

文章编号 1004-924X(2013)04-0927-07

大行程转动柔性铰链性能测试及实验

裴 旭*, 李远玥, 侯振兴

(北京航空航天大学 机械工程学院, 北京 100191)

摘要:针对大行程柔性铰链铰链运动范围较大,转动误差相对较小,实现其转动精度的测量比较困难的问题,提出了一种间接测量大行程柔性铰链转动精度的方法。首先对柔性铰链转动精度的衡量指标进行定义和比较;然后选择合适的指标,提出间接测量该柔性铰链转动中心漂移量和刚度的方法。该方法利用工具显微镜测量铰链运动刚体上的两个特征点在转动过程中的坐标值,从而解算出柔性铰链在不同转角时转动中心点的位置。由此不仅得到了转动中心漂移的大小,还可以得到轴漂的方向。基于该方法搭建了实验平台并对实验误差进行了分析,分析显示其误差主要为特征点坐标的测量误差。实验结果与有限元仿真对比表明,测量结果的误差小于 0.006 mm,基本满足对大行程柔性铰链精度测试的要求。

关键词:大行程柔性铰链;转动精度;刚度;工具显微镜;间接测量

中图分类号:TH133 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132104.0927

Performance measurement and experiment for rotational flexural joint with large-stroke

PEI Xu*, LI Yuan-yue, HOU Zhen-xing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: pei.xu@buaa.edu.cn

Abstract: A method to measure the rotational precision of a flexural joint with a large stroke was proposed to solve the problems that the flexural joint has relatively smaller rotational error and its rotational precision is difficult to be measured directly. Firstly, five kinds of criterions to evaluate the rotational precision were proposed and compared. Then, a proper criterion was chose, and an indirect method to measure the center-shift and stiffness of the flexural joint was developed according to the criterion. With the method, a measuring microscope was used to survey the coordinates of two mark points on the flexural joint, by which the rotational angle and the position of the real rotational center could be calculated, and the central shift of rotation and its shift direction also could be obtained. An experimental platform was built based on the method, and an isosceles trapezoidal flexural joint was used to validate the method. Experiments show that the rotational precision and the stiffness of the flexural joint can be measured at the same time in the experiment. The results are compared with the finite element analysis simulation and it indicates that the error of the experimental result is less than

收稿日期:2012-11-03;修订日期:2013-01-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51275552, 50905005);全国优秀博士学位专项资金资助项目(No. 201234)

0.006 mm, which satisfies the requirement of precision test for most common flexural joints with large-strokes.

Key words: large-stroke flexural joint; rotational precision; stiffness; tool microscope; indirect measurement

1 引言

柔性机构是一种新型机构,它利用材料的弹性变形传递运动。柔性机构可整体化设计和加工,不需要轴承,因此可以减小机构体积,实现无间隙、无摩擦、高精度的运动,目前已被广泛应用于需要精密定位的场合^[1-3]。与刚性机构对应,负责转动的那部分柔性机构可以称之为柔性铰链。

按其运动范围,柔性机构一般可分为小行程和大行程柔性机构。小行程柔性机构(通常又称作微动机构)中典型的转动副为切口型柔性铰链,这类机构刚度大,运动范围很小,一般从几百纳米到几百微米,转动角度小于 1° 。由于其运动精度很高,多用于微操作、精密定位、误差补偿等领域。目前,小行程柔性机构的研究比较成熟,研究成果颇丰^[4-5]。在需要较大运动行程和高精度兼备的应用中,传统的作法是采用宏微结合,即刚性运动平台和柔性运动平台优势互补,前者提供较大的工作空间,后者补偿前者的运动误差。不过,由此带来的缺点也同样明显,比如包含两套运动机构的平台控制复杂,整体质量大等。直接采用大行程柔性铰链(机构)是一种从拓朴层面上解决上述问题的有效方法。目前,越来越多的应用对柔性铰链的行程提出了更高的要求,进一步促进了大行程柔性铰链的研究^[6-8]。大行程柔性铰链利用材料的分布变形,可以提高柔性铰链的运动范围。将多个分布柔性单元(如片簧)组合可以提高铰链性能,如交叉簧片型^[9]、车轮性柔性铰链等^[10]。

柔性铰链的性能指标主要有行程、刚度和精度。行程是指柔性铰链允许转动的角度,刚度是指柔性铰链上施加的转动力矩和相应转动角度的比值,精度为柔性铰链的转动误差。当柔性铰链行程增大时,其精度快速下降,因此对大行程柔性铰链精度性能的研究非常必要。但由于运动范围较大(5° 以上)时,其转动误差相对仍是一个很小的量(数十微米甚至更小),而且对于多簧片柔性铰链其转动中心位置无法直接测量,因此对大行

程柔性铰链的转动精度进行实验测量比较困难,目前只有少数学者建立了实验平台,如 ZELENIKA 等^[9]使用多个激光干涉仪搭建了交叉簧片型柔性铰链的实验平台,但其价格较高,系统复杂。

本论文首先对大行程柔性铰链转动精度的不同表示方式进行分类和比较,然后提出一种利用工具显微镜辅助测量大行程柔性铰链刚度和精度的通用实验方案,最后对实验结果进行了误差分析。

2 大行程柔性铰链的精度定义

理想的铰链可以绕着转动中心转动,其转动刚体上的点运动轨迹是以转动中心为圆心的圆弧。而对于柔性铰链,由于弹性变形不能集中在一个点,其在转动时转动中心就会发生偏移,造成转动运动的误差。这个误差被称为转动轴心漂移,简称轴漂。轴漂的数值很小,而且对于柔性铰链转动中心是抽象的,难以对其直接测量,因此可以选择不同的方法衡量转动误差的大小:

(1)如图 1(a)所示,运动刚体 D 通过柔性铰链 GD (这里用实线代替,可以将其理解为一条簧片或者其他大行程柔性铰链)连接到机架 G 上。柔性铰链的设计转动中心为 O 点(图中可看作是簧片的几何中心),当柔性铰链变形,刚体 D 转动到 D' (虚线所示),簧片的中心 O 点转动到 O' 点,可将轴漂定义为 O 点到 O' 点的距离。这种定义方法测量简单,但准确度不高,多被学者用于衡量小变形的柔性铰链^[11]。

(2)如图 1(b)所示,刚体 D 转动后,其中心线(或者是簧片端点处的切线)与初始位置的交点为 O' 点。可利用 O 点到 O' 点之间的距离表示轴漂。这种定义方式对于单个簧片构成的柔性铰链较为简便^[10],但误差也较大。

(3)如图 1(c)所示,如果刚体绕转动中心 O 点作理想转动,其转动一定角度后到达 D_r (中心线所示)。而实际刚体 D 转动后到达 D' ,可定义 D' 到 D_r 之间的距离为轴漂^[12]。

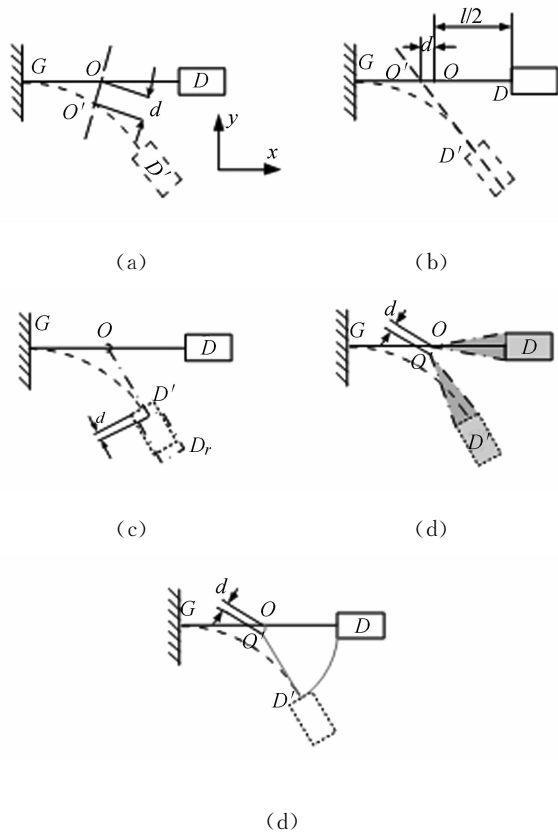


图 1 5 种衡量轴漂的方法

Fig. 1 Five kinds of criterions to evaluate rotational precision

(4)如图 1(d)所示,假设在初始位置时,刚体 D 上有一点 O 和转动中心重合,但不与柔性铰链接触(如图中灰色区域)。可定义在铰链转动后 O'点和其初始位置 O 点之间的距离为轴漂^[9]。

(5)如图 1(e)所示,如果可以测得刚体 D 在转动中的轨迹,则可求得轨迹曲线上各段微弧的曲率中心,可定义曲率中心的位移为轴漂。

从以上定义可知,定义(5)表示的轴漂反应了轴漂的本质,所以最为准确,但对于测量精度的要求过于严格,难以达到。定义(1)和(2)测量简单,但准确度低。定义(3)将轴漂转换到刚体上,不直观,而且对于多簧片结构不易选取测量点。因此,本文采用定义(4)对柔性铰链精度性能进行实验和计算。

$$x_{01} = \frac{d_y \sqrt{L^4 - 2L^2(d_1^2 + d_2^2) - (d_1^2 - d_2^2)^2} - (d_1^2 - d_2^2)d_x + L^2(x_{11} + x_{21})}{2L^2}, \quad (4)$$

$$y_{01} = \frac{-d_x \sqrt{L^4 - 2L^2(d_1^2 + d_2^2) - (d_1^2 - d_2^2)^2} - (d_1^2 - d_2^2)d_y + L^2(y_{11} + y_{21})}{2L^2}, \quad (5)$$

3 大行程柔性铰链的性能测试原理

本节以等腰梯形柔性铰链为例,说明实验的测试原理,这种方法也可用于其他大行程柔性铰链的测试中。

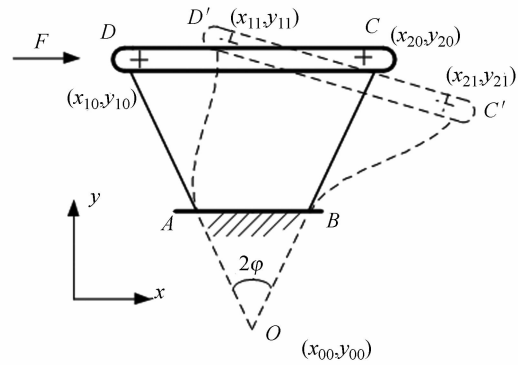


图 2 轴漂测试原理

Fig. 2 Principle to measure center-shift

等腰梯形柔性铰链如图 2 所示,它的 2 根簧片构成梯形的腰,连接两个刚体(AB 和 DC)。当一个刚体(AB)固定时,在外力 F 的作用下另一个刚体(DC)可以绕瞬心 O 点转动。在铰链初始位置测量 DC 上两个特征点坐标 (x_{10}, y_{10}) , (x_{20}, y_{20}) 以及设计时转动中心 O 点坐标 (x_{00}, y_{00}) , 可以分别求得特征点到转动中心的距离:

$$d_1 = \sqrt{(x_{10} - x_{00})^2 + (y_{10} - y_{00})^2}, \quad (1)$$

$$d_2 = \sqrt{(x_{20} - x_{00})^2 + (y_{20} - y_{00})^2}. \quad (2)$$

当铰链转动后两个特征点移动到新坐标 (x_{11}, y_{11}) 和 (x_{21}, y_{21}) , 由定义可知,转动中心固连在刚体上,所以它和两个特征点之间的距离不变,因此可以用下列方程组解出转动中心移动后的坐标值 (x_{01}, y_{01}) :

$$\begin{cases} \sqrt{(x_{11} - x_{01})^2 + (y_{11} - y_{01})^2} = d_1 \\ \sqrt{(x_{21} - x_{01})^2 + (y_{21} - y_{01})^2} = d_2 \end{cases}. \quad (3)$$

去掉一组无关的解,上式的解为:

其中：

$$d_x = x_{11} - x_{21}, \quad (6)$$

$$d_y = y_{11} - y_{21}, \quad (7)$$

$$L = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}, \quad (8)$$

则轴漂可表示为：

$$d_o = \sqrt{d_{ox}^2 + d_{oy}^2}, \quad (9)$$

$$d_{ox} = x_{01} - x_{00}, \quad (10)$$

$$d_{oy} = y_{01} - y_{00}, \quad (11)$$

转动角度为：

$$\theta = \arctan\left(\frac{d_y}{d_x}\right) - \arctan\left(\frac{y_{10} - y_{20}}{x_{10} - x_{20}}\right). \quad (12)$$

可以看出,用这种方法不仅可以测得轴漂数值的大小,还可以测量出其漂移的方向。同时上述推导过程中与具体铰链形式无关,因此这种方法对于转动副的转动误差测量是通用的。

4 大行程柔性铰链性能测试平台

实验装置如图 3 所示,主要组成为: Nikon MM-40 型工具显微镜,其放大倍数为 100,用于观察柔性铰链上的特征点位置;下方放置 Nikon 2 维移动平台,移动范围 50 mm×50 mm,配合 SC-212 数字计数器,分辨率可达 0.2 μm; Mark-10 测力计,满量程为 10 N,精度为 0.2%,用于推动柔性铰链转动,可配合测量柔性铰链的刚度。

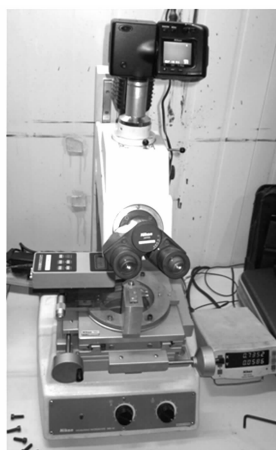


图 3 轴漂测试设备

Fig. 3 Experimental setup

实验中采用大行程等腰梯形柔性铰链作为样例。铰链如图 4 所示,采用线切割一体成型,加工精度小于 0.002 mm,材料为黄铜 ($E = 126 \text{ GPa}, \mu = 0.31$)。其参数为:两簧片之间夹角 90° ,

簧片长度 22 mm,簧片厚度 0.2 mm,柔性铰链厚度 6 mm。

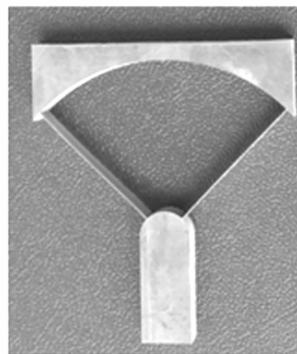
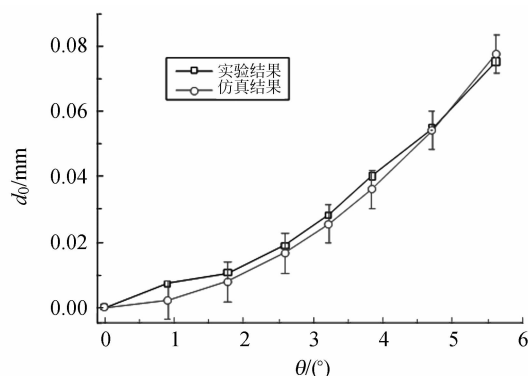


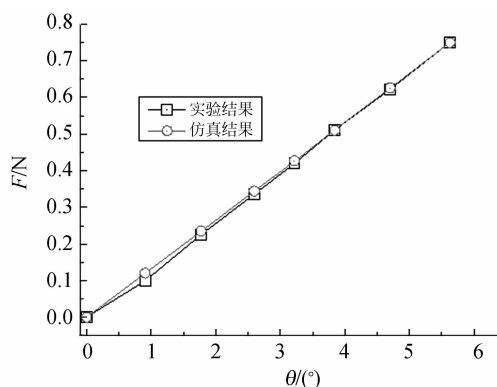
Fig. 4 等腰梯形柔性铰链模型

Fig. 4 Isoscele trapezoidal flexural joint



(a) 轴漂

(a) Center-shift



(b) 刚度

(b) Stiffness

Fig. 5 实验结果和仿真结果对比

Fig. 5 Result comparison between experiment and simulation

使用 Ansys9.0 进行大变形非线性仿真对比实验结果的准确性。为了减少三维实体因网格划分等带来不必要的误差,建模采用了线模型并用二维梁单元进行网格划分。模型中刚性杆的刚度远大于柔性铰链的刚度。

实验和仿真结果对比如图 5 所示。从图中可以看出,实验测得的力和仿真得到的力非常接近,误差主要受测力计的精度以及施力点位置测量误差影响,所以测量精度较高。而轴漂测量的准确度稍差。

5 误差分析

实验结果中的误差主要是坐标值的测量误差引起的。测量误差主要为特征点的识别误差和位移平台的误差。由于通过工具显微镜肉眼识别特征点,因此测量时重复精度较低。另外,由于测量的为相对位置,系统误差影响较小,可认为测量误差为随机误差。对一点多次重复测量读取 x 和 y 坐标值,这两组数中最大与最小值的两者差值为 0.01 mm,因此可认为单个坐标值的极限偏差为 ± 0.005 mm。

铰链中心点位置由多个测量值计算得到,各个测量值互相独立,因此,由随机误差的合成理论^[13]可知轴漂的极限误差满足:

$$\delta_{limO}^{\infty} = \left[\left(\frac{\partial d_o}{\partial x_{11}} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_o}{\partial y_{11}} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_o}{\partial x_{21}} \right)^2 + \left(\frac{\partial d_o}{\partial y_{21}} \right)^2 \right]^{\infty} \delta_{lim}^{\infty} \quad (13)$$

其中: δ_{lim} 为各坐标的极限测量误差,即 ± 0.005 mm。用上式可算出前一节实验数据的极限误差约为 ± 0.006 mm,在图 5(a)中用误差线表示,可以看出,实验值和仿真值之间的最大偏差为 0.005 mm,小于极限误差,实验结果可信。

为了研究特征点选取位置对实验误差的影响,假设图 2 中选取的特征点关于 y 轴对称,特征点与转动中心连线构成的夹角为 β ,特征点到转动中心之间的距离为 d ,并且结果中 x 和 y 方向分量的影响相同,则可以发现轴漂的极限误差只与 β 相关,如图 6 所示。当 $\beta=90^\circ$ 时, $\delta_{limO} = \delta_{lim}$ 。当 $\beta < 90^\circ$ 或 $\beta > 90^\circ$ 时,误差迅速增大。因此选择特征点时角度 β 在 90° 附近测量精度较高。

由于数据测量有误差,而且一般转动中心的坐标需要间接测量得到,因此转动中心坐标(x_{00} ,

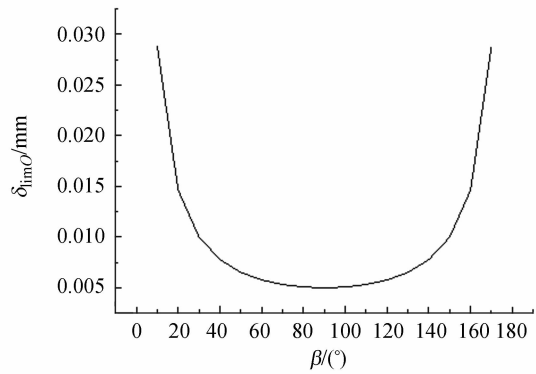


图 6 特征点位置对测量结果极限误差的影响

Fig. 6 Effect of positions of two mark-points on measuring error

y_{00}) 的取值存在误差。分析这个误差对轴漂测量精度的影响,如图 7 所示,理论转动中心为 O 点,在铰链转动后运动到 O' 点,轴漂为 d_o ;由于取值有误差,实际测量点坐标为 O_1 点,到 O 点距离为 λ ,在铰链转动 θ 角后运动到 O_1' 点,轴漂为 d_o' ,当转角 θ 较小时可得:

$$d_o' = d_o + \lambda \theta. \quad (13)$$

由于 λ 和 θ 都很小,如 λ 取 0.005 mm, θ 取 6° 时,其乘积为 0.000 5 mm,因此,一般情况下可以忽略。

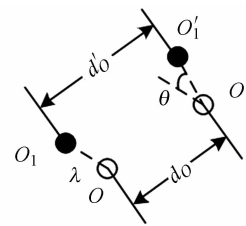


图 7 转动中心取值误差的影响

Fig. 7 Effect of survey error of rotational center on measuring error

6 结 论

本文在对大行程柔性铰链转动精度进行分类定义的基础上,提出一种利用工具显微镜辅助测量大行程柔性铰链刚度和精度的通用实验方案,基本满足了大行程柔性铰链的测试需求。此方法结构简单,通用性强,只需要读取运动刚体上特征值的坐标即可,因此对设备、铰链的要求低,可同

时测量大行程柔性铰链的刚度和轴漂指标,且能知道轴心漂移的方向,为多模块柔性铰链的精度设计提供依据。该方案实验精度较高,对实验结果的误差分析可知,其测量结果误差与特征值的读数误差相同,论文采用的实验平台测量误差能

够小于 0.006 mm,如采用更精确的特征值测量方法即可得到更高的精度。该方案测量转动角度范围亦很大,其测量范围主要受到精密位移平台的移动行程限定,因此合理安排铰链和特征点位置,可以测量更大的转角下的轴漂性能。

参考文献:

- [1] 鲁亚飞, 范大鹏, 范世珣, 等. 快速反射镜两轴柔性支承设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2573-2582.
LU Y F, FAN D P, FAN SH X, *et al.*. Design of two-axis elastic support for fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2573-2582. (in Chinese)
- [2] YU Y Q, FENG Z L, XU Q P. A pseudo-rigid-body 2R model of flexural beam in compliant mechanisms [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2012, 55(9): 18-33.
- [3] 林雪松, 王淑荣, 李福田. 空间傅里叶变换红外光谱仪用全柔性机构的设计及研究[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 691-696.
LIN X S, WANG SH R, LI F T. Design and investigation of the precision scans structure of space infrared FTS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 691-696. (in Chinese)
- [4] 于靖军, 宗光华, 毕树生. 全柔性机构与 MEMS [J]. 光学精密工程, 2001, 9(1): 1-5.
YU J J, ZONG G H, BI SH SH. Fully compliant mechanisms and MEMS [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] 李琳, 杨勇. 空间曲线切口式柔性铰的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2192-2198.
LI L, YANG Y. Design of flexure hinges with space curve notches [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2192-2198. (in Chinese)
- [6] LI H, IBRAHIM R, CHENG K. Design and principles of an innovative compliant fast tool servo for precision engineering [J]. *Mech. Sci.*, 2011, 2: 139-146.
- [7] CHEN G M, GOU Y J, ZHANG A M. Synthesis of compliant multistable mechanisms through use of a single bistable mechanism [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2011, 133(8): 081007.
- [8] SUNG E, SLOCUM A H, MA R, *et al.*. Design of an ankle rehabilitation device using compliant mechanisms [J]. *Journal of Medical Devices*, 2011, 5(1), 011001.
- [9] ZELENKA S, BONA F D. Analytical and experimental characterization of high-precision flexural pivots subjected to lateral loads [J]. *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 2002, 26: 381-388.
- [10] SMITH S T. *Flexures: Elements of Elastic Mechanisms* [M]. New York: Gordon and Breach Science. 2000: 153-230.
- [11] 陈贵敏, 贾建援, 刘小院, 等. 柔性铰链精度特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 107-109.
CHEN G M, JIAN J Y, LIU X Y, *et al.*. Study on the accuracy of flexure hinges [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 107-109. (in Chinese)
- [12] HOWELL L L. *Compliant Mechanisms* [M]. New York: Wiley Press, 2001.
- [13] 梁晋文, 陈林才, 何贡. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 中国计量出版社. 2001.
LIANG J W, CHEN L C, HE G. *Error Theory and Surveying Adjustment* [M]. Beijing: Chinese Metrology Press. 2001. (in Chinese)

作者简介:



裴旭(1979—),男,甘肃天水人,博士,讲师,2002年、2004年、2009年于北京航空航天大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为机器人机构学,柔性机构等。E-mail: peixu@buaa.edu.cn



李远玥(1988—),男,湖北天门人,硕士研究生,2011年于沈阳建筑大学获得学士学位,主要研究方向为机器人机构学,柔性机构等。E-mail: 15140199741@163.com



侯振兴(1989—),男,黑龙江伊春人,硕士研究生,2010年于北京科技大学获得学士学位,主要研究方向为机器人机构学,柔性机构等。E-mail: hzx8568@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)