

文章编号 1004-924X(2013)07-1811-07

# 具有角度修正功能的大行程二维纳米工作台

张昔峰, 黄强先\*, 袁 钰, 黄 帅

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 基于宏微组合驱动方式, 提出一种具有角度修正功能的大行程二维纳米工作台设计方案来减小精密测量系统中由于工作台定位及角度误差引入的测量误差。首先, 从原理上对设计方案进行了论证。该方案中宏动工作台和微动工作台共用位置反馈系统构成闭环控制, 并基于压电陶瓷致动器及柔性铰链设计的六自由度微动工作台对宏动工作台进行直线定位误差及角度误差的综合补偿。然后, 基于设计方案设计了宏动工作台及微动工作台的结构。最后, 对安装调试后的宏微工作台系统进行了直线组合定位测试及角度误差修正测试。实验结果表明, 该工作台系统的宏动行程达到了  $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ; 在闭环控制下, 通过六自由度微动工作台的补偿作用可使各角度偏差由上百秒降至  $10''$  以内, 由此工作台系统在全行程内的直线定位误差可由  $3\text{ }\mu\text{m}$  降至  $25\text{ nm}$  以内。实验结果验证了提出的组合定位系统的有效性。

**关键词:** 六自由度工作台; 宏微二级驱动; 纳米定位; 角度误差补偿

**中图分类号:** TH703; TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1811

## Large stroke 2-DOF nano-positioning stage with angle error correction

ZHANG Xi-feng, HUANG Qiang-xian\*, YUAN Yu, HUANG Shuai

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

\* Corresponding author, E-mail: huangqx@hfut.edu.cn

**Abstract:** On the basis of a macro-micro dual driven method, a solution for the large stroke 2-DOF nano-positioning stage with angle error correction functions is proposed to reduce the measurement errors in a precision measurement system caused by positioning and angular errors of the stage. Firstly, the principle of the solution is demonstrated. In this solution, the macro stage and micro stage share the same position feedback systems to form a closed loop control, and both linear positioning errors and angle errors of macro stage are compensated with the help of a 6-DOF micro stage based on a piezoelectric ceramic actuator and a flexible hinge. Then, the macro stage and micro stage are designed and manufactured based on the solution. Finally, the performance of the 2-DOF nano-positioning stage with error correction functions are tested preliminarily. Experimental result indicates that the stroke of the 2-DOF nano-positioning stage reaches  $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ . With the correction of the micro stage under the closed-loop control, all of the angle errors of the stage are reduced from hundreds

收稿日期: 2013-01-06; 修订日期: 2013-02-26.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2008AA042409); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175141)

of seconds to less than  $10''$ , and the positioning error is reduced from  $3\ \mu\text{m}$  to less than  $25\ \text{nm}$ . Experimental result verifies the effectiveness of the macro-micro dual positioning system.

**Key words:** 6-DOF stage; macro-micro dual driving; nano-positioning; angle error correction

## 1 引言

理想情况下,工作台的运动部件沿其导轨作直线运动,但是由于导轨系统不完善,使得运动部件不仅会产生直线度运动误差,还会产生俯仰角误差、偏摆角误差和滚转角误差。在测量系统中,工作台的角误差对其定位误差有着放大作用,尤其在违背阿贝原则的测量系统中,因工作台角误差及阿贝臂引起的阿贝误差更是不可忽略<sup>[1]</sup>。例如在一个测量系统中,被测量轴线与测量系统的标准量的轴线之间存在  $S=1\ \text{cm}$  的阿贝距离,工作台运动倾斜角度为  $\theta=1''$ ,则由此引起的测量误差  $\Delta L = S \tan \theta \approx S\theta = 50\ \text{nm}$ ,这个误差量级对于纳米测量是不允许的。在普通精度测量系统中,可以通过软件修正对此误差进行一定程度的补偿,但是在纳米级测量系统中,工作台力变形及测量环境的变化,甚至是工件放置位置的不同都会造成工作台的附加微小变形,当测量机行程较大时,单靠修正很难达到纳米级<sup>[2]</sup>。为了解决此问题,传统的方法多采用提高工作台机械加工及装配精度来提高工作台的工作精度,此种方法成本高,周期长,对机械加工精度及装配精度要求极高,在短行程的工作台中尚可使用,而在大行程、高精度要求的纳米测量领域此方法很难实现预期要求。近些年来,有研究提出了共平面导轨设计方案<sup>[3-4]</sup>,该方案可以最大限度地减小测量中的阿贝臂,使得阿贝误差得以减小,但是在测量时,对于有一定高度的被测件,工作台的角误差仍会引入不可忽略的测量误差,并且此误差随着工件的形状及放置位置不同而变化,难以修正。

本文基于宏微组合驱动方式提出一种大行程二维纳米工作台的设计方案,采用基于压电陶瓷致动器设计的六自由度微动工作台对宏动工作台进行定位及角度误差的综合补偿,最大限度提高了整个工作台系统的精度。

## 2 工作台工作原理及方案设计

此宏微工作台系统包括一个大行程二维宏动工作台,一个六自由度微动工作台,两套呈  $90^\circ$  夹角布置的测长测角系统,以及负责协调宏微工作台运动的计算机控制系统。基于丝杠螺母驱动方式的大行程工作台,具有大行程和高响应速度等优点,而基于压电陶瓷和柔性铰链的六自由度微动工作台具有纳米级运动分辨率和极高的运动精度,同时具有 3 个自由度上的角度补偿功能。为使大行程二维工作台的 X、Y 轴直线定位精度达到纳米级,利用六自由度工作台的直线运动对宏动工作台进行了直线定位误差的补偿,此驱动方式可以很好地综合宏动台大行程和微动台高精度的优点<sup>[5]</sup>。为使工作台定位系统获得极小的角度误差,通过六自由度微动台的转角运动对宏动台进行了角度修正。

系统设计方案如图 1 所示,二维宏动工作台行程为  $200\ \text{mm} \times 200\ \text{mm}$ ,宏动台由两个单轴工作台以堆叠式结构搭建而成,六自由度微动台工作台具有 6 个自由度,分别为 X 轴平动、Y 轴平动、Z 轴升降、绕 Z 轴转动、绕 X 轴转动及绕 Y 轴转动。微动台的载物台是整个宏微定位系统的位置输出平台,和载物台刚性相连的两个平面反射镜以  $90^\circ$  夹角布置,分别作为 X 轴激光测长测角系统及 Y 轴激光测长测角系统的反射镜。整个宏微工作台系统中宏动工作台和微动工作台共用一套位置检测系统,使得位置测量具有统一的基准,减小了宏动部分和微动部分分别检测而引进的累积误差。激光测量系统实时采集载物台的位置偏差,作为位置反馈信号反馈给控制系统,控制系统经分析运算后驱动宏动台和微动台协同工作,实现工作台系统的直线组合定位及角度误差修正。

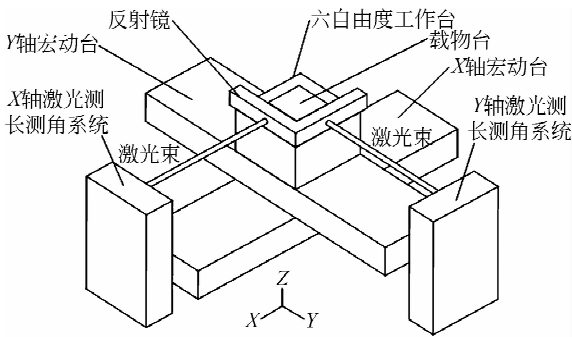


图 1 系统设计方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system design scheme

根据上述指标,采用压电陶瓷配合柔性铰链导轨的结构方案设计了六自由度微动工作台,整体结构如图 2 所示。

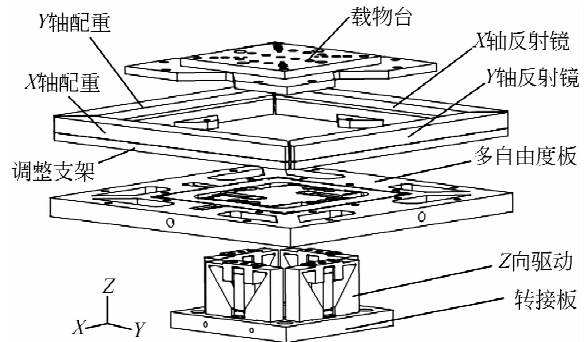


图 2 六自由度微动台整体结构

Fig. 2 Overall structure of 6-DOF micro stage

### 3 工作台机械系统设计

#### 3.1 宏动工作台结构设计

宏动工作台采用两组单轴工作台叠加而成,此工作台采用步进电机配合滚珠丝杠的驱动方式,行程为 200 mm×200 mm,实测此二维工作台在运动范围内的误差如表 1 所示。

表 1 宏动工作台整体误差范围

Tab. 1 Entire error ranges of macro stage

X 轴定位误差	Y 轴定位误差	X 轴回程误差	Y 轴回程误差
3 μm	3 μm	4 μm	4 μm
绕 Y 轴转角	绕 X 轴转角	绕 Z 轴转角	—
96"	78"	127"	—

#### 3.2 六自由度微动工作台结构设计

由表 1 所示参数,同时加入驱动余量,确定用于补偿宏动工作台误差的六自由度微动工作台行程指标如表 2 所示。

表 2 六自由度微动工作台行程指标

Tab. 2 Travel indicators of 6-DOF micro stage

X 轴	Y 轴	Z 轴
9 μm	9 μm	9 μm
绕 Y 轴转角	绕 X 轴转角	绕 Z 轴转角
100"	80"	130"

六自由度微动工作台通过转接板和宏动工作台的滑块刚性相连。固定于转接板上对称布置的 4 组 Z 向压电陶瓷驱动机构提供工作台沿 Z 向的升降和绕 X 轴、Y 轴的转动;工作台沿 X 方向和 Y 方向的平动以及绕 Z 轴的转动由多自由度板实现;多自由度板的内框与四组 Z 向压电陶瓷驱动机构相连,使得 Z 向驱动机构组合运动产生的俯仰运动能够传递给多自由度板。在多自由度板的外框上呈 90°角布置有 X 轴反射镜调整支架和 Y 轴反射镜调整支架,调整支架通过 3 个螺钉和多自由度板外框相连,具有偏摆角和俯仰角的微调功能,条状反射镜固定于调整支架上,用作激光测长及测角系统的靶镜。在 X 轴反射镜和 Y 轴反射镜的对侧安装有相同结构和材料的反射镜调整支架,支架上固定一定重量的配重块,经过配重使得工作台的重心位于几何中心上,减小力变形对结构的影响。载物台通过螺钉和多自由板的外框相连,在连接点处装有垫片,以避免载物台底面对多自由度板内部运动部件的干涉。

图 3 所示为多自由度板结构图。多自由度板采用 7075 铝合金经线切割加工而成,所用柔性铰链为平行板式柔性铰链,平行板柔性铰链结构简单,加工方便,无原理误差。六自由度工作台的 X 轴平动、Y 轴平动、绕 Z 轴的转动集成在此多自由度板上。内框和 Z 向 4 个驱动器刚性相连,外框为其运动输出端。当 X 向驱动陶瓷伸长时,工作台外框产生沿 X 方向的平动,当 Y 向驱动陶瓷伸长时,工作台外框产生沿 Y 方向的平动,当 X

向和 Y 向驱动陶瓷同时运动时,产生沿 XY 方向的合运动。2 个绕 Z 轴转动驱动陶瓷加以相同电压而同时伸长时,推动中框转动,工作台外框随之产生转动。载物台固定孔均布在外框的内侧,外框的运动带动载物台作相应运动。反射镜调整支架固定孔用于反射镜支架的微调与固定。

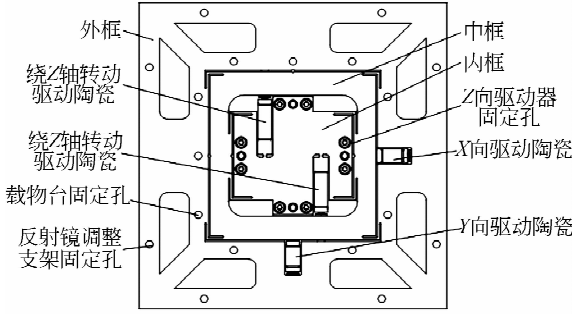


图 3 多自由度板结构图

Fig. 3 Structure of multi-DOF board

绕 X、Y 轴转动机构如图 4 所示。考虑到工作台需具有较高刚度以获得较高的固有频率,同时考虑结构的对称性,采用对称布置 ABCD 四组压电陶瓷致动器完成绕 X、Y 轴转动的方案。假设 Z 向陶瓷驱动器的额定伸长量均为  $\Delta x$ , 如要完成绕 X 轴的转动,步骤如下:初始化后,ABCD 四组压电陶瓷致动器同时伸长到  $1/2\Delta x$ ,之后 BD 两组保持不动,A 继续加电压伸长,C 减小电压使柔性铰链收缩,使和 ABCD 四组驱动机构相连的多自由度板产生绕 X 轴的转动。

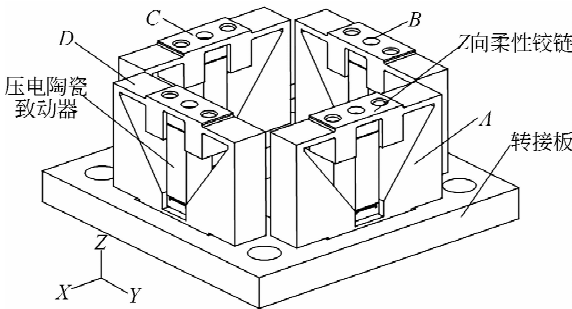


图 4 绕 X、Y 轴转动机构

Fig. 4 Mechanism of rotating around X&Y axis

由弹性导轨组成的工作台系统可简化为质量-弹簧-阻尼力学模型。 $k_1$  为压电陶瓷的刚度,  $m$  为工作台的质量,  $k$  为弹性导轨的刚度。当微位移器的输入位移为  $x$  时,工作台的稳态输出位移

为  $y$ , 经过公式推导可得系统输出与输入的关系为:

$$y = k_1 / (k + k_1) x. \tag{1}$$

设计中所用压电陶瓷致动器的刚度和位移行程是已知量,通过式(1)可以推算出相应的铰链刚度。设计中全部采用了平行板柔性铰链,通过理论计算,很容易得出铰链的具体参数,相关研究已经很成熟<sup>[6-7]</sup>,这里不再赘述。

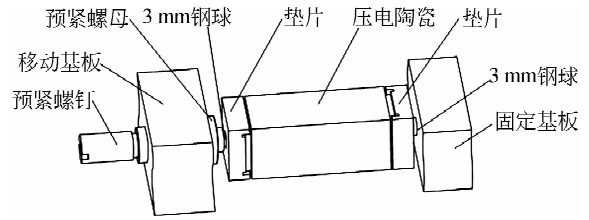


图 5 压电陶瓷无应力夹持及预紧机构

Fig. 5 Clamping and preload mechanism for piezoelectric ceramics without stress

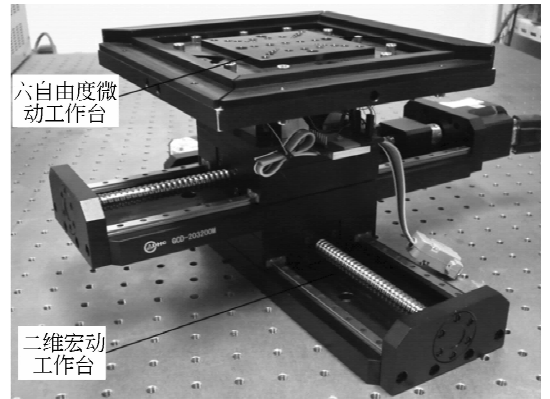


图 6 大行程二维纳米工作台机械系统

Fig. 6 Mechanical system for large stroke 2-DOF nano-positioning stage

压电陶瓷多采用层叠型结构以增加其行程,然而此种方法却使其抵抗扭转及径向应力的能力降低。设计中所用陶瓷为裸陶瓷,相比机械封装的陶瓷更易因使用不当而损坏。设计了图 5 所示的压电陶瓷无应力夹持及预紧机构。2 个垫片面对面成  $90^\circ$  角卡在压电陶瓷两端的绝缘片上,等效为将陶瓷卡在一个十字滑槽中,使得陶瓷的位置被限定而垫片却可以在小范围内滑动。垫片的背面、固定基板以及预紧螺钉的前段都加工有锥形孔,直径 3 mm 的钢球卡在其中,在对应两锥形孔之间起定位及传递力的作用。陶瓷的预紧通过

嵌在移动基板中螺距为 0.35 mm 的预紧螺母和预紧螺钉实现。此结构使得裸陶瓷在工作中所受扭转应力及径向应力极小。整体设计的大行程二维纳米工作台机械系统实物图如图 6 所示。

## 4 实验测试及分析

### 4.1 六自由度工作台行程测试

对装配好的六自由度微动工作台进行了行程测试。通过与压电陶瓷配套的驱动电源对各个自由度对应的陶瓷进行加压测试,使用雷尼绍三光束激光干涉仪进行读数。测试结果显示工作台具有很好的重复性,各自由度行程如表 3 所示,满足预期设计要求。

表 3 六自由度微动工作台行程测试结果

Tab. 3 Test result of travel ranges for 6-DOF micro stage

X 向行程	Y 向行程	Z 向行程
9.3 $\mu\text{m}$	9.2 $\mu\text{m}$	9.5 $\mu\text{m}$
绕 X 轴转角	绕 Y 轴转角	绕 Z 轴转角
102"	86"	134"

### 4.2 宏微工作台组合定位测试

由于测量系统和控制系统尚未完善,采用手动控制模拟宏微工作台的组合定位。通过宏动工作台控制器控制宏动台运动,设定每次运动 50 mm,利用雷尼绍激光干涉仪测得其定位误差,通过微动工作台行程测试曲线拟合函数反解出微动台补偿此偏差所需的驱动电压,然后通过压电陶瓷电源控制软件输出相应的电压给六自由度微动工作台,同时对此电压值实时进行手动微调。表 4 和表 5 分别给出了宏微工作台 X 向组合定位测试和 Y 向组合定位测试的结果,结果显示,通过六自由度微动工作台的补偿作用,工作台系统在全行程内的直线定位误差由 3  $\mu\text{m}$  降至 25 nm 以内,微动工作台对宏动工作台的直线定位误差进行了有效的补偿。

试验中的测量仪器为 Renishaw XL-80 型双频激光干涉仪,其理论分辨率为 1 nm。由于实验条件的限制,测试发现在实验环境中由于大气及振动等因素引起的激光干涉仪的自身示数漂移为 10~20 nm,这是总误差的重要来源。如进一步

提高系统精度,需要对测试系统和环境进行改进和完善。

表 4 宏微工作台 X 向组合定位测试

Tab. 4 Linear combination positioning test along X axis

预设位移/mm	宏动台定位值/mm	微动台补偿后读数/mm	总误差/nm
50	50.002 041	49.999 983	17
100	100.001 144	99.999 975	25
150	149.998 401	150.000 014	14
200	200.001 889	200.000 018	18

表 5 宏微工作台 Y 向组合定位测试

Tab. 5 Linear combination positioning test along Y axis

预设位移/mm	宏动台定位值/mm	微动台补偿后读数/mm	总误差/nm
50	49.999 554	50.000 008	8
100	100.001 493	100.000 014	14
150	149.996 365	150.000 023	23
200	199.999 824	199.999 979	21

通过实验验证了六自由度微动台工作台对宏动工作台角度误差进行补偿的有效性。宏动工作台和微动工作台组合装配调试后,以宏微工作台的几何中心为坐标原点建立二维平面坐标系,则 X 向运动为 -100~+100 mm, Y 向运动为 -100~+100 mm。在此坐标系中,通过宏动台控制器控制宏动工作台粗定位运动到 (50 mm, 50 mm)、(50 mm, -50 mm)、(-50 mm, -50 mm)、(-50 mm, 50 mm) 4 个点,利用双光束激光干涉仪的角度测量功能测量这 4 个点上载物台的角度偏差。通过标定的压电陶瓷施加电压和驱动角度的关系曲线反解出微动台补偿此偏差所需的电压值,配合手动微调,通过微动工作台对载物台偏摆角误差进行补偿。同理在 (50 mm, 50 mm)、(-50 mm, -50 mm) 两点对宏微工作台系统绕 X 轴转角误差和绕 Y 轴转角误差进行了测试。测试结果如表 6、表 7、表 8 所示。

由于压电陶瓷驱动器固有的迟滞、蠕变和非线性特性,造成不同的加压曲线甚至不同的加压

间隔都会引起压电陶瓷伸缩量的不同<sup>[8]</sup>,因此上述测试中必须在反解电压的基础上进行手动微调才能获得相对较高的定位精度,这也从侧面说明了此工作台系统建立闭环反馈控制系统的必要性<sup>[9]</sup>。

表 6 宏微工作台偏摆角组合定位测试

Tab. 6 Combination positioning test of yaw for macro-micro stage

坐标点 (mm,mm)	宏动台 定位值/(")	微动台补偿 后读数/(")	总误差 (")
(50,50)	51.153 55	6.237 32	6.237 32
(50,-50)	6.737 97	5.648 36	5.648 36
(-50,-50)	43.659 34	8.148 45	8.148 45
(-50,-50)	10.756 28	7.885 73	7.885 73

表 7 宏微工作台绕 X 轴转角组合定位测试

Tab. 7 Combination positioning test of rotating around X axis

坐标点 (mm,mm)	宏动台 定位值/(")	微动台补偿 后读数/(")	总误差 (")
(50,50)	27.167 68	7.984 66	7.984 66
(-50,-50)	24.426 66	9.564 42	9.564 42

表 8 宏微工作台绕 Y 轴转角组合定位测试

Tab. 8 Combination positioning test of rotating around Y axis

坐标点 (mm,mm)	宏动台 定位值/(")	微动台补偿 后读数/(")	总误差 (")
(50,50)	31.052 35	9.768 45	9.768 45
(-50,-50)	21.684 49	8.146 37	8.146 37

## 5 结 论

基于宏微组合驱动方式,研制了一种大行程二维纳米工作台系统。该系统用一个串联结构的大行程二维宏动工作台保证其行程达到 200 mm,由基于压电陶瓷致动器设计的六自由度微动工作台实现纳米分辨率的驱动,同时对宏动工作台进行了定位及角度误差的综合补偿,从而实现了具有纳米驱动分辨率的大行程二维工作台系统。实验测试表明,该工作台系统达到了 200 mm×200 mm 的宏动行程,在闭环控制下,通过六自由度微动工作台的补偿作用,使得工作台系统在全行程内的直线定位误差由 3 μm 降至 25 nm 以内,各角度偏差由上百秒降至 10"以内,实现了预期设计要求。

## 参考文献:

- [1] 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社,1999.  
ZHANG G X. *Coordinate Measuring Machine* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 王晨晨. 异端类型三坐标测量机结构原理及误差修正技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.  
WANG C C. *Study on the structural principle and error correction technology of the different types of CMM* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [3] 石照耀,张斌,费业泰. 阿贝原则再认识[J]. 仪器仪表学报,2012,3(5):1128-1133.  
SHI Z Y, ZHANG B, FEI Y T. Re-visit to the Abbe Principle [J]. *Chinese Journal of Scientific In-*

- strument*, 2012, 3(5): 1128-1133. (in Chinese)
- [4] 王伟丽,范光照,刘玉圣. 基于共平面二维工作平台的精密测量系统[J]. 中国计量学院学报,2005,16(4):264-267.  
WANG W L, FAN G Z, LIU Y S. Precision measurement system based on coplanar XY-stage [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2005, 16(4): 264-267. (in Chinese)
- [5] 李国,王波,董申,等. 超精密机床宏/微双驱动微位移机构的设计与控制[J]. 光学精密工程,2009,17(6):1426-1430.  
LI G, WANG B, DONG SH, et al.. Design and control of dual-stage feed drive system in ultra-precision machine tools [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1426-1430. (in Chinese)
- [6] 王纪武,陈恳,李嘉,等. 典型柔性铰链精度性能的研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,2001,41

(11):49-52.

WANG J W, CHEN K, LI J, *et al.* Precision of typical flexible hinges [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2001, 41(11): 49-52. (in Chinese)

[7] 王靖军,裴旭,毕树生,等. 柔性铰链机构设计方法的研究进展[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(13): 2-13.

WANG J J, PEI X, BI S S, *et al.*. State-of-arts of design method for flexure mechanisms [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46 (13): 2-13. (in Chinese)

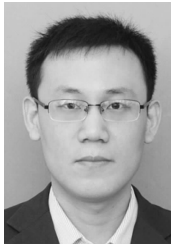
[8] 张涛,孙立宁. 压电陶瓷基本特性研究[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(4): 26-32.

ZHANG T, SUN L N. Research on basic characteristics of piezoelectric ceramics [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(4): 26-32. (in Chinese)

[9] 王俐,饶长辉,饶学军. 压电陶瓷微动台的复合控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1265-1271.

WANG L, RAO C H, RAO X J. Feed-forward control of piezoelectric ceramic positioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1265-1271. (in Chinese)

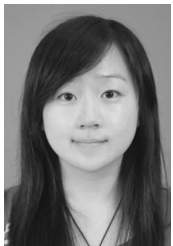
#### 作者简介:



张昔峰(1986—),男,山东枣庄人,工程师,2010年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事精密测试技术与仪器领域的研究。E-mail: zhangxf\_hfut@163.com



黄帅(1987—),男,安徽淮北人,硕士,2010年于中国矿业大学获得学士学位,主要从事精密测试技术与仪器领域的研究。E-mail: huangshuai24@yahoo.cn



袁钰(1988—),女,新疆乌鲁木齐人,硕士,2012年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事现代精度理论及其应用相关研究。E-mail: yuanyu08@126.com



黄强先(1968—),男,山东即墨人,博士,教授,博士生导师,主要从事微纳米三维测量技术、纳米扫描探针技术研究及应用、仪器精度理论研究及应用等领域的研究。E-mail: huangqx@hfut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)