

冗余并联机构运动学性能分析与优化

陈修龙¹ 蒋德玉¹ 陈林林¹ 王清²

(1. 山东科技大学机械电子工程学院, 青岛 266590; 2. 山东科技大学纳米工程研究所, 青岛 266590)

摘要: 研究了一种4自由度—虎克铰—移动副—球铰/转动副—移动副—虎克铰冗余并联机构的运动学性能评价指标和优化设计,建立了该并联机构的雅可比矩阵,得到了该机构的3个不同的运动学性能评价指标,即条件数、最小奇异值和可操作性,在此基础上,定义了评价不同位形下运动学综合性能的全局灵巧度系数指标,并分别研究了不同性能评价指标在并联机构工作空间内的分布规律。最后,基于全局灵巧度指标,利用遗传算法对冗余驱动并联机构的结构参数进行了优化设计。为该冗余并联机构的结构设计奠定了理论基础。

关键词: 冗余并联机构; 雅可比矩阵; 灵巧度; 优化设计

中图分类号: TH113 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0340-08

Kinematics Performance Analysis and Optimal Design of Redundant Actuation Parallel Mechanism

Chen Xiulong¹ Jiang Deyu¹ Chen Linlin¹ Wang Qing²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
2. Institute of Nano Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The kinematics performance analysis and optimal design of 4-UPS-RPU (4-universal joints-prismatic pairs-spherical joints/revolute joints-prismatic pairs-universal joints) redundant actuation parallel mechanism was studied. The Jacobian matrix of the mechanism was established, and the three dexterity measures, which were conditional number, the smallest singular value and operation, were obtained. On this basis, the global dexterity coefficient, which was used to evaluate the dexterity of various configurations, was defined. And the distribution of different dexterity measures when parallel mechanism was kept in different attitudes, such as in single attitude of different Euler angles α and different Euler angles β , at the same Euler angle α and different Euler angles β , in the workspace were analyzed, respectively. Finally, based on the global dexterity coefficient, the structure parameters which include the distribution angle on stationary platform and motion platform and the distribution radius on stationary platform and motion platform, were optimized by genetic algorithm. Compared with the global dexterity coefficient before and after optimization, it was found that the global dexterity coefficient after optimization was bigger than that before optimization. Thus the kinematic performance of 4-UPS-RPU redundant actuation parallel mechanism after optimization was much better than that before optimization, and the optimized effect was obvious. This research can provide important theoretical base of the structure design for the redundant actuation parallel mechanism.

Key words: redundant actuation parallel mechanism; Jacobian matrix; dexterity measures; optimal design

收稿日期: 2015-11-25 修回日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51005138)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2012ZZ008)、山东省泰山学者建设工程专项资金项目(tshw20130956)和山东科技大学杰出青年基金项目(2011KYJQ102)

作者简介: 陈修龙(1976—),男,副教授,博士生导师,主要从事并联机构运动学及其动力学研究,E-mail: cxldy99@163.com

引言

冗余并联机构是输入构件数目多于输出构件自由度数的并联机构,它相对于一般并联机构具有更高刚度、更优的力操作性能和更大的承载能力等优点,目前已成为机器人研究与应用的一个热点^[1-3]。

冗余并联机构的灵巧度是评价机构综合运动学性能和衡量机构传递精度的重要指标,也是参数优化设计的重要依据。迄今,国内外学者在并联机构运动性能分析和优化设计方面取得了一些非常有价值的研究成果^[4-16],针对多种不同的灵巧度评价指标进行了系统的研究,提出了基于不同运动学性能指标的优化设计方法^[17-19],在一定程度上提高了并联机构的运动性能。但以往研究主要针对非冗余并联机构,涉及冗余并联机构的极少。

本文以具有自主知识产权的空间 4-UPS-RPU 冗余并联机构为例,该机构动平台通过 4 个结构完全相同的驱动分支 UPS(虎克铰-移动副-球副)以及另一个驱动分支 RPU(转动副-移动副-虎克铰)与动平台相连接;推导该机构的雅可比矩阵;分析机构的条件数、最小奇异值和可操作性等灵巧度评价指标;提出并分析全局灵巧度系数综合评价冗余并联机构在各种位形下的灵巧度;基于全局灵巧度系数实现冗余驱动并联机构结构参数的优化设计。

1 冗余并联机构的自由度计算

本机构属于闭环空间机构,其自由度的计算可采用 Kutzbach Grubler 公式

$$M = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (1)$$

式中 M ——机构自由度

n ——机构总构件数

g ——机构运动副数

f_i ——第 i 个运动副的相对自由度

如图 1 所示,本机构中 $n = 12, g = 15, \sum_{i=1}^g f_i = 28$,且无复合铰链、虚约束、局部自由度等特殊情,则由式(1)得

$$M = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i = 6 \times (12 - 15 - 1) + 28 = 4$$

即该机构自由度数为 4,而机构的驱动数目为 5,该机构为冗余驱动的空间并联机构。这就需要通过 5 个驱动输入进行协同控制,才能使该机构实现确定的运动。

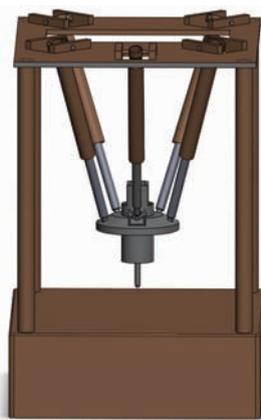


图 1 4-UPS-RPU 冗余并联机构模型图

Fig. 1 Model graph of 4-UPS-RPU parallel mechanism with actuation redundancy

2 冗余并联机构的雅可比矩阵

4-UPS-RPU 冗余并联机构运动速度分析图,如图 2 所示。铰链点 S_i 的速度 ${}^A V_{S_i}$ 可表示为

$${}^A V_{S_i} = {}^A V_{b_o} + {}^A \omega_b \times {}^A r_{S_i} \quad (2)$$

式中 ${}^A V_{b_o}$ ——动平台中心点 O_B 的速度

${}^A \omega_b$ ——动平台的角速度

${}^A r_{S_i}$ ——铰点 S_i 相对于动平台中心点 O_B 的矢径

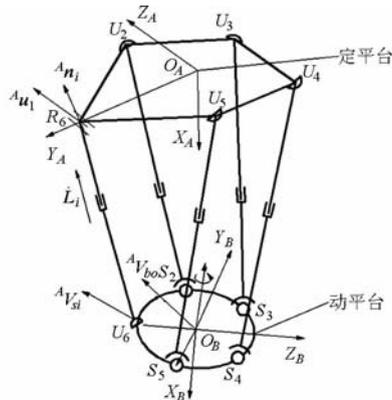


图 2 4-UPS-RPU 冗余并联机构运动速度分析示意图
Fig. 2 Velocity analysis diagram of 4-UPS-RPU parallel mechanisms with actuation redundancy

故驱动速度 \dot{L}_i 可表示为 ${}^A V_{S_i}$ 在 L_i 上的投影

$$\dot{L}_i = {}^A V_{S_i} \cdot {}^A n_i = [{}^A n_i^T \quad ({}^A r_{S_i} \times {}^A n_i)^T]^T \begin{bmatrix} {}^A V_{b_o} \\ {}^A \omega_b \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (3)$$

式中 \dot{L}_i ——杆 L_i 的杆长变化速度

${}^A n_i$ ——杆 L_i 的单位方向矢量

对于全部 5 个驱动杆有

$$\dot{L} = J_{1A} \begin{bmatrix} {}^A V_{b_o} \\ {}^A \omega_b \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $\dot{\mathbf{L}}_i = [\dot{\mathbf{L}}_1 \ \dot{\mathbf{L}}_2 \ \dot{\mathbf{L}}_3 \ \dot{\mathbf{L}}_4 \ \dot{\mathbf{L}}_5]^T$ (5)

$$\mathbf{J}_{1A} = \begin{bmatrix} {}^A \mathbf{n}_1^T & ({}^A \mathbf{r}_{S1} \times {}^A \mathbf{n}_1)^T \\ {}^A \mathbf{n}_2^T & ({}^A \mathbf{r}_{S2} \times {}^A \mathbf{n}_2)^T \\ {}^A \mathbf{n}_3^T & ({}^A \mathbf{r}_{S3} \times {}^A \mathbf{n}_3)^T \\ {}^A \mathbf{n}_4^T & ({}^A \mathbf{r}_{S4} \times {}^A \mathbf{n}_4)^T \\ {}^A \mathbf{n}_5^T & ({}^A \mathbf{r}_{S5} \times {}^A \mathbf{n}_5)^T \end{bmatrix} \quad (6)$$

动平台姿态欧拉角 (α, β, γ) 对时间的导数与动平台角速度之间存在的对应关系为^[16]

$${}^A \boldsymbol{\omega}_b = \begin{bmatrix} {}^A \omega_{bx} \\ {}^A \omega_{by} \\ {}^A \omega_{bz} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(Z, \alpha) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\alpha} + \mathbf{R}(Z, \alpha) \mathbf{R}(Y, \beta) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\beta} +$$

$$\mathbf{R}(Z, \alpha) \mathbf{R}(Y, \beta) \mathbf{R}(X, \gamma) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\gamma} = \begin{bmatrix} 0 & -\sin\alpha \\ 0 & \cos\alpha \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

由4-UPS-RPU机构特点可知,其动平台上的虎克铰链点 U_6 在定坐标系的 Z_A 轴上的坐标为0。虎克铰链点 U_6 在动坐标系下的坐标值转换到定坐标系下可表示为

$$\begin{bmatrix} {}^A X_{U_6} \\ {}^A Y_{U_6} \\ {}^A Z_{U_6} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} -67.11 \\ 0 \\ -228.41 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^A X_{b0} \\ {}^A Y_{b0} \\ {}^A Z_{b0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可得

$${}^A Z_{U_6} = -228.41 R_{33} - 67.11 R_{31} + {}^A Z_{b0} \quad (9)$$

由于 ${}^A Z_{U_6} = 0$,可得

$${}^A Z_{b0} = -67.11 \sin\beta \quad (10)$$

由式(10)可得

$${}^A \dot{Z}_{b0} = -67.11 \dot{\beta} \cos\beta \quad (11)$$

由式(7)和式(11)可得动平台的六维速度为

$$\begin{bmatrix} {}^A \mathbf{V}_{b0} \\ {}^A \boldsymbol{\omega}_b \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{2A} \begin{bmatrix} {}^A V_{xb0} \\ {}^A V_{yb0} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中

$$\begin{bmatrix} {}^A \mathbf{V}_{b0} \\ {}^A \boldsymbol{\omega}_b \end{bmatrix} = [{}^A V_{xb0} \quad {}^A V_{yb0} \quad {}^A V_{zb0} \quad {}^A \omega_{bx} \quad {}^A \omega_{by} \quad {}^A \omega_{bz}]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{J}_{2A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -67.11 \cos\beta \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 0 & 0 & \cos\alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式(12)代入式(4),可得

$$\dot{\mathbf{L}} = \mathbf{J}_{1A} \begin{bmatrix} {}^A \mathbf{V}_{b0} \\ {}^A \boldsymbol{\omega}_b \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{1A} \mathbf{J}_{2A} \begin{bmatrix} {}^A V_{xb0} \\ {}^A V_{yb0} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \mathbf{J}'_A \begin{bmatrix} {}^A V_{xb0} \\ {}^A V_{yb0} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3 冗余并联机构的性能评价指标

根据冗余并联机构雅可比矩阵的奇异值可以选定平均条件数 k 、最小奇异值 σ_{\min} 和可操作性 ω 作为灵巧度衡量指标,各指标具体含义如下:

(1) $k_j = \sqrt{\lambda_{\max}(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)} / \sqrt{\lambda_{\min}(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)}$,其中 \mathbf{J} 为雅可比矩阵; $\lambda_{\max}(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)$ 、 $\lambda_{\min}(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)$ 分别为 $\mathbf{J}\mathbf{J}^T$ 最大和最小特征值; $\frac{1}{k}$ 越大越有利于实现机构的各向同性。

(2) σ_{\min} 越大越有利于动平台对驱动杆的快速响应和控制操作的最大速度。

(3) $\omega = |\det \mathbf{J}^*| = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \sigma_4 \sigma_5$; ω 越大机构的灵巧度越好。

4-UPS-RPU冗余并联机构定平台上的5个铰链点中,第1个转动副沿定坐标系 $\{A\}$ 的 Y 坐标轴方向,坐标值为710 mm,其余4个铰链点 U_i ($i=2, \dots, 5$)为均匀布置,半径为650 mm;4个虎克铰之间的夹角为 $\pi/2$,动平台上5个球铰均匀布置,半径为198.27 mm,各球铰之间的夹角为 $2\pi/5$ 。本文通过雅可比矩阵 \mathbf{J}'_A 得到了条件数、最小奇异值和可操作性3个灵巧度评价指标。

3.1 条件数

4-UPS-RPU冗余并联机构的条件数的倒数在不同姿态下的变化规律,如图3所示。由图3可知,冗余并联机构的姿态变化对其条件数有一定的影响,且机构在 $\alpha = -10^\circ, \beta = 0^\circ$ 姿态下的 $\frac{1}{k}$ 大于其他3个姿态下的值。

3.2 最小奇异值

4-UPS-RPU冗余并联机构的最小奇异值在不同姿态下最小奇异值的变化规律,如图4所示。由图4可知,冗余并联机构的姿态变化对其最小奇异值有较明显的影响,且机构在 $\alpha = -10^\circ, \beta = 0^\circ$ 姿态下的最小奇异值大于其他3个姿态下的值。

3.3 可操作性

4-UPS-RPU冗余并联机构的条件数在不同姿态下的变化规律,如图5所示。由图5可知,冗余并联机构的可操作性随着姿态的改变而变化,且机构在 $\alpha = -10^\circ, \beta = 0^\circ$ 姿态下的可操作性大于其他3

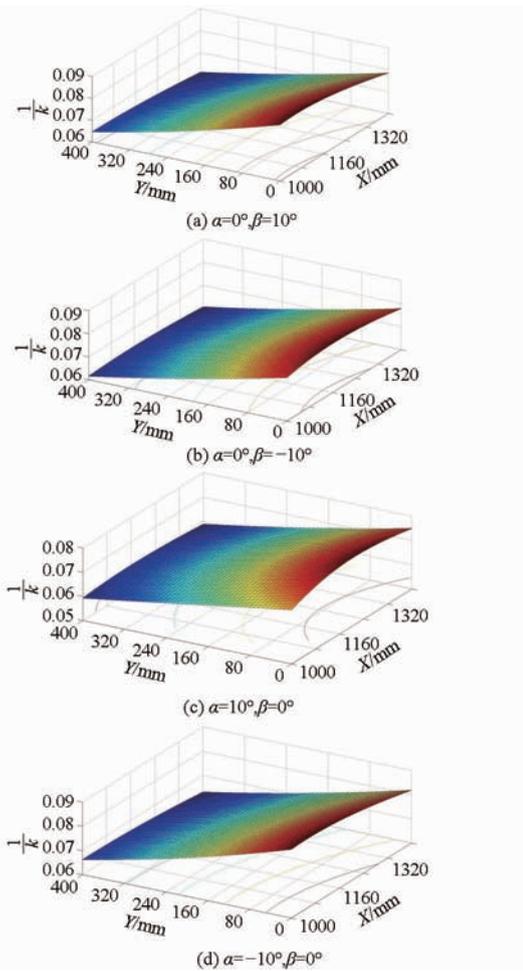


图 3 不同姿态下的条件数的倒数的变化规律
Fig. 3 Changes of reciprocals of condition numbers at different positions and attitudes

个姿态下的值。

3.4 全局灵巧度系数

单个灵巧度评价指标并不能反映冗余并联机构的整体运动性能,必须构造一个能全面评价冗余并联机构灵巧度的指标。本文采用全局灵巧度系数来综合评价并联机构的运动学性能。

$$e = 1 / \sqrt[3]{(k^2 + 1/\sigma_{\min}^2 + 1/\omega^2) / 3} \quad (16)$$

e 值越大机构的灵巧度越好。

4-UPS-RPU 冗余并联机构的全局灵巧度在不同姿态下的变化规律,如图 6 所示。由图 6 可知,冗余并联机构的全局灵巧度随着姿态的改变而变化,且机构在 $\alpha = -15^\circ, \beta = 0^\circ$ 姿态下的全局灵巧度大于其他 3 个姿态下的值。图 7 所示为 4-UPS-RPU 冗余并联机构在同一 α 角、不同 β 角下的全局灵巧度的分布情况。由图 7 可知,在同一 α 角、不同 β 角下,冗余并联机构的全局灵巧度变化明显。

4 冗余并联机构的参数优化

在 4-UPS-RPU 冗余驱动并联机构中影响评

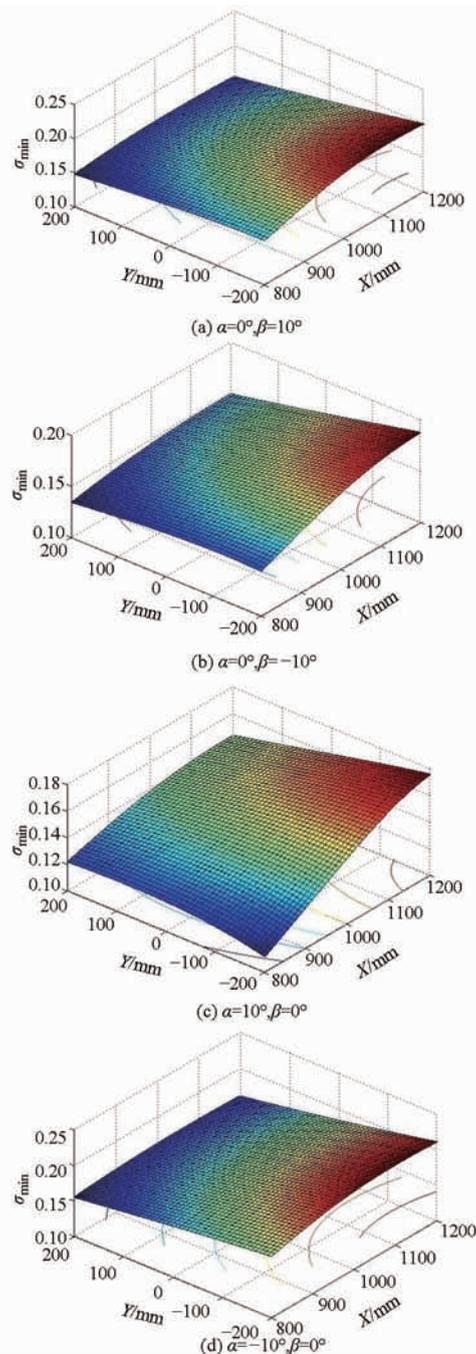


图 4 不同姿态下的最小奇异值的变化规律
Fig. 4 Changes of minimum singular value at different positions and attitudes

价指标的结构参数主要有:定、动平台的铰链点分布角 $\theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和分布半径 r, r_1, r_2 ,如图 8 和图 9 所示。由于优化目标比较多,所以本文利用 Matlab 遗传算法工具箱进行结构参数优化。

在本文中,设计变量为:定、动平台的铰链点分布角 $\theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和分布半径 r, r_1, r_2 。

目标函数为: $\min \left(\frac{1}{e} \right)$

约束条件为:杆长约束条件 $l_{in} \leq l_i \leq l_{ix}$

球铰约束条件 $\theta_{si} \leq \theta_{sx}$

虎克铰约束条件 $\theta_{Ui} \leq \theta_{Ux}$

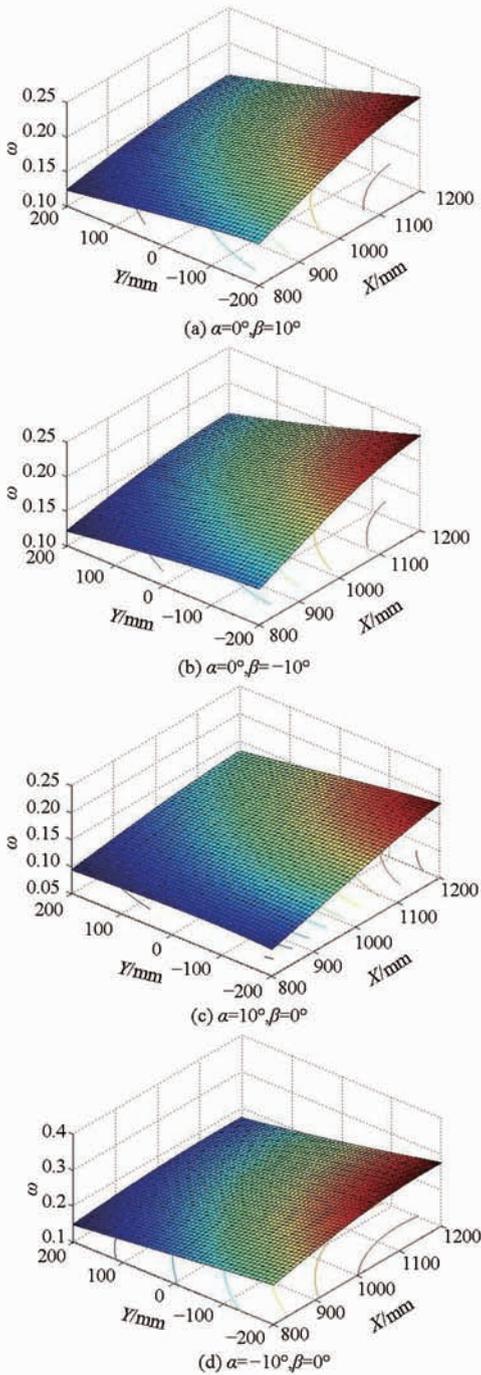


图5 不同姿态下的可操作性的变化规律

Fig.5 Changes of maneuverability at different positions and attitudes

利用遗传算法,得到优化结果为 $\theta = 1.09, \theta_1 = 0.54, \theta_2 = 0.07, \theta_3 = 0.93, r = 662 \text{ mm}, r_1 = 866 \text{ mm}, r_2 = 193 \text{ mm}$ 。

利用优化后的参数,分析得到4-UPS-RPU冗余并联机构的全局灵巧度如图10、11所示,对比分析图10和图6、图11和图7可以发现,图10全局灵巧度比图6的全局灵巧度以及图11全局灵巧度比图7的全局灵巧度都有明显增大,优化后冗余并联

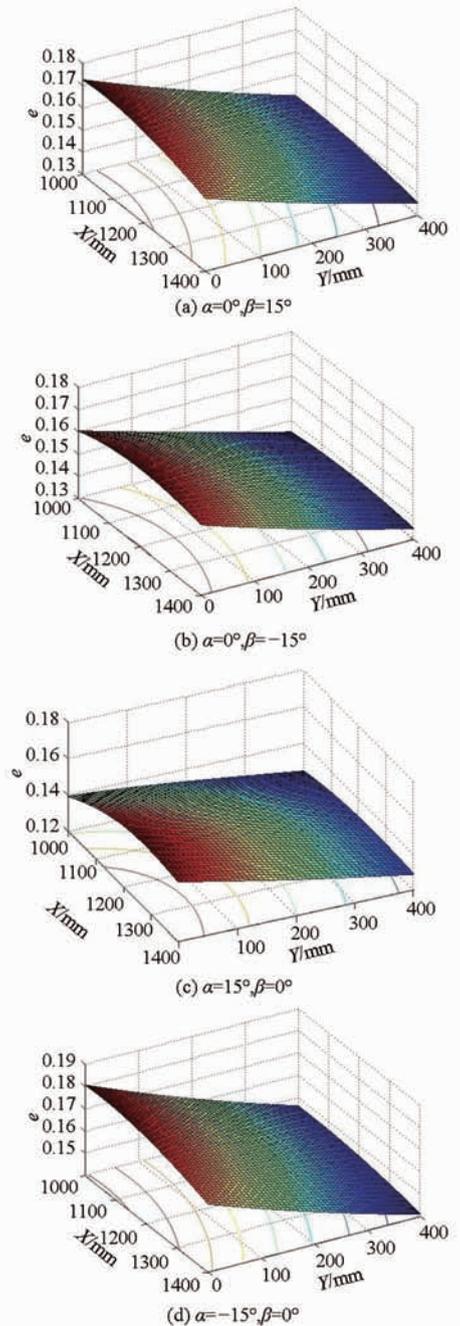


图6 单一姿态下的全局灵巧度

Fig.6 Global dexterity at single position and attitude

机构运动学性能得到了提高。

5 结束语

推导了4-UPS-RPU冗余并联机构的雅可比矩阵,对该机构的条件数、最小奇异值和可操作性等灵巧度评价指标进行了分析;提出了全局灵巧度系数来综合评价冗余并联机构在各种位形下的灵巧度,并分析了其在工作空间内的分布规律;基于全局灵巧度指标,利用遗传算法实现了冗余驱动并联机构结构参数的优化设计,研究为冗余并联机构的运

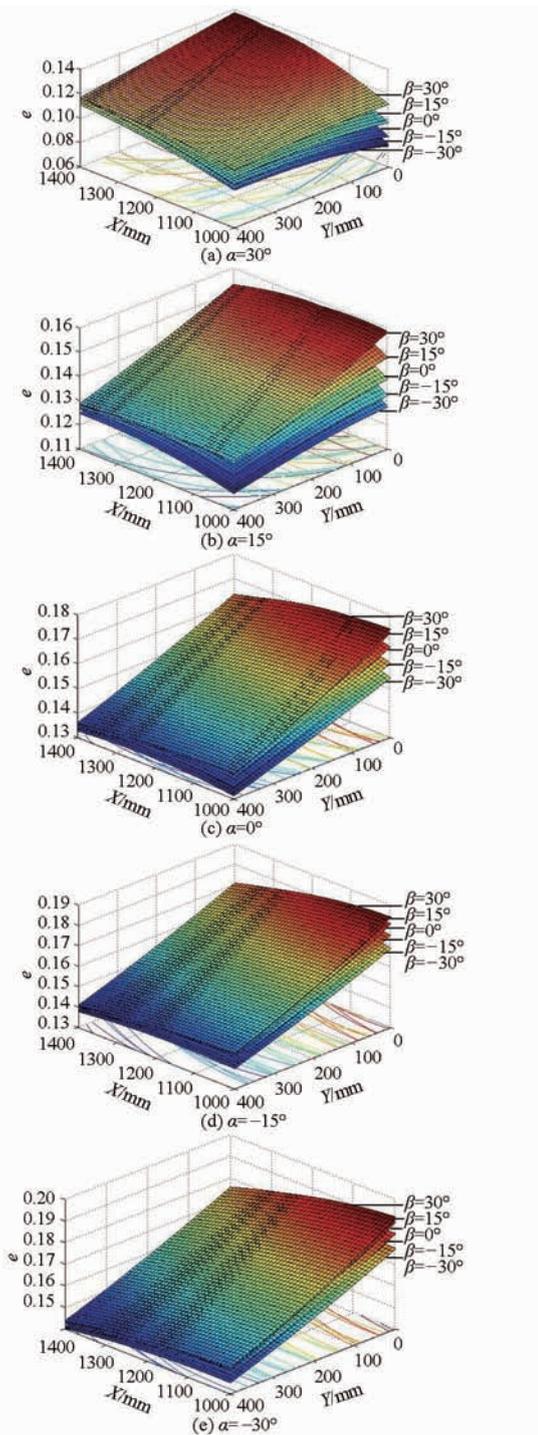


图 7 不同 β 角下的全局灵巧度

Fig. 7 Global dexterity at different β angles

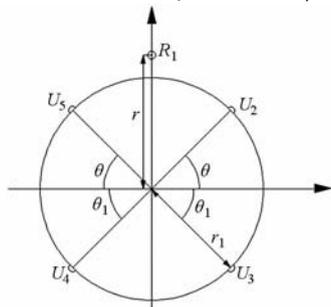


图 8 定平台各铰链点分布图

Fig. 8 Hinge point distribution diagram on fixed platform

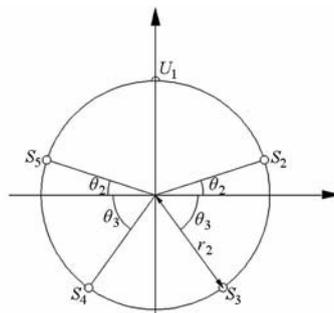


图 9 动平台各铰链点分布图

Fig. 9 Hinge point distribution diagram on moving platform

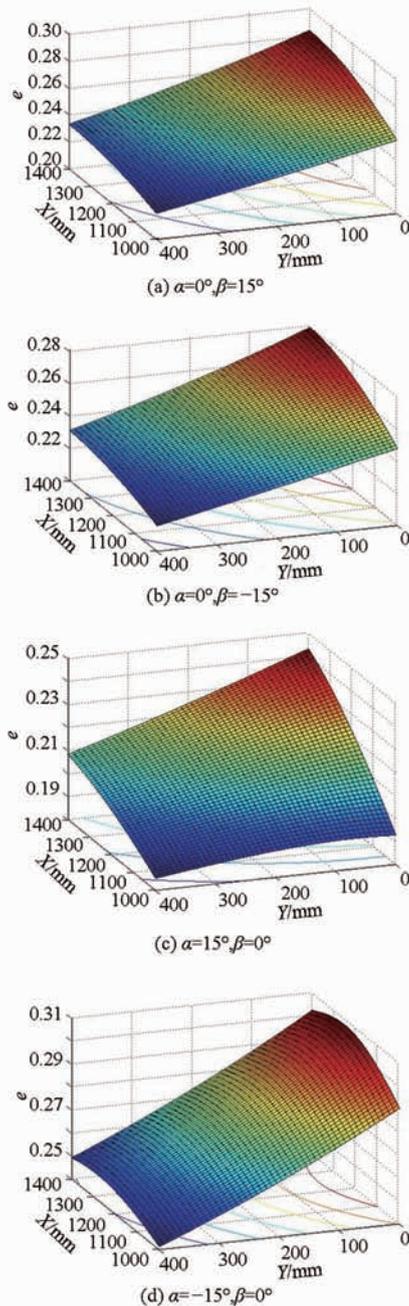
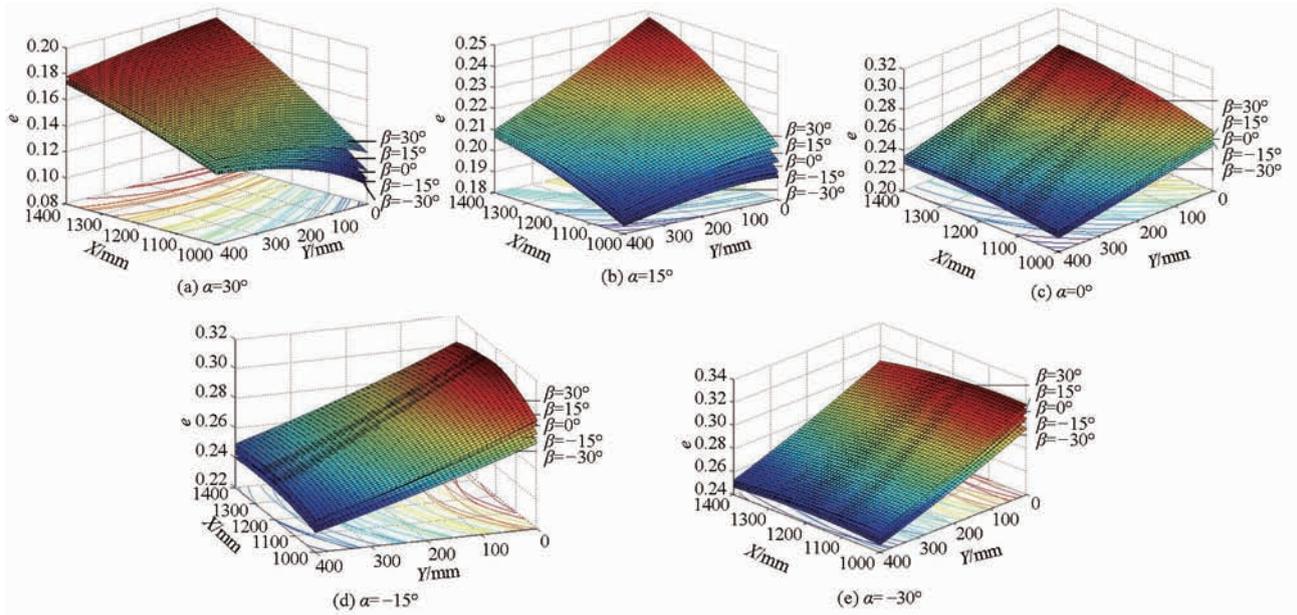


图 10 优化后单一姿态下的全局灵巧度

Fig. 10 Global dexterity at single position and attitude after optimization

图 11 优化后不同 β 角下的全局灵巧度Fig. 11 Global dexterity at different β angles after optimization

动力学性能分析和优化设计提供了一套切实可行的方法 构参数优化设计。
 法,结果可应用于 4-UPS-RPU 冗余并联机构的结

参 考 文 献

- 1 JEONG Haemin, KWON Sang Joo, LEE Sang Moo. Mask-panel alignment robot system using a parallel mechanism with actuation redundancy[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2009, 15(9): 887 - 893.
- 2 李剑锋, 费仁元, 范金红, 等. 驱动器布位及冗余驱动对 Tricept 并联机构性能的影响[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 31 - 39.
 LI Jianfeng, FEI Renyuan, FAN Jinhong, et al. Effects of actuator disposition and redundant actuation on performance of the tricept parallel mechanism[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 31 - 39. (in Chinese)
- 3 HE Jingfeng, JIANG Hongzhou, TONG Zhizhong, et al. Study on dynamic isotropy of a class of symmetric spatial parallel mechanisms with actuation redundancy[J]. Journal of Vibration and Control, 2012, 18(8): 1156 - 1164.
- 4 CHEN Xiulong, SUN Xianyang. Dexterity analysis of a 4-UPS-RPS parallel mechanism[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 9: 1 - 8.
- 5 覃艳明, 郑魁敬, 赵永生, 等. 5-UPS/PRPU 五自由度并联机床的性能分析[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(1): 100 - 107.
 QIN Yanming, ZHENG Kuijing, ZHAO Yongsheng, et al. Performance analysis of 5-UPS/PRPU 5-DOF parallel machine tool(PMT)[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(1): 100 - 107. (in Chinese)
- 6 CHEN Xiulong, FENG Weiming, SUN Xianyang, et al. Kinematics analysis of a parallel coordinate measuring machine[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10: 1 - 6.
- 7 李铁民, 郑浩峻, 汪劲松, 等. 并联机床不同形态下的运动精度评价指标[J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 101 - 105.
 LI Tiemin, ZHENG Haojun, WANG Jinsong, et al. Postprocessing algorithms and system for parallel kinematic machine tools[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(9): 101 - 105. (in Chinese)
- 8 黄田, 汪劲松. Stewart 并联机器人局部灵活度与各向同性条件解析[J]. 机械工程学报, 1999, 35(5): 41 - 46.
 HUANG Tian, WANG Jinsong. Closed form solution to the local dexterity and isotropy of Stewart parallel manipulators[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(5): 41 - 46. (in Chinese)
- 9 PITTENS K H, PODHORODESKI R P. A family of Stewart platforms with optimal dexterity[J]. Journal of Robotic Systems, 1993, 10(4): 463 - 479.
- 10 陈修龙, 赵永生, 鹿玲. 并联机床的灵巧度评价指标及其应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 237 - 242.
 CHEN Xiulong, ZHAO Yongsheng, LU Ling. Dexterity measures of parallel machine tool and its application [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 237 - 242. (in Chinese)
- 11 金振林, 高峰. 一种正交并联机器人的灵巧度指标及其分布[J]. 机械设计, 2001, 18(7): 19 - 22.
 JIN Zhenlin, GAO Feng. Automaticity index and its distribution of a kind of parallel orthogonal robot [J]. Machine Design, 2001, 18(7): 19 - 22. (in Chinese)
- 12 赵克定, 杨灏泉, 吴盛林. Stewart 平台局部灵活度的解析研究[J]. 宇航学报, 2002, 23(4): 42 - 46.

- ZHAO Keding, YANG Haoquan, WU Shenglin. Analytic study of local dexterity for Stewart platform[J]. Journal of Astronautics, 2002,23(4):42-46. (in Chinese)
- 13 陈修龙,高庆,赵永生. 4-UPS-UPU 并联坐标测量机的灵巧度研究[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(6):1200-1208. CHEN Xiulong, GAO Qing, ZHAO Yongsheng. Dexterity measures of 4-UPS-UPU parallel coordinate machine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012,18(6):1200-1208. (in Chinese)
- 14 张艳伟,崔国华,孙振军,等. 空间转动 3-SPS-1-S 型并联机构奇异位形研究[J]. 农业机械学报,2010,41(4):199-203. ZHANG Yanwei, CUI Guohua, SUN Zhenjun, et al. Singular loci analysis of 3-SPS-1-S spatial rotation parallel manipulator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(4):199-203. (in Chinese)
- 15 郭宗和,崔振民,段建国,等. 4-TPT 与其变拓扑结构并联机构的特性[J]. 农业机械学报,2009,40(6):217-221. GUO Zonghe, CUI Zhenmin, DUAN Jianguo, et al. Characteristics of a kind of variable topology structure parallel mechanisms [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(6):217-221. (in Chinese)
- 16 白志富,韩先国,陈五一. 冗余驱动消除并联机构奇异研究[J]. 航空学报,2006,27(4):733-736. BAI Zhifu, HAN Xianguo, CHEN Wuyi. Study on elimination singularities of parallel mechanism by actuation redundancy[J]. Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2006,27(4):733-736. (in Chinese)
- 17 陈修龙,孙先洋,邓昱. 4-UPS-RPS 空间 5 自由度并联机构运动学分析[J]. 农业机械学报,2013,44(8):257-261. CHEN Xiulong, SUN Xianyang, DENG Yu. Kinematics analysis of a novel 5-DOF parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(8):257-261. (in Chinese)
- 18 孙立宁,丁庆勇,刘新宇. 2 自由度高速高精度并联机器人的运动学优化设计[J]. 机械工程学报,2005,41(7):94-98. SUN Lining, DING Qingyong, LIU Xinyu. Optimal kinematic design of 2-dof planar parallel robot with high speed and high precision [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(7):94-98. (in Chinese)
- 19 齐明,刘海涛,梅江平,等. 3-PUS/PU 3 自由度并联机构运动学优化设计[J]. 天津大学学报,2007,40(6):649-654. QI Ming, LIU Haitao, MEI Jiangping. Kinematics optimum design of a 3-dof parallel mechanism with 3-PUS/PU architecture [J]. Journal of Tianjin University,2007,40(6):649-654. (in Chinese)
- 20 陈修龙,孙德才,王清. 基于拉格朗日的冗余驱动并联机构刚体动力学建模[J]. 农业机械学报,2015,46(12):329-336. CHEN Xiulong, SUN Decai, WANG Qing. Rigid dynamics modeling of redundant actuation parallel mechanism based on Lagrange method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(12):329-336. (in Chinese)
- 21 陈修龙,陈林林,梁小夏. 4 自由度冗余驱动并联机构运动学和工作空间分析[J]. 农业机械学报,2014,45(8):307-313. CHEN Xiulong, CHEN Linlin, LIANG Xiaoxia. Kinematics and workspace analysis of a novel 4-DOF redundant actuation parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(8):307-313. (in Chinese)