

复合材料超声直线电机的研究

张志彬 赵伯雷 曾周末 靳世久

(天津大学精仪学院 天津 300072)

摘要 提出了一种利用复合弹性材料 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)的新型超声直线电机。这种电机基于纤维单向排列时 CFRP 的正交各向异性特点,利用压电振子 PZT 激励 CFRP 产生倾斜振动,通过导轨表面的反作用力推动电机移动,结构简单,易于制造。

关键词 微致动 CFRP 各向异性 倾斜振动

1 引言

作为微机械系统的动力源,超声波微电机具有诸多优良性能,一直受到微机械研究领域的关注和重视。国内外对超声波电机的原理、材料、工艺等方面进行了深入研究,并研制出振动片型^[1]、行波型^[2]、复合振子型^[3]等各种形式的超声波微电机。本文以压电材料的逆压电效应为基础,利用 CFRP 的各向异性特点设计了一种新型的压电超声直线电机,其压电振子的激励电压为 $\pm 50\text{V}_{\text{p-p}}$,速度为 $0 \sim 8\text{mm/s}$,驱动力最大约 0.5N ,具有结构简单,易于制造的特点。

2 电机的结构与工作原理

电机的结构如图1所示。两块相同 CFRP 中间夹着压电晶片(PZT),CFRP 的碳纤维单向平行排列,纤维方向与底面成 α 角,对 PZT 片施加交流电压,使其沿厚度方向伸缩振动,从而引起 CFRP 块的振动。由于 CFRP 的各向异性,各点的振动方向将偏离垂直方向一个角度。例如图1中的顶点 A 将沿 β 方向振动,A 点与导轨接触时受到导轨表面的对 A 点向左上方的反作用力,使得振动体向左移动。

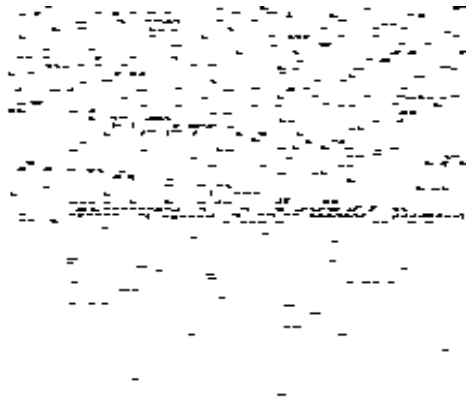


Fig. 1 The structure of the motor

3 振动体动力学方程

由于 CFRP 的振动不沿厚度方向变化, 因此可将其考虑为一个平面问题, 忽略压电晶片厚度的影响, 如图2所示。

纤维单向排列的 CFRP 具有三个互相垂直的弹性对称面, 为正交各向异性体, 其本构方程为^[4] :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{xx} & E_{xy} & E_{xs} \\ E_{xy} & E_{yy} & E_{ys} \\ E_{xs} & E_{ys} & E_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 σ_x 、 σ_y 为 x 、 y 方向的正应力, τ_{xy} 为切应力; ϵ_x 、 ϵ_y 为 x 、 y 方向的正应变, γ_{xy} 为切应变; 等效弹性系数矩阵中各分量由下式计算:

$$\left. \begin{aligned} E_{xx} &= K(l^4 E_L + (m^4 + 2l^2 m^2 \nu_L) E_M) + 4l^2 m^2 G_{LM} \\ E_{yy} &= K(m^4 E_L + (l^4 + 2l^2 m^2 \nu_L) E_M) + 4l^2 m^2 G_{LM} \\ E_{ss} &= K(l^2 m^2 E_L + (1 - 2\nu_L) l^2 m^2 E_M) + (l^2 - m^2)^2 G_{LM} \\ E_{xy} &= K(l^2 m^2 E_L + (l^2 m^2 + \nu_L l^4 + \nu_L m^4) E_M) - 4l^2 m^2 G_{LM} \\ E_{xs} &= Klm(l^2 E_L - ((1 - \nu_L) m^2 + \nu_L l^2) E_M) - 2lm(l^2 - m^2) G_{LM} \\ E_{ys} &= Klm(m^2 E_L - ((1 - \nu_L) l^2 + \nu_L m^2) E_M) + 2lm(l^2 - m^2) G_{LM} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中

$$K = \frac{1}{1 - \nu_L \nu_M};$$

l 、 m 为纤维排列方向的方向余弦;

E_L 、 E_M 分别为沿纤维方向和垂直于纤维方向的弹性模量;

G_{LM} 为剪切弹性模量;

ν_L 、 ν_M 为 L 、 M 方向的面内泊松比。

设 CFRP 块内任一点的振动位移分量为 u 、 v , 则几何方程为:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \epsilon_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

运动微分方程为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} &= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + q(x, y, t) &= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

按位移求解, 将(3)代入(1)后, 再代入(4)得:

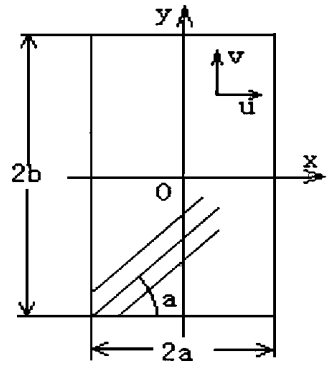


Fig. 2 The dynamic model of the motor

$$\left. \begin{aligned} & \left[E_{xx} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2E_{xs} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + E_{ss} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \cdot u \\ & + \left[E_{xs} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + (E_{xy} + E_{ss}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + E_{ys} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \cdot v = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ & \left[E_{xs} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + (E_{xy} + E_{ss}) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + E_{ys} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \cdot u \\ & + \left[E_{ss} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2E_{ys} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + E_{yy} \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \cdot v = \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - q(x, y, t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

方程(5)即为 CFRP 内任意一点振动应满足的动力学方程。

4 CFRP 块振动解析

满足方程(5)的边值问题很难得到精确解,用能量法求 CFRP 块振动的固有频率。由边界条件,将主振型函数设为:

$$\left. \begin{aligned} u_{11} &= U \sin \frac{\pi}{2a} x \sin \frac{\pi}{2b} y \\ v_{11} &= V \sin \frac{\pi}{2a} x \sin \frac{\pi}{2b} y \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

设 CFRP 块厚度为 c , 则其最大弹性势能为:

$$U_{\max} = \frac{c}{2} (\sigma_x \epsilon_x + \sigma_y \epsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dx dy = \frac{\pi^2 abc (Q_1 U^2 + 2Q_2 UV + Q_3 V^2)}{8} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{E_{xx}}{a^2} + \frac{E_{ss}}{b^2} \\ Q_2 &= \frac{E_{xs}}{a^2} + \frac{E_{ys}}{b^2} \\ Q_3 &= \frac{E_{ss}}{a^2} + \frac{E_{yy}}{b^2} \end{aligned}$$

最大动能为

$$K_{\max} = \frac{\rho abc \omega^2 (U^2 + V^2)}{2} \quad (8)$$

根据最小能量原理:^[5]

$$\frac{\partial (K_{\max} - U_{\max})}{\partial U} = \frac{\partial (K_{\max} - U_{\max})}{\partial V} = 0 \quad (9)$$

将(6)(7)(8)代入(9)得振子的两个固有频率:

$$\omega_{1,2} = \frac{\pi^2 [(Q_1 + Q_2) \pm \sqrt{(Q_1 - Q_3)^2 - 4Q_2^2}]}{8\rho} \quad (10)$$

对应的振动方向:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \tan^{-1} \frac{16\rho f_1^2 - Q_1}{Q_2} \\ \beta_2 &= \tan^{-1} \frac{16\rho f_2^2 - Q_1}{Q_2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

5 实验

基于以上分析我们研制了一台纤维角为45°的直线电机,其几何尺寸 $a = 30\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $c = 20\text{mm}$;固有频率 $f_1 = 38.8\text{kHz}$, $f_2 = 21.2\text{kHz}$;为了保证压电晶体较高的转换效率,并减小CFRP块发热引起的弹性系数变化所带来的影响,采用了具有频率跟踪能力的驱动源,驱动电压为50~100V,速度与驱动电压基本成正比,如图3所示:最大牵引力约为0.5N,牵引力与速度的关系如图4所示。另外加在电机上的正压力对电机的速度也有影响,从图5可以看出当正压力调整到一个适当值时,电机可获得最大的移动速度。

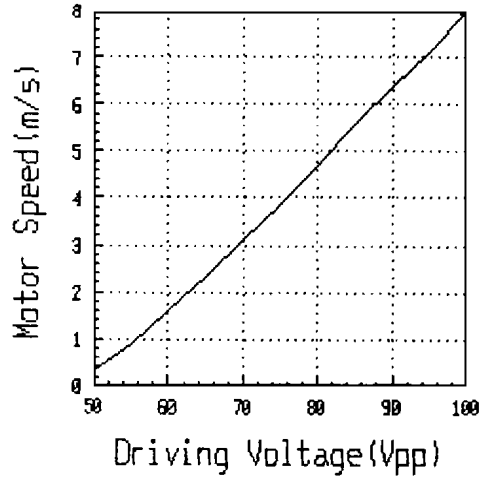


Fig. 3 The relation between driving voltage and motor speed

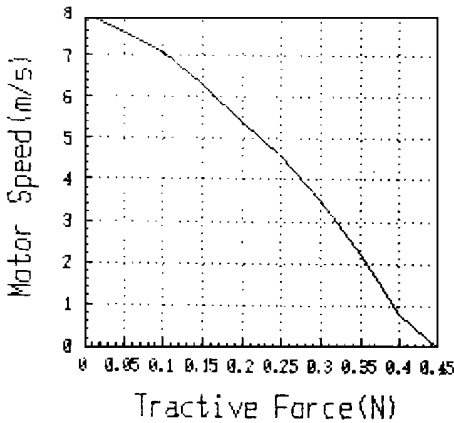


Fig. 4 The relation between tractive force and motor speed

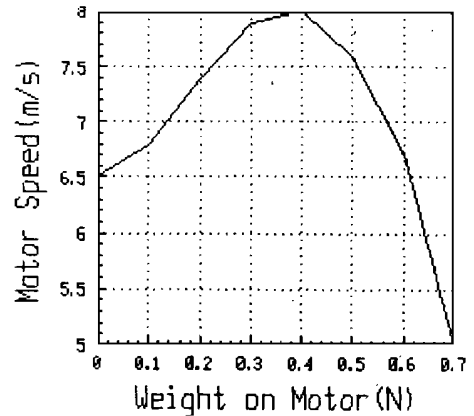


Fig. 5 The relation between weight on motor and motor speed

6 结束语

本文提出的利用复合弹性材料CFRP作振动体的超声直线电机具有结构简单,寿命长,工作稳定,无行程限制等特点,可望在微型机械、自动控制、精密测量等领域里作为一种新型的微致器而得到广泛应用。

参考文献

- 1 指田年生. 振动片型超声波电机. 应用机械工学(日), 1983, 24(5): 88~93
- 2 Hiroshi Hiroto, Sadayuki Ueha. Design of a traveling wave type ultrasonic motor. IEEE Transactions on

Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1995, 42(2): 225 ~ 231

- 3 毛卫宁, 钱进. 复合型超声马达的数值研究. 压电与声光, 1996, 18(1): 36 ~ 38
- 4 张志民等. 复合材料结构力学. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993
- 5 倪振华, 振动力学. 西安: 西安交通大学出版社, 1989

Ultrasonic Linear Motor Using Flexible Composites

ZHANG Zhi-Bin, ZHA O Bo-Lei, ZENG Zhou-Mo, JIN Shi-Jiu
(College of Precision Instrument and Opto-electronic Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract

A new type of ultrasonic linear motor is analyzed in this paper. The motor is mainly composed of flexible composites-CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) blocks and a thin plate of PZT ceramic. In the state of ultrasonic resonance, surface of the CFRP block vibrates obliquely and acts on the base. The vibrating motor moves by the reaction from the base. The driving voltage of piezoelectric vibrator is 50V (V_{pp}); the tractive force is 0.5N; the moving speed is 0 ~ 8mm/s. The motor has a simple structure and is easily made.

Key words: Micro actuating, CFRP, PZT, Anisotropy, Oblique vibration

张志彬 男, 1971年11月出生, 现于天津大学精密仪器及光电子工程学院精密仪器及机械专业攻读博士学位, 从事精密测量及微机械的研究. 曾在《计量学报》, 《微电机》及《物理》各发表论文一篇。