00	-0.16	1.95	3.76	3.56	1.00	-0.17	2.59	5.00	3.57	
		2	2.44	-0.79	4.35	8.21		2.82	-0.96	6.59	12.65		
		3	7.02	-3.74	11.42	18.47		9.35	-5.13	18.74	32.79		
	0.1	3	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08
			2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69	
		4	1	1.00	-0.12	1.57	3.02	3.58	1.00	-0.19	1.73	3.87	3.10
			2	2.17	-0.54	3.13	5.98		2.64	-0.82	4.42	9.77	
3			5.25	-1.76	6.66	12.34		7.91	-3.15	11.73	25.46		
5		1	1.00	-0.10	1.56	3.03	3.59	1.00	-0.18	1.73	3.88	3.10	
		2	2.16	-0.47	3.09	6.00		2.62	-0.75	4.38	9.81		
		3	5.25	-1.76	6.66	12.34		7.91	-3.15	11.73	25.46		
0.15		3	1	1.00	-0.22	1.58	2.97	3.51	1.00	-0.27	1.74	3.79	3.04
			2	2.28	-0.97	3.48	5.88		2.77	-1.27	4.72	9.50	
		4	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08
			2	2.21	-0.71	3.24	5.95		2.68	-0.99	4.51	9.68	
	3		5.46	-2.33	7.30	12.26		8.21	-3.89	12.48	25.11		
	5	1	1.00	-0.13	1.57	3.02	3.57	1.00	-0.20	1.74	3.86	3.09	
		2	2.18	-0.58	3.15	5.98		2.65	-0.86	4.44	9.75		
		3	5.46	-2.33	7.30	12.26		8.21	-3.89	12.48	25.11		
	0.2	3	1	1.00	-0.28	1.60	2.93	3.46	1.00	-0.31	1.74	3.72	3.00
			2	2.40	-1.27	3.81	5.79		2.91	-1.61	5.04	9.26	
		4	1	1.00	-0.20	1.58	2.98	3.53	1.00	-0.25	1.74	3.81	3.06
			2	2.25	-0.87	3.38	5.90		2.73	-1.16	4.63	9.57	
3			5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67		
5		1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08	
		2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69		
		3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67		
5		1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08	
		2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69		
		3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67		
5		1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08	
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57	24.67			
5	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	3.56	1.00	-0.22	1.74	3.84	3.08		
	2	2.20	-0.69	3.23	5.95		2.67	-0.97	4.50	9.69			
	3	5.78	-3.01	8.21	12.18		8.67	-4.81	13.57				

表 2 不设内孔时葵花双撑杆型索穹顶预应力态索杆内力计算表
 Tab.2 Pretressing force distribution and struts' internal force of two-struts sunflower-type cable dome without inner hoop

f/L	j	i	情况 1: $r'_i - r_i = 0, h'_i = R(\cos \theta'_i - \cos \theta_{i+1})$				情况 2: $r'_i - r_i = 0, h'_i = 0.75R(\cos \theta'_i - \cos \theta_{i+1})$				
			T_i	V_i	B_i	H_i	T_i	V_i	B_i	H_i	
0.1	3	0	0.92	-0.21	0.92		0.92	-0.21	0.92		
		1	1.00	-0.16	1.95	3.76	1.00	-0.17	2.59	5.00	
		2	2.44	-0.79	4.35	8.21	2.83	-0.96	6.60	12.65	
	4	0	0.93	-0.15	0.93		0.93	-0.15	0.93		
		1	1.00	-0.13	1.95	3.78	1.00	-0.13	2.59	5.03	
		2	2.40	-0.63	4.27	8.25	2.78	-0.78	6.54	12.72	
	5	3	6.38	-2.26	9.85	18.72	8.49	-3.24	17.15	33.23	
		0	0.93	-0.12	0.93		0.93	-0.12	0.93		
		1	1.00	-0.11	1.95	3.79	1.00	-0.11	2.60	5.04	
		2	2.39	-0.56	4.24	8.27	2.77	-0.70	6.51	12.75	
	0.15	3	3	6.38	-2.26	9.85	18.72	8.49	-3.24	17.15	33.23
			4	18.06	-6.48	23.11	44.44	27.31	-10.85	46.04	90.19
0			0.91	-0.30	0.91		0.91	-0.30	0.91		
4		1	1.00	-0.23	1.95	3.71	1.00	-0.23	2.57	4.94	
		2	2.53	-1.09	4.56	8.10	2.93	-1.30	6.75	12.49	
		0	0.92	-0.22	0.92		0.92	-0.22	0.92		
5		1	1.00	-0.17	1.95	3.75	1.00	-0.17	2.59	5.00	
		2	2.44	-0.81	4.36	8.20	2.83	-0.97	6.60	12.65	
		3	6.63	-2.93	10.49	18.60	8.83	-4.09	17.78	33.02	
		0	0.93	-0.17	0.93		0.93	-0.17	0.93		
5		1	1.00	-0.14	1.95	3.77	1.00	-0.14	2.59	5.02	
		2	2.41	-0.67	4.29	8.24	2.79	-0.83	6.55	12.71	
	3	6.63	-2.93	10.49	18.60	8.83	-4.09	17.78	33.02		
	4	18.71	-7.95	24.83	44.30	28.29	-12.95	48.05	89.89		
0.2	3	0	0.90	-0.37	0.90		0.90	-0.37	0.90		
		1	1.00	-0.28	1.95	3.66	1.00	-0.28	2.56	4.87	
		2	2.66	-1.42	4.86	7.99	3.08	-1.67	6.99	12.31	
	4	0	0.92	-0.27	0.92		0.92	-0.27	0.92		
		1	1.00	-0.20	1.95	3.73	1.00	-0.21	2.58	4.96	
		2	2.49	-0.98	4.48	8.14	2.89	-1.17	6.69	12.56	
	5	3	7.02	-3.74	11.42	18.47	9.35	-5.13	18.74	32.79	
		0	0.92	-0.21	0.92		0.92	-0.21	0.92		
		1	1.00	-0.16	1.95	3.76	1.00	-0.17	2.59	5.00	
		2	2.44	-0.79	4.35	8.21	2.82	-0.96	6.59	12.65	
	5	3	7.02	-3.74	11.42	18.47	9.35	-5.13	18.74	32.79	
		4	19.72	-9.85	27.37	44.14	29.82	-15.72	51.12	89.55	

续表 2

f/L	j	i	情况 3: $r'_i - r_i = 0, h'_i = 1.25R(\cos \theta'_i - \cos \theta_{i+1})$				情况 4: $r_{i+1} - r'_i = 0.75\Delta, h'_i = R(\cos \theta'_i - \cos \theta_{i+1})$				
			T_i	V_i	B_i	H_i	T_i	V_i	B_i	H_i	
0.1	3	0	0.92	-0.21	0.92		0.80	-0.18	0.80		
		1	1.00	-0.16	1.57	3.01	1.00	-0.22	1.74	3.84	
		2	2.20	-0.69	3.23	5.95	2.67	-0.97	4.50	9.69	
	4	0	0.93	-0.15	0.93		0.80	-0.13	0.80		
		1	1.00	-0.12	1.57	3.02	1.00	-0.19	1.73	3.87	
		2	2.17	-0.54	3.13	5.98	2.64	-0.82	4.42	9.77	
	5	3	5.25	-1.76	6.66	12.34	7.91	-3.15	11.73	25.46	
		0	0.93	-0.12	0.93		0.80	-0.10	0.80		
		1	1.00	-0.10	1.56	3.03	1.00	-0.18	1.73	3.88	
		2	2.16	-0.47	3.09	6.00	2.62	-0.75	4.38	9.81	
	0.15	3	0	0.91	-0.30	0.91		0.79	-0.26	0.79	
			1	1.00	-0.22	1.58	2.97	1.00	-0.27	1.74	3.79
2			2.28	-0.97	3.48	5.88	2.77	-1.27	4.72	9.50	
4		0	0.92	-0.22	0.92		0.80	-0.19	0.80		
	1	1.00	-0.16	1.57	3.01	1.00	-0.22	1.74	3.84		
	2	2.21	-0.71	3.24	5.95	2.68	-0.99	4.51	9.68		
5	3	5.46	-2.33	7.30	12.26	8.21	-3.89	12.48	25.11		
	0	0.93	-0.17	0.93		0.80	-0.15	0.80			
	1	1.00	-0.13	1.57	3.02	1.00	-0.20	1.74	3.86		
	2	2.18	-0.58	3.15	5.98	2.65	-0.86	4.44	9.75		
0.2	3	0	0.90	-0.37	0.90		0.78	-0.32	0.78		
		1	1.00	-0.28	1.60	2.93	1.00	-0.31	1.74	3.72	
		2	2.40	-1.27	3.81	5.79	2.91	-1.61	5.04	9.26	
	4	0	0.91	-0.27	0.91		0.79	-0.23	0.79		
		1	1.00	-0.20	1.58	2.98	1.00	-0.25	1.74	3.81	
		2	2.25	-0.87	3.38	5.90	2.73	-1.16	4.63	9.57	
	5	3	5.78	-3.01	8.21	12.18	8.67	-4.81	13.57	24.67	
		0	0.92	-0.21	0.92		0.80	-0.18	0.80		
		1	1.00	-0.16	1.57	3.01	1.00	-0.22	1.74	3.84	
		2	2.20	-0.69	3.23	5.95	2.67	-0.97	4.50	9.69	
	0.2	5	3	5.78	-3.01	8.21	12.18	8.67	-4.81	13.57	24.67
			4	14.94	-7.17	18.07	26.62	27.81	-14.64	37.45	68.08

4 结论

(1) 葵花双撑杆型索穹顶是不采用“拉索海洋和压杆孤岛”Fuller 构想,在下弦节点设置多撑杆的一种比较典型、新颖的索穹顶结构;它具有斜索数量少、施工张拉成形方便、可有效防止环索滑移以及撑杆与结构整体稳定性均得到提高等显著特点。

(2) 本文基于节点平衡方程,提出了这种索穹顶结构预应力态的简捷算法;详细推导了设有内孔和不设内孔时结构预应力态索杆内力的一般性递推计算公式;通过将本文的计算结果与分析设计软件(MSTCAD)所得计算结果对比可知,二者完全相同;表明本文提出的计算公式是准确的,且是一套精确解。

(3) 根据本文的分析方法和计算公式,对 72 个算例进行分析研究,可更直观看出葵花双撑杆型索穹顶预应力态的索杆内力、受力特性和分布规律。

(4) 通过对葵花双撑杆型索穹顶预应力态索杆内力分布的多参数分析可以发现,结构矢跨比、结构中部是否开孔属非敏感性参数;下弦环索数、下弦节点的布设位置属敏感性参数。

(5) 本文对葵花双撑杆型索穹顶的研究和讨论,为索穹顶的选型、设计和施工提供了一种新方案、新思路。

参考文献:

- [1] GEIGER D H, STEFANIUK A, CHEN D. The design and
(下转第 801 页)

- the factors that impact public transport commuting satisfaction [J]. *Journal of Public Transportation*, 2009, 12(2): 1. DOI: 10.5038/2375-0901.12.2.1.
- [18] ARANA P, CABEZUDO S, PEÑALBA M. Influence of weather conditions on transit ridership: a statistical study using data from Smartcards[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2014, 59;1. DOI: 10.1016/j.tra.2013.10.019.
- [19] BÖCKER L, DIJST M, PRILLWITZ J. Impact of everyday weather on individual daily travel behaviours in perspective: a literature review[J]. *Transport Reviews*, 2013, 33(1): 71. DOI:10.1080/01441647.2012.747114.
- [20] TAO S, CORCORAN J, HICKMAN M, *et al.* The influence of weather on local geographical patterns of bus usage[J]. *Journal of Transport Geography*, 2016, 54: 66. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2016.05.009.
- [21] LIU C, SUSILO Y O, KARLSTRÖM A. Investigating the impacts of weather variability on individual's daily activity - travel patterns: a comparison between commuters and non-commuters in Sweden[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 82: 47. DOI: 10.1016/j.tra.2015.09.005.
- [22] ASHALATHA R, MANJU V S, ZACHARIA A B. Mode choice behavior of commuters in Thiruvananthapuram city[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2012, 139(5): 494. DOI:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000533.
- [23] 邵敏华,李田野,孙立军. 常规公交乘客对车内拥挤感知阻抗调查与建模[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(7): 1031. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2012.07.012. SHAO Minhua, LI Tianye, SUN Lijun. Survey method and model of passengers' cost perception of crowding level in bus [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(7):1031. DOI:10.3969/j.issn.0253-374x.2012.07.012.
- [24] 高坤,涂辉招,李浩,等. 出行者对不同交通方式行程时间可靠度和车内拥挤度的感知差异性[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(7): 126. DOI:10.3969/j.issn.1001-7372.2017.07.016. GAO Kun, TU Huizhao, LI Hao, *et al.* Travelers' perception differences in travel time reliability and crowding of mode-choice in multimodal networks[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(7): 126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2017.07.016.

~~~~~

(上接第 746 页)

- construction of two cable domes for the Korean Olympics[C] // Shells, Membranes and Space Frame, Proceedings IASS Symposium. Madrid: IASS, 1986; 265-272.
- [2] LEVY M P. The georgia dome and beyond: achieving lightweight-long span structures [C] // Proceedings of IASS-ASCE International Symposium. Madrid: IASS, 1994; 560-562.
- [3] 陈联盟,袁行飞,董石麟. Kiewitt 型索穹顶结构自应力模态分析及优化设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, 40(1):73. CHEN Lian meng, YUAN Xing fei, DONG Shi lin. Selfstress mode analysis and optimal design of Kiewitt domes[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2006, 40(1):73.
- [4] 董石麟,包红泽,袁行飞. 鸟巢型索穹顶几何构形及其初始预应力分布确定[C]//第五届全国现代结构工程学术研讨会. 广州 [s. n.], 2005;115-120. DONG Shi lin, BAO Hong ze, YUAN Xing fei. Geometry configuration and initial distribution of bird-nest cable dome [C]// Proceeding of 5th Chinese National Modern Structure Engineering. Guang Zhou:[s. n.], 2005; 115-120.
- [5] 卓新,王苗夫,董石麟. 逐层双环肋环型索穹顶结构与施工成形方法:中国, 200910153530[P]. 2009-09-30. ZHUO Xin, WANG Miao fu, DONG Shi lin. Double-ring levy cable dome structure and construction forming method; China, 200910153530[P]. 2009-09-30.
- [6] 董石麟,梁昊庆. 肋环人字型索穹顶受力特性及其预应力态的分析法[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(6), 102. DONG Shi lin, LIANG Hao qing. Mechanical characteristics and analysis of prestressing force distribution of herringbone ribbed cable dome [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(6), 102.
- [7] 陈志华,楼舒阳,闫翔宇. 天津理工大学体育馆新型复合式索穹顶结构风振效应分析[J]. *空间结构*, 2017, 23(3):21. CHEN Zhi hua, LOU Shu yang, YAN Xiang yu. Time-history analysis of wind vibration response for the cable dome of gymnasium at Tianjin University of Technology [J]. *Spatial Structures*, 2017, 23(3):21.
- [8] FULLER R B. Tensile-integrity structures; US, 3063521 [P]. 1962-11-13.
- [9] 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), 1. DONG Shi lin, TU Yuan. Structural system innovation of cable dome structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(10), 1.