

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.03.004

4PRR-P 混联加工机构运动学研究

宋伟, 许勇*, 吕叶萍, 刘勇, 梁铮

(上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 由于平面并联机构存在着动平台灵活度低, 容易产生机构奇异, 工作空间小等缺点, 课题组提出了一种新型4PRR-P混联加工机构。基于螺旋理论验证了机构的自由度特征, 建立了机构位置逆解数学模型, 确定了机构的奇异位形。采用数值搜索法求解了机构的工作空间, 通过考察各尺度参数对工作空间的影响, 优选得到了机构的关键尺度参数。相关数值计算及运动仿真结果表明该机构可以解决平面并联机构存在的灵活度低、容易产生机构奇异、工作空间小等问题。文中运动学模型及性能分析结论合理正确, 相关成果可为机构动力学分析、结构设计提供参考。

关键词: 混联机构; 奇异位形; 工作空间; 尺度优选

中图分类号: TP242 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2019)03-0019-07

Kinematics Study of 4PRR-P Hybrid Machining Mechanism

SONG Wei, XU Yong*, LÜ Yeping, LIU Yong, LIANG Zheng

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

Abstract: Because of the shortcomings of planar parallel mechanism, such as low flexibility of moving platform, singularity of mechanism and small workspace, a new 4PRR-P hybrid machining mechanism was proposed in this paper. Based on the screw theory, the DOF characteristics of the mechanism were verified, and the inverse solution mathematical model of the mechanism position was established, and the singular shape of the mechanism was determined. The workspace of the mechanism was solved by numerical search method. The key dimension parameters of the mechanism were optimized by investigating the influence of dimension parameters on the workspace. Relevant numerical calculation and motion simulation results show that the mechanism can solve the problems of low flexibility, singularity and small workspace of planar parallel mechanism. The kinematics model and performance analysis conclusion in this paper are reasonable and correct, and the relevant results can provide a reference for the dynamic analysis and structural design of the mechanism.

Keywords: hybrid mechanism; singular configuration; workspace; scale optimization

与空间并联机构相比, 平面并联机构具有结构简单、运动学及动力学模型简单及制造成本低的特点^[1]。但是, 由于平面并联机构存在着动平台灵活度低、容易产生机构奇异、工作空间小等缺点, 影响了其实际使用范围。因此, 对于平面并联机构存在的这些缺点, 可以通过使用混联构型或使用增加冗余驱动的方法增大机构的工作空间、提高动平台灵活度、减少平面并联机构的奇异位型。

张东胜^[2]基于2移动1转动三自由度平面并联机构构造了一种新型五自由度串并混联机器人, 并对具

有运动冗余和驱动冗余2种不同模式的平面并联机构(2PRR)²+R(P代表移动副, R代表转动副)进行了运动学分析; 吴存存^[3]提出一种新型2PPPaR(Pa指广义移动副)四自由度并联机构, 该机构能够实现3个移动和1个转动, 可广泛用于高速高精度的分拣、包装和码垛操作中; 陈纯^[4]对平面2-PRR并联机构进行了运动学、动力学模态特性分析及仿真; 王鑫辉^[5]采用同构映射和微分运动学原理, 求解出3-PRR全柔顺并联机构的最佳构型和设计灵敏度; 莫嘉嗣^[6]把3-PRR并联平台机构雅可比矩阵特性与奇异分布引入控制范

收稿日期: 2018-10-16; 修回日期: 2018-12-06

第一作者简介: 宋伟(1993), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 主要研究方向为并联机器人。通信作者: 许勇(1974), 男, 江苏南通人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为机器人机构学。E-mail: brucexuyong@163.com

畴,提出两种奇异区域规避控制策略与1种奇异位型逃逸控制策略;宋杰^[7]研究了平面三自由度 PRR-RRP型并联操作平台在实现复杂运动轨迹和驱动控制方面的优越性。

文献调研发现,鲜有文献系统地研究基于2R1T(T代表移动自由度)平面并联机构的混联加工机构。因此,课题组以新型4PRR-P混联加工机构为研究对象,基于螺旋理论验证了该混联机构的自由度和性质;推导了解析形式的机构位置正逆解,为后续的运动规划及控制提供了便利;确定了发生奇异位形的运动/尺度参数间的关系,考察了机构关键尺度参数对工作空间体积的影响规律,优选出了尺度参数的合理取值范围。研究结果表明,机构运动学模型合理,运动性能及尺度优化的相应结果可为后续研究提供参考。

1 4PRR-P 混联机构

1.1 机构简介

课题组提出的4PRR-P混联机构如图1所示,其中记移动滑块形心为 $A_i(i=1\sim 5)$, $A_1\sim A_4$ 这4个移动滑块的两条导路为定平台, A_i 所在的P副为驱动副。以4个转动副的形心 $B_j(j=1\sim 4)$ 构成动平台,4PRR为4条并联支链,与动平台串联了一个移动副,移动滑块形心记为 A_5 , A_5 导路垂直于并联机构4PRR所在平面。

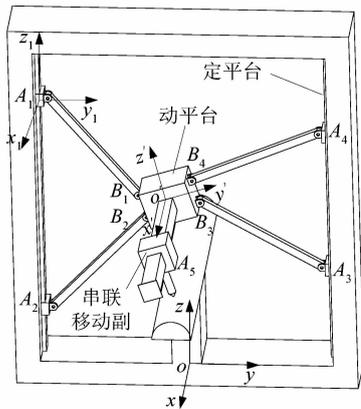


图1 4PRR-P混联机构示意图
Figure 1 Schematic diagram of 4PRR-P hybrid mechanism

4PRR-P混联机构的尺度参数: a 为转动副形心 B_1, B_4 (或 B_2, B_3)的距离; b 为 yoz 平面两驱动导路间的垂直距离; d 为转动副形心 B_1, B_2 (或 B_3, B_4)的距离; q_i 为驱动移动副 A_i 的位移($i=1, 2, 3, 4, 5$); L 为 $A_i B_j$ 杆长($i=j=1\sim 4$); α_j 为 $A_i B_j(i=j=1\sim 4)$ 与 z 向驱动导路间的角度($0\leq\alpha_j\leq\pi/2$); L_5 为串联移动副 A_5 的行程。

1.2 自由度分析

4PRR-P混联机构的定坐标系 $o-xyz$ 和动坐标系 $o'-x'y'z'$ 分别如图1所示,则 A_i 和 B_j 在定坐标系中的位置矢量为:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &: (0, -b/2, q_1); \\ A_2 &: (0, -b/2, q_2); \\ A_3 &: (0, b/2, q_3); \\ A_4 &: (0, b/2, q_4); \\ A_5 &: (q_5, y, z); \\ B_1 &: (0, -b/2 + L\sin\alpha_1, q_1 - L\cos\alpha_1); \\ B_2 &: (0, -b/2 + L\sin\alpha_2, q_2 + L\cos\alpha_2); \\ B_3 &: (0, b/2 - L\sin\alpha_3, q_3 + L\cos\alpha_3); \\ B_4 &: (0, b/2 - L\sin\alpha_4, q_4 - L\cos\alpha_4). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

设置支链坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 如图2所示,图中单向箭头表示约束力线矢,双向箭头表示约束力偶。在坐标系 $o_1-x_1y_1z_1$ 中,支链 $A_1 B_1$ 中各单自由度运动副所对应的运动螺旋^[8]为

$$\left. \begin{aligned} \$_{11} &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 1); \\ \$_{12} &= (1 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 0); \\ \$_{13} &= (1 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ L\cos\alpha_1 \ L\sin\alpha_1). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\$_{11}$ 表示 A_1 处驱动移动副的运动螺旋; $\$_{12}$ 表示 A_1 处转动副的运动螺旋; $\$_{13}$ 表示 B_1 处转动副的运动螺旋。

根据互易积为0的原则,对式(2)求反螺旋得

$$\left. \begin{aligned} \$_{11}^r &= (1 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 0); \\ \$_{12}^r &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 1 \ 0); \\ \$_{13}^r &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 1). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

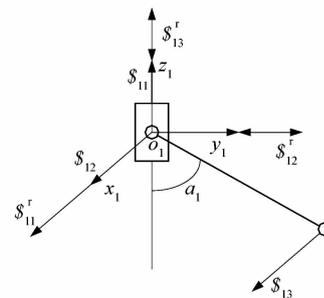


图2 支链 $O_1(A_1 B_1)$ 的运动和约束螺旋
Figure 2 Movement the branch $O_1(A_1 B_1)$ and constrained spiral

同理可得其余3个分支链的反螺旋,4个支链 $A_i B_j(i=j=1\sim 4)$ 的反螺旋相同。因此,4PRR并联机构的约束螺旋系 $\r 为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_1^r &= (1 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 0); \\ \mathcal{S}_2^r &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 1 \ 0); \\ \mathcal{S}_3^r &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 1). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对式(4)求反螺旋,得并联机构动平台的运动螺旋系 \mathcal{S}^m 为

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{S}_1^m &= (1 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 0); \\ \mathcal{S}_2^m &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 1 \ 0); \\ \mathcal{S}_3^m &= (0 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ 1). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:运动螺旋 \mathcal{S}_1^m 表示动平台绕 x 轴转动的自由度;运动螺旋 \mathcal{S}_2^m 表示动平台沿 y 轴方向的移动自由度;运动螺旋 \mathcal{S}_3^m 分别表示动平台沿 z 轴方向的移动自由度。

同时动平台上串联支链中具有沿 x 轴方向一个移动自由度。因此4PRR-P混联机构具有3移动1转动4个自由度。

记4PRR并联机构的驱动位移为 (q_1, q_2, q_3, q_4) ,输出位移即动平台位姿为 (y, z, θ) ,其中 θ 指动平台绕 x 轴旋转角度。

2 并联机构位置反解

位置反解分析即已知机构的输出位姿 (y, z, θ) ,求解机构的驱动位移 (q_1, q_2, q_3, q_4) 。

在定坐标系中,4PRR-P混联机构各运动副形心的位置矢量见式(1),动平台形心 o' 的位置矢量 oo' 记为 (x, y, z) 。

因4PRR并联机构具有一个绕 x 轴转动的自由度(转角为 θ),所以并联机构从定坐标系 $o-xyz$ 到动坐标系 $o'-x'y'z'$ 的姿态转换矩阵

$$\mathbf{R}_{BE} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

位置分析矢量关系为

$$o\mathbf{B}_j = oo' + \mathbf{R}_{BE} \cdot o'\mathbf{B}_j. \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} A_1: & (0, -b/2, z - a/2 \cdot \sin \theta + d/2 \cdot \cos \theta + \sqrt{L^2 - (y - a/2 \cdot \cos \theta - d/2 \cdot \sin \theta + b/2)^2}); \\ A_2: & (0, -b/2, z - a/2 \cdot \sin \theta - d/2 \cdot \cos \theta - \sqrt{L^2 - (y - a/2 \cdot \cos \theta + d/2 \cdot \sin \theta + b/2)^2}); \\ A_3: & (0, b/2, z + a/2 \cdot \sin \theta - d/2 \cdot \cos \theta - \sqrt{L^2 - (b/2 - y - a/2 \cdot \cos \theta - d/2 \cdot \sin \theta)^2}); \\ A_4: & (0, b/2, z + a/2 \cdot \sin \theta + d/2 \cdot \cos \theta + \sqrt{L^2 - (b/2 - y - a/2 \cdot \cos \theta + d/2 \cdot \sin \theta)^2}). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$A_i (i=1 \sim 4)$ 点在定坐标系 $o-xyz$ 中的 z 坐标即为驱动位移 q_i ,即

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= z - a/2 \cdot \sin \theta + d/2 \cdot \cos \theta + \sqrt{L^2 - (y - a/2 \cdot \cos \theta - d/2 \cdot \sin \theta + b/2)^2}; \\ q_2 &= z - a/2 \cdot \sin \theta - d/2 \cdot \cos \theta - \sqrt{L^2 - (y - a/2 \cdot \cos \theta + d/2 \cdot \sin \theta + b/2)^2}; \\ q_3 &= z + a/2 \cdot \sin \theta - d/2 \cdot \cos \theta - \sqrt{L^2 - (b/2 - y - a/2 \cdot \cos \theta - d/2 \cdot \sin \theta)^2}; \\ q_4 &= z + a/2 \cdot \sin \theta + d/2 \cdot \cos \theta + \sqrt{L^2 - (b/2 - y - a/2 \cdot \cos \theta + d/2 \cdot \sin \theta)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

则定坐标系 $o-xyz$ 中转动副形心 B_j 位置坐标为

$$\left. \begin{aligned} B_1: & (0, y - a/2 \cdot \cos \theta - d/2 \cdot \sin \theta, z - a/2 \cdot \sin \theta + d/2 \cdot \cos \theta); \\ B_2: & (0, y - a/2 \cdot \cos \theta + d/2 \cdot \sin \theta, z - a/2 \cdot \sin \theta - d/2 \cdot \cos \theta); \\ B_3: & (0, y + a/2 \cdot \cos \theta + d/2 \cdot \sin \theta, z + a/2 \cdot \sin \theta - d/2 \cdot \cos \theta); \\ B_4: & (0, y + a/2 \cdot \cos \theta - d/2 \cdot \sin \theta, z + a/2 \cdot \sin \theta + d/2 \cdot \cos \theta). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由图3,可得

$$\left. \begin{aligned} B_1 C_1 &= y_{B_1} - y_{C_1} = y - \frac{a}{2} \cos \theta - \frac{d}{2} \sin \theta - \left(-\frac{b}{2}\right); \\ A_1 C_1 &= \sqrt{L^2 - (B_1 C_1)^2}; \\ z_{A_1} &= z_{B_1} + C_1 A_1. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

可得 A_1 的 z 坐标为

$$z_{A_1} = z - a/2 \cdot \sin \theta + d/2 \cdot \cos \theta + \sqrt{L^2 - \left(y - \frac{a}{2} \cdot \cos \theta - \frac{d}{2} \cdot \sin \theta + \frac{b}{2}\right)^2}.$$

A_2, A_3, A_4 的 z 向坐标同理可得。

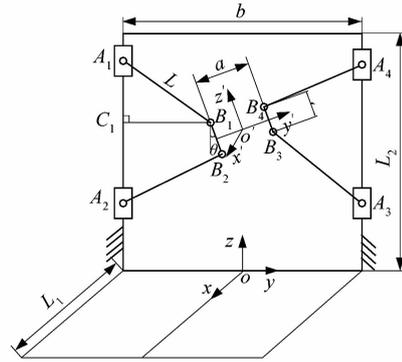


图3 4PRR 并联机构一般位姿
Figure 3 General pose of 4PRR parallel mechanism

由此可知定坐标系 $o-xyz$ 中 $A_i (i=1 \sim 4)$ 位置坐标:

3 速度分析

速度雅可比矩阵将驱动器的关节速度映射为动平台的角速度和线速度,是深入分析机构性能(灵活性、奇异位形和解耦性等)的基础。

将 4PRR 并联机构的位置反解方程式(11),两边对时间求导可确定机构输入速度和输出速度之间的映射关系,即

$$J_q \dot{q} = G V_p \quad (12)$$

式中: $\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dot{q}_4)$ 表示驱动关节的速度; $V_p = (\dot{y}, \dot{z}, \dot{\theta})$ 表示动平台的输出速度。

由于并联机构 4PRR 存在一个冗余驱动(取为 q_4),在 \dot{q} 中删去冗余驱动所在行,得到并联机构的正雅可比矩阵为

$$G = \begin{pmatrix} M_1 & 1 & M_4 \\ M_2 & 1 & M_5 \\ M_3 & 1 & M_6 \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} M_1 &= -\frac{2y - a\cos\theta - d\sin\theta + b}{\sqrt{4L^2 - (2y - a\cos\theta - d\sin\theta + b)^2}}; \\ M_2 &= \frac{2y - a\cos\theta + d\sin\theta + b}{\sqrt{4L^2 - (2y - a\cos\theta + d\sin\theta + b)^2}}; \\ M_3 &= -\frac{b - 2y - a\cos\theta - d\sin\theta}{\sqrt{4L^2 - (b - 2y - a\cos\theta - d\sin\theta)^2}}; \\ M_4 &= \left(\frac{a}{2} \cdot \sin\theta - \frac{d}{2} \cdot \cos\theta\right)M_1 - \frac{a}{2} \cdot \cos\theta - \frac{d}{2} \cdot \sin\theta; \\ M_5 &= \left(\frac{a}{2} \cdot \sin\theta + \frac{d}{2} \cdot \cos\theta\right)M_2 - \frac{a}{2} \cdot \cos\theta + \frac{d}{2} \cdot \sin\theta; \\ M_6 &= \left(\frac{a}{2} \cdot \sin\theta - \frac{d}{2} \cdot \cos\theta\right)M_3 + \frac{a}{2} \cdot \cos\theta + \frac{d}{2} \cdot \sin\theta. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

求得逆雅可比矩阵为

$$J_q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

4 奇异性分析

奇异性是指机构无法运动或瞬时运动无法确定的点,当机构处于奇异位形时,机构的自由度会发生改变,进而影响机构运动的连续性,所以机构应尽量避免奇异位形。根据机构的雅可比矩阵,奇异构型可分为 3 类:正向奇异、逆向奇异以及混合奇异^[9]。

4.1 逆向奇异

由于 $|J_q| \neq 0$,因此逆向奇异不会发生。

4.2 正向奇异

当 $|G| = 0, |J_q| \neq 0$ 时,即当

$$\begin{aligned} |G| &= (M_5 - M_4) \cdot (M_3 - M_1) - (M_2 - M_1) \cdot \\ &(M_6 - M_4) = 0, \end{aligned} \quad (16)$$

正向奇异发生,这意味着在所有驱动都锁住的情况下,动平台还可以在某些方向发生运动。

由式(16)可知,对于 4PRR-P 混联机构,当

$$M_2 = M_3$$

成立时,需满足

$$\left. \begin{aligned} y &= 0; \\ \theta &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

此时正向奇异发生。

4.3 混合奇异

由于 $|J_q| \neq 0$,因此混合奇异不会发生。

5 工作空间分析

5.1 工作空间求解

4PRR-P 混联机构工作空间是建立在 4PRR 并联机构位置反解的基础上,考虑杆长、运动副转角及杆间干涉的约束,利用计算机对机构动平台形心的运动空间进行搜索得到的。

求解工作空间的约束如下:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq x \leq L_1; \\ -a/2 + b/2 - L &\leq y \leq a/2 + L - b/2; \\ d/2 &\leq z \leq L_2 - d/2; \\ 0 &\leq q_1 \leq L_2; \\ \arccos[(L_2 - d)/2L] &\leq \alpha \leq 90; \\ 0 &\leq \theta \leq \arccos[a/(b - 2L\sin\alpha_{\min})]. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

其中, $\sin\alpha_{\min} = \sqrt{1 - [(L_2 - d)/2L]^2}$ 。

边界搜索法通常是利用运动学逆解,考虑机构的尺度参数和运动位移的限制,搜索得到工作空间边界点集^[10]。给定 θ 的角度和步长,使 θ 从 $-\pi/2 \sim \pi/2$,将 $y_{\max}, y_{\min}, z_{\max}, z_{\min}$ 组成的闭合空间内的每一个点都代入机构的运动学反解,确定在该点是否存在于工作空间中。全部搜索完毕,即可得到关于动平台的姿态工作空间。

当动平台转角 θ 固定时,4PRR-P 混联机构的可达位置工作空间可以看作将 yoz 平面的工作空间沿 x 方向拉伸形成的空间。

现给定一组 4PRR-P 混联机构尺度参数如下: $L = 1.00 \text{ m}, L_1 = 1.50 \text{ m}, L_2 = 2.30 \text{ m}, a = 0.42 \text{ m}, b = 1.80 \text{ m}, d = 0.22 \text{ m}$ 。将实例数值代入,可得到工作空间如图 4 所示。

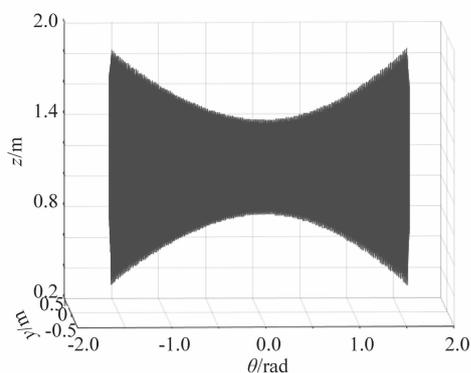


图4 4PRR机构三维工作空间
Figure 4 Three dimensional workspace of 4PRR mechanism

当动平台的姿态角取 $\theta = 1.53$ rad, 4PRR-P 混联机构二维工作空间如图5所示。由工作空间的方向视图可知, 该机构的工作空间内部无空洞区域。

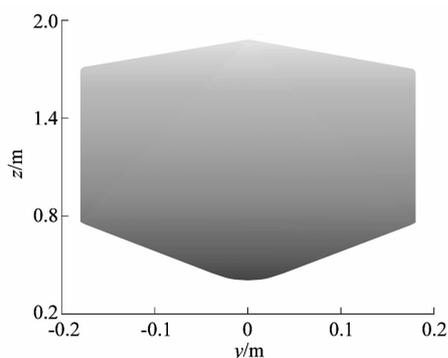


图5 $\theta = 1.53$ rad 时 $yo z$ 平面工作空间
Figure 5 $yo z$ plane of workspace at $\theta = 1.53$ rad

5.2 尺度参数对动平台工作空间的影响

L, b, a, d 是重要的尺度参数, 以下研究这4个参数对动平台工作空间的影响。

1) 杆长 L 对动平台工作空间的影响

对于4PRR-P混联机构算例, 采用单变量法分析杆长 L 对机构动平台形心 o' 生成的 $yo z$ 平面工作空间的影响。考虑到机构的参数限制, 这里取杆长 $L_{\max} = 1.38$ m, $L_{\min} = 0.83$ m。如图6(a)所示, 在取值范围内, 杆长 L 对动平台的 $yo z$ 平面工作空间的影响趋势是先增大后减小。当杆长 $L = 1.05$ m 时, 可得最大工作空间。

2) 参数 b 对动平台工作空间的影响

如图6(b)所示, 这里取 $b_{\max} = 2.20$ m, $b_{\min} = 0.42$ m。可见在取值范围内, 参数 b 对动平台的工作空间

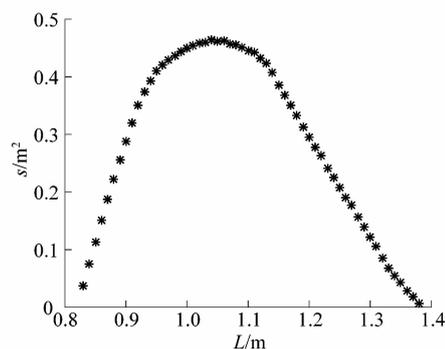
的影响趋势是先增大后减小。当 $b = 1.55$ m 时, 可得最大工作空间。

3) 参数 a 对动平台工作空间的影响

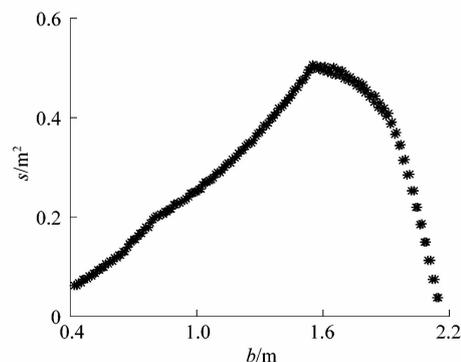
如图6(c)所示, 这里取 $a_{\max} = 1.80$ m, $a_{\min} > 0$ m。可见在取值范围内, 参数 a 对动平台的 $yo z$ 平面工作空间的影响趋势是先增大后减小。当参数 $a = 0.60$ m 时, 可得最大工作空间。

4) 参数 d 对动平台工作空间的影响

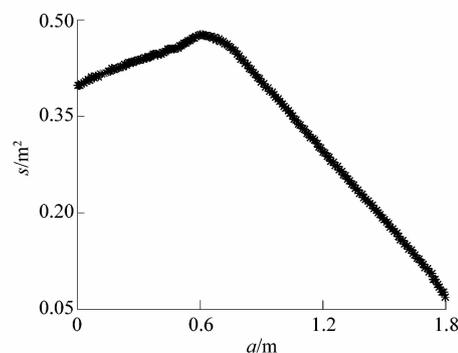
如图6(d)所示, 考虑到机构的参数限制, 这里取 $d_{\max} = 2.30$ m, $d_{\min} = 0$ m。可见在取值范围内, 参数 d 对动平台 $yo z$ 平面的工作空间的影响趋势是先增大后减小再增大。当参数 $d = 0.50$ m 时, 可得最大工作空间。



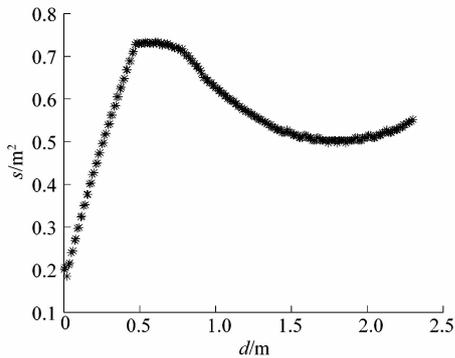
(a) L 对工作空间 $yo z$ 截面面积的影响



(b) b 对工作空间 $yo z$ 截面面积的影响



(c) a 对工作空间 $yo z$ 截面面积的影响



(d) d 对工作空间 yo z截面面积的影响

图6 尺度参数对动平台 yo z 截面面积的影响

Figure 6 Influence of scale parameters on yo z cross sectional area of moving platform

6 加工仿真

4PRR-P 加工工件的三维场景如图 7 所示。被加工零件是直径为 10 mm 的半圆柱体,加工轨迹如图 8 所示。尺度参数 $L = 90$ mm, $a = 10$ mm, $L_2 = 200$ mm, $b = 160$ mm, $d = 6$ mm, $L_1 = 80.5$ mm。

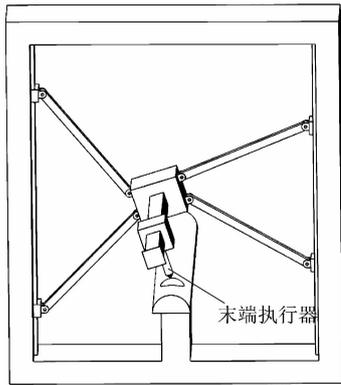


图7 加工场景三维示意图

Figure 7 Three dimensional sketch of processing scene

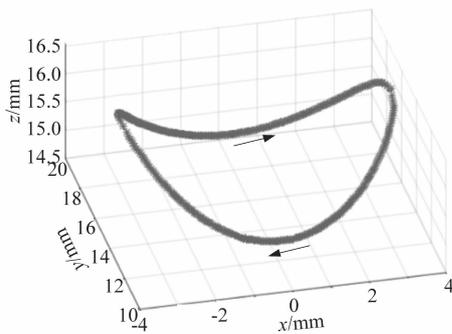
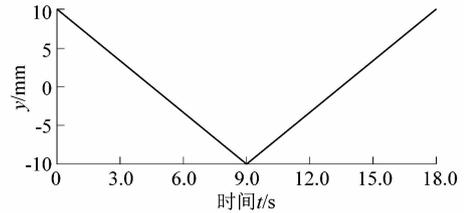


图8 动平台形心轨迹图

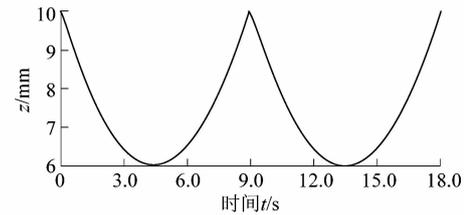
Figure 8 Centroid locus diagram of moving platform

图 8 中混联机构加工仿真得到的动平台形心轨迹图。从图中可以看出执行器末端位移变化曲线连续平滑,说明机构运动相对平稳。

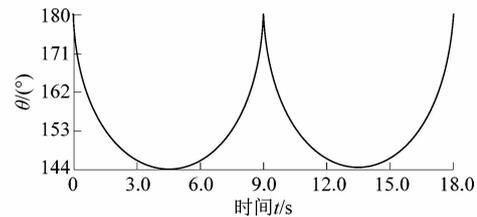
图 9 所示为混联机构动平台形心 o' 在 y, z 方向位移和动平台角度 θ 的变化曲线。可以看出混联机构在加工中,较为平缓,无剧烈波动。



(a) 动平台形心 o' 的 y 方向位移



(b) 动平台形心 o' 的 z 方向位移

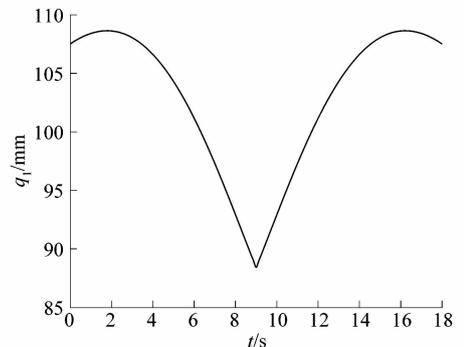


(c) 动平台绕定轴 x 偏转角 θ 变化情况

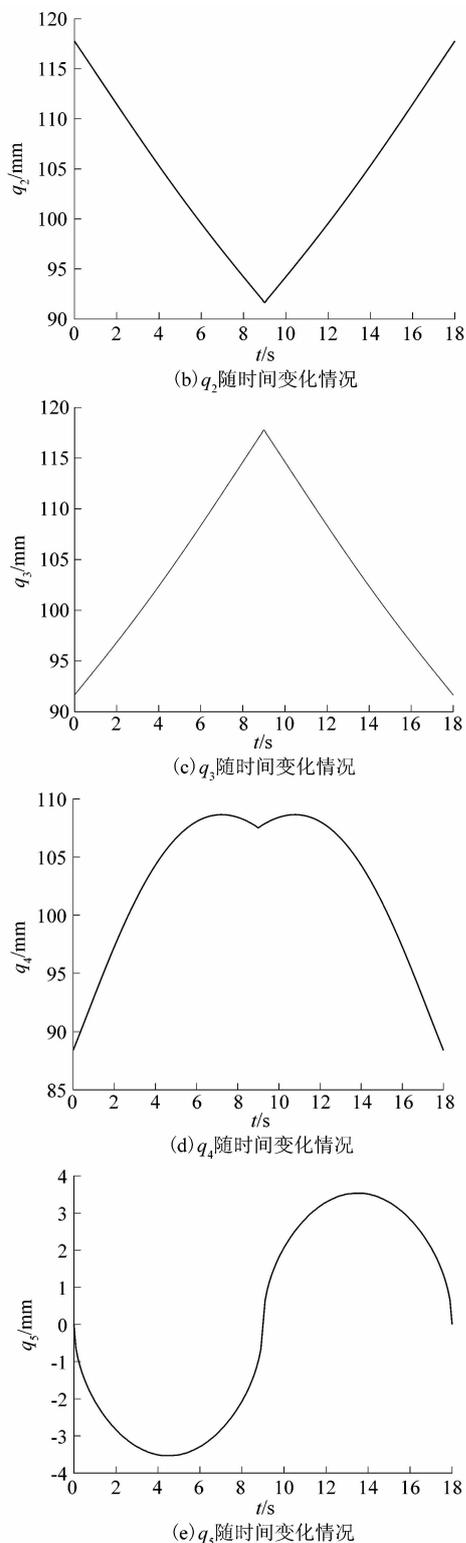
图9 混联机构动平台在 y 和 z 方向位移和动平台角度 θ 的变化曲线

Figure 9 Displacement in y and z directions and change of moving platform angle θ on moving platform of hybrid mechanism

如图 10 所示,为混联机构加工仿真得到的驱动位移 q_i 随时间变化情况。



(a) q_i 随时间变化情况

图10 移动副 q_i 随时间变化情况Figure 10 Change of moving pair q_i with time

7 结论

1) 运用螺旋理论,对4PRR-P混联机构进行自由度分析,证明了4PRR-P混联机构具有沿 x, y, z 方向移动和绕 x 方向转动4个自由度。

2) 对4PRR-P混联机构进行速度分析以及奇异性分析,机构具有正向奇异,无逆向奇异和混合奇异。

3) 通过边界搜索法求解出动平台的工作空间。求解出重要参数对动平台的工作空间的影响:在取值范围内,杆长 L 对动平台的 yoz 平面工作空间的影响趋势是先增大后减小;参数 b 对动平台的工作空间的影响趋势是先增大后减小;参数 a 对动平台的 yoz 平面工作空间的影响趋势是先增大后减小;参数 d 对动平台 yoz 平面的工作空间的影响趋势是先增大后减小再增大。

4) 通过运动仿真具体零件,得出动平台形心 o' 的运动轨迹图和各主动移动副随时间变化位移曲线,仿真过程中运动平稳,无剧烈波动。

参考文献:

- [1] 张东胜,许允斗,姚建涛,等. (2PRR)~2+R平面并联机构的刚度与固有频率[J]. 光学精密工程,2017,25(11):2904-2913.
- [2] 张东胜,许允斗,侯照伟,等. 五自由度混联机器人优化设计与运动学分析[J]. 农业工程学报,2016,32(24):69-76.
- [3] 吴存存,杨桂林,陈庆盈,等. 四自由度2PPP_aR并联机构运动学及性能分析[J]. 机械工程学报,2018,54(3):36-45.
- [4] 陈纯,刘二乐,黄玉美. 2-PRR并联机构刚柔动力学仿真分析[J]. 机械设计与制造,2015(4):101-104.
- [5] 王鑫辉,常琮尧,杜苏睿,等. 3-PRR全柔顺并联机构的水平集多目标拓扑优化设计及灵敏度分析[J]. 锻压技术,2018,43(1):181-188.
- [6] 莫嘉嗣,张宪民,邱志成,等. SEM环境下3PRR并联平台奇异区域规避与逃逸控制策略[J]. 机械工程学报,2015,51(23):1-11.
- [7] 宋杰,梅瑛,李瑞琴. 平面3自由度PRR-RRP型并联操作平台的设计与运动学研究[J]. 机械设计,2015,32(4):56-60.
- [8] 黄真. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社,2014:11-24.
- [9] 李秦川,孙晓东,陈巧红,等. 2-PRS-PRRU并联机构运动学与奇异分析[J]. 机械工程学报,2011,47(3):21-27.
- [10] SHAH H L. Kinematic, dynamic and workspace analysis of a novel 6-DOF parallel manipulator [D]. New York: State University of New York at Buffalo, 2010:16-77.