

文章编号 1004-924X(2016)增-0461-07

## 位移补偿器压电陶瓷片微位移自动测量设备

杨 劲,任同群,王晓东\*

- (1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室,辽宁 大连 116024)

**摘要:**针对用于激光陀螺位移补偿器的压电陶瓷片微位移自动测量任务,研制了自动测量设备。本设备采用三坐标机器人作为运动框架,使用光电传感器作为位移检测及反馈控制传感器,解决运动位置自动检测问题,实现设备的自动化运行。在零件拾取及固定装置中应用真空吸附技术,有效避免薄片零件意外损伤情况的发生。使用高精度电感测微仪,采取双测头测量,相比单测头测量方式,消除了零件搬运及放置位置误差对测量结果的影响。设备可批量完成压电陶瓷片的自动上料、测量和分拣配对工作。实验表明,与现有测量方法相比,本文研制的压电陶瓷片微位移自动测量设备能够提高测量速度60%以上,全量程测量精度 $0.5\mu\text{m}$ ,重复精度 $\leq 0.06\mu\text{m}$ 。满足测量技术要求,测量结果可靠性高、一致性好。

**关键词:**精密测量;压电陶瓷片;微位移测量;自动化设备

**中图分类号:** 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20162413.0461

## Automatic measurement equipment for micrometric displacement of piezoelectric ceramic piece of displacement compensator

YANG Jin, REN Tong-qun, WANG Xiao-dong\*

- (1. Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: xdwang@dlut.edu.cn

**Abstract:** Aimed at automatic measurement task of micrometric displacement of piezoelectric ceramic piece for laser gyroscope displacement compensator, automatic measurement equipment is developed. Three-dimensional robot is adopted in the equipment as motion frame, and photoelectric sensor is used as sensor for displacement detection and feedback control, which solves the problem of automatic motion detection, and realizes automatic operation of equipment. The vacuum technology is applied in parts pickup and fixation, which effectively avoids the occurrence of accidental damage of slice parts. The high-precision inductance micrometers are used with working mode of relative measurement. As a result, the influence of part transport and placement error on measuring result is eliminated effective-

收稿日期:2016-05-10;修订日期:2016-06-07.

基金项目:高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项“高精度惯性器件微制造装备”课题资助项目(No. 2013ZX04001-091)

ly. The equipment can finish the work of automatic part loading, measurement, selection and matching in batches. The experiment results show that the developed equipment improves measuring speed in more than 60 percent compared with existing measuring method, the measurement accuracy is  $0.5 \mu\text{m}$  in full measuring range, the repeated accuracy is no more than  $0.06 \mu\text{m}$ . Thus, the requirements of the measurement is satisfied based on the high reliability and consistency of the developed equipment.

**Key words:** precision measurement; piezoelectric ceramic piece; micrometric displacement measurement; automation equipment

## 1 引言

激光陀螺是一种用于测量物体转动速度的光学惯性器件<sup>[1-2]</sup>,被广泛应用于航空航天等领域,其原理是在闭合环形光路中通过测量两束反向激光相位差的变化,计算出该闭合光路的旋转角速度。

激光陀螺谐振腔长易受外界影响而发生微米级的变化,引起激光频率偏移,对工作稳定性产生致命影响。以压电陶瓷片为核心的位移补偿器可通过压电效应产生微米级的位移补偿,调整腔长以确保激光陀螺以稳定频率工作<sup>[3]</sup>。作为位移补偿器核心驱动部件,压电陶瓷片需根据位移性能配对使用。因此,需要一种测量手段能够高效、准确的测量压电陶瓷片的位移量。

目前,对于压电陶瓷微位移的测量是以激光干涉法为代表的光学测量技术<sup>[4-5]</sup>为主,在需要批量测量时则多采用借助某些测量仪器的人工测量方法。双束激光干涉法<sup>[6]</sup>是目前使用较普遍的高精度微位移测量方法,其分辨率达到  $10^{-14} \text{m}$ ,是目前应用最为广泛的微位移测量方法。光学测量法通常能够获得较高的分辨力和测量精度,适用于测量要求较高的场合。但光学测量系统普遍对测量环境敏感度较高,振动、空气环境等因素会对测量结果造成较大干扰,此外对操作人员的技术要求较高,故多应用于实验室内小批量、高精度微位移测量任务。而电学测量技术因其操作简单,性能稳定,可靠性高,不宜受温湿度等环境因素影响,被广泛应用于各类位移测量场合。在实际生产中,可以将该类测量仪器加入生产线中配合自动化生产和检测。

目前对于陶瓷片微位移的批量检测所采用的人工测量方法是将陶瓷片直立并沿竖直方向固

定,使用单只电感测微仪由顶端压紧,加载电压并测量。该方法效率低下,测量结果受工人操作影响较大,检测质量难以保证,严重影响了微装配等后续工作的产业化和规模化发展。利用机器人自动化技术<sup>[7-8]</sup>可以较好的避免人工操作产生的弊端,机器人工作效率高、稳定性高、重复性好,有利于微机电系统的发展。

综上,本文研制了一种能够自动化批量测量压电陶瓷片微位移的设备。使用直角坐标机器人作为运动框架,采用双侧接触式测量策略,满足不同形状压电陶瓷片的测量需求,解决了现有测量方式效率低、可靠性低、一致性差的问题。

## 2 自动测量设备总体方案

拟测量对象为环形和矩形陶瓷片,厚度为  $0.4 \text{mm}$ 。设备设计指标如下:全量程测量精度  $\leq 0.5 \mu\text{m}$ ,测量重复精度  $\leq 0.06$ ,测量力小于  $0.2 \text{N}$ ,可加载  $0\sim 300 \text{V}$  直流驱动电压,能够完成单批次 50 片压电陶瓷的自动上料、测量和分拣作业。

根据设备的设计指标,测量过程可分解为上料、测量和分拣等环节。上料过程包含零件的拾取、搬运和放置。为避免机械式拾取可能对零件造成的损伤,采用真空吸附式拾取方式,并采用直角坐标机器人式的运动框架结合光电传感器,以便准确定位关键运动位置并保护硬件。测量过程包括陶瓷片驱动电压的精确加载以及微位移的精确测量。设备用于实际生产线的大批量测试,可靠性要求较高,因而考虑采用基于电感测微传感器的接触式测量,同时采用双向相对测量策略,以减小对运动框架定位精度的要求。此外,驱动电源的控制精度严重影响测量精度,因而应选用高精度、高稳定性的陶瓷专用驱动电源。分拣过程

主要为根据测量结果完成合格陶瓷片的配对和分拣,可通过设计不同规格的回收料仓实现。

基于上述分析,本设备采用模块化设计理念,将设备分为测量模块、搬运模块和上下料模块。总体设计方案如图 1 所示。

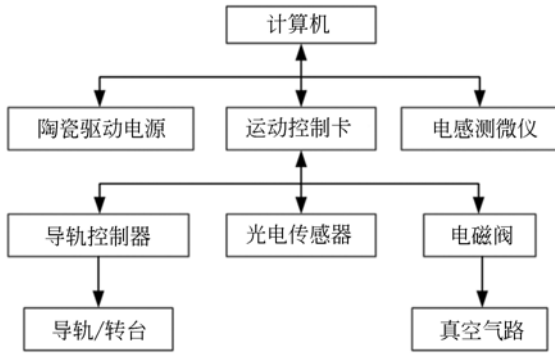


图 1 自动测量设备总体设计框图

Fig. 1 Schematic diagram of automatic measuring equipment

### 3 测量设备研制

设备整体安装在铁磁不锈钢光学面包板上。面包板下方安装缓冲垫,起缓冲隔振作用,使整体设备具有较好的稳定性。

#### 3.1 测量模块

测量模块完成陶瓷片驱动电压加载及微位移测量作业,由电感测微仪、测量平台和上、下电极组成。结构如图 2 所示,电感测微仪固定在导轨上,分别安装于测量平台两侧,下电极位于测量平台,上电极安装于运动框架竖直导轨。测量作业时,压电陶瓷片由搬运模块放置于测量平台下电极,并由上电极压紧固定,导轨带动电感测微仪由两侧与陶瓷片接触,驱动电压通过上下电极加载至陶瓷片,电感测微仪记录并保存测量结果,完成测量作业。本设备采用的电感测微仪量程为 $\pm 1\ 500\ \mu\text{m}$ ,全量程测量精度为 $0.2\ \mu\text{m}$ ,重复性精度为 $0.015\ \mu\text{m}$ ,驱动方式为气动式,可调节测量力。导轨行程为 $15\ \text{mm}$ ,定位精度小于 $10\ \mu\text{m}$ 。测量平台选用旋转滑台,以便于测量陶瓷片不同方向上的位移量。上下电极材料为铜,表面镀金以使其获得较好的导电性。下电极上开有气孔,

下方连接气路回转接头,可通过真空吸附固定陶瓷片。电极结构如图 3 所示。

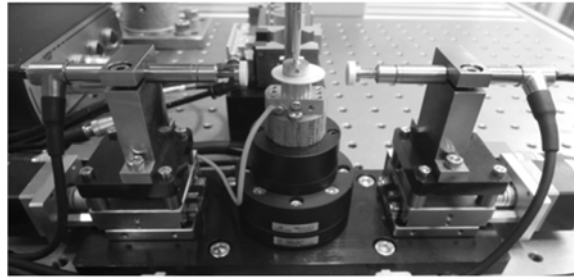


图 2 测量模块实体图

Fig. 2 Photo of measuring module

为防止上电极压紧力过大损伤陶瓷片,使用弹性探针,并通过球面轴承使上电极具备自调整功能,有效避免了接触角度误差带来的局部受力问题。在探头处加装圆环电极,增大接触面积,保证供电和压紧效果。由于上下电极均需连接陶瓷驱动电源,在安装时使用了酚醛树脂和电木制作绝缘连接件,隔离高电压以保护设备和操作人员安全。



图 3 上电极与下电极结构

Fig. 3 Upper electrode and bottom electrode structure

#### 3.2 上下料模块

上下料模块由上料台和下料台组成,分别完成上料前的零件整理定心和测量完成后的分类收集工作,上料台由气爪、对中夹指、零件底座和上料台底座组成,将陶瓷片堆叠放置于零件底座,气

爪带动夹指夹紧陶瓷片即可定心作业。针对任务要求设计了专用夹指和圆形零件底座,夹指具有 1 个 V 型面和 2 个短平面,可分别完成环形及矩形片的定位。底座起限位作用,防止对中夹指对零件造成损伤。

为防止陶瓷片堆叠过多而发生倾倒,在零件底座四周加装挡板作为回收仓。设备共有 5 个合格品回收仓和 1 个废品回收仓,考虑到下料完成后需要人工回收,将回收仓固定在安装板上,下料完成后可以直接将安装板取下并回收陶瓷片。

### 3.3 搬运模块

搬运模块完成陶瓷片的拾取、搬运与放置作业,由水平运动 X 轴和竖直运动 Z 轴组成门式运动框架,将测量模块与上下料模块沿 X 轴安装可减少导轨使用并获得较短的运动路径。X、Z 轴导轨定位精度为 0.02 mm,重复定位精度为  $\pm 0.003$  mm,能够保证拾取和放置运动精度。

拾取臂需检测自身运动位置,并进行拾取和放置动作。上电极则要配合下电极压紧陶瓷片并提供驱动电压。二者运动均为竖直方向,故共同安装于 Z 轴。

将连接杆上端安装固定环后放入直线轴承,并安装于拾取臂安装座。可使其获得平稳高精度的直线运动,同时防止连接杆因重力脱落。连接杆下端连接真空吸盘,由于环形陶瓷片中心有直径为 5 mm 的圆孔,故采用双吸盘结构以确保拾取稳定性。

机械臂结构如图 4 所示,上电极与拾取臂共用一个安装横梁,横梁和上电极套筒上装有发讯片,Z 轴上装有光电传感器。拾取和放置作业时,拾取臂与陶瓷片接触,并与 Z 轴产生相对运动,带动横梁上发讯片触发光电传感器发出反馈信号,Z 轴即停止运动。上电极位置反馈原理与拾取臂相同,由套筒上的发讯片触发光电传感器发出反馈信号,并对 Z 轴发出停止命令。为保护设备运行安全,设计了急停保护装置,当发讯片越过位置检测传感器时,将触发上方的急停传感器,此时设备立即停止所有运动,防止导轨运动过量对设备和陶瓷片造成损伤。设备总体结构如图 5 所示。

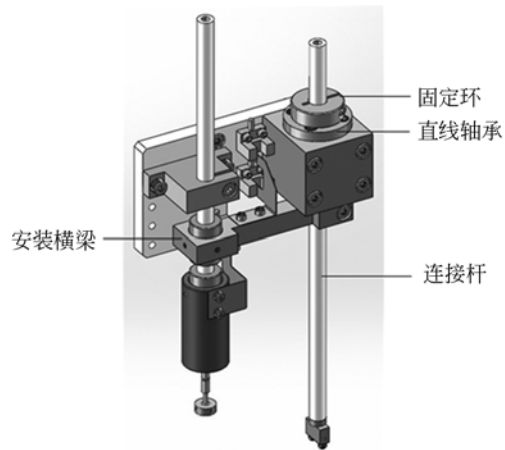


图 4 机械臂结构

Fig. 4 Manipulator structure

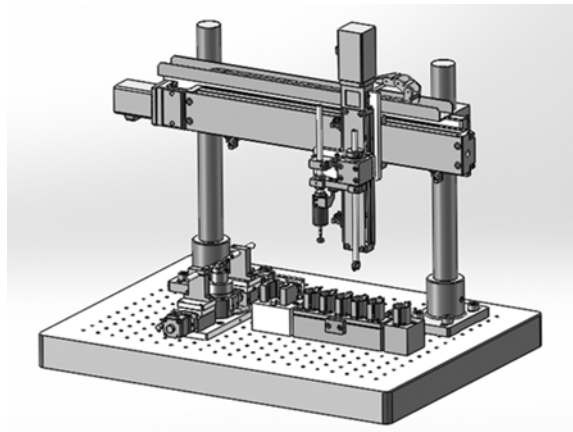


图 5 陶瓷片微位移自动测量设备

Fig. 5 Structure of automatic displacement measuring equipment for piezoelectric ceramic piece

## 4 测量误差来源及影响分析

由于采用双向测量策略,运动模块仅决定了零件拾取和放置的位置精度,不会对测量过程产生影响。测量误差仅来源于电感测头的安装角度误差,如图 6 所示,假设测量时测杆轴线在垂直面内偏角为  $\alpha$ ,陶瓷片产生位移前测头与陶瓷片接触点为 A,发生位移后测头与陶瓷片接触点为 B。即陶瓷片的实际位移为  $L$ 。由于测头存在偏角  $\alpha$ ,测量位移  $L_1 = L \times \cos \alpha$ 。

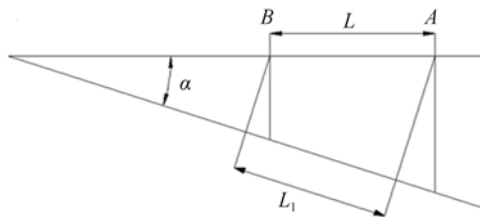


图 6 竖直面测量误差分析

Fig. 6 Measurement error analysis in vertical plane

测量最大误差  $\Delta = L \times (1 - \cos \alpha)$ , 假设安装偏角  $\alpha$  为  $1^\circ$ , 则测量误差约为  $0.00015L$ ,  $L$  为  $0 \sim 2 \mu\text{m}$ , 此时最大误差为  $0.0003 \mu\text{m}$ , 垂直面内测头安装偏角引起的测量误差可以忽略。

假设两测杆轴线在水平面内偏角为  $\beta$ , 由图 7 可知, 对于环形陶瓷片, 测量时由上电极压紧固定, 平面测头与陶瓷片边缘相切, 所以水平面内两测头所测得的位移分别为圆片在半径方向的位移量。故认为两测头测量值之和仍为圆片直径方向上位移量。所以水平面内两侧杆轴线间的夹角不会对测量结果造成影响。而对于矩形片, 水平面内的测杆轴线偏差对测量结果的影响与竖直面相同, 引起的误差远小于测量精度, 可以忽略。

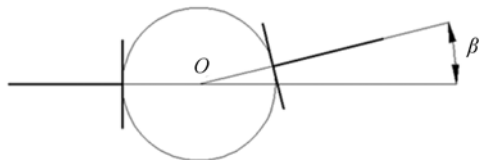


图 7 水平面测量误差分析

Fig. 7 Measurement error analysis in horizontal plane

压电陶瓷片需要驱动电压以产生位移。驱动电压的大小将直接影响最后的测量结果。如果驱动电源的输出电压存在误差, 测量结果就不能正确反映出陶瓷片在同一电压下的位移量。为了保证测量结果的准确性, 必须对驱动电源的输出电压精度做一定要求。

压电陶瓷片的位移特性曲线可近似认为符合线性关系<sup>[9-10]</sup>, 陶瓷片主要工作电压在  $80 \sim 100 \text{ V}$ , 在此范围内, 工作电压每变化  $1 \text{ V}$ , 陶瓷片位移变化量约为  $0.02 \mu\text{m}$ 。为了将电源造成的位移误差控制在  $0.01 \mu\text{m}$  以内以获得较为准确的测量

结果, 将驱动电源的电压精度规定为在  $80 \text{ V}$  内电压偏差值  $\leq 350 \text{ mV}$ , 全量程内  $\leq 0.2\%$ 。这样可将陶瓷片的实际位移量偏差控制在较小范围内, 获得更好的测量一致性, 保证配对的可靠性。设备选用的芯明天压电陶瓷驱动电源输出为直流  $0 \sim 300 \text{ V}$ , 经检测,  $80 \text{ V}$  内电压偏差值  $\leq 20 \text{ mV}$ , 全程偏差值  $\leq 70 \text{ mV}$ , 误差  $\leq 0.023\%$ 。满足精度要求。

### 5 测量实验及结果

设备研制完成后对其整体性能进行测试, 测量实验使用环形陶瓷片, 以 50 片一组进行多次测量, 工作电压  $100 \text{ V}$ 。测量过程未出现异常。原有测量方法单片测量时间约为  $5 \text{ min}$ , 设备单片测量平均时间约为  $2 \text{ min}$ , 工作效率可提高  $60\%$  以上。

#### 5.1 重复性精度

由于重复加载电压时会引入驱动电压误差, 而且受迟滞和蠕变<sup>[11]</sup>等因素影响两次加载相同电压时陶瓷片的形变量也会存在微小差别, 所以对于重复性精度的检测采用如下方法: 对单一陶瓷片重复测量 10 次位移量, 工作电压为  $100 \text{ V}$ 。取 10 次测量结果的标准偏差作为重复性精度。测量结果如表 1 所示。表中数据为 3 片不同批次陶瓷片的测量结果。

表 1 10 次重复测量数据

Tab. 1 Experiment data for 10 repeated measurement of Piezoelectric ceramic slices

测试序号	陶瓷片 1( $\mu\text{m}$ )	陶瓷片 2( $\mu\text{m}$ )	陶瓷片 3( $\mu\text{m}$ )
1	1.61	1.56	1.48
2	1.63	1.50	1.47
3	1.63	1.52	1.49
4	1.63	1.57	1.47
5	1.63	1.55	1.47
6	1.64	1.51	1.46
7	1.65	1.55	1.43
8	1.65	1.50	1.50
9	1.66	1.53	1.47
10	1.67	1.55	1.47

三次测量的标准差分别为  $0.016$ 、 $0.025$ 、 $0.019$ , 均小于  $0.06$ , 满足技术要求。

## 5.2 人机测量数据对比

取同一批陶瓷片,分别采用所研制的设备和原有测量方式进行测量,测量电压为 100 V。测量结果如表 2 所示。结果显示,两组测量数据均

值分别为  $1.451 \mu\text{m}$  和  $1.454 \mu\text{m}$ ,但人工测量结果标准差为  $0.084 \mu\text{m}$ ,设备测量结果标准差为  $0.032 \mu\text{m}$ 。设备测量值离散程度小,测量结果一致性更好,具有更高的可靠性。

表 2 40 片测量数据对比

Tab. 2 Experiment data for 40 Piezoelectric ceramic slices measured by equipment and people

测试序号	设备测量数据( $\mu\text{m}$ )	人工测量数据( $\mu\text{m}$ )	测试序号	设备测量数据( $\mu\text{m}$ )	人工测量数据( $\mu\text{m}$ )
1	1.43	1.26	21	1.46	1.46
2	1.46	1.28	22	1.46	1.48
3	1.43	1.47	23	1.53	1.53
4	1.40	1.56	24	1.49	1.39
5	1.43	1.51	25	1.47	1.43
6	1.39	1.45	26	1.43	1.47
7	1.49	1.51	27	1.40	1.51
8	1.45	1.35	28	1.47	1.42
9	1.45	1.45	29	1.45	1.48
10	1.45	1.19	30	1.47	1.47
11	1.45	1.40	31	1.46	1.52
12	1.36	1.62	32	1.49	1.38
13	1.44	1.52	33	1.49	1.47
14	1.46	1.60	34	1.46	1.44
15	1.45	1.48	35	1.46	1.52
16	1.46	1.51	36	1.45	1.48
17	1.47	1.45	37	1.50	1.36
18	1.43	1.38	38	1.41	1.43
19	1.49	1.48	39	1.47	1.47
20	1.44	1.52	40	1.43	1.51

## 6 结 论

本文介绍了压电陶瓷片微位移测量的研究现状,分析了目前测量方式的缺陷,结合测量任务要求,提出了一种新的测量方案,并完成了设备研制,实现了压电陶瓷片批量自动化测量。解决了

原有测量方法效率低、一致性差等问题。实验结果表明,与原有测量方式相比,文本研制的设备工作效率提升 60% 以上,测量重复精度  $\leq 0.06$ ,具有更高的可靠性,为压电陶瓷片测量的大规模作业提供了一种高效手段。目前设备仅可针对环形片和矩形片进行测量,未来可通过修改测量模块及上下料模块进一步拓展设备的应用范围。

### 参考文献:

- [1] 曾庆化,刘建业,赖际舟,等. 环形激光陀螺的最新发展[J]. 传感器技术,2004,11:1-4.  
ZENG Q H, LIU J Y, LAI J ZH, et al.. Newest developments of ring laser gyro[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2004, 11:1-4. (in Chinese)
- [2] 刘静. 激光陀螺机械抖动控制技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.  
LIU J. *Research on Mechanical Dither Control of Ring Laser Gyro*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [3] 邰正利,闫锋,王文林. 激光陀螺用压电陶瓷材料的制备与研究[J]. 压电与声光,2015,37(4):595-598.  
HUAN ZH L, YAN F, WANG W L. Preparation

- and research of piezoelectric ceramic used for laser gyro [J]. *Piezoelectrics&Acoustooptics*, 2015, 37 (4):595-598. (in Chinese)
- [4] 王青萍,范跃农,姜胜林. 压电薄膜特性参数的测量方法[J]. 压电与声光,2009,31(4):608-612.  
WANG Q P, FAN Y N, JIANG S L. Measurement method for piezoelectric coefficient of piezoelectric thin films [J]. *Piezoelectrics&Acoustooptics*, 2009, 31(4):608-612. (in Chinese)
- [5] 董维杰,宋志杨,崔岩. 压电陶瓷管的微位移测量与非线性校正[J]. 光学 精密工程,2009,17(9):2212-2217.  
DONG W J, SONG ZH Y, CUI Y. Measurement and nonlinear correction for micro-displacement of piezoceramic tube [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2212-2217. (in Chinese)
- [6] LIU J M, PAN B, CHAN H L W, *et al.*. Piezoelectric coefficient measurement of piezoelectric thin films: an overview [J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2002, 75(1-3):12-18.
- [7] 王田苗,陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报,2014,50(9):1-13.  
WANG T M, TAO Y. Research status industrialization development strategy of chinese industrial robot[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(9):1-13. (in Chinese)
- [8] 计时鸣,黄希欢. 工业机器人技术的发展与应用综述[J]. 机电工程,2015,32(1):1-13.
- JI SH M, HUANG X H. Review of development and application of industrial robot technology [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(1):1-13. (in Chinese)
- [9] 朱猛,黄战华,王小军,等. 显微动态散斑法测量压电陶瓷位移特征曲线[J]. 光学 精密工程,2011,19 (4):844-849.  
ZHU M, HUANG ZH H, WANG X J, *et al.*. Measurement of piezoelectric displacement characteristic curves using dynamic speckle correlation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19 (4): 844-849. (in Chinese)
- [10] 孙宝光,杨文艳,程文德. 直流驱动电压下的压电陶瓷特性研究[J]. 压电与声光,2015,37(4):643-645.  
SUN B G, YANG W Y, CHEN W D. Study on features of piezoelectric ceramic under constant-current slaving voltage [ J ]. *Piezoelectrics&Acoustooptics*, 2015, 37 (4): 643-645. (in Chinese)
- [11] 刘泊,郭建英,孙永全. 压电陶瓷微位移驱动器建模与控制[J]. 光学 精密工程,2013,21(6):1503-1509.  
LIU B, GUO J Y, SUN Y Q. Modeling and control for PZT micro-displacement actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(6):1503-1509. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨 劲(1990—),男,陕西汉中,硕士,研究方向为精密装配及检测。E-mail:5813091@163.com



任同群(1980—),男,辽宁省瓦房店人,博士,副教授,2002年于天津大学获得学士学位,2005年于天津大学获硕士学位,2008年于天津大学获博士学位,主要从事光电测量、精密仪器设计与制造等方面的研究,E-mail:ren\_tq@dlut.edu.cn



王晓东(1967—),男,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1989年于南京航空学院获得学士学位,1992年于哈尔滨船舶工程学院获硕士学位,1995年于哈尔滨工业大学获博士学位,主要从事微装配技术与系统、精密仪器设计与制造等方面的研究,E-mail:xdwang@dlut.edu.cn