

文章编号 1004-924X(2018)01-0086-09

二级杠杆柔性铰链复合结构的双足压电直线电机

钟相强^{1,2}, 黄卫清^{1*}, 张 轩², 孙梦馨¹, 卢 倩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. 安徽工程大学 机械与汽车工程学院, 安徽 芜湖 241000)

摘要:为实现精密机械装置的快速定位,增加压电直线电机中位移放大结构对压电叠堆输出位移的放大能力,提出了一种基于二级杠杆和柔性铰链复合结构的新型双足压电直线电机。首先,对电机的作动原理进行分析,推导了驱动足轨迹方程。为提高其输出性能,对直圆型柔性铰链的参数进行了优化,得到最佳铰链参数为厚度 $t_h=0.2$ mm、切割半径 $R_h=1$ mm 和宽度 $b_h=10$ mm。最后,制作了该电机样机并进行了振幅、速度和负载性能测试,基于正交试验方法对电机速度进行了分析,得出电压对电机速度的影响更灵敏。实验结果表明,驱动足 I、II 的位移振幅分别在 $75\ \mu\text{m}$ 和 $63\ \mu\text{m}$ 附近波动,差值约为 $12\ \mu\text{m}$;在 120 V、110 Hz 的信号激励下速度达 16.163 mm/s,最大负载能力为 1.7 N。与现有的压电直线电机相比较,该电机结构简单,易于安装调试,具有响应快、大振幅、速度大且运行稳定的特点。

关键词:双足压电直线电机;压电叠堆;二级杠杆;柔性铰链;正交试验

中图分类号: TM359.4; TH112.5; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182601.0086

Double-foot piezoelectric linear motor with secondary lever and flexure hinge composite structure

ZHONG Xiang-qiang^{1,2}, HUANG Wei-qing^{1*}, ZHANG Xuan², SUN Meng-xin¹, LU Qian¹

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

2. School of Mechanical & Automotive Engineering,
Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

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

Abstract: In order to improve the rapid positioning of precision mechanical devices and the amplification ability of displacement amplification structures for the output displacement of piezoelectric stacks in piezoelectric linear motors, a new kind of double-foot driving piezoelectric linear motor with secondary lever and flexible hinge was proposed. First, the operating principle of the motor was analyzed and the trajectory equation of the driving feet was formulated. Next, the parameters of the straight circular flexure hinge were optimized in order to improve the output performance; the optimal hinge parameters obtained were thickness $t_h=0.2$ mm, cutting radius $R_h=1$ mm, and width $b_h=10$ mm. Finally, the prototype motor was designed, and the amplitude, speed,

收稿日期:2017-05-09;修订日期:2017-07-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51375224);安徽高校自然科学研究重点项目(No. KJ2017A121);江苏高校优势学科建设工程资助项目

and load performance were tested. The motor speed was analyzed based on the orthogonal test method; our analysis revealed the sensitivity of the motor speed on the voltage. Our experimental results revealed displacement amplitudes of the driving feet I and II in the range of $75\ \mu\text{m}$ and $63\ \mu\text{m}$, respectively, i. e., the difference is about $12\ \mu\text{m}$. Furthermore, the speed was observed to reach $16.163\ \text{mm/s}$ under a voltage of $120\ \text{V}$ and a signal excitation of frequency $110\ \text{Hz}$, and a maximum load capacity of $1.7\ \text{N}$ was obtained. Compared with existing piezoelectric linear motors, our motor possesses the advantages of a simple structure, easy installation and debugging, fast response, large amplitude, high speed, and stable operation.

Key words: double-foot piezoelectric linear motor; piezoelectric stack; secondary lever; flexure hinge; orthogonal test

1 引 言

近年来,随着科技的发展和进步,航天航空、仿生科技、精密机械、医学、人造卫星等领域对新型技术产物的定位能力要求也越来越高,因此需要高精度的驱动装置^[1-3]。与传统电机相比,非共振型压电直线电机以体积、质量、定位精度、响应时间和功耗等优势而受到国内外学者的广泛研究。按照原理,这种电机可分成直接驱动型、位移放大型、尺蠖式和惯性摩擦式,其中位移放大型压电电机具有大行程、结构简单等优点。

目前,针对位移放大型压电电机的研究较多^[4-11]。李海林^[6]等人提出了一种双驱动足压电直线电机,该电机采用四组(两组正交)压电叠堆进行驱动,但该电机驱动足振幅较小,速度偏低。苏钊^[7]等人提出一种利用方波-三角波信号驱动的双足压电直线电机,该电机采用双定子安装,通过夹持结构调节与定子之间的接触,最大速度为 $0.502\ \text{mm/s}$,得到了较大提升,但其驱动足振幅仍然偏小。

柔性铰链因没有间隙和机械摩擦、且运动灵敏度高等优点在压电电机中得到广泛关注和应用。柔性铰链结构常和放大机构进行复合应用,在机构中主要用来传递位移,以提高机构对位移的放大效率。目前,常用的放大机构有三角放大机构、杠杆放大机构、弯曲放大机构和压曲放大机构等^[12-16]。卢倩^[17]等人提出了一种二级杠杆式柔性铰链放大比的计算方法,提出柔度比参数的概念,开展了相关仿真和实验验证工作。上述研究工作中,有的单纯研究二级杠杆柔性铰链的优化,并未应用到压电直线电机驱动中;有人设计了一种类型的双足驱动压电直线电机,但压电叠堆本身的输出位移偏小,导致电机还存在放大比不

足的缺陷,电机速度偏低不能快速定位,因此,有必要开展一种面向高振幅放大比、大速度的新型双足驱动压电直线电机研究。

本文基于二级杠杆和柔性铰链复合结构,设计了一种组合型位移放大的非共振式压电直线电机。为提高电机的输出性能,对电机定子中直圆型柔性铰链参数进行优化设计,通过仿真研究得到最佳的柔性铰链参数。实验测试了该电机的振幅、速度、负载等特性,验证了该新型双足驱动电机的可行性,为压电直线电机的研究提供了新的思路。

2 双足压电电机的驱动机理

2.1 作动原理

压电直线电机作动原理如图 1 所示,图中 a, b, c 和 d 分别对应不同的工作状态, I, II 为压电直线电机定子上的两个驱动足,压电直线电机定子中使用的驱动元件(压电叠堆)共有 4 组,编号依次为 1, 2, 3, 4, 在下文叙述作动原理时涉及到压电叠堆时使用这些数字替代。图 2 为驱动信号时序图,全部采用正向偏置电压,避免压电叠堆受损。压电直线电机在一个周期内的作动过程如下:

在 a 状态下, 2 被施加激励电压,产生位移,由柔性铰链和杠杆传递位移,使得驱动足 I 与定子接触并压紧。

从 a 状态变化至 b 状态的过程中,在 2 受激励电压不变的情况下, 1 和 3 同时被施加激励电压,分别产生位移,由柔性铰链和杠杆传递位移。1 产生的位移使得驱动足 I 带动定子沿 X 轴向右运动 α 位移; 3 产生的位移使得驱动足 II 沿 X 轴向左运动 α 位移。

从 b 状态变化至 c 状态的过程中,在 1 和 3 受

激励电压不变的情况下,移除施加在 2 上的激励电压,给 4 施加激励电压。2 断电而恢复初始形态,进而产生回缩现象,促使驱动足 I 与动子脱离接触; 4 产生位移,使得驱动足 II 接触和压紧动子。

从 c 状态变化至 d 状态的过程中,保持施加在 4 上的激励电压不变,同时移除 1 和 3 上的激励电压。1 断电恢复初始形态;因为驱动足 II 与动子保持接触状态,3 断电恢复至初始状态而产

生的回缩使得驱动足 II 带动动子继续沿 X 轴向右移动 α 位移。

从 d 状态变化至 a 状态的过程中,在移除 4 上激励电压的同时给 2 施加激励电压,使得驱动足 II 与动子脱离接触,驱动足 I 接触且压紧动子。

所以,在一个周期内,导轨将沿着 X 轴向右移动 2α 的位移(此值为压电直线电机一个周期内的行程)。

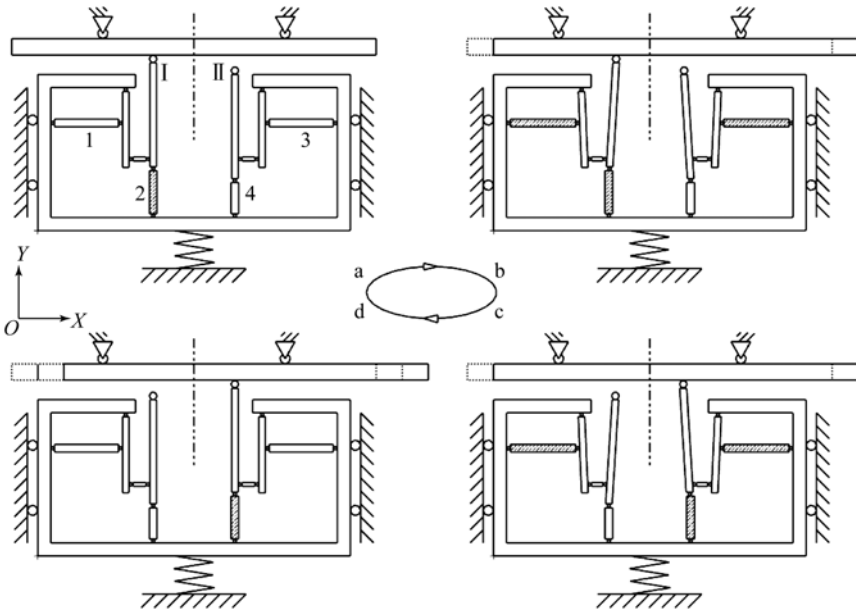


图 1 压电直线电机作动原理

Fig. 1 Operating principles of piezoelectric linear motor

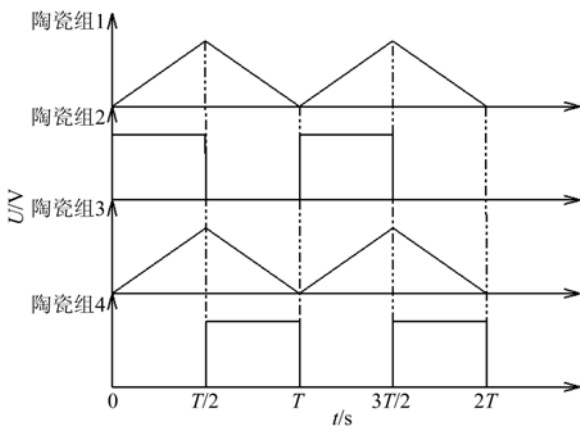


图 2 驱动信号时序

Fig. 2 Timing sequences of driving signal

2.2 驱动足的轨迹方程

根据电机驱动足的运动规律和施加在压电叠堆上的三角波-方波周期信号,可以推导出电机驱动足的轨迹方程。电机的双驱动足对称分布,所以推导出驱动足 I 的轨迹方程即可,且驱动足 I

的有效位移驱动发生在 $0 \sim T/2$ 周期内。图 3 所示为驱动足 I 上压电叠堆的位移输出模型,图中 λ 为二级杠杆的放大倍数。

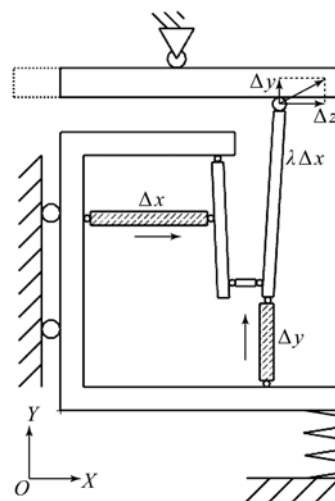


图 3 位移输出模型

Fig. 3 Displacement output model

三角波信号在 $0 \sim T/2$ 周期内的函数式为:

$$f(t) = \frac{2E}{T}t \quad (0 \leq t \leq T/2), \quad (1)$$

式中 E 为信号的电压幅值。

方波信号在 $0 \sim T/2$ 周期时间内的函数式为:

$$g(t) = E \quad (0 \leq t \leq T/2). \quad (2)$$

三角波和方波信号施加在压电叠堆上所产生的位移为:

$$\Delta x = \delta \cdot f(t) = \frac{2\delta E}{T}t, \quad (3)$$

$$\Delta y = \delta \cdot g(t) = \delta E, \quad (4)$$

式中 δ 为常数。

压电叠堆产生的位移经过二级杠杆和柔性铰链传递至驱动足上,按矢量的平行四边形法则,其运动轨迹方程为:

$$\begin{aligned} (\Delta z)^2 &= (\lambda \Delta x)^2 + (\Delta y)^2 = \\ &(\delta E)^2 \times \left[\frac{2\lambda}{T}t \right]^2 + (\delta E)^2. \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)可化简为:

$$\frac{\Delta z}{\delta} = E \cdot \sqrt{\left[\frac{2\lambda}{T}t \right]^2 + 1}. \quad (6)$$

令 $z = \frac{\Delta z}{\delta}$, 有:

$$z = E \cdot \sqrt{\left[\frac{2\lambda}{T}t \right]^2 + 1}, \quad (7)$$

式中: E 和 λ 分别取值为 100 V 和 11.72 , $f = 100 \text{ Hz}$, 则 $T = 0.01 \text{ s}$ 。式(7)曲线如图 4 所示,由图可看出,驱动足 I 的轨迹近似线性,通过摩擦能够连续稳定驱动动子运动。

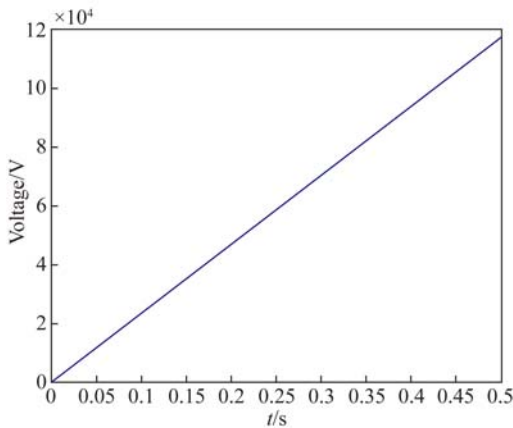


图 4 驱动足 I 的运动轨迹

Fig. 4 Motion trajectory of driving foot I

3 双足压电直线电机的结构设计

3.1 定子结构设计

图 5 为设计的一种基于铰链放大机构的压电直线电机结构,其定子通过 V 型导轨与底板固定,V 型导轨约束定子在一个方向上的自由度;预压螺钉、预压弹簧和预压件组成的预压结构为定子和动子施加相应的预压力;四组测微头分别为四组压电叠堆施加相应的预紧力,且定子结构能够对测微头进行锁紧。

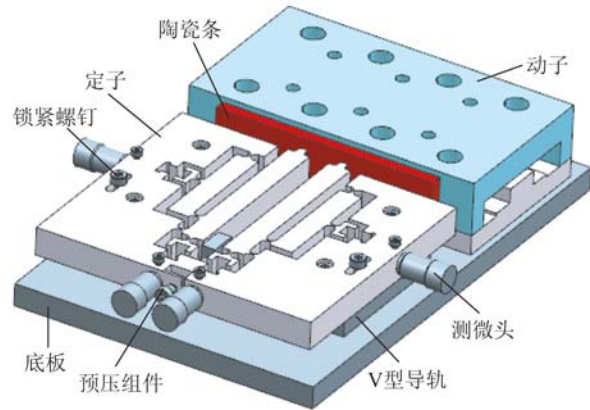


图 5 压电直线电机结构

Fig. 5 Configuration of piezoelectric linear motor

3.2 定子定位机构设计

压电直线电机的定子定位机构设计的主要目的是为了确保定子上的驱动足与动子上粘接的耐磨陶瓷条真实有效接触,从而电机能够将压电叠堆产生的微小位移经过定子放大元件放大之后转换成动子的宏观直线运动。一个输出性能优良的电机,不仅要求定子的高输出与输入比率,而且对辅助电机定子与动子接触的结构设计有着严格要求。图 6 所示为压电直线电机的理想预压模型,限制定子 X, Y 和 Z 轴三个方向中两个方向的运动后,通过预压弹簧产生的弹性力来调节定子驱动足与动子的接触情况。

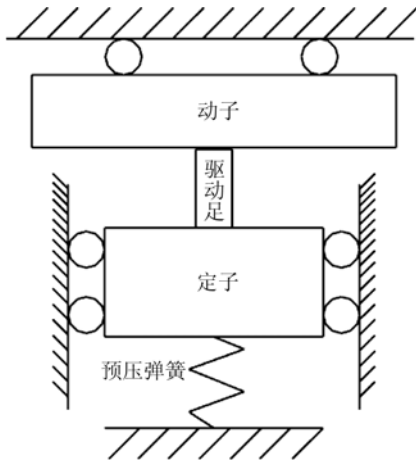


图 6 压电直线电机的理想预压模型

Fig. 6 Ideal preloading model of piezoelectric linear motor

4 二级杠杆柔性铰链复合机构

4.1 二级杠杆放大原理

图 7 为二级杠杆放大原理图。二级杠杆由一个等臂杠杆和一个非等臂杠杆组成,其中,等臂杠杆起放大输入位移的作用,所得到的输出位移再通过两个杠杆的连接部分(直圆型柔性铰链)传递至非等臂杠杆的输入端后再次进行放大输出。图中 A 和 C 点分别为杠杆 I 和 II 的输入位置, B 和 D 点分别为等臂和非等臂杠杆的输出位置,且 D 点为等臂杠杆和非等臂杠杆复合的二级杠杆的最终输出位置, $L_1 \sim L_4$ 为各杠杆的臂长。

设 λ 为二级杠杆的放大倍数,则:

$$\lambda = \frac{(L_1 + L_2)}{L_1} \times \frac{(L_3 + L_4)}{L_4}, \quad (8)$$

式中: L_1, L_2, L_3 和 L_4 分别为 10, 54, 21 和 21 mm。将它们代入式(8)得到二级杠杆的理论放大倍数 λ 为 12.8。

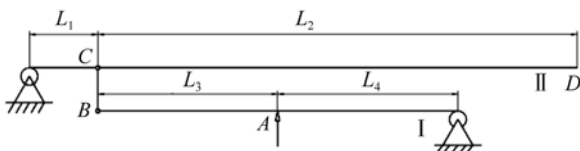


图 7 二级杠杆原理

Fig. 7 Principle schematic of secondary lever

4.2 直圆型柔性铰链参数优化

图 8 所示为柔性铰链的优化模型。其中 5 号

铰链在优化过程不作考虑,定子的放大倍数能力主要与 1~4 号铰链相关,故只需得到 1~4 号铰链优化后的各个参数即可,5 号铰链参数与其它铰链相同。将每个铰链的厚度和半径(1~4 号铰链切割半径全部约束相等,故只需设置一个参数 R_h 即可;厚度分别设置为 T_1, T_2, T_3 和 T_4 ,且厚度数值相等)定义成参数形式(输入参数)。分析过程中对模型施加 Y 轴方向上 1 mm 位移,可以得到模型的放大倍数为 11.134。设置末端驱动足的位移输出作为输出参数(优化目标)。

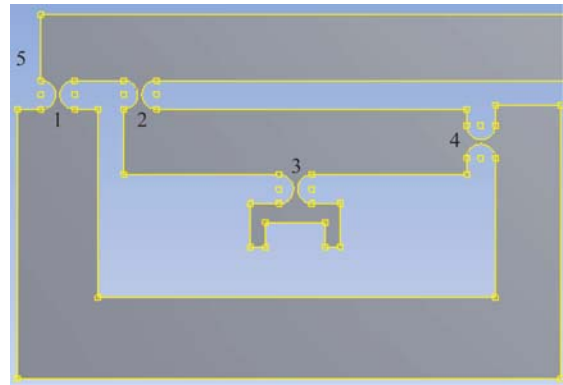


图 8 柔性铰链参数化标记

Fig. 8 Parametric marking of flexure hinge

基于 ANSYS Workbench 的 Design Exploration 模块优化计算,当直圆型柔性铰链厚度 $t_h = 0.2$ mm、切割半径 $R_h = 1$ mm 时,定子模型驱动足沿 Y 轴方向上的位移输出数值约为 11.72 mm,相较于 11.134 mm 的增幅比约为 5.27%;当直圆型柔性铰链厚度 $t_h = 0.3$ mm、切割半径 $R_h = 1.5$ mm 时,定子模型驱动足沿 Y 轴方向的位移输出数值约为 11.57 mm,增幅比约为 3.94%;当直圆型柔性铰链厚度 $t_h = 0.4$ mm、切割半径 $R_h = 2$ mm 时,定子模型驱动足沿 Y 轴方向的位移输出数值约为 11.39 mm,增幅比约为 2.31%。

综上所述可以确定在优化参数数据组合中,定子驱动足沿 Y 轴方向上的输出位移最大约为 11.72 mm,此时直圆型柔性铰链参数为:厚度 $t_h = 0.2$ mm、切割半径 $R_h = 1$ mm 和宽度 $b_h = 10$ mm。

5 双足压电直线电机的实验研究

5.1 定子驱动足端面振幅测试

图 9 所示为定子驱动足振幅测试装置。由信号发生器生成 1 路 100 Hz 的三角波信号,并由信号放大器对电压放大至 120 V,驱动定子驱动足进行工作,激光位移传感器读取驱动足的位移并将数据传输到 PC 机上。

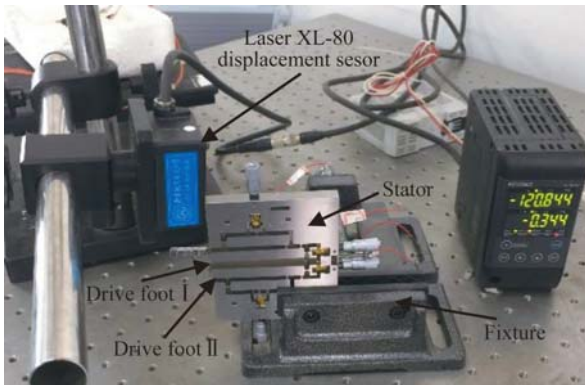


图 9 定子驱动足振幅测试装置

Fig. 9 Amplitude measuring device of stator drive foot

图 10 和图 11 所示为实验测得两个驱动足的位移数据。从图中可以看出,两驱动足的振动相对稳定,驱动足 I、II 的位移幅值分别在 75 μm 和 63 μm 的上下范围浮动,差值约为 12 μm ,造成此差值的可能原因有:(1)压电叠堆预紧力不一致;(2)所使用的压电叠堆的输出性能不一;(3)加工误差导致两驱动足性能不一致;(4)测量方法不精确导致的测量误差;(5)测量过程中出现的随机误差。

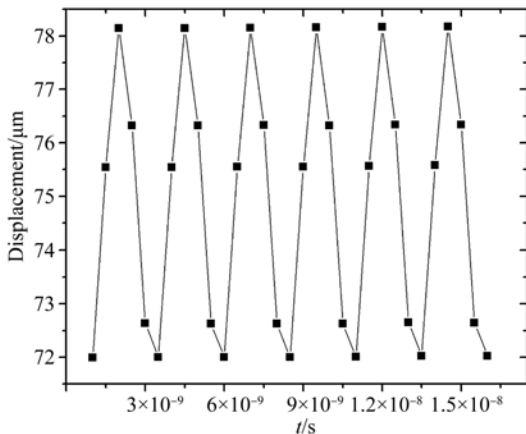


图 10 驱动足 I 的振幅

Fig. 10 Amplitude of drive foot I

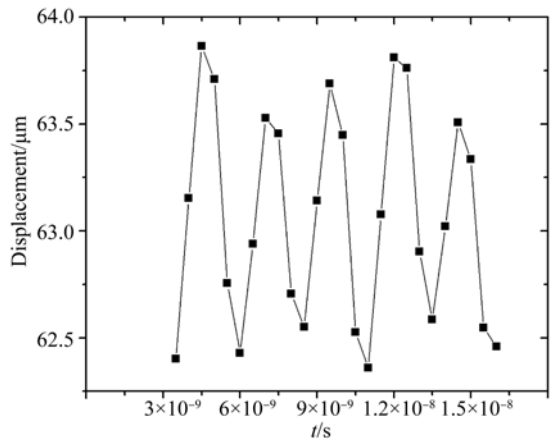


图 11 驱动足 II 的振幅

Fig. 11 Amplitude of drive foot II

5.2 电机速度特性测试(不同电压和频率)

图 12 为速度测试装置图。电机在信号源激励作用下动子产生一定的运动距离,运动距离主要使用直尺进行标定,由秒表计时。通过改变信号发生器输出信号的电压和频率,多次测量电机运动一定位移下的时间,就可以得到电机的运动速度与信号的电压和频率之间的关系。

根据上述实验原理,设定信号的频率为 50~130 Hz、电压为 70~120 V,测试电机性能,结果如图 13 和图 14 所示,在 120 V、110 Hz 下电机的最大速度为 16.163 mm/s。

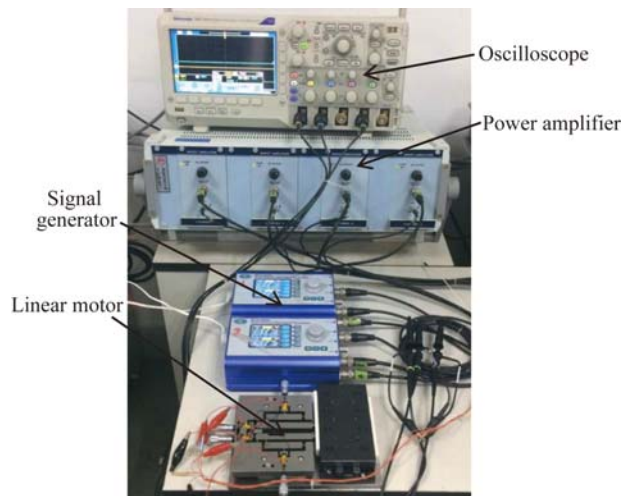


图 12 速度测试装置

Fig. 12 Speed test devices

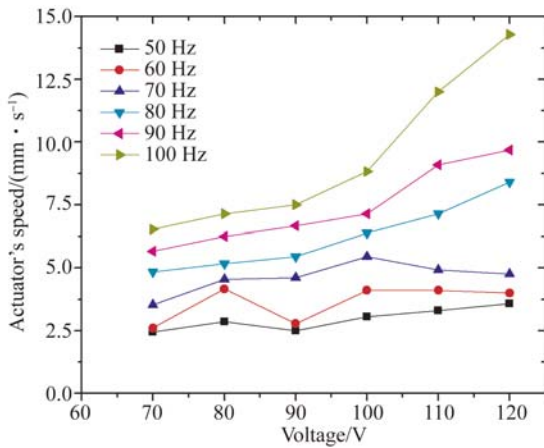


图 13 不同电压下的电机速度曲线

Fig. 13 Speed curves of motor under different voltages

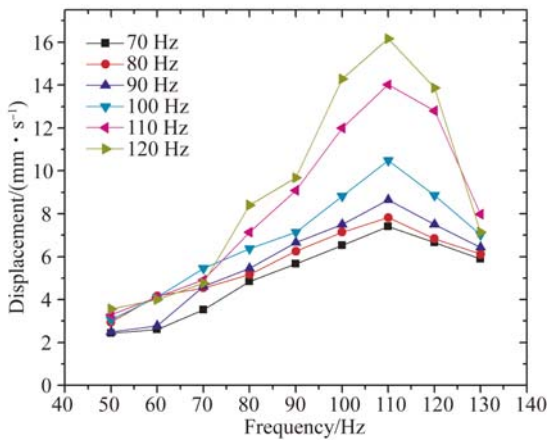


图 14 不同频率下的电机速度曲线

Fig. 14 Speed curves of motor under different frequencies

5.3 电机速度正交试验分析

采用正交试验设计方法对上述实验测得的电机速度数据进行处理和分析,得到信号发生器生成信号对电机速度的影响关系,表 1 是电机速度方差的分析结果^[18]。

表 1 电机速度方差分析

Tab.1 Variance analysis of motor speed

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值
频率 A	43.842	5	8.768	6.856
电压 B	177.838	5	35.568	27.811
误差 E	31.973	25	1.279	
总和 T	253.653	35		

从 F 表中查得临界值 $F_{0.01}(5, 25) = 3.85$, 由表 1 可知 A 和 B 的 F 值均大于 F 表中给定的数

值,这说明 A 和 B 对试验指标的影响程度极其显著;从方差平方和的数值来看, A 相对于平均值的离散程度较 B 来说要小,即 A 对应的样本数据趋于稳定,所以在实际实验过程中对 B 的要求比 A 要高。

5.4 电机负载能力测试

在电机速度性能实验的基础上对电机负载能力进行测试。负载能力测试装置在前面电机性能实验装置的基础上添加了一端系有砝码而另一端系有螺钉(螺钉可固定在电机动子上)的绳子(绕在固定滑轮上),通过更换不同质量的砝码来测得当前电机的速度(信号电压设定为 120 V,频率为 110 Hz)。图 15 所示为电机的负载-速度曲线图。随着砝码质量的增加,电机的速度逐渐下降,且负载能力不大,当前测得的最大负载能力仅有 1.7 N。在实验过程中,当砝码质量增加到 200 g 时,电机出现打滑现象(定子驱动足和动子接触位置处于脱离状态)。

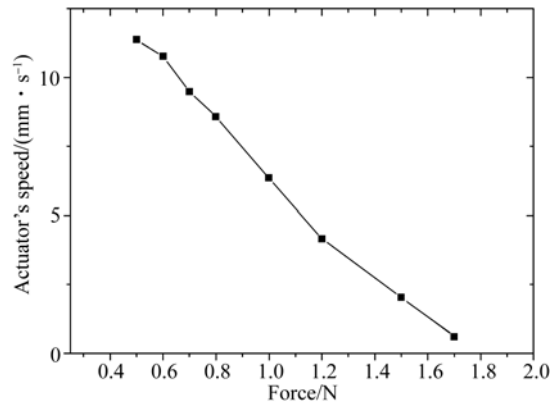


图 15 电机的负载-速度曲线

Fig. 15 Load-speed curve of linear motor

6 结 论

本文提出了一种基于二级杠杆和柔性铰链复合结构的非共振式压电直线电机,根据作动原理和驱动信号推导了驱动足的轨迹方程,利用螺旋测微头很容易为压电叠堆施加定量的预紧力。定子结构中二级杠杆的理论放大倍数 λ 为 12.8,基于 ANSYS Workbench 优化分析得到直圆型柔性铰链的厚度 $t_h = 0.2$ mm、切割半径 $R_h = 1$ mm 和宽度 $b_h = 10$ mm,此时仿真放大倍数为 11.72,与理论放大倍数之间的误差为 8.4%。基于最佳

优化参数制作了该电机样机,对电机的输出性能进行了实验研究,两驱动足的振动相对稳定,驱动足 I、II 的位移幅值分别在 $75\ \mu\text{m}$ 和 $63\ \mu\text{m}$ 附近浮动;设定信号的频率为 $50\sim 110\ \text{Hz}$ 和电压为 $70\sim 120\ \text{V}$,对电机性能进行相关性实验,在 $120\ \text{V}$ 、 $110\ \text{Hz}$ 下测得电机的最大速度为

$16.163\ \text{mm/s}$,最大负载能力仅有 $1.7\ \text{N}$ 。该电机在具有较高放大倍数的前提下,获得了较好的电机性能,具有响应快、速度大和振幅大的优点,能应用于精密机械装置的快速定位。后期需要在保证振幅放大的前提下进一步优化电机的负载能力。

参考文献:

- [1] 于月民. 压电式微动机构动力学与仿真分析 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015: 30-45.
YU Y M. *Dynamics and Simulation Analysis of Micro Displacement Mechanism Based on Piezoelectric Actuator* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015: 30-45. (in Chinese)
- [2] ROP I, HUBBEL P I. Nonlinear micro-dynamic behavior of a ball-screw driven precision slide system [J]. *Precision Engineering*, 1992, 14(4): 229-236.
- [3] STEINMETZ R. Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometry [J]. *Precision Engineering*, 1990, 12(1): 12-24.
- [4] TAKAFUJIK, NAKASHIMA K. Stiffness of a ball screw with consideration of deformation of the screw, nut and screw thread: preloaded double nut [J]. *J S M E International Journal*, 1990, 33(4): 620-626.
- [5] OTSUKAJ, IIDA N, KAWASE Y, et al.. Ultra-precision positioning using lead screw drive (3rd Report): nanometer accuracy positioning and settling time reduction [J]. *Precision Engineering*, 1993, 59(10): 1655-1661.
- [6] 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 H L, WANG Y, HUANG W Q, et al.. A double-foot driving linear piezoelectric motor [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(20): 2719-2723. (in Chinese)
- [7] 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 ZH, HUANG W Q, WANG Y, et al.. A three-phase driving alternate stepping piezoelectric linear motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(9): 2538-2544. (in Chinese)
- [8] 黄卫清, 孟益民. 一种新型非共振压电直线电机的设计 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(14): 1717-1721.
HUANG W Q, MENG Y M. Design of a new type of piezoelectric linear motor based on non-resonant vibration [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(14): 1717-1721. (in Chinese)
- [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, 24(8): 1973-1979.
WANG Y, PAN S, HUANG W Q, et al.. Linear piezoelectric motor with triangular displacement transformer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 1973-1979. (in Chinese)
- [10] 李艳林, 黄卫清. 一种低频大行程直线型压电电机的研究 [J]. 压电与声光, 2009, 31(4): 507-509.
LI Y L, HUANG W Q. Research on a linear piezoelectric motor working in low frequency with unlimited travel range [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2009, 31(4): 507-509. (in Chinese)
- [11] 黄卫清, 陶杰, 孙梦馨, 等. 非共振型压电电机驱动的大行程精密定位旋转平台的建模和实验 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2712-2720.
HUANG W Q, TAO J, SUN M X, et al.. Modeling and experiment of precision rotary positioner with large stroke driven by non-resonant piezoelectric motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2712-2720. (in Chinese)
- [12] 张建瓴, 陈万银, 可欣荣, 等. 一种微位移放大机构的设计与仿真 [J]. 机械设计, 2009, 26(12): 9-12.
ZHANG J L, CHEN W Y, KE X R, et al.. Design and simulation of a kind of micro-displacement amplification mechanism [J]. *Journal of Machine Design*, 2009, 26(12): 9-12. (in Chinese)
- [13] 徐晶晶, 陈西府, 王寅, 等. 基于复合放大机构的压电直线电机 [J]. 压电与声光, 2013, 35(2): 234-236, 249.
XU J J, CHEN X F, WANG Y, et al.. A piezoelectric linear motor based on combined amplification structure [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2013, 35(2): 234-236, 249. (in Chinese)

- [14] 于靖军, 毕树生, 宗光华. 全柔性微位移放大机构的设计技术研究 [J]. 航空学报, 2004, 25(1): 74-78.
YU J J, BI SH SH, ZONG G H. Study on the design of fully compliant motion amplification mechanisms in actuation systems for micromanipulators [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2004, 25(1): 74-78. (in Chinese)
- [15] 赵宏哲, 毕树生, 于靖军. 三角形柔性铰链的建模与分析 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 1-5.
ZHAO H ZH, BI SH SH, YU J J. Modeling and analysis of triangle flexible hinge [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(8): 1-5. (in Chinese)
- [16] 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(11): 102-111. (in Chinese)
- [17] 卢倩, 黄卫清, 王寅, 等. 深切口椭圆柔性铰链优化设计 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 206-215.
LU Q, HUANG W Q, WANG Y, et al.. Optimization design of deep-notch elliptical flexure hinges [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 206-215. (in Chinese)
- [18] 左亚军. 基于正交试验法的注塑机合模机构的优化设计研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
ZUO Y J. *Research on Optimal Design of Clamping Mechanism for an Injection Machine Using Orthogonal Design Method* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012. (in Chinese)

作者简介:



钟相强(1980—),男,山东临沂人,博士研究生,副教授,2003年、2006年于西北农林科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事压电精密致动技术方面的研究。E-mail: xqzh@nuaa.edu.cn

导师简介:



黄卫清(1965—),男,江苏南通人,博士,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,主要从事超声电机技术的研究。E-mail: mehwwq@nuaa.edu.cn