

可折叠管道蠕动并联机构设计与运动仿真

张春燕 朱锦翊 卢晨晖

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 为探索管道蠕动机构及其移动方式,设计一种具有折展能力的3-URU管道蠕动并联机构。该机构支链运动副R与U的空间位置关系能等效成Sarrus结构,可实现并联机构的折展,对折展原理和折展干涉进行分析,求得该机构折展比,并通过仿真验证其折展效果。应用螺旋理论计算该机构自由度,求解位置正解方程,并通过蒙特卡洛法求得该机构的工作空间。在管道内对机构进行蠕动步态规划,并利用ADAMS软件进行管道内的蠕动步态验证,得到两平台位移曲线和支链转角变化曲线。研究表明,该并联机构可实现管道内的蠕动,且折叠后体积较小。

关键词: 3-URU并联机构; 折展机构; 运动仿真; 管道蠕动

中图分类号: TH112 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0410-08 OSID: 

Design and Motion Simulation of Wriggling Parallel Mechanism for Collapsible Pipeline

ZHANG Chunyan ZHU Jinyi LU Chenhui

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to explore a new pipeline peristaltic mechanism and its moving mode, a new 3-URU pipeline peristaltic parallel mechanism with folding ability was proposed. Due to the spatial position relationship between the R and U of the branch motion of the mechanism can be equivalent to the Sarrus structure, the parallel mechanism can be folded, and its folding principle and folding interference were analyzed to obtain the folding ratio and verify its folding effect through simulation. The degree of freedom of the mechanism was calculated by using the screw theory, solving the positive solution of the position and through Monte Carlo method to get the working space of the agency. According to the position analysis, the creeping gait planning of the mechanism in the pipeline was carried out and the creeping gait in the pipeline was verified by the ADAMS software, the displacement curve of the two platforms and the curve of the branch chain rotation angle were obtained. It was comprehensively analyzed that the mechanism can carry out the peristaltic movement in the pipeline after expansion and had a small volume after folding, which provided a certain theoretical basis for the subsequent application of specific pipeline engineering.

Key words: 3-URU parallel mechanism; folding mechanism; kinematic simulation; pipeline peristaltic motion

0 引言

随着大口径石油、天然气管道的发展,以及对管道内壁裂纹、砂眼、焊缝、疵病等信息检测和探测应用需求的增加^[1-2],轮式、壁腹式、履带式、蠕动式等各种驱动模式的管道机器人应运而生^[3-5]。蠕动作为一种较适合于管道等狭窄环境探测的移

动模式,受到众多研究者的关注。TANAKA等^[6]设计一款适用于下水道管道的探测机器人,该机器人利用气动人造肌肉的重复伸长和膨胀达到蠕动的目的。徐从启等^[7]设计了管道机器人的自锁止机构,增大了管道机器人的攀附和牵引能力。TUO等^[8]受蠕动生物生理结构和运动机制的启发,设计一种由单个弹性气囊控制仿生脚、适用于

收稿日期: 2020-04-28 修回日期: 2020-05-31
基金项目: 国家自然科学基金项目(11604205)和上海市研究生科研创新基金项目(19KY0151)
作者简介: 张春燕(1980—),女,副教授,博士生,主要从事机器人机构学研究,E-mail: cyzhang@sues.edu.cn

复杂环境探测的软蠕动机器人。颜国正等^[9]根据仿生学原理研制了适用于狭小空间、微小管道的小型蠕动机器人。以上管道机器人结合多种驱动方式及蠕动方式提高了机器人在管道内部的移动能力。但这些机器人不适宜垂直管道的探测,且随着管道直径的增大,机器人的整体体积也随之增大,不易携带与运输。

空间可展机构是一种根据实际功能需求通过机构运动改变其几何形状的结构,既可根据运输或存储空间的需求进行折叠,又可在工作状态下展开成较大包络尺寸,并承受一定的载荷^[10-12],该机构广泛应用于宇航^[13]、建筑^[14]和军事^[15]等工程。文献[16-17]对折展天线进行了大量研究,设计了一种以活动铰链连接的固面展开天线,增加了其形面精度,并将其应用于空间作业中;MADEN 等^[18]系统归纳了剪叉机构的几何原理和设计方法,设计了一种可用于屋顶建造的空间剪叉机构,增强了建筑结构的自适应性;DING 等^[19]基于多面体折展原理利用空间连杆设计了一种特殊的可展三棱柱结构,丰富了折展机构的多样性,该结构已广泛应用于航空航天领域。借助于可展机构可以解决蠕动管道机器人整体结构偏大、不易运输与携带的问题。

本文基于可展机构的思想,结合并联机构高刚度、高精度等特点,设计一种具有缩放平台的 3-URU 蠕动并联机构,根据其结构特点研究其折展特性,并作折展干涉分析,利用螺旋理论^[20]计算该机构的自由度,分析其攀爬竖直管道时的运动步态,并通过仿真进行验证。

1 机构组成与折展原理分析

1.1 机构组成

图 1 为 3-URU 并联机构初始位置示意图,该机构包括 2 个完全相同的缩放下平台 A、上平台 B,每个平台均由 3 个 V 形连杆通过 3 个移动副 P 连接形成 1 个等边三角形。平台 A、B 的顶点分别表示为 A_i 、 B_i ($i=1,2,3$), 2 个平台的几何中心点分别为 A 、 B , P 副锁定时平台初始位置边长分别为 L_A 和 L_B 。上下平台通过 3 个完全相同的 URU (U 代表虎克铰, R 代表转动副) 支链对称连接,且规定支链 i 中与平台相连接的 U 副第 1 转动轴线为 U_1^i ,与平台相平行的 U 副第 2 转动轴线为 U_2^i ,而支链 i 中的上下 2 个 U 副的第 1 轴线 U_1^i 交于一点 Q_i ($i=1,2,3$),中间 R 副轴线与 2 个 U 副第 2 转动轴线 U_2^i 平行,每条支链的杆长均为 d 。

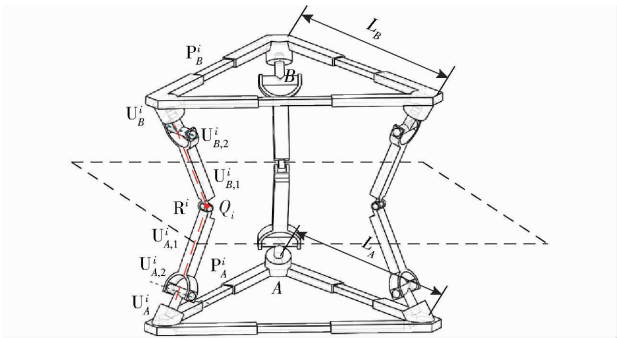


图 1 机构模型示意图

Fig. 1 Schematic of mechanism model

1.2 折展原理分析

1.2.1 等效 Sarrus 折展分析

Sarrus 机构^[21]是自由度为 1,且自由度性质为沿着平台法线移动的直线机构。由于 Sarrus 机构的所有转动副的轴线均平行,如图 2 所示,当 Sarrus 机构的一个平台固定,另一个平台在转动副的作用下可以实现平行于固定平面的上下折叠运动。

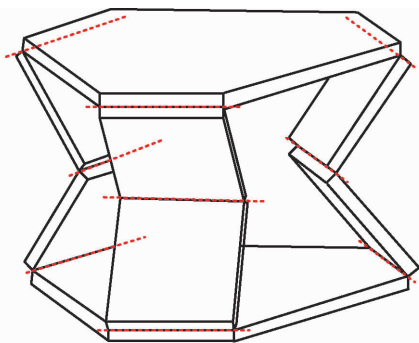


图 2 虚约束 Sarrus 机构的 R 副轴线

Fig. 2 R axis of virtual constraint Sarrus mechanism

由于虎克铰 U 副可完全等效于轴线相交的 2 个转动副,且允许两构件间具有 2 个独立的相对转动。当每条支链的 $U_{A,1}^i$ 与 $U_{B,1}^i$ 锁定后,支链即为空间平行的 RRR 支链,3-URU 并联机构则等效成具有虚约束的 Sarrus 机构^[22],从而实现 3-URU 并联机构在平台法线方向的折叠,使得整体结构拥有折展能力。

为保证机构各杆长有足够的折叠空间,连杆长度 d 取值有限定。如图 3 所示,设定折叠机构的外

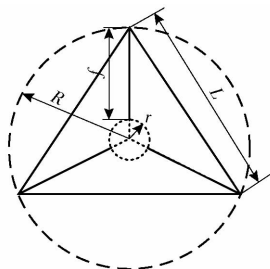


图 3 机构折叠俯视图

Fig. 3 Top view of mechanism folding

接圆半径为 R , 则连杆投影长度 f 、机构中心与连杆间的距离 r 与外接圆半径需满足

$$r = R - f \quad (r > 0)$$

(1)

机构折叠过程如图 4 所示, 上下平台间的初始高度 h 与连杆长度 d 、输入角 θ 的关系为

$$h = 2d \sin \theta$$

(2)

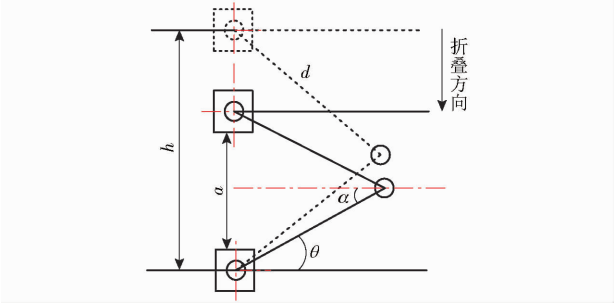


图 4 等效 Sarrus 机构折叠过程

Fig. 4 Folding process of equivalent Sarrus mechanism

根据可展机构折展比的定义^[23], 折展比为机构展开高度 h 与折叠高度 a 的比值, 可得到折展比 η 表达式为

$$\eta = \frac{h}{a} = \frac{1}{\sin \alpha} \quad (0^\circ < \alpha < 90^\circ)$$

(3)

式中 α ——折叠角

图 4 所示折叠过程中存在等量关系: $\Delta \theta = \Delta \alpha$, 因此当输入角 θ 在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围内变化, 折叠角 α 也随之在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围变化, 机构发生折叠。

1. 2. 2 干涉与折展比分析

机构装配时由于杆件存在一定的厚度 m , 使得机构在折展缩放的过程可能发生干涉, 影响机构折展比。图 5 所示阴影重合部分表示杆件在折展时发生干涉, 故需要找出杆件最大干涉处, 进行杆件形状和 R 副连接的改进。由图 5 可知, 发生最大干涉处位于杆件之间的运动副 R^i 的连接处, 为了尽可能减小杆件干涉对机构折展比的影响, 定义运动副 R^i 安装位置与连杆顶点长度为 e , 其改进后的机构模型如图 6 所示。

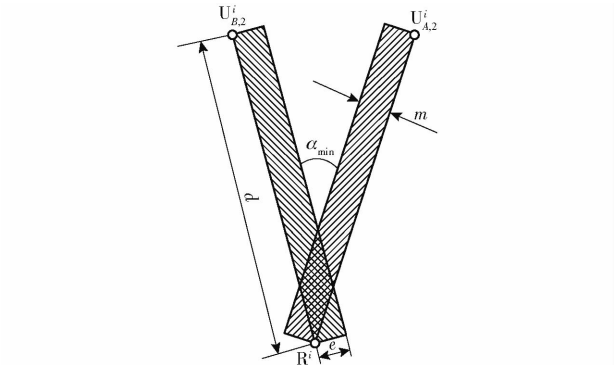


图 5 折展干涉分析简图

Fig. 5 Schematic of folded interference analysis

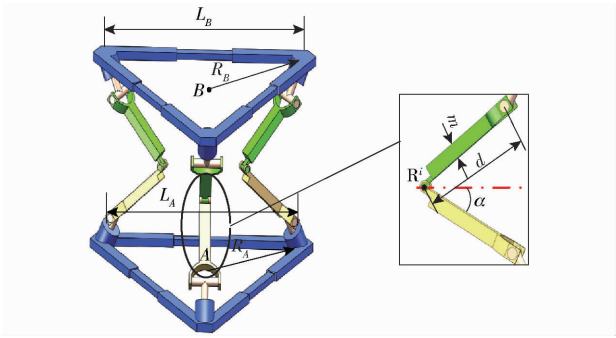


图 6 优化 R 副后的三维模型

Fig. 6 3-D model after R pair optimization

对图 6 所示优化后的装配体进行折展性分析, 平台 A、B 的外接圆半径为 R_A 与 R_B , 令 $R = \{R_A, R_B\}_{\min}$ 。折展比 η 与机构平台 A、B 边长 L_A, L_B 和运动副 R^i 安装位置与连杆顶点长度 e 有关, 且其整体折展结构等效为 Sarrus 机构, 则根据式 (1)、(3) 可得 3-URU 并联机构的折展比 η 为

$$\eta = \frac{2d}{a} = K \frac{d}{(d - e / \sin(2\alpha)) \cos \alpha}$$

(4)

其中

$$K = \begin{cases} \sin \alpha & (R \leq d) \\ 1 & (R > d) \end{cases}$$

式中 K ——与平台边长有关的状态系数

当折叠角 α 在 $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围内变化, 安装位置 e 在 $[0 \text{ mm}, 5 \text{ mm}]$ 范围内变化时, 根据式 (4) 利用 Matlab 可绘制出机构折展比 η 随平台外接圆半径 R 和安装位置 e 的变化图谱, 如图 7 所示。可以看出, 该空间折展机构的折展比 η 随上下平台外接圆半径 R 的增大和安装位置的减小而增大。

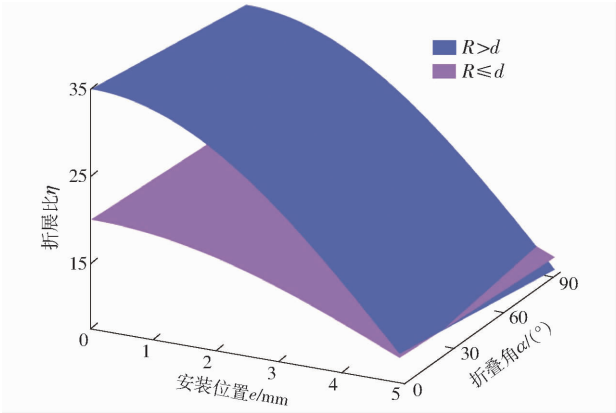


图 7 折展比变化曲面

Fig. 7 Curve of variation of folding ratio

2 自由度分析

由于机构的对称性选任一支链进行自由度分析, 该支链的运动螺旋如图 8 所示。将原点 O_i 与定、动平台 U 副第 1 转动副轴线的交点 Q_1 重合, Z_i 轴与定平台 U 副第 1 转动轴线重合, X_i 轴方向与

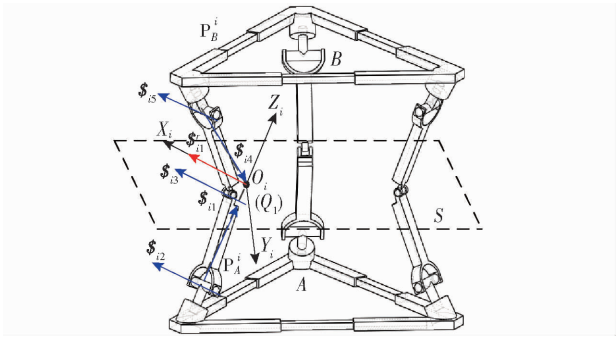


图8 3-URU 机构支链螺旋示意图

Fig.8 3-URU mechanism branch screw diagram

定、动平台 U 副第 2 转动副轴线平行, Y_i 轴方向根据右手定则确定。由螺旋理论可得这一支链的运动螺旋系为

$$\begin{cases} \$_{11} = (0 \quad 0 \quad 1; 0 \quad 0 \quad 0) \\ \$_{12} = (1 \quad 0 \quad 0; 0 \quad b_2 \quad 0) \\ \$_{13} = (1 \quad 0 \quad 0; 0 \quad b_3 \quad c_3) \\ \$_{14} = (1 \quad 0 \quad 0; 0 \quad b_4 \quad c_4) \\ \$_{15} = (0 \quad m_5 \quad n_5; 0 \quad 0 \quad 0) \end{cases} \quad (5)$$

其反螺旋系为

$$\$'_1 = (1 \quad 0 \quad 0; 0 \quad 0 \quad 0) \quad (6)$$

由式(6)可知,支链约束为一个力线矢,方向沿分支坐标系 X_i 轴。由于分支坐标系的 X_i 轴平行于定、动平台 U 副第 2 转动副 U_2^1 ,而 U 副第 2 转动副 U_2^1 始终平行于机构的上下平台,可知当机构位于初始位置时,机构分支的约束力线矢过上下平台 U 副第 1 转动副 U_1^i 交点 Q_i 且平行于定、动平台 U 副第 2 转动副和上下平台平面。机构的对称性让机构的其他 2 个分支也存在 2 个相同的约束力线矢。当机构位于初始位置时,3 个支链中上下平台 U 副第 1 转动副 U_1^i 交点 Q_i 所构成的平面 S 与上下平台平行。综上可知,机构的 3 个约束力线矢共面且平行于上下平台,3 个约束力线矢都在平面 S 内,如图 9 所示,因此平面 S 也称为该机构的约束力平面。

依据 Blanding 法则^[24],同一平面内 3 个不交于一点且不互相平行的力可以转换为 1 个方向沿平面法线的力偶和 2 个汇交力。则该机构的约束力分布如图 9b 所示,力偶 $\$'_3$ 限制了机构动平台 B 沿约束力平面 S 法线的转动,2 个汇交力 $\$'_1$ 和 $\$'_2$ 限制了机构在约束力平面的 2 个移动。该机构只剩下绕约束力平面内 2 条轴线的转动和沿约束力平面法线方向的移动。当机构位于初始位置时,机构的自由度为 3,自由度性质为两转一移。2 个转动自由度为:绕约束力平面 S 内任意轴线的 2 个转动,1 个移动自由度为:沿约束力平面 S 法线的移动。

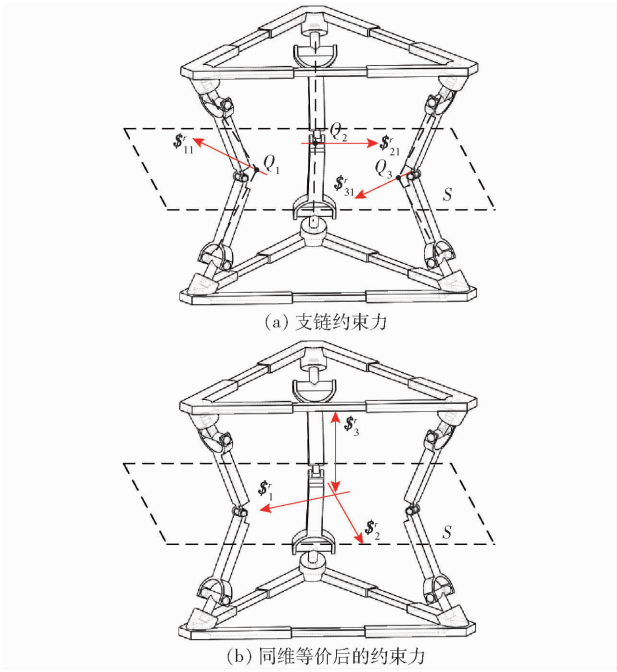


图9 机构约束力分布图

Fig.9 Distribution diagrams of mechanism binding force

根据螺旋理论,3 个力约束在不同轴上,所以不存在公共约束,故生成公共约束所需的约束数为 0,剩余的约束数为 3,且这 3 个约束力线性无关,构成了一个 3 系螺旋,所以冗余约束为 0,通过修正 G-K 公式计算的 P 副锁定后 3-URU 并联机构自由度为

$$M_U = (6 - \lambda)(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i + v = 6(8 - 9 - 1) + 15 + 0 = 3$$

式中 λ ——公共约束数
 n ——机构总构件数
 g ——运动副数目
 f_i ——第 i 个运动副自由度
 v ——冗余约束数目

当 P 副驱动时,平台 A、B 尺寸发生改变时,支链的运动螺旋表达式保持不变,因此 3-URU 机构的自由度不会因 2 个平台的改变而发生变化^[25]。而对于由三移动副组成的缩放平台在文献[26]中已经被证明具有 1 个自由度,记作 $M_p = 1$ 。因此整个机构的自由度计算式为

$$M = M_U + 2M_p = 3 + 2 = 5$$

根据自由度分析可知,为使机构具有确定运动,需要添加至少 5 个驱动。除去上下缩放平台的 2 个驱动,则中间 URU 并联机构需要 3 个驱动。

3 正运动学分析

如图 10 所示,以平台 A 的几何中心点为原点建立坐标系 $OXYZ$, X 轴平行于 $l_{A_1A_3}$, Y 轴指向点 A_2 , Z 轴方向由右手定则确定, θ_i 代表每个支链 i 所绕

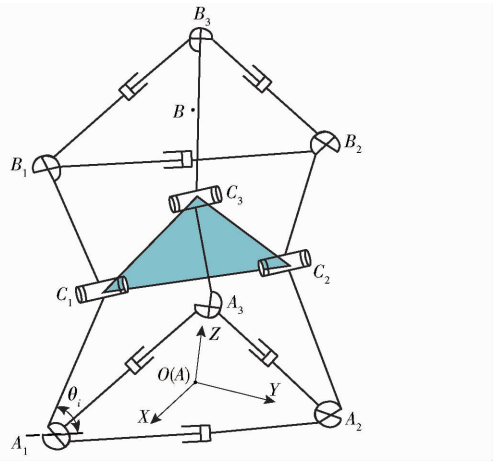


图 10 机构结构示意图

Fig. 10 Schematic of mechanism structure

过的角度。在坐标系 $OXYZ$ 下, L_A 、 L_B 和 d 已知的情
况下, 当平台 A、B 尺寸改变时, 机构的自由度不会
因平台的缩放而发生变化, 运动特性不会发生改变,
动平台中心 B 不会发生改变, 因而简化正运动学求
解, 以求解动平台中心 B 的坐标即是运动学正解问
题。上下平台相同 ($L_A = L_B = L = \sqrt{3}d$), 由机构对称
性可知, 得到 $\angle AA_iC_i = \angle C_iB_iB$ 。

首先根据几何结构, 得到 A_i 位置为

$$\begin{bmatrix} x_{A_1} & x_{A_2} & x_{A_3} \\ y_{A_1} & y_{A_2} & y_{A_3} \\ z_{A_1} & z_{A_2} & z_{A_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}L}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{3}L}{2} \\ -\frac{L}{2} & L & -\frac{L}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

C_i 位置可分别写成关于 θ_i 的方程, 即

$$\begin{bmatrix} x_{C_1} & x_{C_2} & x_{C_3} \\ y_{C_1} & y_{C_2} & y_{C_3} \\ z_{C_1} & z_{C_2} & z_{C_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2}(L - d\cos\theta_1) & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}(L - d\cos\theta_3) \\ -\frac{1}{2}(L - d\cos\theta_1) & L - d\cos\theta_2 & -\frac{1}{2}(L - d\cos\theta_3) \\ d\sin\theta_1 & d\sin\theta_2 & d\sin\theta_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

因此根据定长方程, 可得方程组

$$\begin{cases} (x_B - x_{C_1})^2 + (y_B - y_{C_1})^2 + (z_B - z_{C_1})^2 = d_1 \\ (x_B - x_{C_2})^2 + (y_B - y_{C_2})^2 + (z_B - z_{C_2})^2 = d_2 \\ (x_B - x_{C_3})^2 + (y_B - y_{C_3})^2 + (z_B - z_{C_3})^2 = d_3 \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{令 } k_{11} = \frac{y_{C_2} - y_{C_1}}{x_{C_2} - x_{C_1}}, k_{12} = \frac{z_{C_2} - z_{C_1}}{x_{C_2} - x_{C_1}}, k_{21} = \frac{y_{C_3} - y_{C_1}}{x_{C_3} - x_{C_1}},$$

$$k_{22} = \frac{z_{C_3} - z_{C_1}}{x_{C_3} - x_{C_1}}, \text{化简得}$$

$$\begin{cases} x_B + k_{11}y_B + k_{12}z_B = 0 \\ x_B + k_{21}y_B + k_{22}z_B = 0 \end{cases} \quad (10)$$

求解方程组, 可得

$$\begin{cases} x_B = a_1z_B \\ y_B = a_2z_B \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{其中 } a_1 = -\frac{k_{11}(k_{22} - k_{12})}{k_{11} - k_{21}} - k_{12} \quad a_2 = \frac{k_{22} - k_{12}}{k_{11} - k_{21}}$$

将 x_B 和 y_B 代入式(9)得 z_B 方程为

$$(a_1^2 + a_2^2 + 1)z_B^2 - 2(a_1x_D + a_2y_D + z_D)z_B = 0 \quad (12)$$

求解得

$$\begin{cases} z_B = 0 \\ z_B = \frac{2(a_1x_{C_1} + a_2y_{C_1} + z_{C_1})}{a_1^2 + a_2^2 + 1} \end{cases} \quad (13)$$

对于 $z_B = 0$, 对应的机构状态即为上下平台重合的位
置, 故舍去此解。

因此, 令 $d = 20 \text{ mm}$, 根据图 11 所示蒙特卡洛法
流程图求得 3-URU 并联机构动平台中心点 B 所能
达到位置解的集合, 并依此进行包络求得工作空间,
流程图如图 12 所示。

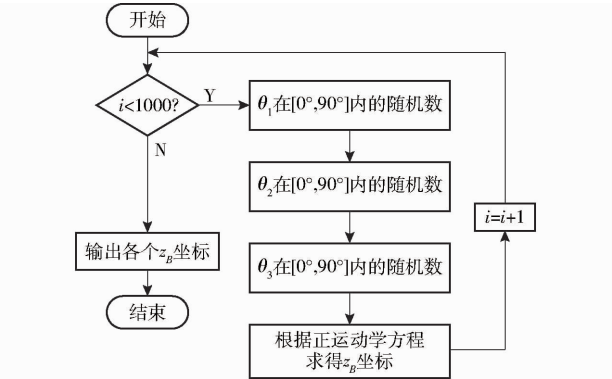


图 11 蒙特卡洛法工作空间流程图

Fig. 11 Monte Carlo workspace flow chart

由图 12a 可知, 3-URU 机构在定坐标系 $OXYZ$
下 Z 轴方向上可达的最大距离为 40 mm , 整体体积较
大, 点 B 可达到 X 轴方向范围为 $-10.7 \sim 11.5 \text{ mm}$, 并
在极限处所能达到的 Z 轴距离约为 20 mm , 因此动
平台可绕 Y 轴正负方向旋转 $\pm 60^\circ$ 达到极限。由
图 12b 可知, 由于 Y 轴方向所对应的支链 2 限制了
动平台向 Y 轴负方向旋转的角度, 因此点 B 可达到
 Y 轴方向范围为 $-9.8 \sim 15.3 \text{ mm}$, 并在极限处所能
达到的 Z 轴距离约为 20 mm , 则动平台绕 X 轴正负
方向旋转 52° 和 -64° 达到极限。

4 蠕动步态规划

以图 1 中平行于上下平台的 U 副第 2 轴线 U_2^i
为驱动, 在蠕动过程的一个周期内定动平台与管道

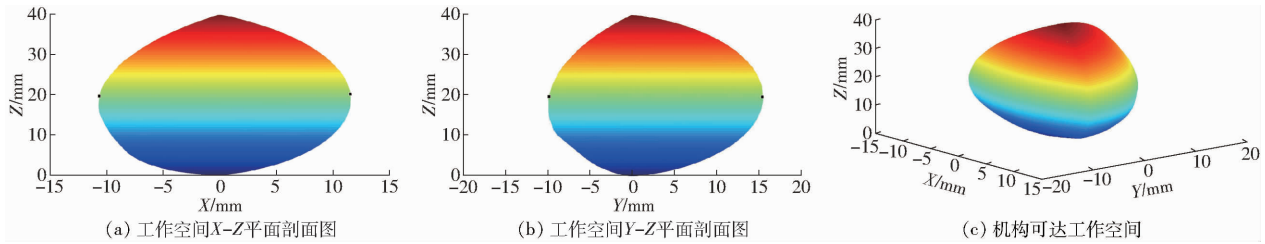


图 12 机构动平台 workspace

Fig. 12 Workspaces of dynamic platform

内壁交替接触,因此需对机构中平行于平台 A、B 的 U_2^i 都安置驱动电机,转动角为 θ_i, θ_j 。结合 2 个平台交替缩放配合支链的转动,能实现蠕动运动。

假设初始状态下,平台 A 和平台 B 同时接触管道内,图 13 为该机构蠕动流程,其具体步态如图 14 所示。

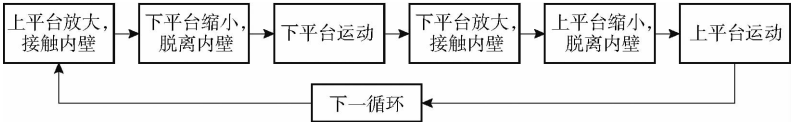


图 13 机构蠕动流程图

Fig. 13 Flow chart of mechanism creep

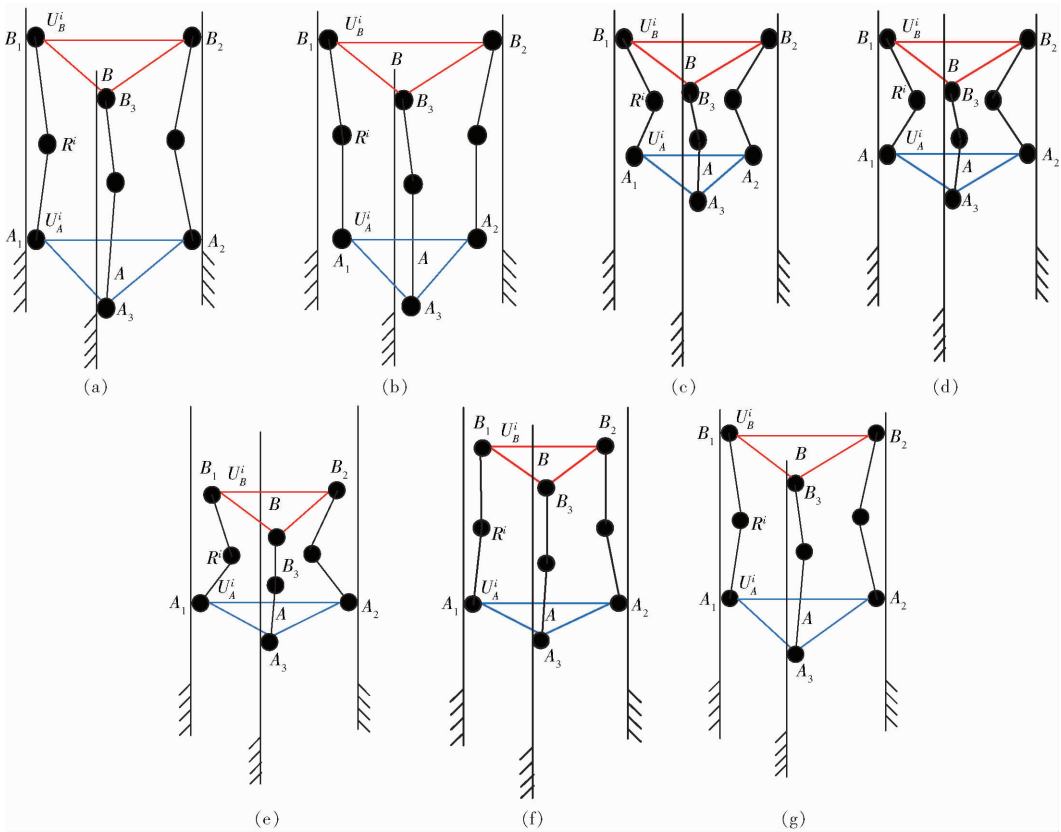


图 14 机构蠕动步态示意图

Fig. 14 Schematic of wriggling gait of mechanism

- (1) 初始状态(图 14a),此时 B 为定平台,A 为动平台。
- (2) 驱动平台 A 上移动副 P_A ,缩小平台 A 使得平台上点 A_i 离开管道内壁(图 14b)。
- (3) 根据所需步长,以平台 B 上 U 副第 2 轴线 $U_{B,2}^i$ 为驱动副,驱动角为 $\theta_j (j=1,2,3)$,使平台 A 向上升起(图 14c)。

- (4) 继续驱动平台 A 上移动副 P_A ,放大平台 A 使平台上点 A_i 接触管道内壁(图 14d)。
- (5) 同理,驱动平台 B 上移动副 P_B ,缩小平台 B 使平台上各 B_i 点离开管道内壁,而此时 A 为定平台,B 为动平台(图 14e)。
- (6) 同样,重复上述驱动,根据所需步长,以平台 A 上 U 副第 2 轴线 $U_{A,2}^i$ 为驱动副,驱动角为

$\theta_i(i=1,2,3)$,使平台 B 向上折叠(图 14f)。

(7)继续驱动平台 B 上移动副 P_B ,放大平台 B 使得平台上点 B_i 接触管道(图 14g)。

图 14 为该机构蠕动运动的一个周期,经一个周期后机构回归初始状态,而整体位置向上运动的长度为 $l(\sin\theta_i + \sin\theta_j)$ 。

5 运动仿真验证

5.1 折展仿真

当上下平台的移动副 P 驱动到最大行程处时,平台形成最大的外接圆(半径为 R_{max}),且运动副 R_3^i 安装位置与连杆顶点长度 $e=0\text{ mm}$,此时通过仿真得机构折叠过程如图 15 所示。当杆件长度 $d=20\text{ mm}$, $R_{max}=80\text{ mm}$,得到折叠角 α 与折展比 η 之间关系如图 16 所示。

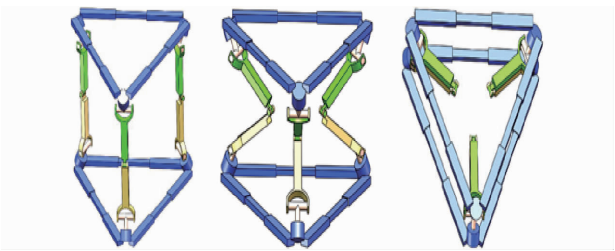


图 15 R_{max} 时机构折叠过程示意图
Fig. 15 Institutions folding process diagram at R_{max}

由图 16 可知,该机构实际折叠时的折叠角 α 与折展比 η 的关系曲线与式(3)求得的理论曲线趋势吻合,且符合图 7 中的折展比变化规律,最大折展比为 35。

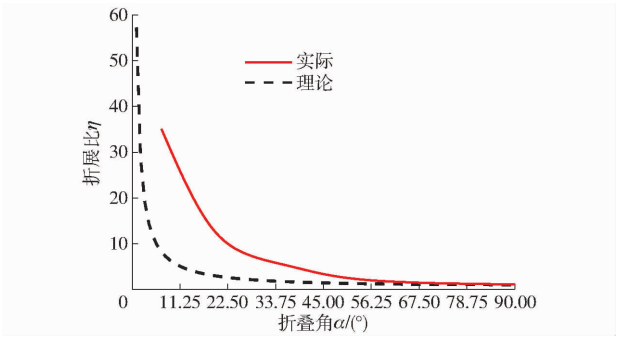


图 16 折叠角与折展比的关系
Fig. 16 Relationship between folding angle and folding ratio

5.2 管道蠕动步态仿真

按上述蠕动步态分析,建立了管道并联机器人的虚拟样机模型,其基本参数如下:上下平台外接圆半径变化范围 $50\sim80\text{ mm}$,管道直径 160 mm ,杆件长度 20 mm ,平台 P 副伸缩步长为 1 mm/s ,所有支链的转动速度为 0.1 rad/s 。并根据图 14 的蠕动运动步态,对机构进行 ADAMS 仿真验证,仿真结果如图 17 所示,各节点仿真步态对应图 14 中规划步态。经过一个运动周期机构向上运动的距离为 40 mm ,符合规划的步态运动长度。

根据仿真得到上下平台的位移曲线和角度变化量曲线如图 18、19 所示。由于机构的对称性每个支链角度的输入值都应是相同的,可得图 19 所示的角度变化符合该机构周期内运动的变化规律,角度变化会导致平台的位移。仿真结果表明,所规划的蠕动步态合理,机构可以在管道内部实现蠕动运动而且整体运动平稳。

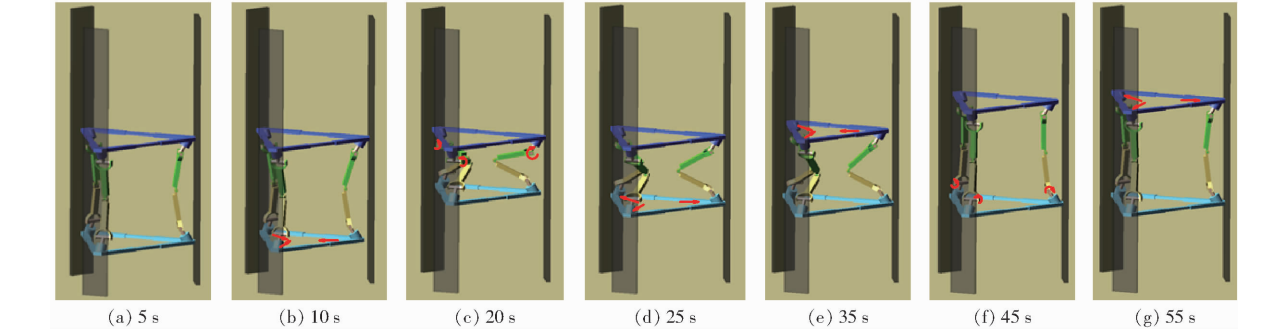


图 17 机构仿真步态
Fig. 17 Simulation gait diagram of mechanism

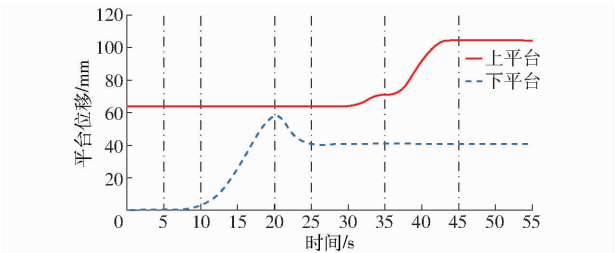


图 18 平台位移与时间的关系曲线
Fig. 18 Relationship between platform displacement and time

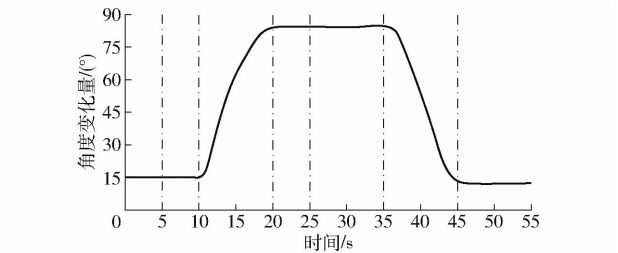


图 19 角度变化量与时间的关系曲线
Fig. 19 Relationship between angle change and time

6 结论

(1)设计了具有空间折展特性的蠕动并联机构,该机构兼具并联机构的优点和折展变形的能力。通过对机构运动干涉及折展比的分析,得出机构折展比随着平台放大和运动副 R_3^1 安装位置的减小而增大的规律,并以此得到机构运动副的安装位置。

(2)求解了该并联机构的位置正解方程,并利

用蒙特卡洛法得出工作空间。对该机构在管道上的蠕动运动步态进行规划,并通过 ADAMS 仿真进行验证,得到了机构角度变化曲线和两平台的位移曲线,证明了机构蠕动步态的合理性与平稳性。

(3)通过仿真验证了机构的折展性,研究表明,该机构具有较好的折展能力,展开后可以在管道内进行蠕动运动,且折叠后体积较小、便于运输与携带。

参 考 文 献

- [1] 刘大伟,刘佳佳.面向管道机器人的非对称惯性驱动系统及其动力学特性[J].中国机械工程,2020,31(18):2189-2195.
LIU Dawei, LIU Jiajia. Dissymmetric inertia driving system for in-pipe robot and its dynamical characteristics [J]. China Mechanical Engineering, 2020,31(18):2189-2195. (in Chinese)
- [2] 李锐明,姚燕安.具有缩放平台的串并联蠕动机构[J].机械工程学报,2016,52(23):94-101.
LI Ruiming, YAO Yanan. Serial-parallel inchworm mechanism with scalable platforms [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016,52(23):94-101. (in Chinese)
- [3] LIU Xiangyu, ZHANG Chunyan, NI Cong, et al. A reconfigurable multi-mode walking-rolling robot based on motor time-sharing control[J]. Industrial Robot, 2019,47(2):293-311.
- [4] 谢同雨,李清,丁煜文,等.多模块蛇形管道打磨机器人的设计与分析[J].机器人,2020,42(6):672-685.
XIE Tongyu, LI Qing, DING Yuwen, et al. Design and analysis of a multi-module snake shaped pipeline grinding robot[J]. Robot, 2020,42(6):672-685. (in Chinese)
- [5] 单彦霞,付冰双,李仕华,等.基于并联机构的双重驱动管道机器人设计与研究[J].机械设计,2020,37(6):17-23.
SHAN Yanxia, FU Bingshuang, LI Shihua, et al. Design and research of the dual-actuated in-pipe robot based on the parallel mechanism[J]. Journal of Machine Design, 2020,37(6):17-23. (in Chinese)
- [6] TANAKA T, HARIGAYA K, NAKAMURA T. Development of a peristaltic crawling robot for long-distance inspection of sewer pipes[C]//2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2014:180-195.
- [7] 徐从启,解旭辉,戴一帆.摩擦接触约束下的微小管道机器人管内运动稳定性分析[J].机械工程学报,2010,46(15):36-44.
XU Congqi, XIE Xuhui, DAI Yifan. Motion stability analysis of micro in-pipe robot with frictional contacts [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(15):36-44. (in Chinese)
- [8] TUO J M, ZANG H B, SHU Y X, et al. A peristaltic bionic robot controlled by a single elastic-gasbag[C]//2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation(WRC SARA), 2018:210-221.
- [9] 颜国正,丁国清,林良明,等.微小型蠕动管道探测机器人机理研究[J].仪器仪表学报,1999,20(2):207-209.
YAN Guozheng, DING Guoqing, LIN Liangming, et al. A research on the driving principle of creeping robot used for pipeline detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999,20(2):207-209. (in Chinese)
- [10] GANTES C J. Deployable structures: analysis and design [M]. WIT Press, 2001:145-147.
- [11] HUANG H, CHENG Q, ZHENG L, et al. Development for petal-type deployable solid-surface reflector by uniaxial rotation mechanism[J]. Acta Astronautica, 2020, 178:511-521.
- [12] LI G, XU P. Design and analysis of a deployable grasping mechanism for capturing non-cooperative space targets[J]. Aerospace and Technology, 2020(106):230-250.
- [13] 郭金伟,许允斗,刘文兰,等.基于四面体单元的新型可展机构自由度分析[J].机械工程学报,2019,55(12):9-18.
GUO Jinwei, XU Yundou, LIU Wenlan, et al. Mobility analysis of novel deployable mechanism based on tetrahedral element [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019,55(12):9-18. (in Chinese)
- [14] 肖航,杨巧龙,任守志,等.大型套接式展收机构接头设计分析及刚度试验研究[J].机械工程学报,2018,54(7):1-10.
XIAO Hang, YANG Qiaolong, REN Shouzh, et al. Design analysis and stiffness test of a large telescopic deployable mechanism joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,54(7):1-10. (in Chinese)
- [15] NOOR A K, VENNERS S L. Flight-vehicle materials, structures and dynamics—assessment, and future directions; computational structures technology [M]. USA: American Society of Mechanical Engineers, 1995:35-37.
- [16] GUEST S D, PELLEGRINO S. A new concept for solid surface deployable antennas[J]. Acta Astronautica, 1996, 38(2):103-113.
- [17] YOU Z, PELLEGRINO S. Cable-stiffened pantographic deployable structures part2: mesh reflector[J]. AIAA Journal, 1997, 35(8):1348-1355.
- [18] MADEN F, KORKAMZ K, AKGUN Y. A review of planar scissor structural mechanisms: geometric principles and design methods [J]. Architectural Science Review, 2011, 54(3):246-257.
- [19] DING X L, YANG Y, DAI J S. Design and kinematic analysis of a novel prism deployable mechanism [J]. Mechanism and Machine Theory, 2013(63):35-49.
- [20] 黄真,赵永生,赵铁石.高等空间机构学[M].北京:高等教育出版社,2014:155-158.
- [21] 廖波,尚建忠,ERNEST A,等.基于 Sarrus 结构的 5 自由度拟人手臂运动学研究[J].机械工程学报,2013,49(3):18-23.
LIAO Bo, SHANG Jianzhong, ERNEST A, et al. Kinematics analysis of a 5-DOF anthropomorphic arm based on Sarrus linkage [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013,49(3):18-23. (in Chinese)
- [22] SHAN M, GUO H, LIU R, et al. Design and analysis of a triangular prism modular deployable mast[C]//2013 IEEE International Conference on Mechatronics & Automation. IEEE, 2013:1546-1551.
- [23] 畅博彦,杨帅,金国光,等.基于直线驱动的空间可展机构运动分析[J].机械工程学报,2020,56(5):192-201.
CHANG Boyan, YANG Shuai, JIN Guoguang, et al. Motion analysis of spatial deployable mechanism driven in straight line [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020,56(5):192-201. (in Chinese)
- [24] BLANDING D L. Exact constraint: machine design using kinematic processing [M]. New York: ASME Press, 1999:145-147.
- [25] ZHANG C Y, WAN Y, ZHANG D. A new mathematical method to study the singularity of 3-RRR multimode mobile parallel mechanism[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019,10(3):1547-1563.
- [26] LI R, MIAO Z, YAO Y, et al. A novel hybrid 3-RPR mechanism with scalable platforms for self-crossing locomotion[C]//ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2014:430-445.