

文章编号 1004-924X(2017)02-0394-07

## Y 型柔性铰链的设计与实验

余跃庆\*, 李清清

(北京工业大学 机电学院, 北京 100124)

**摘要:**为设计一种高精度、结构简单的大变形柔性铰链,提高并联平台的运动精度和零件使用寿命,本文提出了一种 Y 型柔性铰链。首先,借助 ANSYS 和 ADAMS 进行柔性铰链的回转中心、安装方式和行程要求的分析研究。接着,利用数控机床进行柔性铰链的加工制作。然后,利用光学坐标测量仪 OPTOTRAK 进行柔性铰链的轴漂测量实验。最后,进行了转动副并联平台、单片簧柔性铰链并联平台和 Y 型柔性铰链并联平台的圆轨迹实验。实验结果表明:Y 型柔性铰链回转误差最大值为 0.5962mm, Y 型柔性铰链并联平台圆轨迹的误差最大值比转动副并联平台减小了 42.7%。Y 型柔性铰链可以很好地替换并联平台中的转动副,提高并联平台运动精度。

**关键词:**柔性铰链;轴漂;并联

**中图分类号:**TH132.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172402.0394

## Design and experiment of Y-type flexure hinge

YU Yue-Qing\*, LI Qing-Qing

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

\* Corresponding author, E-mail: yqyubjut@163.com

**Abstract:** In order to design a large deformation of flexure hinge with high precision and simple structure and to promote the motion precision of parallel platform and the life of elements, a Y-type flexure hinge was proposed in the article. Firstly, made analysis and study of the rotation center, installation method and stroke requirements of flexure hinge by application of ANSYS and ADAMS. Secondly, processed the flexure hinge by using CNC machine. Thirdly, measured the axis drift of flexure hinge by using the 3D optical coordinate measuring instrument OPTOTRAK. Finally, conducted the circle trajectory experiments of parallel platform with kinematic pairs, leaf spring flexible hinge and Y type flexible hinge. The results show that the maximum rotation error of Y type flexure hinge is 0.596 2 mm and the maximum error of circle trajectory on the parallel platform provided with Y type flexible hinge decreased by 42.7% as compared with on the parallel platform provided with kinematic pairs, which means Y type flexure hinge can substitute the kinematic pairs in the parallel platform and able to promote the motion precision of the parallel platform.

**Key words:** Flexure hinge; axis drift; parallel

收稿日期:2016-09-10;修订日期:2016-10-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51575006)

## 1 引言

随着现代机械不断向高速、高精度方向发展,具有无间隙、耐冲击、无磨损等优点的柔性铰链和柔顺机构越来越多的被运用于微操作机器人、精密光学仪器、航空航天器以及工业设备等领城<sup>[1-5]</sup>。根据柔性铰链的运动行程,可将柔性铰链分为微动型和大行程型。国内外学者对柔性铰链做了大量研究<sup>[6-7]</sup>,但现有的大变形大行程的柔性铰链仍存在着一些不足。由于大变形大行程柔性铰链在并联机构中的应用越来越多,更高精度、更大离轴刚度、结构更简单的大变形大行程柔性铰链成为了研究者不断追求的目标。

李宗轩等提出了利用无量纲设计图方法设计 Cartwheel 型双轴柔性铰链<sup>[8]</sup>的方法;陈贵敏等提出了一种精度更高的深切口椭圆柔性铰链<sup>[9]</sup>,并推导了这类柔性铰链的转角、转动精度和最大应力的解析计算公式;宗光华等设计了一种双曲杆空心柔性铰链<sup>[10]</sup>,具有转角大,稳定性高等优点,但也存在结构复杂、轴漂大等问题;Kikuchi N、毕树生均提出一种交叉簧片转动型柔性铰链<sup>[11-12]</sup>,精度高、转角大,但结构复杂;Goldfarb 等提出了一种转角达到 150°的裂桶型柔性铰链<sup>[13]</sup>,大大提高了柔性铰链的适用范围;Smith 提出了一种轴漂极小的带薄壁梁的桶状回转副<sup>[14]</sup>,但是结构较为复杂,制作难度较高。

上述大部分柔性铰链依然存在轴漂大、离轴刚度小、结构复杂等问题。为了解决这些问题,本文提出了一种 Y 型柔性铰链,并借助 ANSYS 和 ADAMS 对其进行了分析研究。利用数控机床进行柔性铰链的加工并完成组装。利用光学坐标测量仪 OPTOTRAK 分别进行了 Y 型柔性铰链的轴漂测量实验和平面 3-RRR 并联平台圆轨迹实验。

## 2 Y 型柔性铰链设计

### 2.1 方案设计

图 1 所示为平面 3-RRR 并联实验平台,该平台上的转动副有运动间隙、易磨损、不耐冲击,大大降低了实验台的精度。

余跃庆<sup>[3]</sup>等用单片簧柔性铰链替换该平台上

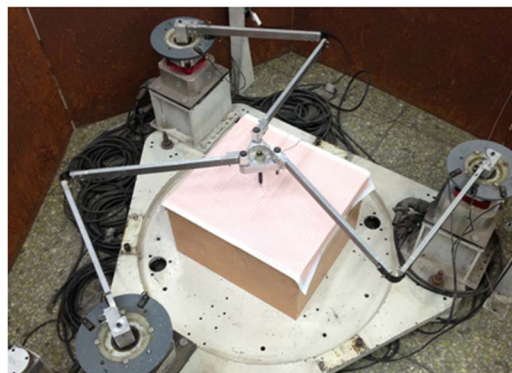


图 1 平面 3-RRR 并联平台

Fig. 1 3-RRR planar parallel platform

的转动副并进行了轨迹跟踪实验。但是,由于单片簧柔性铰链轴漂大、离轴刚度小等原因导致平台运动精度不高。为设计一种轴漂更小、离轴刚度大、结构简单、精度更高的柔性铰链,提高并联平台运动精度,以对称设计思想<sup>[15]</sup>为基础,运用机械设计、材料力学等相关知识,结合并联平台要求提出了如图 2 所示的 Y 型柔性铰链。图中 Y 型柔性铰链包括 2 根刚性杆和 2 片完全相同的圆弧形片簧,圆弧形片簧的圆心角为 135°,刚性杆用于固定连接柔性铰链。

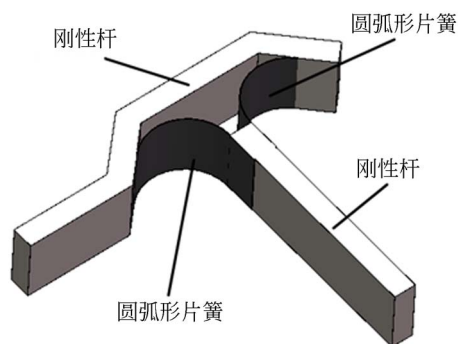


图 2 Y 型柔性铰链

Fig. 2 Y type flexure hinge

### 2.2 确定回转中心

为了提高 Y 型柔性铰链在实际使用中的运动精度,利用 Solidworks2014 进行三维建模,并借助 Solidworks2014 中的 Simulation 软件进行简单的应力运动仿真。通过应力运动仿真在运动杆的中性线上找到一合位移最小点,作为 Y 型柔性铰链的回转中心。图 3 所示为 Y 型柔性铰链简图。图中,圆弧形片簧半径  $R$  为 20 mm,为了便

于加工制造,片簧厚度  $b_1$  设为 0.3 mm,两个片簧之间的夹角  $\alpha$  为  $90^\circ$ 。为了简化仿真模型,柔性铰链上刚性杆杆长  $L$  设为 100 mm。根据并联实验平台的安装要求,将柔性铰链上刚性杆厚度  $b_2$  设为 10 mm,垂直作用于刚性杆上的力  $F$  为一个变化的力, $\theta$  为力  $F$  作用下刚性杆绕回转中心运动的转角, $a$  为回转中心点。片簧的材料为弹簧钢(弹性模量  $2.06 \times 10^{11}$ ,泊松比为 0.3,密度为  $7.85 \text{ kg/m}^3$ )。

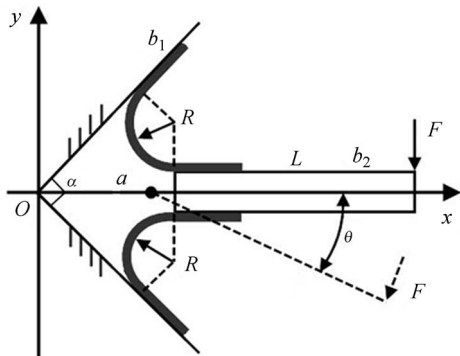


图 3 Y 型柔性铰链简图

Fig. 3 Diagram of Y type flexure hinge

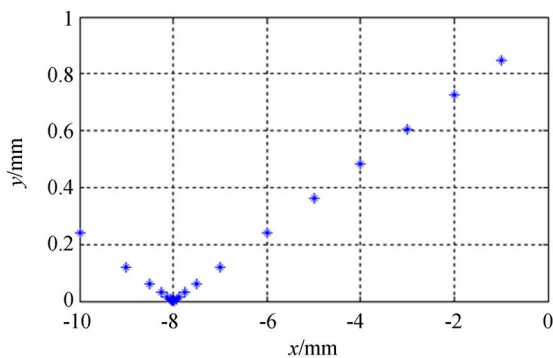


图 4 柔性铰链连杆中轴线上各点位移

Fig. 4 Displacement of points on the central axis of flexure hinge linkage

将运动仿真数据绘制成图 4 所示的点状图,从图中可以看出,Y 型柔性铰链的回转中心  $a$  距离刚性杆边缘为 8 mm,且在刚性杆中性线上。

2.3 确定安装方式及行程要求

Y 型柔性铰链的结构为非中心对称,实际应用时具有 2 种安装方式。规定下图 5(a)所示的安装方式为正装法,左侧连杆作为驱动杆件,右侧连杆作为从动杆件,给驱动杆施加一个扭矩输入后,Y 型柔性铰链会受到一个沿着从动杆方向上

的反作用力  $F$ ,该反作用力  $F$  将会增大柔性铰链轴漂,对柔性铰链的运动精度产生较大影响。

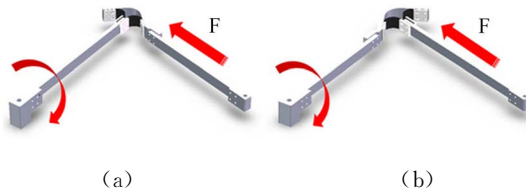


图 5 Y 型柔性铰链两种安装方式

Fig. 5 Two installation ways of Y type flexure hinge

对比发现,采用图 5(b)所示的 Y 型柔性铰链反装法时机构的运动精度比正装法差。因此采用图 5(a)中所示的正装法。

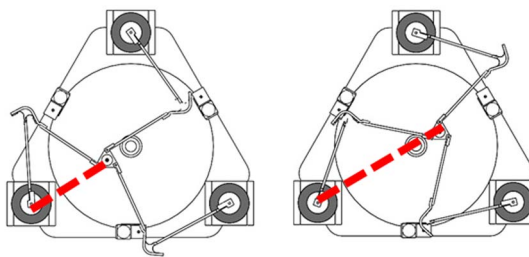


图 6 并联平台上铰链的最小、最大夹角位形图

Fig. 6 Maximum and minimum angle of hinge on the parallel platform

借助 SolidWorks2014 进行并联平台的运动学仿真,如图 6 所示。通过仿真可得:并联平台进行  $R=100 \text{ mm}$  的圆轨迹实验时,柔性铰链两杆的最小夹角为  $52.81^\circ$ ,最大夹角为  $98.18^\circ$ ,因此柔性铰链的最大转角需要达到  $45.37^\circ$ 。

2.4 仿真

为了验证 Y 型柔性铰链是具有运动精度高、回转行程大等特点。利用 Solidworks2014 生成模型的 IGS 格式文件。将生成的 IGS 文件导入到 ANSYS 中,利用 ANSYS 进行有限元网格划分并导出适用于 ADAMS 的 \*.mnf 柔性体文件。将 ANSYS 中生成的 \*.mnf 文件导入 ADAMS,进行柔性体运动仿真。将模型左侧连杆上的刚性面固定,为便于仿真柔性铰链的运动,在右侧连杆端面中心点处标记一个 interface node 点 O,在点 O 上添加一个方向始终垂直于连杆的瞬态力,使得柔性铰链在  $-22.5 \sim +22.5^\circ$  内运动。测量右侧连杆上 O 点与柔性铰链模型坐标原点

的距离,并绘制曲线。同时,观察柔性铰链片簧上的应力分布情况。将 ADAMS 中的测量所得的距离曲线数据导入到 MATLAB,利用 plot 工具重新绘制距离曲线图,定义  $x$  轴变量为 Time (sec),  $y$  轴变量为 Length(mm),限制  $y$  轴坐标为 90~110 mm,  $x$  轴数据截取 2 个完整的波峰波谷,采用红色曲线绘制,最终绘制曲线如图 7 所示。

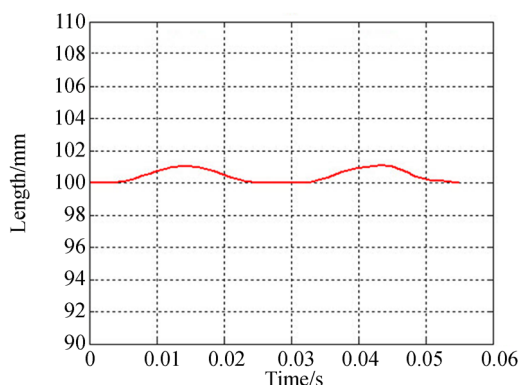


图 7 柔性铰链上 O 点到坐标原点的距离

Fig. 7 Distance between point O on the flexure hinge and the origin

通过仿真数据,Y型柔性铰链右侧连杆上的 O 点与坐标原点的距离误差平均值为 0.435 3 mm,最大峰谷差为 1.090 9 mm,均方差为 0.398 6 mm,误差最大值为 1.085 9 mm。考虑到网格划分精度、精度测量方式好坏等因素会影响最终结果,认为 Y 型柔性铰链基本满足并联平台要求。

### 3 柔性铰链制作及实验

#### 3.1 实物制作

为使柔性铰链上的片簧具有更好的柔性,降低片簧的加工难度,将片簧与刚性杆采用不同材料加工并组装。片簧材料采用 65Mn 弹簧钢片裁剪卷制成型,并通过螺栓与刚性杆连接固定,刚性杆采用 6061-T6 铝合金数控加工成型以减轻重量。Y 型柔性铰链实物如图 8 所示。

#### 3.2 轴漂测量

利用 3D 光学坐标测量仪 OPTOTRAK 进行 Y 型柔性铰链的轴漂测量实验。如图 9 所示,在柔性铰链的运动杆上贴上一个 Marker 点,该点距离回转中心 100 mm。图 9 中 Y 型柔性铰链左



图 8 Y 型柔性铰链实物

Fig. 8 Photo of Y type flexure hinge

侧固定杆通过夹具固定在平台上,右侧运动杆下方临时安装有一个滚动轴承以减小平台对运动杆的摩擦力阻力。

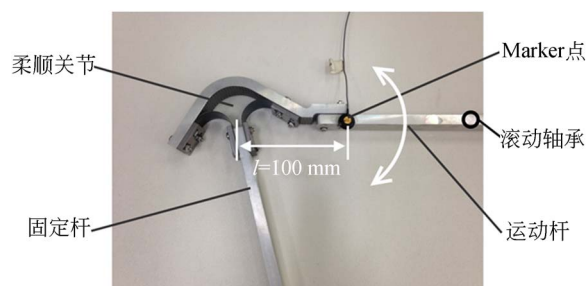


图 9 Y 型柔性铰链轴漂测量实验

Fig. 9 Axis drift measurement experiment of Y type flexure hinge

使柔性铰链运动杆在水平面内从  $-45^\circ$  匀速转动至  $+45^\circ$ , 测量记录柔性铰链上 Marker 点的运动轨迹,并绘制图 10 所示的轨迹曲线。图 11 所示为 Y 型柔性铰链上 Marker 点运动轨迹误差曲线。从图 11 中数据可得,Y 型柔性铰链从  $-45^\circ$  转动至  $+45^\circ$  时,回转中心位置的误差平均值为 0.262 2 mm,最大峰谷差为 0.746 1 mm,均方差为 0.121 7 mm,误差最大值为 0.596 2 mm。Y 型柔性铰链转角越大,精度越低。由于零件加工安装误差、Marker 点安装误差、片簧安装残余应力和仪器测量误差导致回转中心与设计值偏离 0.262 2 mm。虽然加工安装精度和实验测量精度等因素会影响 Y 型柔性铰链运动精度,但实际加工制作出的 Y 型柔性铰链的运动精度、回转行程和离轴刚度均能满足平面并联平台的要求。单独加工的片簧具有精度高、弹性大等优点,但安装

后的片簧上的残余应力会降低柔性铰链的精度,减小回转行程,缩短片簧使用寿命。

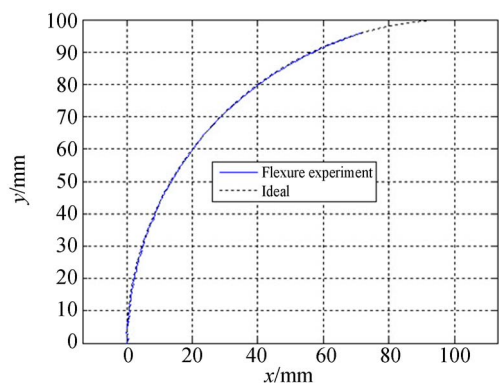


图 10 Y 型柔性铰链上 mark 点运动轨迹曲线

Fig. 10 Trajectory curve of mark point on the Y type flexure hinge

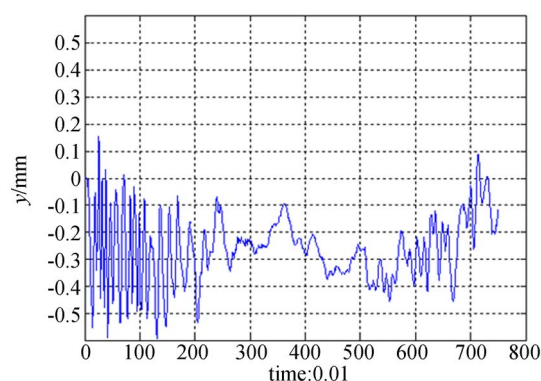


图 11 Y 型柔性铰链上 mark 点运动轨迹误差

Fig. 11 Trajectory error of mark point on the Y type flexure hinge

### 3.3 实验研究

为验证 Y 型柔性铰链是否能提高并联平台的运动精度,进行了转动副并联实验台、单片簧柔性铰链并联实验台和 Y 型柔性铰链并联实验台的轨迹实验,实验轨迹为直径 100 mm 的圆。其中,单片簧厚 0.5 mm,宽度 30 mm,片簧圆弧半径 30 mm,中心平台运动速度 1 000 mm/min。利用 3D 光学坐标测量仪 OPTOTRAK 进行圆轨迹测量,并利用 MATLAB 进行实验数据处理,得到平台运动轨迹误差曲线和表 1 中的平台运动轨迹误差数据。图 13 所示为含转动副的并联平台运动轨迹误差,图 14 所示为含单片簧柔性铰链的并联平台运动轨迹误差,图 15 为含 Y 型柔性铰链的并联平台运动轨迹误差。

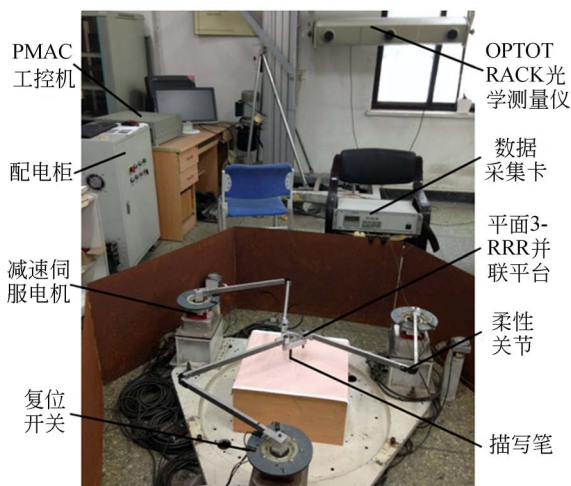


图 12 3-RRR 平面并联平台实验系统

Fig. 12 3-RRR planar parallel platform experiment system

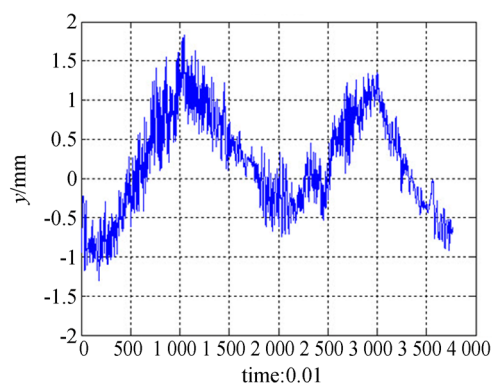


图 13 含转动副的并联平台运动轨迹误差

Fig. 13 Trajectory error of parallel platform with kinematic pair

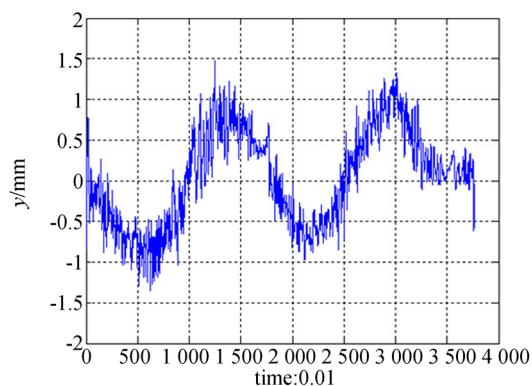


图 14 含单片簧柔性铰链的并联平台运动轨迹误差

Fig. 14 Trajectory error of parallel platform with leaf spring

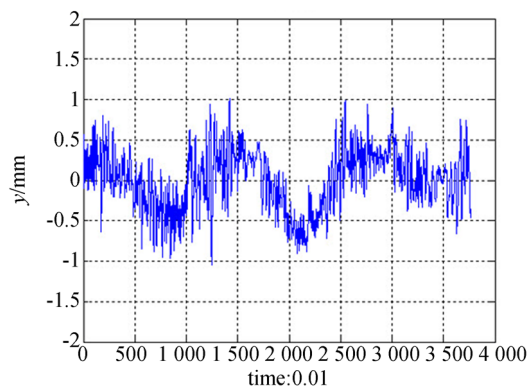


图 15 含 Y 型柔性铰链的并联平台运动轨迹误差

Fig. 15 Trajectory error of parallel platform with Y type flexure hinge

表 1 平面 3-RRR 并联平台运动轨迹误差数据

Tab. 1 Trajectory error statistics of planar 3-RRR parallel platform (mm)

	最大峰 谷差	均方差	误差 平均值	误差 最大值
转动副	0.943 9	0.634 0	0.549 8	1.826 9
单片簧柔性铰链	1.612 2	0.577 3	0.492 5	1.480 5
Y 型柔性铰链	1.435 3	0.363 6	0.295 9	1.047 7

## 参考文献:

- [1] 于靖军,郝广波,陈贵敏,等. 柔性机构及其应用研究进展[J]. 机械工程学报,2015,13:53-68.  
YU J J, HAO G B, CHEN G M, *et al.*. State-of-art of compliant mechanisms and their applications [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015,13:53-68. (in Chinese)
- [2] 周子云,高云国,邵帅,等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计[J]. 光学精密工程,2014,22(6):1547-1554.  
ZHOU Z Y, GAO Y G, SHAO SH, *et al.*. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1547-1554. (in Chinese)
- [3] 余跃庆,吕强,马兰. 含有柔顺关节的并联机器人轨迹跟踪实验[J]. 北京工业大学学报,2015,4:486-492.  
YU Y Q, LV Q, MA L. Experimental study on trajectory tracking of parallel robots with compliant joints [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015,4:486-492. (in Chinese)
- [4] 赵山杉,毕树生,宗光华,等. 基于曲线柔性单元的

从并联平台运动轨迹误差曲线图可以看出, Y 型柔性铰链能显著提高并联平台的运动精度。结合表 1 可以看出,相较于转动副和单片簧柔性铰链, Y 型柔性铰链使得平面 3-RRR 并联平台运动轨迹均方差分别减小了 42.6% 和 37.0%, 误差平均值分别减小了 46.2% 和 40.0%, 误差最大值分别减小了 42.7% 和 29.2%。

## 4 结 论

本文根据现代机械对柔性铰链的高精度、大离轴刚度、大转角、结构简单等要求,提出了一种 Y 型柔性铰链,并进行了仿真、制作和实验研究。实验结果表明: Y 型柔性铰链回转误差最大值为 0.596 2 mm, Y 型柔性铰链并联平台圆轨迹实验的误差最大值比转动副并联平台减小了 42.7%。 Y 型柔性铰链具有精度高、结构简单、转角大等优点,可以很好的替换平面并联平台中的转动副,并提高平台运动精度。

- 新型大变形柔性铰链[J]. 机械工程学报,2009,4: 8-12.  
ZHAO SH B, BI SH SH, ZONG G H, *et al.*. New Large-deflection Flexure Pivot Based on Curved Flexure Element [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 4: 8-12. (in Chinese)
- [5] 余跃庆,马兰,崔忠炜,等. 柔性机器人的关节设计与制作[J]. 中国科技论文,2013, 8:784-786.  
YU Y Q, MA L, CUI ZH W, *et al.*. Design and manufacture of flexure robot joints [J]. *China Sciencepaper*, 2013, 8:784-786. (in Chinese)
- [6] ZHU B L, ZHANG X M, FATIKOW S. Design of single-axis flexure hinges using continuum topology optimization method [J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2014, 3:560-567.
- [7] 裴旭,宗光华,于靖军. 柔性铰链的转动精度改进法[J]. 中北大学学报(自然科学版),2013,2:120-123+133.  
PEI X, ZONG G H, YU J J. Improved method for rotational accuracy of flexure hinges [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2013,2:120-123+133. (in Chinese)
- [8] 李宗轩,张雷,姚劲松,等. Cartwheel 型双轴柔性铰

- 链设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(9): 2317-2325.
- LI Z X, ZHAGN L, YAO J S, *et al.*. Design of Cartwheel bi-axial flexural hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(9): 2317-2325. (in Chinese)
- [9] 陈贵敏, 韩琪. 深切口椭圆柔性铰链[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(3): 570-575.
- CHEN G M, HAN Q. Deep-notch elliptical flexure hinges [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 570-575. (in Chinese)
- [10] 宗光华, 毕树生, 于靖军, 等. 双曲杆型空心柔性铰链[P]. 北京: CN101025187, 2007-08-29.
- ZONG G H, BI SH SH, YU J J, *et al.*. Double curved rod type hollow flexible hinge [P]. Beijing: CN101025187, 2007-08-29. (in Chinese)
- [11] 毕树生, 赵宏哲, 于靖军. 交叉簧片转动型柔性铰链[P]. 北京: CN101387315, 2009-03-18.
- BI SH SH, ZHAO H ZH, YU J J. *Cross-Spring Flexural Pivot's Warpage* [P]. Beijing: CN101387315, 2009-03-18. (in Chinese)
- [12] KIKUCHI N. Solutions to shape and topology eigenvalue optimization problems using a homogenization method [J]. *Intern. J. for Numerical Methods in Engineering*, 1992, 35(7): 1487-1502.
- [13] GOLDFARB M, SPEICH J. A Well-Behaved Revolute Flexure Joint for Compliant Mechanism Design [J]. *ASME J. Mech. Des.*, 1999, 121(3): 424-429.
- [14] SMITH S. *Flexures; Elements of Elastic Mechanisms* [D]. Taylor & Francis, London, 2000.
- [15] MOON Y M, TREASE B P, KOTA S. Design of large\_displacement compliant joints [J]. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2005, 127(4): 788-798.

#### 作者简介:



余跃庆(1970—),男,北京人,教授,博士生导师,现为北京工业大学机电学院机械设计学科带头人,主要从事机构学及机器人学研究。E-mail: yqyu@bjut.edu.cn



李清清(1990—),男,江苏靖江人,硕士研究生,2013年于北京工业大学大学获得学士学位,主要从事大变形柔性铰链研究。E-mail: liqq\_09@sina.com.