

基于 H 卧板面内四足驱动的平面超声电机

贺红林,肖智勇,廖永林,陶 结

(南昌航空大学 航空制造工程学院,江西 南昌 330063)

摘 要:提出 H 结构定子三相振动模态驱动的平面超声电机,设定 H 卧板两纵杆端部处于 xOy 面内的四个凸起作为定子驱动足。通过 H 结构的面外二弯模态分别与面内一纵模态以及面内二弯模态的振动复合,在驱动足合成出沿 yOz 面、 xOz 面的椭圆轨迹,推动动子交替地沿 x 、 y 向做直线运动。阐释了电机的工作原理,推导出驱动足的两相空间椭圆轨迹方程;建立了定子有限元分析模型,实现了定子频率一致性动力学特性优化,仿真出驱动足的频响特性、振动响应及其运动调节特性,设计了电机的装配结构。模拟了仿真定子的运动,结果表明,驱动足沿 x 、 y 、 z 向振幅均达微米级,且调节激励电压和相位可调节电机 x 、 y 向速度与推力。该电机具有广阔应用前景。

关键词:H 形卧板;平面超声电机;驱动机理;结构优化;动力学特性

中图分类号:TM359.5

文献标识码:A

Research on an Ultrasonic Planar Motor Driven by four In-Plane Ends of an H-shaped Stator

HE Honglin, XIAO Zhiyong, LIAO Yonglin, Tao Jie

(School of Aeronautical Manufacturing, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract: An ultrasonic planar motor driven by the three-phase vibration modal based on H-shaped stator was proposed in this paper. Suppose the four bulges located in the xOy plane at the ends of two longitudinal rods of H-shaped horizontal plate are used as the driving feet of the stator, the 1st longitudinal mode, 2nd in-plane bending mode and 2nd out-plane bending modes of H-shaped stator were used as working modes, which were employed to make the motor drive ends run in ellipse trajectories along the yOz and xOz planes to push the slider to do linear motion alternately along x and y directions. The principle of the motor was introduced, and the motion equation for drive end was derived. A frequency consistency optimization finite element analysis (FEA) model for the H-shaped stator was built to calculate the frequency response characteristics, driver particle vibration response and the movement regulation characteristics. An assemble structure was designed for the motor. The vibration simulations for the stator were carried out, which showed that the drive ends' amplitude were up to micron level along the x , y , z directions and the motor's speed at x , y directions as well as the output power could be regulated by moderating either the driving voltage or the phase angle. The proposed motor has wide application prospects.

Key words: H-shaped stator; piezoelectric planar motor; working principle; structural optimization; dynamic characteristics

0 引言

目前,超声电机已进入了工程实用阶段,在诸如高端相机镜头、精密仪器、医疗器械、航空航天、信息和汽车产业、导弹引导装置、飞机的电传操纵系统等领域都得到了重要应用^[1]。超声电机有旋转型、直线型和平面运动型等多种形式^[2]。经过国内、外多年的研究与发展,旋转型和直线型超声电机已经取得了重大突破,并已日渐成熟,而平面运动型超声电

机(PSUM)因运动原理、结构动力学特性及其驱动控制技术复杂,故其发展相对缓慢,目前,在国内外关于平面超声电机的研究与应用还多处于探索阶段^[3]。PSUM 能实现两个或三个平面自由度耦合运动,具有直接驱动、响应快、定位精度高等特点性,目前已推出的平面超声电机主要有柱杆式、平板式、组合式等型式^[2],如吉林大学曾平等研制出一种在平面内实现呈 120° 的三自由度方向直线运动的

收稿日期:2015-09-09

基金项目:江西省自然科学基金资助项目(20151BAB206036);江西省教育厅科技基金资助项目(GJJ14517)

作者简介:贺红林(1967-),男,江西永新县人,教授,硕士生导师,博士,主要从事结构动力学及强度、机电系统设计与控制、压电驱动技术的研究。E-mail:hehonglin1967@163.com。

平板式平面电机^[4];2006年,法国学者通过激励柱杆结构不同阶次的工作模式,研制出能够实现 x 、 y 两方向直线运动和面内旋转运动的3自由度平面超声电机^[5];2008年,时运来基于变截杆的四阶弯振,研制出一种柱杆式的两自由度平面超声电机;2009年,郝铭研制了一种基于十字正交聚能器纵弯复合驱动的平面超声电机,其推力可达100N^[2];2012年,Scuor研究出一种五自由度定位平台^[6];2014年,严亮等研究了一种基于单定子的两自由度平面超声驱动器^[7]。根据上述研究背景,适于应用的需要,为推出大推力、高速度、平板化平面电机,本文在文献[8-9]的工作基础,提出一种H形卧板式压电换能结构驱动的平面超声电机,利用H形卧板的面内外三相振动模式的复合推动动子做平面运动。

1 定子结构及工作原理

1.1 定子结构及其压电配置

利用H形结构的面外弯振、面内纵振、面内弯振三相模态在驱动足上合成出沿两相正交平面内椭圆轨迹,实现动子两向直线运动的直接驱动。定子设计成图1所示H结构,为减少结构振动能量损耗及结构误差对工作模式的影响,定子采用整体式结构;在两纵杆末端设置4个驱动足,用于实现定子与动子之间的摩擦接触;图中, B 为 y 向高度尺寸参数, H 为 z 向厚度尺寸参数, L 为 x 方向长度尺寸参数。图2为压电陶瓷供电方案,PZT采用贴片方式粘贴在H形结构板两纵杆表面,利用压电陶瓷压电常数矩阵中 d_{31} 分量判别的LE振动模式,对三相工作模式进行振动激励,压电陶瓷的极化方向均垂直于定子基体各粘贴表面且方向朝外。其中,激励面内纵振的4片压电陶瓷分别粘贴于纵杆与横杆交汇处正、反面,处于纵杆一阶反对称纵振节线位置;激励面内、面外二阶弯振的两组压电陶瓷各有8片,分别粘贴于两纵杆端部的左右、正反侧面,处于二阶弯振波峰(或波谷)位置。

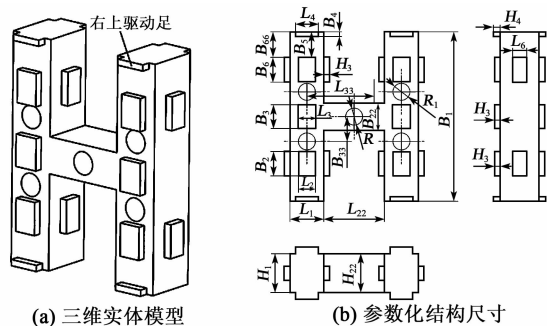


图1 定子结构及尺寸参数

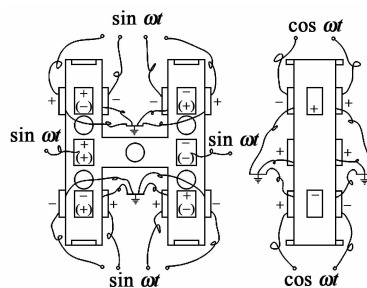


图2 压电陶瓷供电配置

1.2 驱动机理

电机通过H板面外二阶弯振与面内一阶纵振模态的振动耦合,在驱动足合成出沿 yOz 面椭圆运动轨迹,通过面外二阶弯振与面内二阶弯振模态的振动耦合,合成出沿 xOz 面椭圆运动轨迹。定子三相工作模态的作用是纵振、面内弯振分别实现 y 、 x 向自由度移动,面外弯振实现定/动子间动态接触与分离,图3为电机在一个振动周期(T)内的运动状态。

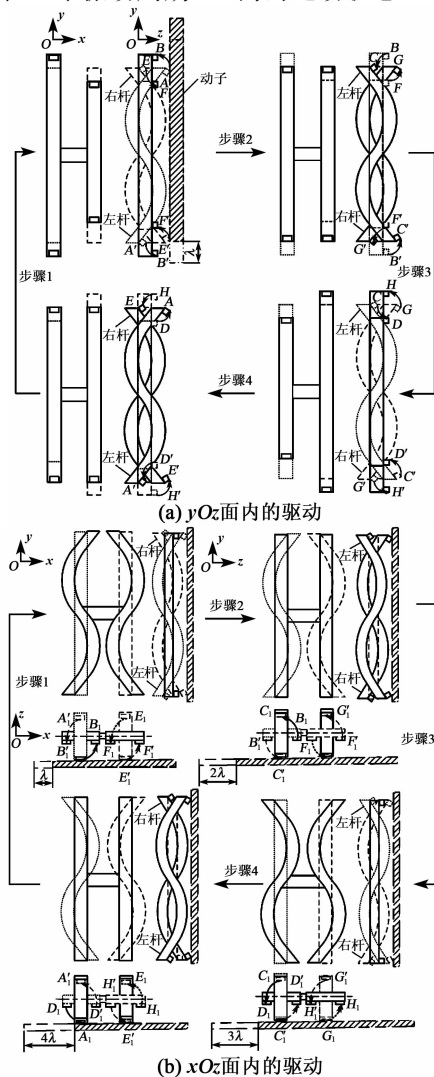


图3 定子驱动足在一个振动周期内的运动

图3(a)为 y 向运动的驱动过程:在 $0 \sim T/4$ 时段,定子面外二阶弯振使左杆上部由最大前弯状恢复成直杆状,使左杆上部的驱动足与动子保持接触并使下部驱动足与动子脱离接触;定子面内一阶纵振使左杆由初始长度 L_0 伸长至最大长度 $L_{\max}$,驱使左杆上部驱动足由A行至B,使下部驱动足由A'行至B'。同时,右杆上部由最大后弯状恢复成直杆状,右杆上部驱动足与动子保持脱离状态而下部驱动足与动子保持接触;定子的一阶反对称纵振则使右杆由 L_0 收缩至最小长度 $L_{\min}$,使右杆上部驱动足由E行至F,而右杆下部驱动足质点由E'行至F'。在该时段,定子左杆上部驱动足与右杆下部驱动足同时与动子接触,共同推动动子沿 y 向移进第一个步距 λ 。随着三相工作模态的振动,定子分4步完成一个完整的振动周期 T ,左杆上部驱动足则依次完成从A-B-C-D-A的一个椭圆运动轨迹,左杆下部、右杆上部、右杆下部驱动足则分别完成A'-B'-C'-D'-A'、E-F-G-H-E、E'-F'-G'-H'-E'的椭圆运动轨迹;定子每完成一个振动周期 T ,则推动动子沿 y 向前移 4λ 。当定子不断重复上述振动周期时,它将推动动子不断沿 y 向前移。如果逆转两相激励电压之间的相位差,动子将沿 y 轴的反方向移动。

图3(b)给出定子驱动动子 x 向运动的情况,其驱动机理与 y 向类似,即定子每完成一个 T ,左杆上部、左杆下部、右杆上部、右杆下部驱动足完成从A1-B1-C1-D1-A1、A1'-B1'-C1'-D1'-A1'、E1-F1-G1-H1-E1、E1'-F1'-G1'-H1'-E1'的椭圆轨迹。

综上所述,在给三相压电陶瓷同时施加激励电压时,当定子面外二阶弯振使左杆上部由最大前弯状恢复成直杆状时,左杆上部驱动足与动子保持接触,面内一阶纵振使左杆上部由初始长度 L_0 伸长至最大长度 $L_{\max}$,面内二阶弯振使左杆上部由直杆状弯成右弯状,驱动足推动动子同时沿 y 、 x 向运动。在不断重复振动周期时,两自由度运动不会产生互相干扰阻滞现象。

1.3 驱动足运动轨迹

H形卧板不同于简单的矩形板和圆板,属异形复杂结构,难以建立其整个结构的振动方程,故无法求解其固有振型函数。但根据左右纵杆假设工作模式的对称性,可将单个纵杆简化为Bernoulli-Euler梁的自由振动问题。现以纵杆末端面中心点为原点建立笛卡尔坐标系,并假定由压电陶瓷激发的三相工作模态振动波能同时达到驱动足,则驱动足质点沿 x 、 y 、 z 方向简谐振动位移响应为

$$x = U \cos(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

$$y = V \cos(\omega t + \beta) \quad (2)$$

$$z = W \cos(\omega t + \gamma) \quad (3)$$

式中: U 、 V 、 W 为驱动足 x 、 y 、 z 向振幅; ω 为激励电压圆频率; α 、 β 、 γ 为驱动足沿 x 、 y 、 z 向振动的初相位;对式(1)~(3)进行三角变换,可得

$$\begin{aligned} \left(\frac{x}{U}\right)^2 + \left(\frac{y}{V}\right)^2 + \left(\frac{z}{W}\right)^2 - \frac{\cos(\beta-\alpha)}{UV}xy - \\ \frac{\cos(\gamma-\beta)}{VW}yz - \frac{\cos(\alpha-\gamma)}{WU}zx = \\ \frac{1}{2}[\sin^2(\beta-\alpha) + \sin^2(\gamma-\beta) + \\ \sin^2(\alpha-\gamma)] \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)为空间椭圆曲线方程,如图4所示。该椭圆轨迹在 xOy 、 xOz 、 yOz 平面上的投影分别为

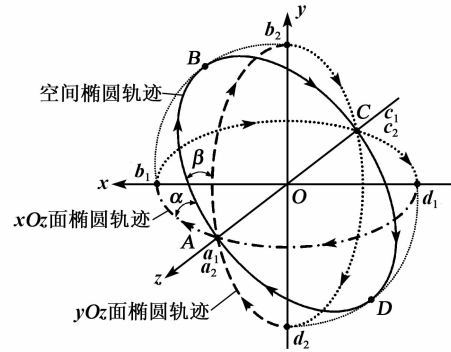


图4 定子驱动足质点的空间椭圆运动

$$\left(\frac{x}{U}\right)^2 + \left(\frac{y}{V}\right)^2 - \frac{2\cos(\beta-\alpha)}{UV}xy = \sin^2(\beta-\alpha) \quad (5)$$

$$\left(\frac{x}{U}\right)^2 + \left(\frac{z}{W}\right)^2 - \frac{2\cos(\alpha-\gamma)}{UW}xz = \sin^2(\alpha-\gamma) \quad (6)$$

$$\left(\frac{y}{V}\right)^2 + \left(\frac{z}{W}\right)^2 - \frac{2\cos(\gamma-\beta)}{VW}yz = \sin^2(\gamma-\beta) \quad (7)$$

式中, $\beta-\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$, $\alpha-\gamma \in [-\pi/2, \pi/2]$, $\gamma-\beta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。本文采用 xOz 、 yOz 面内两个椭圆运动轨迹的复合驱动动子,故当激励电压相位差 $\alpha-\gamma=\pi/2$ 、 $\gamma-\beta=\pi/2$ 时,式(5)~(7)简化为

$$\left(\frac{x}{U}\right)^2 + \left(\frac{z}{W}\right)^2 = 1 \quad (8)$$

$$\left(\frac{y}{V}\right)^2 + \left(\frac{z}{W}\right)^2 = 1 \quad (9)$$

由式(8)可知,驱动足沿 xOz 、 yOz 面作标准椭圆运动,椭圆长、短轴分别为三相振动的振幅,椭圆轨迹形状将影响定子对动子的推动力及电机沿 x 、 y 向运动速度。

2 结构动力学分析

2.1 FEM模型的建立

采用有限元法(FEM)对定子进行结构动力学分析及工作模态计算。在用FEM求解定子工作振型和振动特性参数时,先将定子基体及其PZT片进行结构离散化,而得到多个单元以及一系列节点,并为结定义位移自由度,从而将定子无限自由度求解问题转换为有限个节点自由度求解问题。对于PZT单元,考虑其压电效应,还要为其结定义电势自由度,并引入压电方程描述其力电耦合特性。这样,使得定子FEM机电动力学平衡方程

$$\begin{cases} \mathbf{M}_m \ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}_m \dot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}_{me} [\mathbf{q}_e] = \{\mathbf{F}\} \\ \mathbf{K}_{me}^T \boldsymbol{\delta} - \mathbf{K}_e [\mathbf{q}_e] = \{\mathbf{Q}_q\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{M}_m$ 、 $\mathbf{K}_m$ 分别为弹性基体单元质量阵和刚度阵; $\mathbf{K}_{me}$ 、 $\mathbf{K}_e$ 分别为压电单元的压电耦合阵和介电矩阵; $\{\mathbf{F}\}$ 为定子与动子在接触面上的广义作用力; $\{\mathbf{Q}_q\}$ 为压电单元电极上的电荷; $\boldsymbol{\delta}$ 为节点位移向量; $[\mathbf{q}_e]$ 为节点电荷自由度向量。

采用ANSYS求解式(10),利用8节点六面体单元Solid185实现定子弹性基体网格化,采用多场耦合单元Solid5对压电陶瓷片进行网格划分。根据定子的振动机理及其装配特性,为定子设定自由边界求解条件。定子基体选用黄铜,压电陶瓷采用PZT-8。图5给出了定子振型计算结果。

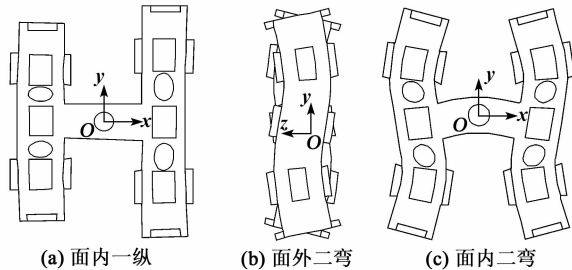


图5 电机工作模态的计算结果

2.2 频率灵敏度分析

为确定定子三相工作模态并使模态频率尽可能地接近,建立H形卧板的参数化有限元分析模型。要找到满足频率一致性的尺寸,要使驱动足输出尽可能大振幅,并实现电机结构微型化和平板化设计,这都有赖于定子结构尺寸优化,为此,需先对定子的主要尺寸进行频率灵敏度分析。该分析不仅是定子设计的基础,也是为后期模态修正及样机调试的重要依据。由于压电激励陶瓷制备复杂,故一般不对陶瓷片尺寸进行优化,即在设计时直接选定成品规格化的压电陶瓷片。表1列出了定子的初始尺寸。

表1 H定子结构参数尺寸

结构参数	L_1/mm	B_1/mm	H_1/mm	L_{22}/mm
初始值	5.80	30.00	6.50	10.50
优化值	6.00	30.00	6.85	10.71
结构参数	B_{22}/mm	H_{22}/mm	L_4/mm	B_4/mm
初始值	5.00	6.50	4.00	0.80
优化值	4.80	6.85	4.00	0.80
结构参数	H_4/mm	R/mm	R_1/mm	B_{33}/mm
初始值	1.20	1.50	1.50	4.40
优化值	1.20	1.50	1.50	4.40

图6为定子结构参数对三相工作模态频率的影响关系。定子结构尺寸的模态频率灵敏度定义为

$$S_j^i = \frac{\partial f_j^i}{\partial p_j} = \frac{(f_{v,j}^i - f_{o,j}^i)}{\Delta p_j} \quad j = 1, 2, \dots, 5 \quad (12)$$

式中, $f_j^{(i)}$ 为第*i*阶模态频率; $i=1,2,3$ 为定子三相工作模态; $f_{v,j}^{(i)}$ 、 $f_{o,j}^{(i)}$ 分别表示定子尺寸的初值及其修改后的值所对应的模态频率; Δp_j 为尺寸参数 $p_j(L_1, H_1, H_{22}, L_{22}, B_{22}, R_1)$ 的变化量。

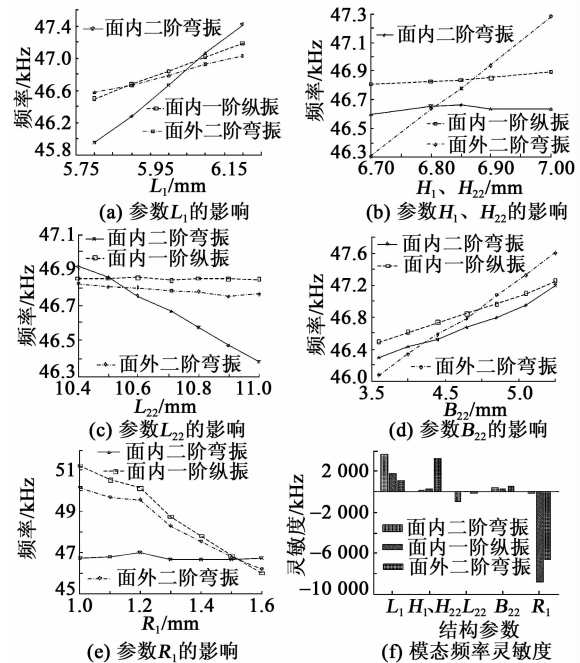


图6 定子结构尺寸对模态频率的影响及灵敏度

从图6(a)可知,尺寸 L_1 对三相工作模态频率都有一定的影响,但对面内二阶弯振影响最大,(见图6(b)),厚度 H_1 、 H_{22} 对面外二阶弯振频率影响最大;尺寸 L_{22} 对面内二阶弯振频率影响最大,(见图6(c));尺寸 B_{22} 对三相工作模态频率影响都较小,(见图6(d));尺寸 R_1 对面内一纵、面外二弯频率影响非常大,对面内二弯几乎没有影响,可直接选定调整孔 R_1

的尺寸为 1.5 mm,(见图 6(e));图 6(f)为各结构参数的模态频率灵敏度。综上分析,在 H 定子工作模态频率一致性分析时,可选定 L_1 、 H_1 、 H_{22} 、 L_{22} 、 B_{22} 参数为优化变量,从而实现结构的频率一致性。

2.3 频率一致性优化

考虑到定子的 FEM 参数化建模型时涉及众多结构参数,同时本文电机的运行又要求三相工作模态的频率趋于一致,为使三相模态频率尽可能接近,需在采用试凑法确定定子初始尺寸的基础上,再利用结构动力学优化方法求取定子的优化尺寸。为此,先根据图 6 的模态频率灵敏度分析结果确定部分结构参数的初始值,拟定优化设计变量的寻优区间,再设计优化算法,在优化区间内求取需相应结构参数的最佳值。依据工作模态频率一致性要求,建立 H 定子动力学优化模型

$$\begin{aligned} \text{define } F_1 &= |f_l - f_{b,\tau}|, \\ F_2 &= |f_l - f_{b,n}|, \\ F_3 &= |f_{b,\tau} - f_{b,n}| \\ \text{find } X &= [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = \\ & [L_1, H_1, L_{22}, B_{22}]^T \\ \min F_{obj} &= \begin{cases} F_1 & (F_1 \geq F_2, F_1 \geq F_3) \\ F_2 & (F_2 \geq F_3, F_2 > F_1) \\ F_3 & (F_3 > F_1, F_3 > F_2) \end{cases} \\ \text{s. t. } x_{i,\min} &\leq x_i \leq x_{i,\max} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: f_l 、 $f_{b,\tau}$ 、 $f_{b,n}$ 分别表示定子的一阶纵振、面内二阶弯振、二阶弯振的模态频率; F_{obj} 为目标函数; $x_{i,\min}$ 、 $x_{i,\max}$ 分别表示相应尺寸的最小值和最大值。

采用 ANSYS 的参数化语言 APDL 编程实现模型(12)的优化求解。通过优化计算求得定子的优化尺寸并列于表 1 中,该组尺寸对应的定子三相工作模态频率之间的最大差值为 222 Hz。

3 驱动足振动响应

若在工作模态频率附近存在振幅与工作模态振幅相近的同向振动干扰模态,则不仅会使电机的效率将大幅降低,甚至会使电机无法正常运行。因此,有必要分析在工作模态附近是否存在高峰值干扰模态,需研究定子的谐响应特征。利用 ANSYS 谐响应求解器,针对定子工作模态邻近频区 44.5~47.5 kHz进行了谐响应分析,求得定子驱动足振动位移幅频响应曲线如图 7(a)所示。

可见,不仅定子的三相工作模态频率接近,而且在工作模态附近不存在高强度同向干扰模态,这说明电机能稳定运行,且可调频范围在可达 1000 Hz。

在驱动足质点能否合成有效椭圆轨迹也是电机

能否正常运行的关键。为此,对 H 形定子进行电激励振动计算,故而在定子三相压电陶瓷片组施加幅值 300 V、频率 46.6 kHz 的同频且相位差为 $\pi/2$ 的正弦激励电压,且设置适当的瑞利阻尼系数,并启动 ANSYS 瞬态求解器仿真了驱动足的振动响应。仿真计算时,选取右上驱动足正面与端面交线的中点为位移响应观测点。图 7(b)、(c)、(d)给出了该驱动足质点的位移响应特性,从图中可见,在经过短暂的振动启动阶段后,驱动足沿 x 、 y 、 z 三向振动迅速达到稳定振动状态,振幅达到微米级。而由 7(e)、(f)可知,右上驱动足顶端中点在沿 xOz 面、 yOz 面的运动轨迹均为椭圆。图 7(g)、(h)为右上驱动足不同质点的椭圆轨迹。可见,靠近驱动足上端面的质点沿 xOz 面的椭圆轨迹比较理想,靠近驱动足内侧端面的质点沿 yOz 面运动的椭圆轨迹较理想;由此可推断:驱动足上与动子接触的位置宜选定在 H 形结构板两纵杆靠近两端端面与内侧位置。考虑到 H 结构的几何对称性,其驱动足以对角线为分界线分为两组而交替地推动动子,为此,还对其他三个驱动足的振动响应进行了观测,结果发现其他三足的运动轨迹与右上驱动足基本保持一致。

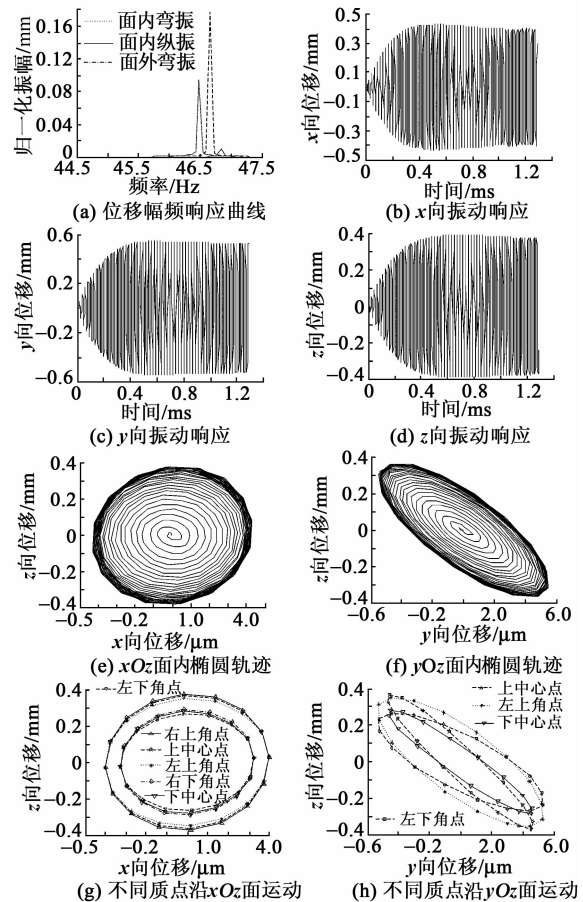


图7 右上驱动足不同质点的振动响应

4 运动调节特性

根据超声电机理论,电机输出推力、速度与驱动足质点的振幅、椭圆轨迹倾斜角密切相关。为获取电机的运动输出特性,对定子的调频、调压、调相位差振动特性进行了仿真分析。在计算调频特性时,三组压电陶瓷均通入幅值为 300 V 的正弦电压,使面内一阶纵振激励电压与面外二阶弯振激励电压的相位差保持为 $\pi/2$,却与面内二阶弯振激励电压保持同相;选定电机工作频段内 7 个频率点,分别对定子进行电压激励。

图 8 为平面超声电机的运动调节特性。由图 8(a)可知,定子在不同频率的电压激励下,振幅呈非线性变化,且在激振频率为 46 kHz 时,振幅达到最大峰值;则通过调节激振电压的频率,可同时改变驱动足 y 、 x 向的输出振幅以调节电机的输出动力和速度,但无法调节 y 、 x 单一自由度方向运动是以推力输出为主还是以速度输出为主。进行调压特性计算时,三组压电陶瓷均通入 46.6 kHz 同频同幅的正弦电压,电压调节范围从 100~350 V 等差变化,三相激励电压的相位配置与调频分析时相同,图 8(b)表明驱动足振幅大小与激励电压幅值呈正向关系;但 PZT 存在工作电压容限,调压法对其运动特性的调节有限。

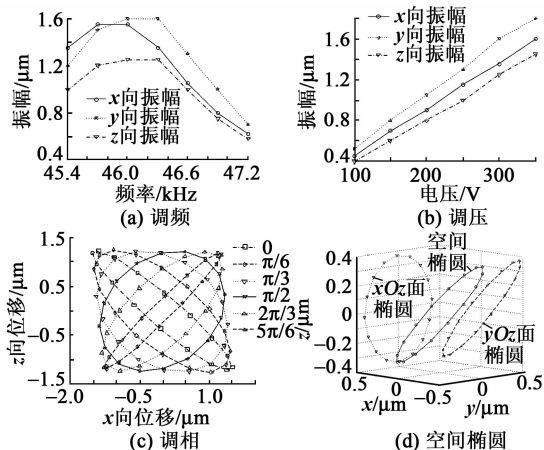


图 8 平面超声电机的运动调节特性

在保持驱动电压幅值 300 V,驱动频率为 46.6 kHz 条件下,对定子采用具有不同相位差的电压进行振动激励,可得到驱动足的 x 、 z 向振幅与驱动电压相位差之间的关系曲线,如图 8(c)所示。由图可知,当相位差由 $\pi/2$ 逐渐降至 0 时,椭圆轨迹由圆变扁直至成斜直线;当相位差由 $\pi/2$ 增大至 π 时,椭圆轨迹呈相同变化趋势;通过调节三相驱动电压之间的相位差,可调节电机速度与动力;但当椭圆形

状过扁时,电机将不能正常工作。在三相压电陶瓷通入同频但不同幅值的激励电压时,获得到的空间椭圆轨迹如图 8(d)所示。由图可知,当 y 向振幅大于 x 向振幅时,则空间椭圆轨迹与 yOz 面夹角小于与 xOz 面夹角,此时更利于增大 y 向速度;当 z 向振幅大于 y 、 x 向振幅时,则更利于增大电机推力;故可通过调节三相电压幅值,来调节电机的速度与推力特性。

5 装配结构设计

多工作模态复合驱动电机设计的一个基本问题是定子的夹持与安装问题。由于定子驱动足与动子的摩擦接触是通过 H 定子的面外弯振实现的,因此,为使保证驱动足能对动子产生推力,需在定子与动子之间施加一定的预紧力,这样,一来可以提供适宜良好的接触作用力,二来可通过可调节的预紧力而控制电机的输出动力。为了尽量减小定子装夹对工作模态的影响,将安装孔设置在三相工作模态的公共节点位置即横板中心处。考虑到超声电机对工作环境要求较高,为减少因灰尘、油质等对电机工作性能的影响,电机其装配采用封闭式装配结构。图 9 为电机的总装结构。由图可知,该电机由定子组件、动子组件、支座组件组成。定子组件由 H 形卧板基体及粘贴在其表面的压电陶瓷组成;动子组件则由滑板、滚珠和动子支座组成;支座组件由立板、底板、侧板和碟簧组成。侧板上设置有小孔,便于电源连接线的接入;在侧板左、右内侧与定子之间放置橡胶块,对定子的微幅摆动起辅助约束作用;滚珠用于减小平面滑板运动的摩擦阻力;碟簧安装在定子与支座组件的底板之间,通过定子固定螺钉可调节碟簧预紧力。

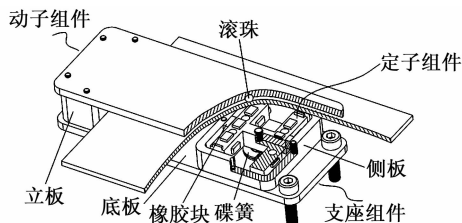


图 9 平面超声电机的装配结构

6 结论

1) 提出 H 形卧板结构驱动的两自由度平面超声电机,选定 H 卧板两纵杆的面内一阶反对称纵振及面内、面外二阶弯振模态为电机工作模态。

2) 建立了定子三相工作模态频率一致性优化数学模型,确定了定子结构尺寸,模拟了驱动足的振动,仿真出驱动足质点沿 yOz 面和 xOz 面行进的椭圆轨迹,验证了电机原理,设计出电机装配结构。

3) 在激励电压峰值为 300 V 时,驱动端足的 x 、 y 、 z 向振幅可达 0.44 μm 、0.55 μm 和 0.40 μm ,相应地,电机的 x 、 y 向速度可望达 82 mm/s 和 103 mm/s。

4) 通过调节电机激励电压的频率、幅值和相位差,可调节其输出运动特性并获取所需的 x 、 y 向不同的速度及推力。

参考文献:

- [1] ZHAO Chunsheng. Ultrasonic motors: Technologies and applications [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, 2011.
- [2] 郝铭. 纵弯复合平面超声电机及驱动系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [3] TAKEMURA K, OHNO Y. Design of a plate type multi-dof ultrasonic motor and its self-oscillation driving circuit [J]. MAENO T. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2004,9(3):474-480.
- [4] 曾平,韩邦成,程光明等. 平移式多自由度压电马达的研究[J]. 压电与声光,2001,23(8):269-271.
ZENG Ping, HAN Bangcheng, CHENG Guangming, et al. Research on multi-freedom degree piezoelectric motor that Move on flat[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2001,23(8):269-271.

- [5] DEMB'EL'E S, ROCHDI K. A Three dof linear ultrasonic motor for transport and micropositioning[J]. Sensors and Actuators A, 2006,125(2):486-493.
- [6] SCUOR N, GALLINA P. Design and testing of a 5-DOF, large working range micropositioning stage[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(4): 620-627.
- [7] YAN L, HU Y Y. A novel two degree-of-freedom ultrasonic planar motor driven by single stator[C]//S. I. :2012 10th IEEE Int Conf Industrial Informatics, 2012:550-553.
- [8] 贺红林,武冬梅. H-结构薄板纵弯复合模态驱动的压电直线电机[J]. 振动与冲击,2013,32(3):1-5.
HE Honglin, WU Dongmei. Ultrasonic linear motor driven by the longitudinal and bending vibration modes of an H-shaped vibrator[J]. J VIB Shock, 2013,32(5):1-5.
- [9] 贺红林,肖煜涵. 准 H 超声换能结构驱动的直线电机动力学特性分析[J]. 南昌航空大学学报,2015,29(1): 20-26.
HE Honglin, XIAO Yuhuan. Design of a novel ultrasonic motor powered by a langevin type H-shaped stator[J]. Journal of Nanchang Hangkong University, 2015,29(1):20-26.

(上接第 540 页)

膜衬底取向度对 AlN 薄膜取向度的影响,以及 Ar 气体流量对 AlN 薄膜应力的影响,实验表明,采用 RF 等离子清洗基片可改善 AlN 薄膜 c 轴结晶取向度,高(110)取向度的 Mo 薄膜衬底有助于高 c 轴取向度 AlN 薄膜的生长,控制 Ar 气流量可以调节 AlN 薄膜应力并制备出低应力 AlN 薄膜。通过优化基片处理和镀膜工艺,制备出高 c 轴结晶取向度和低应力的 AlN 薄膜,满足 FBAR 器件对压电薄膜的要求。

参考文献:

- [1] SHIN Hyunchang, SONG J T. Piezoelectric coefficient measurement of AlN thin films at the nanometer scale by using piezoresponse force microscopy[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2010,56(2):580-585.
- [2] MOTOAKI H, JAN K, TAKASHI A, et al. Surface micromachined AlN thin film 2 GHz resonator for CMOS integration[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 117:211-216.
- [3] YAO H H, LIN C F, KUO H C. MOCVD growth of

- AlN/GaN DBR structures under various ambient conditions[J]. Journal of Crystal Growth, 2004,262:151-156.
- [4] 张霞,陈同来,李效民. Si(100)衬底上 PLD 法制备高取向度 AlN 薄膜[J]. 无机材料学报, 2005, 20(2): 419-424.
- [5] IBORRA E, SNAZ-HERVAS A, CLEMENT M, et al. Assessment of the piezoelectric response of sputtered AlN films by X-ray diffraction[C]//S. I. :IEEE Ultrasonics Symposium, 2005:1808-1811.
- [6] JAKKARAJU R, HENN G, SHEARER C, et al. Integrated approach to electrode and AlN depositions for bulk acoustic wave(BAW) devices[J]. Microelectronic Engineering, 2003,70:566-570.
- [7] 陈云祥,董家和,司美菊,等. FBAR 用氮化铝压电薄膜研究[J]. 压电与声光, 2015,37(6):934-936.
CHEN Yunxiang, DONG Jiahe, SI Meiju, et al. Study on aluminum nitride films used for FBAR devices[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2015,37(6):934-936.
- [8] LIN C M, LIEN W C, FELMETSGER V V. AlN thin films grown on epitaxial 3C-SiC(100) for piezoelectric resonant devices [J]. Applied physics Letters, 2010(97):141907.