

直线自校正式超声步进电机的研究^{*}

周铁英 张 强

(清华大学现代应用物理系 北京 100084)

1996 年 1 月 22 日收到

1996 年 7 月 18 日定稿

摘要 本文把原有的直线行波电机改制成一种直线式具有自校正功能的超声步进电机, 讨论了该电机的驱动理论和步进定位理论, 分析了弹性体滑块在驻波钢梁上的受力过程, 给出了电机在步进定位阶段滑块所受恢复力的近似解析表达式, 并用实验的方法进行了验证, 理论计算与实验结果基本符合。

PACS 数 43.35

Study on a new type of linear self-correcting ultrasonic stepping motor

ZHOU Tieying ZHANG Qiang

(Department of Physics Tsinghua University Beijing 100084)

Received Jan. 22, 1996

Revised Jul. 18, 1996

Abstract The theories of a new type of linear ultrasonic stepping motor's drive and self-correcting positioning were discussed. The forced progress of an elastic body slider on a stationary steel beam was analyzed. The expression of the restoring force of the slider at the motor's self-correcting stage was given. These theories have been examined by means of experiment. The calculated result was basically consistent with the experimental one.

引言

作为超声马达的一个分支, 超声步进电机在精确控制系统等领域有着广泛的应用前景, 以往的超声步进电机^{1,2}多半是采用类似于电磁电机的闭环控制系统, 以达到所要求的精度, 使其控制系统的结构变得较复杂。在保障精度的情况下由较简单的开环控制系统来代替原有的控制结构, 是自校正式超声步进电机的一个显著的特点³。这种电机由于其转子(摄动体)的特殊结构及特殊的控制方式, 具有步进自校正的能力, 从而消除了积累误差。由于省略了前者所采用的传感器和与之相匹配的闭环时序电路以及庞大的编码译码控制系统, 达到了简化结构和保障精度的目的。本文提出一种直线自校正式超声步进电机, 详细介绍了它的结构及其原理。给出了转子(摄动体)在驻波振动梁上的动力学分析, 并以实验给出了验证, 进一步完善了该类马达的定位理论, 根据计算结果, 给出了该电机的设计原则。

^{*} 国家自然科学基金资助项目

1 结构与原理

马达的结构如图 1(a) 所示, 左右两边各有一个 Langevin 振子, 其作用各不相同, 左边的有源振子用来产生纵向振动, 激发金属弹性梁产生弯曲波; 右边的 Langevin 振子则作为吸收回路的一部分。可变电阻 R 与电感 L 并联构成回路的匹配阻抗, K 为一个电子开关, 由一定的时序信号来控制它的状态。梁上的滑块为电机的转子, 其结构如图 1(b), 上面开一些细槽, 槽宽 $2d$, 其中的一个弹性体单元的长度 b 恰好为梁上的弯曲行波的半波长。

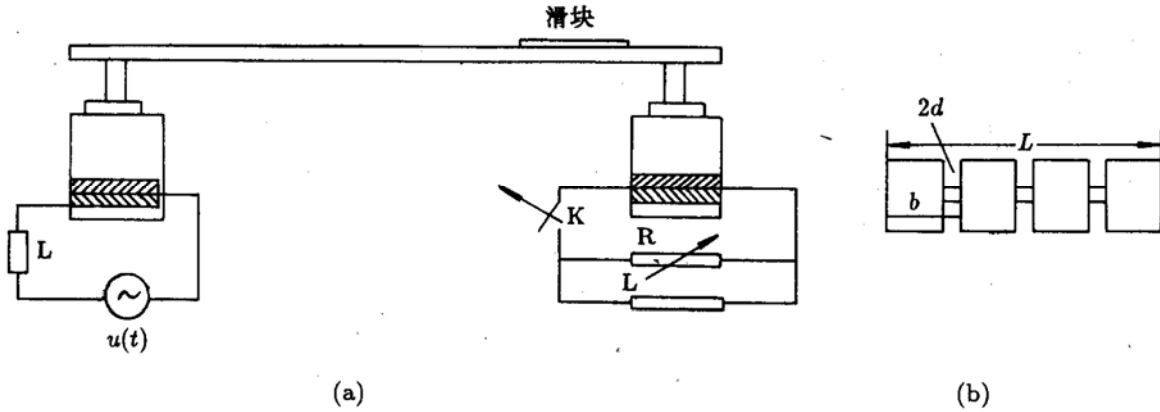


图 1 直线自校正式超声步进马达的结构

电机的时序如图 2 所示。 $u(t)$ 为一驱动信号, 信号的频率决定于梁的弯曲共振频率, 与梁的材料、长度和截面积等有关⁵。 $K(t)$ 是一个开关信号, 用来控制吸收回路的开关 K 。

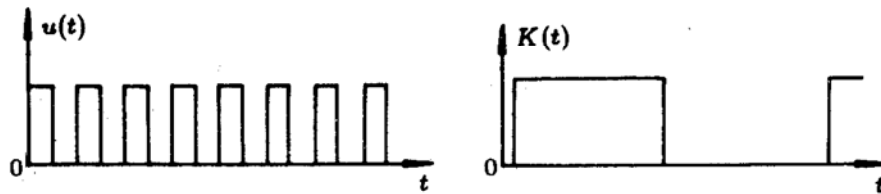


图 2 时序信号

当 K 闭合时, 吸收回路被接通, 在阻抗完全匹配时的理想状态下, 金属梁将产生纯行波。梁表面的粒子作椭圆运动, 利用摩擦力推动滑块沿与行波传播相反的方向运动, 系统构成一个直线行波马达⁴。

当 K 断开时, 吸收阻抗为无穷大, 弹性波几乎完全被反射, 与正向传播的弯曲波叠加形成驻波。当齿状滑块的重复长度等于该驻波的半波长时, 滑块受接触力的作用, 被固定在梁上的确定的位置, 滑块的开口槽中心线与驻波的波节线相重合, 并具有一定的抗干扰能力, 消除了积累误差。

2 弯曲振动梁上的摄动体的受力分析

取梁的纵向轴为 x 轴, 垂直纵向振动方向为 y 轴; 梁宽 a , 厚 h 。为计算方便, 设想整个梁被这样的滑块所覆盖。仅考虑其中的一段 $(0, L)$ 。设吸收回路开关 K 断开时梁的弯曲振动方程⁵

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}, \quad c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

这里, ρ 为梁的质量密度, A 为梁的横截面积, E 为杨氏模量, I 为截面矩, $y(x, t)$ 是梁轴线上质点垂直振动的挠度。则梁表面粒子纵向位移可近似表达为:

$$y(x, t) = \xi \sin \frac{r\pi x}{l} \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

其中, ξ 和 θ 由振动的初始条件决定, r 为正整数, 与梁的振动模式有关, 则梁表面粒子横向位移表示为⁵:

$$u(x, t) = -\frac{h}{2} \frac{\partial y}{\partial x} = -\frac{\xi h r \pi}{2l} \cos \frac{r\pi x}{l} \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

设在任一时刻相邻的两个弹性体单元中只有一个与梁表面接触, 又由于在梁表面的每个小矩形弹性体单元所处地位相同, 则分析时只须考虑其中之一。设滑块上某一单元位于谐振梁的 $[d, l/4 - d]$ 处, 振动体和滑块相接触时受预紧压力作用, 如图 3 所示。

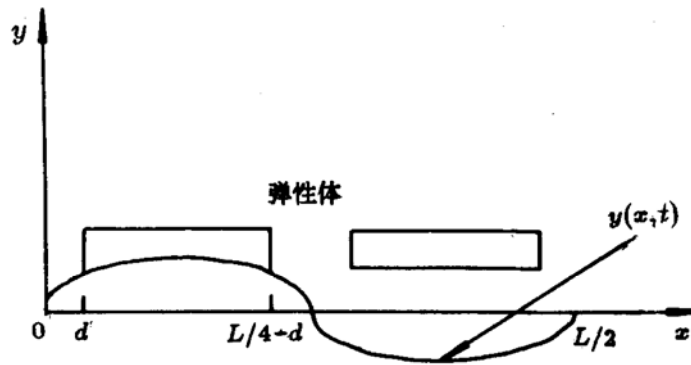


图 3 弹性体单元与驻波振动梁表面的接触

只考虑滑块的弹性变形, 当传递摩擦力的时候, 接触面上的粒子椭圆运动的水平分量速度分布并不均匀, 接触面上各点的正压力分布也不是常数, 同时接触力的大小还受到接触面的状态、材料、形状和润滑条件等因素的影响。根据参考文献 6 的报道得出行波马达的接触力传递模型:

$$f_m = \int_{\sigma} \varepsilon(v - v_m) N_c d\sigma \quad (4)$$

上式各项的意义如下: f_m 是滑块所受的驱动力, σ 为接触面面积, ε 是一个比例常数, 与材料的性质形状及其它条件有关, 一般由实验来确定, v_m 是滑块相对梁的运动速度。 v 为接触面的粒子切向运动速度的分布, 它的表达式为:

$$v(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \quad (5)$$

N_c 为单位面积微元上的正压力, 其表达式为:

$$N_c = -\lambda \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} + \rho h \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \quad (6)$$

这里, λ 为拉梅常数。将 (2)、(3) 式代入 (5)、(6) 式, 令 $r = 4$ 得到:

$$v(x, t) = -\frac{2\pi h \xi \omega}{l} \cos \frac{4\pi x}{l} \cos(\omega t + \theta) \quad (7)$$

$$N_c(x, t) = -\left(\lambda \frac{8\pi^2 h \xi}{l^2} + \omega^2 \xi \rho h \right) \sin \frac{4\pi x}{l} \sin(\omega t + \theta) \quad (8)$$

当转子偏离平衡位置 Δx 时, 假设此时滑块与梁之间没有相对运动, 由 (4) 式得到偏离平衡位置的弹性体单元所受的切向力:

$$f_m = \int_0^{\frac{l}{4}} \varepsilon v_x N dx - \int_{\Delta x - d}^{\Delta x + d} \varepsilon v_x N dx \quad (9)$$

上式中 $N = N_c \cdot a$, 第一项积分为 0, 因此只须计算第二项。将 (7)、(8) 式代入 (9) 式得:

$$f_m = - \left(\frac{\pi^2 h a \xi^2 \omega \lambda \varepsilon}{l^2} + \frac{1}{8} \rho h a \xi^2 \omega^3 \varepsilon \right) \sin \frac{8\pi d}{l} \sin \frac{8\pi \Delta x}{l} \sin 2(\omega t + \theta) \quad (10)$$

(10) 式表示了滑块从平衡位置沿 x 方向移动 Δx 时所受恢复力的函数表达式, 前面的负号表示力的方向沿 $-x$ 轴方向。可以看出, 当 $\Delta x = 0$ 或 $\Delta x = l/8$ 时, $f_m = 0$ 。当 $\Delta x \in (0, l/8)$ 时, f_m 不为 0 且指向 $-x$ 方向; 当 $\Delta x \in (l/8, l/4)$ 时, 可以看作是 Δx 左移 $\Delta x'$, 这里, $\Delta x' = l/4 - \Delta x$, 则利用 (10) 式可知, f_m 的方向指向 $+x$ 轴。这就证明了当开口槽对准波节线时, 处于稳定平衡状态, 当槽对着波腹线时则是处在不稳定平衡状态。这样就解决了超声步进电机自动校正问题, 从而消除了步进电机的积累误差。从 (10) 式还可看出, 第二项惯性力远大于第一项切向力, 而且在线性范围内, 当驻波振动频率越高, 梁的长度宽度比越小, 激振力及分布载荷的幅度越大, 指向平衡位置的恢复力就越大, 效果也就越明显。

3 实验验证

我们设计了一个直线式超声步进电机。电机采用两组共四个 Langevin 大功率换能器, 其中的一组作激振器, 另一组作吸收器, 并且分别垂直安装在一截面为矩形的不锈钢梁上。每个换能器都是相同的。梁的全长为 373.5 mm。通过调节两对换能器和钢梁之间的夹接点的位置和调节吸收回路的阻抗值, 用以降低吸收回路闭合时的梁上的驻波分量。吸收换能器夹接点位于距梁端点 30 mm 处, 激振换能器的夹接点位于距梁的另一端点 28.2 mm 处。梁的截面的宽度为 7.0 mm, 厚度为 4.0 mm。

为了验证自校正理论, 设计了如下实验: 采用 29.9 kHz 和 39.3 kHz 两个共振频率, 滑块共四个单元, 每个单元的长度等于相应频率所对应的半波长, 分别为 16.8 mm 和 14.5 mm。滑块单元间开槽的宽度取为 1 mm, 滑块的厚度为 2 mm。实验的测试装置如图 4 所示。力传感器通过一个探针与滑块接触, 探针与驻波梁平行, 调节传感器基座的螺钉可使探针沿水平方向移动。假如滑块开始处于平衡状态, 向左沿水平方向移动探针, 会使滑块偏离平衡位置, 同时传感器将指示此时向右的恢复力的大小。测量结果如图 5 和图 6 所示。

从实验结果可以得出恢复力随偏移量变化的规律 (见图 5) 为: 最初滑块处于稳定平衡点 (定为 0 点), 由 0 开始增加, 当偏移量大约为 $1/8$ 波长时, 恢复力最大, 在此之后开始下降, 当偏移量等于 $1/4$ 波长时恢复力为 0, 此点即是不稳定平衡点 (驻波波腹点), 从该点继续偏移, 滑块将跳向下一平衡位置。实验得出的滑块所受水平恢复力随偏移量的变化趋势与 (10) 式所得的结论定性符合。从实验结果还可以看出 (见图 6), 恢复力大小基本上随负载的增加而线性上升, 随电激励幅度的增加而线性上升, (10) 式也说明了这一点。但负载和电激励的增加量须在适当的范围内, 假如超过这一范围, 将导致非线性效应。

为了更加清楚地说明这些问题, 根据 (10) 式给出了恢复力随偏移量变化的理论曲线的一部分 (见图 7)。这两个曲线分别对应着 39.3 kHz 和 29.9 kHz 两个频率, 这里的时间因子项取最大值 1, 对应的恢复力相对幅度的最大值分别为 $9.6 \times 10^4 p \xi^2 \varepsilon$ (kgf) 和 $3.6 \times 10^4 p \xi^2 \varepsilon$ (kgf)。这里的 p 是单位面积梁所受的外加压力, ξ 和 ε 分别是振幅和摩擦系数。与前面所得的实验结果相比较, 可以看出力随偏移量的变化趋势、所对应的不稳定平衡点及稳定平衡点基本上是一致的。

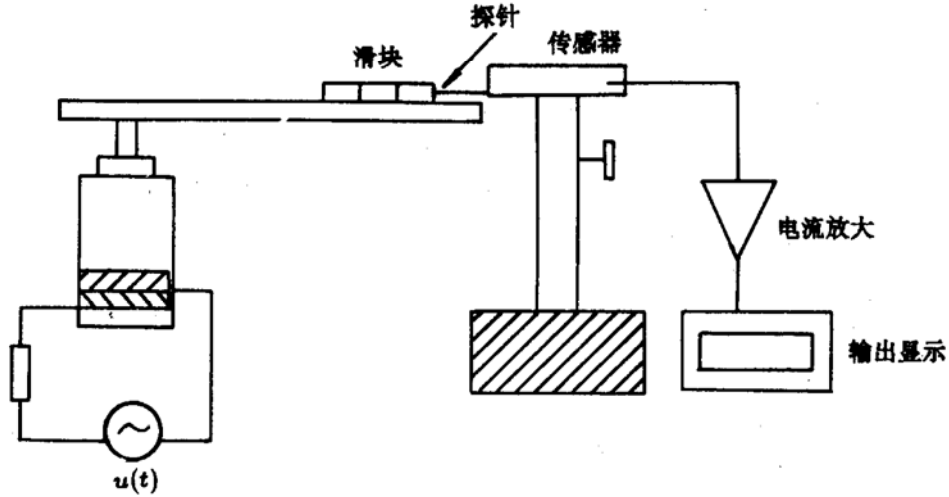


图 4 测量验证恢复力与偏移量之间关系的实验

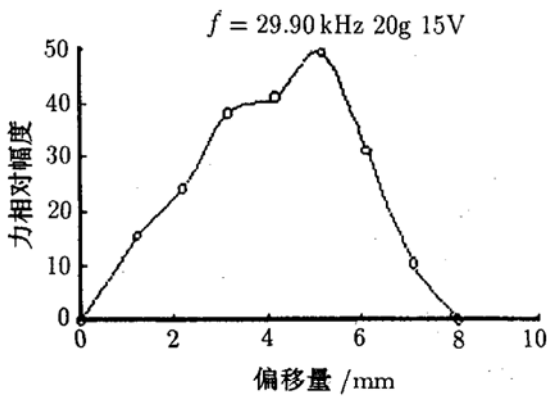


图 5 恢复力随偏移量变化的实验曲线

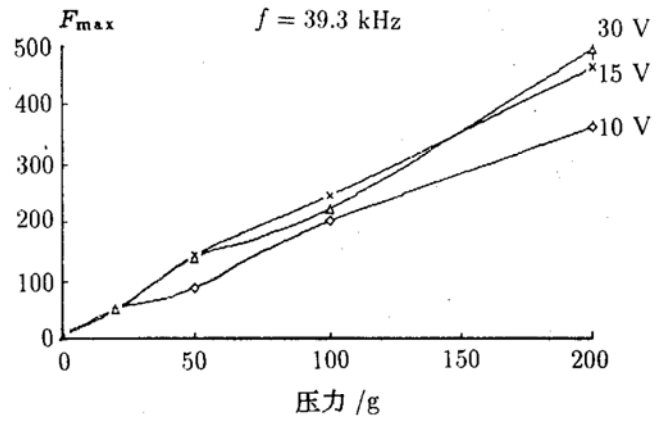


图 6 不同压力作用下最大恢复力 F_{max} 随电激励幅度的变化

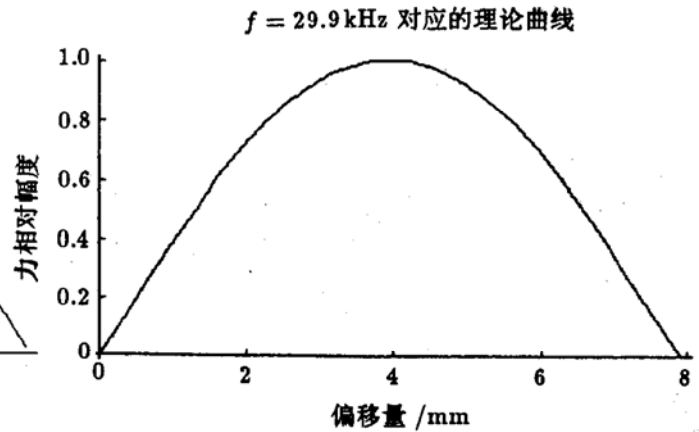
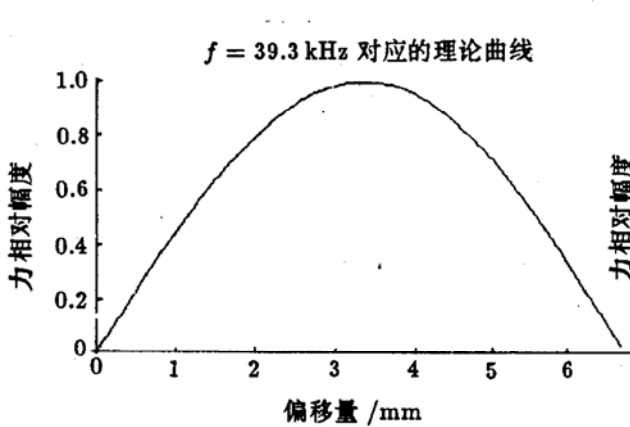


图 7 恢复力随偏移量变化的理论曲线

4 结论

通过前面的分析和实验, 关于这种直线自校正步进电机的原理及设计过程, 可以得出如下结论: 马达工作在两种不同的状态 —— 行进和自校正状态, 主要由一个开关信号来控制。信号

$u(t)$ 的幅度和频率及信号 $K(t)$ 的频率决定了电机的速度和精度; 滑块的单元重复长度决定于梁的弯曲波的波长, 滑块的最佳槽宽由 (10) 式得出为 $l/16$, 它使恢复力达到最大值; 在一定范围内, 对滑块所加的压力越大, 自校正的灵敏度越大, 但压力太大时将产生非线性效应。由于振动摩擦产生的非线性效应见另文。

参 考 文 献

- 1 Inchworm Systems, Catalog. Burleigh Instruments Inc., Burleigh Park Fishers. NY 14453
- 2 Chiharu Kusakabe *et al.* Driving and controlling of a watch device ultrasonic motor by two phase signals. *Japn. J. Appl. Phys.*, 1991, **30**: 206—208
- 3 Chiharu Kusakabe *et al.* An encoder-less ultrasonic stepping motor using open-loop control system. *Japan. J. Appl. Phys.*, 1992, **31**: 239—241
- 4 Minoru *et al.* Excitation condition of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985, **77**(4): 1431—1435
- 5 屈维德主编. 机械振动手册. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 6 陈永校, 郭吉丰编著. 超声波电动机. 杭州: 浙江大学出版社, 1994, 6
- 7 吴家龙编著. 弹性力学. 上海: 同济大学出版社, 1987