

# 条形弯曲振动压电变压器电路模型及特性研究

陈 超, 黄以华

(1. 中国科学技术大学信息处理中心, 安徽合肥 230027; 2. 广州中山大学电子与通信工程系, 广东广州 510275)

**摘 要:** 本文所研究的压电变压器工作在弯曲振动模式下. 较之现有的压电变压器而言, 这种器件能够以较小的几何尺寸实现低频率的振动, 文中应用能量法对该压电变压器进行了理论分析和推导, 并得出其等效电路模型. 文中还进行了样品制作和测试工作, 测试结果与理论结果基本一致.

**关键词:** 压电变压器; 弯曲振动; 等效电路

**中图分类号:** TN384 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 08-1190-03

## A Research on Equivalent Circuit Model and Characters of the Strip Bend Vibration Mode Piezoelectric Transformer

CHEN-Chao<sup>1</sup>, HUANG Yi hua<sup>2</sup>

(1. Information processing center, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China;

2. Department of Electronic and Information Engineering, Zhongshan University Guangzhou, Guangdong 510275, China)

**Abstract:** A kind of piezoelectric transformer works in the bend vibration mode is discussed. Compared with other kind of piezoelectric transformers, this transformer can realize low frequency with small geometry size. Theoretical analysis and deduction are given through energy method, and the equivalent circuit model is found. Furthermore, the component is fabricated and tested, and the testing result is agreed with the calculated result.

**Key words:** piezoelectric transformer; bend vibration; equivalent circuit

### 1 引言

压电变压器是一种新型的固态陶瓷变压器, 有许多独特的优点, 可被应用于多种场合<sup>[1-4]</sup>. 目前, 国际上对高频压电变压器的研发工作开展的非常广泛, 已开发出 5MHz 工作频率的样品, 而对低频压电变压器的研究尚未引起足够的重视. 事实上, 低频压电变压器同样具有广泛的用途, 例如用于电光源及信号源中等等, 目前 GE 及 TI 等公司已开展了这方面的研究<sup>[5]</sup>. 但是, 压电变压器工作频率的降低往往会导致其几何尺寸的增加, 如何解决这一问题本文研究的重点.

### 2 条形弯曲振动压电变压器

通过对各种振动模式的分析与对比, 本文选择了纵弯振动模式来设计压电变压器. 纵弯振动是压电体的一大类振动, 其特点是在同样的固有频率值时, 振子的纵向尺寸比纵向振动模式的尺寸小的多. 本文利用这一模式制作了条形弯曲振动压电变压器, 其结构为: 输入部分为长条伸缩振动的两个压电振子, 用导电胶粘合起来, 使两片的极化强度 P 的方向和激励电场 E 的方向相反, 如图 1 所示. 这样在外加电场 E 的作用下, 当一片产生伸长形变时, 另一片则产生缩短形变, 因为两

片是紧密粘合的, 所以叠片就作纵向弯曲振动. 波的传播方向则与振子的长度方向平行, 是一种纵波. 输出部分也是由两片压电片构成的, 各自与输入部分相连, 如图 2 所示. 这样, 当输入部分在电压的激励下振动时, 输出部分也随之产生振动.

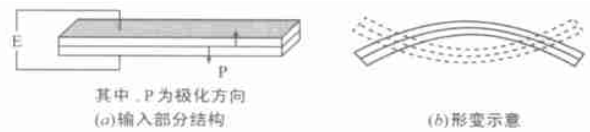


图 1 输入部分

下面我们就来推导这种变压器的电路模型, 先看输入部分.



图 2 变压器的结构

取变压器的纵向轴线为 x 轴, 并取轴线中点为零点, 当其一端固定时, 其位移的分布由式(1)给出, 式中省略了时间因子  $e^{j\omega t}$ .

$$= \left[ \sin\left(\frac{m\omega l}{2}\right) \cosh mx + \cosh\left(\frac{m\omega l}{2}\right) \sin x \right] \quad (1)$$

式中,  $m = \omega / a$ ,  $\omega$  为角频率,  $a$  是由振子本身的常数所决定,  $l$  为振子的长度.

位移对时间的导数为

$$\dot{v} = \left[ \sin\left(\frac{ml}{2}\right) \cosh mx + \cosh\left(\frac{ml}{2}\right) \sin x \right] \quad (2)$$

则参考速度为

$$v = \frac{1}{A} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \dot{v} dx = \frac{2}{ml} \sin\left(\frac{ml}{2}\right) \sinh\left(\frac{ml}{2}\right) \quad (3)$$

所以  $v^2 = \frac{2[\cosh ml - 1 - \cos ml \cosh ml + \cos ml]}{m^2 l^2} \quad (4)$

输入部分微元体上的动能为

$$M = 2 U_d / v^2 = \frac{whl^2 \{ m^2 l [2 + \cosh ml - \cos ml] + m(\sinh ml - \sin ml - \sin ml \cosh ml - \cos ml \sinh ml) \}}{\cosh ml + \cos ml - \cos ml \cosh ml - 1} \quad (7)$$

若忽略变压器输入部分横向的应力和应变,则对输入部分可列出压电方程

$$T_1 = \frac{Y^D}{1 - (D)^2} S_1 - \frac{g_{31} Y^D}{1 - D} D_3 \quad (8)$$

$$E_3 = \frac{T_3}{s_{33}} D_3 - g_{31} T_1 \quad (9)$$

其中,  $Y^D$  为杨氏模量;  $D$  为泊松比;  $T_{33}$  为反介电常数;  $g_{31}$  为压电常数. 则压电片单位体积中的位能为

$$U_p = \frac{1}{2} S_1 T_1 = \frac{Y^D z^2}{2[1 - (D)^2]} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) + \frac{g_{31} Y^D z}{2(1 - D)} \left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) D^3 \quad (10)$$

将式(8)代入式(9)可得

$$E_3 = \frac{s_{33} D_3}{1 - (D)^2} + \frac{g_{31} Y^D z}{(1 - D)^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (11)$$

其中

$$\frac{s_{33}}{1 - (D)^2} = \frac{T_{33}}{s_{33}} + \frac{g_{31} Y^D}{1 - D} \quad (12)$$

式(11)对厚度积分可得

$$V = \int_0^h E_3 dz = \frac{1}{2} \frac{s_{33} D_3 h}{1 - (D)^2} + \frac{g_{31} Y^D h^2}{8[1 - (D)^2]} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (13)$$

令  $V = 0$ , 则由上式可得

$$D_3 = \frac{g_{31} Y^D h}{4[1 - (D)^2]} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (14)$$

代入式(10)可得

$$U_p = \frac{1}{m^4} \left[ \frac{Y^D z^2}{2[1 - (D)^2]} + \frac{g_{31}^2 (Y^D)^2 h z}{8(1 - D)[1 - (D)^2]} \frac{s_{33}}{s_{33}} \right] \left[ \sin^2 \frac{ml}{2} \cosh^2 mx + \cosh^2 \frac{ml}{2} \sin^2 mx - 2 \sin \frac{ml}{2} \cosh \frac{ml}{2} \sin mx \cosh mx \right] \quad (15)$$

则恒压状态下输入部份的位能为

$$U^V = 2 \int_0^{V/2} U_p dV = \frac{2w}{m^4} \left[ \sin^2 \frac{ml}{2} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2m} \sinh ml \right) + \cos^2 \frac{ml}{2} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2m} \sin ml \right) \right] \times \left[ \frac{Y^D h^3}{48[1 - (D)^2]} + \frac{g_{31}^2 (Y^D)^2 h^3}{64(1 - D)[1 - (D)^2]} \frac{s_{33}}{s_{33}} \right] \quad (16)$$

而  $U^V = \frac{1}{2} K |\max|^2 \quad (17)$

式中  $K$  为等效刚度, 所以

$$K = \frac{4w}{m^4 (1 + \cosh ml - \cos ml + \cos ml \cosh ml)}$$

$$du = \frac{1}{2} wh dx (\dot{v})^2 \quad (5)$$

式中,  $w$  为振子的宽度,  $h$  为振子的厚度

则整个输入部分的动能为

$$U_d = \frac{1}{2} wh \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} (\dot{v})^2 dx = \frac{wh}{8} \left\{ l[2 + \cosh ml - \cos ml] + \frac{[\sinh ml - \sin ml - \sin ml \cosh ml - \cos ml \sinh ml]}{m} \right\} \quad (6)$$

由动能公式可算出系统的等效质量  $M$  为

$$\times \left[ \sin^2 \frac{ml}{2} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2m} \sinh ml \right) + \cos^2 \frac{ml}{2} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2m} \sin ml \right) \right] \times \left[ \frac{Y^D h^3}{48[1 - (D)^2]} + \frac{g_{31}^2 (Y^D)^2 h^3}{64(1 - D)[1 - (D)^2]} \frac{s_{33}}{s_{33}} \right] \quad (18)$$

根据电容的定义,可以直接得出输入部分的静电容为

$$C_{in} = \frac{4lw \frac{T_{33}(1 - k_p^2)}{h}}{h} \quad (19)$$

其中,  $k$  为平面机电耦合系数.

根据机电耦合系数的基本定义,压电振子的有效机电耦合系数为

$$k_{eff}^2 = \frac{\text{振子所贮存的机械能}}{\text{电源提供的能量}} \quad (20)$$

本文所研究的系统工作在低频,所以,振子中所贮存的机械能主要由弹性能所确定,而

$$\text{弹性能} = \frac{1}{2} C \phi^2 V^2 \quad (21)$$

式中,  $\phi$  为机电转换系数,  $\phi = F/V$ ,  $F$  为作用于系统上的等效力. 而电源提供的能量为静电容所贮存的电能与压电振子中所贮存的机械能之和,所以

$$k_{eff}^2 = \frac{\frac{1}{2} C \phi^2 V^2}{\frac{1}{2} (C_{in} + \phi^2 C) V^2} \quad (22)$$

则

$$\phi^2 = \frac{C_{in} k_{eff}^2}{C(1 - k_{eff}^2)} \quad (23)$$

而

$$k_{eff}^2 = 8 k_p^2 / (2 - 8 k_p^2), C = 1/K \quad (24)$$

所以

$$\phi^2 = KC_{in} \frac{8 k_p^2}{2 - 8 k_p^2} \quad (25)$$

到此,本文运用能量法推出了矩形弯曲振动压电变压器输入部分等效电路模型的几个重要参数,即输入端的静电容  $C_{in}$ , 动态等效电容  $C$ , 动态等效电感  $L (= 1/M)$  和机电转换系数  $\phi$ .

依据相同的过程,输出部分等效电路模型的参数为

静电容  $C_{out} = \frac{4lw \frac{T_{33}(1 - k_p^2)}{h}}{h} \quad (26)$

机电转换系数  $\phi^2 = K C_{out} \frac{8 k_p^2}{2 - 8 k_p^2} \quad (27)$

等效刚度  $(= 1/C)$  为

$$K = \frac{4w}{m^4 (1 + \cosh ml - \cos ml + \cos ml \cosh ml)} \times \left[ \sin^2 \frac{ml}{2} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2m} \sinh ml \right) + \cosh^2 \frac{ml}{2} \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2m} \sin ml \right) \right] \times \left[ \frac{Y^D h^3}{48[1 - (D)^2] J} + \frac{g_{31}^2 (Y^D)^2 h^3}{64(1 - (D)^2) [1 - (D)^2] J_{33}} \right] \quad (28)$$

$$M = \frac{wh^2 \{ m^2 [1/2 + \cosh ml - \cos ml] + m(\sinh ml - \sin ml - \sin ml \cosh ml - \cos ml \sinh ml) \}}{\cosh ml + \cos ml - \cos ml \cosh ml - 1} \quad (29)$$

根据上述推导结果和适当的边界条件,可得出理想状态下(没有能量损耗)压电变压器完整的电路模型,如图3所示。

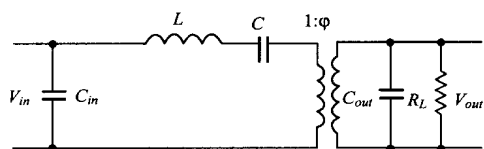


图3 弯曲振动压电变压器等效电路

但是实际的系统都是有能量损耗的,所以,电路模型中应当串联等效电阻  $R$ ,但此处很难给出  $R$  的精确表达式,本文只能给出其近似的表达式为:

$$R = \omega(M/Q_m + M/Q_m) \quad (30)$$

根据上述等效电路模型(考虑  $R$ ),该器件的电压传输特性、功率特性等电特性便很容易得出。

### 3 实验及讨论

实验中我们分别用不同型号的 PZT 材料来分别构成压电变压器的输入部分和输出部分,并进行了测试,结果如图4、5

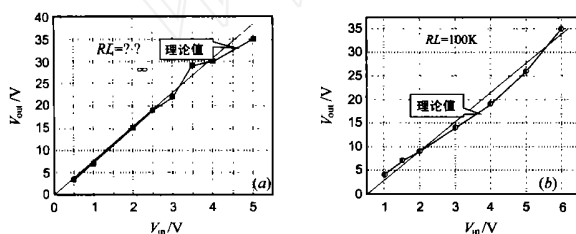


图4 样品的升压特性

所示,同时,根据材料及几何参数,依据本文的理论公式,绘制出理论曲线。

由图4不难看出,该压电变压器的输出电压与输入电压基本成线性,各测试点与理论计算值很接近,并且由4(a)与(b)的对比可看出,在相同的输入电压的情况下,变压器的负载越轻,则输出电压也越高。图5中的理论值与实验值大体是一致的,其中心频率为96kHz左右,并且负载越轻,其中心频率也越高。另外我们注意到,如果采用其它的结构及振动模式来得到相同的中心频率,则器件的尺寸至少在10cm左右,而我们所作的器件长不超过3cm,几何尺寸被大大减小。

### 4 结论

本文利用纵弯振动模式,在理论分析的基础上,设计和制作的条形弯曲振动压电变压器可以有效地解决低频压电变压器几何尺寸过大的问题,为低频小尺寸压电变压器的开发做出了有益的尝试。文中对该器件的升压及频率特性进行了理论计算和实验测试,理论值与实验值基本相符。对于该器件的其他特性还需进一步的研究。

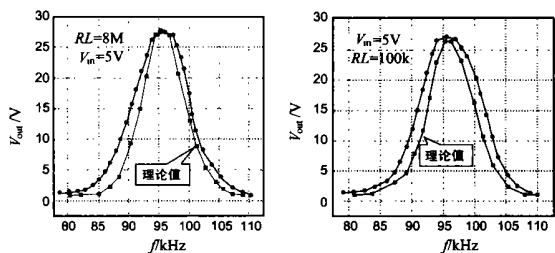


图5 样品的升压比——频率特性

### 参考文献:

- [1] Ivensky, G, Bronstein, S, Berr Yaakov, S. Analysis and design of a piezoelectric transformer AC/DC converter in a low voltage application [A]. Power Electronics Specialists Conference [C]. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, 2002, 2. 409 - 414.
- [2] Dallago, E, Danioni, A, Passoni, M, Venchi, G. Modelling of DC-DC converter based on a piezoelectric transformer and its control loop [A]. Power Electronics Specialists Conference [C]. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, 2002, 2. 927 - 931.
- [3] Eric M Baker, Weixing Huang, Dan Y Chm, Fred C. Lee. Radial mode piezoelectric transformer design for fluorescent lamp ballast applications [A]. Power Electronics Specialists Conference [C]. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, 2002, 3. 1289 - 1294.
- [4] Bronstein, S, Berr Yaakov, S. Design considerations for achieving ZVS in a half bridge inverter that drives a piezoelectric transformer with no series inductor [A]. Power Electronics Specialists Conference [C]. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, 2002, 2. 585 - 590.
- [5] Sur Ho Lee, Jae-Il Hong, Ju-Hyun Yoo, Geon Sar Gong. Characteristics of piezoelectric transformer for power supply [A]. Ultrasonics Symposium, 1998. Proceedings, 1998 IEEE, 1998, 1. 971 - 975.

### 作者简介:



陈超男, 1980年6月生于湖北省武汉市, 1994考入中国科学技术大学少年班学习, 毕业后留校并在职读研, 现为中国科学技术大学图书馆系统部主任, 并担任中国科大信息处理中心兼职教员, 主要从事网络多媒体技术及相关电子器件的研究工作。

黄以华 男, 1973年出生于福建省福清市, 博士, 2002年毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 并获博士学位, 现为广州中山大学电子系讲师, 主要从事信息科学及电子元器件的研究工作。