

一种具有纳米级步进特性的直线压电电机^{*}

陈西府¹, 李明¹, 卢倩¹, 黄卫清²

(1. 盐城工学院机械工程学院 盐城, 224051) (2. 广州大学机械与电气工程学院 广州, 510006)

摘要 为实现纳米级的定位精度,通过精密控制电机定/动子间的正压力和相对运动速度,以实现电机在一个周期内的精密步进运动。首先,在研究电机步进运动原理的基础上,设计了具有法向振动框特征的驱动足结构,可以获得驱动端法向振动和切向振动的独立解耦特性;其次,利用有限元法对定子驱动足进行了参数优化设计,获得了定子驱动足的主要结构尺寸;最后,制作电机样机并进行了定子振动特性实验和电机特性实验。定子振动特性实验结果表明:该电机在 1~400 Hz 范围内能够使得驱动阶段和回程阶段具有不同的运动特性,上述两个运动阶段的动子运动位移差即为电机的运动步距,因而该电机具有更小的位移分辨率。机械输出特性实验结果表明:该电机在 1~400 Hz 范围内分别具有微、纳米级步进运动特性,在 1~30 Hz 内电机的位移分辨率最高可达 11 nm。综上,该电机在 400 Hz 以内能实现微纳米定位精度,电机速度最高可达 63.3 $\mu\text{m/s}$ 。

关键词 直线电机; 压电作动器; 步进运动; 纳米级分辨率; 非共振

中图分类号 TH703; TM356

引 言

直线压电电机能够利用压电元件的逆压电效应,把电机定子的微幅振动直接转化为动子的直线运动,直线压电电机具有结构紧凑、定位精度高和免润滑、免电磁干扰等优点,因而在精密定位、精密操控和航空航天中具有良好的应用前景^[1-2]。

近 30 年来,共振型直线压电电机(直线超声电机)得到了迅速发展,出现了行波型^[3]、驻波型^[4]和声表面波型^[5]直线超声电机。其中:行波型直线超声电机出现最早,但是效率不高;驻波型直线超声电机具有易于小型化和效率高等优点,得到了众多国内外学者的青睐。日本学者研究了复合模式下的驻波型直线压电电机^[6],提出了一种具有“三明治”结构型式的大推力直线超声电机^[7]。国内,文献[8-10]系统研究了直线压电电机的设计、原理及其在精密定位平台的应用;文献[11-12]提出了具有单足、双足和四足特征的直线超声电机。上述研究工作推进了直线超声电机技术的迅速发展。目前,该类电机的最大行程可达厘米级、定位精度可达纳米级,电机最大输出力可达数十牛,这为直线压电电机的产业化应用提供了技术基础。

共振型直线压电电机为获得所需要的振动模式,必须对压电陶瓷的布置方式和定子的结构进行合理设计^[13]。同时,共振状态是一种不稳定状态,定子的固有频率会随温度等的变化而发生改变,这极大地影响了电机稳定运行^[14]。为此,文献[15-16]提出了非共振摩擦驱动型直线压电电机的工作机理,并开发了直动型、正交型和柔性位移放大型非共振直线压电电机。该类电机能够在几千赫兹范围内稳定运行,不受温度和磁场等外部环境的影响,对电机定子的尺寸精度和加工精度的影响不敏感,因而具有良好的宽频域运行稳定性。受电机原理的限制,上述几类非共振型直线压电电机的位移分辨率仅为微米级。为此,笔者在非共振摩擦驱动型直线压电电机的研究基础上,设计了一台具有纳米级步进特性的非共振型直线压电电机,并进行了样机的运动特性测试。

1 电机的工作原理

1.1 电机步进运动原理

电机定/动子接触界面的摩擦学特性取决于摩

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51405420, 51375224, 51805465);江苏省自然科学基金资助项目(BK20140474);江苏省高校优秀中青年骨干教师和校长境外研修计划资助项目;江苏高校“青蓝工程”资助人才项目(苏教 2018-12)
收稿日期:2018-09-25;修回日期:2018-11-15

擦副材料、定/动子间的正压力和相对运动特征。为此,希望通过控制在驱动阶段和回程阶段电机定/动子接触界面间的正压力和切向速度差,来实现电机动子在驱动阶段和非驱动阶段具有不同的摩擦驱动特性。这种摩擦驱动特性的差异可以使得电机动子在驱动阶段的位移大于在回程阶段的位移,从而在一个周期内实现一个较小的位移差,即得到一个较小的差动步距。图 1 为电机动子的步进运动原理图。

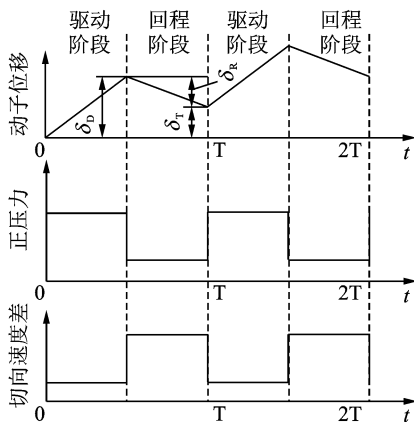


图 1 电机步进运动原理

Fig. 1 Motor stepping motion principle

由图 1 可知,与回程阶段相比,在驱动阶段,电机定/动子间的正压力较大、定/动子之间的速度差较小,因此电机动子能够产生较大的周期步进位移,即 $\delta_D > \delta_R$ 。在整个周期内,动子的运动距离为 $\delta_T = \delta_D - \delta_R$ 。

1.2 电机的结构原理和电激励方法

图 2 为电机的结构原理示意图,其中定子驱动足联接了两个垂直布置的压电作动器,分别为切向作动器和法向作动器。上述切向作动器采用三角波激励,占空比 ≥ 1 ,笔者采用占空比为 2 的非对称三角波激励;法向作动器采用方波激励,如图 3 所示。切向作动器用于控制电机定/动子间的切向速度差,法向作动器用于控制电机定/动子接触界面间的正压力。

当给两组压电作动器施加图 3 所示的激励信号时,电机动子的运动过程如下。

驱动阶段:法向压电作动器的激励电压由零突变为最大,法向压电叠层迅速伸长,法向正压力达到最大值。同时,切向压电作动器的激励电压由零缓慢增加,电机定/动子间的切向速度差较小,电机动子前进较大的距离 δ_D 。

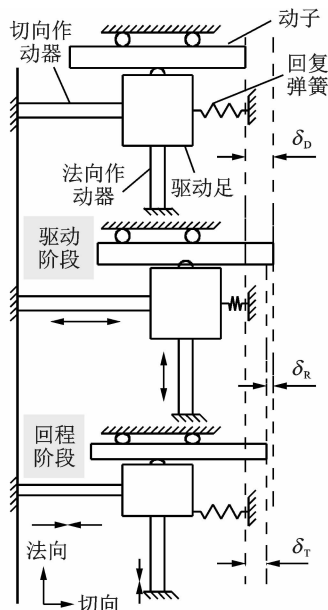


图 2 电机结构原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the motor

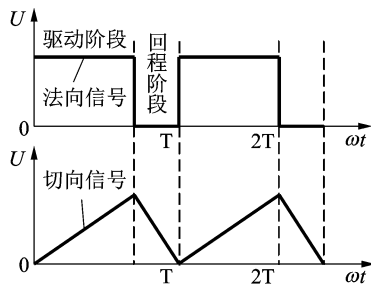


图 3 电机的激励信号

Fig. 3 Excitation signal of motor structure

回程阶段:法向压电作动器的激励电压由最大突变为零,法向压电叠层迅速缩短,电机定/动子间的正压力最小。由于切向压电作动器的激励电压由最大值迅速减小,电机定/动子间的切向速度差较大,电机动子后退较小的距离 δ_R 。

综上,在一个周期内,电机动子整体前进了一个差动步距 $\delta_T = \delta_D - \delta_R$ 。

2 电机的结构设计

2.1 驱动足的结构

为保证驱动足的切向位移和法向位移具有解耦性,提高驱动足的位移输出精度和易控制性,设计了具有法向振动框结构的驱动足。其中,切向振动框和法向振动框之间安装切向压电叠层,用来输出切向位移;法向振动框与横梁之间布置法向压电叠层,

用来输出法向位移。

切向振动框通过两平行的柔性悬臂固定在法向振动框内,该柔性平行悬臂具有较大的法向刚度和较小的切向刚度,如图 4 所示。驱动足的法向位移和切向位移分别由法向压电叠层和切向压电叠层提供,两压电叠层的预紧主要是通过切向预紧弹簧和法向预紧弹簧来实现的。上述两个预紧弹簧均为柔性结构,其设计刚度约为压电叠层刚度的 1/10。

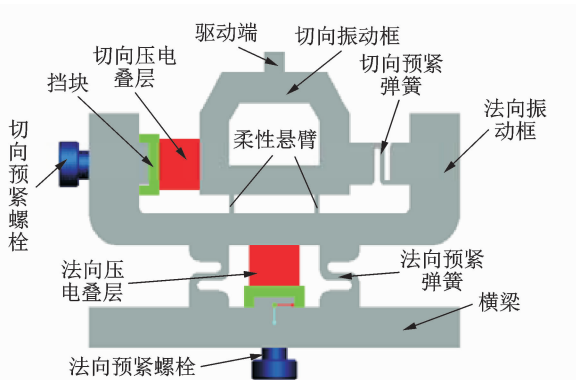


图 4 驱动足三维结构模型

Fig. 4 Three dimensional model of driving foot

2.2 驱动足结构参数设计

图 5 显示了电机驱动足的关键结构参数,这些参数的数值决定了驱动足的法向刚度和切向刚度。其中: T_1 和 W_1 为切向预紧弹簧的厚度和宽度; T_2 、 D 和 L 分别为两平行柔性悬臂的厚度、距离和高度。上述 5 个参数决定了驱动足的切向刚度,而驱动足的法向刚度主要取决于 T_2 和 W_2 ,分别表示法向预紧弹簧的厚度和宽度。当在 P_1 、 P_2 处施加周期性位移激励时,驱动足的刚度特性对驱动端的切向位移和法向位移有重大影响。同时,也会影响到电机定子系统的振动特性和振动模态。因此,需要对上述参数进行详细设计。

利用有限元法对驱动足进行静力学仿真。定义驱动足的材料属性:弹性模量为 2.09×10^{11} Pa,泊

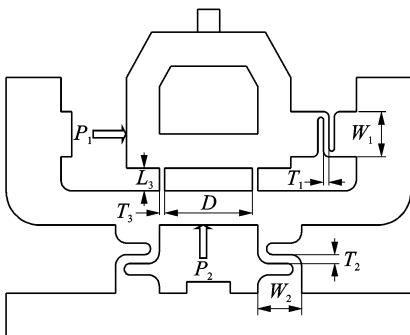


图 5 驱动足主要结构参数

Fig. 5 Main structural parameters of driving foot

松比为 0.269,密度为 $7\ 850\text{ kg/m}^3$ 。

使用高级网格划分方式中的接近和曲率对驱动足进行网格划分,划分后的网格如图 6 所示,共有 986 997 个节点,681 775 个单元。由于驱动足所联接定子夹持机构在切向的刚度很大,在 A、B、C、D 四处设置为固定约束,在 E 处施加力载荷,如图 7 所示。

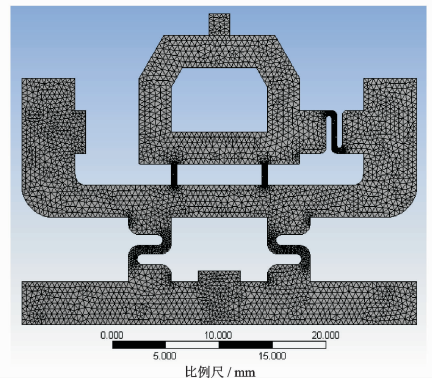


图 6 驱动足网格划分模型

Fig. 6 Meshing model of driving foot

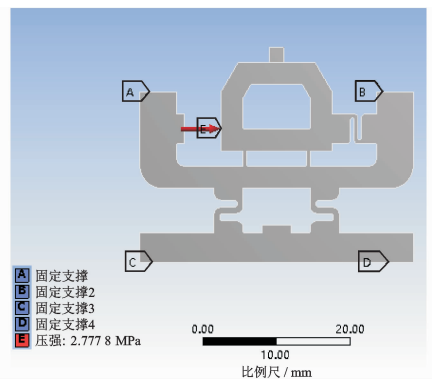


图 7 驱动足边界条件模型

Fig. 7 Boundary condition model of driving foot

由于法向振动框刚度较大,受载荷后的变形可忽略不计。利用有限元法仿真分析柔性梁的厚度和柔性梁间的距离对偏转率、切向位移和最大等效应力的影响,分别如图 8、9 所示。所谓偏转率是指压电叠层装配处驱动足的法向位移与切向位移的比率,过大的偏转率会造成压电叠层承受过高的剪切载荷,而降低压电叠层的寿命。

从图 8 可以看出,当柔性梁厚度在 $0.2 \sim 1.5\text{ mm}$ 范围内变化时,偏转率逐渐增加,而切向位移和最大等效应力逐渐降低。当柔性支撑梁的厚度小于 0.3 mm 时,发生了较大应力集中现象。当柔性梁的厚度大于 0.6 mm 时,偏转率较高。当柔性

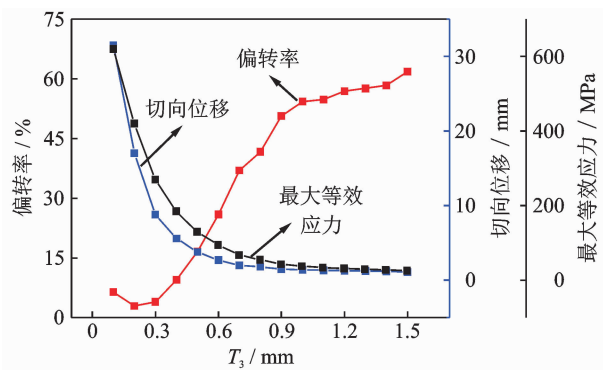


图8 柔性悬臂厚度的仿真设计

Fig. 8 Simulation design of flexible beam thickness

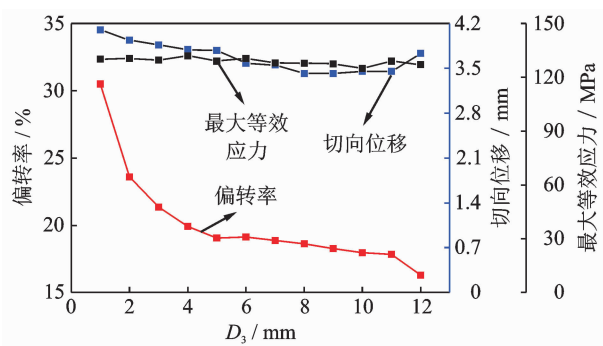


图9 柔性悬臂间距的仿真设计

Fig. 9 Simulation design of flexible cantilever spacing

梁的厚度大于 0.45 mm 时,驱动端的偏转率变化较小,能够满足驱动足的切向位移振幅要求。综上,柔性梁厚度的合理范围为 0.3~0.6 mm,取 0.5 mm。

图 9 反映了柔性悬臂梁间距对偏转率、切向位移和最大等效应力的影响。可以看出,柔性悬臂的间距对最大等效应力和驱动足的切向位移影响较小。随着柔性悬臂梁间距的增加,偏转率逐渐下降,当间距大于 5 mm 后,偏转率变化较小。故选取柔性悬臂梁的间距为 10 mm。

为获得预紧弹簧作用下压电叠层的适当输出位移,利用有限元软件对预紧弹簧的主要结构参数 T_1 , W_1 对其刚度的影响进行了仿真,结果如图 10 所示。

由图 10 可知,在柔性支撑梁的结构不变的条件下,驱动足的刚度随着预紧弹簧厚度的增大而增大,随着预紧弹簧宽度的增大而减小。由于预紧机构的刚度通常为压电叠层刚度的 1/10,根据仿真结果,切向压电叠层的预紧弹簧的厚度取 0.5 mm,宽度取 4 mm;法向压电叠层的预紧弹簧的厚度取 0.8 mm,宽度取 4 mm。驱动足的主要结构尺寸如表 1 所示。

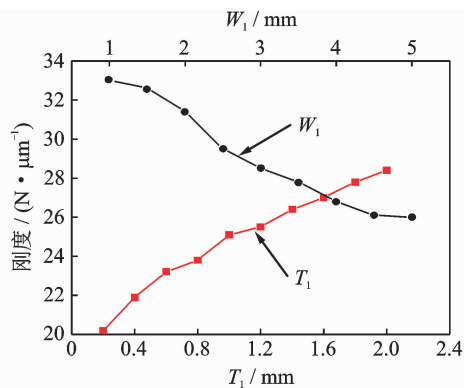


图10 预紧弹簧的仿真设计

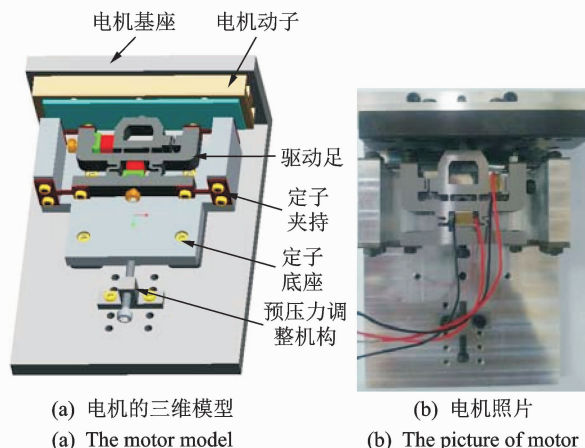
Fig. 10 Simulation design of pre-tightening spring

表1 驱动足主要结构参数及尺寸

参数	尺寸 / mm
W_1	4
T_1	0.5
T_3	0.5
D_3	10
W_2	4
T_2	0.8
L_3	2
W_3	6

2.3 电机的总体结构

定子和动子安装在 L 型底板上,电机整体结构如图 11(a)所示。电机夹持机构由定子底座和 4 片预压板簧组成,预压板簧为 T 形结构,分别连接驱动足和定子底座。预压板簧在水平方向有很大的刚度,起支撑驱动足的作用。在竖直方向的刚度较小,能产生较大的弹性变形,该弹性变形保证电机定子和动子在整个运动周期均处于接触状态。



(a) 电机的三维模型

(a) The motor model

(b) 电机照片

(b) The picture of motor

图11 电机的三维模型和实物照片

Fig. 11 3D model and physical photo of the motor

电机驱动足的材料为 45# 钢,调质处理;预压板簧的材料为 65Mn 弹簧钢;电机基座和定子底座为 2AL12 铝合金。压电叠层为 THORLABS 公司的 PA4FKW 型压电叠层,详细参数见表 2。

表 2 压电叠层主要参数

Tab. 2 The main parameter of piezoelectric stacks

尺寸/ mm	最大 位移/ μm	最大 出力/N	谐振 频率/kHz	工作 电压/V
$5 \times 5 \times 3$	3.6 ± 0.15	1 000	270	0~150

由于压电叠层的振动频率接近电机的固有频率时,电机系统会产生共振现象,影响电机的运行稳定性。为此,利用仿真分析软件对电机进行模态分析,以确定电机的非共振频率工作范围,仿真分析结果如图 12 所示。图 12 中横坐标为无量纲单位,表示振动阶次。

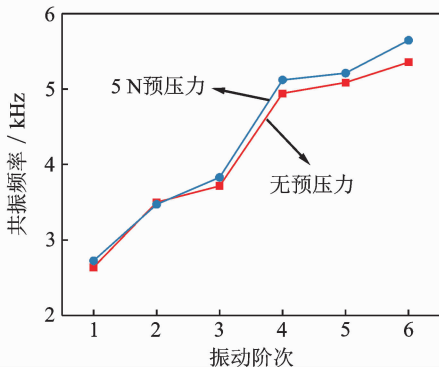


图 12 电机振动模式的仿真分析

Fig. 12 Simulation analysis of motor vibration mode

从图 12 可以看出,无预压力作用和 5 N 预压力作用下电机的一阶、二阶的固有频率非常接近,表明预压力对电机的低阶固有频率影响不大。随着阶次增加,两固有频率的差异也越来越大,其中两六阶固有频率差值约为 300 Hz。由于无预压力作用下单足电机的一阶固有频率为 2 637 Hz,因此电机的工作频率范围可达 2 kHz 以上。

3 电机样机的实验研究

为了测试定子的位移特性,搭建了基于 LK-H020 激光位移传感器测试系统的电机综合机械性能实时测试实验台,如图 13 所示。激光头可测量电机动子的位移输出,激光位移传感器的控制器实现激光头测量数值与计算机之间的数据传输和存储。

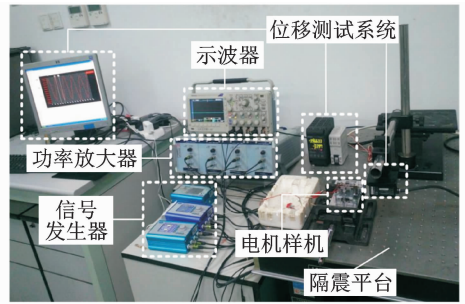
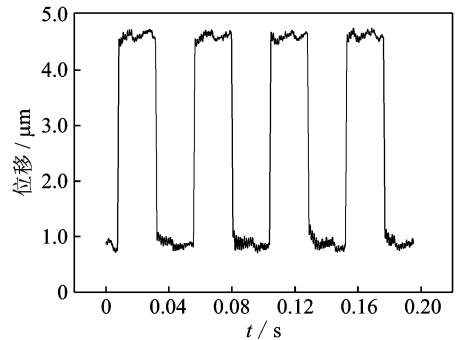


图 13 电机特性测试系统

Fig. 13 Testing system for motor characteristics

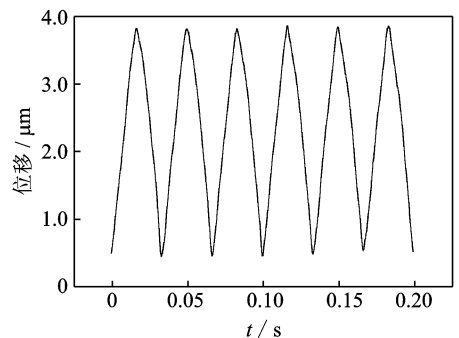
3.1 电机系统的振动特性测试

为验证图 1 所示的电机工作机理,测试电机定子驱动足的振动特性和动子运动特性。当电机稳定运行时,利用图 13 测试系统,能够以 10 kHz 的采样频率获得不同时刻定子驱动足振动位移或者动子运动位移的采样数据。利用 Origin 数值分析软件对采样数据进行处理可以得到相应的位移曲线。图 14 为驱动电压幅值为 140 V,频率为 20 Hz,30 Hz 时驱动足端部的切向振动特性曲线和法向振动特性曲线。从图 14 可以看出,驱动足的切向振动位移和法向振动位移均与激励电压的波形一致;切向振幅和法向振幅均为 3.5 μm 左右。因此,通过改变压



(a) 法向振动位移特性

(a) The normal vibration characteristic



(b) 切向振动位移特性

(b) The tangential vibration characteristic

图 14 电机定子振动特性曲线

Fig. 14 The vibration characteristic curve of motor stator

电叠层的激励频率和激励电压,能对电机定/动子间的正压力和切向速度差进行精确控制。

图 15 为预压力为 5 N,激励电压峰-峰值为 125 V,频率为 30 Hz 下的电机动子的微观运动特性曲线。

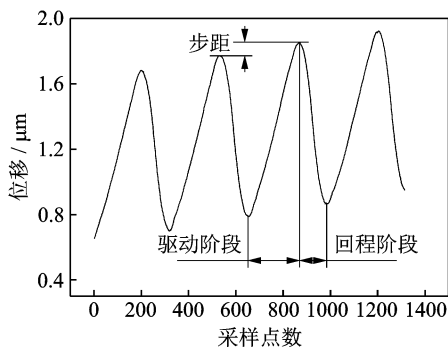


图 15 电机动子运动位移曲线

Fig. 15 The displacement curve of slider

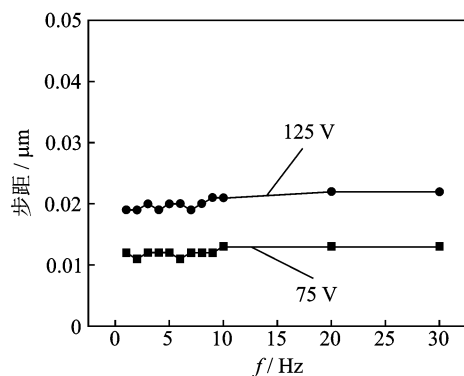
从图 15 知,动子在每个周期内做往复运动,由于驱动阶段和回程阶段摩擦特性的差异性,驱动阶段动子的位移大于回程阶段动子的位移,所以动子在一个周期内实现了更高精度的差动步距。

3.2 电机的步距特性测试

利用图 15 所示的动子位移曲线可以获得电机动子在多个周期内的平均运动步距,从而可以得到电机动子的步距运动特性曲线。图 16 为电机在 5 N 预压力、切向激励电压峰-峰值分别为 75 V 和 125 V 时电机在低频域的电机步距特性变化曲线。

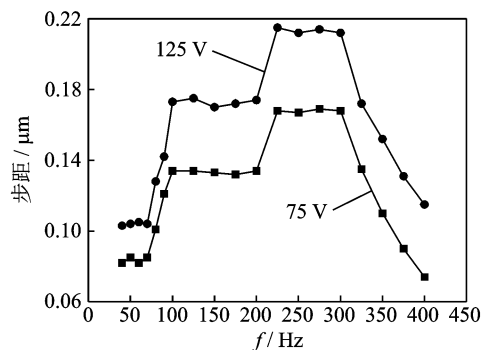
从图 16(a)可以看出,当切向激励电压为 75 V 时,电机的步距范围为 11~13 nm,平均步距为 12 nm,误差在 8% 左右;当切向激励电压为 125 V 时,电机步距范围为 19~22 nm,平均步距为 20 nm,误差在 10% 之内。从图 16(b)可以看出,激励频率范围为 40~70 Hz 时,当切向激励电压为 75 V 时,步距范围为 82~84 nm,平均步距为 83 nm,误差在 1.2% 之内。切向激励电压为 125 V 时,电机的步距变化幅度较小,步距范围为 104~106 nm,平均步距为 105 nm,误差在 1% 之内。

在 100~200 Hz 内,切向激励电压为 75 V 时,电机的步距范围为 132~134 nm,平均步距为 133 nm,误差在 1% 以内。切向激励电压为 125 V 时,电机的步距变化范围为 170~173 nm,平均步距为 171.5 nm,误差在 1% 之内。在 225~300 Hz 内,切向激励电压为 75 V 时,电机的步距范围为 164~166 nm,平均步距为 165 nm,误差在 0.6% 左



(a) 低频域步距特性

(a) The step characteristic in low frequency range



(b) 高频域步距特性

(b) The step characteristic in high frequency range

图 16 电机步距特性曲线

Fig. 16 Motor step characteristic curve

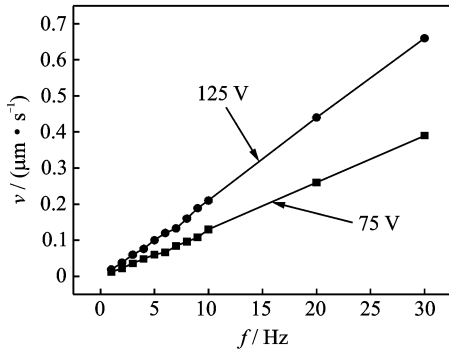
右。切向激励电压为 125 V 时,电机的步距范围为 211~214 nm,平均步距为 213 nm,误差在 1% 之内。

综上,在整个工作频率范围内,该电机存在 4 个稳定步距频域。随着频率的增加,电机的步距逐渐增加,到临界频率(300 Hz)后,电机的步距逐渐减小,但不存在稳定步距频域。

3.3 电机的速度特性测试

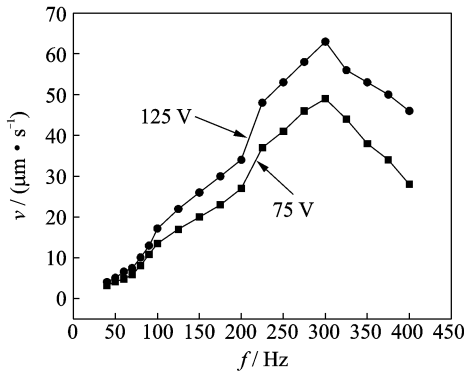
通过测量在某一时段内电机动子的运动位移,可获得电机动子的平均速度,如图 17 所示。在 1~30 Hz 围内,电机以极低速运行,最高速度不超过 1 $\mu\text{m/s}$,电机速度与频率之间呈线性关系,如图 17(a)所示。在 40~400 Hz 频率范围内,电机的运行速度均大于 1 $\mu\text{m/s}$,电机速度与频率之间的线性关联度变差,如图 17(b)所示。当激励电压为 75 V 和 125 V 时,都存在一个临界频率,使得电机的运行速度最高,且临界频率均为 300 Hz 左右。

在 1~400 Hz 频率范围内,电机的运行速度先增加再降低,当频率超过 400 Hz 时,电机不能够稳



(a) 低频域速度特性

(a) The speed characteristic in low frequency range



(b) 高频域速度特性

(b) The speed characteristic in high frequency range

图 17 电机的速度特性曲线

Fig. 17 Motor speed characteristic curve

定运行。这主要是由于频率较低时,电机在一个周期的运动步距也较小,因而电机的运行速度很低。随着频率增加,电机的周期运动步距也随之增加,因此电机的运行速度变大。但超过临界频率后,电机定子的振动频率过高,电机动子在驱动阶段和回程阶段的位移差值越来越小,即周期运动步距不断减小,所以电机的运行速度逐渐降低。特别地,激励频率高于 400 Hz 时,电机步距为零,电机动子将作往复运动。

3.4 电机的推力-速度特性测试

利用吊砝码的方法分别测试激励电压为 75 V 和 125 V、激励频率为 300 Hz 时电机的推力-速度特性,如图 18 所示。可以看出,随着电机悬吊砝码重量的增加,电机的运行速度逐渐降低。当激励电压为 75 V 时,电机的最大推力可达 1 N,当激励电压为 125 V 时,电机的最大推力可达 1.6 N。

4 结束语

在研究非共振直线压电电机运动原理的基础

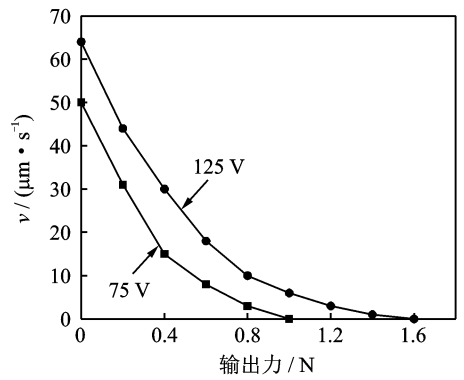


图 18 电机的推力-速度特性

Fig. 18 Thrust-speed characteristic of the motor

上,提出了一种具有纳米级步进运动特性的直线压电电机。该电机定子具有法向振动位移和切向振动位移解耦的特点,便于实现对电机定/动子法向力和切向速度进行独立控制。利用有限元法对电机定子的关键参数进行仿真分析和优化设计,从而设计出满足定子位移输出特性的柔性结构。通过对电机样机的定子和动子进行振动特性测试,验证了该类电机的运动原理。电机运动特性和机械特性实验表明,该电机可以在 1~400 Hz 的频率范围内稳定运行,电机运动行程可达 70 mm,位移分辨率最高可达 11 nm。通过精密控制驱动阶段和回程阶段电机定/动子间的正压力和切向速度差,动子在驱动阶段与回程阶段分别实现了一个可控的、方向相反的精确位移,从而在整个运动周期内能够获得更小的周期运动步距,即纳米级步进运动位移。另外,该类型电机具有良好的运行稳定性和易控制性,可以通过调频和调压两种方式实现对电机的控制。

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,2007:167-168,330-332.

[2] 姚志远,李晓牛,李响,等. 直线超声电机设计、建模和应用的研究进展[J]. 振动、测试与诊断,2016,36(4): 615-623.
Yao Zhiyuan, Li Xiaoniu, Li Xiang, et al. Advances in design, mand applications of linear ultrasonic motors [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016,36(4):615-623. (in Chinese)

[3] Zhang Dongsheng, Wang Shiyu, Xu Jie. Piezoelectric parametric effects on wave vibration and contact mechanics of traveling wave ultrasonic motor[J]. Ultra-

- sonics, 2017, 81:118-126.
- [4] Li Xiang, Yao Zhiyuan, He Yigang, et al. Modeling and experimental investigation of thermal-mechanical-electric coupling dynamics in a standing wave ultrasonic motor[J]. Smart Material Structures, 2017, 26(9): 1-18.
- [5] Takasaki M, Osakabe N, Kurosawa M K, et al. Miniaturization of surface acoustic wave linear motor[J]. Micromechatronics, 2017, 44:679-682.
- [6] Funakubo T, Tomikawa Y. Characteristics of multi-layer piezoelectric actuator made of high Q material for application to ultrasonic linear motor[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2002, 41(11):7144-7148.
- [7] Kurosawa M K, Kodaira O, Tsuchitoi Y, et al. Transducer for high speed and large thrust ultrasonic linear motor using two sandwich-type vibrators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1998, 45(5):1188-1195.
- [8] 韩路, 黄卫清, 王寅. 两级复合放大箝位步进压电直线电机[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 698-702. Han Lu, Huang Weiqing, Wang Yin. Clamp stepper piezoelectric linear motor with combination of two amplification [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 698-702. (in Chinese)
- [9] 李玉宝, 时运来, 赵淳生, 等. 高速大推力直线型超声电机的设计与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33):49-53. Li Yubao, Shi Yunlai, Zhao Chunsheng, et al. Research on linear ultrasonic motor with high speed and large thrust force [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33):49-53. (in Chinese)
- [10] Wang Liang, Liu Junkao, Liu Yingxiang, et al. A novel single-mode linear piezoelectric ultrasonic motor based on asymmetric structure[J]. Ultrasonics, 2018, 89:137-142.
- [11] Liu Yingxiang, Chen Weishan, Xu Dongmei, et al. Improvement of a rectangle-shape linear piezoelectric motor with four driving feet[J]. Ceramics International, 2015, 41(S1):594-601.
- [12] Liu Yingxiang, Chen Weishan, Feng Pengliang, et al. Miniaturization of a U-shape linear piezoelectric motor with double feet[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2014, 214(4):95-100.
- [13] 徐旭, 梁艳春, 时小虎. 超声马达的频率温度特性分析[J]. 吉林大学学报:理学版, 2002, 40(2):109-113. Xu Xu, Liang Yanchun, Shi Xiaohu. Analysis of frequency-temperature characteristics of ultrasonic motor [J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2002, 40(2):109-113. (in Chinese)
- [14] 陈培洪, 王寅, 黄卫清. 一种新型直动式压电直线电机的设计[J]. 压电与声光, 2011, 33(2): 239-243. Chen Peihong, Wang Yin, Huang Weiqing. The design of a new direct action piezoelectric linear motor [J]. Piezo-electrics & Acoustooptics, 2011, 33(2): 239-243. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] Sun Mengxi, Huang Weiqing, Wang Yin, et al. Research on a novel non-resonant piezoelectric linear motor with lever amplification mechanism[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2017, 261:302-310.



第一作者简介:陈西府,男,1979年8月生,博士、副教授。主要研究方向为压电作动器的设计及应用。曾发表《动摩擦型压电叠堆直线电机定子的振动特性》(《振动、测试与诊断》2014年第34卷第5期)等论文。

E-mail: chenxiforyou@163.com

通信作者简介:卢倩,男,1983年7月生,博士、副教授。主要研究方向为压电驱动技术及压电致动测试计量技术。

E-mail: jackeylunuaa@126.com

