

十二杆张拉整体结构动态分析及路径规划研究

徐 佶¹, 冯晓东^{1, 2}, 许 贤², 陈 耀³

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058;
3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 张拉整体因其区别于传统结构的特点在土木和可动结构领域有广泛的发展前景, 目前学者对于多步态或更复杂的球形张拉整体研究较少, 且一些传统路径规划方法不适用于多面体张拉整体结构. 因此, 本文采用几何方法找寻了一种多步态的十二杆球形张拉整体结构(Snub-12)的合理构型, 并用找形方法进行了验证. 定义并分析了 Snub-12 的多种基本步态和各步态形成的理论路径空间, 并将其与单步态的 6 杆球形张拉整体结构(TR-6)进行对比, 明确了两种结构运动的特点和区别. 对快速搜索随机树算法进行改进并利用其产生引导路径, 结合 Snub-12 步态组合的情况, 生成适合不同场景的合理运动路径, 最后通过仿真分析验证了方法的可行性和有效性. 分析结果表明: 同等条件下, 不论是路径空间中盲区占比还是独立滚动步态的翻滚步长, Snub-12 均优于 TR-6, 更适宜开展长距离运动. 基于引导策略的路径规划方法可以解决多步态张拉整体结构的路径规划问题, 这丰富了球形张拉整体结构的运动理论, 可以为该类球形张拉整体可动结构的实际应用提供了理论支撑.

关键词: 张拉整体; 多步态; 引导策略; 步态组合; 路径规划

中图分类号: TU394

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2024)02-0238-11

Research on dynamic analysis and path planning of twelve-bar tensegrity structure

XU Ji¹, FENG Xiaodong^{1, 2}, XU Xian², CHEN Yao³

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Zhejiang Shaoxing 312000, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The tensegrity has a broad development prospect in the field of civil engineering and movable structures because of its characteristics different from those of traditional structures. At present, scholars have less research on multi gait or more complex spherical tensegrity, and some traditional path planning methods are not suitable for polyhedral tensegrity structures. Therefore, a twelve-bar tensegrity structure is studied and a path planning method based on guiding strategy is proposed in this paper. Firstly, according to the geometric properties of the snub cube, a reasonable configuration of a twelve-bar spherical tensegrity structure (Snub-12) with multi gaits is found by using the geometric method and verified by the form finding method. The multiple basic gaits of Snub-12 movable robot and the theoretical path space formed by each gait are defined and analyzed, and the characteristics and differences between the two robots are clarified by comparing with the 6-bar spherical tensegrity structure (TR-6) with single gait. The rapidly-exploring random tree algorithm is modified to generate a guide path, and reasonable motion path suitable for different scenes are generated in consideration of the gait combination of Snub-12. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by simulation analysis. The results show that under the same conditions, Snub-12 is better than TR-6 in terms of the blind zone ratio in the path space and the rolling step length of the independent rolling gait, and is proved to be more suitable for long-distance

收稿日期: 2022-11-28

修回日期: 2024-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908356); 国家留学基金委项目(202008330250)

第一作者: 徐 佶(1996—), 男, 硕士生, 主要从事张拉整体可动结构研究. E-mail: 837400483@qq.com

通信作者: 冯晓东(1987—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事大跨度空间结构及智能结构研究.

E-mail: fengxiaodong@usx.edu.cn

sports. The proposed path planning method based on the guidance strategy provides a method to solve the path planning problem of multi-gait tensegrity structure, which not only enriches the motion theory of spherical tensegrity structure, but also provides theoretical support for the practical application of such spherical tensegrity movable structures.

Key words: tensegrity; multi-gaits; guidance strategy; gait combination; path planning

张拉整体结构是一种由刚性压杆和柔性拉索组合而成的自平衡稳定体系, 具有造型美观、大变形小应变、可展等特点, 已在土木工程^[1]、生物力学^[2]、机器人^[3]、超材料^[4]、航天航空^[5]等领域得到了蓬勃的应用. 近年来, 球形张拉整体可动结构因其抗震性好、灵活性高和滚动性佳, 可应用于缓冲装置、动态雕塑和工程救援器等领域的原因为, 吸引了众多学者进行研究. 目前, Shinichi 等^[6]研究并制作了一种 TR-6 可动结构, 通过仿真分析和试验测试实现了结构的连续运动. 美国 NASA^[7]研究了一种无约束、高度动态和顺应的 6 杆张拉整体机器人—SUPERBall, 并对其状态控制和运动控制等方面开展了研究. 杜文娟等^[8,9]提出了一个通用预测方法来预测 6 杆可动结构的运动方向, 而后通过有限元法分析结构形变过程, 获得形变后几何构型, 建立各参数的关系, 并优化了 6 杆可动结构的运动参数. 罗阿妮等^[10]分析比较了索和杆两种驱动方式的特点, 通过杆驱动的方式对该结构的变形和滚动开展了研究. Zheng 等^[11-12]提出了一种生成张拉整体可动结构运动步态的方法, 定量研究了 6 杆可动结构的运动鲁棒性, 并用实物机器人进行了实验验证. Kim 等^[13-14]研发了一种可以快速滚动的新型张拉整体可动结构 T12-R, 并提出两种方法来优化张拉整体可动结构运动. Shibata^[15]制作了一种 12 杆张拉整体可动结构的概念模型, 并对其运动特点进行了相关分析. Peterson^[16]以一种类似截角八面体的张拉整体结构为对象, 研究并测试了两种控制器.

就张拉整体可动结构而言, 路径规划是可动结构运动系统的重要一环. Kim 等^[17]设计了一种可以滚动和跳跃的张拉整体球探测器, 并提出了一种结合跳跃和滚动的定位和路径规划算法, 以实现节能导航的目的. Chang 等^[18]研究了 TR-6 的运动规律并提出了一种基于 A* 算法的滚动控制和路径规划分层进行的路径规划方法进行路径规划. Lu^[19]提出了一种基于 Dijkstra 算法的路径

规划方法, 利用数值模拟和实验分析对 TR-6 可动结构开展了研究. Shah 等^[20]回顾了近年来张拉整体机器人技术的发展, 并指出了新的挑战方向.

综上所述, 国内外学者已经对球形张拉整体可动结构及运动控制有了一定的研究, 但多集中于研究 6 杆球形张拉整体结构, 对于多步态或更复杂的球形张拉整体研究较少(其他结构在某些方面优于 6 杆结构), 且由于球形张拉整体运动系统的固有特性, 一些传统路径规划方法不适用于多面体张拉整体结构. 因此, 本文基于扭棱立方体的几何特点, 研究了一种具有多步态的球形张拉整体结构(Snub-12), 定义并分析了 Snub-12 结构的基本步态和各步态形成的理论路径空间, 并将其与单步态的 6 杆球形张拉整体结构(TR-6)进行对比, 明确了两种结构运动的特点和区别. 此外, 本文对快速搜索随机树算法进行改进并利用其产生引导路径, 结合 Snub-12 步态组合的情况, 生成适合不同场景的合理运动路径, 最后通过仿真分析验证了方法的可行性和有效性. 本文提出的基于引导策略的路径规划方法可有效解决多步态张拉整体的路径规划问题, 丰富了球形张拉整体的运动理论, 并为该类球形张拉整体结构的实际应用提供了理论支撑.

1 Snub-12 结构

1.1 构型描述与参数获取

Snub-12 是一种由 12 杆和 48 索组成的球形张拉整体体系, 每个节点分别通过 4 个索单元与其他节点相连, 形成近似不规则扭棱立方体的自平衡空间三十八面体结构.

扭棱立方体是通过立方体的 6 个面旋转一定角度, 并向外移动一定距离, 加入 32 个三角形得到的多面体, 根据旋转方向不同可分为左旋扭棱立方体和右旋扭棱立方体, 如图 1 所示. 可以采用立体几何的方法求解扭棱立方体的节点坐标^[21], 由此建立 12 杆球形张拉整体结构的节点坐标矩阵以找寻 Snub-12 的合理构型.

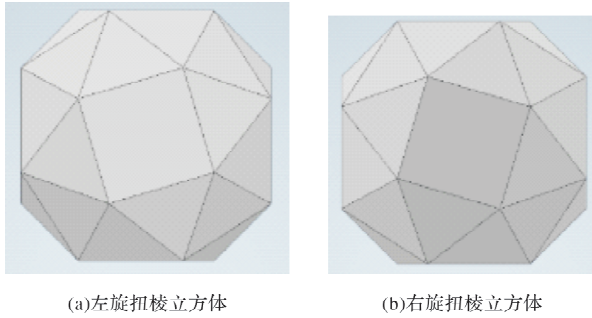


图1 扭棱立方体的两种不同构型

Fig. 1 Two different configurations of snub cube

如图2所示,在立方体的每个面上映射一个小正方形,并使该正方形旋转相同的角度,同时确保小正方形与立方体对应的面同心.这些小正方形的边与三角形的边一起组成12杆球形张拉整体结构的两类边索,分别为索1(橘黄色实线)和索2(天蓝色实线),A1—A4表示相邻节点的间距.建立笛卡尔坐标系,其原点位于立方体的中心,设立方体的边长为 $2h$,每个面上的小正方形旋转角为 β ,小正方形对角线的一半长度为 c ,旋转角 β 和倾斜角 γ (半对角线和 X 轴方向之间的夹角)之间的关系可以表示为

$$\gamma = \beta + 45^\circ \quad (1)$$

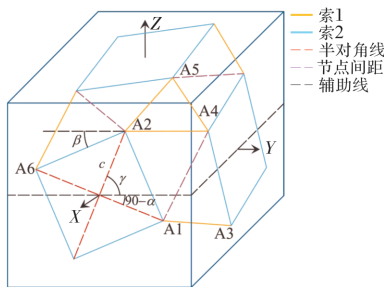


图2 构建 Snub-12 的示意图

Fig. 2 Diagram of Snub-12

则图中 A1 到 A6 的坐标可依次表示为

$$\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}_{A1 \sim A6} = \begin{bmatrix} h & c \cdot \sin\gamma & -c \cdot \cos\gamma \\ h & c \cdot \cos\gamma & c \cdot \sin\gamma \\ c \cdot \cos\gamma & h & -c \cdot \sin\gamma \\ c \cdot \sin\gamma & h & c \cdot \cos\gamma \\ c \cdot \cos\gamma & c \cdot \sin\gamma & h \\ h & -c \cdot \sin\gamma & c \cdot \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

同理, Snub-12 的其余节点坐标同样可用 c 和 γ 表示. c 和 γ 的取值可通过以下两个假定条件确定:

(1)每根拉索等长;

(2)各节点平衡^[22].

例如,对节点 A2 进行分析.

1) 索_{A2-A1}与索_{A2-A4}长度相等,即

$$|A1 - A2| = |A4 - A2| \quad (3)$$

2) 节点 A2 平衡,即

$$s_1 = \frac{A6 - A2}{|A6 - A2|} + \frac{A1 - A2}{|A1 - A2|} \quad (4)$$

$$s_2 = \frac{A5 - A2}{|A5 - A2|} + \frac{A4 - A2}{|A4 - A2|} \quad (5)$$

$$b = \frac{A3 - A2}{|A3 - A2|} \quad (6)$$

$$D = [s_1; s_2; b]^T = 0 \Rightarrow \det(D) = 0 \quad (7)$$

式中: D 为平衡矩阵; s_1 为索_{A2-A6}与索_{A2-A1}的单位向量的合向量; s_2 为索_{A2-A5}与索_{A2-A4}的单位向量的合向量; b 为杆的单位向量.

联立方程(3)~(7),可求得

$$\begin{cases} \gamma \approx 78.49^\circ \\ c \approx 0.7537h \end{cases} \quad (8)$$

1.2 数值找形及验证

根据式(8)求得的 c 和 γ , 可获得 Snub-12 的各节点的坐标并建立对应的节点矩阵, 进一步地, 根据结构的几何拓扑关系建立拓扑矩阵和连接矩阵^[23-24]. 然后通过动力松弛法和力密度法分别找形并互相验证, 两种方法找形结果一致, 最终获得如图3所示的自平衡结构, 该结构的自应力模态为1, 独立机构位移模态为13.

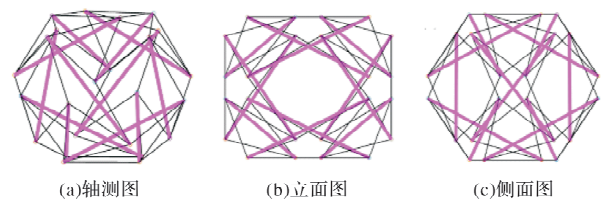


图3 Snub-12 找形结果

Fig. 3 Form finding of Snub-12

表1 结构基本参数

Tab. 1 Basic parameters of structure

构件	长度	力密度系数		
		式(7)的解	力密度法	动力松弛法
杆	1.904 1	-1.307 7	-1.307 2	-1.307 6
索1	1.065 9	1.000 0	1.000 0	1.000 0
索2	1.065 9	1.086 5	1.086 2	1.086 5

可以看出,表1中所示的每个杆的长度是相同的,大约为索长的1.786倍.根据公式(7)或通过

两种不同的找形方法计算的索的力密度系数彼此一致, 并且符合张拉整体结构的成形条件, 这意味着所获得的 Snub-12 是合理的.

2 步态分析与对比

2.1 滚动步态定义

Snub-12 表面由 38 个多边形组成, 可分为正方形、正三角形和等腰三角形, 将其拓扑展开可以得到如图 4(b)所示的展开图, 图中的编号对应图 4(a)的节点编号. 展开图由 8 个正三角形, 6 个正方形和 24 个等腰三角形组成, 其中 24 个等腰三角形是非封闭的, 其底边在拓扑展开图中用虚线表示.

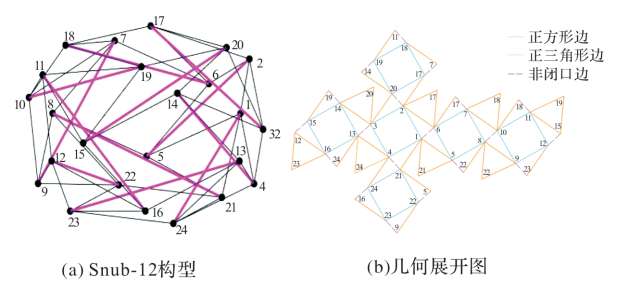


图 4 Snub-12 的几何展开图
Fig. 4 Unfold geometric diagram of Snub-12

由几何展开图可知, 每个正方形被 4 个等腰三角形包围, 每个等边三角形被 3 个等腰三角形包围, 每个等腰三角形的 3 边分别对应连接着正方形、等边三角形和等腰三角形, 为便于描述, 将等边三角形用英文字母 S 表示, 正方形用英文字母 Z 表示, 等腰三角形用 O 表示. 由张拉整体结构的滚动原理分析可知, 其运动可分解成连续地着地面多边形绕其一边旋转至另一个多边形的过程. 因此 Snub-12 的基本步态可分为以下 5 种: ZO 步态、SO 步态、OO 步态、OZ 步态以及 OS 步态(图 5).

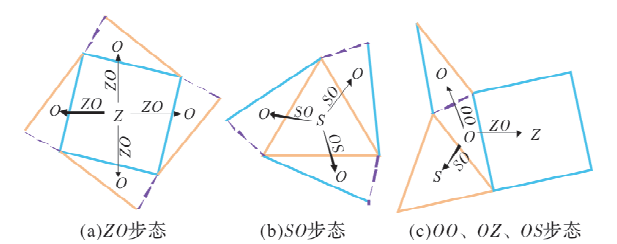


图 5 Snub-12 基本步态示意图
Fig. 5 Basic gaits of Snub-12

2.2 动态仿真分析

为了进一步研究 Snub-12 的基本滚动步态, 采

用 Adams 动力仿真分析软件对其翻滚行为进行仿真分析. 杆件由等长、均质的两段刚性杆组成, 并添加移动副(一种低副, 在平面内是一种相对移动)实现伸缩功能, 拉索则由弹簧替代, 然后根据结构拓扑建立如图 6 所示的仿真模型. 构件参数根据找形结果并结合实际进行设置, 如表 2 所示.

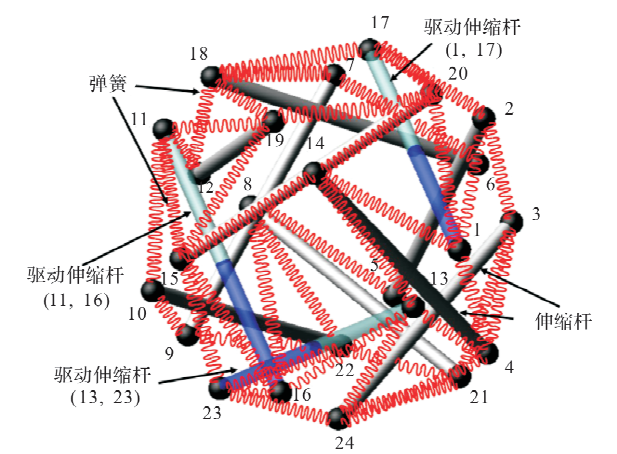


图 6 仿真模型
Fig. 6 Simulation model

表 2 构件相关参数

Tab. 2 Member information of simulation model	
参数名称	值
杆构件长度/mm	380
杆构件半径/mm	10
杆材料	铝
杆密度/kg · mm ⁻³	2.74 × 10 ⁻⁶
弹簧刚度系数/N · mm ⁻¹	5
索 1 预载荷/N	38
索 2 预载荷/N	41.5
弹簧预载荷长度/mm	214

经过仿真分析发现, Snub-12 动力仿真模型可以实现两个正方形着地面、两个正三角形着地面和正方形与至正三角形着地面之间的相互翻滚运动. 根据动力仿真结果, 正方形与正三角形着地面的相互翻滚运动相对容易实现. 通过缩短驱动杆(13, 23)和驱动杆(3, 24)的长度, 可以实现向两根杆对应边的三角形着地面的翻滚, 见图 7. 值得一提的是, 在 Snub-12 的三种基本多边形中, 等腰三角形可能是因为相较于其他两种多边形面积相对较小, 使其作为着地面非常不稳定, 而可动结构在翻滚过程中具有一定的惯性, 所以通常不考虑将等腰三角形作为其落地面, 因此原有的五种基本滚动步态可进一步优化为如图 8 所示的四种滚动步态.

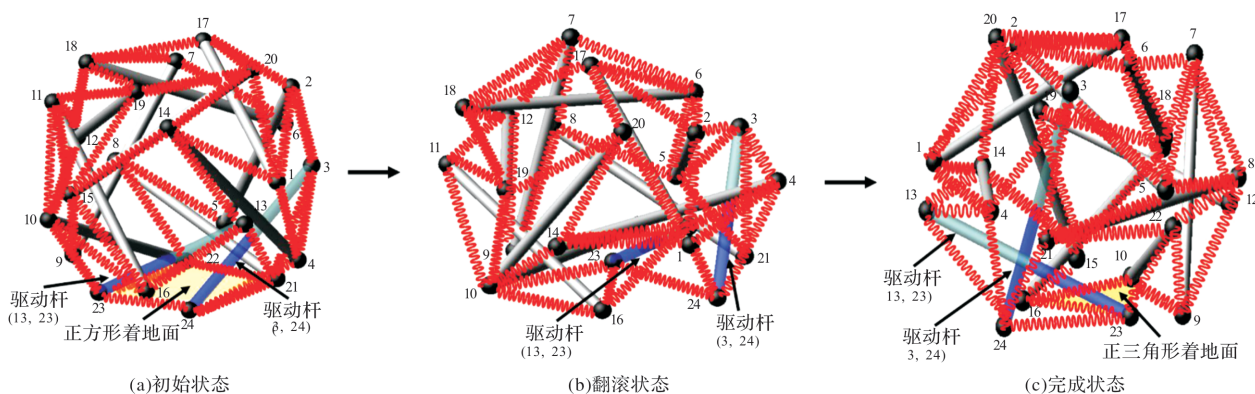


图7 Snub-12 可动结构从着地面为正方形到正三角形的翻滚过程

Fig. 7 The rolling process of the Snub-12 movable structure from square to triangle

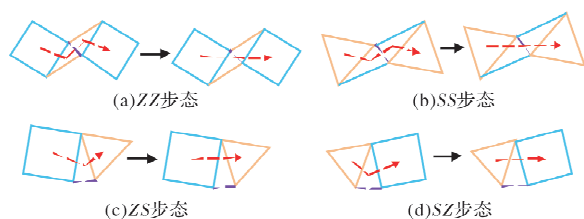


图8 四种滚动步态

Fig. 8 Four rolling gaits

2.3 路径空间

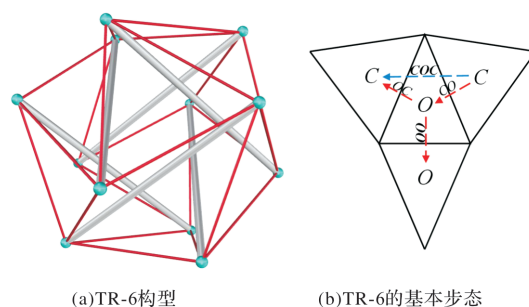
由于多面体可动结构的翻滚运动是通过表面多边形之间的不断交替实现的, 每个步态的初始状态和终止状态保持稳定时, 均以其落地面的某个多边形作为支撑面. 在平面上连续不断地扩展表面多边形, 则可以获得多面体结构的表面扩展图, 将扩展图中各多边形的形心相连即可得到结构在平面上可能的路径空间.

一些多面体结构的拓展多边形可以覆盖整个环境, 而另一些多面体结构无法完全覆盖, 无法覆盖部分称之为路径盲区. 由此可以将多面体结构分为两类, R1 类为可完全覆盖的, R2 类为无法完全覆盖的^[19], 而球形张拉整体结构是一种表面由多种多边形组成的 R2 类结构, 因此, 为了更好地研究球形张拉整体可动结构的运动轨迹和路径规划, 对其进行路径空间的分析具有十分重要的意义.

2.4 TR-6 路径空间介绍

国内外已经有众多学者对 6 杆球形张拉整体结构(TR-6)的步态和运动进行了较为深入地分析研究^[8-14], TR-6 的表面由开口等腰三角形与闭口等边三角形组成. 为便于描述, 用 C 和 O 分别代表等边三角形和等腰三角形, 其底边在展开图中用虚线表示^[13-14]. 按照其滚动特点, 滚动步态可分为 CO 步态、 OC 步态以及 OO 步态三种, 图 9(b).

TR-6 采用 CO/OC 步态运动时, 路径轨迹为 Z 字形, 路径盲区为正三角形, 所形成的路径空间如图 10(a)所示; 当将 COC 作为一个叠合步态进行简化, 并以此来描述 TR-6 的运动时, 路径空间则变为图 10(b)所示的蜂巢结构, 路径盲区也由原来的正三角形变为正六边形.

图9 TR-6 构型及其基本步态^[13-14]Fig. 9 The TR-6 and its basic gait TR-6^[13-14]

对于 Snub-12 结构, Snub-12 的步态复杂多样, 直接用基本步态进行随机组合时, 很难预测其运动轨迹, 因此首先对 Snub-12 的四种独立的滚动步态进行分析, 以得到可能的路径空间. 当只采用一种独立步态(即单步态)进行翻滚时, 其理论路径空间如图 10(c)、10(d)和 10(e)所示. 图中无填充图形为结构表面及其拓展图; 黑色填充部分为运动空间的路径盲区, 即实际无法到达的区域, 由 Snub-12 的构型特性决定. 以每个未填充图形的形心点代表 Snub-12 的重心位置, 用红色虚线连接各多边形形心点, 即可得到对应的路径空间, 每一段红色虚线代表一个步态, 其几何长度代表该步态的理论步长. 由图可知, 若采用 ZZ 步态, 形成的路径空间为井字形, 结构可沿横向或纵向直线运动, 路径盲区为正方形; 若采用 SS 步态, 形成的路径空间为蜂巢形, 路径盲区为六边形; 若

采用 ZS(SZ)步态, 形成的路径空间为波浪形, 结构可沿 Z 字形运动.

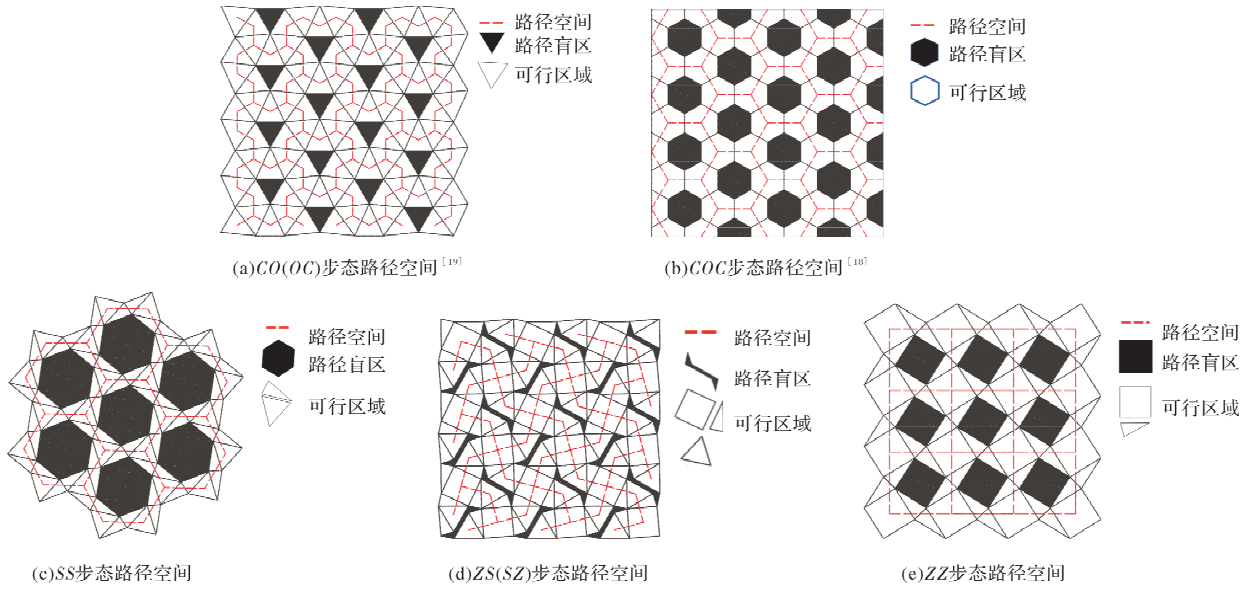


图 10 TR-6 和 Snub-12 的不同运动步态形成的路径空间

Fig. 10 Path spaces formed by different kinematic gait patterns of TR-6 and Snub-12

2.5 TR-6 和 Snub-12 对比

很明显, 在运动生成的路径空间中, 路径盲区的存在势必会对结构的运动区域产生影响. 根据前述所知, 滚动步态不同, 形成的路径盲区也不同, 表 3 给出了各独立滚动步态下形成的路径盲区对比(取杆长均为 178.6 的两种结构进行对比). 由表 3 可知, 就 TR-6 而言, 在图 10(a)生成的运动空间中, 其路径盲区占区域总面积的 10.76%.

就 Snub-12 而言, 执行 ZZ 或 SS 步态时(图 10(c)或 10(e)), 其路径盲区占比较大, 极大地限制了 Snub-12 可到达的运动区域; 而执行 ZS(SZ)步态时, 路径盲区的占比相较其他两种步态均有明显下降, 只达到了 7.5%, 且优于 TR-6 OC(CO)步态的 10.76%. 因此, 当结构采用一种独立步态滚动时, 建议选择 Snub-12 的 ZS(SZ)步态以探索更多未知的场景.

表 3 两种结构的路径盲区对比

Tab. 3 Comparison of path blind zones of two structures

参数	TR-6			Snub-12	
步态	CO/OC	COC	ZZ	ZS/SZ	SS
运动区域	723.4×709.6	716.9×709.6	593×593	729.6×729.6	597×604.8
盲区形状	正三角形	正六边形	正方形	Z 字形	正六边形
单盲区面积	3 479.9	9 084.7	10 000	2 222	25 980.7
盲区个数/个	16	18	9	18	7
盲区总面积	55 678.4	163 524.6	90 000	39 996	181 864.9
面积比/%	10.8	32.1	25.6	7.5	50.3

为了进一步研究两种结构在滚动时的特点和区别, 在不考虑翻滚偏移和运动惯性等因素的条件下, 比较他们的各独立滚动步态的翻滚距离, 以及在各滚动步态连续翻滚 8 步后的直线前进距离. 由表 4 结果可知, Snub-12 各独立滚动步态的理论翻滚步长均远大于 TR-6, 同样翻滚 8 步后理

论上行进的直线距离也远大于 TR-6, 虽然 Snub-12 的 ZS/SZ 步态的步长相较于 ZZ 步态和 SS 步态是最短的, 也略少于 TR-6 的 COC 步态, 但几乎是 TR-6 的 CO/OC 步态的两倍, 同样翻滚 8 步后有相同的效果, 这意味着 Snub-12 具有在相同情况下到达更远目标点的能力, 更适合开展远距离

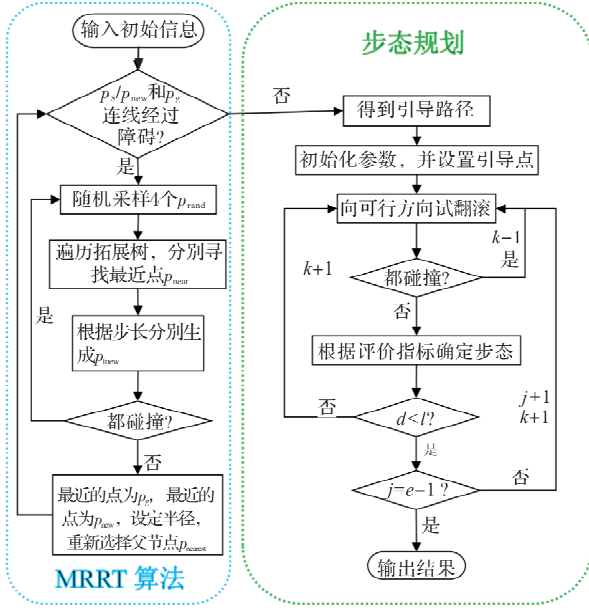


图 12 基于引导策略的路径规划流程图

Fig. 12 Flowchart of path planning based on guidance strategy

3.2 有效性验证

本节采用 TR-6 的路径空间, 在 MATLAB (2019b) 中进行仿真验证. 图 13(c) 和 (d) 中, 绿色和红色实线分别为 MRRT 算法生成的探索路径和引导路径, 蓝色实线则为经过路径规划后形成的理论运动路径, 对比图 13(a) 和 (b) 的结果可知, 本文方法可以得到和 A* 算法和 Dijkstra 算法一致的理论规划路径, 表明本文提出的基于 MRRT 引导的路径规划方法是切实有效的.

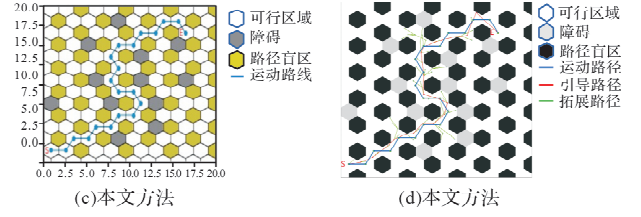
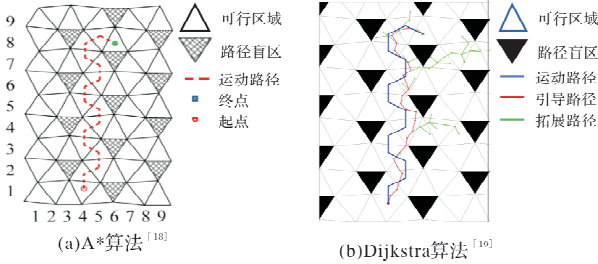


图 13 不同方法对 TR-6 结构的路径规划对比

Fig. 13 Comparison of different methods for path planning of TR-6 structure

3.3 Snub-12 的组合步态

图 14 给出了 Snub-12 两种落地模式下的翻滚方向, 当着地面为正方形 (用 Z 表示) 时, 结构可以向 8 个方向翻滚, 其中 4 个为 ZZ 步态, 4 个为 ZS 步态, 相同步态的 4 个方向之间相差 90° ; 当着地面为正三角形 (用 S 表示) 时, 结构可以向 6 个方向翻滚, 其中 3 个为 SZ 步态, 3 个为 SS 步态, 相同步态的 3 个方向之间相差 120° , 因此四种步态可以用公式 (10) 表示. 当 ZS 步态的初始方向角 $\alpha_{ZS} = 75^\circ$ 时, 其他三种步态的初始方向角分别为 $\alpha_{ZZ} = 32.7^\circ$, $\alpha_{SZ} = 15^\circ$, $\alpha_{SS} = 72.3^\circ$.

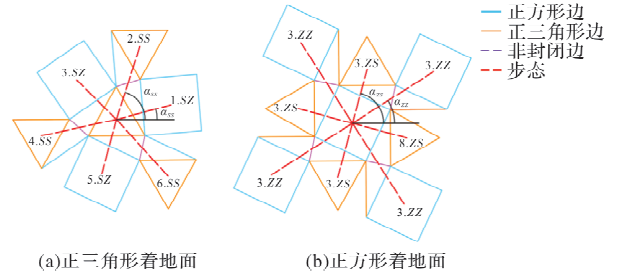


图 14 两种落地模式下的翻滚方向

Fig. 14 Rolling directions of two landing patterns

$$\begin{cases} P_{ZZ} = \left[l_{ZZ} \cdot \cos(\alpha_{ZZ} + \frac{n\pi}{2}), l_{ZZ} \cdot \sin(\alpha_{ZZ} + \frac{n\pi}{2}) \right], n \in \{0, 1, 2, 3\} \\ P_{ZS} = \left[l_{ZS} \cdot \cos(\alpha_{ZS} + \frac{n\pi}{2}), l_{ZS} \cdot \sin(\alpha_{ZS} + \frac{n\pi}{2}) \right], n \in \{0, 1, 2, 3\} \\ P_{SZ} = \left[l_{SZ} \cdot \cos(\alpha_{SZ} + \frac{2m\pi}{3}), l_{SZ} \cdot \sin(\alpha_{SZ} + \frac{2m\pi}{3}) \right], m \in \{0, 1, 2\} \\ P_{SS} = \left[l_{SS} \cdot \cos(\alpha_{SS} + \frac{2m\pi}{3}), l_{SS} \cdot \sin(\alpha_{SS} + \frac{2m\pi}{3}) \right], m \in \{0, 1, 2\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{ZZ} , P_{ZS} , P_{SZ} 和 P_{SS} 分别表示同一种步态模式的集合; l 表示步长, α 表示初始方向角.

因此, 正方形着地面和正三角形着地面的滚动运动步态集合可分别表示为

$$\begin{cases} P_Z = \{P_{ZZ}, P_{ZS}\} \\ P_S = \{P_{SZ}, P_{SS}\} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_Z 表示正方形着地面的步态集合, P_S 表示正三角形着地面的步态集合, P_{ZZ} , P_{ZS} , P_{SZ} 和 P_{SS}

分别表示同一种步态模式的集合。

每翻滚一步,结构的运动方向都会改变,因此每翻滚一次,初始方向角就要相应地调整,对于采用不同步态翻滚后,初始方向角调整表示为

$$\begin{cases} \alpha' = \alpha & \text{ZZ 步态} \\ \alpha' = \alpha + 45^\circ t_{\text{ZS}} - 90^\circ & \text{ZS 步态} \\ \alpha' = \alpha + 60^\circ t_{\text{ZS}} - 60^\circ & \text{SZ 步态} \\ \alpha' = \alpha + 60^\circ & \text{SS 步态} \end{cases} \quad (12)$$

式中: α 表示初始方向角; t_{SZ} , t_{ZS} 分别表示 SZ 步态和 ZS 步态的方向角编号,如图 14 所示。

本文分别采用结构下一步重心离引导点的距离($d_{p' \rightarrow g'}$)和重心到引导路线的垂直偏差($d_{p \rightarrow r}$)作为评价指标选择翻滚步态来生产理想的理论运动路径。

(1) 指标 $d_{p' \rightarrow g'}$ 可以表示为

$$d_{p' \rightarrow g'} = \sqrt{(x_{g'} - x_{p'})^2 + (y_{g'} - y_{p'})^2} \quad (13)$$

$$g' = \begin{cases} j+1 & d_{p' \rightarrow g} \geq l_{\min} \\ j+2 & d_{p' \rightarrow g} < l_{\min} \end{cases} \quad (14)$$

其中, d 表示两点距离; p' 为下一步的结构重心; g 和 g' 分别为当前引导点和下一步的引导点; j 为引导点编号; l_{\min} 为步态最小步长。

然后通过删选,获得下一步翻滚步态:

$$\Delta p^I = \begin{cases} P_Z^I(d_{p' \rightarrow g', \min}) Z \\ P_S^I(d_{p' \rightarrow g', \min}) S \end{cases} \quad (15)$$

式中: Δp^I 为步态集合 P_Z^I 或 P_S^I 中 $d_{p' \rightarrow g'}$ 最短的步态 P_Z^I 和 P_S^I 为式(11)中满足碰撞检测的步态集合。

(2) 引导路线 r 可以用以下参数方程表示。

$$A \cdot x + B \cdot y + C = 0 \quad (16)$$

因此,指标 $d_{p \rightarrow r}$ 可以表示为

$$d_{p \rightarrow r} = \frac{|A \cdot x_p + B \cdot y_p + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (17)$$

式中: p 为结构当前位置重心; A , B 和 C 为确定引导路径的系数。

为了确保结构在每步向后续的引导点移动,施加以下限制,即

$$d_{p \rightarrow g'} = \sqrt{(x_{g'} - x_p)^2 + (y_{g'} - y_p)^2} \quad (18)$$

$$P^{II} = \begin{cases} P^I(d_{p \rightarrow g'} < d_{p \rightarrow g'}) & d_{p \rightarrow g'} > d_{p \rightarrow g', \min} \\ P^I(d_{p \rightarrow g', \min}) & d_{p \rightarrow g'} \leq d_{p \rightarrow g', \min} \\ P^I(d_{p \rightarrow g'} < l_{\max}) & d_{p \rightarrow g'} \leq d_{p \rightarrow g', \min} \end{cases} \quad (19)$$

$$l_{\max} = \begin{cases} l_{\text{ZZ}} & Z \\ l_{\text{SS}} & S \end{cases} \quad (20)$$

式中: P^{II} 为满足向前翻滚和碰撞检测的步态集合,

P^I 为满足碰撞检测的步态集合, l_{ZZ} 和 l_{SS} 分别表示 ZZ 步态和 SS 步态的步长。

同理,通过删选,获得下一步的翻滚步态,即

$$\Delta p^{II} = \begin{cases} P_Z^{II}(d_{p \rightarrow r, \min}) Z \\ P_S^{II}(d_{p \rightarrow r, \min}) S \end{cases} \quad (21)$$

式中: Δp^{II} 为步态集合 P_Z^{II} 或 P_S^{II} 中 $d_{p \rightarrow r}$ 最短的步态, P_Z^{II} 和 P_S^{II} 为式(11)中满足碰撞检测和向前翻滚的步态集合。

在根据不同的评价指标获得确定的翻滚步 Δp 后, Snub-12 的重心位置的变化可以表示为:

$$p(k+1) = p(k) + \Delta p \quad (22)$$

式中: $p(k)$ 表示结构当前位置; $p(k+1)$ 表示在当前位置翻滚一步后所处位置; Δp 表示确定后的翻滚步。

3.4 仿真分析

本节设计了 3 种场景并对其开展仿真分析,环境建模为 800×800 的无量纲俯视工作区域,起点坐标为(50, 50),目标点坐标为(750, 750),并在不同场景中设置了一定数量形状各异的障碍物,考虑到结构的自身尺寸,对每种场景的障碍物进行膨化处理。设定初始扩展步长 $\text{eta} = 50$,目标点邻域 $\lambda = 30$,四种步态的初始参数设置如表 6 所示。

表 6 步态的初始参数

Tab. 6 Initial parameters of gait

步态	步长 l	初始方向角 $\alpha/^\circ$
SS	33.85	42.3
ZZ	42.35	2.7
ZS	24.83	45
SZ	24.83	-15

图 15 为两种评价指标下 Snub-12 在三种环境中运动路径图,表 7 为三种环境中 50 次路径规划的平均数据,在三种场景下 Snub-12 都可以通过不同步态随机组合获得结构从起点到终点的理论运动路径,验证本文方法是可行有效的。另外,数据显示在三种环境中,步态指标为 $d_{p' \rightarrow g', \min}$ 的运动路径的路径长度和步态总翻滚步少于一,步态指标为 $d_{p \rightarrow r, \min}$ 的运动路径的路径最大偏差和平均偏差小于另一条,这表明,对于多步态运动结构,可以通过不同的步态评估指标进行结构的步态组合,以获得满足需要的运动路径。

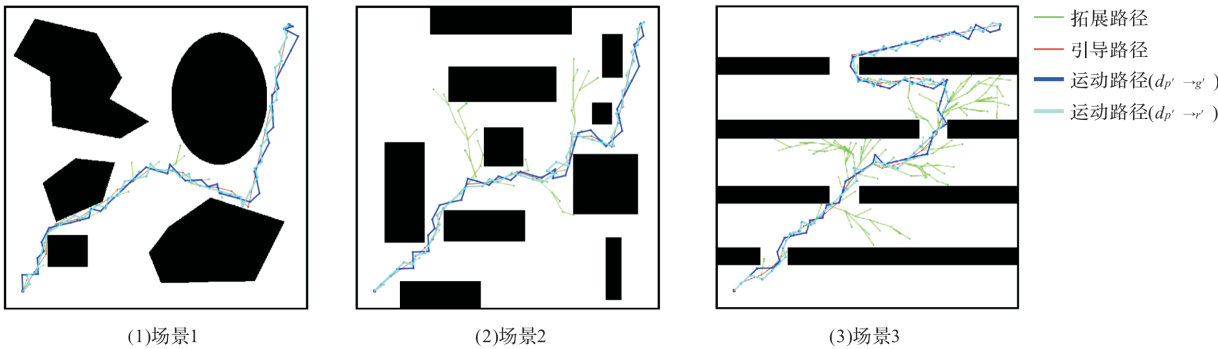


图 15 三种场景下路径规划图
Fig. 15 Path planning diagrams under three scenes

表 7 Snub-12 在三种场景中的仿真数据
Tab. 7 Simulates data of Snub-12 in three scenarios

指标	步态翻滚数				路径长度	最大 $d_{p \rightarrow r}$	平均 $d_{p \rightarrow r}$
	ZZ	ZS	SZ	SS			
场景 1							
$d_{p' \rightarrow g', \min}$	8.54	10.88	10.38	16.06	1420.95	24.52	9.24
$d_{p \rightarrow r, \min}$	8.07	15.2	14.62	11.18	1449.13	22.85	7.27
场景 2							
$d_{p' \rightarrow g', \min}$	8.42	11.92	11.50	12.46	1347.48	24.45	8.57
$d_{p \rightarrow r, \min}$	7.18	14.86	14.38	10.78	1381.31	21.88	6.87
场景 3							
$d_{p' \rightarrow g', \min}$	10.90	14.10	13.76	18.70	1773.50	27.86	9.07
$d_{p \rightarrow r, \min}$	9.68	18.36	18.00	14.80	1804.70	24.15	7.10

4 结论

(1) 本文用几何方法找到了一种多步态的十二杆张拉整体结构(Snub-12)的构型与动力松弛法和力密度法的找形结果基本一致,表明找形结果是合理的;

(2) Snub-12 在滚动时可越过等腰三角形实现两个基本步态之间的翻滚运动, Snub-12 可形成三种独立步态运动的路径空间,通过 Snub-12 与 TR-6 进行对比, Snub-12 在步长和路径盲区方面优于 TR-6;

(3)本文方法可以在路径空间环境中规划出与其他两种算法一致的张拉整体结构的理论运动路径,然后对 Snub-12 在不同环境下进行了仿真分析,可以规划出其运动路径,验证本文方法是可行有效的;

(4)对于多步态运动结构,可以通过不同的步态评估指标(不限于本文的两种指标)进行结构的步态组合,以获得满足需要的运动路径.

参考文献 References

[1] MAURIN B, MOTRO R, CEVAER F, et al. Composite profiles and membranes tensegrity panels[J].

European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2009, 13(9): 1061-1072.
[2] SCARR G. A consideration of the elbow as a tensegrity structure[J]. International Journal of Osteopathic Medicine, 2012, 15: 53-65.
[3] RIEFFEL J, MOURET J B. Adaptive and resilient soft tensegrity robots[J]. Soft Robotics, 2018, 5(3): 318-329.
[4] CHEN M,GOYAL R, MAJJI M, et al. Design and analysis of a growable artificial gravity space habitat [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 106: 106147.
[5] LEE H, JANG Y, CHOE JK, et al. 3D-printed programmable tensegrity for soft robotics [J]. Science Robotics, 2020, 5(45) :1-11.
[6] HIRAI S,IMUTA R. Dynamic simulation of six-strut tensegrity robot rolling[C]// IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. Guangzhou, China: Guangzhou University Press, 2012: 198-204.
[7] SABELHAUS A P, BRUCE J,CALUWAERTS K, et al. System design and locomotion of SUPERball, an untethered tensegrity robot[C]// 2015IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seattle, WA, USA:IEEE Xplore, 2015: 2867-2873.
[8] 杜汶娟,马书根,李斌,等. 可变结构体机器人形变

- 状态找寻及运动方向预测方法[J]. 科学通报, 2013, 58(S2): 97-103.
- DU Wenjuan, MA Shugen, LI Bin, et al. Deformation state searching and motion direction prediction of variable structure robot[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(S2): 97-103.
- [9] 杜汶娟, 马书根, 李斌, 等. 可变结构体机器人滚动步态参数优化[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 127-136.
- DU Wenjuan, MA Shugen, LI Bin, et al. Parameter optimization for rolling motion of structure variable robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(17): 127-136.
- [10] LUO A N, LIU H P. Analysis for feasibility of the method for bars driving the ball tensegrity robot[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2017, 9(5): 1-6.
- [11] ZHENG Y F, CAI H Y, WANG M J, et al. Rolling gaits of a strut-actuated six-strut spherical tensegrity[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(5): 172988142096090.
- [12] ZHENG Y, LI Y, LU Y P, et al. Robustness evaluation for rolling gaits of a six-strut tensegrity robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2021, 18(1): 172988142199363.
- [13] KIM K, MOON D, BIN J Y, et al. Design of a spherical tensegrity robot for dynamic locomotion[C]// 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver, BC, Canada:IEEE Xplore, 2017: 450-455.
- [14] KIM K, AGOGINO A, AGOGINO A. Rolling locomotion of cable-driven soft spherical tensegrity robots[J]. Soft Robotics, 2020, 7(3): 346-361.
- [15] SHIBATA M, HIRAI S. Moving strategy of tensegrity robots with semiregular polyhedral body[C]// Emerging Trends in Mobile Robotics-International Conference on Climbing & Walking Robots & the Support Technologies for Mobile Machines. Komatsu, Shiga, Japan:IEEE Xplore, 2010: 359-366.
- [16] PETERSON H. Twelve bar intelligently simulated tensegrity[D]. Norrbotten: Lulea University of Technology, 2018.
- [17] KIM K, CHEN L H, CERA B, et al. Hopping and rolling locomotion with spherical tensegrity robots[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. Daejeon, Korea (South): IEEE Xplore, 2016: 4369-4376.
- [18] CHANG J, LI B, LIU W et al. The path planning method of tensegrity robot based on A * algorithm[C]// 2018 IEEE 8th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Tianjin, China: Tianjing University Press, 2018: 1502-1507.
- [19] LU Y P, XU X, LUO Y Z. Path planning for rolling locomotion of polyhedral tensegrity robots[J]. Proceedings of IASS annual symposia, 2019, 60(4): 273-286.
- [20] SHAH D S, BOOTH J W, BAINES R L, et al. Tensegrity robotics[J]. Soft Robotics, 2022, 9(4): 639-656.
- [21] NOOSHIN H, SAMAVATI A. High precision data for snub polyhedral[C]// Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS): Future Visions. Amsterdam, The Netherlands:IEEE Xplore, 2015: 1-11.
- [22] ZHANG L Y, ZHU S X, CHEN X F, et al. Analytical form-finding for highly symmetric and super-stable configurations of rhombic truncated regular polyhedral tensegrities[J]. Journal of applied mechanics, 2019, 86(3): 1-11.
- [23] 冯晓东, 章万鹏, 罗尧治, 等. 基于方案矩阵编制策略的张拉整体结构拓扑形态研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(8): 75-86.
- FENG Xiaodong, ZHANG Wanpeng, LUO Yaozhi, et al. Investigation on topological morphology of tensegrity structure based on scheme matrix strategy[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(8): 75-86.
- [24] 冯晓东, 杨伟家, 李锋, 等. 基于二次奇异值分解法的张拉整体结构找形分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(4): 502-509.
- FENG Xiaodong, YANG Weijia, LI Feng, et al. Form-finding analysis of tensegrity structure based on quadratic singular value decomposition method[J]. J of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2021, 53(4): 502-509.
- [25] 王硕, 段蓉凯, 廖与禾. 机器人路径规划中快速扩展随机树算法的改进研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(7): 1-8.
- WANG Shuo, DUAN Rongkai, LIAO Yuhe. Research on the improvement of the rapidly exploring random tree algorithm in robot path planning[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(7): 1-8.
- [26] CHI W, DING Z, WANG J, et al. A generalized voronoi diagram based efficient heuristic path planning method for RRTs in mobile robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 4926-4937.

(编辑 吴海西)