

# 圆盘形弯曲振动压电变压器等效电路及特性研究

黄以华<sup>1</sup>, 施 俊<sup>2</sup>, 周康源<sup>2</sup>

(1. 中山大学电子与通信工程系, 广东广州 510275; 2. 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 安徽合肥 230027)

**摘 要:** 本文将圆盘弯曲压电振子的分析方法通过适当的处理进而应用到圆盘形弯曲振动压电变压器的理论推导过程中, 得到了该器件的等效电路, 并通过实验研究验证了该等效电路的正确性. 此外, 文中的理论分析与性能测试还证明, 弯曲振动压电变压器对于防止器件损坏、减小介电损耗、提高效率都有一定的作用.

**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:** 03722112 (2003) 121664203

## The Research on the Equivalent Circuit Model and Characteristic of Disk Flexural Vibration Mode Piezoelectric Transformer

HUANG Yi2hua<sup>1</sup>, SHI Jun<sup>2</sup>, ZHOU Kang2yuan<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic and Communication, Zhongshan University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

**Abstract:** The analysis method applied in the disk flexural vibration actuator was adapted properly and then used to deduce the equivalent circuit model of disk flexural vibration mode piezoelectric transformers. The equivalent circuit model is verified by the experimental results. Besides this, the theoretic analysis and experimental result also indicate that this new kind of components can prevent the destruction, decrease the permittivity loss and improve the efficiency in some degree.

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

### 1 引言

传统的纵向振动压电变压器以及最近两三年来的国际上出现的径向振动压电变压器在应用过程中常常存在几个问题: (1) 支撑(安装)点不够精确和(或)牢固; (2) 内部介电损耗比较大; (3) 实际功率传输能力不足; (4) 功率较大时器件容易损坏. 这几个问题严重影响了压电变压器在功率电子系统中的广泛应用. 为了解决这些问题, 圆盘形弯曲振动压电变压器被设计出来.

### 2 器件结构

圆盘形弯曲振动压电变压器输入部分为夹心式叠层结构, 如图 1 所示, 即在两层压电陶瓷圆片中间通过导电胶粘合一层金属圆片, 圆片的直径略大于压电片的直径. 采用这种结构, 有很多好处: 首先, 中间的金属夹层特别有助于器件在功率电子系统中的安装, 借助于中间金属层的边缘, 整个压电变压器可以牢固连接在电子设备中的支架(点)上, 减少因振动而产生的诸如支撑点位移而效率降低、电极引线焊点松动、压电片开裂失效等现象的发生, 从而提高器件的可靠性; 其次, 功率传输能力明显提高, 因为该结构的器件在工作时, 所依赖的是平面机电耦合系数  $k_p$ , 而一般压电陶瓷  $k_p$  的值多在 0.6

左右, 要比横向机电耦合系数  $k_{31}$  大近一倍( $k_{31}$  的值多在 0.3 ~ 0.38 左右), 这样, 该器件在一个工作周期内, 对于同样的输入功率, 器件的电2机能量的转换值可提高近一倍, 另外由于有金属圆片的存在,  $k_p$  的有效值比不使用金属圆片的陶瓷振子大约 6%<sup>[4]</sup>, 这又进一步提高了实际的电2机能量的转换效率; 第三, 器件的内部损耗有一定的减小, 因为输入和输出部分都是叠层结构, 相同部分的各层之间从电路的角度来看是并联结构, 这在器件的等效电路中相当于将各压电片的损耗电阻进行并联, 因而总的损耗电阻可以得到一定的减小. 输出部分则在输入部分的两个端面上分别粘接一片压电陶瓷片, 整个器件的结构在图 1 示出.

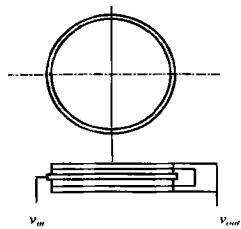


图 1 圆盘形弯曲振动压电变压器

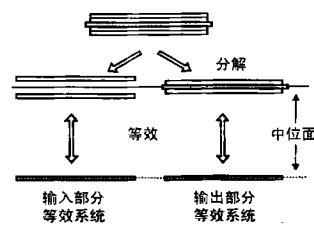


图 2 变压器的分解及等效过程

### 3 等效电路

通常情况下,我们可以列出变压器的压电方程和运动方程并求解,然后通过机电类比来得到这种类型压电变压器的等效电路.但是对于弯曲振动模式而言,这样的过程将是极其复杂的,并且很难得到解析解,从而影响等效电路模型的正确性.文献[5]给出了圆片晶体振子作弯曲振动时的运动方程的解析解,只要对该解析解做适当的处理,同时将变压器分解成输入和输出部分,再分别等效成中位面上的两个等效系统(如图2所示),并结合能量法及实际的边界条件,整个变压器的等效电路便不难求出,那么这种类型压电变压器的各种特性就可以很容易得到.详细推导过程不再赘述,此处我们只给出主要结果.

#### 3.1.1 输入部分

在交变电压的作用下,输入部分工作时的所满足的机电方程为:

$$v_{in} = \frac{1}{j\omega C_i} i + \frac{U}{j\omega C_i} v, F = \frac{U}{j\omega C_i} i + \left[ Z_M + \frac{U^2}{j\omega C_i} \right] v \quad (1)$$

式中:  $F$ ))) 等效系统上的作用力;  $i$ ))) 压电变压器的输入电流;  $v$ ))) 中位面上的参考速度;  $v_{in}$ ))) 压电变压器的输入电压;  $C_i$ ))) 输入电容;  $U$ ))) 输入部分的变压比.

考虑到能量损耗电阻  $R = X_0 M / Q_m = K / X_0 Q_m$  (主要是热效应,辐射功率很小,因而忽略不计),则圆盘弯曲振动压电变压器输入部分的等效电路为

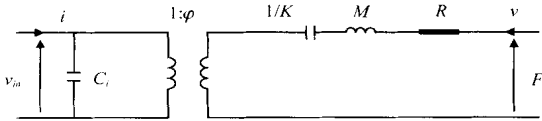


图3 圆盘弯曲振动压电变压器输入部分的等效电路

图中  $M$  为输入部分等效质量,  $K$  为输入部分等效刚度.

#### 3.1.2 输出部分

与3.1类似,输出部分工作时同样满足机电方程

$$v_{out} = \frac{1}{j\omega C_o} i_c + \frac{<}{j\omega C_o} v_c$$

$$F_c = \frac{<}{j\omega C_o} i_c + \left[ Z_{C_M} + \frac{<^2}{j\omega C_o} \right] v_c \quad (2)$$

其中:  $F_c$ ))) 等效系统上的作用力;  $i_c$ ))) 压电变压器的输出电流;  $v_c$ ))) 中位面上的参考速度;  $v_{out}$ ))) 压电变压器的输出电压;  $C_o$ ))) 输出电容;  $<$ ))) 输出部分的变压比.

根据上式及考虑能量损耗电阻,输出部分的等效电路为

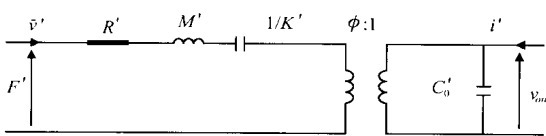


图4 输出部分的等效电路

图中  $M_c$  为输出部分的等效质量,  $K_c$  为输出部分的等效刚度. 因为输入与输出部分的等效系统之间满足边界条件:  $F = F_c, v = v_c$ , 所以, 图3和图4可以合并成为图5.

### 4 特性研究

#### 4.1 特性参数

为了研究该压电变压器的特性,我们采用不同的材料制作了1#和2#两个样品,各样品的几何参数及材料特性参数如表1所示,其中1#样品的驱动部分采用PZT材料,输出部分则采用NEC公司的DCM23陶瓷材料,2#样品的输入与输出部分都采用PZT材料.

表1 器件的几何参数及材料特性参数<sup>[6]</sup>

	1#		2#	
	输入	输出	输入	输出
相对介电系数 $\epsilon_r / \epsilon_0$	1260	1100	1260	1260
介电损耗 $\text{tg}\delta$ (%)	0.3	0.006	0.3	0.3
机电耦 $k_p$ (%)	68	68	68	68
合系数 $k_t$ (%)	49	49	49	49
品质因数 $Q_m$	900	2000	900	900
压电常数 $d_{33}$ ( $@10^{-12} \text{M/V}$ )	335	220	335	335
压电出力系数 $g_{33}$ ( $@10^{-3} \text{V}\#\text{M/N}$ )	29.6	28	29.6	29.6
居里点 (e)	300	252	300	300
密度 $Q(10^3 \text{kg/M}^3)$	7.75	7.8	7.75	7.75
压电片直径(mm)	10		12	
压电片厚度(mm)	0.22		0.22	
金属片直径(mm)	11		13	
金属片厚度(mm)	0.22		0.22	

#### 4.1.2 电压传输特性

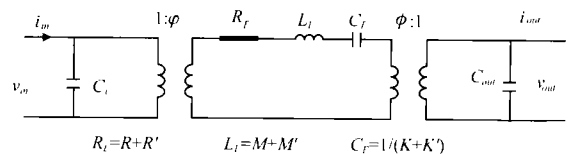


图5 圆盘弯曲振动压电变压器等效电路

本文对两个样品均进行了电压特性的测试.对样品1的测试结果如图6所示.图中显示,本文所提出的圆盘弯曲振动压电变压器已具备升高电压的作用,其升压比为5~7之间,而且测试值与理论值的差别不大,并呈现较强的线性.图7为样品2的测试曲线,与样品1相比显然样品2的升压比要小得多,这主要是由于输出部分材料不同所致.

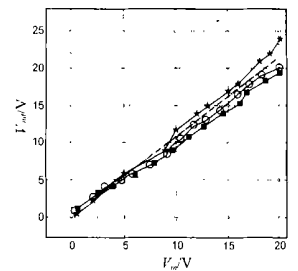
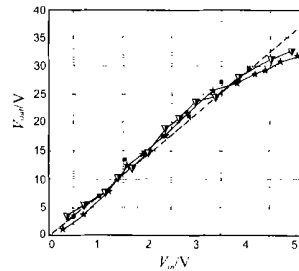


图6 1#样品的升压特性 图7 2#样品的升压特性

### 4.1.3 频率特性

图8是1#样品的频率特性,圆点为仿真值,三角为测试值.可以看出,器件的谐振频率为100kHz左右,而1#样品的有效直径仅为10mm,这说明该结构的压电变压器确实能够以小尺寸实现低频振动的目的.

### 4.1.4 功率特性

功率特性的测试曲线如图9所示,圆点为仿真值,三角为测试值.显然可以看到,曲线也是向下凹的,功率最低点出现在负载为200k左右,这和理论曲线的走势是基本一致的.另外我们测试了器件在大功率输入情况下的稳定性,试验中可以观察到,即使在数十瓦的输入功率下,器件物理结构仍然完好,只是此时发热严重,器件表面非常烫手,但未出现裂痕.

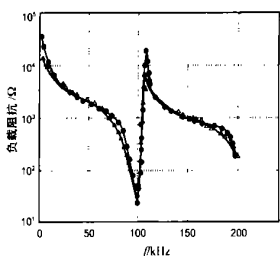


图8 1#样品的负载阻抗  
)) 频率特性

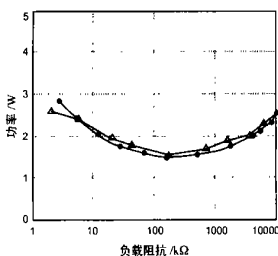


图9 功率2负载特性

### 4.1.5 应用

目前压电变压器多用于微型DC2DC或AC2DC电路中,通过IC技术将驱动和控制电路集成起来,开关模块的重量(含压电变压器)已经降到了几克,这对于一些特殊应用场合具有现实意义.在这一领域,国际上已有一些成熟的产品,可是数量和品种都不多.可以说,关于压电变压器的应用研究仍处于一个发展阶段,但是在互联网上已经可以找到一些大公司,如SIEMENS、NEC及TI的研究报告.基于上述原因,我们也对本文的压电变压器作了初步的研究,由于压电变压器的驱动与控制这一问题本身就是一个值得研究的课题,目前很难确定哪一种驱动和控制方式是最佳的,因此本文仅给出一个实验电路,有关配套电路(驱动、控制及输入输出端匹配网络)的最优化设计问题正是我们下一阶段的研究课题.

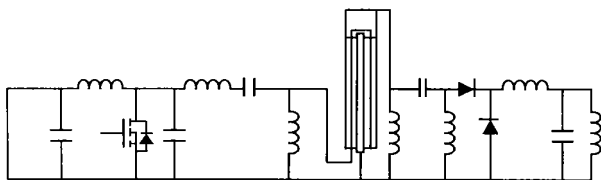


图10 实验电路

## 5 结论

本文为了解决现有压电变压器所存在的问题而设计了弯曲振动压电变压器,经过理论分析和实验研究,证明该器件对于解决支撑点稳定性、减小损耗、提高效率都有一定的作用,同时我们也发现,器件的某些性能还有待进一步提高.另外文中对该器件的应用也作了初步的探讨,有关配套电路的最优化设计工作将在今后的研究中进行.

### 参考文献:

- [1] Flynn A M, Sanders S R. Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformers[A]. Power Electronics Specialists Conference[C]. 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE, Volume 2, 1998. 1463- 1471.
- [2] Huangyihua, Zhoukangyuan, Shi Jun. The equivalent circuit model and characteristic of radial vibration mode piezoelectric transformer [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30 (11): 1585- 1588.
- [3] Lin, R L, Lee, F C, Baker, E M, Chen, D Y. Inductorless piezoelectric transformer electronic ballast for linear fluorescent lamp[A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE, 2001. 2. 664- 669.
- [4] 张沛霖,张仲渊. 压电测量[M]. 北京:国防工业出版社,1983.
- [5] Mu Tingrong, The equivalent circuit and the shear stress of the thin piezoceramic composite circular plate[J]. Acta Acustica 1983, 8 (1): 45- 53.
- [6] 压电... 2PT SERIES[Z]. NEC公司产品手册.

### 作者简介:



黄以华 男,1973年4月生于福建省福清市,2002年毕业于中国科学技术大学电子工程与信息科学系,获博士学位.现为广州中山大学电子与通信工程系讲师.主要研究方向为固态超声电子器件及微波器件.

施俊 男,1977年4月生于江苏南通,现为中国科学技术大学电子工程与信息科学系博士生,主要从事超声影像、医学诊断系统及超声电子器件的研究工作,目前在香港城市理工大学作访问研究.

周康源 男,1941年生于上海,1964年毕业于上海交通大学水声工程专业,现为中国科学技术大学电子工程与信息科学系教授,博士生导师,主要从事超声及其相关领域的研究工作.