

直线超声电机动子运动特性研究

李慧鹏,孙业飞,唐若祥,吕亚宁,刘缤艳

(北京航空航天大学 光电技术研究所,北京 100191)

摘要:对基于面内振动的直线超声电机运动特性进行研究,简述了电机工作原理及定子椭圆运动产生条件,分析了电机运转时动子与定子的接触状态。结合定子周期性伸缩振动,以等速点(定子与动子速度相等时刻点)和临界接触点为分割点,研究了一个激励信号周期内动子的速度变化趋势,建立了稳态下动子的速度模型和位移模型。基于所建模型,借助仿真手段研究了动、定子装配间距与动子速度之间的关系。结果表明,在保证电机正常工作的前提下,动子运动速度与动、定子间装配间距近似线性关系。

关键词:直线超声电机;运动特性;装配间距;速度模型;位移模型

中图分类号:TM356

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.010

Study on the Motion Characteristics of Mover of Linear Ultrasonic Motor

LI Huipeng, SUN Yefei, TANG Ruoxiang, LYU Yaning, LIU Binyan

(Institute of Photoelectric Technology, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The motion characteristics of linear ultrasonic motor based on in-plane vibration were studied. The working principle of the motor and the conditions of the elliptical motion of the stator were briefly described. The contact state between the mover and the stator at the operation of the motor was analyzed. Combined with the periodic stretching vibration of the stator, the velocity variation trend of the mover in a period of the excitation signal was studied by taking the equal-velocity point (the moment at which the speeds of the stator and the mover are the same) the critical contact point as the segmentation point. The velocity model and displacement model of the mover at the steady state were established. Based on the established model, the relationship between the assembly clearance of mover and stator and the velocity of the stator was studied by means of simulation. The results showed that, on the premise of ensuring the normal operation of the motor, there was an approximate linear relationship between the motion speed of the mover and the assembly clearance between the mover and the stator.

Key words: linear ultrasonic motor; motion characteristic; assembling clearance; velocity model; displacement model

0 引言

超声电机是一种利用超声波振动进行驱动的新型电机,其结构紧凑,无电磁干扰,精度高,在航空航天、精密驱动领域有广阔的应用前景^[1-2]。直线超声电机利用压电晶体的逆压电效应,将电能转换为定子的超声振动,再通过定子与动子之间的摩擦实现动子的运动^[3]。

自20世纪70年代VISHNEVSKY等^[4]提出了直线超声电机、定子接触的椭圆轨迹驱动原理以来,有关超声电机的研究得到快速发展。Ueha和Kurosawa建立了定转子接触模型的解析表达式^[5-6]。许海等^[7]对基于面内振动的直线驻波型超

声电机的动、定子接触过程和摩擦进行研究,建立了装配间距与电机输出推力模型。万志坚等^[8]分析了定子切向运动和法向运动过程,在此基础上研究了定子对动子“跳跃式”驱动与预压力的关系。

目前针对直线超声电机运动学研究较多的是围绕定子的振动模态及结构设计^[9-10],对动子的运动过程,尤其是微观运动过程缺乏相应研究。本文从直线超声电机定子与动子相对运动关系入手,分析了稳定运动状态下一个激励周期内动子的微观运动特性,依据定子周期性振动产生的动、定子间相互作用力建立了动子的速度模型和位移模型,在此基础上仿真研究了直线超声电机、定子装配间距对其

收稿日期:2017-08-14

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项基金资助项目(2013YQ050791)。

作者简介:李慧鹏(1975-),男,内蒙古赤峰人,副教授,博士,主要从事传感器技术、光电测试技术的研究。

微观运动特性的影响。

1 直线驻波型超声电机运动原理

图1为基于面内振动的直线驻波型超声电机工作原理示意图。电机定子主要由压电陶瓷片构成,8片压电陶瓷正、反对称分布,互为对角的两片压电陶瓷作为一组。给压电陶瓷施加两相激励信号 $V_1 = V \sin(\omega t + \alpha)$ 和 $V_2 = V \sin(\omega t + \beta)$, 会激发定子的一阶纵向伸缩振动和二阶横向弯曲振动,其中 V 为信号幅值, ω 为信号频率, α, β 分别为信号相位。2个振动状态叠加使定子驱动足作椭圆运动,通过摩擦力驱动动子在直线导轨上运动。

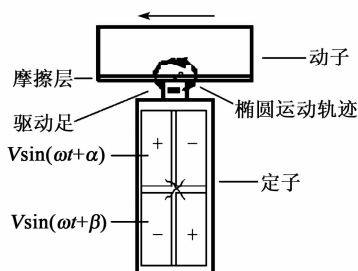


图1 面内振动型直线超声电机原理图

U_0 、 V_0 分别为直线超声电机定子的纵向伸缩振幅和横向弯曲振幅, $u(t)$ 、 $v(t)$ 分别为 t 时刻驱动足的纵、横向位移,在两相激励信号下有^[11]

$$u(t) = U_0 \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

$$v(t) = V_0 \sin(\omega t + \beta) \quad (2)$$

当 $\beta - \alpha = \frac{\pi}{2}$, 即两信号激励初始相位差为 90°

时,由式(1)、(2)可得

$$\frac{v(t)^2}{V_0^2} + \frac{u(t)^2}{U_0^2} = 1 \quad (3)$$

由式(3)可知,定子作椭圆运动,此时定子的纵向位移和横向位移分别为

$$u(t) = U_0 \sin \omega t \quad (4)$$

$$v(t) = V_0 \cos \omega t \quad (5)$$

给动、定子合适的装配间距,在定子作椭圆运动时,会通过摩擦力驱动动子运动。

2 直线超声电机运动特性分析

直线超声电机正常工作时,定子与动子间有压力作用,压力大小影响着电机的运动特性。而在电机装配过程中定子驱动足与动子摩擦层之间的间距又直接影响两者之间的压力。因此,动、定子装配间距对其运动有很大影响。

对超声电机定子施加一定的预紧力,使定子驱动足与动子摩擦层相互接触,并产生一定压力。在

此压力下,摩擦层产生初始形变,形变量为 Δl , Δl 为负时表示摩擦层被压缩。图2(a)中,当 $-|U_0| < \Delta l < 0$, 动、定子会有一段过程处于分离状态。图2(b)中, $\Delta l < -|U_0|$, 整个运动过程中,动子与定子一直保持接触状态。

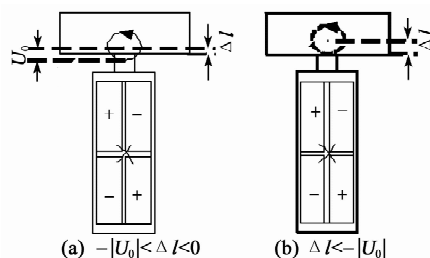


图2 直线超声电机装配关系示意图

以 $-|U_0| < \Delta l < 0$ 为例,分析直线超声电机动子的稳态运动过程。用 v_m 表示动子的运动速度, v_n 表示定子驱动足的切向速度。图3为定子椭圆运动轨迹, a, f 两点为动、定子临界接触点, b, e 两点为等速点, c 点为等加速度点。图4为驱动足切向速度-时间关系图。在 a 点,动、定子速度方向相反。 $a-b$ 过程中,定子在激励信号下纵向伸长,动子与定子之间产生压力。因为在 y 轴负半轴,动、定子速度方向相反,在 y 轴正半轴,动子速度大于驱动足切向速度,所以动子所受摩擦力均为阻力,作加速度增加的减速运动。在 b 点,动子速度与驱动足切向速度相等,即 $v_{mb} = v_{nb}$ 。 $b-d$ 过程中,驱动足切向速度超过动子速度,动子所受摩擦力为推力。随着定子伸长,动子作加速度增大的变加速运动。在椭圆最高点 d ,驱动足切向速度达到最大,此时 $v_{md} < v_{nd}$, 对应加速度关系 $a_{md} > a_{nd}$, 动子所受摩擦力仍为推力。 $d-e$ 过程中,动子速度继续增加,但由于定子伸长量开始减小,动子加速度有所减小。同时,驱动足切向速度也开始减小。在 e 点,两者速度再次相等, $v_{me} = v_{ne}$ 。 $e-f$ 过程中,在 y 轴正半轴,驱动足切向速度小于动子速度,在 y 轴负半轴,动、定子速度方向相

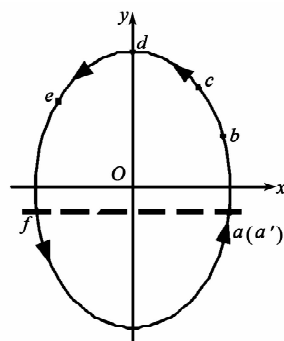


图3 定子驱动足椭圆运动轨迹

反,动子所受摩擦力均为阻力,作减速运动。在 f 点,动子与定子分离, $v_{mf} > v_{nf}$ 。 $f-a'$ 过程中,由于动子在滚珠导轨上运动,所受摩擦力很小,可把动子看作匀速运动, $v_{ma'} = v_{mf}$ 。

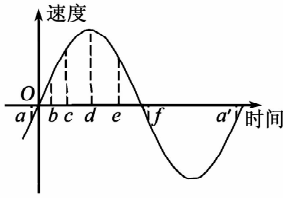


图 4 定子驱动足速度变化趋势

3 直线超声电机运动建模

3.1 动、定子摩擦力分析

把动子的摩擦层简化为分布式线弹簧,单位长度的等效刚度系数 k_m [12] 为

$$k_m = \frac{E_m b_m}{h_m} \quad (6)$$

式中: h_m 为摩擦层的厚度; b_m 为摩擦层的横向宽度; E_m 为摩擦材料的弹性模量。

给电机施加预压力 F_p , 由于摩擦层刚度系数远小于定子的刚度,可近似认为只有摩擦层产生形变,形变量 $\Delta l = -F_p/k_m$ 。

当给超声电机施加激励信号后,定子会按式(4)做周期性运动。在运动过程中,摩擦层所受压力为

$$F(t) = F_p + k_m u(t) \quad (7)$$

摩擦力为

$$f(t) = \mu \cdot F(t) \cdot \text{sgn}[u(t) - \Delta l] \quad (8)$$

式中: $\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & u(t) > \Delta l \\ 0 & u(t) \leq \Delta l \end{cases}$; μ 为滑动摩擦系数。

假设动子负载为 m , 根据式(4)、(8)可知动子在 t 时刻加速度为

$$a_m(t) = \frac{f(t)}{m} \quad (9)$$

3.2 瞬态运动特性建模

假设定子逆时针运动,速度向左为正,结合式(1)可得定子驱动足切向速度为

$$v_n(t) = V_0 \omega \sin \omega t \quad (10)$$

在初始接触时刻,即 t_a 时刻,动子速度为 v_{ma} 。根据以上分析可知,在 $a-b$ 阶段定子对动子做负功,动子速度减小,结合式(9)得到 t 时刻速度为

$$v_{m(a-b)}(t) = v_{ma} - \int_{t_a}^t a_m(s) ds \quad (11)$$

$b-e$ 阶段,定子对动子做正功,动子速度增加,即

$$v_{m(b-e)}(t) = v_{mb} + \int_{t_b}^t a_m(s) ds \quad (12)$$

$e-f$ 阶段,定子对动子做负功,动子速度减小,即

$$v_{m(e-f)}(t) = v_{me} - \int_{t_e}^t a(s) ds \quad (13)$$

$f-a'$ 阶段,动子匀速运动,且

$$v_{m(f-a')} = v_{mf} \quad (14)$$

在 b, e 时刻点,动子速度与定子驱动足切向速度相等,结合式(8)~(14)可得

$$\begin{cases} v_{mb} = v_{ma} + k_1 (\cos \omega t_b - \cos \omega t_a) + k_2 (t_b - t_a) \\ v_{me} = v_{mb} + k_1 (\cos \omega t_b - \cos \omega t_e) + k_2 (t_b - t_e) \\ v_{mf} = v_{md} + k_1 (\cos \omega t_f - \cos \omega t_e) + k_2 (t_f - t_e) \\ v_{mb} = v_{nb} \\ v_{me} = v_{ne} \\ v_{mf} = v_{ma} \\ v_{nb} = V_0 \omega \sin \omega t_b \\ v_{ne} = V_0 \omega \sin \omega t_e \\ F(t) = k_m [u(t) - \Delta l] = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $k_1 = \frac{\mu k_m U_0}{m \omega}$; $k_2 = \frac{\mu k_m \Delta l}{m}$ 。对方程组(15)求解,可得 t_a, t_b, t_e, t_f 及动子在这 4 个时刻对应的速度 $v_{ma}, v_{mb}, v_{me}, v_{mf}$ 。

根据上述速度模型,描绘出一个激励周期内动子速度变化趋势,如图 5 所示。图 6 为电机平稳运行时动子速度的周期性变化。

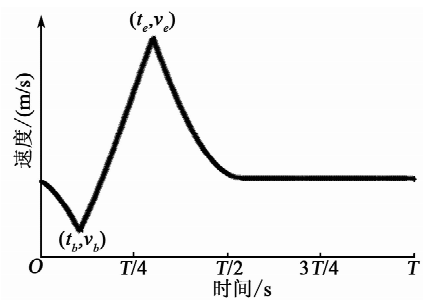


图 5 1 个周期激励内动子运动速度

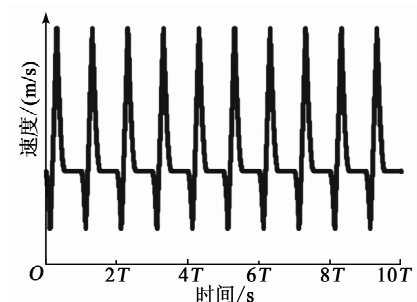


图 6 稳态过程中动子运动速度

借助已建速度-时间模型,对时间 t 积分,得到 动子的位移-时间模型为

$$s_m(t) = \begin{cases} \int_{t_a}^t v_{m(a-b)}(s) ds & t \in [t_a, t_b) \\ \int_{t_a}^{t_b} v_{m(a-b)}(s) ds + \int_{t_b}^t v_{m(b-e)}(s) ds & t \in [t_b, t_e) \\ \int_{t_a}^{t_b} v_{m(a-b)}(s) ds + \int_{t_b}^{t_e} v_{m(b-e)}(s) ds + \int_{t_e}^t v_{m(e-f)}(s) ds & t \in [t_e, t_f) \\ \int_{t_a}^{t_b} v_{m(a-b)}(s) ds + \int_{t_b}^{t_e} v_{m(b-e)}(s) ds + \int_{t_e}^{t_f} v_{m(e-f)}(s) ds + v_{mf}(t_a + T - t_f) & t \in [t_f, t_a + T) \end{cases} \quad (16)$$

图 7 为一个激励周期内动子的位移曲线。由图可看出,在 t_b 到 t_f 时间段,动子位移与时间呈现非线性关系,与速度模型一致。

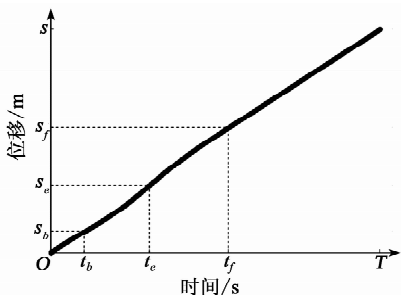


图 7 直线超声电机时间-位移曲线

表 1 不同装配间隙 Δl 所对应的瞬态运动参数

$\Delta l/\text{nm}$	t_a/ms	t_b/ms	t_e/ms	t_f/ms	$v_{ma}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{mb}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{me}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{mf}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0	0	2.520 2	5.961 2	10.000	0.049 3	0.044 7	0.060 0	0.049 3
-50	-0.398 9	2.290 3	5.991 9	10.399	0.046 7	0.041 4	0.059 8	0.041 4
-100	-0.804 3	2.059 3	6.020 4	10.804	0.043 9	0.037 9	0.059 6	0.043 9
-150	-1.223 6	1.825 9	6.046 9	11.224	0.040 9	0.034 1	0.059 5	0.040 9
-200	-1.666 7	1.588 2	6.072 8	11.667	0.037 7	0.030 1	0.059 3	0.037 7

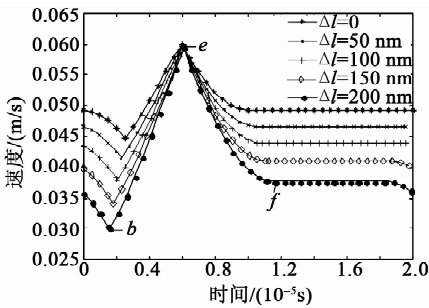


图 8 不同间距下动子速度变化趋势

由图 8 可看出,在一定范围内,配合间距减小, b 点速度降低,但由于等速点 b 提前,等速度点 e 推后,且 $b-e$ 之间的加速度变大,到达 e 点的速度相差无几。而分离点 f 推后,定子对动子所做负功增加,动子在分离时刻的速度变低。

为了更精确地反映装配间距与动子速度间的关系,根据式(16)可得动子在一个激励周期内的平均速度:

4 装配关系与运动特性仿真研究

取摩擦因素 $\mu=0.15$,动子负载 0.5 kg ,定子一阶纵振振幅 400 nm ,二阶弯振振幅 200 nm ,激振频率 $500\,000\times 2\pi\text{ Hz}$,动子摩擦层等效刚度系数 $k_m=4\times 10^{10}\text{ N/m}$ 。当动子与定子之间装配间距 Δl (即摩擦层初始形变)取不同值时,根据式(15)可求出各变量所对应的值,如表 1 所示。根据表 1 参数,结合速度模型,得到不同装配间距下动子瞬态速度变化趋势,如图 8 所示。

$$\bar{v} = \left[\int_{t_a}^{t_b} v_{m(a-b)}(s) ds + \int_{t_b}^{t_e} v_{m(b-e)}(s) ds + \int_{t_e}^{t_f} v_{m(e-f)}(s) ds + v_{mf}(t_a + T - t_f) \right] / T \quad (17)$$

根据式(17)可求出不同装配间距下动子的平均速度,如表 2 所示。

表 2 动、定子装配间距与其对应的平均速度

$\Delta l/\text{nm}$	$\bar{v}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0	0.050 3
-50	0.048 1
-100	0.045 8
-150	0.043 4
-200	0.040 9

对表 2 数据进行拟合,得到图 9 所示的拟合曲线。由图可知,动子平均速度与装配间距近似线性关系为

$$\bar{v} = 4.253\,7 \times 10^{-5} \cdot \Delta l + 0.050\,2 \quad (18)$$

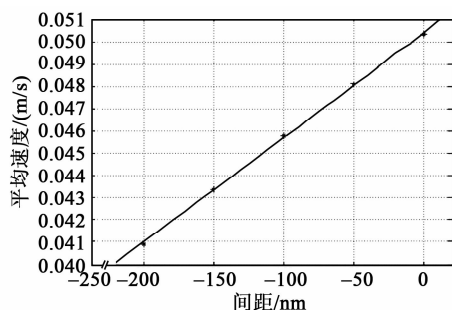


图9 动/定子装配间距与平均速度关系曲线

要想获得较快的运动速度,可适当增加动子与定子之间的装配间距。装配间距与电机堵转推力成反比^[13],与噪声成正比关系^[14]。因此,在装配时要综合考虑各方面因素,根据需求选择合适的装配间距。

5 结论

本文针对基于面内振动的直线驻波型超声电机,从定子与动子相对运动关系方面入手建立了动子的速度和位移模型,模型表明:

1) 在一个激励周期内,2个等速点和2个临界接触点将动子的运动划分为变加速、变减速和匀速运动3种状态。

2) 直线超声电机动子位移与时间呈近似线性关系,从宏观角度可以认为动子是匀速直线运动。

3) 动、定子装配间距与动子速度呈近似正比关系,要想获得更高的速度可适当增加动、定子间的间距。

本文研究反映了直线超声电机瞬态运动过程,通过数学仿真直观表现了动子的稳态运动过程,仿真结果与理论分析一致。研究结果为超声直线电机的装配与运动控制提供理论依据。

参考文献:

- [1] YAO Z Y, ZHAO C S, ZENG J S, et al. Analytical solution on the non-linear vibration of a traveling wave ultrasonic motor[J]. Journal of Electroceramics, 2008, 20(3): 251-258.
- [2] HEMSEL T, WALLASCHEK J. Survey of the present state of the art of piezoelectric linear motors[J]. Ultrasonics, 2000, 38(1/8): 37-40.
- [3] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] VISHNEVSKY V, GULTIAEVAL, KARTASCHEW I, et al. Piezoelectric motor; 851560[P]. 1981-07-30.
- [5] KUROSAWA M, UCHA Z. Efficiency of traveling wave ultrasonic motor[J]. Journal of Acoustical Socie-

ty of Japan, 1988, 44(1): 40-46.

- [6] 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, 1997.
- [7] 许海, 李志荣. 直线驻波型超声电机的接触分析和堵转推力模型[J]. 微电机, 2010, 43(5): 19-21.
XU Hai, LI Zhirong. Analysis on the process of contact of linear ultrasonic motor and the model of stall-thrust[J]. Micro Motors, 2010, 43(5): 19-21.
- [8] 万志坚, 胡泓. 面内弯纵型直线超声电机的驱动与摩擦分析[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(2): 229-236.
WAN Zhijian, HU Hong. Analysis on friction driving of linear ultrasonic motor with in-plane bending and longitudinal mode[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2014, 34(2): 229-236.
- [9] 杨模尖, 姚志远, 李响, 等. V型贴片式直线超声电机的结构优化设计[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 213-218.
YANG Mojian, YAO Zhiyuan, LI Xiang, et al. Structural optimization design of V-shape patch type linear ultrasonic motors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(7): 213-218.
- [10] 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 study on linear ultrasonic motor using longitudinal and bending mode[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2013, 35(2): 229-233.
- [11] 贺红林, 武冬梅, 何文丛, 等. 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(5): 1-5.
HE Honglin, WU Dongmei, HE Wencong, et al. Ultrasonic linear motor driven by the longitudinal and bending vibration modes of an H-shaped vibrator[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(5): 1-5.
- [12] 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): 629-633.
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): 629-633.
- [13] 许海, 赵淳生. 直线型驻波超声电机的定、动子间接触及摩擦分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(2): 144-149.
XU Hai, ZHAO Chunsheng. Contact process and friction analysis of linear ultrasonic motor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(2): 144-149.
- [14] 张杰. 直线超声电机摩擦磨损实验装置设计及实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.