

# 双柔铰导向式非共振压电直线电机\*

王道智<sup>1</sup>, 黄卫清<sup>2</sup>, 孙梦馨<sup>3</sup>, 许文运<sup>1</sup>, 卢倩<sup>1</sup>, 陈西府<sup>4</sup>, 王寅<sup>5</sup>

(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 南京, 210016)

(2. 广州大学机械与电气工程学院 广州, 510006) (3. 南京工程学院机械工程学院 南京, 211167)

(4. 盐城工学院机械工程学院 盐城, 224051) (5. 华侨大学机电及自动化工程学院 厦门, 361021)

**摘要** 光波导封装等领域对拥有大行程、高精度以及高分辨率的微位移平台有大量需求, 在研究微位移平台的过程中设计了一种双铰链导向式非共振压电直线电机。简述了电机的工作原理, 完成了电机的结构设计, 制作出电机的样机并完成相关的实验, 实验设备主要有信号发生器、功率放大器、示波器和激光位移传感器等。实验表明, 电机最大速度达到 10.36 mm/s, 分辨率达到 0.3  $\mu\text{m}$ , 理论最大输出推力达到 8.33 N, 电机设计达到预期目的。

**关键词** 非共振; 压电直线电机; 压电叠堆; 柔性铰链

**中图分类号** TM356; TM359.4; TH113

## 引言

压电直线电机是众多压电作动器中的一类, 具有结构简单、定位精度高、设计形式多样等优点, 近年来受到国内外学者的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。共振型直线压电电机的发展较早, 技术已经发展很成熟, 目前也已得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>, 但存在运行稳定性较差等缺点。非共振型直线压电电机是利用压电叠堆在非共振状态下的大位移输出实现直线位移输出的一类电机。与共振式压电电机相比, 非共振状态具有较宽的工作频带, 对周围环境的抗干扰性强; 且对电机定子的尺寸和加工精度要求不太高, 易于保证电机运行的平稳性。非共振式压电电机根据定位方式的不同可分为以下两种类型<sup>[4]</sup>: a. 大行程模式, 在一定频率的电压下, 压电叠堆做周期性的伸缩运动, 电机将每一次叠堆伸缩产生的位移累积起来形成宏观位移; b. 精密定位模式, 通过在压电叠堆上施加缓慢变化的直流电压使其产生形变, 进而获得纳米级别的位移。这种模式的定位分辨率较高, 输出推力较大, 但行程很小, 因此需要借助各种放大机构。

采用大行程模式定位的非共振式压电电机根据运行原理又可以分为惯性冲击型<sup>[5-6]</sup>、尺蠖型<sup>[7-8]</sup>以及摩擦驱动型<sup>[9-10]</sup>。惯性冲击式电机通过压电元件快速伸缩时对质量块的冲击来产生位移输出, 它的结构简单、体积小且易于集成; 尺蠖式压电直线电机通常包括箝位

机构、驱动机构和底座三部分, 其中箝位机构可以由两组或多组组成; 摩擦驱动型电机在非共振状态下工作, 具有较宽的工作频带, 易于保证电机的工作平稳性, 对驱动控制信号和加工精度等要求较低。

## 1 电机结构和工作原理

### 1.1 电机结构

图 1 为定子结构图, 包括叠层压电陶瓷组、定子安装板、预紧螺钉以及定子框架。定子框架分为上、下两层, 每层为 2 个 L 型结构上下布置, 中间采用一组平行四边形铰链机构连接。下部 L 型结构中的压电叠堆用于产生纵向的位移, 上部 L 型结构中的压电叠堆也通过一组平行四边形铰链机构产生横向位移。定子安装板与定子框架之间同样采用一组平行四边形铰链机构来减少施加预紧力时电机可能产生的旋转。叠堆上的圆弧形垫块是为了克服安装过程以及作动过程中可能产生的切向力。

图 2 所示为预紧装置的结构分解图, 包括固定螺钉、预紧块、预紧弹簧、预紧支撑板、预紧顶块及预紧螺钉。预紧支撑板通过固定螺钉与底板固连; 预紧弹簧套在预紧块上, 推动预紧顶块压缩弹簧达到施加预紧力的目的; 预紧螺钉用于锁紧预紧顶块来保持施加的预紧力。

\* 国家自然科学基金资助项目 (51375224, 51405420); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20140474)  
收稿日期: 2017-01-10; 修回日期: 2017-04-13

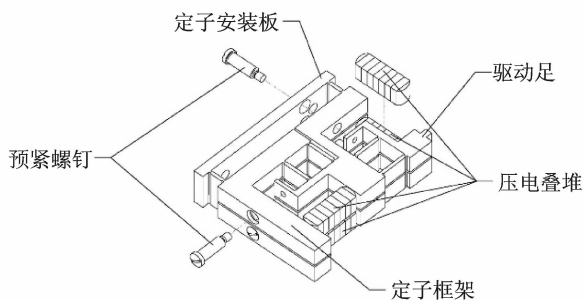


图1 定子结构图

Fig. 1 Structure of the motor

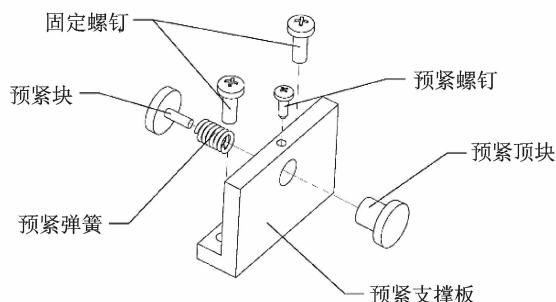


图2 预紧装置结构图

Fig. 2 Structure of preload device

图3为压电直线电机的整体结构,由定子、导轨(动子)、耐磨陶瓷条、定子固定板、预紧装置以及底板组成。定子通过其中的定子安装板与定子固定板固连,定子上的驱动足在预紧装置的作用下与导轨上的耐磨陶瓷条紧密接触,使得该电机具有断电自锁的功能。

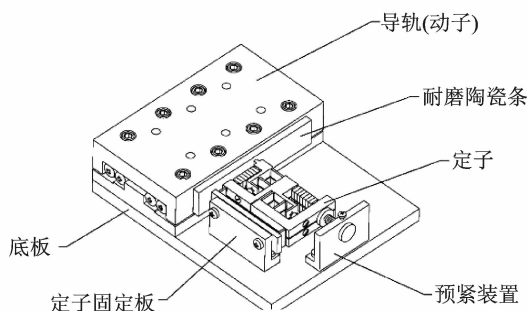


图3 电机整体结构

Fig. 3 Structure of the motor

## 1.2 工作原理

图4所示为压电电机在工作模式下施加在4组叠层压电陶瓷上的电压信号,采用方波-三角波的原因是相比于正弦波信号能使电机输出特性更好<sup>[11]</sup>。压电叠堆分别给予编号11,12,21和22。图5所示为压电电机在一个周期内的工作机理图。定子框架为双层结构,为了方便说明在图中为左右放置。结合图4和图5,其中: $a(c_2)$ 表示 $t=0(t=T)$ 的后一瞬间; $b_1$ 表示 $t=T/2$ 的前一瞬间; $b_2$ 表示 $t=T/2$

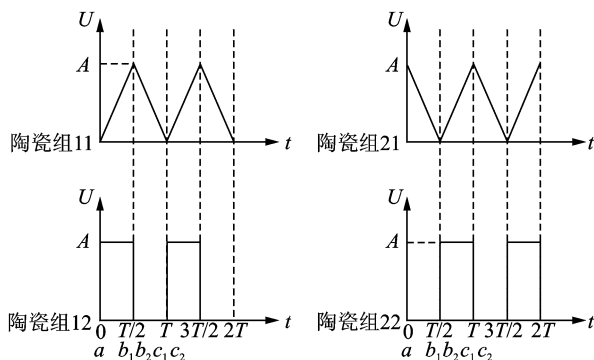


图4 驱动电压时序图

Fig. 4 Sequence diagram of the driving voltage

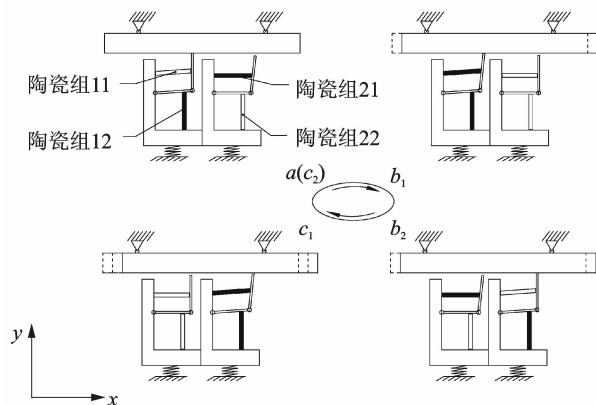


图5 一周期内定子的运动状态图

Fig. 5 Movement of the stator in one period

的后一瞬间; $c_1$ 表示 $t=T$ 的前一瞬间。

$a$ 时刻:左边驱动单元的叠层压电陶瓷组12上加高电平为 $A$ 的方波信号,其在 $y$ 轴正方向伸长,顶端顶紧动子,右边驱动单元的陶瓷组21上的电压由 $A$ 均匀下降,顶端向 $x$ 轴负方向移动;

$b_1$ 时刻:左边驱动单元的叠层压电陶瓷组12升压至 $A$ ,滑轨在驱动足的作用下向 $x$ 轴正方向移动一段距离,右边驱动单元的叠层压电陶瓷组21的电压降为0,顶端回到初始位置;

$b_2$ 时刻:叠层压电陶瓷组12上的电压变为0,左边驱动单元顶端缩回,右边驱动单元的叠层压电陶瓷组22上的电压为 $A$ ,顶端顶紧动子;

$c_1$ 时刻:叠层压电陶瓷组11上的电压降为0,左边驱动单元顶端回到初始位置,右边驱动单元的叠层压电陶瓷组21上的电压匀速增大到 $A$ ,滑轨在驱动足的作用下向 $x$ 轴正方向移动一段距离。

## 2 电机实验

### 2.1 压电叠堆的振动特性

电机的最终性能和压电叠堆自身的性能有很大

关系,性能优良的压电叠堆是最终电机性能的保证。实验采用丹麦 noliac 公司的 NAC2013-H14 压电叠堆,尺寸为 5 mm×5 mm×14 mm,采用图 6 所示的装置对压电叠堆施加预紧力,采用基恩士 LK-H1W 系列 CCD 激光位移传感器测量不同情况下压电叠堆的位移。

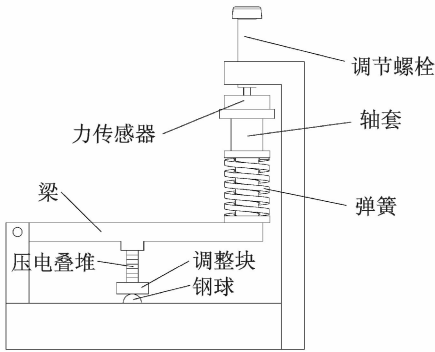


图 6 压电叠堆预紧装置

Fig. 6 Device of preloading piezoelectric stack

实验结果如图 7、图 8 所示。由图 7 可以看出,适当增大对压电叠堆的预紧力能够增大其振幅,这是因为在一定的预应力作用下,电畴转向活动会增强,从而诱发大的应变,体现为压电叠堆的振幅增大。但是当预应力过大时,电畴转向已不占主导地位,过大的预应力会使陶瓷的刚度增大,位移输出的一部分要用于克服由预压力所导致的弹性变形,导致叠堆振幅变小<sup>[12]</sup>。由图 8 可以看出,在较低的频率(200 Hz 以下)时,频率对振幅的影响很小,这为将来通过调节频率来调整电机的速度提供可能。

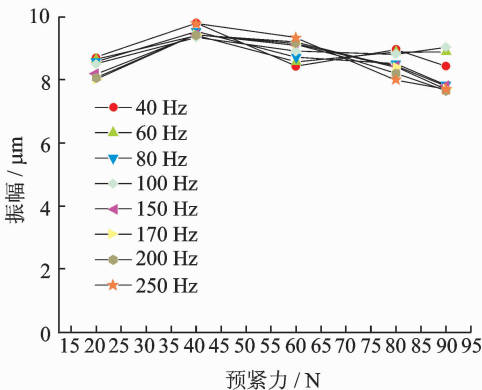


图 7 不同驱动频率下压电叠堆的振幅-预紧力图线

Fig. 7 Amplitude of piezoelectric stack versus preload force under different driving frequencies

## 2.2 电机的输出特性

根据上述电机的结构设计,加工了整套零件,使用 THK 公司的 VRU3105 直线导轨作为动子,在导轨侧面与驱动足接触的位置粘贴氧化铝陶瓷条。

实物图如图 9 所示。

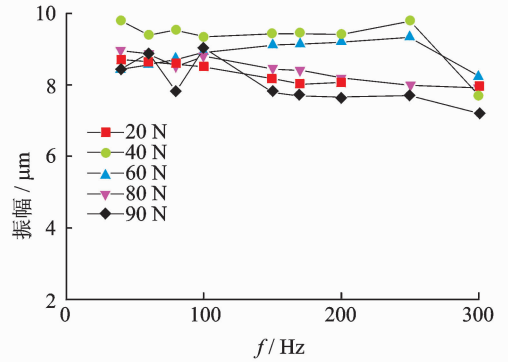


图 8 不同预紧力下压电叠堆的振幅-频率图线

Fig. 8 Amplitude of piezoelectric stack versus driving frequency under different preload forces

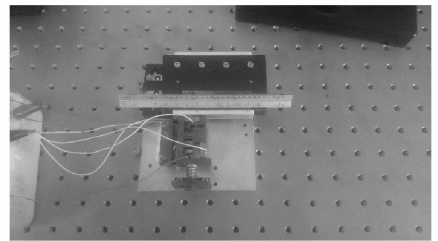


图 9 电机装配实物图

Fig. 9 Photograph of the prototype motor

### 2.2.1 速度与电压、频率之间的关系

根据电机的工作原理,当对压电叠堆施加合适的电压时,能够实现双足的交替运动,通过固定频率改变电压的方法得到的结果如图 10 所示。可以看出在相同频率下电机速度随着电压的增大而增加,同时频率的增加也能够使电机速度提升,在频率为 500 Hz、电压为 120 V 时测得电机最大空载运行速度为 10.36 mm/s。

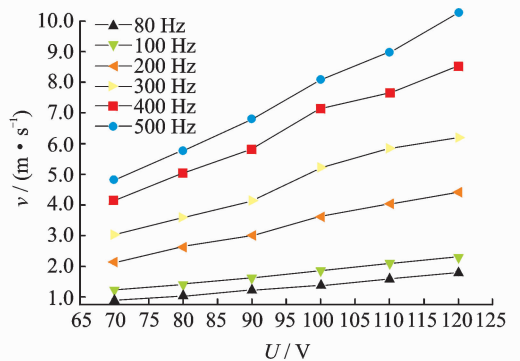


图 10 不同驱动频率下的速度-电压图线

Fig. 10 Speed of the motor versus voltage under different driving frequencies

### 2.2.2 电机正、反向的速度特性

在电压为 100 V、频率从 80 Hz 到 500 Hz 变

化,测得电机正、反向速度曲线如图 11 所示。在此频率范围内电机正向速度从 1.37 mm/s 上升到 8.08 mm/s,电机反向速度从 1.41 mm/s 上升到 7.55 mm/s,在低频段电机的正、反向特性较为一致,达到实验预期效果。

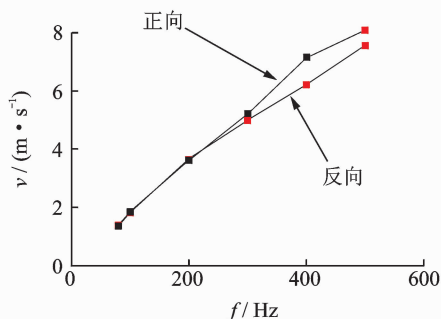


图 11 电机正反向的速度-频率图线

Fig. 11 Bidirectional speed of the motor versus driving frequency

### 2.2.3 电机输出位移分辨率

电机的定位分辨率直接影响到定位平台的精度,因此有必要研究电机的分辨率特性。通常施加的电压越小,电机的输出位移越小,分辨率越高;但是电压太小会导致无法驱动,因此需要通过测试确定实验所用导轨能产生的最小激励电压幅值。

在峰峰值分别为 50, 40, 30 和 20V 的方波-三角波信号的驱动下,导轨的输出如图 12 所示。对结果进行整理可得:当激励电压峰峰值为 50, 40 和 30 V 时,平台步距约为 7.8, 5.58 和 3.98  $\mu\text{m}$ ;当激励电压峰峰值为 20 V 时,导轨位移曲线如右下角小图所示,此时由于驱动足单步的位移降低,再加上驱动足回位时与导轨没有充分脱离,造成整个系统的回撤

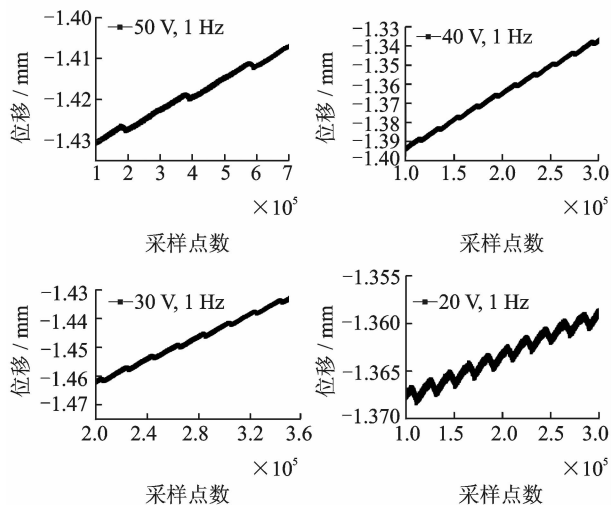


图 12 不同电压下电机的步进分辨率

Fig. 12 The step resolution of the motor under different voltages

现象非常明显,步距也大幅减小到 0.94  $\mu\text{m}$ 。

采用的驱动方式为连续步进,施加的信号和速度特性实验时的相同。为了测得导轨在更低激励电压幅值下的步距,下面将采用另一种驱动方式,如图 13 所示。该驱动方式仍然采用三相方波-三角波驱动,区别之处在于在每个驱动波之后设置较长的间歇段。

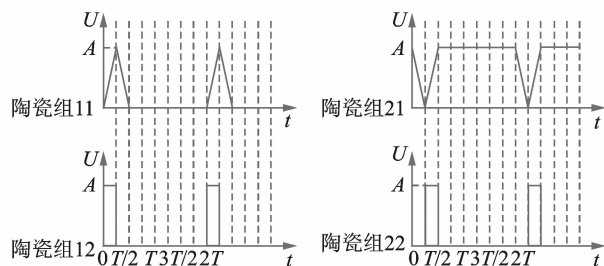


图 13 研究电机最小步距使用的驱动电压

Fig. 13 Driving voltage used in the experiment of exploring minimum step resolution

对导轨进行测试,结果如图 14 所示,得到 50, 40, 30 和 20 V 时,电机输出步距约为 3.118, 2.104, 1.4 和 0.3  $\mu\text{m}$ ,此实验结果相比于前述驱动模式(连续步进)有显著提高,这是由于在连续步进时惯性影响较大。采用本实验的驱动方式,适合平台进行慢速高精度运动。同时,上述两个实验都说明该平台具有高速步进和低速高精度运动两种可用模式。

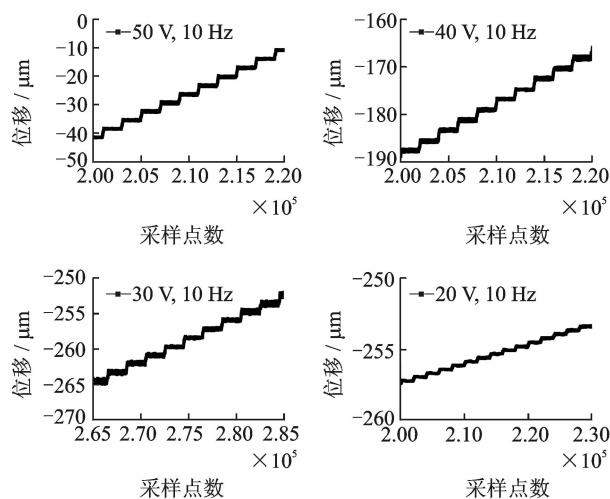


图 14 间歇驱动电压下电机的步进分辨率

Fig. 14 The step resolution of the motor under spasmodical driving voltage

### 2.2.4 电机负载特性

对压电叠堆施加峰峰值 100 V, 100 Hz 带正向偏置的方波-三角波信号,在导轨一侧悬挂砝码测试电机的推力。图 15 所示为电机的负载特性曲线,由

图可以看出,随着负载的增加,电机速度大致呈线性下降,用一次函数拟合得到电机的最大输出推力为 8.33 N。

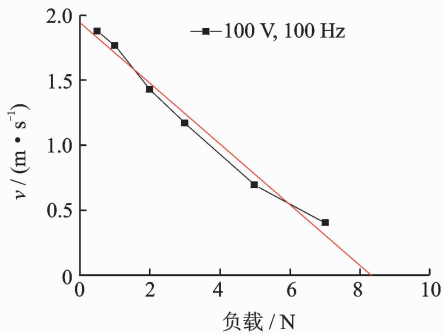


图 15 电机负载特性曲线

Fig. 15 Loading characteristic of the motor

### 2.3 讨论与分析

从上面的实验结果可以看出,电机的空载运行速度和电压拥有较好的线性关系,且具有较好的正反向速度一致性,这在实际的调速控制中具有积极意义。采用特定的驱动电压后电机的步进分辨率有了显著提高,对后续的定位控制提供基础,理论上负载能达到 8.33 N。

## 3 结论

1) 设计了一种利用压电叠堆驱动的非共振压电直线电机,该电机结构简单,体积小,同时具有较好的双向输出性能。

2) 电机速度与电压之间的线性度较好,在驱动频率为 500 Hz、电压为 120 V 时电机的无负载速度达到 10.36 mm/s。

3) 在施加特定的驱动信号后电机的分辨率能够达到 0.3  $\mu\text{m}$ ,拥有比较好的精度。

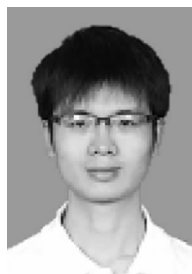
4) 在峰峰值为 100 V、频率为 100 Hz 的驱动信号下电机的理论最大输出推力为 8.33 N。

### 参 考 文 献

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007:6-8.
- [2] 陶宝祺. 智能材料结构[M]. 北京:国防工业出版社, 1997:81-85.
- [3] 李冲,许立忠,高立超,等. 压电微传动电机发展综述[J]. 微特电机, 2016(3):71-75.

Li Chong, Xu Lizhong, Gao Lichao, et al. Overview of micro piezodrives motors[J]. Small & Special Electrical Machines, 2016(3):71-75. (in Chinese)

- [4] Peng Yuxin, Peng Yulong, Gu Xiaoyi, et al. A review of long range piezoelectric motors using frequency leveraged method[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2015, 235:240-255.
- [5] Qu Jianliang, Chen Weihai, Zhang Jianbin, et al. A large-range compliant micropositioning stage with remote-center-of-motion characteristic for parallel alignment[J]. Microsystem Technologies, 2016, 22(4):777-789.
- [6] Nishimura T, Hosaka H, Morita T. Resonant-type piezoelectric smooth impact drive mechanism (SIDM) actuator using a bolt-clamped Langevin transducer[J]. Ultrasonics, 2012, 52(1):75-80.
- [7] Shimizu Y, Peng Y, Kaneko J, et al. Design and construction of the motion mechanism of an XY micro-stage for precision positioning[J]. Sensors and Actuators A:Physical, 2013, 201:395-406.
- [8] Torii A, Ueda A, Doki K. Control of a tripedal robot walking with a shuffle[J]. Electrical Engineering in Japan, 2011, 177(4):33-41.
- [9] 王寅,潘松,黄卫清,等. 三角位移转换式压电直线电机[J]. 光学精密工程, 2016(8):1973-1979.  
Wang Yin, Pan Song, Huang Weiqing, et al. Linear piezoelectric motor with triangular displacement transformer[J]. Optical and Precision Engineering, 2016(8):1973-1979. (in Chinese)
- [10] 李海林,王寅,黄卫清,等. 一种双足驱动压电直线电机[J]. 中国机械工程, 2014, 25(20):2719-2723.  
Li Hailin, Wang Yin, Huang Weiqing, et al. A double-foot driving linear piezoelectric motor[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(20):2719-2723. (in Chinese)
- [11] 苏钊,黄卫清,王寅,等. 三相驱动交替步进压电直线电机[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9):2538-2544.  
Su Zhao, Huang Weiqing, Wang Yin, et al. A three-phase driving alternate stepping piezoelectric linear motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9):2538-2544. (in Chinese)
- [12] 王寅. 多模式压电直线电机的研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.



第一作者简介:王道智,男,1992年9月生,硕士生。主要研究方向为压电直线电机的应用。

E-mail: wangdaozi@nuaa.edu.cn

