

DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2025.01.019

一种索加强的可折展剪式穹顶结构研究

周家伟^{1,2}, 何振翔^{1,2}, 袁行飞³, 董永灿³

(1. 浙江大学 平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310028; 2. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028;
3. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 剪式可展结构具有折展率高, 安装和拆卸方便等优点, 广泛应用于各类建筑结构, 但该结构存在承载力较低的缺陷. 本文提出一种新型索加强的可折展剪式穹顶结构, 通过在剪式单元基础上布置拉索可显著提高展开成形后结构的刚度. 介绍了可展剪式穹顶结构构形, 考察了实现结构折展需满足的几何条件 and 设计参数, 对剪式穹顶折展过程进行运动学分析. 进一步利用有限元分析软件 ANSYS, 通过改变拉索预应力和剪式单元折展角度, 对带索和不带索的剪式穹顶结构进行了静力性能分析和对比. 结果表明, 带索剪式穹顶结构的刚度相比无索剪式穹顶结构有显著提升; 改变拉索预应力大小和剪式单元折展角度会显著改变带索穹顶的力学性能, 需根据实际工程要求进行合理的取值.

关键词: 可展结构; 剪式单元; 索加强; 拓扑连接; 运动学分析; 有限元分析

中图分类号: TU399

文献标志码: A

文章编号: 1006-6578(2025)01-0019-08

Research on a kind of deployable scissor-hinge dome with cable reinforcement

ZHOU Jia-wei^{1,2}, HE Zhen-xiang^{1,2}, YUAN Xing-fei³, DONG Yong-can³

(1. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China;
2. The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China;
3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Deployable scissor-hinge systems is widely applied in various temporary buildings due to its superior deployability, light weight, convenient installation and disassembly. However, it also has the defects of low structural bearing capacity and stiffness. A new type of deployable scissor-hinge dome is proposed in this paper. Cables are applied to enhance the stiffness of the structures based on scissor units after deploying. The structural configuration is also introduced. The geometric conditions of deploying and its design parameters are derived. The kinematic analysis in the deploying process is completed. Through changing the prestress of the cables and the deploying angle of the scissor units, the static behaviors of scissor-hinge dome with cables and without cables are compared and analyzed by using ANSYS as a FEA tool. It is shown that the stiffness of scissor-hinge dome is enhanced significantly after adding cables. It also can be markedly concluded that the static behavior of the scissor-hinge dome with cables has changed notably after changing the prestress of the cables or the deploying angle of the scissor units. The appropriate value needs to be determined according to the engineering requirements in practice.

Key words: deployable systems; scissor unit; cable reinforcement; topology; kinematic analysis; FEA

收稿日期: 2024-04-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278224); 浙江省自然科学基金项目(Z24E080001).

作者简介: 周家伟(1970—), 男, 浙江舟山人, 博士, 正高级工程师, 主要从事大跨度空间结构研究. E-mail: 1027195963@qq.com

利用剪式铰实现结构的折展是一种较有效的方式. 剪式结构的概念最早在 1961 年由西班牙建筑师 Pinero^[1]提出, 他申请了相关专利, 同时设计了多种剪式平面结构和空间结构. Clarke^[2]开发了一种由三杆剪式单元组成的新型空间单元“Trissor”, 并利用该单元设计了一种半球形圆顶. Hoberman^[3,4]利用极角剪式单元, 设计了可用于大型结构的 Iris 穹顶和 Hoberman 球体式结构. Akgun^[5]等提出了一种具有转动自由度的剪式单元(SLE), 并将其应用于平面和空间剪式结构的组装, 在不改变覆盖区域大小和保持稳定荷载的情况下实现了各种结构曲线形状的变化. Tao Yang^[6]等提出由两种“V”形杆铰接形成的剪式单元(NCAE), 可用于环形剪式结构和空间剪式结构的组装, 极大地丰富了剪式结构构型.

通过剪式单元组装形成的剪式结构在展开成型后添加少量的约束便可转换为稳定的结构. 因其造型轻盈、折展率高, 安装拆卸便捷等优点, 剪式结构应用广泛, 但目前, 大部分剪式结构由于单元的相对转动特性使得结构刚度较低^[7], 只能承受较小的荷载作用.

为提高现有剪式结构的刚度, 本文提出一种新型索加强的可折展剪式穹顶结构, 通过中心杆控制折叠和展开, 各樘剪式单元间用交叉的环索相连接. 利用索只拉不压的特性, 在不影响机构运动的基础上, 提高展开成型后剪式铰结构的刚度和承载能力. 本结构可搭配膜材使用, 所有杆件和索件均可装配, 具有快速拼装、便捷折展的优点, 可应用于雨棚罩棚、救灾避难场所及建筑小品中.

本文首先介绍了可折展剪式索穹顶结构的构形特点, 阐明满足可展条件的几何参数关系; 利用 MATLAB 编制程序对剪式穹顶展开过程进行运动学分析, 计算了在指定展开构型下可展剪式穹顶的杆件长度, 以及各点的坐标和杆件间夹角随时间的变化关系, 并绘制了各参数随时间的变化曲线和结构折展过程图; 最后以拉索预应力和剪式单元折展角度为变量, 对展开完成后的带索和不带索的剪式穹顶进行静力性能对比分析, 探明索强化作用和剪式单元折展角度对结构刚度和承载力的影响.

1 索加强可折展剪式穹顶构形

剪式单元由两根梁式杆在中间某一点通过枢轴相互连接组成, 枢轴允许它们绕垂直于其公共平面的轴自由旋转, 但限制所有其他相对的自由度. 按照



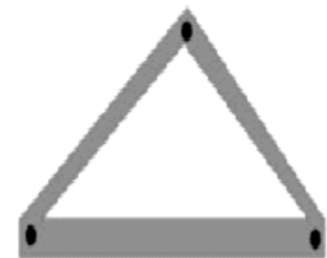
(a) 平移单元



(b) 极角单元



(c) 折角单元



(d) 三角形单元

图 1 基本剪式单元类型

Fig. 1 Basic types of scissor units

枢轴连接的位置和杆件的形状, 基本剪式单元可以划分为四种^[8]: 平移单元、极角单元、折角单元和三角形剪式单元, 剪式单元通过单元端部节点相互连接可形成二维或三维的剪式可展结构.

如图 2 所示, 新型索加强的可展剪式穹顶由若干樘剪式桁架组成, 每樘剪式桁架由多个极角单元依次首尾铰接. 各樘剪式桁架铰接于中心处的上下

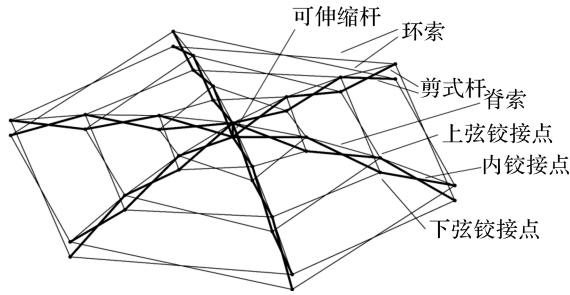


图2 索加强的剪式穹顶结构

Fig. 2 Cable-strengthened scissor-hinge dome

两节点. 为提高结构的整体刚度, 各榀剪式桁架中的上弦点用脊索相连. 同一环相邻榀的上弦节点和下弦节点用交叉环索相连.

可展剪式穹顶结构为可变结构, 具有一个自由度, 通过调整可伸缩中心杆的长度控制中心上下两节点之间的距离, 来调整剪式单元的夹角, 进而驱动所有剪式桁架同步进行展开和收缩以实现整体结构的折展. 索在连接时有一定预留长度, 在结构折展过

程中, 索始终保持松弛状态不会影响剪式桁架的折展. 当展开至设计展开态后, 中心杆达到设计最短长度, 并约束所有剪式桁架继续展开, 此时对索件张拉以施加预应力.

2 剪式穹顶折展运动学分析

2.1 实现折展需满足的几何条件

设一剪式穹顶由 n 榀剪式桁架组成, 每榀桁架有 m 个剪式单元, 如图3所示, 每个剪式单元由铰结点可分为四根半杆, 各半杆长分别记为 a_{ij} , $i=1, 2, 3, 4, j=1, 2, 3, 4$. 各榀剪式桁架为实现可展目标, 剪式单元的各杆件长度需满足如下几何条件: 在相邻两个剪式单元中, 第一个剪式单元铰接于第二个剪式单元一侧的两根半杆长度之和, 与第二个剪式单元铰接于第一个剪式单元一侧的两根半杆长度之和相等, 即:

$$a_{i3} + a_{i4} = a_{(i+1)1} + a_{(i+1)2}, i=1, 2, \dots, m-1 \quad (1)$$

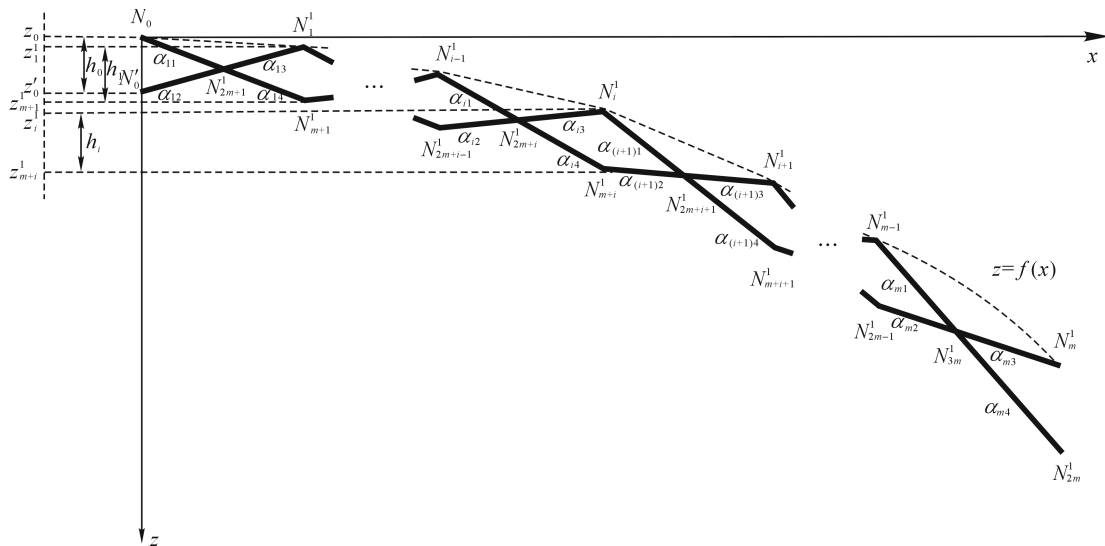


图3 剪式桁架平面示意图

Fig. 3 Plan view schematic of scissor-hinge truss

2.2 折展运动分析

定义其中一榀剪式桁架为第一榀剪式桁架, 以该桁架所在平面为 xoz 平面、中心上节点 N_0 为原点建立坐标系, 该榀各节点 N_i^1 坐标为 $(x_i^1, 0, z_i^1)$, $i=1, 2, \dots, m$. 在给出设计展开态时桁架上弦节点拟合的目标曲线 $z=f(x)$ 后, 该桁架构型可由以下独立的设计参数确定: 剪式单元数 m , 各上弦节点与中心伸缩杆的水平距离 x_i , $i=1, 2, \dots, m$, 设计展开态时中心杆上下节点高度差 h_0 ($h_1 = z_0 - z_0'$), 距中心杆最近的一组上下弦节点高度差 h_1 ($h_1 = z_1^1 -$

z_{m+1}^1).

由目标曲线 $z=f(x)$ 和各个上弦节点与中心伸缩杆的水平距离 x_i , 可得各上弦节点竖向坐标为:

$$z_i^1 = f(x_i^1), i=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

根据上下弦节点连线与水平面垂直, 可得:

$$x_i = x_{i+m}, i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

由(3)推知几何相似可知:

$$a_{i1} * a_{i4} = a_{i2} * a_{i3}, i=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

通过初始参数 h_0, h_1 和(1)(2)(3)可得第一个剪式单元杆件长度 a_{13} 和 a_{14} 以及中心铰接点 N_{2m+1}^1 , 由

(1)可知 $a_{21} + a_{22} = a_{13} + a_{14}$, 代入(2)~(4)可求得第二个剪式单元杆件长度中心铰接点 N_{2m+1}^1 以及下弦点 N_{2m+2}^1 的坐标, 以此类推可求得第一榀桁架内所有杆件长度和展开至设计态时的点坐标。

对由 n 榀桁架组成的剪式穹顶, 第 j 榀剪式桁架可视为第一榀剪式桁架绕 z 轴逆时针旋转 $2(j-1)\pi/n$ 。设 $\alpha = 2\pi/n$, 则可由第一榀剪式桁架设计展开态时的节点坐标求得其他各榀各节点空间坐标

$$\begin{bmatrix} x_i^j \\ y_i^j \\ z_i^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha & 0 \\ \sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{j-1} \begin{bmatrix} x_i^1 \\ 0 \\ z_i^1 \end{bmatrix}, i=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

设第 i 个剪式单元右侧侧杆长和左侧侧杆长之比为 k_i , 则

$$k_i = a_{i4}/a_{i1} = a_{i3}/a_{i2} \quad (6)$$

在折展过程中, 设驱动结构折展的中心杆随时间的长度为 $h_0(t)$, 由几何关系易知第 i 个剪式单元右侧上下点距离

$$h_i(t) = h_0(t) \prod_{n=1}^i k_n, i=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

杆 $N_{m+i}^1 N_{2m+i}^1$ 与 z 轴的夹角

$$\alpha_i(t) = \arccos[(h_{i-1}(t)^2 + a_{i1}^2 - a_{i2}^2)/h_{i-1}(t) * a_{i1} * 2] \quad (8)$$

点 N_i^1 和 N_{m+i}^1 的横坐标

$$x(t)_{N_i^1} = x(t)_{N_{m+i}^1} = \sum_{n=1}^i \cos\alpha_n(t) * (a_{n1} + a_{n4}) \quad (9)$$

点 N_i^1 和 N_{m+i}^1 的纵坐标分别为

$$z(t)_{N_i^1} = \sum_{n=1}^i \sin\alpha_n(t) * (a_{n1} + a_{n4}) - \sum_{n=1}^i h_n(t) \quad (10)$$

$$z(t)_{N_{m+i}^1} = \sum_{n=1}^i \sin\alpha_n(t) * (a_{n1} + a_{n4}) - \sum_{n=1}^{i+1} h_n(t) \quad (11)$$

由(9)(10)(11)对 t 求一阶导可得折展过程中点 N_i^1 和 N_{m+i}^1 沿 x 方向和 z 方向的速度分量。

杆 $N_{2m+1}^1 N_i^1$ 和杆 $N_{2m+i}^1 N_{m+i}^1$ 的夹角为

$$\beta(t) = \arccos[(a_{i3}^2 + a_{i4}^2 - h_i(t)^2)/a_{i3} * a_{i4} * 2] \quad (12)$$

由(12)对 t 求导即可得折展过程中各剪式单元两杆的转动角速度。

2.3 折展分析算例

选取以下模型作为分析算例, 展开后结构上顶点外形为球壳形, 组成的目标曲线关系式 $x^2 + z^2 = 6.5^2$ m, 结构跨度为 8 m, 矢高为 1.38 m, 矢跨比为 0.17, 共有 6 榀剪式桁架和 3 圈交叉相连的环索, 每一圈的半径 $x_i = 1.2i + 0.4$ m, 中心杆上下节点高度差 $h_0 = 0.6$ m, 距中心杆最近的一组上下弦节点高度差 $h_1 = 0.4$ m, 中心杆长度随时间变化关系 $h_0(t) = 0.06t$ m。

利用 MATLAB 编制折展运动分析程序, 计算了剪式桁架各杆件的长度, 得到各点的坐标和杆件间夹角随时间的变化关系式, 并对剪式穹顶折展过程进行模拟, 可得折叠过程如图 4 所示。

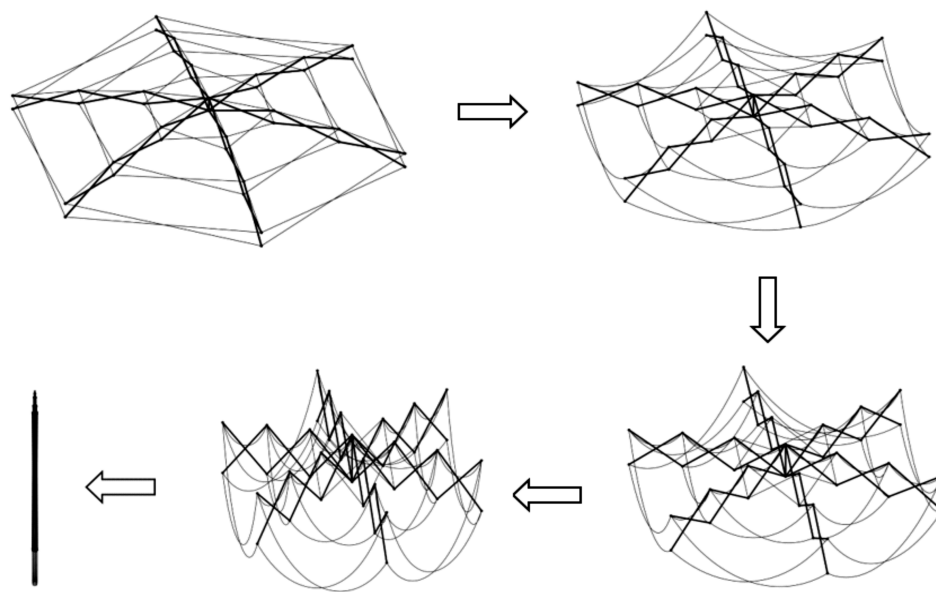


图4 剪式索穹顶结构折叠过程

Fig. 4 Folding process of scissor-hinge cable dome

图 5 为使用 MATLAB 求得该模型各几何参数后,利用 Simulink 插件绘制的剪式桁架的平面示意图,其中剪式桁架上弦点由内侧到外侧分别为 N_1, N_2, N_3 ,剪式桁架下弦点由内侧到外侧分别为 N_4, N_5, N_6 ,这些上下节点在图 5 坐标系下的坐标为

$(x_{N_i}, z_{N_i}), i=1, 2, \dots, 6$,其中剪式桁架各剪式单元的夹角由内侧到外侧分别为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$,根据 2.2 分别绘制上弦点横坐标 $x_{N_1} \sim x_{N_3}$ 下弦点纵坐标 $z_{N_4} \sim z_{N_6}$,以及最内侧剪式单元夹角 $\beta_1 \sim \beta_3$ 随时间的变化关系曲线如图 6 所示。

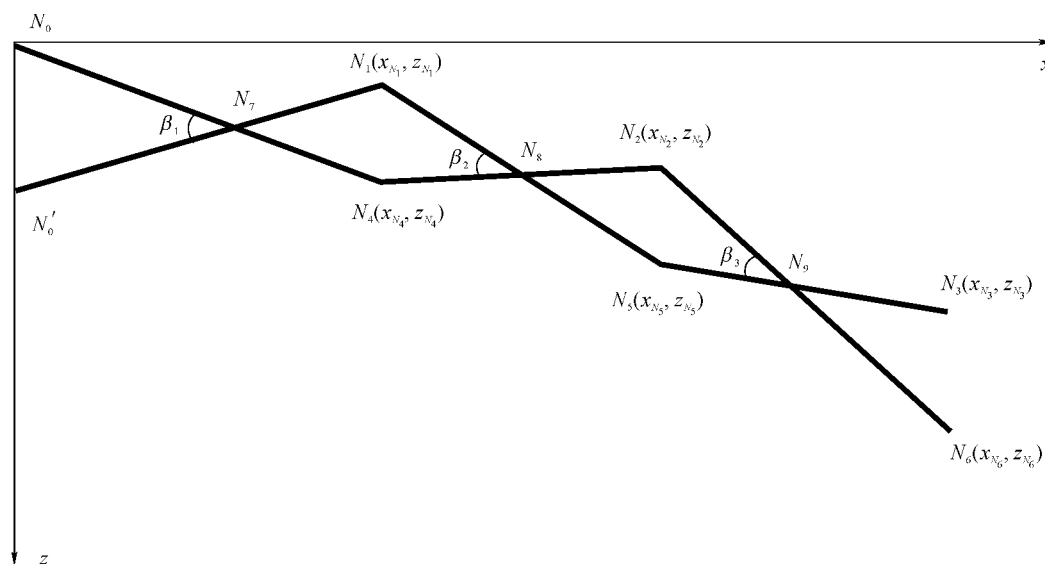


图 5 剪式穹顶算例桁架平面示意图

Fig. 5 Plan view schematic of the truss of scissor-hinge dome in example

由上图可知,在中心杆随时间匀速收缩的驱动下,而剪式桁架上各点在径向上加速收缩.最外侧下弦节点在折叠过程中经历先下降后提升的过程,而内侧下弦节点则随时间趋于匀速下降.桁架上三个剪式单元的夹角大小相近,且都随时间加速增大。

3 索加强剪式穹顶静力性能分析

3.1 计算模型

为考察索加强剪式穹顶的力学性能以及拉索对结构刚度的作用,分别对索加强剪式索穹顶和无索剪式穹顶进行静力性能分析和对比.其中无索剪式穹顶仅保留剪式单元和中心撑杆.剪式铰穹顶最大展开直径为 4 m,此时第一个剪式单元夹角 $\beta_1=28.59^\circ$.剪式单元的杆件采用 Q345 钢管,外径为 76 mm,壁厚为 4 mm,弹性模量 E 为 2.06×10^{11} N/m²,拉索构件 $\phi 20$,抗拉强度为 1 590 N/mm²,弹性模量 E 为 1.35×10^{11} N/m².

采用有限元软件 ANSYS 进行建模分析,剪式单元的杆件采用 BEAM189 三节点梁单元模拟,拉索采用 LINK180 单元模拟,对整体结构施加约束时,在 6 个环向支座节点只保留沿径向移动的自由

度 u_x ,约束其余平移自由度和三个旋转自由度;在各铰接点通过 CE 命令施加约束方程,令铰接的两点 $u_x, u_y, u_z, \text{rot}x$ 和 $\text{rot}y$ 相等,只保留剪式单元所在平面上的旋转自由度 $\text{rot}z$.

对该结构施加大小为 500 N/m² 的均布面荷载作为基本工况进行静力分析.施加荷载时,先使用 SURF154 面单元等效建立模型的上表面,各个上节点均在面上,将这些节点的平动自由度全部约束,然后对面单元模型施加荷载,得到这些节点的支座反力,反号施加到这些节点上即施加等效节点荷载.考虑到剪式单元的展开角度(第一个剪式单元夹角 β_1)和索件预应力 a 均对结构的静力性能有影响,特建立多组索加强有限元模型 Model β_1 - a 和无索模型 Model β_1 进行分析对比.其中 $\beta_1=30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$; $a=0, 40$ MPa, 50 MPa, 60 MPa, 70 MPa, $a=0$ 表示索无初始预应力.图 7 为部分有限元模型。

3.2 数值模拟结果比较

对上述模型进行受力分析,可得各剪式穹顶在均布荷载下的位移和应力.部分穹顶的位移云图和应力云图如图 7~8 所示。

各剪式穹顶最大位移和应力指标如表 1~4 所示。

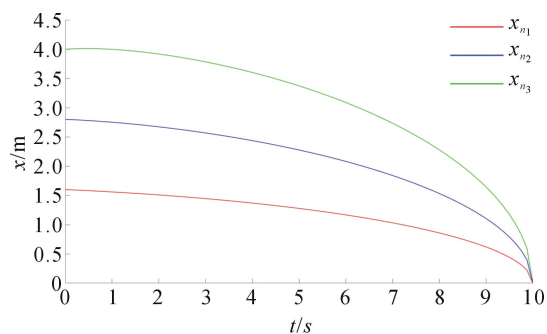
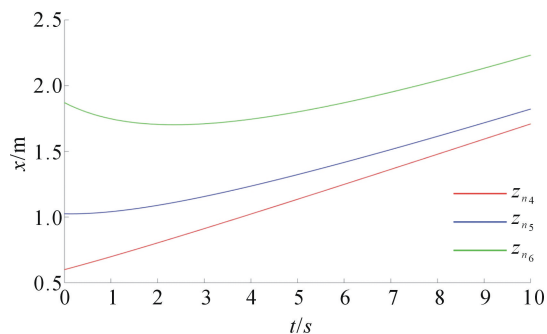
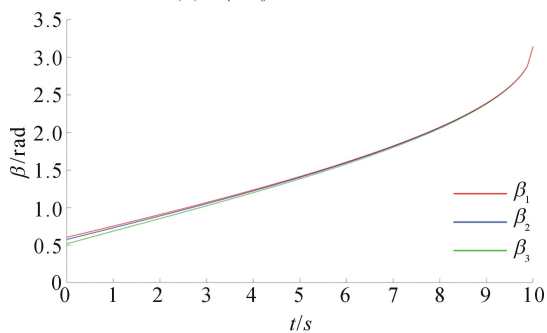
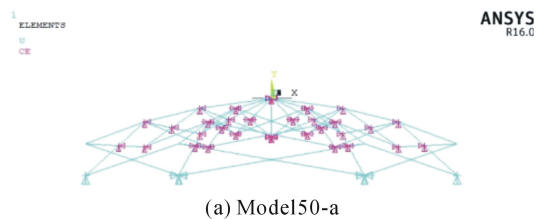
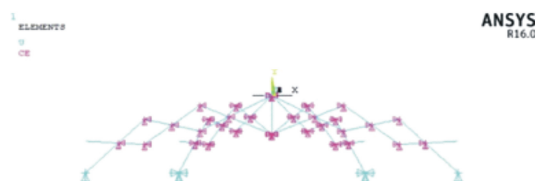
(a) $x_{n1} \sim x_{n3}$ 随时间变化曲线(b) $x_{n4} \sim x_{n6}$ 随时间变化曲线(c) $\beta_1 \sim \beta_3$ 随时间变化曲线

图6 剪式穹顶部分几何参数随时间变化曲线

Fig. 6 Variation curve of some geometric parameters of scissor-hinge dome with time



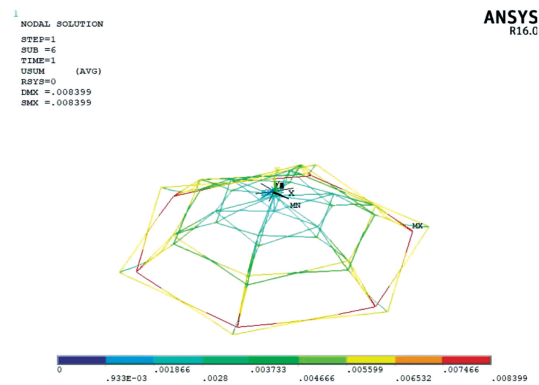
(a) Model50-a



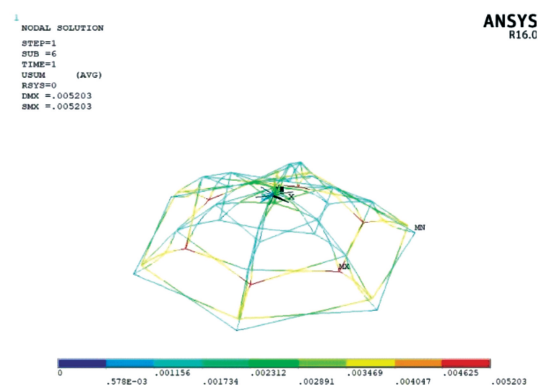
(b) Model50

图7 索加强剪式穹顶和无索剪式穹顶建模示意图

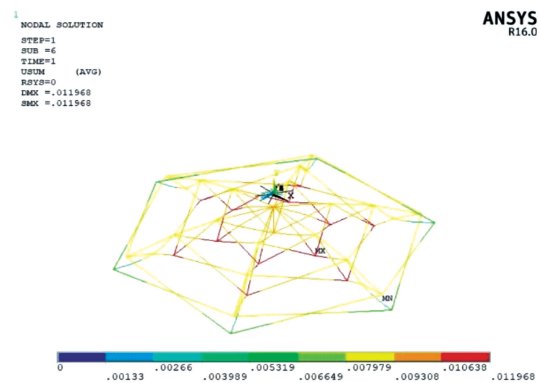
Fig. 7 Modeling schematic of scissor-hinge dome with and without cables



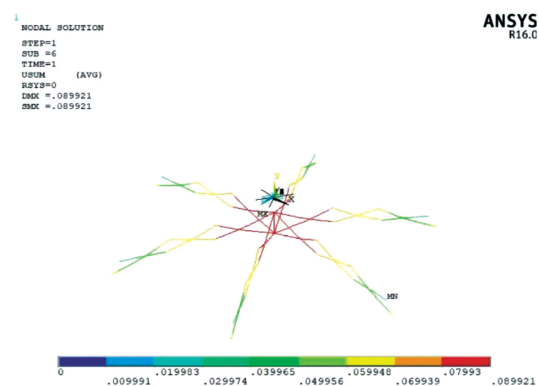
(a) Model30-0位移云图



(b) Model30-70位移云图



(c) Model50-0位移云图



(d) Model40位移云图

图8 剪式穹顶位移云图(单位:m)

Fig. 8 Displacement nephogram of scissor-hinge domes (Unit: m)

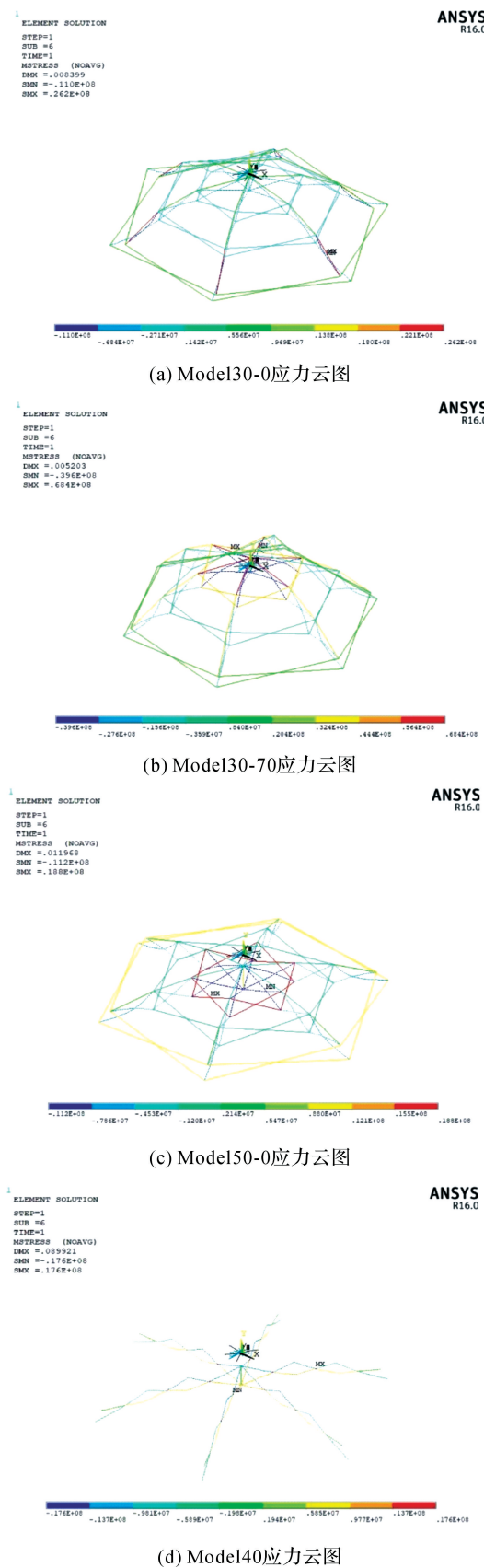


图 9 索加强的剪式穹顶和无索剪式穹顶的应力云图 (单位: N/m^2)

Fig. 9 Displacement nephogram of scissor-hinge domes with and without cables (Unit: N/m^2)

表 1 各剪式穹顶最大位移 (单位: mm)

Table 1 Max displacement of different scissor-hinge domes (Unit: mm)

a/MPa	$\beta_1/(^{\circ})$		
	30	40	50
0	8.399	9.248	11.97
40	5.22	7.066	8.104
50	4.795	6.927	7.83
60	4.982	6.948	7.83
70	5.203	7.187	7.846
无索	128.4	89.92	83.63

表 2 各剪式穹顶最大正应力 (单位: MPa)

Table 2 Max normal stress of different scissor-hinge domes (Unit: MPa)

a/MPa	$\beta_1/(^{\circ})$		
	30	40	50
0	2.07	6.74	9.72
40	7.16	9.74	10.51
50	8.43	11.14	12.05
60	9.72	12.55	14.25
70	11.00	14.61	16.46
无索	41.69	12.26	9.72

表 3 各剪式穹顶最大负应力 (单位: MPa)

Table 3 Max negative stress of different scissor-hinge domes (Unit: MPa)

a/MPa	$\beta_1/(^{\circ})$		
	30	40	50
0	9.90	7.74	10.92
40	23.54	22.31	20.94
50	28.47	26.55	24.98
60	33.40	30.79	29.83
70	38.34	35.90	34.68
无索	16.15	11.75	14.92

表 4 索加强的剪式穹顶最大索应力 (单位: MPa)

Table 4 Max stress of cables of different scissor-hinge domes (Unit: MPa)

a/MPa	$\beta_1/(^{\circ})$		
	30	40	50
0	26.22	12.99	18.80
40	42.19	38.25	40.60
50	50.91	46.70	48.58
60	59.63	55.15	57.69
70	68.36	64.24	66.79

由上述图表可知,在施加相同的均布荷载下,无索剪式穹顶的内环会发生较大的竖向位移,剪式单元的负应力集中分布于上弦杆,剪式单元的正应力集中分布于下弦杆,且产生较大水平的弯矩.在本文研究的 β_1 取值范围内, β_1 越大,无索剪式穹顶的挠度越小,最大正应力越小,最大负应力呈现先减小后增大的趋势.

与无索剪式穹顶相比,索加强的剪式穹顶结构变形显著减小,仅为无索剪式穹顶最大位移的3.73%~14.31%,结构刚度明显提高.在 β_1 和索预应力水平都较小的情况下,最大位移集中在外圈的上弦节点,连接第二圈和第三圈的脊索的应力明显大于其他索件.随着 β_1 和索预应力水平的提高,最大位移所在位置逐渐向内圈的下弦节点移动,最大索力出现在内圈的脊索和环索上.在本文研究的 β_1 和索预应力取值范围内, β_1 越大,结构的最大位移、最大正应力越大;索预应力水平越大,结构的最大位移则先减小后增大;当索预应力 $a=50$ MPa时,结构位移最小.因此实际工程应用时,需在满足刚度需求的前提下选择合理的索预应力水平并控制折展角度过小.

4 结 论

1)提出了一种可折展剪式索穹顶的结构构形,总结了可展剪式索穹顶的构型特点,指出满足结构折展所需要的几何条件.该结构在保留剪式结构可展性的基础上,利用索进一步强化了结构完全展开后的刚度和承载能力.

2)对可折展剪式索穹顶进行了折展过程中的运动学分析,根据结构的设计参数推导了索穹顶上各点的空间坐标关系和各参数随时间的变化关系.

3)运用 ANSYS 对可折展剪式索穹顶进行了结构选型和建模,阐明了有限元分析过程中的结构自由度约束方法和等效荷载施加方法,并和仅保留剪式单元的无索剪式穹顶进行静力性能的对比分析,

结果表明布置拉索能有效提高可折展剪式穹顶的刚度.

参考文献

- [1] MADEN F, AKGUN Y, KIPER G, et al. A critical review on classification and terminology of scissor structures [J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 2019,60(1): 47-64.
- [2] CLARKE R C. Kinematics of a novel deployable space structure system [C]// Elsevier Applied Science Publ. 1984: 820-822.
- [3] CHUCK H. The art and science of folding structures [J]. Sites, 1992,24: 61-69.
- [4] CHUCK H. Reversibly expandable doubly-curved truss structures [P]. US Patent 4,942, 700.
- [5] AKGUN Y, GANTES C J, SOBEK W, et al. A novel adaptive spatial scissor-hinge structural mechanism for convertible roofs[J]. Engineering Structures, 2011,33(4): 1365-1376.
- [6] YANG T, LI P, SHEN Y T, et al. Deployable scissor mechanisms derived from non-crossing angulated structural elements [J]. Mechanism and Machine Theory. 2021,165: 104434.
- [7] 俞锋,许贤,罗尧治.索强化剪式铰机构力学性能研究[J].工程力学,2021,38(5): 151-160.
YU Feng, XU Xian, LUO Yao-zhi. Research on mechanical properties of cable-strengthened scissor-hinge mechanism [J]. Engineering Mechanics, 2021,38(5): 151-160.
- [8] 于晓明.剪式结构及其强化结构的静力性能研究[D].西安:西安建筑科技大学,2022: 187.
YU Xiao-ming. Study on static performance of scissors structure and its strengthened structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2022: 187.