

板式四足直线超声电机的分析与实验*

朱 华, 崔云鹏, 刘 军

(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)

摘要 为了提高超声电机的驱动能力和工作效率,设计了一种矩形板式的贴片四足直线超声电机。电机定子由磷青铜和 8 片压电陶瓷片组成,4 个驱动足分布在矩形板 4 个顶角。电机利用矩形板的面内一阶纵振和面外反对称弯振相互叠加,在驱动足处形成椭圆运动轨迹,并通过有限元软件对电机进行模态和谐响应仿真分析,分析和验证电机工作原理的可行性。对电机进行实验,激励峰值电压为 200 V,激励频率为 25 810 Hz,当预压力为 10 N 时,电机的最大空载速度为 130 mm/s,预压力为 12 N 时,电机的最大负载为 3.5 N。结果表明,该电机结构简单,具有较好的输出性能和广泛的应用场景。

关键词 矩形板式; 四足直线超声电机; 面外反对称弯振; 机械性能
中图分类号 TH113.2; TM359.4

引 言

超声电机由于具有响应快、高精度、抗磁干扰等优点,在工业、航空航天、医疗器械等领域有很好的应用^[1-5]。超声电机分为直线型超声电机和旋转型超声电机^[6-7],对于直线型超声电机,由于其本身不仅具有旋转型超声电机的一般特点,而且结构更简单,具有结构多样化的特点^[8-10]。

目前,直线型超声电机的驱动形式多为单足驱动和双足驱动,驱动力相对较小^[11]。为了获得较大的推力,目前多采用叠堆型压电陶瓷的直线电机,但由于叠堆型压电陶瓷的加工工艺复杂,电机的装配要求精度较高,生产成本相对较高^[12-15]。根据目前直线超声电机设计上存在的问题,许多学者采用多足式直线超声电机来提高超声电机的工作效率。Jian 等^[16]设计了一种 π 型单模态双足叠堆式的直线超声电机,该电机推力可以达到 110 N。钟相强等^[17]等提出一种基于二级杠杆放大原理的双足直线作动器,经过实验测试可以有效的增大驱动足振幅。苏钊等^[18]提出了一种三相激励步进式双足直线电机,该电机的最大推力为 4.63 N。曾劲松等^[19]提出了一种四足贴片式的直线电机,该电机利用定子的面内一阶纵振和二阶弯振模态合成驱动足处的椭圆运动,但电机的空载速度和负载相对较

小。贺红林等^[20]设计出一种工字型直线超声电机,将工型结构上两平行板的面内一、二阶反对称弯振作为工作模态,以板侧的 4 个凸起作为驱动足。这些驱动足沿对角线分为两组交替地驱动滑块,该电机结构较为新颖但结构较为复杂,装配后所占空间较大。肖智勇^[21]设计一种 H 型卧板式定子平面超声电机,利用 H 型定子特定的三相模态振动作为工作模态。

笔者设计了一种利用面内一阶纵振和面外反对称弯振模态为工作模态的四足贴片式直线超声电机,该电机相对于上述的直线电机结构简单,易于装配,并且具有较好的性能输出。

1 电机结构和工作方式

1.1 电机结构

电机定子由磷青铜材料的金属板基体和 8 片 PZT-8 材料的压电陶瓷片组成,压电陶瓷片通过环氧树脂胶粘贴在金属板两侧。图 1 为电机整体结构装置,由滑块,预压力施加装置,摩擦陶瓷条,定子固位架和底板组成。其中,预压力施加装置由 2 个预压力调节螺栓、弹簧和接触装置组成,当向预压力螺栓施加预紧力时,弹簧压缩产生的压力传递给与定子接触的装置,实现预压力的施加。

* 国家基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2015CB057501);江苏高校优势学科建设工程资助项目
收稿日期:2019-05-14;修回日期:2019-06-10

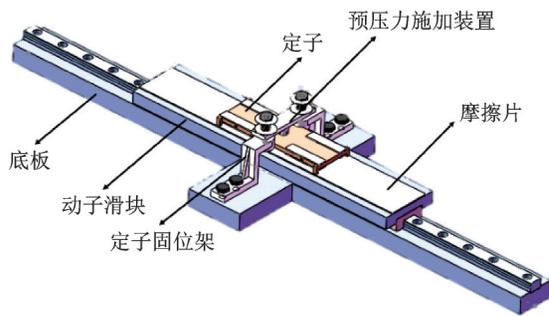


图 1 电机整体结构

Fig.1 Overall structure of the motor

1.2 工作模态及激励方式

本研究所设计的电机利用面内一阶纵振模态和面外反对称弯振模态为电机的工作模态,模态振型如图 2 所示。为激发矩形板的面内一阶纵振模态,需要在板的两端加载同相激励电压,使矩形板沿长度方向产生伸缩运动;为激发矩形板的面外反对称弯振模态,需要在金属板的正反两侧相同位置加载反相电压,使其在一侧面扩张的同时另一侧面收缩,从而形成面外的弯曲振动。压电陶瓷电压的激励方式及极化方向如图 3 所示。

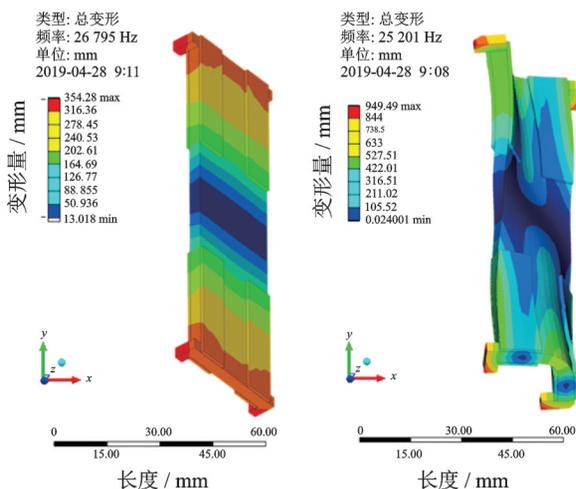


图 2 定子振动模态仿真结果

Fig.2 Stator vibration mode simulation results

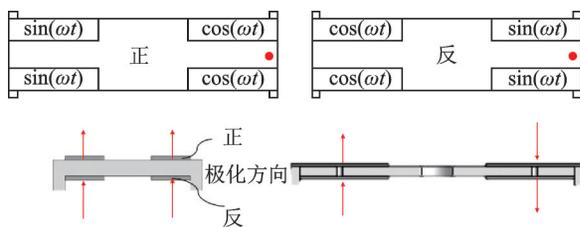


图 3 压电陶瓷激励方式

Fig.3 Piezoelectric ceramic excitation method

1.3 工作过程

笔者设计的四足直线超声电机所利用的工作方

式为矩形板的面内和面外振动相互叠加的形式,电机的工作原理如图 4 所示。

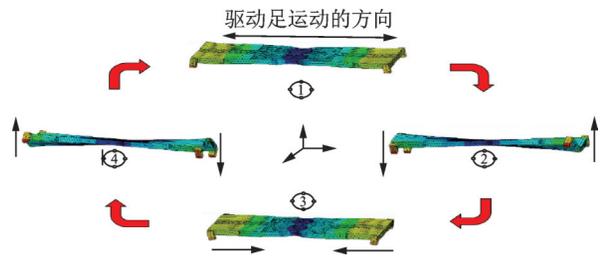


图 4 电机工作模式

Fig.4 Operating mode of the motor

1) 在 $0 \leq \omega t \leq \pi/2$ 时,电机定子两端驱动足随着纵向伸长运动,如图 4①所示,同时定子左端驱动足向下运动与滑块表面接触,定子右端驱动足向上抬起与滑块表面分离。

2) 在 $\pi/2 \leq \omega t \leq \pi$ 时,电机定子伸长到最大位置的同时,两端的驱动足也分别运动到最低和最高位置处,如图 4②所示,此过程中滑块向左运动一段距离,左端 2 个驱动足为滑块提供输出力。

3) 在 $\pi \leq \omega t \leq 3\pi/2$ 时,电机定子两端驱动足随着纵向收缩运动回到平衡位置,同时左右两端驱动足回复到平衡位置处,此时滑块不运动,如图 4③所示。

4) 在 $3\pi/2 \leq \omega t \leq 2\pi$ 时,电机定子左端驱动足向上抬起,右端驱动足向下运动并逐渐与滑块表面接触,同时定子继续收缩到极限位置处,如图 4④所示。此过程中滑块继续向左运动一段距离,右端两个驱动足为滑块提供输出力。

由以上运动分析可知,定子的两组驱动足分别交替完成了椭圆运动周期,验证了电机原理的可行性。

2 结构优化设计及仿真分析

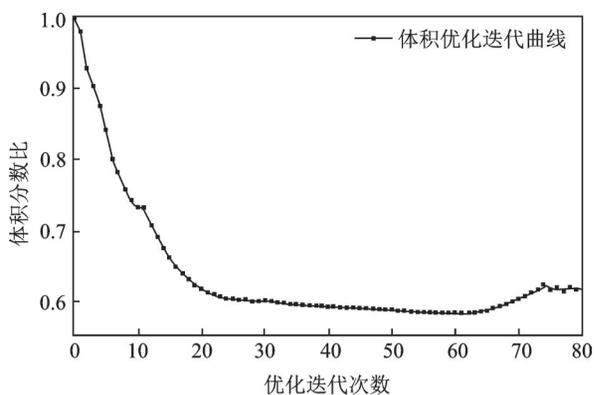
2.1 定子优化设计

笔者首先对电机定子的几何尺寸进行灵敏度分析,通过分析得出当电机定子长宽尺寸为 $60 \text{ mm} \times 19 \text{ mm}$ 时,面内一阶纵振频率和面外反对称弯振频率相近,所对应的频率分别为 25 201, 26 795 Hz,继续调节定子尺寸参数,尽管能够达到较好的频率一致性,但会因增大定子体积而不利于电机的小型化。综合以上分析,笔者对定子结构采用拓扑优化设计方法,在不改变定子几何尺寸的情况下,采用去除定

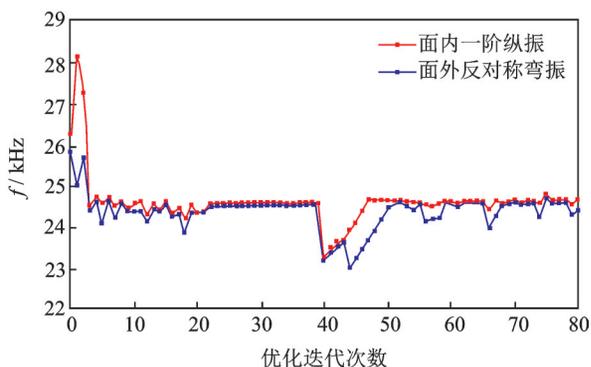
子部分材料的方式,使面内一阶纵振频率和面外反对称弯振的频率差最小。频率优化迭代曲线和体积优化迭代曲线分别如图 5(a),(b)所示,拓扑优化后的结果如图 6 所示。拓扑优化数学模型为

$$\begin{aligned} \min \Delta f &= f_1 - f_2 \\ \text{s.t.} &\begin{cases} V_f(x) - V_{\beta} \leq 0 \\ 0 \leq x_i \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: Δf 为定子的一阶纵振模态和二阶弯振模态的频率差; V_f, V_{β} 为结构的体积分数; x_i 为单元密度设计变量值。



(a) Volume optimization iteration curve



(b) Frequency optimization iteration curve

图 5 优化迭代曲线

Fig.5 Optimization of the iteration curve

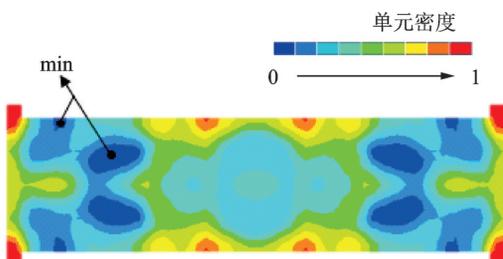


图 6 拓扑优化结果

Fig.6 Topology optimization results

2.2 仿真分析

从拓扑优化结果可知,深蓝色部分单元密度值最小,是需要去除的部分,但由于定子的面内一阶纵振和面外反对称弯振的节点均在定子中部,当夹持位置选取其中间位置时,对电机性能影响最小。综合上述分析,定子的结构尺寸最终确定为如图 7 所示。

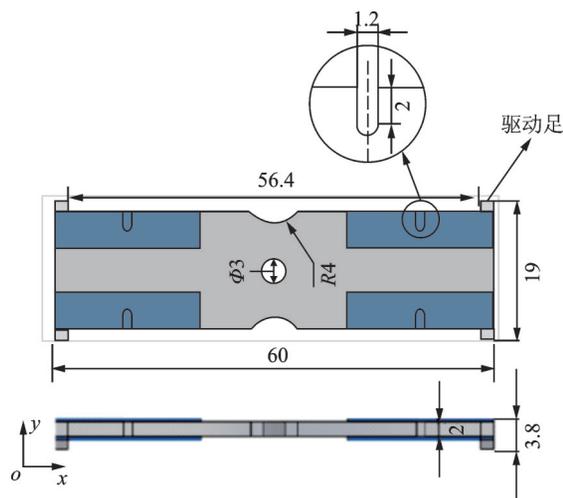


图 7 定子结构几何尺寸(单位:mm)

Fig.7 Stator structure geometry (unit: mm)

优化后定子的两相模态仿真结果如图 8(a),(b)所示,对优化前和优化后的定子结构分别进行有限元模态仿真分析,结果如表 1 所示。

表 1 定子优化前后频率参数

Tab.1 Frequency parameters before and after stator optimization

参数	面内一阶纵振频率	面外反对称弯振频率	频率差
优化前	26 795	25 203	1 592
优化后	25 218	25 331	113

为了更加清楚地表示驱动足的运动轨迹,对电机进行谐响应仿真分析,取驱动足端面的一点,对其在一个周期内不同时刻的振幅进行计算,得到该点的三维运动轨迹如图 9 所示。由图可知,驱动足在空间中的椭圆运动轨迹并非完全平行于 xOz 面,而是与其形成一个夹角,其角度的大小对超声电机的效率有一定的影响。

3 实验与分析

用多普勒激光测振仪对电机进行扫频和定频实

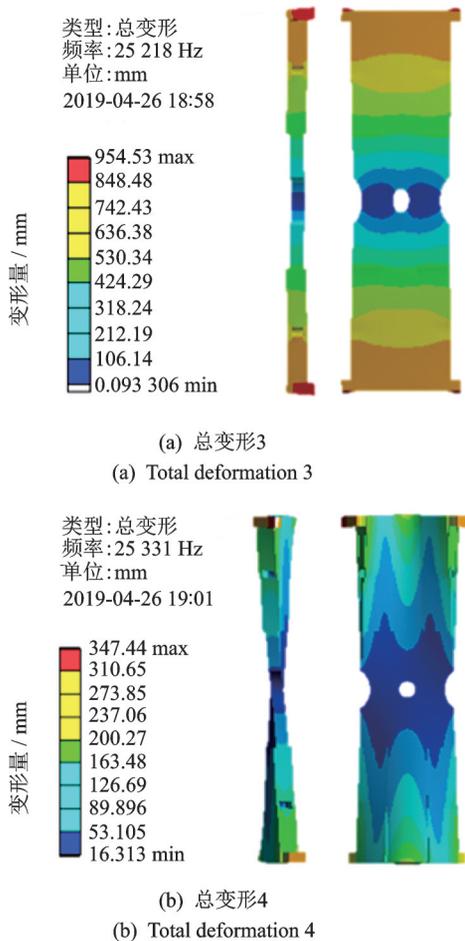


图 8 优化后有限元仿真结果
Fig.8 Finite element simulation results after optimization

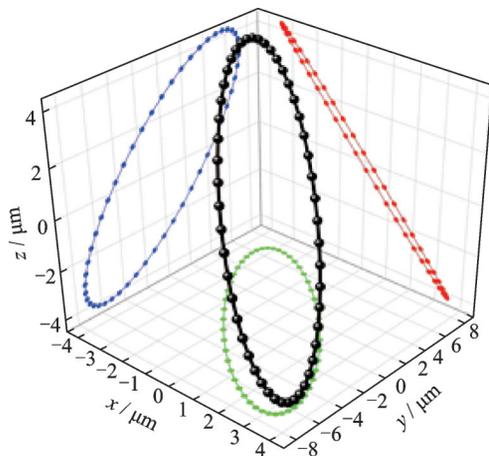


图 9 驱动足运动轨迹
Fig.9 Motion trajectory of driving foot

验,调节电机的激励峰峰电压为 100 V,可测得电机面内一阶纵振和面外反对称弯振的实际振动速度与频率关系曲线分别如图 10(a),(b)所示。其中面内一阶纵振的实际共振频率为 25 539 Hz,与仿真结果相比高出 321 Hz,面外反对称弯振的实际工作频率为 25 601 Hz 比仿真结果高 270 Hz,通过以上数据

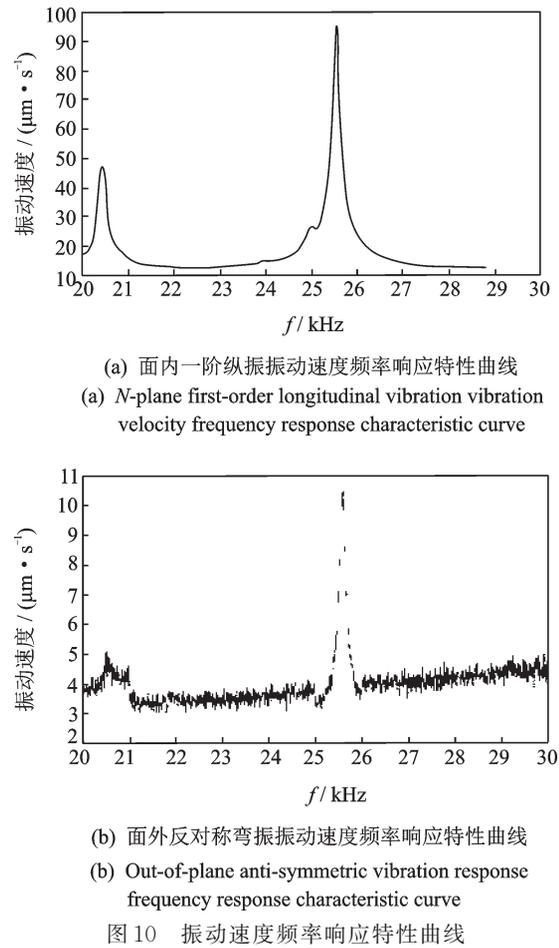


图 10 振动速度频率响应特性曲线
Fig.10 Vibration velocity frequency response characteristic curve

对比发现仿真结果与实验结果的误差在 1%~2%,误差相对较小,定子几何尺寸设计比较合理。然后对电机的实际振型进行验证,得到结果如图 11 所示。通过实验发现电机的实际工作振型与有限元仿真分析结果基本相同,进一步证明了此种电机设计方案的可行性。

电机实验测试装置如图 12 所示,对电机的机械性能进行实验测试其结果如图 13(a),(b)所示,在

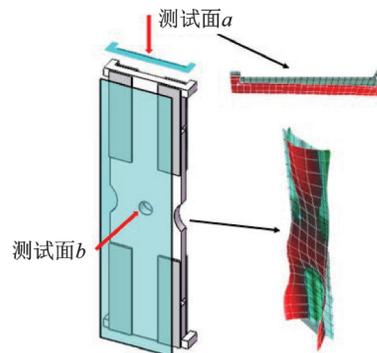


图 11 激光测振振型图
Fig.11 Laser measurement vibration pattern

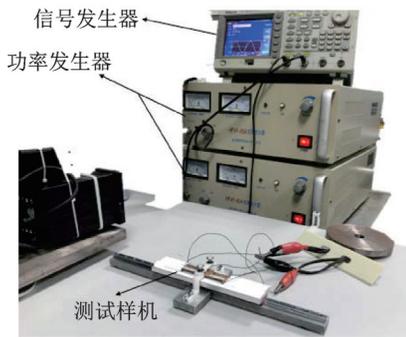
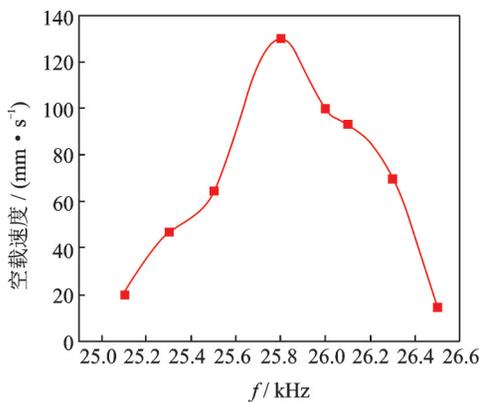


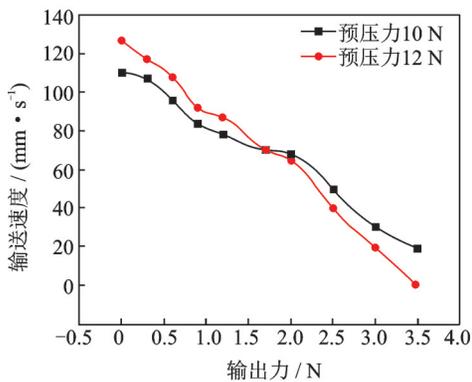
图12 电机机械性能测试装置图

Fig.12 Chart of testing device for mechanical performance of electric machinery



(a) 电机空载速度频率关系曲线

(a) No load speed frequency curve of motor



(b) 不同预压力下速度负载关系曲线

(b) The relationship curve of velocity and load under different preload

图13 电机机械性能测试曲线

Fig.13 Motor mechanical performance test curve

驱动峰峰电压为 200 V,驱动频率为 25 810 Hz 时,调节预压力为 10 N,电机空载速度大小随频率变化曲线如图 13(a)所示,空载最大速度为 130 mm/s。对在不同预压力情况下对电机的输出性能进行研究,分别调整电机的预压力为 10 和 12 N,得到电机速度与负载的关系如图 13(b)所示。由图可知,在预压力为 10 N 时最大负载为 3 N,预压力为 12 N 时

最大负载为 3.5 N。

4 结 论

1) 提出一种基于面内一阶纵振和面外反对称弯振的贴片式板式四足直线超声电机,并通过拓扑优化的设计方法对电机进行结构优化。

2) 利用 ANSYS 有限元仿真软件对电机定子结构进行仿真,并利用多普勒激光测振仪对电机进行扫频和定频实验,实验结果与仿真结果振动形式相符。通过实验结果与仿真结果对比,发现仿真与实际结果误差为 1%~2%。

3) 对样机进行机械性能实验,调节电机峰峰电压为 200 V,激振频率为 25 810 Hz,当预压力为 10 N,最大空载速度为 130 mm/s,预压力为 12 N 时,最大负载为 3.5 N。该电机结构简单,便于安装,有较大的应用前景。

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, 2010:14-19.

[2] 李存岑. 矩形板超声电机的振子振型激励技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.

[3] 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, 24(8): 1973-1978. WANG Yin, PAN Song, HUANG Weiqing, et al. Linear piezoelectric motor with triangular displacement transformer[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1973-1978. (in Chinese)

[4] 冯森, 时运来, 张军, 等. 直线超声电机特性测试系统的设计及试验[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5): 935-942. FENG Sen, SHI Yunlai, ZHANG Jun, et al. Design and test of linear ultrasonic motor characteristic test system[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 935-942. (in Chinese)

[5] 刘剑. 基于矩形薄板面内振动的直线型超声电机的研究[J]. 声学学报, 2003, 28(1): 86-90. LIU Jian. Research on linear ultrasonic motor based on in-plane vibration of rectangular thin plate[J]. Acta Acustica, 2003, 28(1): 86-90. (in Chinese)

[6] 许海. 一种新型直线超声波电动机的设计[J]. 微特电机, 2007, 14(1): 21-22. XU Hai. Design of a novel linear ultrasonic motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 2007, 14(1): 21-22. (in Chinese)

[7] 张百亮, 姚志远, 简月, 等. 基于弯曲模态的板形直线超

- 声电机结构设计[J]. 振动与冲击, 2019, 38(1): 110-117.
- ZHANG Bailiang, YAO Zhiyuan, JIAN Yue, et al. Structural design of plate-shaped linear ultrasonic motor based on bending mode[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(1): 110-117. (in Chinese)
- [8] 邓习树, 吴运新. 国内外直线超声电机的研究现状及关键技术[J]. 微电机, 2005, 38(5): 78-80.
- DENG Xishu, WU Yunxin. Research status and key technologies of linear ultrasonic motors at home and abroad [J]. Micromotor, 2005, 38(5): 78-80. (in Chinese)
- [9] 赵淳生, 李朝东. 日本超声电机的产业化、应用和发展[J]. 振动、测试与诊断, 1999, 19(3): 1-7.
- ZHAO Chunsheng, LI Chaodong. Industrialization, application and development of ultrasonic motors in Japan [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1999, 19(3): 1-7. (in Chinese)
- [10] 陶征, 董迎晖, 赵淳生. 压电陶瓷在杆式超声电机中最佳位置的研究[J]. 压电声光, 2004, 26(1): 20-23.
- TAO Zheng, DONG Yinghui, ZHAO Chunsheng. Study on the best position of piezoelectric ceramics in rod ultrasonic motors[J]. Piezoelectric Sound and Light, 2004, 26(1): 20-23. (in Chinese)
- [11] 陈西府, 黄卫清, 王寅. 动摩擦型压电叠堆直线电机定子的振动特性[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(5): 960-966.
- CHEN Xifu, HUANG Weiqing, WANG Yin. Vibration characteristics of the stator of dynamic friction type linear piezoelectric stack motors [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(5): 960-966. (in Chinese)
- [12] OTSUKA J, FUKADA S, KAWASE Y. Ultra-precision position using lead screw drive [J]. Precision Engineering, 1993, 59(10): 1655-1661.
- [13] 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)
- [14] NADER G, SILVA E C N, ADAMOWSKI J C. Characterization of novel flextensional transducer [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2003, 14(5): 297-308.
- [15] 赵淳生, 朱华. 超声电机技术的发展和应[J]. 振动、测试与诊断, 1999, 19(1): 1-5.
- ZHAO Chunsheng, ZHU Hua. Development and application of ultrasonic motor technology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1999, 19(1): 1-5. (in Chinese)
- [16] JIAN Y, YAO Z Y, ZHANG B L, et al. A novel π -type linear ultrasonic motor driven by a single mode [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(6): 125-130.
- [17] 钟相强, 张本学, 黄卫清, 等. 双足压电直线作动器结构优化与实验[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(5): 1037-1043.
- ZHONG Xiangqiang, ZHANG Benxue, HUANG Weiqing, et al. Structural optimization and experiment of biped piezoelectric linear actuator [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(5): 1037-1043. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 曾劲松, 郭长亮. 四足直线超声电机的研究[J]. 微电机, 2012, 45(9): 34-38.
- ZENG Jinsong, GUO Changliang. Research on four leg linear ultrasonic motor [J]. Micromotors, 2012, 45(9): 34-38. (in Chinese)
- [20] 贺红林, 凌普, 夏自强. 工字型定子驱动的压电直线电机动力学特性[J]. 压电与声光, 2016, 38(5): 725-731.
- HE Honglin, LING Pu, XIA Ziqiang. Dynamic characteristics of piezoelectric linear motor driven by I-type stator [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(5): 725-731. (in Chinese)
- [21] 肖智勇. H型卧板纵弯复合模态振动驱动的压电平面电机研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2016.



第一作者简介: 朱华, 男, 1978年8月生, 博士、副研究员。主要研究方向为精密驱动与控制系统、智能制造非标流水线与专机、工厂制造执行系统与SCADA系统等。曾发表《超声电机技术的发展和应》(《振动、测试与诊断》1999年第19卷第1期)等论文。

E-mail: hzhu103@nuaa.edu.cn