

基于 ADAMS 的 3-UPRP 并联机构的运动学分析及仿真

郭旺旺, 李瑞琴, 樊大宝, 樊晓琴, 王秀娇
(中北大学, 太原 030051)

摘要: **目的** 对 3-UPRP 并联机构进行运动学分析和仿真, 验证其是否具有良好的运动学性能。**方法** 运用修正的 G-K 公式计算出该机构的自由度, 并且利用 D-H 法计算 3-UPRP 并联机构的位置解, 利用虚设机构法求出 3-UPRP 并联机构的一阶影响系数, 利用 ADAMS 对机构进行位移、速度、加速度的分析。**结果** 得到了机构的位置解以及仿真后的速度、加速度等图像, 图像曲线都呈现周期性、有规律的运动, 曲线未出现突变点和断点, 变化范围稳定。**结论** 该机构具有较好的运动学性能, 在包装机械等领域有很好的应用前景。

关键词: 3-UPRP; D-H 法; 虚设机构法; ADAMS

中图分类号: TB486; TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)15-0153-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.15.023

Kinematic Analysis and Simulation of 3-UPRP Parallel Mechanism Based on ADAMS

GUO Wang-wang, LI Rui-qin, FAN Da-bao, FAN Xiao-qin, WANG Xiu-jiao
(North University of China, Taiyuan 030051, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze and simulate the kinematic properties of the 3-UPRP parallel mechanism, to verify whether the parallel mechanism has good kinematic performance. The degree of freedom of the mechanism was calculated with the modified G-K formula and the position solution of 3-UPRP parallel mechanism was calculated by D-H method. The first order influence coefficient of 3-UPRP parallel mechanism was obtained by the virtual mechanism method. ADAMS was used to analyze the displacement, speed and acceleration of the mechanism. The position solution of the mechanism and the images of velocity and acceleration, etc. after simulation were obtained. The image curves showed periodic and regular motion. The curves had no sudden change points and break points, and its change range was stable. With better kinematic performance, the mechanism has very good application prospects in the field of packaging machinery, etc.

KEY WORDS: 3-UPRP; D-H method; fictitious mechanism method; ADAMS

并联机构具有刚度大、结构稳定、承载能力高、误差小、精度高、运动负荷较小等优点^[1], 能够很好地应用到自动化包装领域中, 并已经运用到包裹、封口和雕刻等实际工作当中, 使生产效率大幅提高, 同时避免了一些人为干扰因素, 增加了自动化过程的稳定性^[2]。少自由度并联机构构型相对简单、工作空间较大和驱动较少等特点, 在自动化包装等领域具有广阔的应用前景^[3]。运动学分析是并联机构的性能评估、尺寸合成以及动力学分析等工作的基础, 是研究

并联机构杆件运动规律的重要一步, 自从并联机构诞生至今一直被国内外学者研究^[4-7]。LI 等^[8]提出了一种改进的 3-CRU 并联机构并且基于螺旋理论对机构进行运动分析。SONG 等^[9]提出了一种新型的并联机器人, 在运动学分析的基础上进行了运动的最优设计。GAN 等^[10]研究了一种可重构的并联机构的运动问题, 并且将其应用于康复平台和机器人手术器械等领域。另外, 禹润田等^[11]对脚踝康复的 3 自由度的绳驱动的并联机构进行了运动性能的分析。郭希娟等^[12]

收稿日期: 2018-01-12

作者简介: 郭旺旺 (1994—), 男, 中北大学硕士生, 主攻机构创新与机器人装备。

通信作者: 李瑞琴 (1964—), 女, 中北大学教授、博导, 主要研究方向为机构理论与复杂机械系统。

分析了新型的直升机操纵机构自由度、姿态角以及运动支链的位置。ADAMS 软件具有强大的运动学仿真分析功能,许多研究人员通过仿真分析了机构的运动性能^[13-14]。

文中以 3-UPRP 并联机构为研究对象,采用 D-H 参数法进行位置解分析,利用虚设机构法求解一阶影响系数,最后建立 3-UPRP 并联机构的虚拟样机模型,并且在 ADAMS 中进行仿真分析,得到 3-UPRP 并联机构的速度和加速度图像,为该机构在包装过程中的优化以及参数设定提供一定的理论基础。

1 3-UPRP 并联机构描述

在初始位形下 3-UPRP 并联机构见图 1。由动平台、定平台和 3 条 UPRP 分支组成,其中每条支链都包括一个万向铰链 U 副,一个转动副 R 副,2 个移动副 P_{i1} 和 P_{i2} ($P_{11}, P_{21}, P_{31}, P_{12}, P_{22}, P_{32}$),以及 3 个连杆 $U_iP_{i1}, P_{i1}R_i$ 和 $R_iM_iP_{i1}R_iM_iP_{i2}$,并且通过 U 副和定平台连接,通过 P_{i2} 与动平台连接。其中, U 副的一个转动副平行于定平台的平面,另一转动副垂直于定平台的平面, R 副平行于定平台的平面并且和 U 副中 2 个转动副两两垂直,通过驱动移动副 P_{i1} 得到动平台的输出。

自由度的计算可以通过修正 G-K 公式计算:

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^{12} f_i + v - \xi \quad (1)$$

式中: M 为机构的自由度; d 为机构的阶数, $d=6-\lambda$, λ 为机构的公共约束数; n 为包括机架的构件数目; g 为运动副的数目; f_i 为第 i 个运动副的自由度数; v 为并联冗余约束; ξ 为机构中存在的局部自由度。

将 3-UPRP 并联机构的以上参数代入式 (1) 得 $M=6(11-12-1)+15+0-0=3$, 因此 3-UPRP 并联机构的自由度为 3。

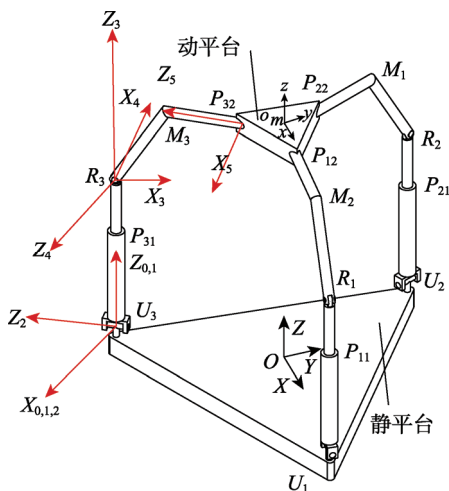


图 1 3-UPRP 并联机构构型

Fig.1 Configuration of 3-UPRP parallel mechanism

2 D-H 法进行位置解分析

为了更好地描述空间连杆机构的位置和姿态,可以利用 D-H 的方法来建立分支 UPRP 的坐标系,见图 1。分支 UPRP 相应的 D-H 参数见表 1。

表 1 UPRP 分支的 D-H 参数
Tab.1 D-H parameters of UPRP branches

i	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	$a_{i-1}/(^{\circ})$	θ_i	d_i	关节变量
1	0	0	0	0	θ_1
2	90	0	0	0	θ_2
3	-90	0	90	d_3	d_3
4	90	0	θ_4	0	θ_4
5	-90	d	0	d_5	d_5

其中, α_i 为绕 X_i 轴, 从 Z_i 旋转到 Z_{i+1} 的角度; a_i 为沿着 X_i 轴, 从 Z_i 移动到 Z_{i+1} 的距离; θ_i 为绕 Z_i 轴, 从 X_{i-1} 旋转到 X_i 的角度; d_i 为沿着 Z_i 轴, 从 X_{i-1} 移动到 X_i 的距离^[15]。

坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的矩阵变换通式可以表示为:

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & -d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据表 1 中的 UPRP 的 D-H 参数和公式可以得到连杆坐标系之间的变换矩阵 ${}^{i-1}_iT$:

$$\begin{aligned} {}^0_1T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^1_2T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ {}^2_3T &= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ {}^4_5T &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

接下来求解动坐标系 o_m-xyz 到分支末端坐标系 $O_5-X_5Y_5Z_5$ 以及分支坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 到定坐标系 $O-XYZ$ 的变换矩阵, 机构的动坐标系、定坐标系和分支坐标系的几何关系见图 2—3。

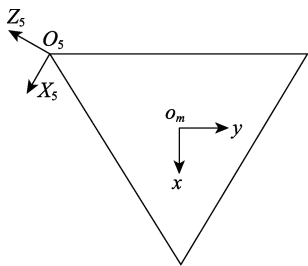


Fig.2 The geometric relationship between moving coordinate system and branch terminal coordinate system

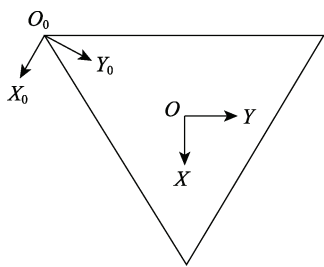


Fig.3 The geometric relationship between the branch coordinate system and the fixed coordinate system

动坐标系 o_m-xyz 到分支末端坐标系 $O_5-X_5Y_5Z_5$ 的转换矩阵为:

$${}^5_{o_m}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{3}r \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

分支坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 到定坐标系 $O-XYZ$ 的变换矩阵为:

$${}^o_0\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{3}R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

动坐标系 $o_m\text{-}xyz$ 到定坐标系 $O\text{-}XYZ$ 的变换矩阵可以通过式 (6) 得到。

$${}^O\mathbf{T} = {}^O\mathbf{T}^0\mathbf{T}^1\mathbf{T}^2\mathbf{T}^3\mathbf{T}^4\mathbf{T}^5\mathbf{T}^6 \quad (6)$$

另外机构的 3 个自由度是定平台所在平面的转动以及其法向方向的移动, 因此动坐标系相对于定坐标系的位姿矩阵可以写成如式 (7) 形式。

$$T = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \sin \gamma & \sin \beta \cos \gamma & X \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma & Y \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： α, β, γ 分别为动平台在定坐标系中绕着 Z

轴、Y轴、X轴转过的角度； X, Y, Z 为动平台在定坐标系中沿着X轴、Y轴、Z轴方向的移动的距离。

动坐标系 $o_m\text{-}xyz$ 到定坐标系 $O\text{-}XYZ$ 的变换矩阵 o_oT 和动坐标系相对于定坐标系的位姿矩阵 T 相等, 即:

$${}^{o_m}_Q \mathbf{T} = \mathbf{T} \quad (8)$$

让 2 个矩阵中的对应元素相等, 建立相应的方程组就可以求得这个分支的反解表达式。

同理,采用上面的方法也可以得到另外 2 个分支的反解表达式。

3 一阶影响系数及速度分析

3.1 分支螺旋系的建立

机构的运动影响系数深刻地反映了机构的运动学和动力学本质,能够方便地表示出机构中的运动映射。3-UPRP 并联机构是自由度为 3 的少自由度并联机构,故采用虚拟机构法求解机构的一阶影响系数^[16]。

3-UPRP 并联机构的每个分支的胡克副都用单自由度的转动副表示, 这样一个分支就有 5 个运动副, 包括 3 个转动副和 2 个移动副构成。根据虚拟机构法, 需要将每个分支增加一个虚拟杆和虚拟的运动副, 同时必须使每个分支所增加的运动副的运动都是 0, 且与分支的 5 个单自由度运动副所构成的运动螺旋系为线性无关。现在取第 1 分支进行分析。假设给定的虚拟转动副的偏距是 a_0 , 沿着坐标轴的 y 方向, 见图 4。

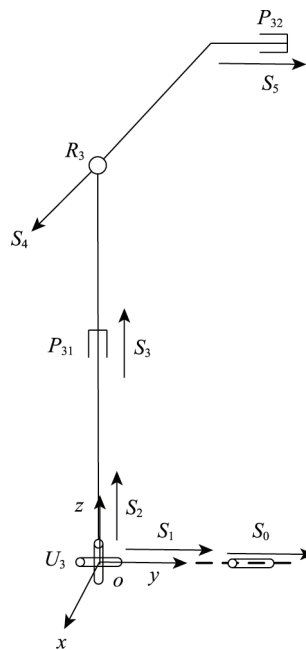


Fig.4 The branch with virtual kinematic pair

给定虚拟机构运动螺旋为 S_0 , 进而建立了支链的运动螺旋系。

$$\begin{aligned}
S_1 &= (0, 1, 0; 0, 0, 0) \\
S_2 &= (0, 0, 1; 0, 0, 0) \\
S_3 &= (0, 0, 1; 0, 0, a_3) \\
S_4 &= (0, 1, 0; a_4, 0, 0) \\
S_5 &= (0, 0, 0; a_5, 0, b_5) \\
S_0 &= (1, 0, 0; 0, a_0, 0)
\end{aligned} \quad (9)$$

这样每个支链在各自的坐标系建立螺旋系矩阵为:

$$[Gg] = [S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5] \quad (10)$$

3.2 分支影响系数矩阵的建立

3个分支坐标系在固定坐标系中的位置见图5。

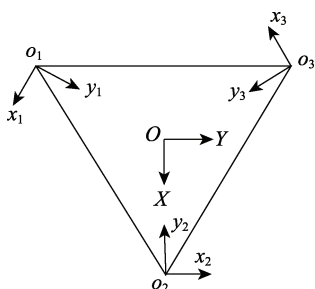


图5 3个分支坐标系与固定坐标系的几何关系

Fig.5 The geometric relationship between 3 branch coordinate systems and fixed coordinate system

根据图5可得,对固定坐标系的坐标变换矩阵分别为:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, T_2^0 = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & 1/2 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} -\sqrt{3}/2 & 1/2 & 0 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3个分支坐标系的原点坐标对固定坐标系可以用反对称矩阵来表示:

$$\begin{aligned}
E_1 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R \\ 0 & R & 0 \end{bmatrix}, E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{\sqrt{3}R}{2} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{2} \\ \frac{\sqrt{3}R}{2} & \frac{R}{2} & 0 \end{bmatrix}, \\
E_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}R}{2} \\ 0 & 0 & -\frac{R}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}R}{2} & \frac{R}{2} & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (12)$$

则各个支链的螺旋系在固定坐标系中的转换矩阵为:

$$S_i^0 = \begin{bmatrix} [T_i^0] & [0] \\ [E_i] \cdot [T_i^0] & [T_i^0] \end{bmatrix} \quad (13)$$

于是3个分支在固定坐标系下的影响系数矩阵为:

$$[G_i^H] = [S_i^0][Gg] \quad (14)$$

又由于:

$$[G_H^0] = \begin{bmatrix} [G_H^1]_3 & [G_H^2]_3 & [G_H^3]_3 & [G_H^1]_1 \\ [G_H^2]_1 & [G_H^3]_1 & & \end{bmatrix} \quad (15)$$

因此,一阶影响系数矩阵的表达式为:

$$[G_Q^H] = [G_H^0]^{-1} \quad (16)$$

3.3 速度分析

由于该机构的自由度为3,只有3个输入。这样从矩阵 $[G_Q^H]$ 中取出前3列构成的矩阵 $[G_q^H]$,对应可得输入与输出方程:

$$V_H = [G_q^H] \dot{q} \quad (17)$$

式中: $\dot{q} = (\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3)$; V_H 为末端平台的速度; $\dot{q}$ 为机构的3个主动输入速度。

如果再将 V_H 分解为平台的角速度 ω 和平台上某一参考点的线速度 V_p ,则式(17)变为:

$$\begin{aligned}
V_p &= [G] \dot{q} \\
\omega &= [G'] \dot{q}
\end{aligned} \quad (18)$$

式中: $[G']$ 为 $[G_q^H]$ 中的前3行; $[G]$ 为 $[G_q^H]$ 中的后3行。

4 ADAMS 进行运动仿真

将 SolidWorks 中建立的三维模型保存成.parasolid 格式,导入到 ADAMS 中,然后对导入的几何模型施加约束,建立好相应的虚拟样机模型。

对3个支链的主动副施加如下的驱动函数:

$$\begin{cases} l_1 = 20 \times \cos(2\pi t + 0.5\pi) \\ l_2 = 20 \times \sin(2\pi t) \\ l_3 = 20 \times \cos(2\pi t) \end{cases} \quad (19)$$

仿真类型选择 default, 仿真时间为3 s, steps 为3000,进行仿真运算。进入后处理中,选择动平台的质心点为研究对象,得到了位置、线速度、角速度、线加速度以及角加速度的图像,见图6。图6中 Max 表示机构运行时位移和速度的最大值, X, Y, Z 分别表示空间直角坐标系各个坐标的分量。

从图6中可以看出,3-UPRP 并联机构的运动曲线都呈现周期性的有规律的运动。其中位移曲线很平缓,没有大的波动,这样可以保证机构在运行过程中的稳定性;线速度和角速度曲线连续且没有出现突变点,表明机构的驱动性能良好;线加速度和角加速度

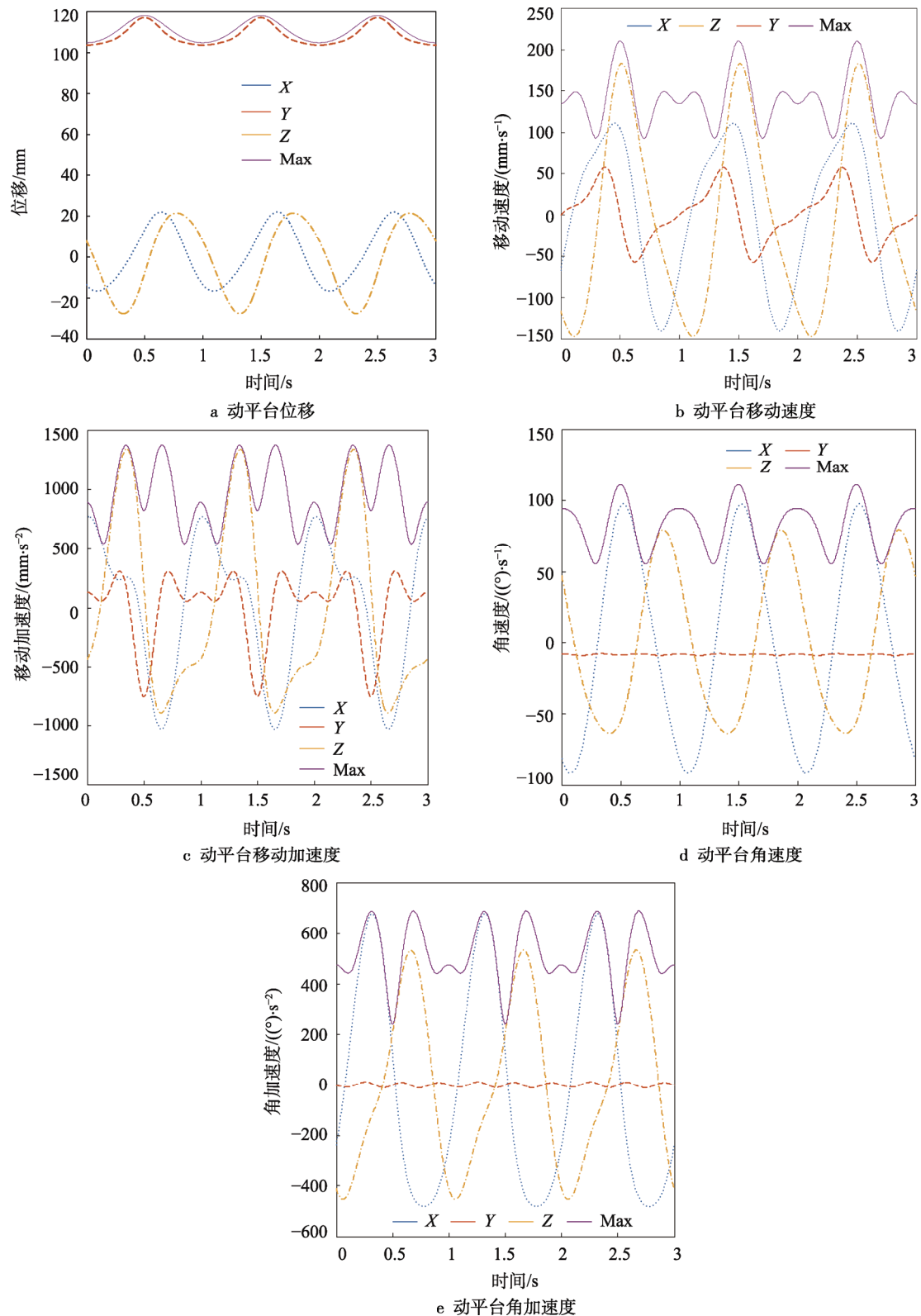


图 6 动平台速度和加速度曲线

Fig.6 Moving platform speed and acceleration curve

曲线也比较平缓,说明机构在工作过程中杆件的受力并没有大的突变;Y方向(也就是定平台法向方向)的角加速度近似等于0,这也验证了机构在定平台所在平面的2个转动。总体而言,该并联机构的运动性能优越,具有很强的可控性和稳定性。

5 结语

以一种新型的 3-UPRP 并联机构为研究对象,利用 D-H 法分析了 3-UPRP 并联机构的结构参数,得到了位置反解。然后采用虚设机构法对 3-UPRP 并联机

构进行运动分析,得到了 3-UPRP 并联机构的一阶影响系数矩阵。最后在 ADAMS 中对 3-UPRP 并联机构进行运动学仿真,得到了动平台质心的位置、线速度、角速度、线加速度以及角加速度的图像。通过对 ADAMS 仿真结果进行分析可知,各支链在运动过程中未发生干涉,且位置、线速度、角速度、线加速度以及角加速度曲线均没有发生突变现象,这表明该并联机构在工作过程中运动平稳,具有良好的运动学性能。由于 3-UPRP 并联机构运动学性能的优越性,使得该并联机构在自动化包装等领域具有广阔的应用前景,文中的研究为其进一步的深入研究和实际应用奠定了理论基础。

参考文献:

- [1] 路懿, 胡波. 少自由度并联机构研究进展[J]. 燕山大学学报, 2011, 35(5): 377—384.
LU Yi, HU Bo. Research Progress of Less Degree of Freedom Parallel Mechanism[J]. Journal of Yanshan University, 2011, 35(5): 377—384.
- [2] 李明辉, 李波. 基于 Ansys 的注塑机前模板结构参数优化设计[J]. 包装工程, 2016, 37(3): 116—120.
LI Ming-hui, LI Bo. Optimization Design of the Structure Parameters of the Injection Molding Machine Based on Ansys[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(3): 116—120.
- [3] 白龙, 孙牧原, 崔国华, 等. 三平动并联机构动力学建模与工作空间分析[J]. 包装工程, 2015, 36(23): 88—93.
BAI Long, SUN Mu-yuan, CUI Guo-hua, et al. Three Translational Parallel Mechanism Dynamics Modeling and Workspace Analysis[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(23): 88—93.
- [4] NURAHMI L, SCHADLBAUER J, HUSTY M. Kinematic Analysis of the 3-RPS Cube Parallel[J]. Asme Idetc, 2015, 7(1): 011008.
- [5] LIU X J, LI J, ZHOU Y. Kinematic Optimal Design of a 2-degree-of-freedom 3-parallelgram Planar Parallel Manipulator[J]. Mechanism & Machine Theory, 2015, 87: 1—17.
- [6] 李坤, 原大宁, 王庚祥. 一种新型 3-UPS/UPR 并联机构运动学分析及应用[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(2): 188—193.
LI Kun, YUAN Da-ning, WANG Geng-xiang. Kinematics Analysis and Application of a New 3-UPS/UPR Parallel Mechanism[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(2): 188—193.
- [7] 陈修龙, 孙先洋, 邓昱. 5 自由度空间并联机构运动学优化设计[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 303—307.
CHEN Xiu-long, SUN Xian-xiang, DENG Yu. Kinematic Optimization Design of 5-DOF Space Parallel Mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 303—307.
- [8] LI B, LI Y M, ZHAO X H et al. Kinematic Analysis of a Novel 3-CRU Translational Parallel[J]. Mechanical Sciences, 2015, 6(1): 57—64.
- [9] SONG Y, GAO H, SUN T, et al. Kinematic Analysis and Optimal Design of a Novel 1T3R Parallel Manipulator with an Articulated Travelling Plate[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, 2014, 30(5): 508—516.
- [10] GAN D, DIAS J, SENEVIRATNE L. Unified Kinematics and Optimal Design of a 3rRPS Metamorphic Parallel Mechanism with a Reconfigurable Revolute Joint[J]. Mechanism & Machine Theory, 2016, 96: 239—254.
- [11] 禹润田, 方跃法, 郭盛. 绳驱动并联踝关节康复机构设计及运动性能分析[J]. 机器人, 2015, 37(1): 53—62.
YU Run-tian, FANG Yue-fa, GUO Sheng. Design and Kinematic Performance Analysis of a Cable-driven Parallel Mechanism for Ankle Rehabilitation[J]. Robot, 2015, 37(1): 53—62.
- [12] 郭希娟, 蒙小刚, 王玉镇, 等. 一种新型共轴式直升机操纵机构运动学分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(1): 47—56.
GUO Xi-juan, MENG Xiao-gang, WANG Yu-zhen, et al. Kinematic Analysis of a New Type of Coaxial Helicopter Control Mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(1): 47—56.
- [13] 汪磊, 毛卫平. 基于 ADAMS 和 Pro/E 弯脚机械臂运动仿真分析[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 110—112.
WANG Lei, MAO Wei-ping. Motion Simulation of Bending Manipulator Based on ADAMS and Pro/E[J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(6): 110—112.
- [14] 张军, 谢志江, 吴小勇. 基于 ADAMS 和 MATL-AB 的 3-PPR 并联机构运动学分析与仿真[J]. 机床与液压, 2017, 45(17): 10—14.
ZHANG Jun, XIE Zhi-jiang, WU Xiao-yong. Kinematics Analysis and Simulation of the 3-PPR Parallel Mechanism[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2017, 45(17): 10—14.
- [15] 蔡自兴, 谢斌. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
CAI Zi-xing, XIE Bin. Robotics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [16] 赵延治, 宋晓鑫, 杨建涛. 基于虚设运动副的并联机器人静态误差建模与标定[J]. 中国机械工程, 2017, 28(18): 2189—2197.
ZHAO Yan-zhi, SONG Xiao-xin, YANG Jian-tao. Static Error Modelling and Calibration for Parallel Robots Based on Virtual Joint Pairs[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(18): 2189—2197.