

引用格式:陈修龙,陈天祥,李跃文,等. 3-PRR 并联机器人机构运动学建模与分析[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(5):79-87.

CHEN Xiulong, CHEN Tianxiang, LI Yuewen, et al. Kinematics modeling and analysis of 3-PRR parallel robot mechanism [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(5):79-87.

3-PRR 并联机器人机构运动学建模与分析

陈修龙¹, 陈天祥¹, 李跃文¹, 蒙昭如²

(1. 山东科技大学 机械电子工程学院, 山东青岛 266590; 2. 青岛大学 数据科学与软件工程学院, 山东 青岛 266071)

摘要:对3-PRR并联机器人机构的运动学建模和运动特性进行分析研究。建立了机构的位置、速度、加速度运动学正解及反解的数学模型,得出特定轨迹下驱动杆的杆长、速度和加速度的变化曲线,利用ADAMS仿真验证了运动学建模的正确性;分析了机构在不同姿态下的工作空间;推导出机构的雅克比矩阵,据此分析了不同姿态下机构的条件数、最小奇异值、可操作性等特性。

关键词:并联机器人机构;运动学;工作空间;雅克比矩阵

中图分类号: 文献标志码: 文章编号: 1672-3767(2018)05-0079-09

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.05.011

Kinematics Modeling and Analysis of 3-PRR Parallel Robot Mechanism

CHEN Xiulong¹, CHEN Tianxiang¹, LI Yuewen¹, MENG Zhaoru²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. School of Data Science and Software Engineering, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

Abstract: The kinematics modeling and analysis of a 3-PRR parallel robot mechanism were studied in this paper. The mathematical model for the forward and inverse solution of position, velocity and acceleration of the mechanism was established; the curves of the length, velocity and acceleration of the driving rod under the specific trajectory were obtained; and the correctness of the kinematics modeling was verified by using ADAMS. The workspaces of the mechanism with different attitude angles were analyzed and the Jacobian matrix of the mechanism was deduced, on the basis of which the kinematic characteristics with different attitude angles including the condition number, the smallest singular value, and maneuverability were also studied.

Key words: parallel robot mechanism; kinematics; workspace; Jacobian matrix

并联机构具有刚度质量比大、精度高、承载能力强、易于实现高速等特点^[1-3]。平面三自由度并联机构在芯片封装及电路板精密切割等领域具有较广的应用,已逐渐成为国内外研究热点。

目前国内外在平面三自由度并联机构的运动学、优化设计和刚度分析等方面做了一些研究工作^[4-6]。张宪民等^[7-9]研究了3-RRR和4-RRR机构的运动学性能。Mousavi等^[10]研究了3-RPR机构的最大奇异椭圆平面及优化分析。Staicu^[11]研究了3-PRR机构的运动学分析及运动控制。董倩文等^[12]对3-PRP机构做

收稿日期:2018-01-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51005138);山东省自然科学基金项目(ZR2017MEE066)

作者简介:陈修龙(1976-),男,河北沧州人,副教授,博士生导师,主要从事机构学理论和应用技术的研究。

E-mail: cxldy99@163.com

了运动学灵巧度和刚度分析。李树军等^[13]分析了 3-PRR 机构的刚度特性。韩霄等^[14]对 3-RRP 机构做了运动学、动力学及精度分析。王鑫辉等^[15]对 3-PRR 机构做了多目标拓扑优化设计及灵敏度分析。以上学者分别对不同构型的平面并联机构做了研究,但是目前尚没有对 3-PRR 机构进行系统的运动学数学建模和运动特性分析,这是对此构型机构进行运动控制与优化设计的基础。因此,本研究针对 3-PRR 平面并联机器人机构,建立运动学正反解数学模型,分析不同姿态角对工作空间的影响。利用机构的雅克比矩阵条件数、最小奇异值、可操作性三个指标对 3-PRR 并联机构进行灵巧度分析。

1 3-PRR 并联机构运动学建模

1.1 运动学反解

运动学反解建模分析是已知动平台中心 O_a 的位姿 (x, y, φ) , 求解出驱动副的输入 l_i , l_i 为驱动杆 $A_i B_i$ 的杆长。

3-PRR 并联机构模型,见图 1。由图 1 可知,3-PRR 并联机构由定平台、动平台和三条对称的支链组成,每个支链包括主动杆和从动杆,主动杆通过移动副与定平台连接,随着主动杆的伸缩,该机构可实现平面内三自由度运动。并联机构的定坐标系(定系)和动坐标系(动系)的原点分别位于三角形 $A_1 A_2 A_3$ 和三角形 $a_1 a_2 a_3$ 的中心。

1.1.1 位置分析

每条支链驱动杆长度为 l_i ($i = 1 \sim 3$), 从动杆长度为 S_i , 动平台外接圆半径为 r , 定平台外接圆半径为 R , 其中 l_i 和 S_i 与定系的水平轴的夹角分别为 α_i 和 θ_i , a_i 与动系的水平轴的夹角为 β_i 。动平台中心坐标 O_a 在定系下可表示为

$$O_a = [x, y, \varphi]^T。$$

其中: x 和 y 为定系下动平台中心坐标, 姿态角 φ 为动系相对于定系的转角。

对于支链 i , 建立运动学方程如下所示:

$$\begin{cases} {}^A x_{Ai} + l_i \cos \alpha_i + S_i \cos \theta_i = {}^A x_{ai} \\ {}^A y_{Ai} + l_i \sin \alpha_i + S_i \sin \theta_i = {}^A y_{ai} \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{cases} {}^A x_{Ai} = R \cos \alpha_i \\ {}^A y_{Ai} = R \sin \alpha_i \\ {}^A x_{ai} = x + r \cos (\beta_i + \varphi) \\ {}^A y_{ai} = y + r \sin (\beta_i + \varphi) \end{cases}$$

运动学方程(1)整理可得:

$$\begin{cases} l_i \cos \alpha_i + S_i \cos \theta_i = {}^A x_{ai} - {}^A x_{Ai} = Q_{xi} \\ l_i \sin \alpha_i + S_i \sin \theta_i = {}^A y_{ai} - {}^A y_{Ai} = Q_{yi} \end{cases} \quad (2)$$

基于三角函数定理,消去从动杆的转角 θ_i 可得

$$l_i^2 - 2(Q_{xi} \cos \alpha_i + Q_{yi} \sin \alpha_i)l_i + (Q_{xi}^2 + Q_{yi}^2 - S_i^2) = 0. \quad (3)$$

求出驱动杆长度为:

$$l_i = (Q_{xi} \cos \alpha_i + Q_{yi} \sin \alpha_i) \pm \sqrt{(Q_{xi} \cos \alpha_i + Q_{yi} \sin \alpha_i)^2 - (Q_{xi}^2 + Q_{yi}^2 - S_i^2)}. \quad (4)$$

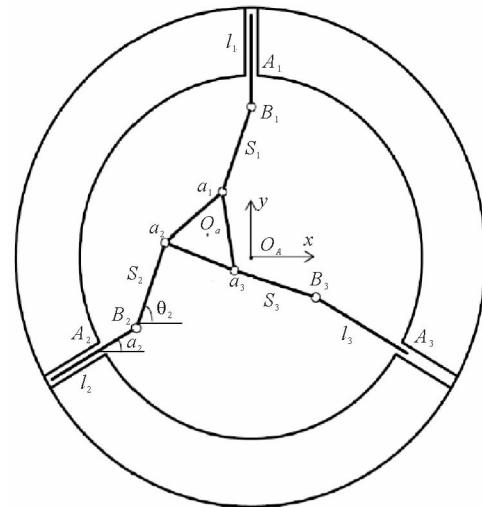


图 1 3-PRR 并联机构模型简图(P: 移动副, R: 转动副)

Fig. 1 Model diagram of 3-PRR parallel mechanism(P: Moving pair, R: Rotating pair)

1.1.2 速度分析

将运动学方程(2)对时间求一次导数,得到速度方程:

$$\begin{cases} \cos \alpha_i l_i - S_i \sin \theta_i \dot{\theta}_i = \dot{x} - r \sin(\beta_i + \varphi) \dot{\varphi} \\ \sin \alpha_i l_i + S_i \cos \theta_i \dot{\theta}_i = \dot{y} + r \cos(\beta_i + \varphi) \dot{\varphi} \end{cases} \quad (5)$$

方程(5)写成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & -S_1 \sin \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_1 & S_1 \cos \theta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha_2 & -S_2 \sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \alpha_2 & S_2 \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \alpha_3 & -S_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \alpha_3 & S_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{l}_1 \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{l}_2 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{l}_3 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r \sin(\beta_1 + \varphi) \\ 0 & 1 & r \cos(\beta_1 + \varphi) \\ 1 & 0 & -r \sin(\beta_2 + \varphi) \\ 0 & 1 & r \cos(\beta_2 + \varphi) \\ 1 & 0 & -r \sin(\beta_3 + \varphi) \\ 0 & 1 & r \cos(\beta_3 + \varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

简记为

$$\mathbf{J}_{F1} \dot{\mathbf{L}}_{\theta} = \mathbf{J}_{F2} \dot{\mathbf{X}}. \quad (7)$$

1.1.3 加速度分析

公式(5)对时间求导,可得加速度反解方程为

$$\mathbf{J}_{F1} \ddot{\mathbf{L}}_{\theta} = \mathbf{J}_{F2} \ddot{\mathbf{X}} + \boldsymbol{\mu}. \quad (8)$$

其中:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{L}}_{\theta} &= [\ddot{l}_1 \quad \ddot{\theta}_1 \quad \ddot{l}_2 \quad \ddot{\theta}_2 \quad \ddot{l}_3 \quad \ddot{\theta}_3]^T, \\ \ddot{\mathbf{X}} &= [\ddot{x} \quad \ddot{y} \quad \ddot{\varphi}]^T, \\ \boldsymbol{\mu} &= \begin{bmatrix} S_1 \cos \theta_1 & 0 & 0 & -r \cos(\beta_1 + \varphi) \\ S_1 \sin \theta_1 & 0 & 0 & -r \sin(\beta_1 + \varphi) \\ 0 & S_2 \cos \theta_2 & 0 & -r \cos(\beta_2 + \varphi) \\ 0 & S_2 \sin \theta_2 & 0 & -r \sin(\beta_2 + \varphi) \\ 0 & 0 & S_3 \cos \theta_3 & -r \cos(\beta_3 + \varphi) \\ 0 & 0 & S_3 \sin \theta_3 & -r \sin(\beta_3 + \varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \\ \ddot{\varphi}^2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

1.1.4 算例分析

机构动平台中心分别按照 0° 和 30° 姿态角沿一个半径为 30 mm 的圆形轨迹运行,以轨迹的圆心为坐标系原点。基于机构的反解方程,通过 Matlab 数值计算得到 0° 和 30° 姿态角下的杆长、速度和加速度曲线,如图 2 和图 4 所示;Adams 仿真曲线图如图 3 和图 5 所示。

通过对比图 2 和图 4 可知,在改变动平台姿态角时,对驱动杆的杆长变化影响较大,但对驱动杆的速度和加速度影响较小。通过对比图 2 和图 3、图 4 和图 5 可知,各驱动杆的长度、速度、加速度曲线变化平滑,Matlab 计算结果与 Adams 仿真分析结果基本一致,验证了运动学建模的正确性。

1.2 运动学正解

运动学正解的坐标系建立及符号参数表示与运动学反解的相同,在此不再赘述,运动学正解方程如下:

$$\begin{cases} R \cos \alpha_i + l_i \cos \alpha_i = x + r \cos(\beta_i + \varphi) - S_i \cos \theta_i \\ R \sin \alpha_i + l_i \sin \alpha_i = y + r \sin(\beta_i + \varphi) - S_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (9)$$

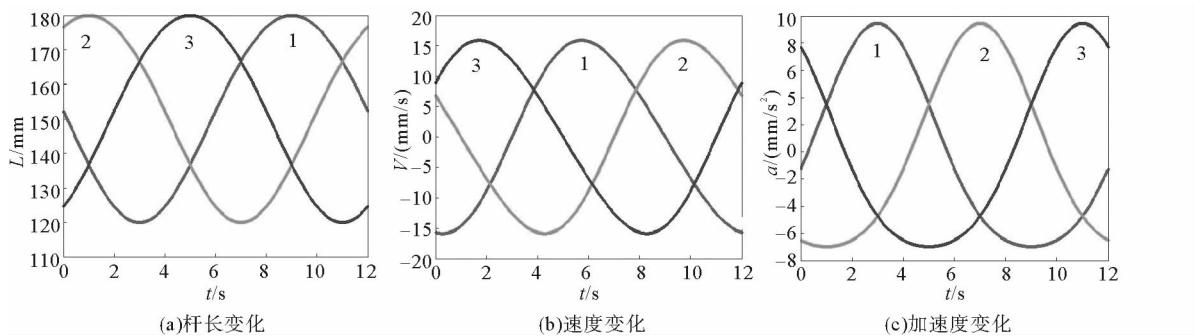
图 2 姿态角 0° Matlab 计算曲线图

Fig. 2 The calculation curve of 0 degrees of attitude angle by Matlab

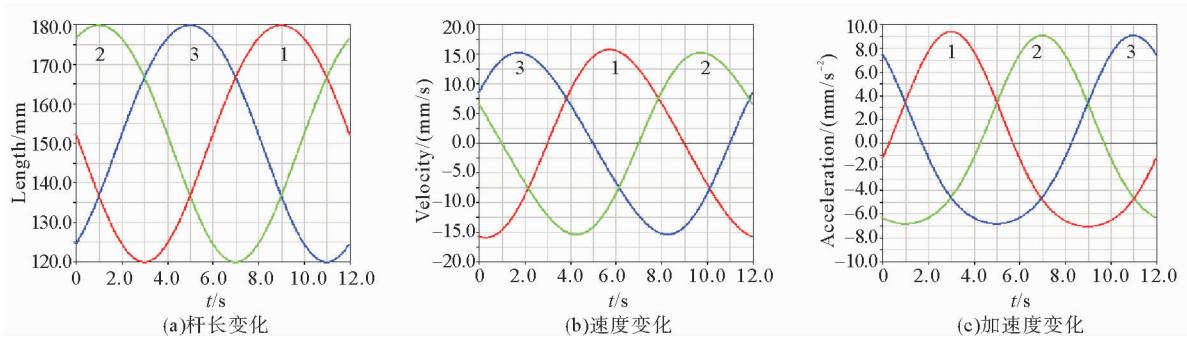
图 3 姿态角 0° Adams 仿真曲线图

Fig. 3 The simulation curve of 0 degrees of attitude angle by Adams

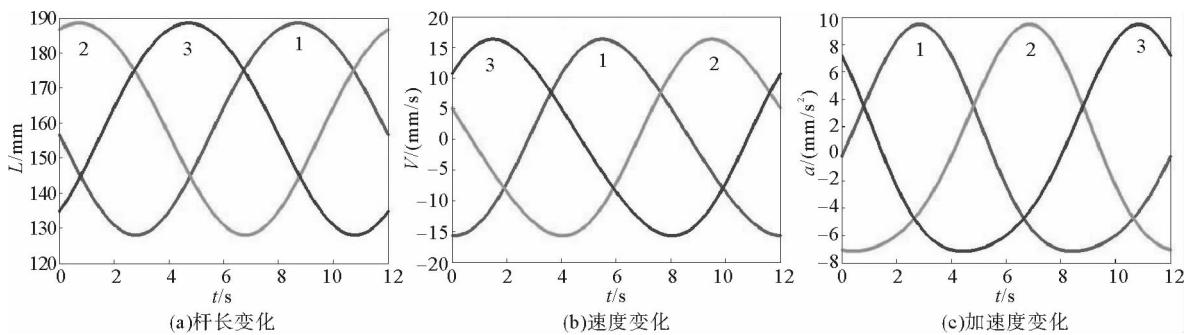
图 4 姿态角 30° Matlab 计算曲线图

Fig. 4 The calculation curve of 30 degrees of attitude angle by Matlab

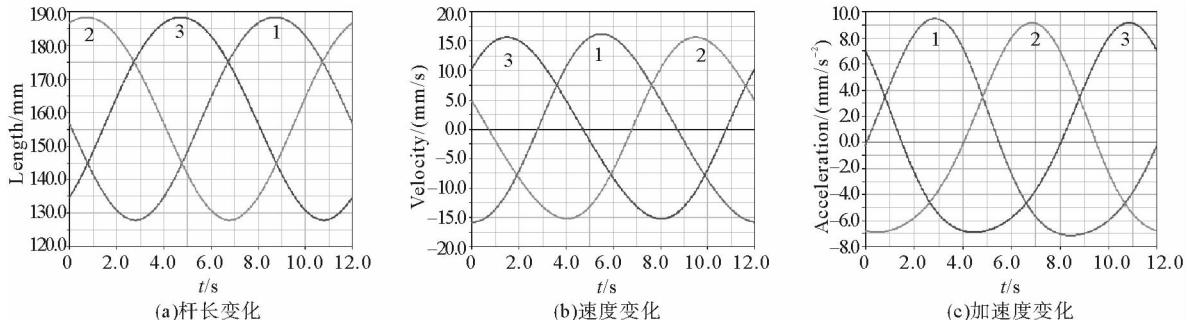
图 5 姿态角 30° Adams 仿真曲线图

Fig. 5 The simulation curve of 30 degrees of attitude angle by Adams

同理可得,速度正解矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \alpha_3 \\ 0 & 0 & \sin \alpha_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{l}_1 \\ \ddot{l}_2 \\ \ddot{l}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -r\sin(\beta_1 + \varphi) & S_1 \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & r\cos(\beta_1 + \varphi) & -S_1 \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -r\sin(\beta_2 + \varphi) & 0 & S_2 \sin \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & r\cos(\beta_2 + \varphi) & 0 & -S_2 \cos \theta_2 & 0 \\ 1 & 0 & -r\sin(\beta_3 + \varphi) & 0 & 0 & S_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & r\cos(\beta_3 + \varphi) & 0 & 0 & -S_3 \cos \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

简记为

$$\mathbf{J}_{Z2}\ddot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}_{Z1}\ddot{\mathbf{X}}_\theta. \quad (11)$$

速度正解方程(10)对时间求一次导数,得到加速度正解矩阵方程如下:

$$\mathbf{J}_{Z2}\ddot{\mathbf{L}} - \boldsymbol{\mu} = \mathbf{J}_{Z1}\ddot{\mathbf{X}}_\theta. \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{X}}_\theta &= [\ddot{x} \quad \ddot{y} \quad \ddot{\varphi} \quad \ddot{\theta}_1 \quad \ddot{\theta}_2 \quad \ddot{\theta}_3]^T, \\ \ddot{\mathbf{L}} &= [\ddot{l}_1 \quad \ddot{l}_2 \quad \ddot{l}_3]^T, \\ \boldsymbol{\mu} &= \begin{bmatrix} S_1 \cos \theta_1 & 0 & 0 & -r\cos(\beta_1 + \varphi) \\ S_1 \sin \theta_1 & 0 & 0 & -r\sin(\beta_1 + \varphi) \\ 0 & S_2 \cos \theta_2 & 0 & -r\cos(\beta_2 + \varphi) \\ 0 & S_2 \sin \theta_2 & 0 & -r\sin(\beta_2 + \varphi) \\ 0 & 0 & S_3 \cos \theta_3 & -r\cos(\beta_3 + \varphi) \\ 0 & 0 & S_3 \sin \theta_3 & -r\sin(\beta_3 + \varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \\ \dot{\theta}_3^2 \\ \dot{\varphi}^2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

2 3-PRR 并联机构工作空间分析

2.1 工作空间及面积求解

2.1.1 约束条件

在约束条件下,根据运动学方程是否存在实数解,可以求解出 3-PRR 机构的可达工作空间,有实数解的点即为机构的可达工作点。已知 3-PRR 并联机构参数: $S_1 = S_2 = S_3 = 200 \text{ mm}$, $r = 50 \text{ mm}$, $R = 400 \text{ mm}$ 。求解本 3-PRR 并联机构工作空间:即在满足以下约束条件下,计算求解动平台中心点 O_a 可达工作点的集合。工作空间的约束条件:

1) 各驱动杆的长度限制:并联机器人由移动副驱动,驱动杆长度变化须满足

$$l_{\min} < l_i < l_{\max}.$$

当某一驱动杆长达到其极限值时,并联机器人动平台上的中心点也就达到了工作空间的边界。各驱动副行程 $l_i = l_{\max} - l_{\min}$,其大小直接影响操作空间的大小。

2) 从动杆的干涉:设各从动杆截面都是边长为 m 的正方形,两相邻杆中心线间的最短距离为 M ,则两杆之间不发生干涉的条件为

$$M > m.$$

3) 各转动关节的转角限制。由于各转动关节的转动范围有限,所以关节转角也限制了各支链从动杆的转动幅度:

$$\theta_{\min} < \theta_i < \theta_{\max}$$

2.1.2 计算分析结果

基于 MATLAB R2014a 数值计算分析的工作空间,见图 6。由图 6 可求出在动平台姿态角为 0 度时的最大工作空间面积为 39885 mm^2 ,工作空间最大内切圆半径为 100 mm 。

2.2 不同姿态角对工作空间的影响

不同姿态角下的工作空间对比如图 7 所示。由图 7 可知,当动平台的姿态角为 0 度时,机构的工作空间最大;在改变动平台姿态角时,工作空间也会随着旋转一定的角度,并且工作空间的面积也会随着减小。

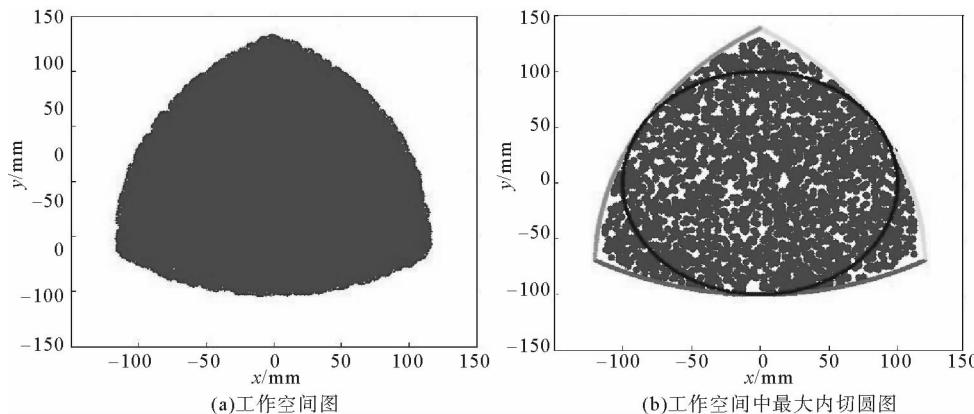


图 6 动平台姿态角 0°时的工作空间

Fig. 6 The working space of the moving platform at the attitude angle of 0 degrees

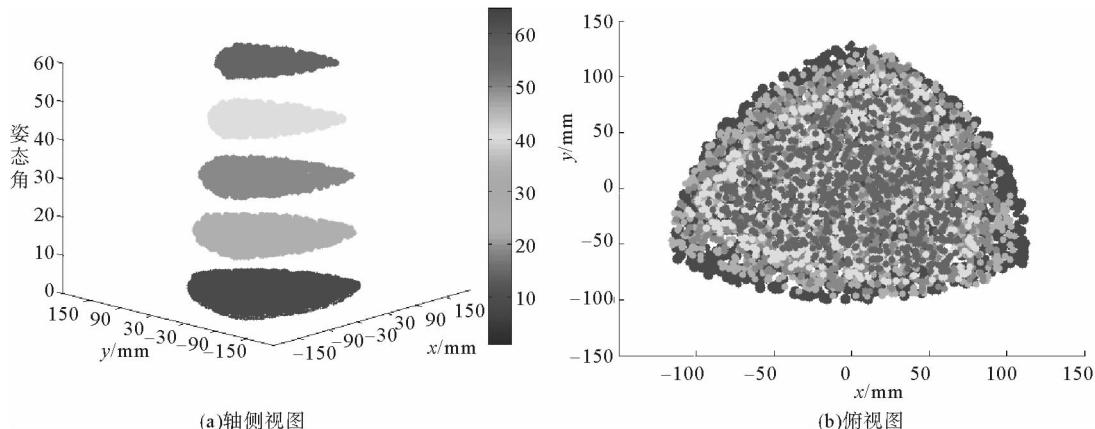


图 7 不同姿态角下的工作空间对比图($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$)

Fig. 7 A work space contrast diagram with different attitude angles

(0 degrees, 15 degrees, 30 degrees, 45 degrees, 60 degrees)

3 3-PRR 并联机构灵巧度分析

3.1 不同姿态下的条件数的倒数值

3-PRR 机构的雅克比矩阵条件数的倒数值越大,机构的运动学性能越好。3-PRR 机构雅克比矩阵条件数的倒数值如图 8 所示。可以看出,工作空间中心处机构的运动学性能比边缘处机构的运动学性能要好。

3.2 不同姿态下的最小奇异值

最小奇异值越大,越有利于动平台的快速响应,也越有利于控制操作的最大速度。动平台在不同姿态下的最小奇异值变化,如图 9 所示。

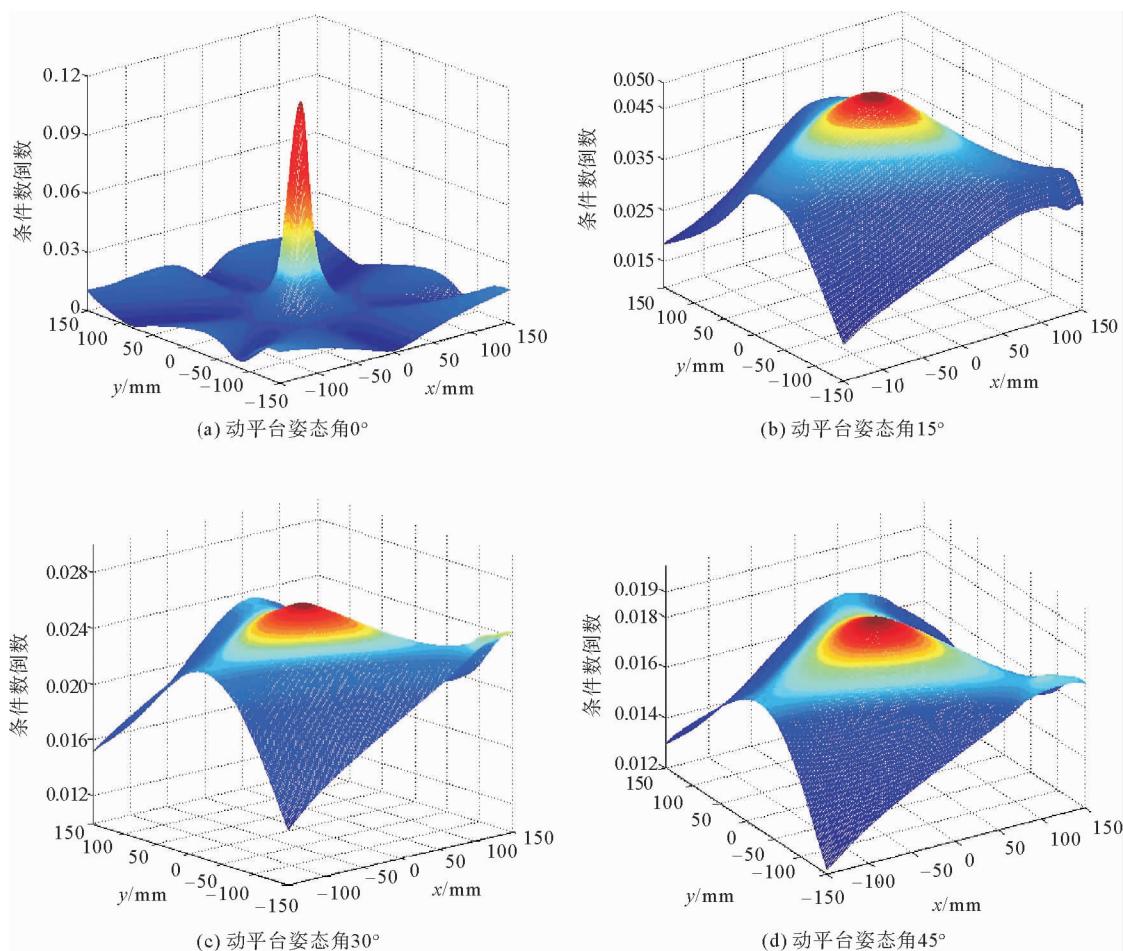
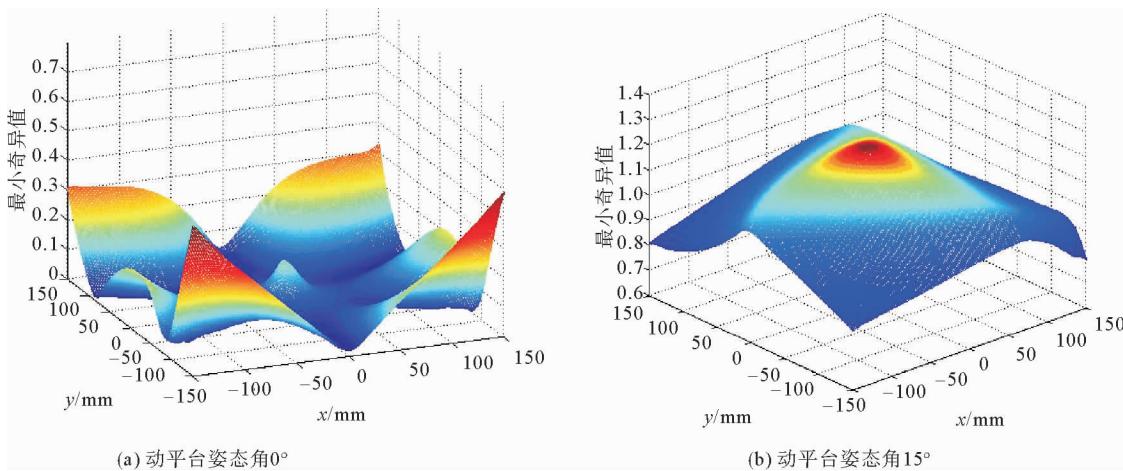


图 8 不同姿态角时的条件数倒数

Fig. 8 The reciprocal of the condition number of different attitude angles

由图 9 可以看出,当动平台姿态角为 0° 时,机构的最小奇异值较小,不利于动平台的快速响应;当动平台姿态角为 15° 时,机构的最小奇异值有明显的增大,动平台易于快速响应控制;当动平台姿态角增大到 30° 、 45° 时,最小奇异值变化较小,机构的快速响应特性和姿态角为 15° 时无较大差异。



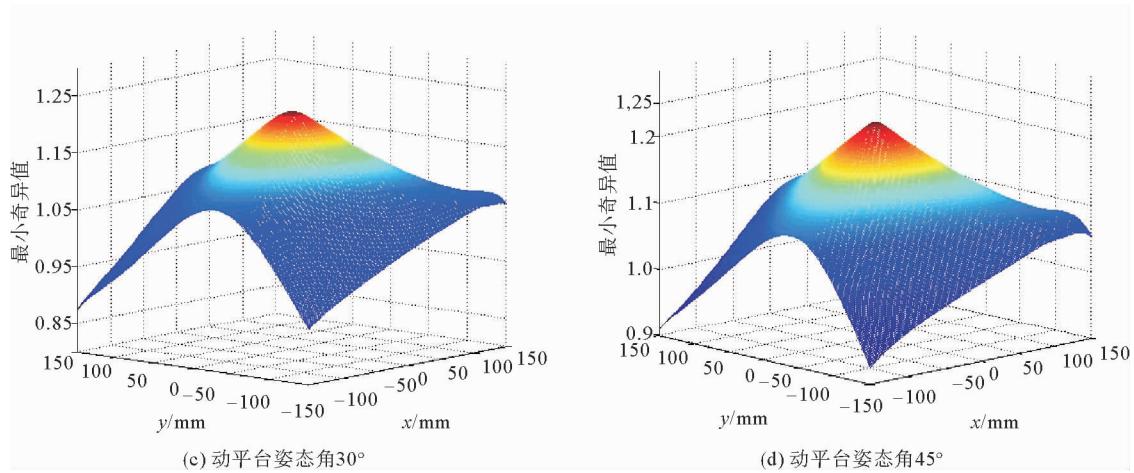


图 9 不同姿态角下的最小奇异值

Fig. 9 The minimum singular value of different attitude angles

3.3 不同姿态下的可操作性

可操作性的值越大,动平台的工作灵活程度越高。动平台在不同姿态下的可操作性变化图,见图 10。

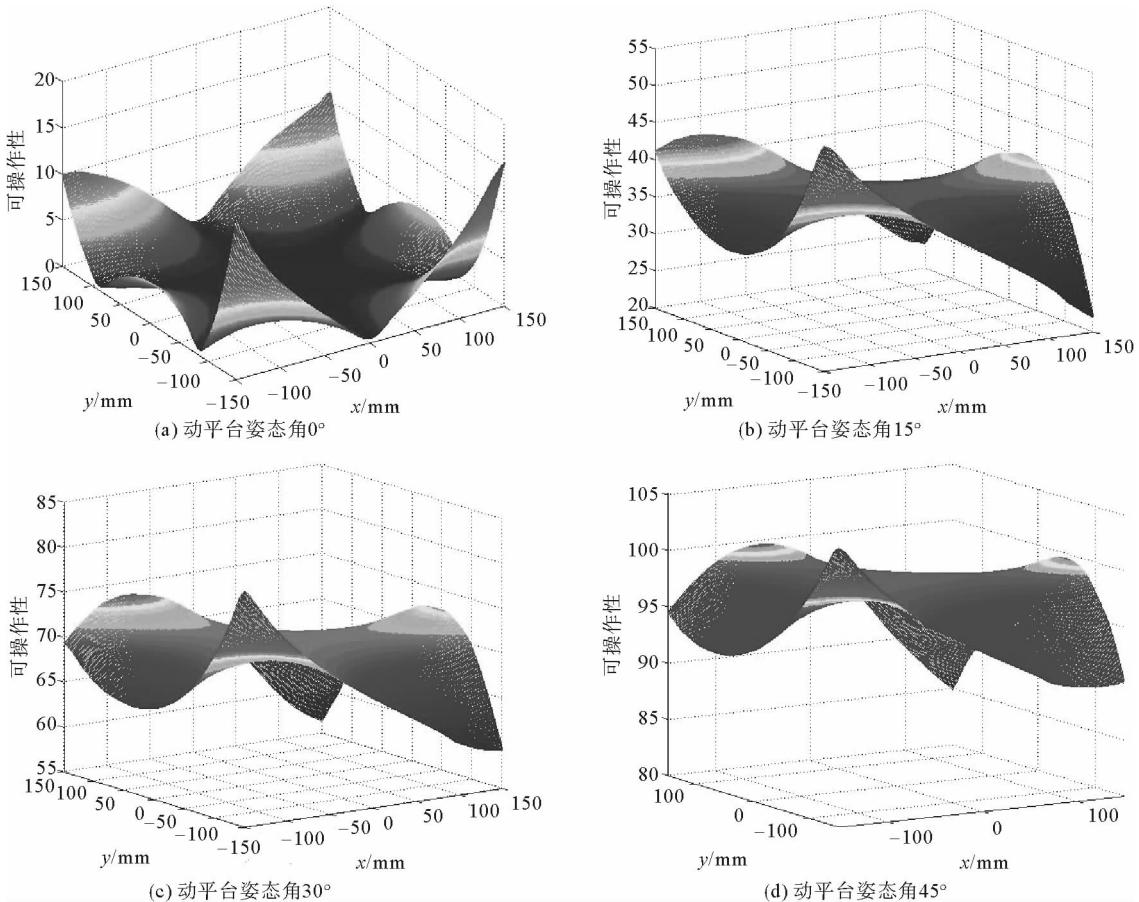


图 10 不同姿态角下的可操作性

Fig. 10 The maneuver ability of different attitude angles

从图 10 可以看出,当动平台姿态角为 0° 时,机构的可操作性较小,动平台的灵活程度较低;当动平台姿态角为 15° 时,机构的可操作性有明显的增大,动平台灵活程度较高;当动平台姿态角增大到 30° 、 45° 时,可操作性也随之增大,动平台灵活程度较好。

4 总结

本研究建立了机构的运动学反解和正解数学模型，并对运动学反解进行了实例计算验证，得出特定轨迹下杆长、速度、加速度的变化曲线；根据约束条件，计算出不同姿态下动平台的工作空间，分析了动平台姿态角对工作空间的影响；并推导出速度雅克比矩阵，计算出在不同姿态下雅克比矩阵条件数的倒数值、最小奇异值、可操作性在工作空间分布，分析了机构的灵巧度特性。

参考文献：

- [1]朱大昌,冯文结,安梓铭.整体式平面三自由度全柔顺并联机构构型拓扑优化设计[J].机械工程学报,2015,51(5):30-36.
ZHU Dachang, FENG Wenjie, AN Ziming. Structural topology optimization design of integral planar three degree of freedom fully compliant parallel mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(5):30-36.
- [2]高丽华,郑亚青,MITROUCHEV Peter.基于 ADAMS 的绳牵引并联支撑系统动力学建模[J].山东科技大学学报(自然科学版),2013,32(6):89-94.
GAO Lihua, ZHENG Yaqing, MITROUCHEV Peter. Dynamic modeling of a rope traction parallel support system based on ADAMS [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 32(6):89-94.
- [3]SHAN X,CHENG G. Structural error and friction compensation control of a 2(3PUS+S) parallel manipulator[J]. Mechanism and Machine Theory,2018,124:92-103.
- [4]ZHANG D,XU Y,YAO J,et al. Kinematics,dynamics and stiffness analysis of a novel 3-DOF kinematically/actuation redundant planar parallel mechanism[J]. Mechanism & Machine Theory,2017,116:203-219.
- [5]WU X,XIE Z,KEPLER J,et al. A parametric model of 3-PPR planar parallel manipulators for optimum shape design of platforms[J]. Mechanism & Machine Theory,2017,118:139-153.
- [6]SLAVISAS,ALEKSANDARN. A new pseudo-rigid-body model approach for modeling the quasi-static response of planar flexure-hinge mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory,2018,124:150-161.
- [7]ZHANG X,ZHANG X. A comparative study of planar 3-RRR and 4-RRR mechanisms with joint clearances[J]. Robotics & Computer Integrated Manufacturing,2016,40:24-33.
- [8]ZHANG H,ZHANG X,ZHANG X,et al. Dynamic analysis of a 3-PRR parallel mechanism byconsidering joint clearances [J]. Nonlinear Dynamics,2017,90:405-423.
- [9]ZHAN Z,ZHANG X,JIAN Z,et al. Error modelling and motion reliability analysis of a planar parallel manipulator with multiple uncertainties[J]. Mechanism and Machine Theory,2018,124:55-72.
- [10]MOUSAVI M,MASOULEH M,KARIMI A. On the maximal singularity-free ellipse of planar 3-RPR parallel mechanisms via convex optimization[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2014,30(2):218-227.
- [11]STAICU S. Inverse dynamics of the 3-PRR planar parallel robot[J]. Robotics & Autonomous Systems,2009,57(5):556-563.
- [12]董倩文,刘永姜,李瑞琴,等.3-PRP 平面并联机构运动学分析[J].机械传动,2015,39(1):35-38.
DONG Qianwen, LIU Yongjiang, LI Ruiqin, et al. Kinematic analysis of 3-PRP planar parallel mechanism[J]. Mechanical Transmission, 2015, 39(1):35-38.
- [13]李树军,孟巧玲.3-PRR 平面并联机构的刚度特性[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(6):865-868.
LI Shujun, MENG Qiaoling. Stiffness characteristics of 3-PRR planar parallel mechanism[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2009, 30(6):865-868.
- [14]韩霄,李虹,李瑞琴.基于 BP 法的 3-RRP 并联机构位置正解研究[J].组合机床与自动化加工技术,2015(2):94-96.
HAN Xiao, LI Hong, LI Ruiqin. Research on position positive solution of 3-RRP parallel mechanism based on BP method [J]. Combined Machine Tool and Automatic Machining Technology, 2015(2):94-96.
- [15]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.
WANG Xinhui, CHANG Congyao, DU Surui, et al. Multi-objective topology optimization design and sensitivity analysis on 3-PRR fully compliance parallel mechanism based on level-set method[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(1): 181-188.