

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.038

高速空间并联式坐标测量机动力学优化设计*

陈修龙 贾帅帅 邓昱

(山东科技大学机械电子工程学院, 青岛 266510)

【摘要】 为了改善高速空间并联式坐标测量机的动力学性能,将虚拟样机技术应用于该测量机的弹性动力学优化设计中。协同利用 CAD、CAE 和可视化虚拟样机技术,建立高速空间并联式坐标测量机的刚柔耦合虚拟样机,分别考察动平台质量与驱动杆轴径的变化对测量机运动输出误差及驱动杆最大动应力等动力学行为的影响规律,并据此对这些参数进行优化设计,得到测量机动平台质量为 80.85 kg,驱动杆轴径为 44 mm。仿真结果表明,经过优化设计,测量机驱动杆最大动应力降为 17.5 MPa,运动输出误差也明显小于优化设计前,测量机的动力学特性得到明显改善。

关键词: 并联式坐标测量机 虚拟样机 刚柔耦合 动力学特性

中图分类号: TH133 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0213-06

Dynamics Optimization Design of High-speed Spatial Parallel Coordinate Measuring Machine

Chen Xiulong Jia Shuaishuai Deng Yu

(College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract

In order to improve dynamic characteristics of high-speed spatial PCMM (parallel coordinate measuring machine), the virtual prototype technology was applied to the elastodynamics optimization design of PCMM. Integrating CAD, CAE and visual technologies, the rigid-flexible virtual prototyping of PCMM was built. The influence law of the mass of moving platform and the diameter of driving limbs on the dynamic behaviors, including kinematics output response and maximum dynamic stress of driving limbs were discussed. On these grounds, the mass of moving platform and the diameter of driving limbs were optimized. The optimal results, which include the mass of moving platform of 80.85 kg and the diameter of driving limbs of 44 mm, were obtained. The simulation results showed the maximum dynamic stress of driving limbs were decreased to 17.5 MPa, the kinematics output response were also reduced, so that the obvious improvement of the dynamics characteristics for PCMM was realized, and the powerful theoretical basis and method were provided.

Key words Parallel coordinate measuring machine, Virtual prototype, Rigid-flexible coupling, Dynamic characteristics

引言

高速空间并联式坐标测量机的主体结构是空间并联机构,测量头及关节配套装置均安装在动平台

上,动平台通过两个或两个以上并联的运动支链与定平台连接。它具有高速度、高加速度、高精度、承载能力强、误差小等优点。

高速空间并联式坐标测量机中各零部件刚度相

收稿日期: 2011-03-28 修回日期: 2011-04-14

* 国家自然科学基金资助项目(51005138)和山东省高等学校科技计划项目(J09LD54)

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: exldy99@163.com

差较大,其中运动支链中轻质杆件的刚度要远远低于动平台和定平台的刚度。所以,高速空间并联式坐标测量机在高速和高加速度工况下,由于受到大幅、高频惯性力及外载荷的作用,各轻质杆件将产生一定程度的弹性变形,从而引起测量机的支链以及整体的弹性振动,这是导致测量机动力学性能下降的主要因素之一^[1-2]。因此,要获得最优的动力学性能,应进行基于弹性动力学性能指标的优化设计^[3]。目前虽然国际上在并联机器人的动力学优化设计方面取得了一些理论成果^[4-9],但国内外学者针对并联机器人弹性动力学优化设计的研究还不成熟,而且涉及空间并联机器人的极少,并联机器人弹性动力学精细模型建立和求解过程非常复杂^[10],这导致很难对并联机器人动力行为特性及其影响因素给予科学的描述和精确的预测结果,而这些正是利用动力学优化设计取得理想动力学性能应具备的前提条件,这些阻碍了并联机器人弹性动力学优化设计在工程中的应用。因此,不建立和求解数学模型即可实现并联机器人弹性动力学优化设计以提高测量机动力学性能,并推动其在工程实际中的应用已成为高速空间并联坐标测量机研究的一个重要方向。

本文以4-UPS-UPU高速空间并联式五坐标测量机为例,协同利用SolidWorks、ANSYS和ADAMS平台,建立该测量机的刚柔耦合虚拟样机,考察动平台质量与驱动杆轴径的变化对测量机运动输出误差及驱动杆动应力等动力学行为的影响规律,并据此完成对测量机动平台质量和驱动杆轴径参数的优化设计,改善测量机的动力学特性。

1 测量机构与刚柔耦合虚拟样机

4-UPS-UPU并联坐标测量机机构是三移动、两转动五轴并联机构,由动平台、定平台以及连接动平台和定平台的5个分支等组成。其特征是: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UPU(虎克铰-移动副-虎克铰)与动平台相连接。通过改变5个驱动杆的杆长,动平台可在一定范围内实现不同的位置和姿态,使安装在动平台上的测量头完成三坐标至五坐标的测量。测量机机构的结构见图1。

本文视5个驱动杆为弹性体,其余构件为刚性体,建立4-UPS-UPU并联坐标测量机刚柔耦合虚拟样机。具体过程为:利用SolidWorks建立测量机的三维实体模型;以Parasolid格式把刚体构件导入ADAMS中;将5根驱动杆三维实体模型以Parasolid格式导入ANSYS中,在前处理中,定义单元类型

SOLID85,设置5根驱动杆的材料均为钢,定义驱动杆的密度为 7801 kg/m^3 ,弹性模量为 211 GPa ,泊松比为 0.29 ;对驱动杆进行网格划分,完成对5根驱动杆的柔性化处理;最后将5根驱动杆的弹性体模型导入到ADAMS中;添加刚性体构件与弹性体构件之间的运动副约束关系,得到4-UPS-UPU并联坐标测量机的刚柔耦合虚拟样机,见图2。

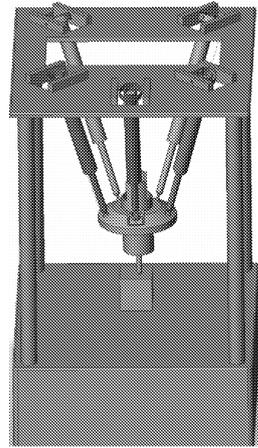


图1 测量机机构
的结构图

Fig.1 Structural
diagram of PCMM

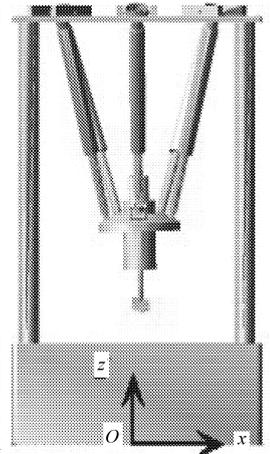


图2 测量机刚柔
耦合虚拟样机

Fig.2 Rigid-flexible
model of PCMM

2 动力学优化设计

高速空间并联式坐标测量机的动平台质量和驱动杆轴径(驱动杆截面积)是影响其动力学特性的重要因素,在设计时优化动平台质量和驱动杆轴径可明显改善测量机的动力学特性。优化设计前测量机动平台的质量为 105 kg ,各驱动杆的轴径都为 50 mm 。定义测量机测头的运动规律为

$$\begin{cases} x = 0.0226 + 0.05 \cos\left(\frac{3\pi}{2}t + \frac{\pi}{2}\right) \\ y = 0.9738 + 0.05 \cos\left(\frac{3\pi}{2}t + \frac{\pi}{2}\right) \\ z = 0.7193 + 15t \end{cases} \quad (0 \leq t \leq 4) \quad (1)$$

式中 x, y, z ——测量机测头 X, Y, Z 轴上的坐标值

2.1 动平台质量对驱动杆最大动应力和测量头运动误差的影响

动平台质量对驱动杆最大动应力和测量头运动误差影响分析的实施过程为:首先把测量机动平台的质量在一定范围内离散为若干不同值(离散质量值越多,分析精度越高),然后对含有不同动平台质量的测量机进行虚拟样机建模,在ADAMS平台下仿真以求得驱动杆的最大动应力和测量头的运动误

差值;最后用 Matlab 拟合以上得到的数据,这样就得到驱动杆最大动应力和测量头运动误差随动平台质量变化的曲线。测量机其他结构参数不变时,测量机动平台质量对其驱动杆最大动应力(5 个驱动杆的动应力中的最大值)的影响规律如图 3 所示。测量机其他结构参数不变时,测量机的动平台质量对其位移输出误差的影响规律如图 4 所示。测量机动平台质量对其速度输出误差的影响规律见图 5;测量机动平台质量对其加速度输出误差的影响规律见图 6。

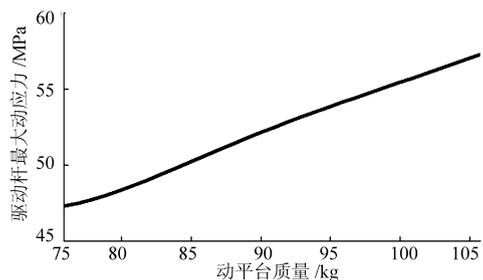


图 3 驱动杆最大动应力随动平台质量变化曲线

Fig. 3 Maximum stress of driving limbs with different mass of moving platform

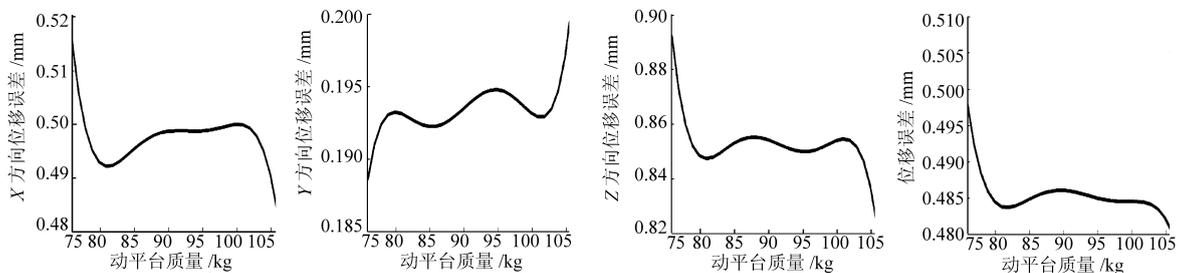


图 4 位移误差随动平台质量变化曲线

Fig. 4 Displacement error output of probe with different mass of moving platform

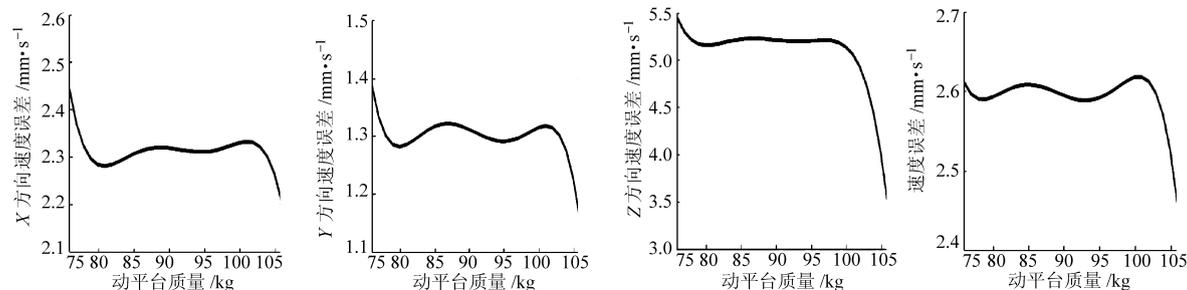


图 5 速度误差随动平台质量变化曲线

Fig. 5 Velocity error output of probe with different mass of moving platform

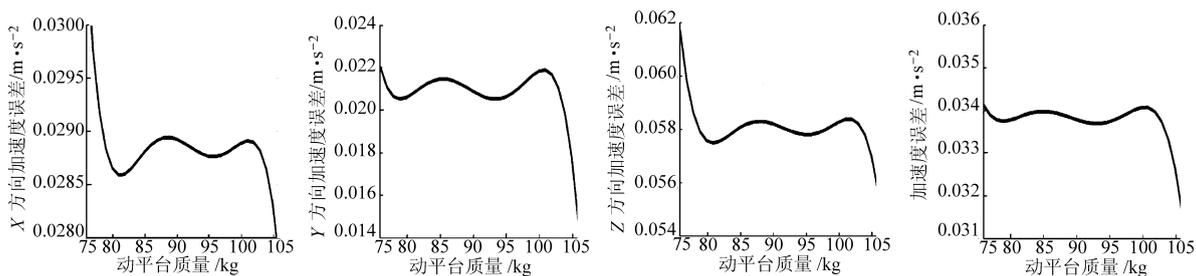


图 6 加速度误差随动平台质量变化曲线

Fig. 6 Acceleration error output of probe with different mass of moving platform

2.2 驱动杆轴径对驱动杆最大动应力和测量头运动误差的影响

测量机其他结构参数不变时,测量机驱动杆轴径对其驱动杆最大动应力的影响规律(测量机 5 个驱动杆的轴径按相同规律一起变化)如图 7 所示。测量机其他结构参数不变时,测量机驱动杆轴径对其位移输出误差的影响规律见图 8;测量机驱动杆轴径对其速度输出误差的影响规律见图 9;测量机

驱动杆轴径对其加速度输出误差的影响规律见图 10。

2.3 动力学优化设计

由图 3 可知,测量机驱动杆的最大动应力随动平台质量的增加而增加。由图 4 可知,测量机的动平台质量对其 X、Y、Z 方向的位移输出误差影响有波动,当动平台质量为 102 kg 以后,X、Z 方向的位移输出误差随动平台质量的增加而减小,但 Y 方向

的位移输出误差随动平台质量增加而增大,测量机的动平台质量对其合位移输出误差影响有波动,但较平滑,在动平台质量为 80.85 kg 时,合位移误差出现较小值,在动平台质量为 88 kg 以后,合位移输出误差随着动平台质量的增加出现减小的趋势。由图 5 和图 6 可知,测量机测头的速度输出误差曲线和加速度输出误差曲线都有波动,两者的波动趋势比较趋近,而且都比较平滑,经分析在动平台质量为 80 kg 时,合速度和合加速度误差也都出现较小值。

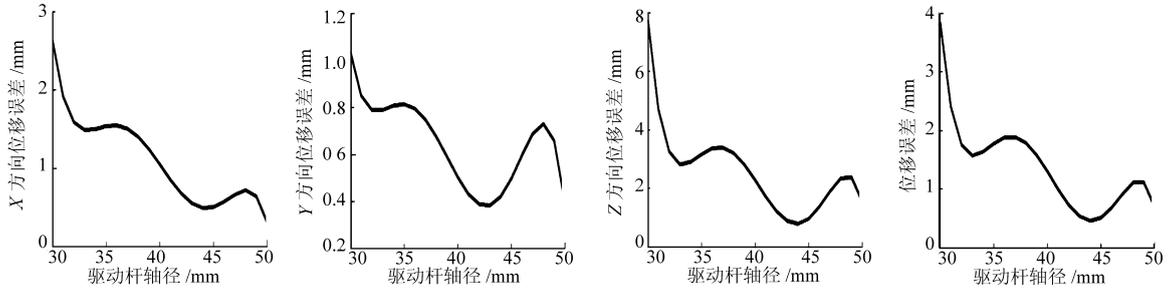


图 8 位移误差随驱动杆轴径变化曲线

Fig. 8 Displacement error output of probe with different diameters of driving limb

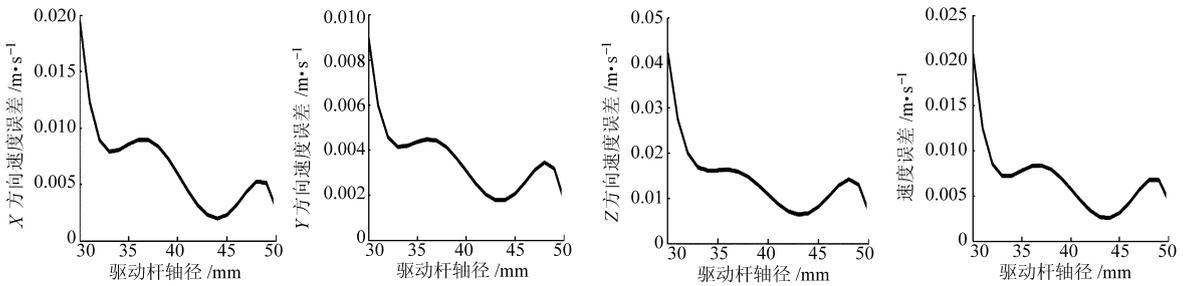


图 9 速度误差随驱动杆轴径变化曲线

Fig. 9 Velocity error output of probe with different diameters of driving limb

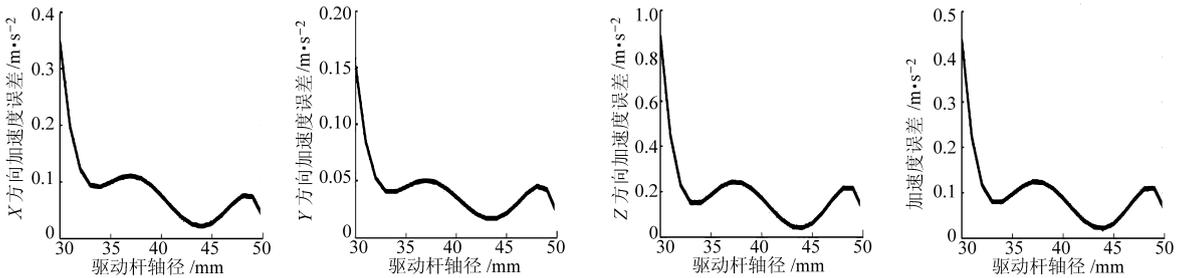


图 10 加速度误差随驱动杆轴径变化曲线

Fig. 10 Acceleration error output of probe with different diameters of driving limb

由图 7 可知,测量机驱动杆的最大动应力随驱动杆轴径的增加而出现波动,在轴径为 34 mm 和 44 mm 时,最大动应力达到较小值。由图 8 可知,测量机驱动杆轴径对其位移输出误差的影响较大,随着驱动杆轴径的增加,合位移误差出现较大波动,在轴径为 44 mm 时,合位移误差最小。由图 9 和图 10 可知,测量机速度和加速度输出误差随其驱动杆轴径增加而出现波动,但比较平滑,且在轴径为 44 mm 时,合速度和合加速度误差也都出现最小值。

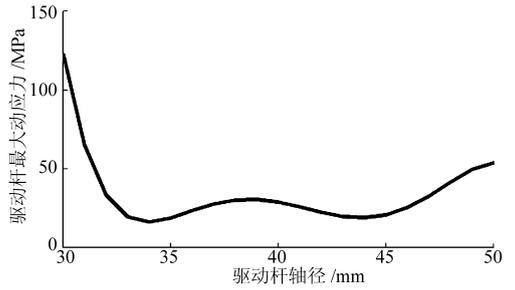


图 7 驱动杆最大动应力随驱动杆轴径变化曲线

Fig. 7 Maximum stress of driving limbs with different diameters of driving limb

经以上分析可知,测量机动平台质量和驱动杆轴径对其动力学性能影响都较大,在综合考虑上述分析结果的基础上,测量机动平台质量取 80.85 kg,驱动杆轴径取 44 mm。

3 优化设计后动力学特性

对优化设计后测量机的动力学特性进行仿真分析。优化设计后测量机各驱动杆的最大动应力见图 11(驱动杆 1 为图 1 所示距读者最近位置的杆

件,沿驱动杆1顺时针依次为驱动杆2、驱动杆3、驱动杆4和驱动杆5);测量机位移输出误差见图12;测量机速度输出误差见图13;测量机加速度输出误差见图14。

由图11可知,优化设计后测量机5个驱动杆的最大动应力降为17.5 MPa,明显小于优化设计前;由图12~14可知,优化设计后测量机的位移输出误差、速度输出误差以及加速度输出误差出现小范围的波动,但是都明显减小。通过对比可以发现,优化设计后动力学特性得到了明显改善。

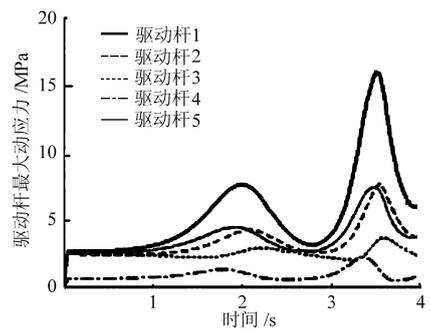


图11 各驱动杆最大动应力曲线

Fig. 11 Maximum stress of driving limbs

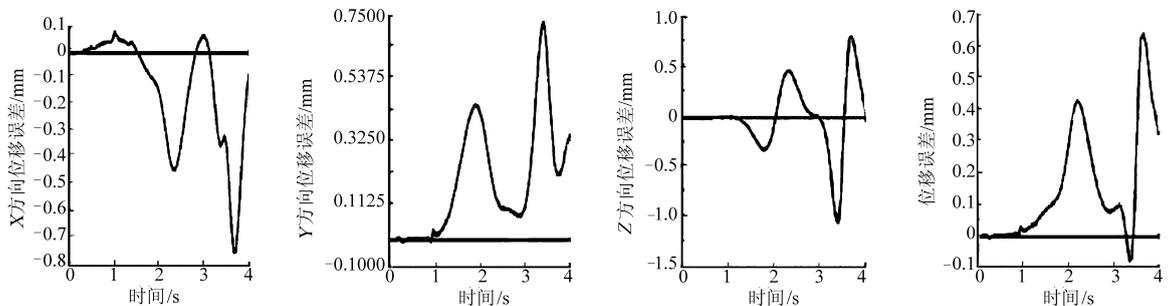


图12 位移误差曲线

Fig. 12 Displacement error output of probe

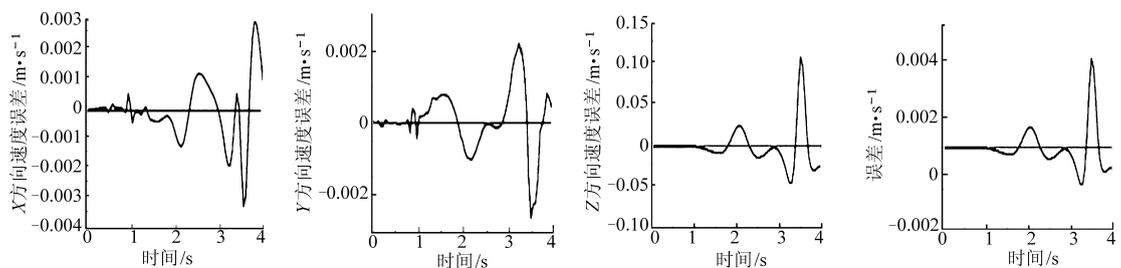


图13 速度误差曲线

Fig. 13 Velocity error output of probe

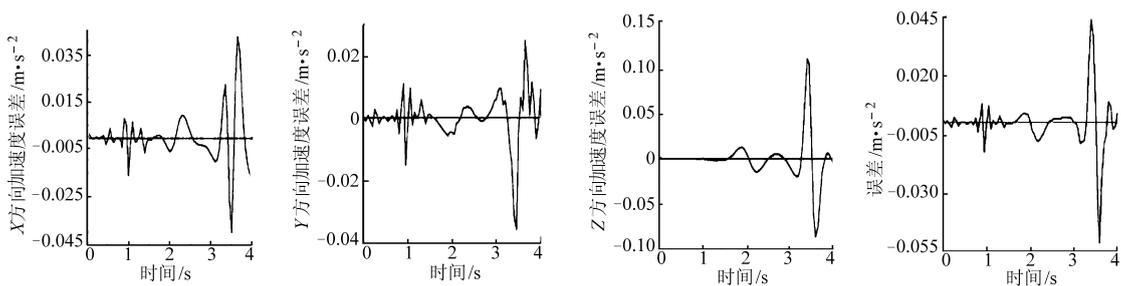


图14 加速度误差曲线

Fig. 14 Acceleration error output of probe

4 结束语

在 SolidWorks 中建立高速空间并联式坐标测量机实体模型,在 ANSYS 中完成测量机驱动杆件的柔性化处理,最后在 ADAMS 中建立测量机的刚柔耦合虚拟样机,分析了测量机动平台质量和驱动杆轴

径对其动力学性能的影响规律,得到了测量机动平台质量和驱动杆轴径的优化设计参数值。仿真结果表明,优化设计后测量机的动力学性能得到较大改善。本文采用的方法避免了建立数学模型和复杂的方程求解过程,降低了工作难度、减轻了工作量,具有很强的实用性。

参 考 文 献

- 1 Zhao Yongjie, Gao Feng, Dong Xingjian, et al. Elastodynamic characteristics comparison of the 8 - PSS redundant parallel manipulator and its non-redundant counterpart the 6 - PSS parallel manipulator [J]. Mechanism and Machine Theory, 2010, 45(2):291 ~ 303.
- 2 陈修龙,贾帅帅,邓昱,等. 新型 4 - UPS - UPU 并联坐标测量机刚柔耦合动力学性态[J]. 吉林大学学报:工学版, 2011, 41(4):1 020 ~ 1 024.
Chen Xiulong, Jia Shuaishuai, Deng Yu, et al. Dynamic behaviors of rigid-flexible coupling for novel 4 - UPS - UPU parallel coordinate measuring machine [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(4):1 020 ~ 1 024. (in Chinese)
- 3 刘延杰,孙立宁,刘品宽,等. 一种新型高速精密机器人的弹性动力学研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(1): 1 294 ~ 1 296.
Liu Yanjie, Sun Lining, Liu Pinkuan, et al. Kineto-elastodynamic analysis of new high speed and high precision robotic mechanism [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(1):1 294 ~ 1 296. (in Chinese)
- 4 Tang Xueyan, Chen I-Ming, Li Qing. Design and nonlinear modeling of a large-displacement XYZ flexure parallel mechanism with decoupled kinematic structure [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(11): 115 101.1 ~ 115 101.11.
- 5 Li Haihong, Yang Zhiyong, Huang Tian. Dynamics and elasto-dynamics optimization of a 2 - DOF planar parallel pick-and-place robot with flexible links [J]. Struct. Multidisc. Optim. , 2009, 38(2): 195 ~ 204.
- 6 杜兆才,余跃庆,苏丽颖. 动平台惯量参数对柔性并联机构动力学特性的影响及优化设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6):1 009 ~ 1 016.
Du Zhaocai, Yu Yueqing, Su Liying. Effects of inertia parameters of moving platform on the dynamic characteristic of flexible parallel mechanism and optimal design[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 1 009 ~ 1 016. (in Chinese)
- 7 汪琦,王立平,汪劲松,等. 6 - SPS 型并联机床基于动态特性的优化设计[J]. 中国机械工程, 2003, 14(11):908 ~ 912.
Wang Qi, Wang Liping, Wang Jinsong, et al. Design optimization based on dynamic characteristics of 6 - SPS parallel kinematic machine tool[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(11): 908 ~ 912. (in Chinese)
- 8 李金泉,陈恳,丁洪生. BKX - I 并联机床的结构参数对机床模态的影响分析[J]. 制造技术与机床, 2006(2):64 ~ 66.
Li Jinquan, Chen Ken, Ding Hongsheng. The influences of structure parameters on BKX - I PKM ' s modal [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2006(2): 64 ~ 66. (in Chinese)
- 9 李志鹏,郭艳玲. 基于柔体动力学分析的平面并联机器人结构优化设计[J]. 机械设计, 2006, 23(7):19 ~ 21.
Li Zhipeng, Guo Yanling. Structural optimization design of planar parallel robot based on dynamics analysis of flexible body [J]. Journal of Machine Design, 2006, 23(7): 19 ~ 21. (in Chinese)
- 10 鲁开讲,师俊平,高秀兰,等. 平面柔性并联机构弹性动力学研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6):208 ~ 215.
Lu Kaijiang, Shi Junping, Gao Xiulan, et al. Elastic-dynamics of planar flexile parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 208 ~ 215. (in Chinese)