文章编号:1004-2474(2016)05-0725-06

工字型定子驱动的压电直线电机动力学特性

贺红林,凌 普,夏自强
(南昌航空大学 航空制造工程学院,江西 南昌 330063)

摘 要:提出工字型定子驱动的压电直线电机,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动子。阐述电机的驱动机理,建立了定子的机电耦合分析数值模型,求解出电机工作模态,模拟出驱动端轨迹,验证了电机原理,完成了电机装配结构设计。研究表明,当弯、纵振激励电压分别为50 V和250 V时,驱动端的z、y向振幅分别达1 μm和2 μm。该电机有望输出较大动力和速度,具有良好的应用前景。

关键词:工型定子;直线超声电机;驱动机理;机电耦合分析;动力学特性
中图分类号:TM359.5 **文献标识码**:A

Dynamic Characteristics of a Piezoelectric Linear Motor Driven by an I-Shaped Stator

HE Honglin, LING Pu, XIA Ziqiang
(School of Aeronautical Manufacturing, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: A linear motor based on an I-shaped stator was proposed in this paper. The 1st asymmetric longitudinal mode and 2nd asymmetric in-plane bending mode of the stator were employed as the working modes, four bulges on the sides of the stator were used as the stator's driving ends which pushed the slider with each two of them in opposite angle. The principle of the motor was discussed. An FEM model for the stator was built to simulate the dynamic characteristics of the motor by the modal analysis and transient analysis. The assembly of motor with I-shaped stator is completed. The amplitude of the stator in the z and y directions were 1 μm and 2 μm respectively when the bending vibration excitation voltage was 50 V and the longitudinal excitation voltage was 250 V. This motor is expected to have a greater power and speed, and has a good application prospect.

Key words: I-shaped stator; ultrasonic motor; driving principle; electromechanical coupled-field analysis; dynamic characteristics

0 引言

超声电机是一种新型驱动装置,与电磁电机相比,超声电机更易实现结构微型化、运动控制精密化,且不受外部环境电磁干扰[1]。压电直线作动类直线超声电机是超声电机的一种基本类型,在小型精密伺服直线驱动、显微医学操作及微装配等应用中具有特殊重要的地位。为满足应用领域对直线超声电机提出的多样需求,近年来,国内、外不少学者都对直线超声电机(LUSM)的压电驱动机理、设计技术、新型结构形式、解决工程问题的应用等方面作了大量的研究[2~8]。迄今为止,LUSM的大规模工程应用仍受限制:

1) 它还普遍存在动力小,效率低,欠稳定,控制性较差等问题。

2) 目前已推出的电机结构形式使其还无法全面满足应用领域对其提出的灵活多样的需求[9]。

因此,深入探析电机的力/电动力力学行为、压电转换机理、理论建模和结构优化,探索电机全新的运动原理及其定子超声换能结构仍是直线电机研究的重要内容。许海等曾提出过一种单矩形板双足结构的超声波电机[10],该电机具有工作状态稳定,正反向调节灵活的特点,为改进该电机输出性能并丰富电机样式。本文在文献[11]基础上,提出一种基于工型定子的新型直线电机,该电机利用工字结构上、下两矩形板的纵振和弯振,而在驱动端形成椭圆轨迹用以推动动子滑块进行直线运动,具有多足交替驱动,速度较快,结构小巧,装配简单等特点,在工程上具有广泛应用前景。本文重点对该电机的驱动

收稿日期:2015-12-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51265040),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,江西永新人,教授,博士,主要从事结构动力学及压电驱动技术的研究。E-mail: hehonglin1967@163.com.

机理、动力学优化及运行特性进行了研究。

1 定子结构及工作模态

根据振动理论，矩形薄板纵振频率远高于同阶面外弯振频率。为使弯、纵两相频率接近，本文采用频率较高的矩形薄板的面内弯振，故将定子 z 方向尺寸 H_1 设计得较大。由于工型定子竖杆中部同时为弯、纵振的节点位置，故在此处开孔以便实现定子固定。用于激发定子振动的压电陶瓷分别粘贴在两行板与竖板连接处及二阶弯振最大应变处，如图 1(a)所示，所有压电陶瓷片的极化方向均垂直粘贴表面朝外。同时为激发定子所需工作模态，对压电陶瓷的激励配置如图 1(b)所示。为合成出驱动端椭圆轨迹，适当选定定子工作模态很重要。本文的工型超声电机定子采用定子的一阶交替纵振及二阶交替弯振，如图 2 所示。利用图中的两相工作模态，不仅能有效合成驱动端椭圆运动轨迹，且可充分利用工型定子结构对称特点，使定子沿对角分布的 2 个驱动端两两交替驱动，提高电机的驱动速度及驱动力。

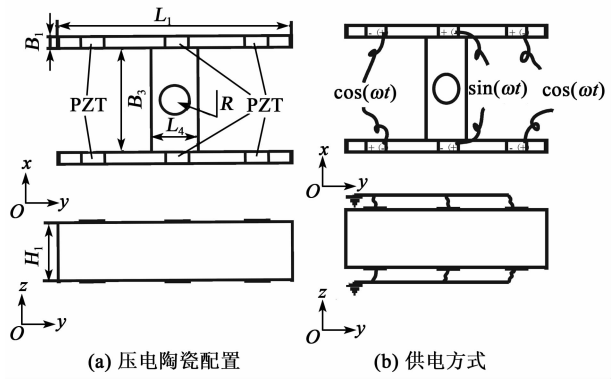

图 1 工型定子结构及振动激励方式

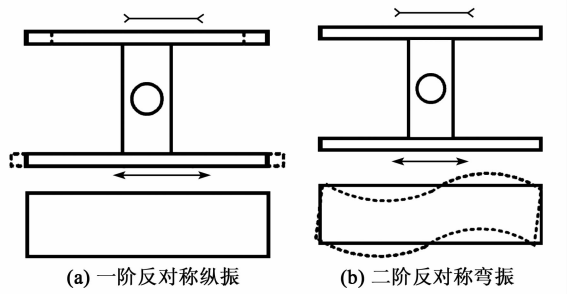

图 2 工型定子的假设工作模态

2 定子分析模型的建立

定子的主要作用是完成将电能转化为机械能的动力学过程，故定子动力学特性分析实质上就是建立定子机电耦合模型并对其进行求解。考虑到工型并非简单弹性体，故采用有限元法对其建模求解较方便，为此分别用不同单元模拟定子弹性基体及其压电陶瓷机电力学行为。针对压电单元，引入第二类压电方程表征其逆压电效应，即

$$\begin{cases} \boldsymbol{T} = c^E - e\boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{D} = e\boldsymbol{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S\boldsymbol{E} \end{cases} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{T}$ 为应力张量；$\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量；$\boldsymbol{S}$ 为应变张量；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度矢量；c^E 电场强度下的弹性系数；ε^S 为应变介电常数；e 为压电常数。

利用 Halmitonia 变分原理，并考虑式(1)给定的压电关系，建立压电单元的动力学平衡方程为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{m}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\delta}} \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{c}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\delta}} \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{k}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}} & \boldsymbol{\Theta}^{\mathrm{e}} \\ \boldsymbol{\Theta}^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \boldsymbol{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}} \\ \boldsymbol{Q}^{\mathrm{e}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{m}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}}$、$\boldsymbol{c}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}}$、$\boldsymbol{k}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}}$ 为 PZT 单元质量阵、阻尼矩阵、刚度阵；$\boldsymbol{\Theta}_{\mathrm{e}}$、$\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}$ 为机电耦合阵、电容量阵；$\boldsymbol{F}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}}$、$\boldsymbol{Q}_{\mathrm{e}}$ 为结点等效载荷向量、电荷向量；$\boldsymbol{\delta}$、$\boldsymbol{\phi}$ 为节点位移向量、电势向量。

根据最小势能原理、弹性方程、几何方程和力学本构方程，可建立定子基体单元的动力学方程

$$\boldsymbol{m}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \boldsymbol{c}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}\dot{\boldsymbol{\delta}} + \boldsymbol{k}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}}\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{F}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}} \tag{3}$$

将式(2)、(3)联立并将定子单元质量阵、阻尼阵、刚度阵、机电耦合阵、电容阵、结点力向量、结点电荷向量进行组装，可建立定子 FEA 有限元模型为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{m} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\delta}} \\ \ddot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{c} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\delta}} \\ \dot{\boldsymbol{\phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{k} & \Theta \\ \Theta^T & \boldsymbol{C}_{\mathrm{m}} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \boldsymbol{\delta} \\ \boldsymbol{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ Q \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{m} = \mathop{\mathrm{A}}\limits_{i=1}^{n_{\mathrm{b}}} \boldsymbol{m}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}} + \mathop{\mathrm{A}}\limits_{i=1}^{n_{\mathrm{p}}} \boldsymbol{m}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}}$ 为定子的总体质量阵；$\boldsymbol{c} = \mathop{\mathrm{A}}\limits_{i=1}^{n_{\mathrm{b}}} \boldsymbol{c}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}} + \mathop{\mathrm{A}}\limits_{i=1}^{n_{\mathrm{p}}} \boldsymbol{c}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}}$ 为定子的阻尼阵；$\boldsymbol{k} = \mathop{\mathrm{A}}\limits_{i=1}^{n_{\mathrm{b}}} \boldsymbol{k}_{\mathrm{b}}^{\mathrm{e}} + \mathop{\mathrm{A}}\limits_{i=1}^{n_{\mathrm{p}}} \boldsymbol{k}_{\mathrm{p}}^{\mathrm{e}}$ 为定子的刚度阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{m}} = \mathop{\mathrm{A}}\limits_{i=1}^{n_{\mathrm{p}}} \boldsymbol{C}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}$ 为定子的电容量阵；$\boldsymbol{\Theta} = \mathop{\mathrm{A}}\limits_{i=1}^{n_{\mathrm{p}}} \boldsymbol{\Theta}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{e}}$ 为定子的机电耦合系数阵；$\mathop{\mathrm{A}}\limits_{i=1}^{n}$ 为单元阵形成总体阵算子；n_{b}，n_{p} 分别为定子基体及压电陶瓷单元数；F、Q 分别为结点等效外力、等效电荷。

3 频率一致性动力学优化

在利用有限元软件 ANSYS 实现式(4)的求解时，须先根据图 1 的尺寸参数并基于表 1 所示尺寸值建立定子的三维实体模型，再利用多物理场耦合单元 Solid5 对定子压电陶瓷进行网格划分，并利用八节点六面体单元 Solid185 划分定子基体网格单元。在此基础上，为给定子施加自由边界载荷并利用 Lanczos 法提取到定子工作模态如图 3 所示。图中，两平行板厚度 B_1 较小，其在 x 方向上的刚度较弱，导致平行板纵振模态中略微含有面内弯曲，但这

并不影响驱动平面在 yOz 平面内的运动，可见，工型定子具备预设的电机工作驱动模态。

表 1　工型定子的结构尺寸确定

参数	L_1/mm	L_2/mm	B_1/mm	H_1/mm	B_2/mm	R/mm
初始值	28	6.0	3	6.0	7	1.5
优化值	30	6.2	3	6.2	7	1.5

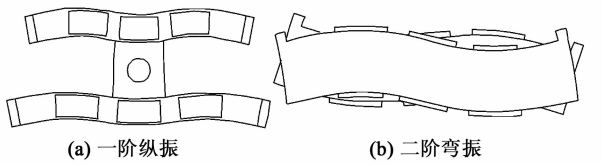

图 3　工型定子的计算工作模态

本文利用压电陶瓷的 d_{31} 效应激发工作模态振动。由图 1(b)可知，粘贴于定子两平行板正、反面中部的 4 片压电陶瓷用于激发定子一阶反对称纵振；粘于平行板正、反面两端的 8 片压电陶瓷片，则激发定子二阶反对称弯振。在工型定子两平行板侧面末端位置还设置了高约 1.5 mm 的驱动足，用于实现定子与动子的摩擦接触并对动子产生驱动作用。仿真计算显示，配置压电陶瓷的定子纵、弯工作模态的频率分别为 60 553 Hz、61 434 Hz，二者的值相差较大。

定子两相模态频率必须趋于一致，为此需对定子进行频率一致性动力学优化。图 4 为基于 ANSYS APDL 优化定子结构的流程，相应的优化尺寸见表 1。可见，经过结构动力学优化后，定子的一阶纵振模态频率为 56 080 Hz，二阶弯振模态频率为 56 287 Hz，二者仅相差 207 Hz，从而获得了良好的频率一致性，同时，优化尺寸均处于压电激励的合理范围内；此外，在对优化后的定子工作模态的振型进行观察时，也未见到工作模态的振型出现畸变。这说明该优化尺寸具有可行性。

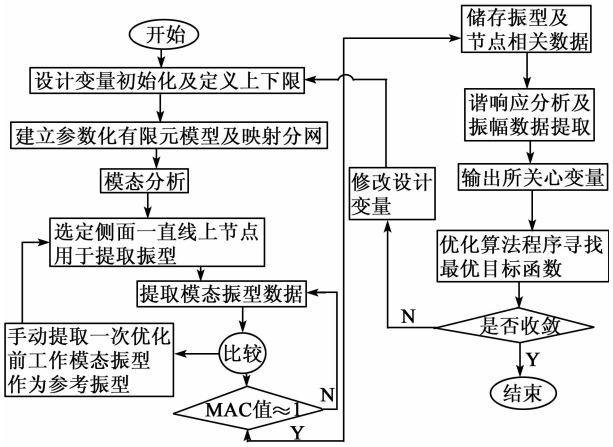

图 4　定子结构的优化过程

4　驱动端运动合成

根据电机设计理论，在工作模态选择合理条件，只需对粘于定子的压电陶瓷施加简谐激励信号，即可激发工作模态振动，从而在驱动端质点合成出椭圆轨迹，借助椭圆轨迹并其于驱动足与动子间的摩擦耦合，即能推动动子作直线运动。本文的电机利用工型结构两平行板一阶反对称纵振和二阶反对称弯振模态在驱动端合成出沿 zOy 平面的椭圆运动轨迹，其中，面内二阶反对称弯振实现定子与动子法向动态接触与分离；一阶反对称纵振用于驱动动子作直线运动。图 5 为在 1 个振动周期(T)内的定子推动动子的驱动机理。

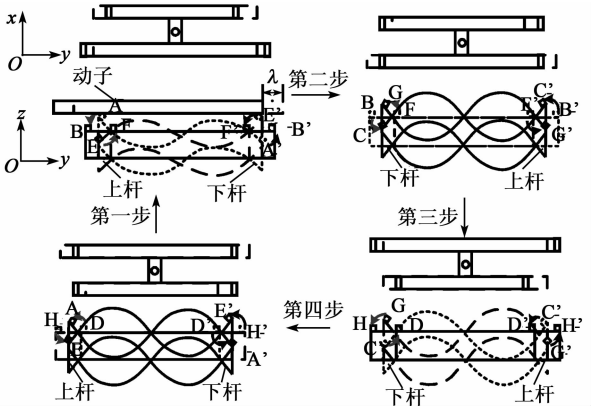

图 5　定子的工作模态振动驱动过程

在 $0\sim T/4$ 内，面外二阶弯振使下板左端由前弯恢复至直板状并与动子保持接触，右部由后弯恢复至直杆状而与动子脱离；一阶纵振使下板由初始长度伸至最大长度，使下板左驱动足由 A 行至 B，右驱动足由 A'行至 B'。同时，面外二弯还使上板左部由后弯恢复至直板状而与动子脱离，右部由前弯恢复至直板保持与动子接触；一阶纵振使上板由初始长度缩至最短，驱使上板左部驱动足由 E 行至 F，右部驱动足由 E'行至 F'。该时段下板左驱动足与上板右驱动足同时推动动子沿 y 向移进一步距 λ。

在 $T/4\sim T/2$ 内，面外二弯使下板左部由直杆弯成后弯状而与动子脱离，右部由直板状完成前弯而与动子接触；一阶纵振使下板由最大长度缩至初始长度，驱使下板左驱动足由 B 行到 C，右驱动足由 B'行至 C'。同时，面外二阶弯振还使上板左部由直板弯成前弯状而保持与动子接触，右部由直板弯成后弯状而不与动子脱离；一阶纵振使上板由最小长度伸至初始长度，使上板左驱动足由 F 行至 G，右驱动足由 F'行至 G'。该时段定子下板右驱动足与上板左驱动足同时推动动子沿 y 向移进第二步距 λ。

同理，在 $T/2\sim T$ 振动周期，定子下板左驱动足先由 C 行至 D，再行至 A；下板右部驱动足则先由 C'行至 D'，再行至 A'；上板左驱动足由 G 行至 H，再行至 E；上板右驱动足由 G'行至 H'，再行至 E'。定子驱动足推动动子移进 2 个步距 λ。

定子每完成一个振动周期 T，将推动动子沿 y 向移进 4 步距。定子不断重复振动周期时将推动动子不断沿 y 向前移。如果逆转一阶纵振与二阶弯振间激励信号的超前滞后相位关系，将驱动动子沿 y 轴的反向移动。

假定定子通电激励后，其纵、弯振模态均被正确激发，则驱动端质点沿 z 向和 y 向位移分别为

$$\begin{cases} z = Z_{\max}\sin\omega t \\ y = Y_{\max}(\sin\omega t + \varphi) \end{cases} \tag{5}$$

式中：ω 为施加到压电陶瓷激励电压的圆频率；φ 为定子弯、纵响应之间的相位差，在材料阻尼及结构阻尼被忽略的情况下，根据振动学理论，定子弯、纵两相间的相位差等于两相激励电压间的相位差；$Z_{\max}$、$Y_{\max}$ 分别为定子弯振、纵振的最大振幅。由式(5)消去时间变量 t，可得驱动端质点运动方程为

$$\frac{z^2}{Z_{\max}^2}+\frac{y^2}{Y_{\max}^2}-\frac{2zy}{ZY}\cos\varphi=\sin^2\varphi \tag{6}$$

当 $\varphi\in\left[-\frac{\pi}{2},0\right)$ 或 $\varphi\in\left(\frac{\pi}{2},\pi\right)$ 时，式(6)在坐标系 zOy 中组成椭圆。特别的，当 $\varphi=\frac{\pi}{2}$ 时，则式(6)方程简化为

$$\frac{z^2}{Z_{\max}^2}+\frac{y^2}{Y_{\max}^2}=1 \tag{7}$$

式(7)表示一个长、短轴分别等于弯振和纵振振幅的标准椭圆。同样，当 φ 取不同的值时，在坐标 zOy 中组成的椭圆也会发生改变，如图 6 所示。

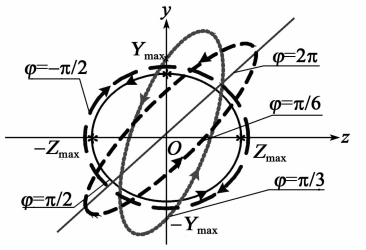

图 6 驱动端质点轨迹与激励电压相位差的关系

5 动力学特性的仿真

5.1 定子的频响特性

谐响应分析是用于确定在一定频率范围内，结构响应和频率间的关系。在超声电机的工作过程中，在工作模态附近若存在较高的干扰模态响应，电机工作的稳定性会降低甚至无法工作。为分析本电机工作模态频率的干扰响应，对定子施加频率为 54 187～58 187 Hz 的正弦激励电压，可得定子左下角驱动端频率响应曲线如图 7 所示。

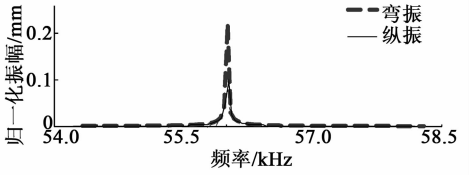

图 7 工型定子谐响应特性曲线

仿真结果表明，工型定子模态频率约 56 000 Hz，其弯振和纵振在工作模态频率附近无高峰值干扰模态，由此可推断本电机有望获得较好的工作性能。再通过进一步分析，初步将 56 187 Hz 作为电机驱动的频率基点。在该激振频率下定子被激发的纵振和弯振能输出较大振幅。

5.2 驱动端振动特性

为模拟出定子在电压激励作用下的驱动端运动轨迹，还需针对定子有限元分析(FEA)模型进行电激励条件下的瞬态动力学计算，以获取定子驱动端振动响应，图 8 为该模型的振动响应求解过程。

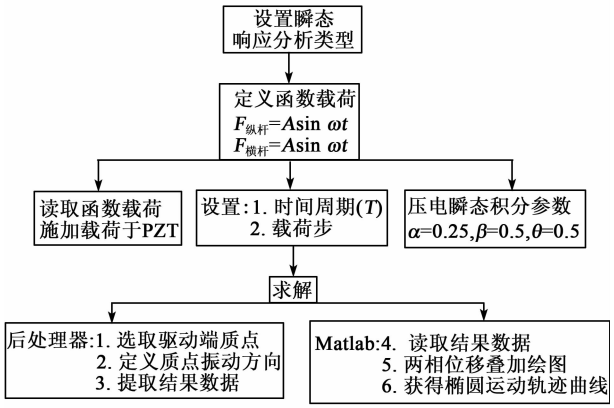

图 8 工字型定子的振动特性仿真流程

由图 3(b)可知，工型定子结构矩形薄板的弯振会在纵振方向(y 向)上产生一定的位移。为减少弯振模态对纵振方向产生过大的位移影响，定子弯振激励电压的峰值降低至 50 V，纵振激励电压为 250 V，两相激励电压的频率为 56 187 Hz，分别施加在激励定子弯振和纵振的压电陶瓷上。图 9 为通过计算得到的定子 4 个驱动端的位移轨迹。由图可知，因弯振影响，工字定子的各驱动端轨迹都存在轻微幅度的角度偏移。通过分析，定子在设定的电压激励下，各驱动端质点均能合成良好的椭圆运动轨迹，且振幅都达到微米级，说明该定子在理论上具备了较好的驱动特性。

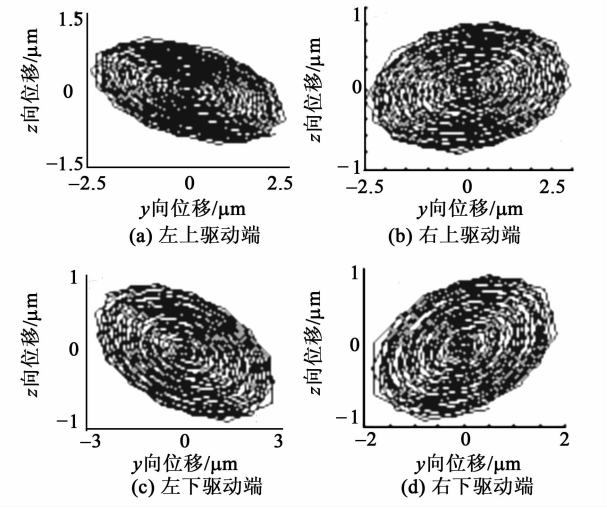

图 9　定子各个驱动端质点运动轨迹

6　运动调节特性仿真

超声直线电机定子驱动端的运动轨迹很大程度上取决于激励信号,通过调整两相激励电压的峰值、频率和相位差,可方便获得电机所需的运动输出特性,这也是超声电机的特点之一。本节将通过调整电机两相激励电压的幅值、频率和相位差来探究电机定子的动力学特性。

6.1　调压振动特性

研究表明,改变激励电压的幅值可调节压电陶瓷的振动响应特性,进而可控制定子驱动端的响应振幅。本文的工型定子由薄板构成,其驱动端的运动轨迹很大程度上取决于两相激励电压的电压差。理论上,弯振与纵振激励电压的幅值差越小,定子弯振振幅越大,其在纵振方向产生的位移偏移越大,驱动端的运动轨迹越倾斜;在施加适当电压差的激励电压时,驱动端的运动轨迹有可能越接近正椭圆。

为研究电压对定子运动特性的影响,在给纵振压电陶瓷施加定值的激励电压,分别对弯振压电陶瓷施加 50～150 V 的激励电压,计算得到定子驱动端弯振振幅变化如图 10 所示。结果表明,在一定的电压范围内,定子弯振的振幅和对应的激励电压峰值成线性关系。

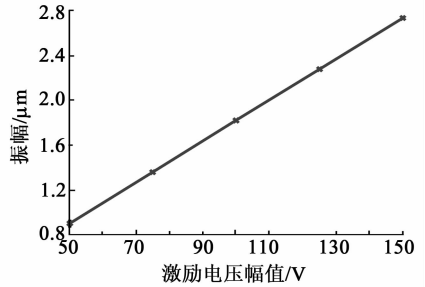

图 10　弯振振幅和激励电压的关系

为研究弯振激励电压的变化对驱动端运动的影响,图 11 为在弯振激励变为 100 V 时,定子两驱动端的运动轨迹。

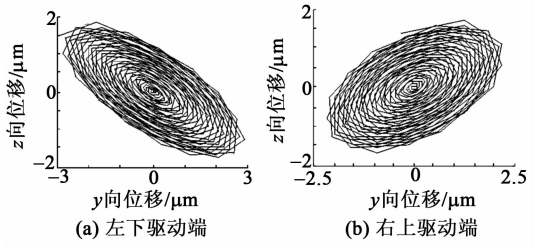

图 11　弯振激励 100 V 时驱动端的运行轨迹

对比图 9 可知,增大弯振激励电压,其响应振幅增大,纵振模态的影响也增大,驱动足质点运动轨迹曲线倾斜度将增大。适当提高弯振激励电压的峰值虽可提高定子与动子间的摩擦接触力,但将降低定子与动子间的接触时间,则降低电机的驱动速度。仿真表明,当弯振激励电压峰值过大时,驱动足质点的运动轨迹曲线将过于倾斜,可能影响电机的驱动效率甚至导致电机无法工作。

6.2　调频振动特性

由图 7 可看出,当激励电压频率低于 56 200 Hz 时,驱动足质点的振动响应随着激励电压频率的增加而增大;当激励电压频率超过该值时,驱动足质点的响应幅值随着激励电压频率的增加而降低,即改变激励电压的频率,可改变定子驱动端振动响应。考虑到纵振振幅决定了电机速度,故调节纵振驱动频率可改变电机速度,又因弯振响应幅值决定了电机输出动力大小,可见调节弯振驱动频率可调节电机推力。总之,调节驱动频率可调节该电机的机械输出特性。为便于更好地观测定子调频特性,对分析模型中的两相压电陶瓷施加不同频率的驱动信号进行振动激励,图 12 为仿真结果。由图可见,频率的调节仅在工作模态附近区域内有效,调频范围较狭窄。实际上,当驱动频率过高或过低时,不仅将使定子响应振幅过小而影响电机的运动质量,且会产生差拍现象,进一步导致电机运动质量下降。

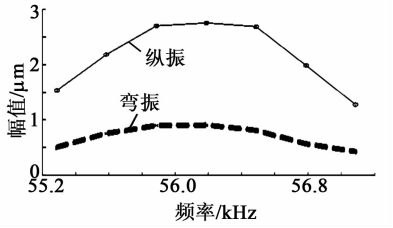

图 12　定子的调率振动特性

6.3 调相振动特性

定子驱动端的椭圆运动轨迹与定子两相振动的相位差有关，而定子两相振动间的相位差与分别激励这两相振动的激励电压间的相位差有关。通过改变两相激励电压的相位差，可改变定子驱动端的运动轨迹，进而起到调节电机运动特性的效果。为研究工型定子的调相特性，对定子弯振激励压电陶瓷施加定值初始相位的激励电压，通过调节纵振激励电压的初始相位角，驱动足质点的振动位移响应如图 13 所示。由图可看出，改变两相激励电压间的相位差，将改变驱动足质点的运动轨迹，即可调节电机的运动特性。但如果过大的改变两相激励电压间相位差，定子驱动端的运动轨迹曲线将过于倾斜，使电机无法正常工作。

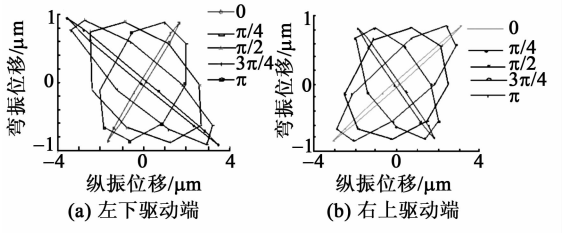

图 13 定子调相振动特性

7 电机装配结构设计

工型定子结构的中部连接板同时是定子纵振模态和弯振模态的节点位置。因此，利用工型定子中部连接板的中心孔作为夹持孔，可最大程度地降低夹持及安装等因素对定子振动模态产生的影响。图 14 为电机的机装配结构。该电机定子由沉头螺栓固定在底座凸台上；为约束定子的旋转自由度同时减少对定子工作模态的干扰，在定子左、右两侧与底座间垫入橡胶块。在定子正面的上侧安置动子和导轨，动子和导轨由 4 个预紧螺栓固定在电机上。

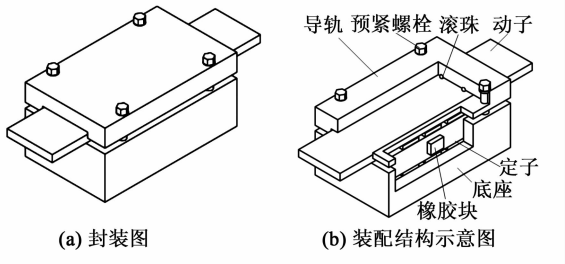

图 14 电机的三维装配模型

8 结论

1）提出基于工字型定子两平行板面内一阶反对称纵振和二阶反对称弯振模态压电直线电机。

2）以定子平行板侧面设置 4 个凸起作为驱动足，这些驱动足两两一组交替地对推动动子移动。

3）建立了定子机电耦合分析动力学有限元模型，仿真出定子工作模态及其驱动端椭圆轨迹，验证了电机原理的可行性。

4）驱动端的 z 向和 y 向振幅可达 1 μm 和 2 μm，该电机可望输出较大的推力和速度。

5）调节两相工作模态的激励信号的幅值、驱动频率与驱动相位差，可调节电机的机械输出特性。

6）设计出电机的装配结构及其预紧加压方式。

参考文献：

[1] 万志坚. 基于面内弯纵复合模态的直线超声电机研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.

[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]. T Maeno 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 & Acoustoptics，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. l.：10th IEEE Int Conf Industrial Informatics，2012：550-553.

[8] 简月，姚志远，杨模尖，等. V 型直线超声电机梁式夹持的结构设计[J]. 光学精密工程，2015，23(5)：1358-1364.
JIAN Yuan，YAO Zhiyuan，YANG Mojian，et al. Structure design of beam type clamp for V-shaped ultrasonic motor[J]. Optics and Precision Engineering，2015，23(5)：1358-1364

[9] TAKEMURA K，OHNO Y. Design of a plate type multi-dof ultrasonic motor and Its self-oscillation driving circuit [J]. T Maeno IEEE/ASME Transactions on Mechatronics，2004，9(3)：474-480.

[10] 许海，李洁，赵淳生. 双足型直线超声电机的设计及实验[J]. 中国机械工程，2005，16(3)：243-245.
XU Hai，LI Jie，ZHAO Chunsheng. Design and experiment of eouble foot liner ultrasonic motor [J]. China Mechanical Engineering，2005，16(3)：243-245

[11] 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.