

面内弯纵型直线超声电机的驱动与摩擦分析*

万志坚^{1,2}, 胡 泓²

(1. 深圳职业技术学院工业中心 深圳, 518055) (2. 哈尔滨工业大学深圳研究生院 深圳, 518055)

摘要 分析了直线超声电机定子的质点切向运动和法向运动, 认为等速点(定子质点的横向分速度与动子运动速度相等的点)将椭圆运动接触弧对动子的作用分成了驱动部分和阻碍部分。通过对定子的纵向伸缩振动分析, 得知定子质心随着定子的振动而发生颤动, 质心的颤动使定子两端的受力不是一个定值, 并使定子的驱动足对动子进行跳跃性地驱动, 电机定子对电机动子进行跳跃式驱动和粘滑摩擦受到材料刚度、预压力、定子振幅等多种因素的影响。文中的摩擦机理分析也可为其他类型的超声电机的驱动与摩擦分析提供参考。

关键词 超声电机; 椭圆运动; 摩擦; 预压力; 弹簧刚度; 质心

中图分类号 TM359.4

引 言

超声波电机自 1980 年指田年生首次提出以来, 得到了快速地发展。超声电机是利用摩擦力进行动力输出的, 但是超声电机的摩擦传动模型还不成熟, 迄今为止, 对超声电机的摩擦传动机理的分析多数处于定性的层面上, 许多结论的获得大都基于实验结果。Ueha 和 Kurosawa^[1-2]于 1988 年首次对定转子的接触模型进行定量分析。认为在接触区域内只有摩擦层发生变形, 转子(或动子)上的摩擦层用一组分布的线性弹簧来考虑其变形, 建立了定、转子接触模型的解析表达式。Maeno 等^[3]1992 年利用有限元方法对电机的机械特性进行了计算, 采用静摩擦系数和动摩擦系数对接触层内剪切变形进行考虑, 认为定转子接触区域内存在复杂的粘滑分布。

国内外许多学者对摩擦界面模型特别是摩擦界面的粘滑特性进行了研究^[4-19], 但是难以形成定论。另外, 众多文献都表明, 预压力、摩擦材料的刚度对超声电机的动力输出影响明显, 但鲜见到对此进行深入分析的报道。笔者以面内弯纵复合型超声直线电机为例, 以其定子驱动足质点的椭圆运动为切入点, 通过结合质点椭圆运动过程的切向和法向速度分析、定子和动子之间的压力和摩擦力分析等, 阐述了质点的椭圆运动轨迹与电机动子运动的关系, 较合理地解释了电机动力输出与预压力、预压弹簧和

摩擦材料的刚度等因素之间的联系。

1 弯纵型直线超声电机的工作原理

如图 1, 一种面内弯纵型直线超声电机定子可由 8 片 PZT8 压电陶瓷片和一块磷青铜材料矩形板粘接而成^[4]。压电陶瓷片相对于青铜矩形板对称布置。“+”表示压电材料沿 z 轴正向极化, “-”表示压电材料沿 z 轴的负向极化。青铜弹性材料的背面的 4 片压电陶瓷极化方向和前面的 4 片压电陶瓷极化方向成对称状态。

当用两相激励电压 $V_1 = V \sin \omega t$ 和 $V_2 = V \sin \omega t$ 进行激励时, 定子矩形板激发一阶纵向振动和面内二阶弯曲振动同时被激发, 矩形板上的驱动足将形成椭圆运动, 驱动足通过摩擦力驱动动子(滑块)向左或向右移动(图 1)。

设 u_x, u_y 为驱动足中间质点的 x, y 位移, U_x, U_y 为矩形板一阶纵向振动和二阶弯曲振动时驱动足中间质点的振幅。根据机械振动理论

$$u_x = U_x \sin \omega t \quad (1)$$

$$u_y = U_y \cos \omega t \quad (2)$$

驱动足表面质点 x 和 y 方向速度和加速度公式如下

$$v_x = U_x \omega \cos \omega t \quad (3)$$

$$v_y = -U_y \omega \sin \omega t \quad (4)$$

$$a_x = -U_x \omega^2 \sin \omega t \quad (5)$$

* 国家自然科学基金资助项目(6097406); 深圳市科技项目基金资助项目(20120617140536963, 20120613133924246)
收稿日期: 2013-05-31; 修回日期: 2013-08-01

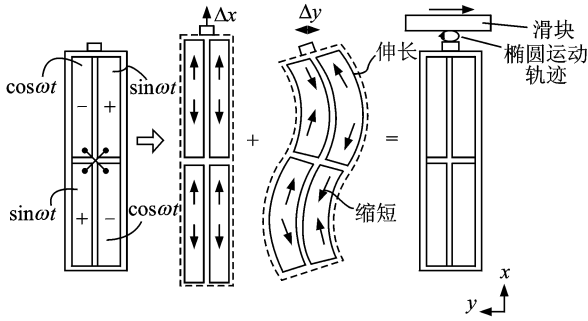


图1 弯纵型超声直线电机原理简图

Fig. 1 Schematic diagram of the linear ultrasonic motor

$$a_y = -U_y \omega^2 \cos \omega t \quad (6)$$

2 定子驱动足质点切向运动分析

图2为电机定子驱动足和动子(滑块)接触驱动简图。将动子上摩擦材料层简化为分布式线弹簧^[5],有

$$k_m = \frac{E_m b_m}{h_m} \quad (7)$$

其中: k_m 为单位长度摩擦材料的等效刚度; h_m 摩擦材料层的厚度; b_m 摩擦层的横向宽度; E_m 为摩擦材料的弹性模量。

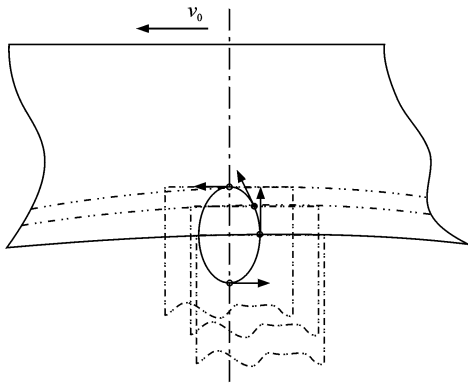


图2 定子和动子(滑块)接触驱动简图

Fig. 2 Schematic diagram about driving between the stator and the slider

超声电机工作之前,一般要施加预压力,使定子的驱动足与动子摩擦材料层以一定的压力接触,摩擦层将产生变形。由于直线超声电机用摩擦材料(如三氧化二铝)一般有较高的刚度,动子摩擦层的变形并不大,动子摩擦层的被接触部分下凹时,下凹处的曲率半径远大于定子驱动足的宽度,可近似认为定子驱动足与动子摩擦层为面接触,从而可忽略动子摩擦界面的剪切变形。曲焱炎^[6]认为驱动足伸

入摩擦材料的内部,笔者认为此仅适用于较软的摩擦材料。

以驱动足的中间质点逆时针运动为例作分析,质点作逆时针方向的椭圆运动,此椭圆运动是一阶纵向振动和二阶弯曲振动的合成。在质点对动子的驱动过程中,一阶纵向振动(x 方向)使驱动足质点和摩擦界面产生压力;二阶弯曲振动使质点切向运动(y 方向),给动子提供切向推力。弯纵复合振动的综合作用使质点对动子接触面产生切向摩擦推力。

电机稳定运行时,质点作椭圆运动,椭圆中心是质点的平衡位置。图3为驱动足质点的运动椭圆图,设质点的椭圆运动方向为逆时针运动方向。图中标明了质点在 y 向的运动速度方向。

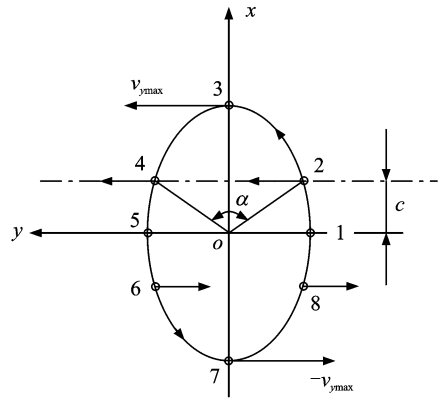


图3 定子驱动足质点椭圆运动 y 方向速度分量图

Fig. 3 y -direction velocity of the particle moving along an ellipse

从式(4)、(6)可知, y 方向的速度分量 v_y 按正弦规律变化,加速度按余弦规律变化。文中将驱动足切向运动方向与动子运动方向一致时的行程称为推程,即为点1~5的运动区间;反之称为回程,即为点5~点1的运动区间。

考虑电机的稳态运行情况,假设稳态时,动子(滑块)的运动速度为 v_0 ,由定子驱动足质点的速度公式可知,驱动足质点的切向(y 方向)运动速度是变化的,由于动子的运动是靠驱动足质点运动的作用来实现的,所以电机运行时驱动足质点的切向运动的最大运动速度一定大于动子(滑块)的平均速度 v_0 。因此质点在推程中, y 方向的速度分量 v_y 一定会出现与 v_0 等速的点,此处简称为等速点。设图3中的点2和点4为等速点。等速点2和4将运动椭圆分成上下两部分,在驱动足质点逆时针从点2运动到点4期间, $v_y > v_0$,驱动足质点对动子产生推

力; 在驱动足质点从点 4 运动到点 2 期间, $v_y < v_0$, 驱动足质点对动子产生阻碍。另外, 驱动足质点在等速点 2 和 4 处的速度与动子的速度相等时, 定子和动子在此处粘滞。

当电机工作的时候, 定子振动的频率就是工作频率, 设为 ω_0 , 在等速点时, 质点的切向运动速度 v_y 与动子的移动速度 v_0 相等, 即

$$v_y = -U_y \omega_0 \sin \omega_0 t_0 = v_0 \quad (8)$$

解得

$$\omega_0 t_0 = \arcsin \frac{-v_0}{U_y \omega_0} \text{ 或 } \omega_0 t_0 = \pi - \arcsin \frac{-v_0}{U_y \omega_0} \quad (9)$$

在质点 y 向加速阶段, 有

$$t_0 = \frac{1}{\omega_0} \arcsin \frac{-v_0}{U_y \omega_0} \quad (10)$$

设 c 为质点运动椭圆等速点 2 和 4 的连线相对于平衡位置的距离, 则

$$c = \left| \int_0^{t_0} v_x(t) dt \right| = \left| \int_0^{t_0} U_x \omega_0 \cos \omega_0 t dt \right| = \left| \int_0^{\frac{1}{\omega_0} \arcsin \frac{-v_0}{U_y \omega_0}} U_x \omega_0 \cos \omega_0 t dt \right| = \left| \frac{-v_0 U_x}{U_y \omega_0} \right| \quad (11)$$

由式(11)可看出, 距离 c 由驱动足质点的运动椭圆决定。 U_x 越小, U_y 越大, 即椭圆越扁平, 距离 c 越小, 则有效驱动时间越长, 越有利于定子的动力输出。另外, 还可看出, c 与电机中定子和动子间的预压力无关。

3 定子驱动足质点的法向运动

图 4 为定子驱动足质点沿法向(x 方向)运动的情况。虽然驱动足质点的法向运动并不能直接驱动动子的运动, 但是定子驱动足质点和动子的摩擦界面有预压力, 同时驱动足质点的法向运动也带来质

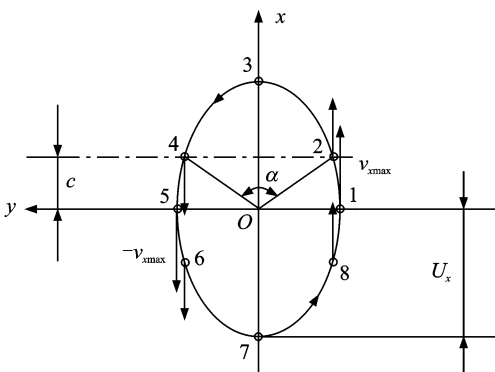


图 4 定子驱动足质点沿法向(x 方向)运动速度
Fig. 4 x -direction velocity of the particle moving along an ellipse

点和摩擦界面的压力变化, 从而使定子与动子出现相对滑动或者相对滑动趋势时产生交变的摩擦力, 电机正是依靠此摩擦力驱动动子运动的。

对矩形板定子纵向振动而言, 定子驱动足质点在点 1 处法向(x 方向)速度达到最大。由于驱动足质点垂直于动子摩擦界面运动, 所以定子与动子的摩擦界面的压力在点 3 时达到最大, 质点的法向速度为零。随后, 定子进入收缩阶段, 如果定子的驱动足与动子全接触, 质点与动子的摩擦界面的压力在点 7 达到最小。

从以上分析可知, 从等速点 2 到等速点 4 之间, 定子与动子摩擦界面刚好处于压力最大的阶段, 并且定子驱动足质点的速度大于动子的速度(等速点除外), 定子驱动足相对动子摩擦层沿运动方向滑动, 从而产生滑动摩擦力实现对动子的驱动。

根据上述分析, 驱动足质点从点 2 逆时针运动到点 4 期间驱动动子运动, 从点 4 逆时针运动到点 2 期间阻碍动子运动的。所以, 如果让定子驱动足在椭圆的点 2 到点 4 区间(运动椭圆的上半部)与动子接触, 在点 4 到点 2 区间(运动椭圆的下半部)与动子分离, 对电机的动力输出而言是最理想的。

4 电机运行时定子质心的颤动分析

图 5 表示了定子的受力情况, 图中为摩擦材料层的线弹簧模型以及定子的受力图。其中 F_y 是定子尾端预压弹簧产生的预压力, F_n 为摩擦材料层对定子的作用力。设电机静态时的初始预压力为 F_{y_0} , 弹簧初始变形量为 δ_y 。此时, 动子的摩擦层所受到的压力等于预压力 F_{y_0} , 产生的变形量为 δ_m 。

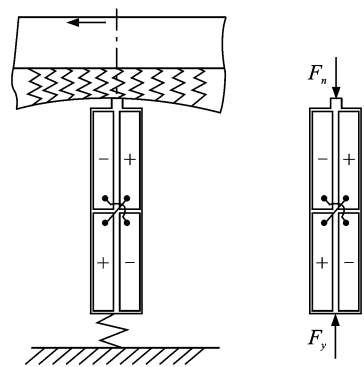


图 5 定子的受力图

Fig. 5 Force diagram of the stator

图 6 为定子振动过程中的变形情况示意图。电机静态时

$$k_m \delta_m = k_y \delta_y = F_{y_0} \quad (12)$$

其中: k_m 为定子摩擦层的刚度系数; k_y 为预压弹簧的刚度系数。

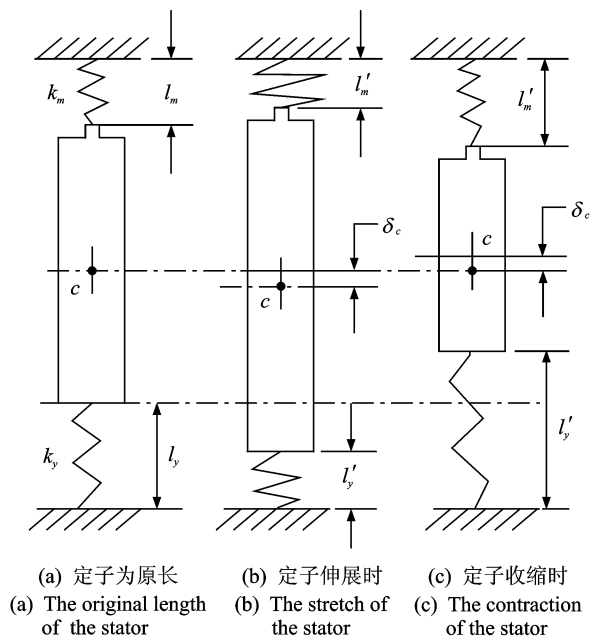


图6 定子振动过程的变形图

Fig. 6 Deformation of the stator in vibrating

当电机工作时,定子产生周期性的振动。考虑定子和定子摩擦层全接触的情况,对于一阶纵振,定子的长度发生变化时,预压弹簧和定子的摩擦层也会发生周期性的变形,则有: $\delta_m = l_{m_0} - l_m$; $\delta_y = l_{y_0} - l_y$ 。其中: l_{y_0} 为预压弹簧的原长; l_{m_0} 为摩擦材料层的原始厚度; l_y 为预压弹簧受到初始预压力后的长度; l_m 为摩擦材料层受到预压作用后的厚度。

电机工作时,定子发生振动,则预压弹簧和摩擦材料层都会产生附加变形。

定子伸长时,预压弹簧的变形量 δ_y 和摩擦材料层的变形量 δ_m 分别为

$$\delta'_m = l_{m_0} - l'_m \quad (13)$$

$$\delta'_y = l_{y_0} - l'_y \quad (14)$$

定子缩短时,有

$$\delta'_m = l'_m - l_{m_0} \quad (15)$$

$$\delta'_y = l'_y - l_{y_0} \quad (16)$$

其中: l'_y 为定子振动时预压弹簧的长度; l'_m 为定子振动时摩擦材料层的厚度。

考虑任意时刻,定子伸长期间两端的受力到达平衡时,有

$$k_m \delta_m = k_y \delta_y \quad (17)$$

$$k_m \delta'_m = k_y \delta'_y \quad (18)$$

易得

$$k_m (\delta'_m - \delta_m) = k_y (\delta'_y - \delta_y) \quad (19)$$

解得

$$\frac{\delta'_y - \delta_y}{\delta'_m - \delta_m} = \frac{k_m}{k_y} \quad (20)$$

式(20)说明,定子长度变化后,定子摩擦层的变形增量和预压弹簧的变形增量与它们的刚度成反比。当定子摩擦层和预压弹簧刚度不同时,由于定子摩擦层的变形增量和预压弹簧的变形增量不等,质心会发生移动,且向变形增量(刚度较小)的那一端移动。设预压弹簧的刚度较小,则质心的移动情况如图6所示。由于预压弹簧的刚度小于定子摩擦层的刚度,定子伸长时,定子质心向预压弹簧方向移动 δ_c 。这是因为在定子伸长过程中,定子往两端瞬间等量伸长,由于定子摩擦层的刚度大于预压弹簧的刚度,定子摩擦层将产生较大的推力,并对定子做功,使定子质心往预压弹簧端运动。反之,定子缩短时,预压弹簧力做功,定子质心向定子方向移动 δ_c 。

如果定子摩擦层和预压弹簧刚度一样,定子伸缩时定子摩擦层和预压弹簧的变形量相等,定子的质心将不会移动。事实上,弯纵型直线超声电机中,预压弹簧的刚度一般小于定子摩擦层的刚度,所以在电机的运行过程中,电机定子除了作弯、纵振动外,定子整体还沿着 x 方向作微幅往返颤动。

5 驱动足“跳跃”式驱动机理

设定子驱动足质点的纵向振幅为 U_x 。当定子和预压弹簧、摩擦层全接触,若定子摩擦层和预压弹簧的刚度不等,则只要定子振动,定子的质心就会产生位移 δ_c ,得到如下关系式

$$\delta_c = \delta'_y - \delta_y - (\delta'_m - \delta_m) \quad (21)$$

$$U_x = \delta'_y - \delta_y + (\delta'_m - \delta_m) \quad (22)$$

由式(20),(21),(22)联立得到方程组

$$\begin{cases} \delta_c = \delta'_y - \delta_y - (\delta'_m - \delta_m) \\ U_x = \delta'_y - \delta_y + (\delta'_m - \delta_m) \\ (\delta'_y - \delta_y) / (\delta'_m - \delta_m) = k_m / k_y \end{cases}$$

解得

$$\delta_c = \frac{k_m - k_y}{k_m + k_y} U_x \quad (23)$$

式(23)表明,定子的质心位移与预压弹簧和定子摩擦层的刚度差有关,如果预压弹簧与定子摩擦层的刚度越接近,则定子质心的颤动会变小;反之,定子质心的颤动越大。

下面对定子驱动足相对于定子摩擦界面的“跳跃”运动进行分析。由于在电机运行时,定子与定子

有相对运动,所以定子驱动足每完成一个椭圆运动周期后,与动子摩擦层在一个新的位置再次接触。故此处以摩擦层未预压状态的界面作为定子驱动足“跳跃”的参考面。

由振动理论^[7]可知,弹簧的自由振动频率为

$$\omega_t = \sqrt{\frac{3k}{\rho l}} \quad (24)$$

其中: k 为弹簧的刚度系数; ρ 为弹簧的线密度; l 为弹簧的长度。

上式表明,当动子摩擦层和预压弹簧的刚度较大时,动子摩擦层和预压弹簧振动频率较高,弹簧的振动周期也较小。

在定子伸长阶段,定子两端分别与预压弹簧、动子的摩擦层保持接触,根据前面小节的分析,定子质心将向预压弹簧、动子的摩擦层中刚度较小的一侧移动一段距离 δ_c 。在定子收缩阶段,当动子摩擦层和预压弹簧的刚度足够大时,动子摩擦层或预压弹簧的弹性回复将跟随定子的收缩,定子质心将向刚度较大的一侧移动 δ_c 。此情形下,定子两端仍然可以与动子摩擦层、预压弹簧全接触,定子驱动足的“跳跃”高度为零。定子与动子、预压弹簧的位置关系如图 7 所示。

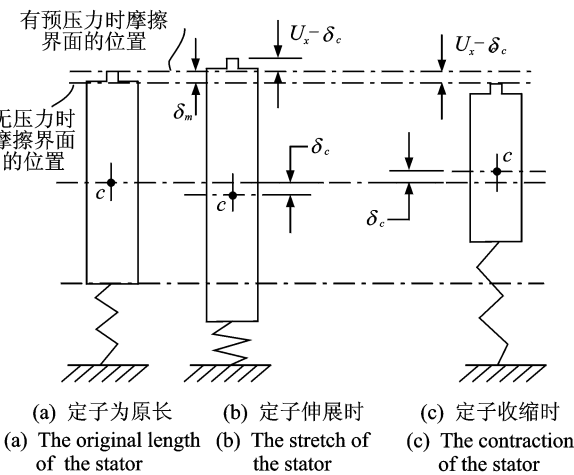


图 7 全接触时定子的振动过程

Fig. 7 Vibration of the stator when the stator maintains contact with the slider

当动子摩擦层和预压弹簧的刚度较小时,动子摩擦层和预压弹簧振动频率较低,当它们的刚度低至一定程度时,在定子收缩阶段,动子摩擦层或预压弹簧的弹性回复将滞后于定子的收缩,这时定子将出现一端或两端与动子摩擦层和预压弹簧分离。当动子摩擦层和预压弹簧的弹性回复均滞后于定子的收缩时,定子两端与它们同时分离,质心受到的外力

瞬间消失,质心将保持静止,如图 8 所示。此种情况与定子驱动足的“跳跃”有关,并且超声电机工作时也多是此种情况。

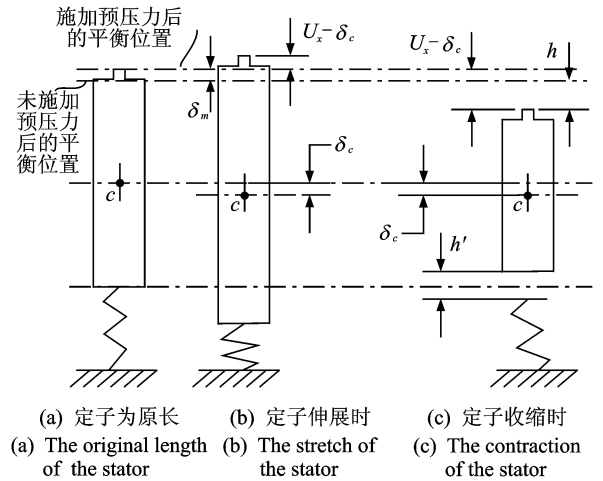


图 8 定子跳跃时的振动情况

Fig. 8 Vibration of the stator in jump

由图 8 可知,定子驱动足顶端与动子摩擦层未受预压力时平衡界面的距离为

$$h = U_x + \delta_c - \delta_m \quad (25)$$

将式(23)代入式(25)得

$$h = U_x + \frac{k_m - k_y}{k_m + k_y} U_x - \delta_m = \frac{2k_m}{k_m + k_y} U_x - \delta_m \quad (26)$$

即

$$h = \frac{2k_m}{k_m + k_y} U_x - \delta_m \quad (27)$$

其中: $\delta_m = \frac{F_{y_0}}{k_m}$,则有

$$h = \frac{2k_m}{k_m + k_y} U_x - \frac{F_{y_0}}{k_m} = \frac{2}{1 + \frac{k_y}{k_m}} U_x - \frac{F_{y_0}}{k_m} \quad (28)$$

当 $h > 0$ 时,驱动足顶端将脱离动子的摩擦界面,出现“跳跃”, h 为“跳跃”高度。从前面的运动分析可知,驱动足跳跃式地与动子摩擦层接触有利于驱动动子运动。

由式(28)可知:

1) 驱动足的“跳跃”高度与定子驱动足的纵向振动位移、摩擦层和预压弹簧的刚度、预压力的大小有关,振幅越大,定子驱动足在纵向方向的行程越大,“跳跃”越高;

2) 电机初始预压力越小,则动子摩擦层的初始变形越小,两个平衡位置的间距 δ_{m_0} 越小,则定子驱动足“跳跃”越高;

3) 动子摩擦材料的刚度大于预压弹簧的刚度,

定子质心在定子伸展阶段时向预压弹簧端的位移较大,摩擦材料层的变形也较小,定子的“跳跃”会较高,预压弹簧的刚度较小,定子的“跳跃”也较高;

4) 当动子摩擦材料的刚度和预压弹簧的刚度相等时,式(28)改写为

$$h = U_x - \frac{F_{y_0}}{k_m} = U_x - \delta_m \quad (29)$$

式(29)说明,在动子摩擦材料的刚度和预压弹簧的刚度相等的情况下,当定子驱动足的振幅大于摩擦层的预压变形时,定子驱动足将产生跳跃;反之,定子驱动足将和动子摩擦层全接触。

文中把定子驱动足质点在作椭圆运动中 and 动子摩擦界面实际接触的那一段椭圆弧称为接触弧,这里定义椭圆中心对接触弧所张的角度为接触角 α ,图3和图4中 $\angle 4O2$ 即为接触角。预压弹簧刚度、动子摩擦层的刚度、电机预压力、驱动足振幅都将对接触角的大小产生影响。文中把驱动足和动力接触面分离的现象称作“腾空”,如果接触角 α 太小,即驱动足的“腾空”时间较长,驱动足的运动椭圆上等速点以上的部分只有一小段对动子进行驱动,在其他条件均不变的情况下,驱动足的有效驱动力较小。如果接触角 α 较大,动、定子接触弧段将加大,接触弧段将延伸至等速点以下部分,使驱动足“腾空”时间变短,甚至出现全接触的情况(接触角 α 为 360°)。这样,驱动足的运动椭圆上等速点以下的部分对动子运动产生阻碍加大,也造成驱动力减小,甚至不能驱动。

根据前面的分析,如果定子和动子在等速点24以上的弧段(图4,椭圆中被线段24所分的上半部分)接触,在其余弧段(图4,椭圆中被线段24所分的下半部分)分离,则是最理想的驱动状态,此时椭圆弧24为驱动弧,对应的 α 为理想接触角。对应的椭圆弧42可称为阻碍弧,定子驱动足质点运动在这个弧段对动子运动起阻碍作用。在超声电机实际的工作中,实际接触角会大于或者小于理想接触角。在超声电机设计和制造过程中,最佳的驱动状态取决于预压弹簧、摩擦材料、电机预压力的合理选择与设置。

综上所述,预压力较小、预压弹簧的刚度较小、摩擦材料的刚度较大等情况均有利于定子对动子的跳跃性驱动,有利于电机动力的输出,反之则不利于电机的动力输出。上述结论中,预压力和摩擦材料刚度对电机动力输出的影响已经被实验所验证^[20]。

根据图4,并结合前述分析可知,当跳跃高度 $h = U_x + c$ 时为最理想,此时接触角 α 为理想接触

角。将式(11)和式(28)代入式(29)得

$$h_{\max} = \frac{2}{\frac{k_y}{k_m} + 1} U_x - \frac{F_{y_0}}{k_m} = U_x - \frac{v_0 U_x}{U_y \omega_0} \quad (30)$$

求解得到合适的预压力为

$$F_{y_0} = \left(\frac{k_m - k_y}{k_m + k_y} - \frac{v_0}{U_y \omega_0} \right) k_m U_x \quad (31)$$

式(31)表明,合适的预压力与摩擦材料的刚度、预压弹簧的刚度、激励电压的频率、定子振幅等有关。当定子的振幅增大时,电机要想获得更好的动力输出,电机的预压力可相应提高,文献[20]的实验结果也验证了这一结论。

6 定子与动子摩擦界面的摩擦力分析

根据前面的分析结果,可以计算出定子的驱动足和动子摩擦界面之间的作用力和摩擦力。

1) 定子伸长阶段的摩擦力

定子驱动足和动子摩擦界面的压力为

$$P_n(t) = F_y + k_m(u_x - \delta_c) \quad (32)$$

相对滑动时,定子与摩擦界面的摩擦力为

$$f_h(t) = P_n(t) \mu_h \operatorname{sgn}(v_y - v_0) \quad (33)$$

其中: $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0; \mu_h \text{ 为滑动摩擦系数} \\ -1 & x < 0 \end{cases}$

粘滞阶段时,静摩擦力为

$$f_s(t) = P_n(t) \mu_s \quad (34)$$

其中: μ_s 为静摩擦系数,其方向与相对运动趋势方向相反。

2) 定子收缩阶段的摩擦力

定子驱动足脱离摩擦界面之前定子和动子摩擦界面的压力为

$$P_n(t) = F_y - k_m(u_x - \delta_c) \quad (35)$$

滑动摩擦有

$$f_h(t) = P_n(t) \mu_h \operatorname{sgn}(v_y - v_0) \quad (36)$$

粘滞时的静摩擦力

$$f_s(t) = P_n(t) \mu_s \quad (37)$$

其方向与相对运动趋势方向相反。

为涵盖定子驱动足和动子界面接触的各种情况,下面考虑全接触(即接触角为 360°)的摩擦情况。实际接触点和脱离点可能在点7之上,甚至在等速点2,4之上。设摩擦力方向与y轴正向一致为“+”,反之为“-”。

由于驱动足质点做超声频率的振动,所以驱动足质点的速度较快,而电机正常工作时动子的移动速度相对较慢。其速度很快就超过动子的移动速

度,所以驱动足质点和动子的等速时间很短,即粘滞时间很短。驱动足和动子间绝大部分时间为滑动摩擦。驱动足和动子接触面的摩擦情况如图9所示,图中各点对应驱动足质点的运动椭圆上的点。 $2' \sim 2$ 和 $4' \sim 4$ 为表示等速接触区。日本学者Takashi Maeno认为, $2' \sim 3$ 阶段是粘滞状态^[3];南京航空航天大学赵向东认为 $3 \sim 4$ 阶段和 $4' \sim 7$ 阶段摩擦力继续增大^[5],与笔者的分析略有不同。

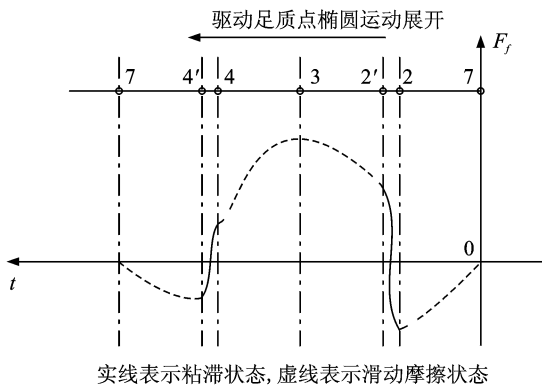


图9 驱动足和动子接触面的摩擦示意图

Fig. 9 Schematic diagram about friction between the stator and the slider

考虑电机稳定运行时的情况。如图9所示,当定子驱动足质点在点7与动子质点接触时,定子驱动足质点切向速度落后于动子质点的速度,定子驱动足质点阻碍动子运动,并随着定子和动子之间的压力的增大,阻碍作用的滑动摩擦力越来越大。当定子驱动足质点切向速度与动子质点速度相等时,即出现粘滞,定、动子间存在静摩擦力,静摩擦力的方向也随着运动趋势的改变而改变。随后定子驱动足质点的速度超过动子质点切向速度,此时为滑动摩擦,滑动摩擦力与动子运动方向一致,驱动动子运动。当质点运动到点3时,定子与动子之间的压力最大,滑动摩擦力也最大,此后随着定子的收缩,定、动子间的压力变小,滑动摩擦力变小。定子的切向速度也开始变小,随后出现第二等速点,此时为定子和动子摩擦界面第二次粘滞。随后,定子驱动足质点的切向速度再次落后于动子的运动速度,此时定子驱动足和动子摩擦界面出现滑动摩擦,阻碍动子运动。

另外,由于定子驱动足质点运动到点3之后,定子开始收缩,由第3小节的分析可知,驱动足和动子界面的之间压力减小较快,所以此阶段平均滑动摩擦力和最大静摩擦力都比定子伸长阶段时小。

7 结论

1) 定子驱动足质点的椭圆运动是超声电机输出动力的关键。“等速点”将驱动足质点的椭圆运动对动子摩擦层的作用分成两个部分:a.驱动动子运动;b.阻碍动子运动。超声电机一般是在被定子“驱动”和“阻碍”的交替作用下输出动力的。

2) 定子振动过程中,其质心的位置随之改变,定子两端的作用力也是变化的。当满足一定的条件时,驱动足将对动子进行跳跃式驱动。

3) 定子驱动足和动子摩擦界面存在复杂的粘、滑摩擦,定子驱动足相对于动子适当的“跳跃”有利于电机的动力输出。定子驱动足的“跳跃”高度取决于预压弹簧刚度、动子摩擦层的刚度、电机预压力、驱动足振幅等因素。

4) 当定子的振幅增大时,电机要想获得更好的动力输出,电机的预压力需要相应提高。

参 考 文 献

- [1] 黑泽实,上羽贞行. 进行波型超音波モーターの効率[J]. 日本音響学会会刊,1988,44(1):40-46.
Kurosawa M, Ueha Z. Efficiency of traveling wave ultrasonic motor[J]. Journal of Acoustical Society of Japan, 1988,44(1):40-46. (in Japanese)
- [2] 上羽贞行. 超声波马达理论与应用[M]. 杨志刚,郑学伦,译. 上海:上海科学技术出版社,1998:230-248.
- [3] Maeno T, Tsukimato T, Miyake A. Finite-element analysis of the rotor/stator contact in a ring type ultrasonic motor[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics Ferroelectric, and Frequency Control, 1992,39(6):668-674.
- [4] 万志坚,胡泓. 面内弯纵型直线超声电机的数学模型与实验研究[J]. 压电与声光,2013,35(2):229-233.
Wan Zhijian, Hu Hong. The mathematical model and experimental on linear ultrasonic motor using longitudinal and bending mode[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013,35(2):229-233. (in Chinese)
- [5] 赵向东,陈波,赵淳生. 旋转行波超声电机非线性摩擦界面模型[J]. 南京航空航天大学学报,2003,35(6):630-633.
Zhao Xiangdong, Chen Bo, Zhao Chunsheng. Nonlinearly frictional interface model of rotated traveling wave type ultrasonic motor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003,35(6):630-633. (in Chinese)

- [6] 曲焱炎. 超声驱动微摩擦机理分析及各向异性摩擦材料研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009:16-33.
- [7] 张义民. 机械振动[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 16-17.
- [8] 刘锦波, 陈永校. 超声波电机定转子接触的摩擦传动模型及其实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(4): 59-63.
Liu Jinbo, Chen Yongxiao. Investigation on contact model of ultrasonic motor and its experiments [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4): 59-63. (in Chinese)
- [9] 施军丽. 超声波电机摩擦驱动模型和摩擦材料研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004: 27-41.
- [10] 陈强. 圆柱定子直线超声波电机的设计、仿真与试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2008: 60-68.
- [11] 曲建俊, 田秀, 孙凤艳. 基于行波型超声马达的超声波振动减摩试验研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(1): 73-77.
Qu Jianjun, Tian Xiu, Sun Fengyan. Experiment study on friction reduction of ultrasonic vibration based on traveling wave ultrasonic motor [J]. Tribology, 2007, 27(1): 73-77. (in Chinese)
- [12] 周广睿. 行波型超声波电机定转子摩擦模型及瞬态特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 8-22.
- [13] 蒋春荣, 胡敏强, 金龙, 等. 行波型超声波电机定转子接触粘滑分布特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 48-53.
Jiang Chunrong, Hu Minqiang, Jin Long, et al. Stick-slip distribution of contact area between stator and rotor in traveling wave ultrasonic motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 48-53. (in Chinese)
- [14] Giraud F, Sandulescu P, Amberg M. Modeling and compensation of the internal friction torque of a traveling wave ultrasonic motor [J]. IEEE Transaction on Haptics, 2011, 4(4): 11-12.
- [15] Storck H, Littmann W, Wallaschek J, et al. The effect of friction reduction in presence of ultrasonic vibrations and its relevance to travelling wave ultrasonic motors [J]. Ultrasonics, 2002(40): 379-383.
- [16] Nakamura K, Ueha S. Potential ability of ultrasonic motors; a discussion focused on the friction control mechanism [J]. Electronics and Communications in Japan, Part 2, 1998, 81(4): 1637-1647.
- [17] 姚志远, 吴辛, 赵淳生. 行波超声电机定转子接触状态试验分析 [J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4): 387-474.
Yao Zhiyuan, Wu Xin, Zhao Chunsheng. Test of contact interface properties of stator and rotor in travelling wave ultrasonic motors [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2009, 29(4): 387-474. (in Chinese)
- [18] 张健滔, 姚志远, 宋小刚, 等. 基于虚拟仪器的直线超声电机机械特性测试 [J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(2): 218-222.
Zhang Jiantao, Yao Zhiyuan, Song Xiaogang, et al. Mechanical characteristics of linear ultrasonic motors based on virtual instrument [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2): 218-222. (in Chinese)
- [19] 金家楣, 泮振锋, 钱富. 阶梯圆柱形压电振子直线型超声电机 [J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 715-719.
Jin Jiamei, Pan Zhenfeng, Qian Fu. Linear ultrasonic motor using notched cylindrical piezoelectric vibrator [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 715-719. (in Chinese)
- [20] 赵淳生. 超声技术与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 109-111, 197, 301.



第一作者简介: 万志坚, 男, 1970年9月生, 博士, 副教授。主要研究方向为超声电机。曾发表《Modeling and experimental analysis of the linear ultrasonic motor with in-plane bending and longitudinal mode》(《Ultrasonics》2014, Vol. 54, No. 3)等论文。

E-mail: sunwanzj@163.com。