

行波式压电微电机的等效电路特性*

马建旭 王立鼎 崔天宏 吕琼莹
(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

摘要 本文通过对行波式压电微电机原理性的分析,并结合质点运动学基础理论,研究了压电微电机换能理论,建立了电机等效电路。该方法将为深入研究压电微电机的力矩、功率、以及效率提供有力的理论基础。

关键词: 等效电路; 行波式压电微电机; 微机械

1 引言

80年代末期,微电子机械系统(MEMS)作为一门新兴学科得到了科学家们的重视并有迅猛的发展趋势,它将广泛地应用于生物医学、农业、工业、航天、航海和家庭服务等领域中,微电机做为微机械的动力源无疑是研究的焦点。而压电微电机更以其独有的高换能、储能密度、抗磁干扰能力强、响应性能好等优点,将得到广泛的应用。

本文的目的是通过对行波式压电微电机的原理分析,以牛顿运动学为基础,研究压电微电机换能理论,最终建立电机等效电路。该等效电路将用于电机的深入研究中。

2 行波式压电微电机的结构原理和能量转换

根据压电逆效应,当在压电陶瓷两端施加交流电压时,将有驻波产生。如果将两个压电陶瓷压紧在一起,粘接在弹性体上,并且使两个压电陶瓷电极处相互位移 $\frac{1}{4}\lambda$,在每个压电陶瓷上施加时间上成 90° 相位差的交流电压(如图1),则A、B两压电陶瓷产生的驻波合成为行波:

$$\begin{aligned} y &= y_A + y_B = \zeta_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \omega_0 t + \zeta_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} x \cos \omega_0 t \\ &= \zeta_0 \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \omega_0 t \right) \end{aligned} \quad (1)$$

根据适当的运算^[1],可知弹性体表面的质点做椭圆运动。当移动体(转子)压置于振动弹性体表面上时,会受到弹性体表面的质点运动产生的摩擦力作用,移动体将沿着与行波行进相反的方向运动。这就是行波式压电微电机的工作原理。根据其工作原理,电机主要由交流电源、定子、转子三部分组成。其中,定子包括压电陶瓷片和弹性体。

* 国家自然科学基金资金、攀登计划资助项目。

收稿日期:1995年7月17日

压电微电机的能量转换过程可根据其结构原理分成两部分。第一部分,电源供给压电陶瓷的输入电能,通过压电陶瓷和弹性体构成定子振动(即转化成机械振动能、变形能)。第二部分,将定子振动通过摩擦材料带动转子转动,最终由转子输出机械驱动能。因而输入的电能可认为转化成输出机械能、储存在电机中未释放的机械能、电机能量损耗三部分。

3 行波式压电微电机的等效电路

行波式压电微电机的等效电路可分成定子和转子两部分,下面我们逐一分析。

3.1 定子的等效电路

如图1,定子是利用压电陶瓷的逆压电效应,将电能转换成机械振动能装置。在这一节中,我们重点分析定子的电-机转换的理论和等效电路。

3.1.1 定子的电-机转换理论

根据质点运动学中具有 n 个自由度的牛顿运动方程,可得其广义坐标式:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial w}{\partial q'_x} \right) - \frac{\partial w}{\partial q_x} = F_x \quad (2)$$

$(x=1, 2, 3, \dots, n)$

式中, w ——质点系统储藏的动能;

q_x ——一般坐标系中第 x 个坐标;

q'_x ——广义速度;

F_x —— q_x 方向的广义力。

实际上,作用在质点上的力,除了外力 F_x ,还要考虑质点相互间的约束力(位能作用力 $-F_x^{(u)}$)和质点运动中克服摩擦而损耗的力(耗散力 $F_x^{(j)}$),因而式2可转变为

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial w}{\partial q'_x} \right) - \frac{\partial W}{\partial q_x} + F_x^{(j)} - F_x^{(u)} = F_x \quad (3)$$

式中, $F_x^{(u)} = -\frac{\partial U}{\partial q_x}$

$$F_x^{(j)} = \frac{\partial J}{\partial q'_x}$$

U ——系统储藏的位能;

J ——耗散能。

可得

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial w}{\partial q'_x} \right) - \frac{\partial W}{\partial q_x} + \frac{\partial J}{\partial q'_x} + \frac{\partial U}{\partial q_x} = F_x \quad (4)$$

式(4)即为拉格朗日方程式。

对于电压引起压电体的振动属微小振动,因而在直角坐标系中

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij} q'_i q'_j$$

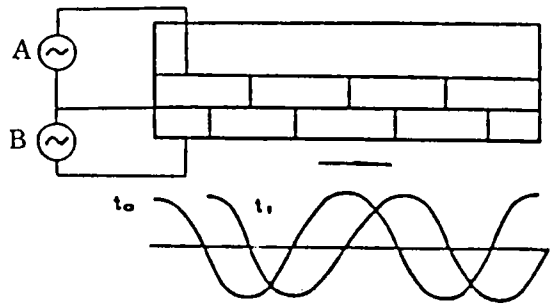


图1 行波形成机理

Fig. 1 The transmission mechanism that creates the travelling wave

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} q'_i q'_j$$

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij} q_{ij}$$
(5)

式中, $m_{ij} = \sum_{k=1}^n m_k \left(\frac{\partial x_k \partial x_k}{\partial q_i \partial q_j} + \frac{\partial y_k \partial y_k}{\partial q_i \partial q_j} + \frac{\partial z_k \partial z_k}{\partial q_i \partial q_j} \right)$

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^n r_k \left(\frac{\partial^2 x_k}{\partial q_i \partial q_j} + \frac{\partial^2 y_k}{\partial q_i \partial q_j} + \frac{\partial^2 z_k}{\partial q_i \partial q_j} \right)$$

$$s_{ij} = \partial^2 U / \partial q_i \partial q_j$$

m_{ij} ——惯性系数;

r_{ij} ——损耗系数;

s_{ij} ——弹性刚度。

将式(5)代入式(4)得

$$\sum_{j=1}^n (m_{ij} q''_j + r_{ij} q'_j + s_{ij} q_j) = F_i$$

由于定子作简谐振动,故

$$\sum_{j=1}^n (j\omega m_{ij} + r_{ij} + \frac{s_{ij}}{j\omega}) q'_j = F_i$$
(6)

令

$$Z_{ij} = j\omega m_{ij} + r_{ij} + s_{ij} / j\omega$$
(7)

则

$$\sum_{j=1}^n Z_{ij} q'_j = F_i$$
(8)

式中, Z_{ij} 机械阻抗。

根据克西霍夫定律得

$$\sum_{j=1}^n Z_{ij} I_j = \epsilon_i$$
(9)

式中,

$$Z_{ij} = j\omega L_{ij} + R_{ij} + \frac{1}{j\omega C_{ij}}$$
(10)

式(10)表示阻抗 Z_{ij} 由电感 L_{ij} 、电阻 R_{ij} 、电容 C_{ij} 串联组成。 ϵ_i 表示第 i 个回路中所包含的电动势。

式(8)和式(9)极为相似。如果以电能 $W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n L_{ij} I_i I_j$ 、静电能 $U_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij} Q_i Q_j$ 、

焦耳热 $J_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n R_{ij} I_i I_j$ 替代机械系统的动能 W 、储藏的位能 U 、耗散能 J , 则式(4)可认为是电系统的拉格朗日方程。因而式(4)就是压电电机换能理论的基本方程式。

利用集中参数法表示式(8)所描述的机械系统(如图2a), 与其相类似的等效串联谐振电路为图2b。

3.1.2 定子的等效电路

如图1所示, 应用于定子电端的 A 相和 B 相电压中是存在着 90° 的相位差, 且两压电陶瓷电极处相互位移为 $\frac{1}{4}\lambda$, 其余部位产生的作用将完全相同。我们先独立分析定子 A 相电压的等效电路。

将一般压电振子电系统、机械系统能量分别代入式(4), 可得压电电机换能常用的基本方

程式^[2]:

$$\left. \begin{aligned} I &= YV + Av \\ F &= zv - AV \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中, V, I, Z, Y 分别为电机换能中电端的电压、电流、阻抗、导纳; F, v, z 分别为换能振子机械端的驱动力、位移、机械阻抗; A 为从电端到机械端转换率, 称为电机换能力的系数。考虑电源内部导纳 \dot{Y}_0 和振源 F 的内阻 z_0 时, 式(11)将变为

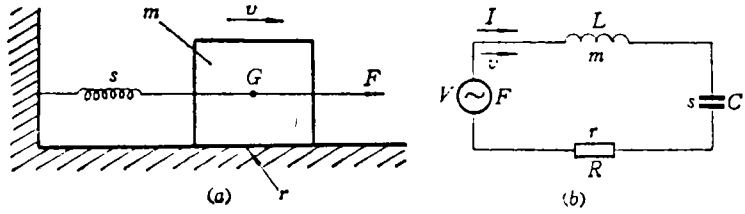


图2 定子机械谐振系统和等效电路

(a)机械系统 (b)等效电路

Fig. 2 The mechanical resonance system and the equivalent circuit of the stator

(a)The equivalent circuit of the stator in voltage A (b)The equivalent circuit of the stator

$$\left. \begin{aligned} \dot{I} &= (\dot{Y}_0 + \dot{Y}_1) \dot{V} + A \dot{v} \\ \dot{F} &= -AV + (z_0 + z_1) \dot{v} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

对于行波式压电微电机, 其 A 相电压将主要引起定子纵向振动(如图3), 产生驻波。当孤立研究定子时, 只有电驱动($\dot{F}=0$), 其电端呈现的导纳为自由导纳 \dot{Y}_f

$$\dot{Y}_f = \dot{I} / \dot{V} = \dot{Y}_0 + \dot{Y}_1 + A^2 / (z_0 + z_1) \quad (13)$$

式中, Y_1 —一定子中压电陶瓷介电损耗导纳。

根据资料3可得

$$Y_1 = 1 / [1 / (j\omega C_0) + R_0]$$

式中, C_0 —压电陶瓷片静态电容;

R_0 —介电损耗的并联电阻。

对于定子系统, 我们可设 $\dot{Y}_0=0, z_0=0, z_1$ 由等效电阻 r 、等效质量 m 和等效弹性刚度 s 组成; 即

$$z = r + j(\omega m - s/\omega) \quad (15)$$

令 $R_1 = r/A^2, L_1 = m/A^2, C_1 = A^2/s$

则定子自由导纳 \dot{Y}_f 为

$$\dot{Y}_f = \dot{Y}_1 + A^2 / z = \frac{1}{1 / (j\omega C_0) + R_0} + \frac{1}{R + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})} \quad (16)$$

因而可得定子中 A 相电压的等效电路(如图4a)。综合考虑定子的 A 相、 B 相电压可得到整个定子的等效电路(图4b)。

3.2 转子的等效电路

仍以加在定子上 A 相电压产生的等效电路为例, 研究将等效电路进一步延伸后的电机电路。根据压电微电机原理, 将转子置于定子上, 定子的机械振动将通过定子与转子之间的摩擦力带动转子。如图5a 为转子依靠与定子之间摩擦力产生转动的简单机械受力图, 根据前面的

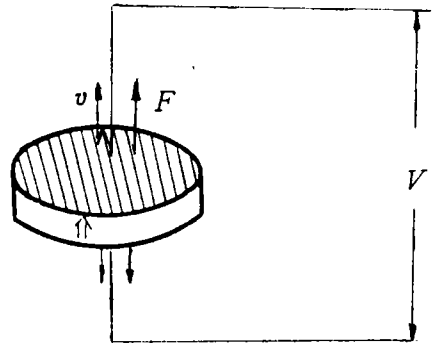


图3 纵向振动的定子压电振子

Fig. 3 The piezoelectric vibrator of the stator that vibrates longitudinally

电路转化理论,其对应的等效电路为图5b.图6中, L_3 相应于转子质量, R_3 表示转子转动时与轴和其他部位的摩擦损失。

行波式压电微电机中定子与转子的接触可认为是弹性接触,因而在电路中相应用 C_2 表示两者之间的弹性系数。并且在由定子到转子的机械传递过程中,存在着两者之间因摩擦而损失的机械能量,因而应加入与 C_2 并列的电阻 R_2 表示。最终由转子输出的能量将用于拖动负载,我们利用可变电阻 R 表示这部分能量的流向。综上所述,我们得到了整个行波式压电微电机的等效电路图(图6)。

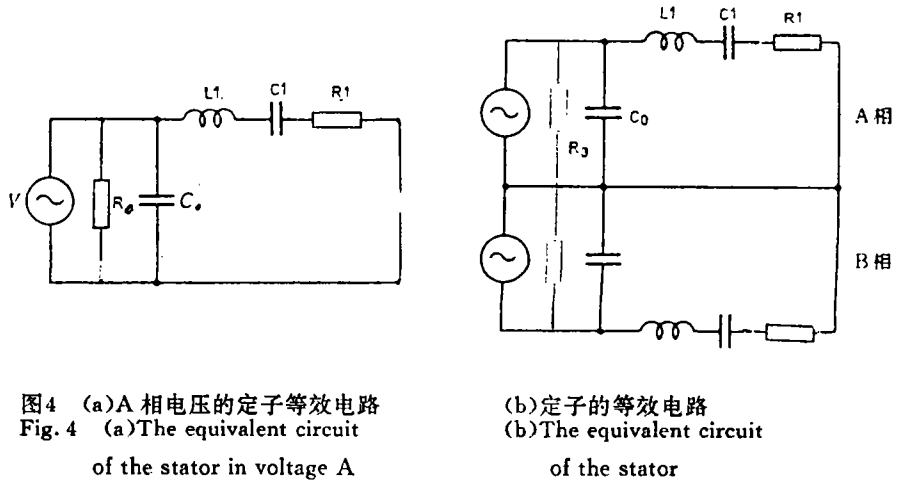


图4 (a)A相电压的定子等效电路
Fig. 4 (a)The equivalent circuit of the stator in voltage A

(b)定子的等效电路
(b)The equivalent circuit of the stator

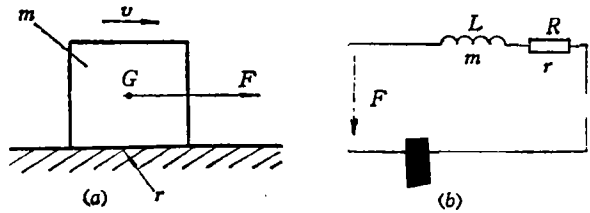


图5 转子的机械系统和等效电路
Fig. 5 The mechanical system and the equivalent circuit of the rotor

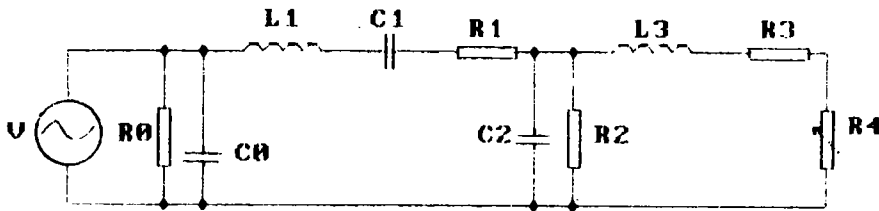


图6 行波式压电微电机的等效电路
Fig. 6 The equivalent circuit of the micro travelling wave piezoelectric motor

4 结 论

本文在对行波式压电微电机结构原理分析的同时,结合牛顿力学中质点运动的基础理论,深入分析了该电机的压电换能理论和能量转换过程,利用电子学理论建立了该电机等效电路。该电路将有效地应用于压电微电机的力矩、功率以及效率的深入研究,并提供给设计者优化的电机工作参数。

参 考 文 献

- [1] 崔天宏等, 超声微电机传动机理的研究. 机械工程学报, 1995, 31(2): 71-76
- [2] O. Zharii, Normal mode expansions in dynamic electroelasticity and their applications to electromechanical energy conversion. J. Acoust. Soc. Amer. 1990, 92(1): 65-68
- [3] J. Van Randerat et al., Piezoelectric Ceramics. Mullard Limited, 1974

Equivalent Circuit's Characteristics of a Micro Traveling Wave Piezoelectric Motor

Ma Jianxu, Wang Liding, Cui Tianhong and Lu Qiongying
(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper analyses the principle of a micro traveling wave piezoelectric motor, studies the principle from electrical energy to mechanical energy in PZT depending on the particles kinematics, and establishes the equivalent circuit of this motor. The method will supply the basic principle for the research of the torque, power and efficiency of this motor.

Key words: Equivalent circuit, Micro traveling wave piezoelectric motor, Micro electro mechanical system (MEMS)

马建旭 男, 1970年出生, 中国科学院长春光学精密机械研究所机械制造专业博士研究生。1994年3月毕业于吉林工业大学机械工程系, 获硕士学位。曾从事汽车淬硬齿轮高效加工方法的研究, 现主要从事微电子机械系统方向的研究。已在 IEEE、仪器仪表学报、汽车工程等国内外著名会议及刊物发表论文十多篇。1985年获中国科学院院长奖学金。