doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.046

5 自由度空间并联机构运动学优化设计*

陈修龙　孙先洋　邓　昱
(山东科技大学机械电子工程学院, 青岛 266590)

摘要: 定义了一种能综合评价不同位形下并联机构灵巧度的指标——平方平均灵巧度系数,分别考察了 4 - UPS - RPS 空间并联机构的定平台和动平台上铰链点的分布角、定平台铰链点分布圆的半径以及动平台铰链点分布圆的半径对平方平均灵巧度系数的影响规律,并据此对这些参数进行优化设计,得到该并联机构定平台铰链点的均布角为 π/2,动平台铰链点的均布角为 2π/5,定平台上第 1 个铰链点到定坐标系原点的距离为 650 mm,定平台上其余 4 个铰链点分布圆的半径为 800 mm,动平台上铰链点分布圆的半径为 160 mm。仿真结果表明,经过优化设计,4 - UPS - RPS空间并联机构的平方平均灵巧度系数指标比优化前明显增大,运动学性能得到了较大改善。

关键词: 并联机构　空间　运动学　优化设计
中图分类号: TP24　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2014)06-0303-05

引言

5 自由度空间并联机构是一类重要的少自由度并联机构,它与 3、4 自由度并联机构相比具有更加灵活的自由度,与 6 自由度并联机构相比具有更低的成本,在机械制造、航空和航天等领域具有广阔的应用前景[1-6]。

空间并联机构的运动学性能是限制其工程应用的重要指标[7-9],而对空间并联机构进行运动学优化设计是取得较好运动学性能的重要手段。目前虽然国内外学者在并联机构运动学优化设计方面取得了一些理论成果[10-19],但大都只针对一个或一种运动学性能评价指标对空间并联机构进行优化设计,这导致相关的研究结果具有一定的局限性和片面性。因此,迫切需要开展基于运动学综合性能评价指标的优化设计以提高并联机构的整体运动学性能,推动机构在工程领域的实际应用。

本文介绍一种能实现三维转动和二维移动的 5 自由度 4 - UPS - RPS 空间并联机构,分别考察 4 - UPS - RPS 空间并联机构的动平台和定平台上铰链点的分布角、定平台铰链点分布圆的半径、动平台铰链点分布圆的半径等对并联机构灵巧度的综合评价指标——平方平均灵巧度系数的影响规律,据此确定并联机构的最佳结构参数,以期实现 4 - UPS - RPS 空间并联机构的运动学优化设计。

1　4 - UPS - RPS 空间并联机构的结构描述

4 - UPS - RPS 空间并联机构由定平台、动平台和5 个驱分支组成(见图 1 和图 2),定平台通过 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 1 个驱动分支 RPS(转动副-移动副-球铰)与动平台相连接,在 5 个驱动分支的共同作用下,该机构动平台可在一定范围内实现三维转动二维移动 5 自由度运动。

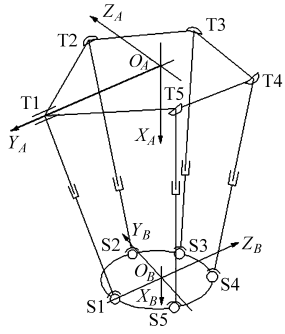

图 1　4 - UPS - RPS 并联机构机构图

Fig. 1　Mechanism diagram of 4 - UPS - RPS

2　灵巧度综合评定指标——平方平均灵巧度系数

目前单独采用任一个指标评定并联机构位形的灵巧度都有局限性,为了解决这一问题,本文提出一个综合的灵巧度评定指标——平方平均灵巧度系

收稿日期: 2013 - 07 - 03　修回日期: 2013 - 09 - 08
* 国家自然科学基金资助项目(51005138)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2012ZZ008)、山东科技大学杰出青年基金资助项目(2011KYJQ102)和江苏省数字化制造技术重点建设实验室开放课题资助项目(HGDML - 1104)
作者简介: 陈修龙,副教授,博士后,主要从事并联机器及其动力学研究,E-mail: cxldy99@163.com

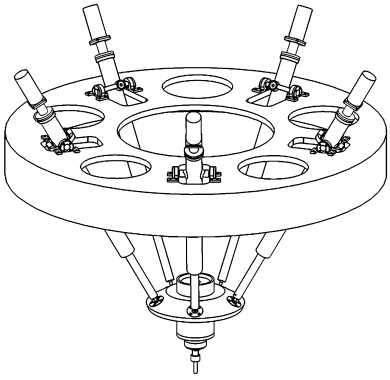

图 2 4 – UPS – RPS 并联机构实体模型图

Fig. 2 Solid model of 4 – UPS – RPS

数[20],即

$$p=\sqrt{\frac{\left(\frac{1}{k}\right)^2+\sigma_{\min}^2+\omega^2}{3}} \tag{1}$$

式中 k——并联机构的平均条件数

$\sigma_{\min}$——最小奇异值

ω——可操作性系数

在评定并联机构的位姿灵巧度时,平方平均灵巧度系数 p 是一个全面的指标,它很好地将平均条件数、最小奇异值和可操作性 3 个评定指标融合到一起,克服了单一指标评定灵巧度时的局限性,可更加全面地对灵巧度进行评定,p 值越大,并联机构的灵巧度越好。

3 空间并联机构的运动学优化设计

基于平方平均灵巧度系数指标对 4 – UPS – RPS 空间并联机构进行运动学优化设计,以确定 4 – UPS – RPS 空间并联机构的最佳结构参数。

3.1 动、定平台铰链点分布角的优化

4 – UPS – RPS 空间并联机构定、动平台上的铰链点分布位置角对平方平均灵巧度系数的影响规律,见图 3。由图 3 可知,当定平台铰链点均布角 Q_1 取值在(1.3 ~ 1.6)rad 时,动平台铰链点均布角 Q_2 取值在(1.0 ~ 1.7)rad 时,平方平均灵巧度系数 p 较大。综合考虑后取定平台铰链点均布角为 $Q_1=\pi/2$,取动平台铰链点均布角 $Q_2=2\pi/5$。

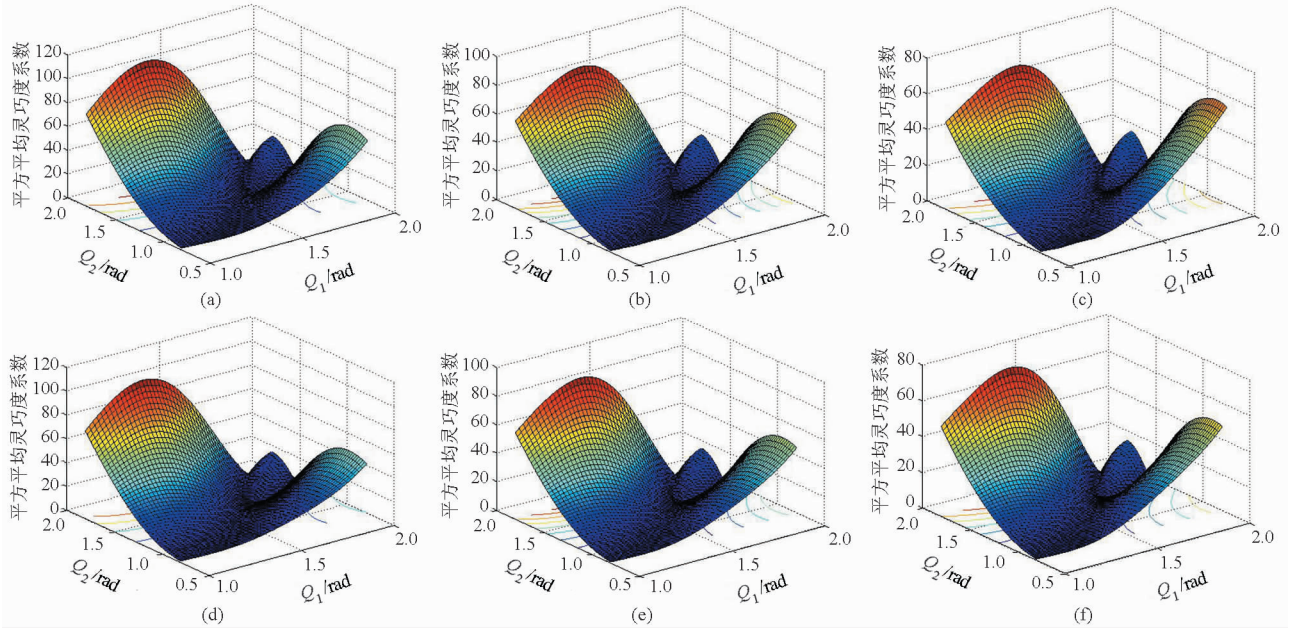

图 3 动、定平台上的铰链点分布角对平方平均灵巧度系数的影响规律

Fig. 3 Influence law of distribution position angle of joints on stationary platform and moving platform on square mean dexterity coefficient

(a) $\alpha=0°,\beta=15°,\gamma=105°$ (b) $\alpha=15°,\beta=15°,\gamma=105°$ (c) $\alpha=25°,\beta=15°,\gamma=105°$

(d) $\alpha=0°,\beta=25°,\gamma=115°$ (e) $\alpha=15°,\beta=25°,\gamma=115°$ (f) $\alpha=25°,\beta=25°,\gamma=115°$

3.2 定平台铰链点分布圆半径优化

4 – UPS – RPS 空间并联机构定平台上的铰链点所在圆半径对平方平均灵巧度系数的影响如图 4 所示。由图 4 可知,平方平均灵巧度系数随着定平台铰链点 T_1 到定平台坐标系值 R_1 的减小而增大,随着铰链点所在分布圆半径 R_2 增大而增大。综合考虑机构结构 R_1 和 R_2 对平方平均灵巧度系数的影响,取 $R_1=650$ mm,$R_2=800$ mm。

3.3 动平台铰链点分布圆半径优化

4 – UPS – RPS 空间并联机构动平台上的铰链点所在圆半径 r 和两平台距离 H 对平方平均灵巧度系数 p 的影响规律,如图 5 所示。由图 5 可知,平方

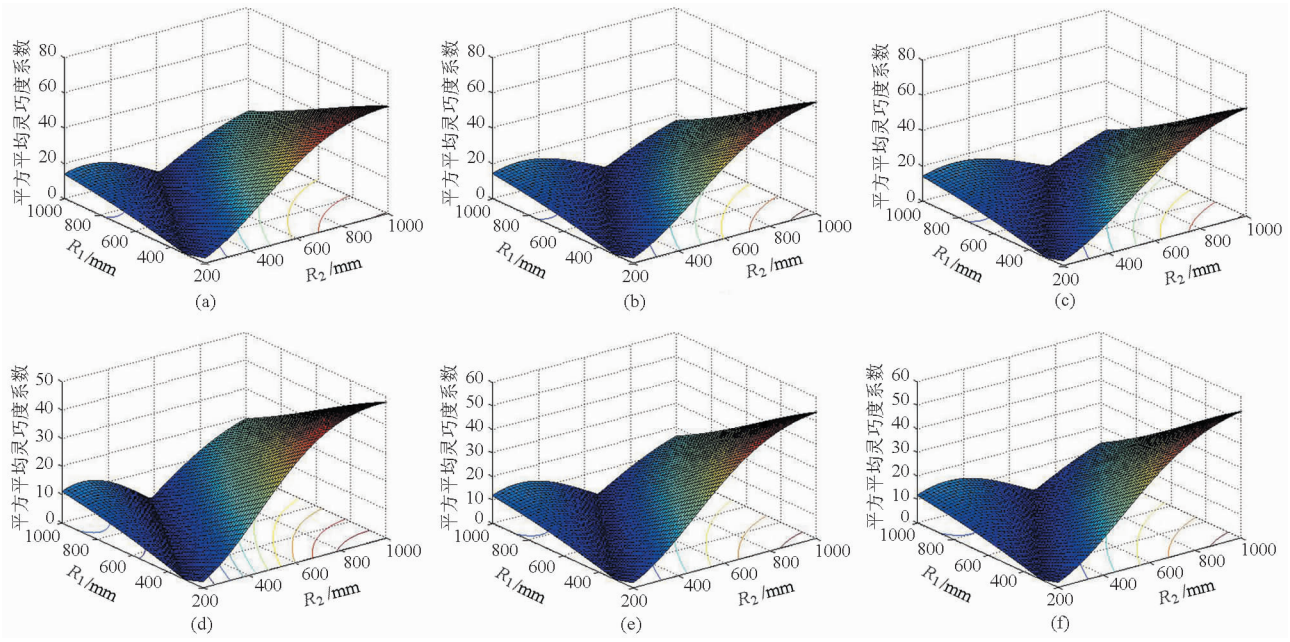

图 4　定平台上的铰链点所在圆半径对平方平均灵巧度系数的影响规律

Fig. 4　Influence law of distribution position radius of joints on stationary platform on square mean dexterity coefficient

(a) $\alpha=0°,\beta=15°,\gamma=105°$　(b) $\alpha=15°,\beta=15°,\gamma=105°$　(c) $\alpha=25°,\beta=15°,\gamma=105°$

(d) $\alpha=0°,\beta=25°,\gamma=115°$　(e) $\alpha=15°,\beta=25°,\gamma=115°$　(f) $\alpha=25°,\beta=25°,\gamma=115°$

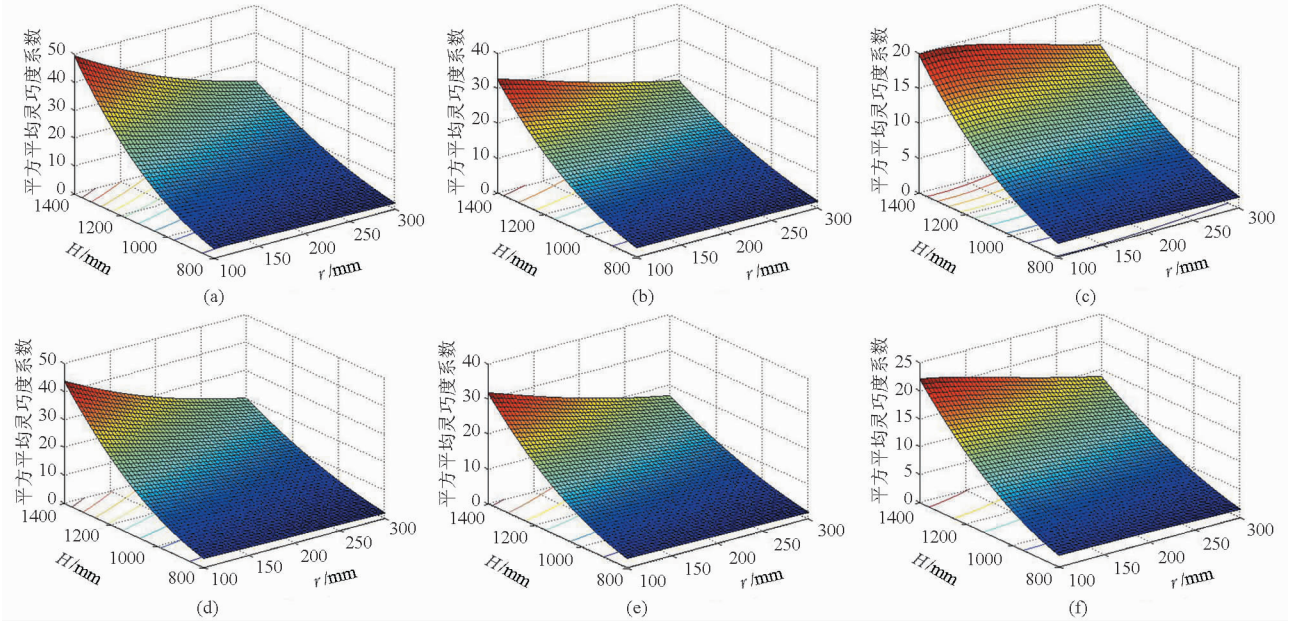

图 5　动平台上的铰链点所在圆半径对平方平均灵巧度系数的影响规律

Fig. 5　Influence law of distribution position radius of joints on moving platform on square mean dexterity coefficient

(a) $\alpha=0°,\beta=15°,\gamma=105°$　(b) $\alpha=15°,\beta=15°,\gamma=105°$　(c) $\alpha=25°,\beta=15°,\gamma=105°$

(d) $\alpha=0°,\beta=25°,\gamma=115°$　(e) $\alpha=15°,\beta=25°,\gamma=115°$　(f) $\alpha=25°,\beta=25°,\gamma=115°$

平均灵巧度系数 p 随着动平台铰链点所在圆半径 r 的减小而增大，当 $r<200$ mm 时，平方平均灵巧度系数 p 较大。p 随着两平台距离 H 增大而增大，综合考虑机构结构和工作空间等因素影响，取 $r=160$ mm。

3.4　优化前后的并联机构的运动学性能比较

优化前定义 4 − UPS − RPS 空间并联机构的结构参数为：定平台上的 5 个铰链点中，第 1 个铰链点 T_1 到定坐标系原点的距离为 717 mm，其余 4 个铰链点 U_i($i=2,3,4,5$)为均匀布置，间隔角度为 $\pi/2$，半径为 645 mm；动平台上 5 个铰链点 S_i($i=1,2,\cdots,5$)为均匀布置，半径为 202 mm，间隔角度为 $2\pi/5$。按照优化前定义的 4 − UPS − RPS 空间并联机构的结构参数对其进行运动学性能分析，得到机构在不同姿态、不同截面下的平方平均灵巧度系数，如图 6

所示。按照优化后 4 – UPS – RPS 空间并联机构的结构参数对其进行运动学性能分析,得到机构在不同姿态、不同截面下的平方平均灵巧度系数,如图 7 所示。由图 6 和图 7 对比可知,相同姿态和截面下优化后平方平均灵巧度系数大于优化前,因此优化后 4 – UPS – RPS 空间并联机构运动性能有明显改善。

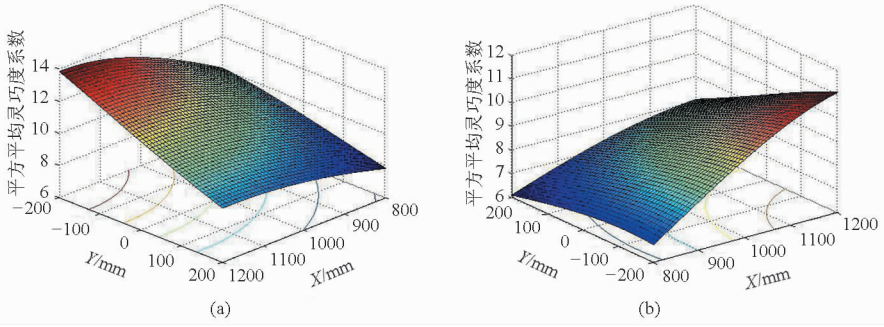

图 6 优化前平方平均灵巧度系数

Fig. 6 Square mean dexterity coefficient before optimization design

(a) $\alpha=15°,\beta=25°,\gamma=115°,Z=-77$ mm (b) $\alpha=25°,\beta=25°,\gamma=115°,Z=-77$ mm

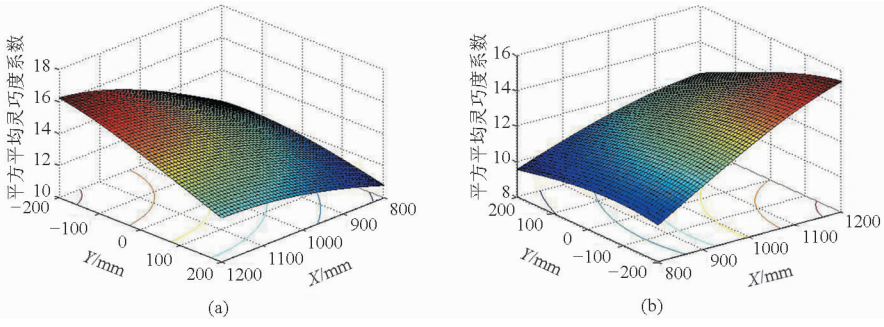

图 7 优化后平方平均灵巧度系数

Fig. 7 Square mean dexterity coefficient after optimization design

(a) $\alpha=15°,\beta=25°,\gamma=115°,Z=-77$ mm (b) $\alpha=25°,\beta=25°,\gamma=115°,Z=-77$ mm

4 结论

(1) 定义了一个综合的运动学性能评价指标——平方平均灵巧度系数,实现了对并联机构运动学性能的全面评价。该评价指标的通用性强,适用于对其他类型并联机构的运动学性能的优化。

(2) 分别考察了 4 – UPS – RPS 空间并联机构的动、定平台上铰链点分布角及其所在圆半径对平方平均灵巧度系数指标的影响规律,实现了空间并联机构的运动学优化设计,得到 4 – UPS – RPS 空间并联机构结构参数的最优值。

(3) 通过对优化后 4 – UPS – RPS 空间并联机构运动学性能分析可知,优化后并联机构的平方平均灵巧度系数有较大提高,运动性能得到了明显改善。

参 考 文 献

1 陈修龙, 贾帅帅,邓昱. 高速空间并联式坐标测量机动力学优化设计[J]. 农业机械学报,2012,43(3):213 – 218.
Chen Xiulong, Jia Shuaishuai, Deng Yu. Dynamics optimization design of high-speed spatial parallel coordinate measuring machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(3):213 – 218. (in Chinese)

2 赵永生,郑魁敬,李秦川,等. 5-UPS/PRPU 五自由度并联机床运动学分析[J]. 机械工程学报,2004,40(2):12 – 16.
Zhao Yongsheng, Zheng Kuijing, Li Qinchuan, et al. Kinematic analysis of 5-UPS/PRPU 5-DOF parallel machine tool [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004,40(2):12 – 16. (in Chinese)

3 Kong Xianwen, Gosselin Clément M. Type synthesis of 5-DOF parallel manipulators based on screw theory [J]. Journal of Robotic Systems,2005,22(10):535 – 547.

4 唐卫星,马履中,石奇端,等. 3T-2R 五自由度并联机构的型综合[J]. 中国机械工程,2007,18(20):2460 – 2463.

5 李秦川,陈巧红,胡旭东,等. 对称五自由度 3R2T 并联机构的雅可比分析[J]. 中国机械工程,2008,19(14):1731 – 1735.

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. 并联机床不同位形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. Precision measures for various configurations of parallel kinematic machine tools [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2002,38(9):101 – 105. (in Chinese)

8 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 measuring machine [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(6): 1200 - 1208. (in Chinese)
9 Gosselin C, Angeles J. A global performance index for the kinematic optimization of robotic manipulators[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 1991, 113(3): 220 - 226.
10 Nalluri Mohan Rao, Mallikarjuna Rao K. Dimensional synthesis of a spatial 3-RPS parallel manipulator for a prescribed range of motion of spherical joints[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(2): 477 - 486.
11 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.
12 李坤全，方跃法. 改进遗传算法在 6-RSS 并联机器人机构设计中的应用[J]. 北京交通大学学报，2008，32(4)：19－23.
Li Kunquan, Fang Yuefa. Application of intelligent optimization in structure design for the 6-RSS parallel mechanism[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2008, 32(4): 19 - 23. (in Chinese)
13 Liu H T, Huang T, Zhao X M, et al. Optimal design of the TriVariant robot to achieve a nearly axial symmetry of kinematic performance[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(12): 1643 - 1652.
14 Xie Fugui, Liu Xinjun, Wang Liping, et al. Optimum kinematic design of the 4R 2-DOF parallel mechanism[J]. Tsinghua Science and Technology, 2009, 14(5): 663 - 668.
15 刘松国，朱世强，王宣银，等. 一般 6R 机器人的高精度逆运动学优化算法[J]. 农业机械学报，2007，38(11)：118－122.
Liu Songguo, Zhu Shiqiang, Wang Xuanyin, et al. Optimized inverse kinematics algorithm with high accuracy for general 6R robots [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(11): 118 - 122. (in Chinese)
16 谢志江，史浩明. 6-HUS 并联机构位置逆解与运动学优化设计[J]. 机械设计，2011，28(12)：26－30.
Xie Zhijiang, Shi Haoming. Inverse positions solution and kinematics optimal design based on a 6-HUS parallel mechanism [J]. Journal of Machine Design, 2011, 28(12): 26 - 30. (in Chinese)
17 赵云峰，程丽，赵永生. 3- UPS/S 并联机构运动学分析及机构优化设计[J]. 机械设计，2009，26(1)：46－49.
Zhao Yunfeng, Cheng Li, Zhao Yongsheng. Kinematic analysis of 3-UPS /S parallel mechanism and its optimization design [J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(1): 46 - 49. (in Chinese)
18 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, et al. 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)
19 崔国华，周海栋，王南，等. 基于 Isight 的 3-UPS-S 并联机器人机构多目标优化[J]. 农业机械学报，2013，44(9)：261－266.
Cui Guohua, Zhou Haidong, Wang Nan, et al. Multi-objective optimization of 3-UPS-S parallel mechanism based on Isight[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 261 - 266. (in Chinese)
20 Chen Xiulong, Sun Xianyang. Dexterity analysis of 4 - UPS - RPS parallel mechanism[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2012, 44(9): 1 - 8.

Kinematics Optimum Design of a 5-DOF Spatial Parallel Mechanism

Chen Xiulong　Sun Xianyang　Deng Yu

(*College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong University of Science and Technology*, *Qingdao* 266590, *China*)

Abstract: The square mean dexterity coefficient, which is used to comprehensively evaluate the dexterity of various configurations, is introduced. The influence law of the structural parameters, including the distribution position angle of the joints on the stationary platform and moving platform, the distribution position radius of the joints on the stationary platform, and the distribution position radius of the joints on the moving platform, on the square mean dexterity coefficient are discussed. On these grounds, the structural parameters are optimized. The optimal results obtained are as following, the distribution position angle of the joints on the stationary platform is $\pi/2$, the distribution position angle of the joints on the moving platform is $2\pi/5$, the distance between the first joint on the stationary platform and the center of the stationary platform is 650 mm, the distribution position radius of the joints on the stationary platform is 800 mm, and the distribution position radius of the joints on the moving platform is 160 mm. The simulation results show that the square mean dexterity coefficient of 4 - UPS - RPS parallel mechanism are creased, so that the obvious improvement of the kinematics characteristics for the parallel mechanism is realized.

Key words: Parallel mechanism　Spatial　Kinematics　Optimum design