

DOI:10.11918/202212014

含冗余拉索的张拉整体拼接结构变形能力分析

罗阿妮, 曹紫莺, 刘贺平, 冯亚铭, 陆金鑫

(哈尔滨工程大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为研究含冗余拉索的张拉整体结构的变形能力, 基于能量耗散最少的索驱动理念, 提出了实现结构变形的最优驱动方式的选择方法。首先, 对张拉整体基本单元的结构参数、构件与节点的连接关系进行设置, 并对索长收缩后结构新的稳定状态进行力学性能分析, 得出新的节点坐标计算公式; 其次, 赋值结构参数和材料参数, 对结构的变形过程进行分析: 先收缩被动索对张拉整体结构进行预紧, 计算除主动索外结构额外耗散的弹性势能, 后收缩主动索使张拉整体结构发生变形, 计算主动索能量耗散做功和结构的最终变形, 提出结构变形的最优驱动方式的评价标准; 最后, 以含冗余拉索的双层轴向拼接结构为例, 区分结构的主动索与被动索, 进行最优驱动方式研究。分析结果表明: 对于结构的单一轴向变形, 当斜索为主动索、中间水平索为被动索时, 结构的轴向变化最大, 能量耗散最小; 对于包含轴向变形与扭转变形的结构复合变形, 当与杆构件旋向相反的斜索为主动索, 剩余斜索为被动索时, 结构的复合变形最大, 能量耗散最小。

关键词: 张拉整体; 可展结构; 索驱动; 力平衡; 变形分析

中图分类号: TU323; TH122

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)12-0086-07

Analysis of shape-change capabilities of tensegrity structures with redundant cables

LUO Ani, CAO Ziyang, LIU Heping, FENG Yaming, LU Jinxin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To study the deformation capacity of tensegrity structures with redundant cables, this paper proposed a method to select the optimal driving mode to achieve structural deformation based on the cable-driven concept with minimal energy dissipation. Firstly, the structural parameters of the tensegrity basic unit and the connection relationship between the member and the node were set, and the mechanical properties analysis was conducted on the structure in the new stable state after the contraction of the cable. This analysis yielded a new calculation formula of the node coordinates. Secondly, the structural parameters and material parameters were assigned to analyze the deformation process of the structure. The passive cables were firstly shrunk to prestress the tensegrity structure, and the additional dissipated elastic potential energy of the structure except for the active cables was calculated. Then, the active cables were shrunk to induce the deformation of the tensegrity structure. The energy dissipation work of the active cables and the final deformation of the structure were calculated. Moreover, the evaluation criteria of the optimal driving mode of the structural deformation were proposed. Finally, taking the double-layer axial splice structure with redundant cables as an example, the active and passive cables of the structure were differentiated and the optimal driving mode was studied. The results show that for the single axial deformation of the structure, when the diagonal cables are active and the middle horizontal cable is passive, the axial change of the structure is maximized while the energy dissipation is minimized. For the composite deformation involving axial deformation and torsional deformation, the composite deformation of the structure is maximized and the energy dissipation is minimized when the diagonal cables opposite to the rod member are active while the remaining diagonal cables are passive.

Keywords: tensegrity structures; deployable structures; cable actuation; force equilibrium; deformation analysis

富勒(R. B. Fuller)最早提出“张拉整体”的概念, 因该类结构具有轻质、灵活、抗冲击和可折展等优点^[1-4], 被广泛应用于建筑^[5]、机器人^[6]、可展天

线^[7]等领域, 是研究的热点问题。法国的Motro给出了较为完善的张拉整体结构的定义: 张拉整体结构是由一组离散受压构件包含于连续的受拉构件中

收稿日期: 2022-12-06; 录用日期: 2023-02-28; 网络首发日期: 2023-10-30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20231028.1340.002>

基金项目: 国家自然科学基金(51835002, 51875111); 黑龙江省自然科学基金(LH2019E023, LH2020E062)

作者简介: 罗阿妮(1978—), 女, 副教授, 博士生导师

通信作者: 刘贺平, liuheping@hrbeu.edu.cn

组成的稳定自平衡体系^[8-9]。

棱柱式张拉整体结构是最常见的一类, Amendola 等^[10]对双材料棱柱式张拉整体结构新的组装方式和压缩响应特性进行了研究; Zhang 等^[11]提出利用棱柱式基本单元构造一类由杆-杆连接组成的大尺度张拉整体结构的方法; Wang 等^[12]提出了一种利用 4 棱柱张拉整体结构变形来实现机器人可操纵滚动运动的设计方法; Zhang 等^[13]提出了一个由 4 棱柱张拉整体结构和两个端板组成的变形模块并实现其对称/非对称部署; 张沛等^[14]用动力松弛法与反分析思想相结合的方式研究了含冗余拉索的棱柱式张拉整体结构成形过程。结构中存在拉索失效时会造成一般张拉整体结构的整体失效, 若结构含冗余拉索则会在一定程度上避免此种情况, 因此, 含冗余拉索的棱柱式张拉整体结构比一般张拉整体结构抗破坏能力强, 含冗余拉索的棱柱式张拉整体结构在桥梁建筑、机械臂等领域具有广泛的应用前景。

驱动结构变形的方式主要分为 3 种: 杆驱动、索驱动和杆-索混合驱动, 由于索驱动可保持杆长不变, 保证绳索始终受拉力作用, 索驱动具有可控性强的优点, 是最常用的驱动方式^[15]。Fraddosio 等^[16]研究了由主动索和被动索控制的 V 形膨胀器的轴向伸缩变化; Chen 等^[17]提出了节能索驱动策略, 通过区分主、被动索的方式以 V 形膨胀器为例全面分析了结构的受拉、受压、弯曲、扭转和剪切变形。

本文选用索驱动的方式对含冗余拉索的棱柱式张拉整体结构的变形能力进行研究, 选出能量耗散最少的驱动方式。因为改变结构形状是打破原有平衡建立新的平衡, 过程涉及结构的力学性能分析, 现做出如下假设: 1) 构件受力方向仅沿轴向, 不发生转动, 无转动惯量; 2) 材料为线弹性材料, 变形范围内截面积保持不变; 3) 不考虑节点连接处的摩擦。

1 张拉整体结构的力学性能分析

张拉整体基本单元的拓扑示意图如图 1 所示, 各构件与节点相连, 所有节点均匀分布在上、下端面外接圆上, 规则基本单元的上、下端面外接圆的半径相等, 用 R 表示, 基本单元高度为 h , 端面上相邻节点绕圆心的夹角称为单元内转角, 用 θ 表示, 当基本单元杆构件数为 p 时, 单元内转角 $\theta = 2\pi/p$, 斜索上端面节点在下端面的投影与斜索下端面节点绕圆心的夹角为扭转角, 用 φ 表示。

对于图 1 结构, 有 3 个索构件和 1 个杆构件连接于同一节点, 在此基础上, 每个节点额外连接一条斜索, 则形成了含冗余拉索的张拉整体结构, 其拓扑

关系如图 2 所示。

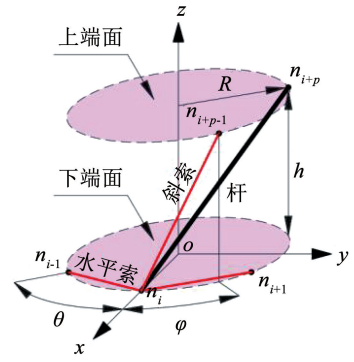


图 1 张拉整体基本单元的拓扑示意

Fig. 1 Topological diagram of prismatic tensegrity unit

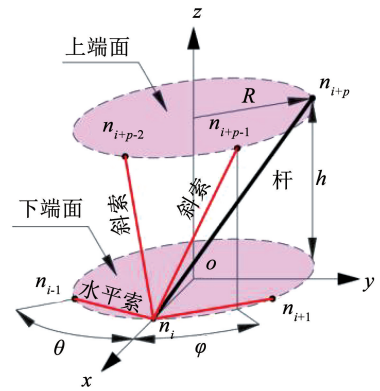


图 2 含冗余拉索的棱柱式张拉整体结构拓扑示意

Fig. 2 Topological diagram of prismatic tensegrity structure with redundant cables

通过定义的分形参数 p 和几何参数 R, h , 可以得出节点坐标 $n_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T (i = 1, 2, \dots, 2p)$, 结合图 2 所示的拓扑关系, 可得到诸多含冗余拉索的张拉整体基本单元, 当 $p = 4$ 时, 基本单元如图 3 所示。

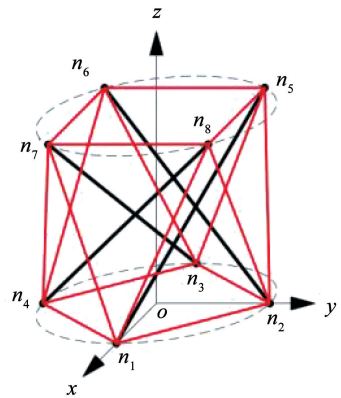


图 3 含冗余拉索的棱柱式张拉整体基本单元

Fig. 3 A prismatic tensegrity basic unit with redundant cables

通过节点坐标和构件与节点之间的连接关系, 可得结构的平衡方程如下:

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{t} = \mathbf{W} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}_1 \in R^{6p \times n_c}$ 为式 (1) 的平衡算子, n_c 为构件总

数, $t \in R^{n_c \times 1}$ 为各构件内力, $W \in R^{6p \times 1}$ 为作用于节点上的外载荷。

单个构件的内力计算公式为^[18]

$$t_i = EA \frac{l_i - l_{i0}}{l_{i0}} = k_i \Delta l_i \quad (2)$$

式中: E 为构件的弹性模量, A 为构件的截面积, l_i 为第 i 个构件长度, l_{i0} 为第 i 个构件原长, k_i 为第 i 个构件的刚度, Δl_i 为第 i 个构件长度变化量。

张拉整体结构在初始外力 w_0 作用下达到平衡状态, 表达式如下:

$$K_{n_0} n_0 = w_0 \quad (3)$$

式中: n_0 为初始坐标节点矢量矩阵, K_{n_0} 为初始刚度矩阵。

当改变外载使之变化为 dw 或改变索长 Δl , 则

会打破原有平衡状态产生一个新的平衡, 新平衡时满足如下表达式:

$$K_{T_{n_0}} (n_f - n_0) = dw \quad (4)$$

式中: $K_{T_{n_0}}$ 为切线刚度矩阵, n_f 为结构变形后的节点坐标矢量矩阵。

节点坐标的变化量 Δn 由式(4)可得

$$\Delta n = K_{T_{n_0}}^{-1} dw \quad (5)$$

新的节点坐标公式可表示为

$$n_f = n_0 + \Delta n \quad (6)$$

2 索驱动张拉整体结构变形分析

研究含冗余拉索的棱柱式拼接结构的变形能力, 基本单元与拼接结构的主要结构参数见表 1。

表 1 结构参数

Tab. 1 Parameters of tensegrity structure

结构类型	单元个数	杆构件数	索构件数	单元高/m	端面半径/m	单元内转角/(°)	上端面与下端面的扭转角/(°)
基本单元	1	4	16	0.75	0.5	90	45
拼接结构	2	8	28	1.50	0.5	90	90

根据表 1 所示参数, 研究由 2 个含冗余拉索的 4 棱柱基本单元轴向拼接形成张拉整体结构的变形能力, 拼接结构的上、下单元杆构件均为逆时针旋向, 且上单元下端面节点与下单元上端面节点重合, 将初始节点 n_1 与 x 轴重合, 各节点编号和索构件编号如图 4 所示。

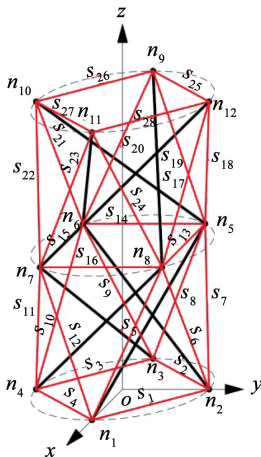


图 4 含冗余拉索的 4 棱柱轴向拼接结构

Fig. 4 Axial splice structure with redundant cables

图 4 所示的双层拼接结构中索构件与节点的连接关系见表 2。

依据位置属性对索构件进行分类, 见表 3。改变主动索索长, 被动索会随之发生变化, 最终实现结构变形, 根据主、被动索的不同对索组赋值不同的材料属性, 各构件材料属性参照文献[17], 见表 4。

表 2 索构件连接关系

Tab. 2 Connection relationship of cables

构件	连接关系	构件	连接关系
s_1	$n_1 \rightarrow n_2$	s_{15}	$n_6 \rightarrow n_7$
s_2	$n_2 \rightarrow n_3$	s_{16}	$n_7 \rightarrow n_8$
s_3	$n_3 \rightarrow n_4$	s_{17}	$n_8 \rightarrow n_{12}$
s_4	$n_4 \rightarrow n_1$	s_{18}	$n_5 \rightarrow n_{12}$
s_5	$n_1 \rightarrow n_8$	s_{19}	$n_5 \rightarrow n_9$
s_6	$n_2 \rightarrow n_8$	s_{20}	$n_6 \rightarrow n_9$
s_7	$n_2 \rightarrow n_5$	s_{21}	$n_6 \rightarrow n_{10}$
s_8	$n_3 \rightarrow n_5$	s_{22}	$n_7 \rightarrow n_{10}$
s_9	$n_3 \rightarrow n_6$	s_{23}	$n_7 \rightarrow n_{11}$
s_{10}	$n_4 \rightarrow n_6$	s_{24}	$n_8 \rightarrow n_{11}$
s_{11}	$n_4 \rightarrow n_7$	s_{25}	$n_{12} \rightarrow n_9$
s_{12}	$n_1 \rightarrow n_7$	s_{26}	$n_9 \rightarrow n_{10}$
s_{13}	$n_8 \rightarrow n_5$	s_{27}	$n_{10} \rightarrow n_{11}$
s_{14}	$n_5 \rightarrow n_6$	s_{28}	$n_{11} \rightarrow n_{12}$

表 3 索构件分类

Tab. 3 Classification of cables

类别表示	索描述	索编号
CBH	上、下端面水平索	$s_1 \sim s_4, s_{25} \sim s_{28}$
CSH	中间水平索	$s_{13} \sim s_{16}$
CD	斜索	$s_5 \sim s_{12}, s_{17} \sim s_{24}$

表 4 构件材料属性

Tab. 4 Material properties of elements

类型	直径/m	弹性模量/(N·m ⁻²)	质量密度/(kg·m ⁻³)
普通索	0.004	4.0 × 10 ¹⁰	2.80 × 10 ³
主动索	0.004	4.0 × 10 ¹⁰	2.80 × 10 ³
被动索	0.004	4.0 × 10 ⁷	2.80 × 10 ³
杆*	0.040	2.0 × 10 ¹¹	7.85 × 10 ³

注:杆构件壁厚为 0.002 m。

对棱柱式张拉整体轴向拼接结构进行变形分析,通过收缩被动索索长对结构施加初始预紧力,可以以此计算除主动索外结构初始耗散的弹性势能 U_0 为

$$U_0 = \sum_{i=1}^{n_c} \frac{1}{2} \frac{E_i A_i}{l_i^o} (l_i^{ap} - l_i^p)^2 - \sum_{k=1}^{n_a} \frac{1}{2} \frac{E_k A_k}{l_k^o} (l_{ak}^{ap} - l_{ak}^p)^2 \quad (7)$$

式中: l_i^p 为被动索收缩第 i 个构件的长度, l_i^{ap} 为被动索收缩结构重新平衡后第 i 个构件的长度, l_{ak}^{ap} 为被动索收缩结构重新平衡后第 k 个主动索的长度, l_{ak}^p 为被动索收缩第 k 个主动索的长度, n_a 为主动索数目。

结构预紧后收缩主动索使结构发生变形,获得主动索额外做功 W_a 为

$$W_a = \sum_{j=2}^{\text{steps}} \sum_{i=1}^{n_a} t_{ai}^j \Delta l_{ai}^j \quad (8)$$

式中: t_{ai}^j 为第 j 次迭代第 i 个主动索的额外产生的内力, Δl_{ai}^j 为第 j 次迭代第 i 个主动索收缩后结构重新平衡的索长与 $j-1$ 次索长差值, steps 为设置的迭代步数。

t_{ai}^j 的计算公式如下:

$$t_{ai}^j = \frac{E_i A_i (l_{ai}^{oj} - l_{ai}^j)}{l_{ai}^j} \quad (9)$$

式中: l_{ai}^{oj} 为第 j 次迭代第 i 个主动索收缩后结构重新平衡的索长, l_{ai}^j 为第 j 次迭代第 i 个主动索收缩后索长。

通过缩短主动索索长使结构发生变形, Δl_{ai}^j 为负值, 则 W_a 为负值。通过式(7)、(8), 可以计算 U_0 和 W_a , W_a/U_0 与能量耗散有关: W_a/U_0 越大, 能量耗散越大, 因此, 两者比值越小驱动效率越高。

收缩索长, 会打破结构原有平衡形成新的稳定

构型, 不同的驱动方式结构变形不同, 限制下端面节点 z 轴方向的自由度, 保证上端面 4 个节点共面的基础上, 研究结构轴向变形与扭转角变形能力, 现定义轴向变形性能参数 ε 和扭转变形性能参数 ω , 参数 ε 为整体结构高度变化, 参数 ω 为结构上端面与下端面绕 z 轴的转角相对于整体结构高度的变化, ε 、 ω 的计算公式分别为:

$$\varepsilon = \Delta h/H \quad (10)$$

$$\omega = \gamma/H \quad (11)$$

式中: Δh 为结构变形前、后上端面与下端面形心的高度差, H 为拼接结构总高度, γ 为上端面与下端面绕 z 轴的转角变化。

结合弹性势能 U_0 、主动索做功 W_a 、轴向变形性能参数 ε 和扭转变形性能参数 ω , 定义 μ_s 和 μ_T 的计算公式分别为:

$$\mu_s = \frac{W_a}{U_0 \varepsilon} \quad (12)$$

$$\mu_T = \frac{W_a}{U_0 \omega} \quad (13)$$

μ_s 、 μ_T 的表达式在包含能量的基础上又考虑到结构变形, 当 μ_s (或 μ_T) 越小时, 结构变形过程中能量耗散越小, 结构更易发生变形, 以此选出索驱动结构变形的最优驱动方式。

3 驱动方式对结构变形的影响分析

选出主、被动索, 其余索构件均为普通索, 赋值表 4 所示的材料属性, 收缩被动索索长对结构施加预紧力, 后收缩主动索驱动结构发生变形, 获得最终的稳定构型, 通过计算被动索能量耗散值 U_0 、主动索能量耗散做功 W_a 以及变形性能参数 ε 、 ω , 得出能实现结构变形的最优驱动方式。

3.1 单一轴向变形

现有 4 种满足结构单一轴向变形要求的驱动方式, 收缩 20% 被动索索长对结构预紧, 后收缩 15% 主动索索长实现结构变形, 根据表 1 设置的基本单元高度 ($h=0.75$ m) 可以得出 2 个基本单元拼接结构的高度 $H=1.50$ m, 4 种驱动方式下的变形结果见表 5。

表 5 单一轴向变形驱动方式与结果

Tab. 5 Driving methods and results of single axial deformation

驱动方式	主动索	被动索	$\Delta h/m$	ε	W_a/U_0	μ_s
1	CSH	CBH	-0.033 6	-0.022 4	-2.550 7	113.905 9
2	CBH	CSH	-0.034 9	-0.023 3	-2.562 0	110.090 7
3	CD	CSH	-0.393 3	-0.262 2	-4.756 1	18.140 0
4	CD	CBH	-0.391 9	-0.261 3	-4.758 7	18.213 3

由表 5 可得,4 种驱动方式全部满足 $\Delta h < 0$,也就是结构是沿轴向被压缩的,并且,当斜索 CD 为主动索、CSH 作为被动索时,结构的高度变化最大 $\Delta h = -0.3933 \text{ m}$,轴向变形性能参数 $\varepsilon = -0.2622$,在相同变化高度下耗能最少 $\mu_s = 18.1400$,此种驱动方式对单一变形(收缩)效果最好。

为清楚表述结构的最低能耗驱动方式,将驱动方式 3 的索组构件可视化,如图 5 所示。获得的变形前、后的结构如图 6 所示,图中虚线为变形前结构,实线为变形后结构。

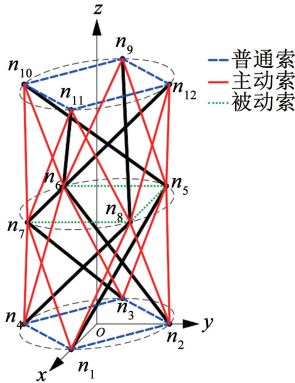


图 5 轴向收缩的最优驱动方式

Fig. 5 Optimal driving mode of axial shrinkage

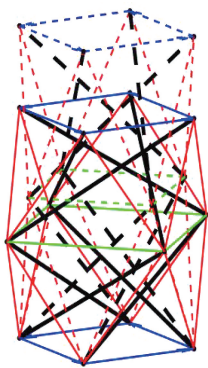


图 6 变形前、后结构图

Fig. 6 Structure before and after deformation

由图 6 可以看出,结构变“矮胖”,结构的高度发生了明显减小。进一步,可以得到结构预紧后,主动索作用过程中节点坐标变化趋势和各类构件内力变化趋势,分别如图 7、8 所示。

表 6 轴向与扭转复合变形的驱动方式与结果

Tab. 6 Driving methods and results of composite axial and torsional deformation

驱动方式	主动索	被动索	$\Delta h/\text{m}$	$\gamma/(\circ)$	W_a/U_0	μ_s	μ_T
1	CSH	CD	-0.060 6	35.218 2	-0.314 9	7.789 7	-0.013 4
2	CBH	CD	-0.060 6	35.219 0	-0.314 9	7.789 7	-0.013 4
3	CD(s_5, s_7, s_9, s_{11})	CD*	-0.094 4	15.552 7	-7.102 4	112.827 2	-0.685 0
4	CD($s_{17}, s_{19}, s_{21}, s_{23}$)	CD*	-0.094 4	15.552 7	-7.102 4	112.827 2	-0.685 0
5	CD($s_5, s_7, s_9, s_{11}, s_{17}, s_{19}, s_{21}, s_{23}$)	CD*	-0.063 4	0.956 5	-24.341 9	575.662 7	-38.173 1
6	CD(s_6, s_8, s_{10}, s_{12})	CD*	-0.081 7	21.727 9	-0.011 5	0.211 4	-0.000 8
7	CD($s_{18}, s_{20}, s_{22}, s_{24}$)	CD*	-0.081 7	21.727 9	-0.011 5	0.211 4	-0.000 8
8	CD($s_6, s_8, s_{10}, s_{12}, s_{18}, s_{20}, s_{22}, s_{24}$)	CD*	-0.047 2	11.751 2	-0.026 9	0.856 9	-0.003 4

注:除选中编号外的剩余索构件。

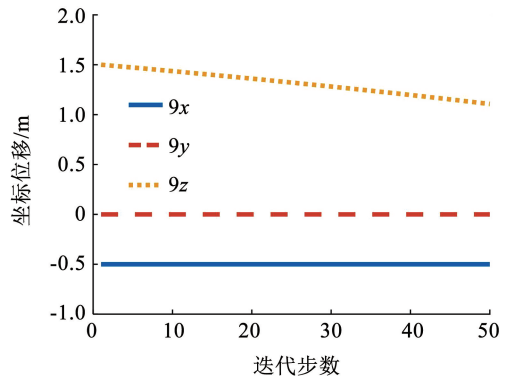


图 7 预紧后节点(n_9)坐标

Fig. 7 Nodal coordinate (n_9) after prestress

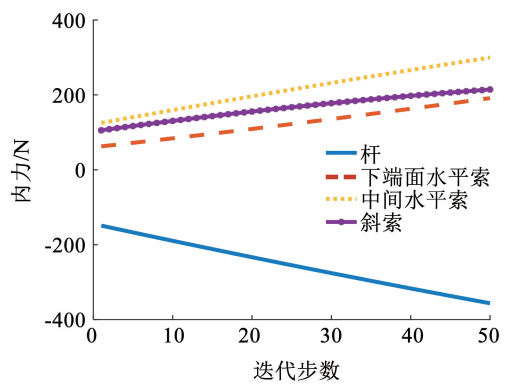


图 8 预紧后结构内力变化曲线

Fig. 8 Curve of structural internal force after prestress

由图 7 可以看出,节点 n_9 的 x 轴坐标和 y 轴坐标基本保持不变, z 轴坐标随着迭代步数的增加而逐渐减小。由图 8 可得,结构预紧后构件已具备内力,随着主动索索长减小,结构的单个构件内力大小逐渐增加,杆构件提供支持力,其内力大小始终为负值,索构件提供拉力,其内力大小始终为正值,并且,对于 3 组索构件而言,中间水平索的内力始终最大。

3.2 轴向与扭转的复合变形

棱柱式张拉整体结构最常见的复合变形是轴向变形与扭转变形的组合,与单一轴向变形的操作方式相同,先收缩 20% 被动索索长对结构进行预紧,后收缩 5% 主动索索长实现结构变形,表 6 为轴向与扭转复合变形的驱动方式和结果。

通过对表 6 分析可得:

1) 驱动方式 1 的主动索为中间水平索 CSH, 驱动方式 2 的主动索为上、下端水平索 CBH, 两种驱动方式的被动索皆为斜索 CD, 虽然两种驱动方式的主动索不同, 但实现的变形效果基本相同, 其高度变化为 $\Delta h = -0.0606 \text{ m}$, 相较于表中所列其他驱动方式, 驱动方式 2 能够实现结构的最大扭转变形, 最大扭转角 $\gamma = 35.2190^\circ$ 。

2) 驱动方式 3、4 的主动索分别为与杆构件旋向相同的下、上基本单元斜索, 被动索为剩余斜索构件, 两种驱动方式实现的驱动效果一致, 其中 $\mu_s = 112.8272, \mu_T = -0.6850$, 从数值上看 μ_s 远大于 μ_T , 说明主动索为旋向与杆构件旋向相同的斜索时结构更易发生扭转变形。

3) 驱动方式 5 将驱动方式 3、4 进行叠加, 将主动索设置为旋向与杆构件旋向相同的斜索, 被动索为结构中剩余斜索构件, 但并未实现高度变化 Δh 和扭转角变化 γ 加倍的情况, Δh 和 γ 较驱动方式 3、4 减小, μ_s 和 μ_T 较驱动方式 3、4 增大, 能量耗散大, 不利于结构变形。

4) 复合变形的最优驱动方式为驱动方式 6、7, 主动索分别为与杆构件旋向相反的下、上基本单元斜索, 被动索为剩余斜索, 2 种驱动方式实现的结构变形效果相同: 高度变化为 $\Delta h = -0.0817 \text{ m}$, 扭转角变化 $\gamma = 21.7279^\circ$ 。驱动方式 8 是驱动方式 6、7 的叠加, 其高度差 Δh 和扭转角变化 γ 数值上较驱动方式 6、7 减小近乎 1/2, 在能量耗散方面也较驱动方式 6、7 差。

最优复合变形驱动方式 7 如图 9 所示, 结构变形如图 10 所示, 虚线与实线分别表示变形前、后结构。

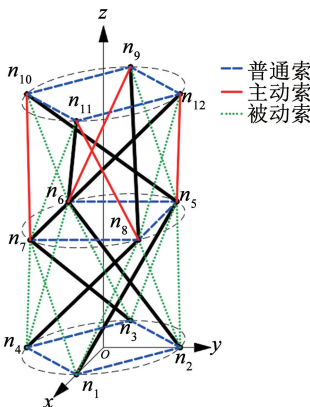


图 9 复合变形的最优驱动方式

Fig. 9 Optimal driving mode of composite deformation

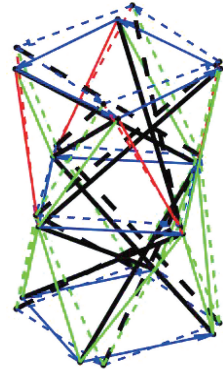


图 10 复合变形前、后结构图

Fig. 10 Structure before and after deformation

相应地, 收缩被动索对张拉整体结构预紧后, 主动索作用过程中各类构件内力变化趋势和节点坐标变化趋势, 分别如图 11、12 所示。

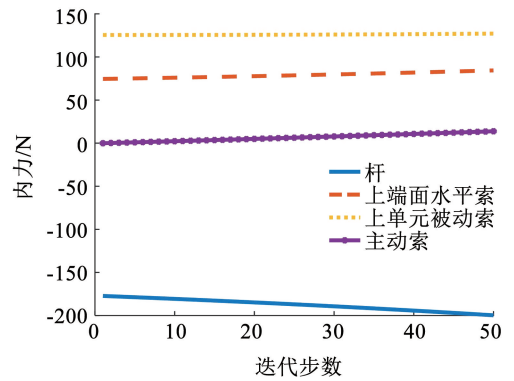


图 11 复合变形最优驱动方式构件内力

Fig. 11 The internal force of the optimal driving mode

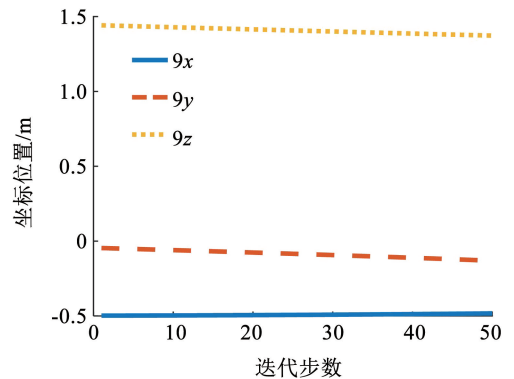


图 12 复合变形最优驱动方式节点 (n_9) 坐标

Fig. 12 Nodal coordinate of the optimal driving mode

由图 11 可以看出, 各类构件内力大小始终增加, 索构件内力始终大于 0, 杆构件内力小于 0, 满足杆受压力索受拉力的条件。由图 12 可得, 节点 n_9 的坐标发生微小变化, z 轴和 y 轴坐标有下降趋势, x 轴坐标变化不明显。

4 结 论

1) 对于双层拼接结构的单一轴向变形, 当斜索

为主动索、中间水平索为被动索时,结构的高度变化最大,能量耗散最少,轴向变形的驱动效率最高。

2) 对于双层拼接结构既产生高度变化又产生扭转变化的复合变形,当上单元或下单元的主动索为与杆构件旋向相反的斜索、被动索为剩余斜索时,能量耗散最少,复合变形的驱动效率最高。

参考文献

- [1] JUAN S H, MIRATS TUR J M. Tensegrity frameworks: Static analysis review[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(7): 859. DOI:10.1016/j.mechmachtheory.2007.06.010
- [2] 罗阿妮, 刘贺平, SKELTON R E, 等. 张拉整体基本形体稳定构型理论[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(23): 62
LUO Ani, LIU Heping, SKELTON R E, et al. The theory of basic tensegrity unit stable forming [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(23): 62. DOI: 10.3901/JME.2017.23.062
- [3] 冯晓东, 胡晋荣, 撒剑波, 等. 新型环形张拉整体式穹顶结构形态设计与分析[J]. *建筑钢结构进展*, 2022, 24(3): 80
FENG Xiaodong, HU Jinrong, SA Jianbo, et al. Morphology design and analysis of novel annular tensegrity-dome structures[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2022, 24(3): 80. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.03.009
- [4] 陈占魁, 罗凯, 田强. 张拉整体结构的动力学等效建模与实验验证[J]. *力学学报*, 2021, 53(6): 1698
CHEN Zhankui, LUO Kai, TIAN Qiang. Dynamic equivalent modeling of tensegrity structures and experimental verification [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(6): 1698. DOI: 10.6052/0459-1879-21-056
- [5] GILEWSKI W, KŁOSOWSKA J, OBARA P. Applications of tensegrity structures in civil engineering[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 111: 242. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.084
- [6] SHAH D S, BOOTH J W, BAINES R L, et al. Tensegrity robotics [J]. *Soft Robotics*, 2022, 9(4): 639. DOI: 10.1089/soro.2020.0170
- [7] TIBERT A G, PELLEGRINO S. Deployable tensegrity reflectors for small satellites [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2002, 39(5): 701. DOI:10.2514/2.3867
- [8] 阚子云. 张拉整体结构动力响应分析的模型和算法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019
KAN Ziyun. Research on modeling and numerical method for dynamic response analysis of tensegrity structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2019.004369
- [9] MOTRO R. *Tensegrity: Structural systems for the future* [M]. London: Kogan Page Science, 2003
- [10] AMENDOLA A, CARPENTIERI G, DE OLIVEIRA M, et al. Experimental investigation of the softening-stiffening response of tensegrity prisms under compressive loading [J]. *Composite Structures*, 2014, 117: 234. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.06.022
- [11] ZHANG Liyuan, ZHAO Hongping, FENG Xiqiao. Constructing large-scale tensegrity structures with bar-bar connection using prismatic elementary cells [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2015, 85(3): 383. DOI: 10.1007/s00419-014-0958-3
- [12] WANG Xinrui, LING Zhenchao, QIU Chen, et al. A four-prism tensegrity robot using a rolling gait for locomotion [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 172: 104828. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104828
- [13] ZHANG Liyuan, ZHENG Yang, YIN Xu, et al. A tensegrity-based morphing module for assembling various deployable structures [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2022, 173: 104870. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104870
- [14] 张沛, 冯健, 周继凯. 含冗余拉索的棱柱型张拉整体结构成形过程分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(5): 848
ZHANG Pei, FENG Jian, ZHOU Jikai. Analysis on forming process of prismatic tensegrity structures with redundant cables [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(5): 848. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2022.05.004
- [15] 董晓. 六杆张拉整体机器人的设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019
DONG Xiao. Design and analysis of tensegrity robot with six rods [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004778
- [16] FRADDOSIO A, MICHELETTI A, PAVONE G, et al. Analysis of novel adaptable tensegrity towers [C]//*Proceedings of IASS Annual Symposia*. Guildford, UK: International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2020: 1
- [17] CHEN Muhao, FRADDOSIO A, MICHELETTI A, et al. Energy-efficient cable-actuation strategies of the V-Expander tensegrity structure subjected to five shape changes [J]. *Mechanics Research Communications*, 2023, 127: 104026. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2022.104026
- [18] MA Shuo, CHEN Muhao, SKELTON R E. Tensegrity system dynamics based on finite element method [J]. *Composite Structures*, 2022, 280: 114838. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114838

(编辑 张红)