

复合振子型大推力大行程直线 超声电机特性研究

李朝东 金 龙 赵淳生

(南京航空航天大学振动工程研究所 南京 210016)

1998 年 2 月 20 日收到

1998 年 7 月 30 日定稿

摘要 该复合振子型直线超声电机是作者提出的一种新型直线超声电机结构型式。本文叙述了该电机的基本结构和动作原理,说明了该电机产生大推力和大断电自锁力的机理,给出了所制作的原型机特性实验的结果。该原型机最大推力为 11 N,最大输出功率为 1.4 W,正反两向性能基本一致。

PACS 数: 43.88, 43.40

The characteristics of hybrid transducer type linear ultrasonic motor with large thrust and large stroke

LI Chaodong JIN Long ZHAO Chunsheng

(Institute of Vibration Engineering Research, NUA A Nanjing 210016)

Received Feb. 20, 1998

Revised Jul. 30, 1998

Abstract This hybrid transducer type linear ultrasonic motor is a new type linear ultrasonic motor which been proposed by authors. This paper describes its basic structure and operation principle, deals with the cause of the large thrust and large self-lock force when power is cut off which produced by this motor. The prototype motor's measured characteristics are shown, its maximum thrust is 11 N and maximum output power is 1.4 W, both backward and forward motion performance is roughly coincident.

引言

在小型、精密直线运动装置的驱动和控制方面,直线超声电机具有许多优越性,应用前景十分广阔^[1]。国外已开发出多种直线超声电机的原理样机,而国内则侧重于高分辨率微位移作动器的研究,对大推力大行程直线超声电机的研究甚少,尚未见到有关特性研究的报道。在机器人、计算机辅助制造、FA 机器等应用背景下,希望直线超声电机具有大的推力和断电自锁力。作者不久前以实现大推力为目标,研制出了一种复合振子型直线超声电机^[1]并制作了原型机。经过对该原型机的量测,最大推力达 11 N,最大输出功率 1.4 W,且正反两向性能基本一致。本文叙述该直线超声电机的驱动原理、基本结构和对原型机所做特性实验的结果。

1 大推力的实现

直线超声电机主要由驱动振子和直线导轨(或滑块)两部分组成,其中的驱动振子一般由压电元件和弹性体构成。直线超声电机的驱动原理是利用压电元件激励出弹性体的超声频域共振,并使驱动面上的质点产生椭圆运动,借助摩擦力推动驱动振子,或固定驱动振子而推动滑块前进。驱动摩擦力由驱动面上的摩擦系数和驱动振子对导轨(或滑块)的法向压力决定,该法向压力由振子的振动力和加在振子上的预压力构成。影响摩擦系数的因素很复杂,而在摩擦系数一定的情况下,输出推力的大小主要取决于该法向压力的大小。另外,电机在断电停止时具有的位置自锁力等于预压力和静摩擦系数的乘积,静摩擦系数一定时,断电自锁力的大小取决于预压力的大小。由此可见,实现大推力的关键在于加大作用在驱动振子上的预压力和加大驱动振子的振动发生力。

目前已开发出的直线超声电机中,所采用的压电元件类型大体上有三种:压电陶瓷片(横向振动模式)、叠层型压电作动器、兰杰文型(Langevin-type)振子(纵向振动模式)。采用压电陶瓷片的直线超声电机(例如^[2,3]),是将几个压电片粘贴在弹性体上,激发出弹性体的纵向振动模态(沿导轨方向)和横向弯曲振动模态(垂直于导轨方向),在足部合成为驱动所需的椭圆运动,由于所产生的横向振动力小,不能对其施加大的预压力,因此输出的推力不大,最大推力一般为 $0.6\text{ N} \sim 4\text{ N}$ 。采用叠层型压电作动器的直线超声电机(例如^[4,5]),发挥该作动器体积小发生力大的特长,作电机的激励源使用,输出的最大推力为 $4\text{ N} \sim 10\text{ N}$ 。但目前的叠层型压电作动器适合于低频工作,在超声频域工作时介电损耗大,另外该作动器制作工艺复杂,成本高,应用上有局限性。采用兰杰文型振子的直线超声电机目前有两种,一种是指田开发的行波方式^[6],在弹性梁的两端各联结一个兰杰文型振子,一个激振,一个吸振,激发出梁的弯曲振动行波,推动压在梁上的滑块移动,输出的最大推力可达 50 N 以上,但结构尺寸过大,效率很低(为 3% 以下)。另一种是上羽开发的双足步行(inchworm)方式^[6],电机驱动振子由产生沿导轨方向的前后伸缩运动的兰杰文型振子,和产生垂直于导轨上下运动的叠层型压电作动器复合而成,可产生 10 N 的推力,但仍采用了叠层型压电作动器。作者开发的直线超声电机,为驻波方式,未采用叠层型压电作动器,电机驱动振子由作纵向振动的兰杰文型振子和作弯曲振动的板状振子复合而成,板状振子兼作纵向振动的聚能器,把兰杰文型振子垂直于导轨方向布置,其振动发生力大,可以对其施加相当大的预压力,从而获得大的输出推力。另一方面,由于垂直于导轨方向的振动位移大,降低了对导轨工作表面加工精度的要求,所以实现大的行程没有困难。

2 基本结构和动作原理

本复合振子型直线超声电机的基本结构如图1所示。电机驱动振子由作纵向激振的兰杰文型振子和作横向激振的板状振子复合而成。圆形压电陶瓷片用螺栓夹紧于前后金属盖板之间,作纵向激振,激出1阶纵向振动模态。前盖板前部做成板状,两面贴矩形压电陶瓷片,作横向弯曲激振,激出3阶弯曲振动模态。图2(a)和图2(b)分别为用有限单元法计算出的1阶纵向振动振型和3阶弯曲振动振型。设计电机驱动振子的各部尺寸,使这两个振动模态频率一致,以便能用同一频率激出这两个模态来。当向两组压电片分别施加同频率、相位互差 90° 的驱动电压激振时,电机驱动振子的驱动端表面质点便产生椭圆运动。图示的夹持位置位于两振动的共同节线上,夹持驱动振子使其轴线保持与导轨垂直,并在预压力作用下保持与导轨接触,固定导轨,电机驱动振子便沿导轨移动。当相位差由 90° 切换为 -90° 时,电机便反向移动。

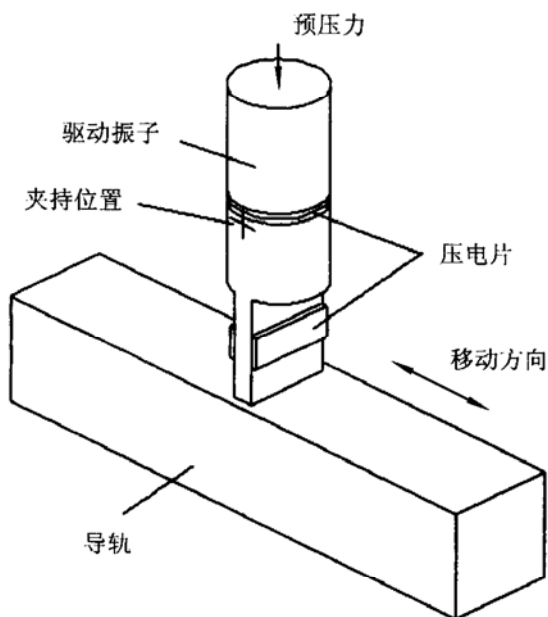


图1 复合振子型直线超声电机的基本结构

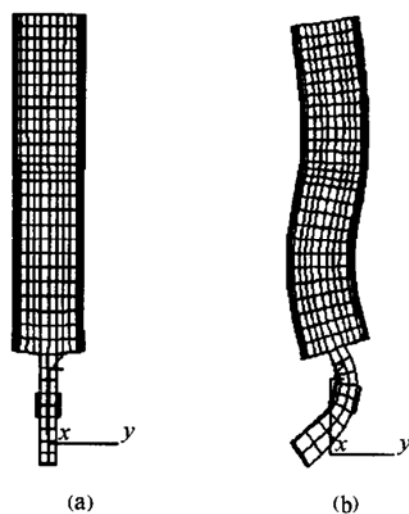


图2 振子的纵向和弯曲振动振型

3 实验结果

制作了复合振子型直线超声电机的原型机，电机驱动振子外径为 $\phi 20\text{ mm}$ ，总长度为 100 mm ，电机行程为 0.5 m 。驱动振子的前盖板用硬铝，导轨用普碳钢制成，目前该原型机驱动面上暂未使用摩擦材料。图3为原型机推力速度特性实验装置示意图。首先对原型机的纵向振动和弯曲振动模式频率进行了实测，以考查电机组装后这两个模式频率是否仍保持一致。分别用纵向振动振子和弯曲振动振子作激振源，接入 HP3562A 动态信号分析仪对电机驱动振子进行扫频。扫频结果，1阶纵向振动模式频率 $f_{L1} = 21.475\text{ kHz}$ ，3阶弯曲振动模式频率 $f_{B3} = 21.437\text{ kHz}$ ，可见两频率仍相当靠近。

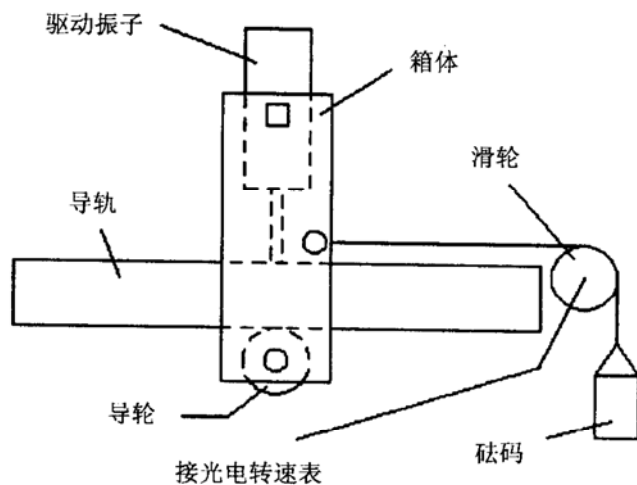


图3 原型机推力速度特性实验装置

然后对原型机进行了推力速度特性实验。实验方法是调整电机驱动振子上压紧弹簧的变形量设定预压力，电机输出的推力用吊砝码测出，输出速度是用光电转速表非接触地测出滑轮的速度再经换算得出。实验表明，该电机正反两向运动切换灵活，速度在一定范围内可调，同一负载下速度虽有少量波动，但运行基本稳定，两向特性基本一致。由于电机效率较高且散热条件好，电机经长时间运行没有出现发热现象。

图4给出了电机在不同预压力条件下，无负荷速度与驱动频率的特性曲线。可见预压力增大时，谐振频率向高的方向漂移，同时谐振点电机输出速度下降。这表明：(1) 电机驱动振子的谐振频率随预压力加大会有所提高。(2) 预压力加大时，驱动振子输出的振动能量中用于克服预压力的比重增加了，也就是说，驱动振子足部的弹性变形加大了，导致振子前进步幅减小。图5给出了电机在驱动频率 $f = 21.64\text{ kHz}$ 不变，设定不同的预压力条件下，输出速度与推力的特性曲

线。可见电机的输出特性基本是下降的直线，并且，随着预压力的加大，空载速度降低，最大推力加大，即电机趋于硬特性。这是因为预压力加大后，电机驱动振子与导轨间摩擦力增加，加大了电机驱动振子的输出力。

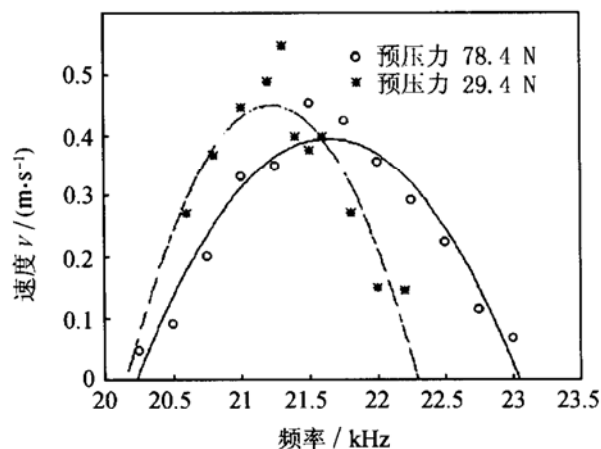


图 4 无负荷速度特性

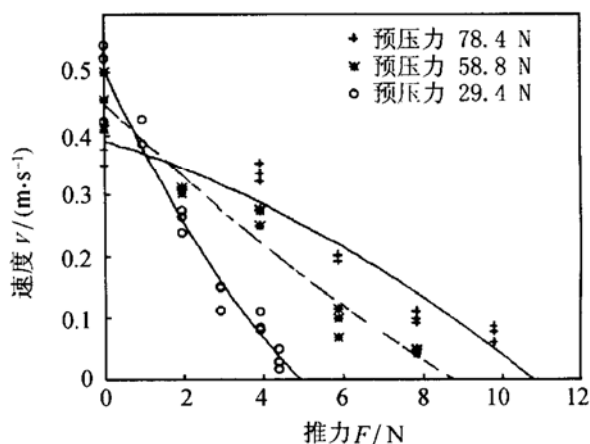


图 5 速度与推力特性

由于采用了兰杰文型振子，纵向振动发生力大，可以施加大的预压力，所以输出大推力成为可能。电机在全行程上运行速度保持稳定。实测最大输出功率出现在速度 $v = 0.35 \text{ m/s}$ ，推力 $F = 4 \text{ N}$ ，输出功率 $P_{out} = 1.4 \text{ W}$ 。实测最大断电自锁力为 20 N 。但在负载力过大时，出现电机驱动振子啃轨现象，驱动振子和导轨间磨损严重，运行速度也不均匀。这是由于电机打滑现象加剧引起的，表明界面摩擦系数不够大。可见在电机驱动振子端部粘贴适当的摩擦材料很有必要。可以预计，增加摩擦材料后不仅磨损可以减少，输出推力也会进一步加大。

4 结束语

研制出一种复合振子型直线超声电机，实现了大推力。原型机最大推力为 11 N ，最大输出功率 1.4 W ，无负荷最大速度 0.5 m/s 。今后在驱动面摩擦材料的选用、进一步提高效率和进行高精度速度和位置控制方面作深入研究，以将该种电机推向实用化。

参 考 文 献

- 1 李朝东, 赵淳生. 直线型超声马达的研究和应用. 东南大学学报, 1997; 27(5A): 123—126
- 2 Nikon. リニア型超音波アクチュエータ原理サンプルカタログ. 1996(内部资料)
- 3 山口昌树, 岩尾直人, 山田祥治. 角柱形共振器を用いたリニア超音波モータ. 电子情报通信学会论文志, 1990; J73-A(6): 1178—1179
- 4 大西一正, 内藤浩一, 中泽彻. 縦 - 曲げ結合振動を用いた超音波リニアアクチュエータ. 日本音响学会志, 1991; 47(1): 27—34
- 5 Funakubo T, Tsubata T, Taniguchi Y. Ultrasonic linear motor using multilayer piezoelectric actuators. *Jan. J. Appl. Phys.*, 1995; 34(5B): 2756—2759
- 6 Ueha S, Tomikawa Y. Ultrasonic motors theory and applications. New York: OXFORD Science Publications, 1993