

文章编号 1004-924X(2017)06-1494-08

双向作动大行程二自由度稳像机构

黄卫清^{1*}, 党冰楠¹, 王 寅², 孙梦馨¹

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏 南京 210016;

2. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要:针对光学稳像系统的双向动态大行程的设计要求,本文设计了一种可伸缩双向作动的压电作动器,并基于此压电作动器设计了二自由度稳像机构。压电作动器由一个收缩式三角位移放大机构和一个伸张式三角位移放大机构组成。位移放大机构可为压电平台提供足够的行程,柔性铰链可使平台结构更加紧凑。接着,利用有限元分析软件 ANSYS 对平台结构进行静力学仿真,模拟了平台的位移和应力变化。最后对原理样机进行了实验分析,实验结果显示所设计压电平台在低电压和低频率下有足够大的行程和足够快的响应速度,作动器在 120 V 电压下的输出位移在 67 μm 左右,基本满足稳像系统的性能要求,故平台结构的设计方案是可行的。

关键词:光学稳像;二维平台;压电直线作动器;位移放大机构

中图分类号:TH112.5;TN384 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172506.1494

Two-freedom image stabilization institution of large stroke of bidirectional actuation

HUANG Wei-qing¹, DANG Bing-nan¹, WANG Yin², SUN Meng-xin¹

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

* Corresponding author, E-mail: mehwwq@nuaa.edu.cn

Abstract: Aiming at the design requirement of bidirectional dynamic long stroke in optical image stabilization system, a kind of scalable and bidirectional piezoelectric actuator was proposed, and two-freedom image stabilization institution was designed based on this piezoelectric actuator. This piezoelectric actuator was made up of a shrinkage triangle amplification mechanism and a stretching triangle amplification mechanism. These amplification mechanisms can provide enough stroke for piezoelectric platform. Meantime, flexure hinge can make piezoelectric platform more compact. Static simulation of platform was conducted by analysis software ANSYS, and displacement and stress variation of platform were analyzed. At last, prototype model experiment analysis was implemented. Experiment result shows that proposed piezoelectric platform has enough large stroke and quick responding speed under low voltage and low frequency, and output displacement of actuator is about 67 μm under voltage of

收稿日期:2016-09-28;修订日期:2016-12-01.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51375224);华侨大学高层次人才科研启动费资助项目(No. 15BS102)。

120V. So it can be concluded that design scheme of platform structure is feasible and it basically satisfies performance requirement of image system.

Key words: Optic image stabilization; two-dimension platform; linear piezoelectric actuator; displacement amplification institution

1 引 言

红外成像导引技术因具有全天时工作、对气象环境条件要求低等特点,近年来成为世界各国重点发展的高端技术之一^[1-4]。在红外成像过程中,由于探测器与目标间的相对运动速度较大以及弹体和成像产品自身振动等原因,导致获得的图像模糊,对制导精度产生了很大影响。增加光学稳定系统是解决图像模糊,提高红外成像产品性能的重要手段^[5]。光学稳像系统在红外成像产品中有着重要作用。它一方面稳定光轴,另一方面接受信号驱动光轴去跟踪目标。

光学稳像系统是通过移动成像系统中某一光学元件的位置实现稳像的。现有稳像系统中的伺服系统通常由各种不同类型的陀螺或它们的组合组成,体积较大且精度难以提高;另外响应速度也不能满足高速工作的需求。因此需要设计有效的伺服系统以显著提高稳像机构的精度和响应速度,并提升稳像系统的抗过载能力,而且使稳像系统小型化。

压电作动器,尤其是压电叠堆式作动器具有能量转换效率高、电源功耗低、响应速度快、分辨率高、输出力大的特点,特别是能实现低压驱动并且体积较小,是稳像系统中理想的驱动器件^[6]。以压电叠堆为核心的压电式直线作动器作为伺服系统中的执行器,可以显著提高稳像系统的精度和响应速度,特别适用于星载或机载环境下的各种成像机构。国内学者对此已经进行了大量的研究。2008年,中国科学院的夏永泉等人提出了用于航空遥感的二维像移补偿镜结构^[7]。2010年,华中科技大学的吴鑫等人设计了用于红外凝视成像系统的光学微扫描器^[8],中国科学院的廖胜凯等人在2011年设计了采用压电陶瓷驱动器的高频像移补偿系统^[9],2013年上海大学罗均等人设计了一套基于球形超声电机的具有三个旋转自由度的机器人仿生眼结构,有效解决了机器人工作时视觉成像不稳定的问题^[10]。

通过分析上述文献,本文设计了一种双向作动大行程二自由度稳像机构,其中压电直线作动器为主要作动元件。压电直线作动器可进行可伸缩双向作动,其以压电叠堆为核心驱动单元,由一个收缩式三角位移放大机构和一个伸张式三角位移放大机构串联组成,能够满足大行程和双向动态作动的设计目标。压电直线作动器一端固定,另一端通过柔性铰链和平台连接,驱动平台上的光学元件在二自由度平面内向指定位置移动,达到稳定成像的目的。

2 压电平台整体结构设计

2.1 平台结构设计

图1为二自由度稳像机构的结构示意图。光学元件放置在中央正方形平台上。两个压电直线作动器分布在正方形平台的两个相邻直角边上,压电直线作动器一端由柔性铰链固定,另一端通过柔性铰链^[11]和平台连接。通过合成两个垂直方向上的输出位移,平台上的光学元件可以在二自由度平面内任意移动,实现作动目标。

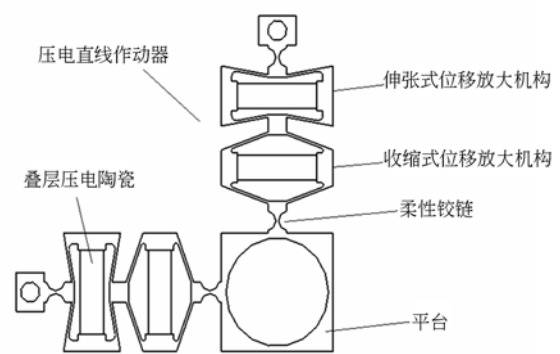


图1 平台结构示意图

Fig. 1 Schematic of stage structure

2.2 作动器结构设计

压电直线作动器的设计目标为输出位移放大和双向主动输出。为了实现这两个设计目标,作动器结构由一个伸张式三角位移放大机构和一个收缩式三角位移放大机构串联组成。作动器结构

示意图如图 2 所示。

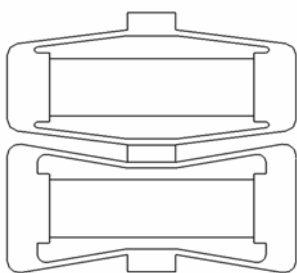


图 2 压电直线作动器

Fig. 2 Linear piezoelectric actuator

2.2.1 位移放大原理

由于压电叠堆的输出位移较小(一般不超过 $50\ \mu\text{m}$),从而限制了其在某些情况下的应用。为了满足应用所需的作动行程,需要对压电叠堆的输出位移进行放大。国内外学者已对位移放大机构进行了大量研究。目前常用的微位移放大机构有采用杠杆放大原理的机构、三角放大原理的机构、压曲放大原理的机构等^[12-15]。采用三角放大原理的机构的主要特点是机构紧凑,位移放大倍数理论上可以达到很大,同时也具有很好的动态特性。因此,基于三角放大原理的微位移机构可以很好地满足作动器需求。三角微位移放大原理如图 3 所示。

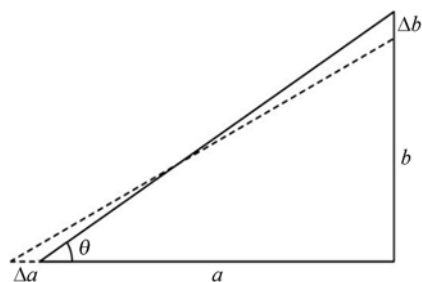


图 3 三角放大原理示意图

Fig. 3 Triangle amplification principle

图 3 中,设长直角边为 b ,短直角边为 a ,长直角边与斜边的初始角度为 θ ,当长边伸长 Δb 时,短边缩短 Δa ,则有

$$a^2 + b^2 = (a - \Delta a)^2 + (b + \Delta b)^2, \quad (1)$$

由式(1)可得放大倍数为

$$\beta = \frac{\Delta a}{\Delta b} \approx \frac{b}{a} = \frac{1}{\tan \theta}. \quad (2)$$

由式(2)可知, β 只与 θ 有关,而与斜边和直

角边的长度无关。随着 θ 的不断减小, β 的增长曲线呈反正切型,因此在较小的角度下可以实现较大的放大倍数^[16]。在放大倍数增长平缓区域和增长剧烈区域分别选择一个角度来设计位移放大机构,验证角度变化对放大机构性能的影响,对下一步一体化平台设计提供依据。

2.2.2 收缩式三角微位移放大机构

收缩式三角微位移放大机构的结构示意图如图 4 所示。

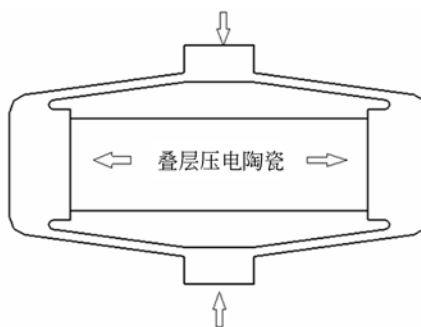


图 4 收缩式三角放大机构

Fig. 4 Shrinkage triangle amplification mechanism

放大机构设计为菱形对称结构,其中 4 条斜边柱与菱形两条对角线构成 4 个相互对称的直角三角形,通过菱形两对对角线的不等长来实现位移放大^[17-18]。压电叠堆置于位移放大机构内部,位于菱形的长对角线方向。当压电叠堆两端施加的电压升高时,压电叠堆在长对角线上伸长,经过位移放大机构放大后,将在菱形机构的短对角线上产生收缩形变。

2.2.3 伸张式三角微位移放大机构

伸张式三角微位移放大机构的结构示意图如图 5 所示,放大机构设计为对称多边形结构,其中四条斜边、斜边柱及长对角线构成 4 个相互对称的直角三角形,压电叠堆置于位移放大机构内部,位于放大机构的长对角线方向。当压电叠堆两端施加的电压升高时,压电叠堆在长对角线上伸长,经过位移放大机构,在短对角线上产生伸张形变。

2.2.4 压电直线作动器作动机理

压电叠堆可以承受很大的压力但是几乎不能承受拉力。因此当压电叠堆两端电压升高,压电叠堆伸长时,受到放大机构压力作用,两种三角微位移放大机构能够进行主动作动,响应速度快且输出易控制。但当压电叠堆两端电压降低,压电叠堆收缩时,由于不能承受拉力,两种微位移放大

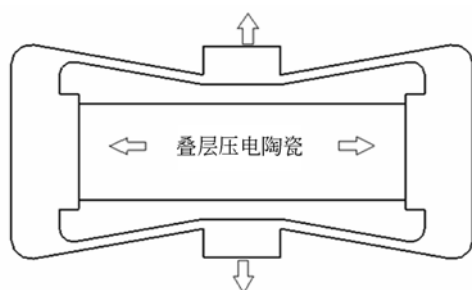


图 5 伸张式三角位移放大机构

Fig. 5 Stretching amplification mechanism

机构只能依靠结构自身的弹性恢复力作动,其作动响应较慢且不受控制。对于上述结构的作动器,两个三角位移放大机构能够将压电叠堆的输出位移放大,另外通过施加在两个放大机构压电叠堆上的电压差,能使作动器在同一直线上进行两个不同方向的主动作动,满足作动器的设计目标。

3 压电平台的有限元分析

为了验证压电平台结构的位移特性,采用有限元仿真软件 ANSYS 对平台进行静力学分析。平台材料选用 45# 钢,收缩式位移放大机构角度 θ 为 20° ,伸张式位移放大机构 θ 为 10° ,将压电平台看作各项同性材料。压电平台作动的位移是由相邻直角边上的两个相同作动器的作动矢量合成的,因此只对压电直线作动器的位移特性进行仿真。

保持压电直线作动器固定端面不动,在压电叠堆和放大机构的接触面上加载位移。压电叠堆在 100 V 电压下的输出位移为 $10 \mu\text{m}$,则各接触面上的加载位移为 $5 \mu\text{m}$ 。由于压电平台相邻直角边上的作动器结构完全一致,因此仿真时分别进行两种方式加载:收缩式位移放大机构加载(图 6 所示),伸张式位移放大机构加载(图 7 所示)。

图 6 仿真结果显示,收缩式三角微位移放大机构的位移放大倍数为 2.7,和理论计算放大倍数 2.7 一致。

图 7 仿真结果显示,伸张式三角微位移放大机构的位移放大倍数为 4.7,比理论计算放大倍数 5.6 小。

由仿真结果可以看出在角度较大时,放大倍

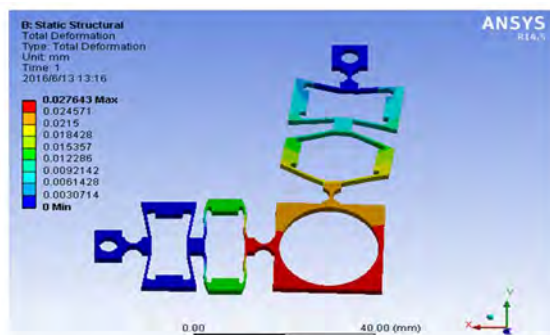


图 6 收缩式放大机构仿真图

Fig. 6 Shrinkage mechanism simulation graph

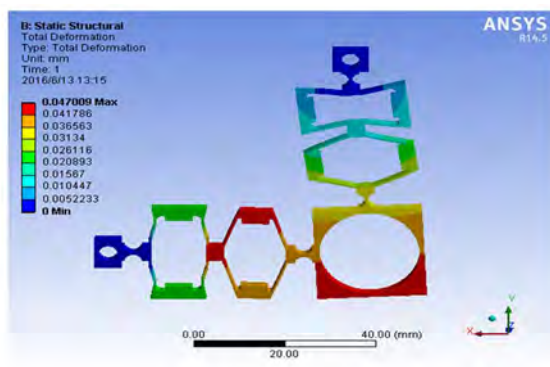


图 7 伸张式放大机构仿真

Fig. 7 Stretching mechanism simulation graph

数主要由角度控制,受其他尺寸影响较小,在角度较小时,放大倍数受结构其他尺寸的影响较大。在一个方向作动时,另外一个方向也会产生一定的位移,因此需要在驱动控制环节中加入反馈系统来调节平台位移。

4 压电平台实验研究

4.1 压电平台机构实验测试原理

根据平台结构模型和有限元仿真结果制作了平台结构的样品,对样机进行了一系列实验验证。实验使用丹麦 Noliac 公司的 NAC2013-H14 型压电叠堆,外形尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 。试验之前,将上述型号的 4 个压电叠堆设置一定的预压力分别安装在平台的 4 个位移放大机构中。放大机构安装完成后,用螺栓将平台固定在隔震台上。压电作动器的输出位移为微米级别,试验使用的测试仪器为基恩士 LK-HO20 型激光位移传感器,测量精度为 1 nm 。将位移传感器

固定在放置光学元件的平台另一端来测量作动器最终输出位移。实验原理示意图如图 8 所示。



图 8 实验装置及各组成部件

Fig. 8 Experimental setup and its components

试验时为了测试作动器在缓慢变化情况下的位移变化情况,信号发生器可以提供 4 路相互独立的正弦信号,通过功率放大器将信号幅值放大 20 倍施加在压电直线作动器的 4 个位移放大机构的压电叠堆上。示波器用来监测输入信号的幅值、频率等各个指标。通过调整某个作动器中放大机构压电叠堆的输入电压差,将压电平台向指定的方向移动。激光位移传感器的激光束对准平台的位移输出端,在施加激励信号后,压电平台将产生位移,可通过传感器测得一段时间内压电平台输出端的位置变化,然后通过连接在激光位移传感器的 PC 端软件读取位移变化数据。

4.2 作动器输出位移与电压的关系

压电平台的位移输出是两个相互垂直方向上压电作动器的位移矢量的合成,因此测量两个方向上压电直线作动器的输出位移特性即可获得平台的位移输出特性。由于作动器中两个放大机构独立作动,因此只需测量两个位移放大机构的位移输出特性。测量位移放大机构的输出位移与电压的关系时,保持正弦电压频率恒定为 50 Hz,电压幅值从 10 V 起,以 10 V 为梯度依次增加到 120 V。通过激光位移传感器读取在各个电压数值下平台在位移输出端的幅值变化,并记录数据。图 9 是压电直线作动器中两个位移放大机构的输出位移随电压变化图。

以伸张式放大机构输出位移为正,则收缩式放大机构输出的位移与其方向相反,为负。从图中可以看出,伸张式放大机构和收缩式放大机构的位移-电压曲线近似为一条直线,且线性度较

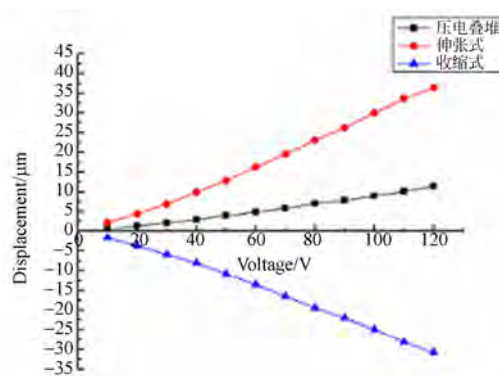


图 9 位移-电压关系图

Fig. 9 Displacement-voltage diagram

好,对压电叠堆的输出位移均有不错的放大效果。在 120 V 电压下,伸张式位移放大机构的输出位移为 $38.86 \mu\text{m}$,放大倍数为 3.6。在 120 V 电压下,收缩式位移放大机构的输出位移为 $28.25 \mu\text{m}$,放大倍数为 2.5。

图 10 为另一压电直线作动器上两个位移放大机构的输出位移与电压关系图。

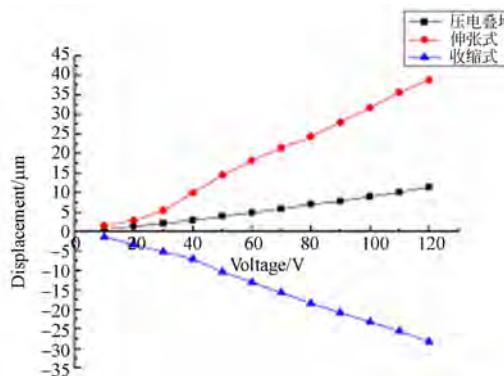


图 10 位移-电压关系图

Fig. 10 Displacement-voltage diagram

图 10 中的位移-电压关系图曲线与图 9 中的关系曲线大致吻合,证明了在一定的电压下两个位移放大机构的输出位移较为稳定,结构的位移-电压实验重复性好,设计方案较为成功。

由放大机构的放大倍数与理论、仿真上的差别可知:在角度较大时,放大倍数变化平缓,此时角度大小为影响放大倍数的主要因素,且对加工精度的要求较低。在角度较小时,放大倍数变化剧烈,此时放大倍数由角度、大小和其他结构尺寸共同决定,且此时对机构的加工精度要求较高,很小的加工误差就会带来很大的放大倍数偏差。

稳像机构是由两个压电直线作动器直接连接在两相邻直角边上的,因此在一个方向上作动时,另一个方向上也会产生一定的位移,存在两自由度的位移耦合现象。因此在实际作动时,需要在控制系统中加入反馈调节环节以保证精度。

4.3 作动器输出位移与频率的关系

为了进一步研究在低频信号下压电作动器的输出位移特性,设计了频率-位移输出实验用于测量恒定电压下,作动器在各个频率时的位移输出端的幅值变化情况。测量时保持正弦电压幅值恒定为 50 V,频率从 10 Hz 起,以 10 Hz 为梯度依次增加到 60 Hz。通过激光位移传感器读取各个频率下的输出位移幅值变化数值。图 11 是压电直线作动器中两个位移放大机构的输出位移随频率变化图。

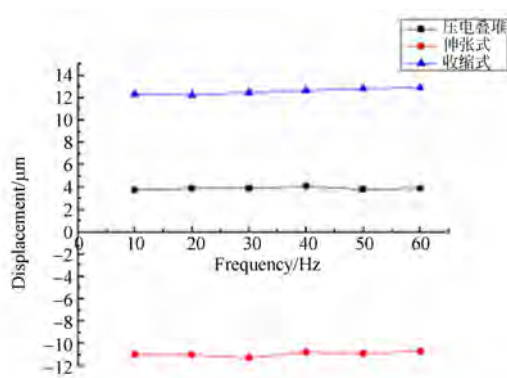


图 11 位移-频率关系图

Fig. 11 Displacement-frequency diagram

参考文献:

- [1] 罗海波,史泽林. 红外成像制导技术发展现状与展望[J]. 红外与激光工程,2009,38(4):565-573.
LUO H B, SHI Z L. Status and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009,38(4):565-573. (in Chinese)
- [2] 王铎. 红外成像制导运动模糊图像恢复技术研究[J]. 光电技术应用,2016,31(4):15-17+21.
WANG D. Research on motion-blur image restoration technology of infrared imaging guidance [J]. *Electro-optic Technology Application*, 2016,38(4):15-17+21. (in Chinese)
- [3] 杨俊彦,吴建东,宋敏敏. 红外成像制导技术发展展望[J]. 红外,2016,37(8):1-6+28.
YANG J Y, WU J D, SONG M M. Development and prospect of infrared imaging guidance technology [J]. *Infrared*, 2016,37(8):1-6+28. (in Chinese)
- [4] 阎胜利,潘洪涛,王子辰,等. 非制冷红外成像在对空制导中应用的关键问题[J]. 红外与激光工程,2015,45(8):2315-2320.
YIN SH L, PAN H T, WANG Z CH, et al.. Key subjects of UCIR guidance applied on air defence [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45

由图 11 可以看出,在 10~60 Hz 的低频区间内,两个放大机构的输出位移变化很平缓,只有 1 μm 左右的变化,其对作动器输出位移的影响几乎可忽略,这证明了作动器在低频环境下可以稳定作动输出位移,设计方案满足要求。另一个方向上作动器的位移-频率关系与上图一致。

5 结 论

本文根据红外成像产品光学稳像技术的要求,设计了一种以压电直线作动器为主要作动部件的二自由度稳像机构,并介绍了作动器和平台的结构设计方法和工作原理。利用有限元仿真软件 ANSYS 对作动器的位移变化进行仿真。最后,对制作的原理样机进行了实验分析,并且论证了角度和机构尺寸对于位移放大机构放大倍数的影响。实验结果证明:在低频低电压的环境下,作动器对压电叠堆的输出位移进行了放大,且能够完成双向主动作动的设计目标。在 120 V 的正弦电压激励下,作动器行程为 67.1 μm 。作动器位移与电压近似成线性关系,且随电压的增加而增大,在低频下作动器位移输出稳定,几乎不受频率变化的影响。该压电直线作动器能够满足光学稳像机构的大行程、小结构和在低频低压下能够双向主动作动的性能要求。实验结果证明了设计方案原理的可行性,对进一步设计一体化的稳像机构提供了依据。

- (8):2315-2320. (in Chinese)
- [5] 朱强华,李胜勇,姜涛. 稳像技术[J]. 舰船电子对抗,2006,29(5):77-80.
ZHU Q H, LI SH Y, JIANG T. Image stabilization technology [J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2006, 29(5):77-80. (in Chinese)
- [6] 黄卫清,史小庆,王寅. 菱形压电微位移放大机构的设计[J]. 光学 精密工程,2015,23(3):803-809.
HUANG W Q, SHI X Q, WANG Y. Design of diamond piezoelectric micro displacement amplification mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):803-809. (in Chinese)
- [7] 夏永泉,贾建军. 用于航空遥感的二维像移补偿镜的设计[J]. 红外,2008,29(8):17-20.
XIA Y Q, JIA J J. Design of 2D image motion compensation mirror for aerial remote sensing [J]. *Infrared*, 2008, 29(8):17-20. (in Chinese)
- [8] 吴鑫,陈四海,仇力,等. 用于红外凝视成像系统的光学微扫描器[J]. 光机电信息,2010,27(11):99-104.
WU X, CHEN S H, CHOU L, *et al.*. An optical microscan for a staring infrared imaging system [J]. *OME Information*, 2010, 27(11):99-104. (in Chinese)
- [9] 廖胜凯,刘银年,陈小文,等. 采用压电陶瓷驱动器的高频像移补偿系统[J]. 红外与激光工程,2011,41(3):539-543.
LIAO SH K, LIU Y N, CHEN X W, *et al.*. High frequency motion compensation system based on PZT actuator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011,41(3):539-543. (in Chinese)
- [10] LUO J, HUANG CH J, LI H Y, *et al.*. Design and simulation of a bionic eye based on spherical ultrasonic motor [J]. *The Journal of New Industrialization*, 2013,3(7):98-105.
- [11] 卢倩,黄卫清,孙梦馨. 基于柔度比优化设计杠杆式柔性铰链放大机构[J]. 光学 精密工程,2016,24(1):102-111.
LU Q, HUANG W Q, SUN M X. Optimization design of amplification mechanism for level flexure hinge based on compliance ratio [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(1):102-111. (in Chinese)
- [12] 杨志刚,刘登云,吴丽萍,等. 应用于压电叠堆泵的微位移放大机构[J]. 光学 精密工程,2007,15(6):884-888.
YANG ZH G, LIU D Y, WU L P, *et al.*. Micro-displacement magnifying mechanism used in piezostack pump [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6):884-888. (in Chinese)
- [13] 李会文,吴晖辉,胡俊峰. 一种位移放大微动平台的设计和特性分析[J]. 机床与液压,2014,42(15):101-103.
LI H W, WU H H, HU J F. Properties analysis and design of a displacement amplification micro-stage [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014, 42(15):101-103. (in Chinese)
- [14] 马力,谢炜,刘波,等. 柔性铰链微定位平台的设计[J]. 光学 精密工程,2014,22(2):238-245.
MA L, XIE W, LIU B, *et al.*. Design of micro-positioning stage with flexure hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2):238-245. (in Chinese)
- [15] 汪建新,刘曜宁,张玲聪,等. 磁致伸缩换能器辐射板位移放大机构设计[J]. 机械设计与制造,2015(3):201-207.
WANG J X, LIU Y N, Z HANG L C, *et al.*. Magnetostrictive transducer radiating plate displacement magnifying mechanism design [J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2015(3):201-207. (in Chinese)
- [16] 徐志科,鄢珂,金龙. 一种正交型压电位移放大机构的研究[J]. 压电与声光,2009,31(2):207-209+212.
XU ZH K, YAN K, JIN L. Research of orthogonal micro-displacement amplifier with piezoelectric actuator [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2009,31(2):207-209+212. (in Chinese)
- [17] 朱华,曹如意,管磊. 应用于干涉显微镜的直线压电作动器[J]. 光学 精密工程,2013,21(6):1524-1530.

ZHU H, CAO R Y, GUAN L. Linear piezoelectric actuator applied to interference microscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1524-1530. (in Chinese)

- [18] 方楚,郭劲,徐新行,等. 适用于FSM系统的菱形微位移放大机构设计[J]. *红外与激光工程*, 2016,

46(10):170-176.

FANG CH, GUO J, XU X H, *et al.*. Design of rhomboid micro stroke amplifier for FSM system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 46(10):170-176. (in Chinese)

作者简介:



党冰楠(1992—),男,陕西渭南人,硕士研究生,2014年于南京航空航天大学获得学士学位,主要从事压电精密驱动技术的研究。E-mail:827358940@qq.com

导师简介:



黄卫清(1965—),男,江苏南通人,教授,博士生导师,1987年、1990年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,1999年于香港理工大学获得博士学位,主要从事压电精密驱动技术的研究。E-mail:mehwq@nuaa.edu.cn