

压电变压器工作特性及应用研究

黄以华,周康源,陈 昕

(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: 压电变压器是一种非常有前途的固态电子器件,同传统的电磁变压器相比具有器件结构简单、体积小、效率高、无电磁噪声、无电磁式绕组及不可燃烧、安全性高等特点,而且在大规模生产下的成本可以大幅降低.本文采用等效电路模型对该器件的升压比(增益)、输出功率、功率传输效率进行了理论分析和计算,并用实验手段对其加以验证.利用压电变压器制作的 CCHL 驱动器和 DC-DC 变换器的电路也在文中给出.

关键词: 压电变压器;等效电路;直流变换器

中图分类号: TN146+.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)11-1549-03

A Study on Property and Application of Piezoelectric Transformer

HUANG Yi-hua, ZHOU Kang-yuan, CHEN Xin

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

Abstract: Piezoelectric transformer is a kind of very promising solid electronic component which has the following several merits compared with the traditional magnetic transformers: it has very simple structure, small volume, high efficiency, no magnetic noise, no windings so unflammable, high safety, and low cost under mass production. In this paper, the properties of piezoelectric transformer such as the step-up ratio of voltage, output power, efficiency, etc. are analyzed and calculated through equivalent circuit model. The accuracy of the model is verified by experiment. Two applications circuits: CCHL driver and DC-DC converter using piezoelectric transformer are given.

Key words: piezoelectric transformer; equivalent circuit; DC-DC converter

1 引言

压电变压器 (piezoelectric transformer 以下简称 PT) 是一种固态电子元件,最早由 C. A. Rosen^[1]于 1956 年发明.与传统的电磁式变压器相比,PT 有以下的优点:(1)结构简单,体积小,重量轻;(2)无电磁干扰,无需电磁屏蔽;(3)安全性高,无绕组,不会起火燃烧;(4)效率高,能量密度大(100 KHz 谐振条件下,330w/cm³^[2]).但是九十年代以前,由于压电材料在功率和可靠性等方面的原因,PT 的发展曾一度停滞不前.近年来,随着信息处理设备和通讯设备日益小型化的发展,电源设备小型化的需求越来越高,加之功能陶瓷材料的迅猛发展,PT 的上述优点重新得以重视,国际上的许多大公司和研究机构如 Motorola、Philips、NEC、Epson、Tokin、SIEMENS、和 TI 均对 PT 的材料制备、新型结构设计及器件性能进行深入研究.

2 压电变压器的工作原理

2.1 PT 的构成及工作原理

PT 按其振动模式的不同可分为 Rosen 型、厚度振动型、径向振动型等^[3],但无论何种类型的 PT,均是由驱动部分和输出部分构成.以图 1 的 Rosen 型 PT 为例,当它工作时,其驱动部分将输入的交变电压通过横向逆压电效应转换为整个压电片的纵向振动,输出部分又将振动经由正压电效应转换为电

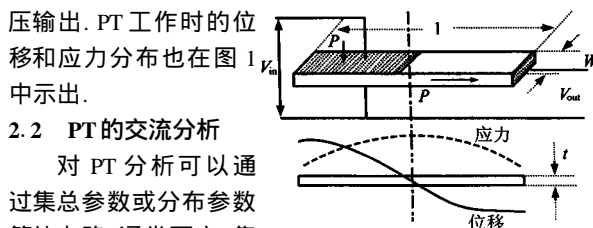


图 1 Rosen 型 PT

压输出. PT 工作时的位移和应力分布也在图 1 中示出.

2.2 PT 的交流分析

对 PT 分析可以通过集总参数或分布参数等效电路.通常而言,集总参数等效电路比分布参数等效电路易于计算.集总参数等效电路如图 2 所示,图中各元件的值为 PT 谐振频率附近的等效值,它们与 PT 的材料参数及几何尺寸间的关系为: C_i :输入电容, C_o :输出电容, L :等效电感, R :等效电阻, C :等效电容, ϕ :传输比, R_L :负载阻抗.

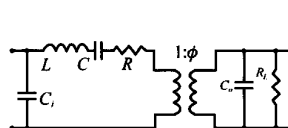


图 2 集总参数等效电路

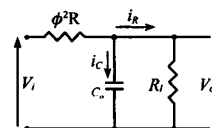


图 3 简化等效电路

$$C_i = \frac{1}{2} \frac{T_{33}(1 - k_{31}^2)}{t} \frac{\Delta w}{t}, \text{ 其中 } k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E T_{33}};$$

$$C_0 = 2 \frac{T_{33}}{s_{33}} (1 - k_{33}^2) \frac{w}{l}, \text{其中 } k_{33}^2 = \frac{g_{33}^2 T_{33}}{s_{33}^2 E};$$

$$L = \frac{1}{8} \frac{t}{w} \frac{(s_{11}^E)^2}{d_{31}}, \text{其中 } \rho \text{ 为材料密度};$$

$$C = \frac{8}{2} k_{31}^2 C_i \frac{1}{(1 - k_{31}^2) \left[1 + \frac{D}{N s_{11}^E} \left(1 - \frac{8}{2} k_{33}^2 \right) \right]};$$

$$R = \frac{1}{s C Q_m} \frac{1}{1 - A}, \text{其中 } A = \frac{8}{2} \frac{k_{33}^2}{1 + \frac{D}{N s_{11}^E}}.$$

为了便于计算,图2可进一步等效为图3,其电路方程如下.

$$\phi V_i = \phi^2 R (i_R + i_c) + V_o \quad (1)$$

$$i_c = j s C_o V_o \quad (2)$$

$$i_R = V_o / R_L \quad (3)$$

此处 s 为串联谐振角频率, $s = 1/\sqrt{LC}$. 从方程(1)~(3)计算电压增益为:

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\phi}{1 + (\phi^2 R / R_L) + j s C_o \phi^2 R} \quad (4)$$

当 R_L , G 达到最大值 $G = \frac{\phi}{\sqrt{1 + (s C_o \phi^2 R)^2}}$ (5)

输出功率为: $P_o = \frac{|V_o|^2}{R_L} = \frac{\phi^2 V_i^2}{R_L \left\{ \left(1 + \frac{\phi^2 R}{R_L} \right)^2 + (s C_o \phi^2 R)^2 \right\}}$ (6)

当式(6)的分母取最小值时,即:

$$R_L = \frac{\phi^2 R}{\sqrt{1 + (s C_o \phi^2 R)^2}} \quad (7)$$

最大输出功率为: $R_{OMAX} = \frac{\phi^2 V_i^2}{2R \left(1 + \sqrt{1 + (s C_o \phi^2 R)^2} \right)}$ (8)

当 $\ll 1$ 时,式(8)可简化为: $R_{OMAX} = \phi^2 V_i^2 / (4R)$ (9)

此时 $R_L = \phi^2 R$ (10)

电路的输入功率为:

$$P_i = \phi^2 R |i_c + i_R|^2 + P_o = V_o^2 \left\{ \frac{\phi^2 R + R_L}{R_L^2} + (s C_o \phi)^2 R \right\} \quad (11)$$

则功率传输效率为:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{1}{1 + \phi^2 R / R_L + (s C_o \phi)^2 R_L R} \quad (12)$$

当式(12)分母取最小值时,即

$$R_L = 1 / (s C_o) \quad (13)$$

最大功率传输效率为:

$$\eta_{MAX} = 1 / (1 + 2 s C_o \phi^2 R) \quad (14)$$

3 压电变压器基本工作特性测试

PT的基本工作特性除了上述推导的升压比(增益)、输出功率、功率传输效率以外,还包括各种静态参量(材料参数、静电容等)、温度特性、几何尺寸的影响等. 本文对上述特性进行了详细的测试,被测样品的材料基本参数如表1所示.

表1 材料参数

$d_{31} / \times 10^{-12} \text{ nV/V}$	$d_{33} / \times 10^{-12} \text{ nV/V}$	K_{31}	K_{33}	$\rho / \text{g/cm}^3$	$T_{33} / \text{ }^\circ\text{C}$
163	419	32%	75%	7.7	2100

3.1 PT升压比特性

对PT进行测试时,信号源所提供的交流电压的频率与PT的谐振频率相同. PT的输出为二倍压整流直流输出. 测试结果如图4所示. (a)、(b)图中细实线为通过等效电路计算的理论值,三角、方块及圆点为实验值. 从式(4)可以看出,当负载一定时,输出电压与输入电压成线性关系,而图4(a)中的实测值很好的反映了这一关系. 由图4(b)不难看出,当负载阻抗足够大时升压比达到了十倍以上,并且随着负载阻抗的增大,升压比还可进一步提高. 我们在实验中测得的升压比达到了100倍以上,即在10M负载下,输入20伏电压,输出端得到2300多伏的电压. 这一结果同利用式(4)计算的结果基本吻合,说明等效电路模型是准确的. 在测试中我们还观察到,随着负载的逐渐减小,PT的谐振频率有所下降,如图4(c)所示,目前尚不清楚产生此现象的原因,但对使用者而言,为了充分发挥PT的作用,不同的谐振频率下,PT应当配以不同的负载,对某些阻抗特性会变化的电子器件而言,当其作为PT的负载时,设计电路时,应考虑使用频率跟踪电路. 图4(d)反应了PT的频率谐振特性,从图中可以看出,PT具有滤波作用,只有当输入信号(电压)的频率接近PT的谐振频率时,此电压才被大幅放大,当输入信号的频率偏离PT的谐振频率较大时($\geq 1\text{kHz}$),放大倍数大大降低.

3.2 PT的阻抗特性

PT的阻抗特性如图5所示. 测试条件为输出端开路,无整流电路. 图5(a)显示,PT的半波谐振频率为35KHz,全波谐振频率为70KHz,这与振动理论分析的结果是相同的. 图5(b)是PT输入端电压与电流间的相位差随频率变化的曲线. 由图可见,在正、反两个谐振点上,相位差为0,输入阻抗为纯阻性;两点之间为感性;两点以外为容性,电压落后于电流.

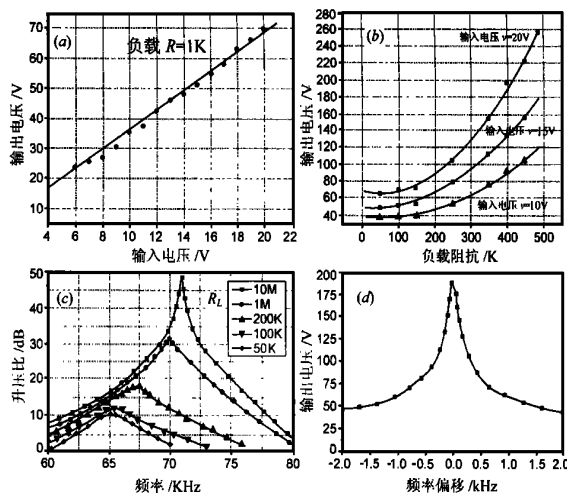


图4 测试曲线

3.3 PT的温度特性

本文中用于制备PT的压电陶瓷的居里点为295,所以在通常的使用温度范围内不会引起失效,但是随着环境温度的改变及介质损耗、内摩擦的影响,PT的谐振频率将随之改变,从而影响到升压比和效率. 理论分析表明,PT的工作频率

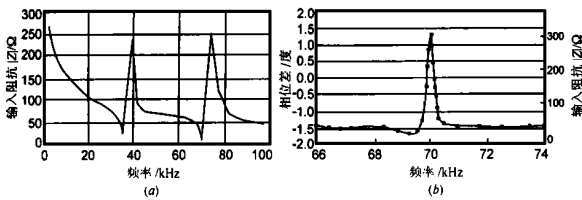


图 5 PT的阻抗特性

$f = v/2l$, 式中 v 为 PT 中的声速, l 为 PT 的长度. 当温度升高时, v 和 l 均发生变化, 导致 f 的变化. 测试曲线如图 6 所示. 曲线表明, 随着温度逐渐升高, PT 的谐振频率先是升高, 达到 80

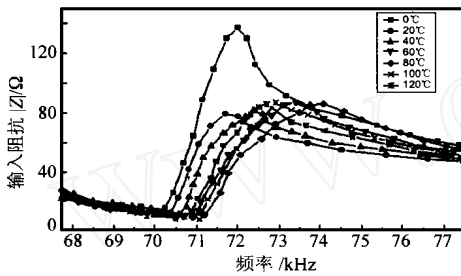


图 6 温度特性

左右时, 反而随着温度的继续升高而下降. 出现这种现象的原因是: 80 以下, 随着温度的提高, PT 中声速的上升比长度的加大对 f 的影响要大, 80 以上, 温度对 PT 长度的影响要明显于对声速的提高, 故 f 有所下降. 但总体而言, 温度对谐振频率的影响不大, 约 6Hz/

3.4 几何尺寸对 PT 的影响

PT 的几何尺寸对其性能会产生一定的影响, 对其深入的研究工作尚在进行中, 但目前一系列的对比测试结果表明: PT 的升压比 G (增益)、功率传输效率 在一定程度上取决于长宽比 l/w 和长厚比 l/t , 并随其增大而有所上升. 实验中还发现, 对于小阻抗负载, 长、宽之比小的 PT 其性能要优于长、宽之比大的 PT; 对于大负载阻抗, 情况正好相反.

4 PT 的应用研究

PT 在大功率的应用方面尚有很多的问题 (如材料的温度特性, 机械强度, 大功率下的成本问题等等) 没有解决, 所以目前主要被应用高压小功率电源方面, 如驱动冷阴极荧光灯 (CCHL), 而 CCHL 是笔记本电脑和手机的 LCD 显示屏所必需的背景光源. 本实验室设计出以 PT 为核心器件的 CCHL 驱动器如图 7 所示. CCHL 的工作特性为: 启动时需要提供 1000V 左右的高电压, 正常工作时需 400 ~ 500V 的电压, 其功率消耗为 2 ~ 4W, 输入

阻抗在数百 k 左右, 这些特性对 PT 而言非常合适. 驱动 PT 的电压频率应当与 PT 的谐振频率保持一致. 而实际上, PT 的谐振频率常

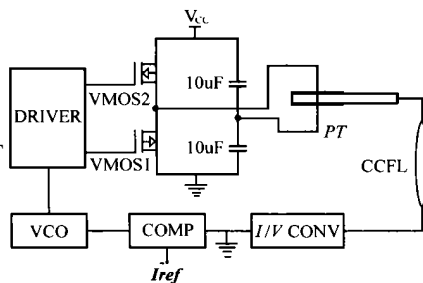


图 7 CCHL 驱动器

常因受到负载 (图 4 (c))、环境温度、元件尺寸及其误差的影响而产生变化. 就 CCHL 而言, 其工作时的阻抗与启动时的阻抗相差十几 K, 会使 PT 的谐振频率产生变化. 为了得到最佳的输出, 需要跟踪 PT 谐振频率的变化从而对驱动电压频率进行自动调整, 所以图 7 采用了正反馈自激电路. 门驱动部分提供 50% 占空比的方波, 使 VMOS1 和 VMOS2 轮流导通, 为 PT 提供交变的激励电压, 此电压经 PT 升高, 供给 CCHL. CCHL 的输出电流被送入反馈回路. 反馈回路由 I/V 转换模块、比较器和 VCO 模块组成. I/V 转换模块将 CCHL 的电流转换为信号电压, 比较器将此电压与参考电压对比, 产生控制电压送入 VCO, VCO 调节门驱动的输出频率使整个驱动器的输出功率保持在参考电压设定的水平上. 此外本实验室将 PT 同 ZVS (Zero-Voltage-Switch) 技术相结合, 制作出 DC-DC 变换器如图 8

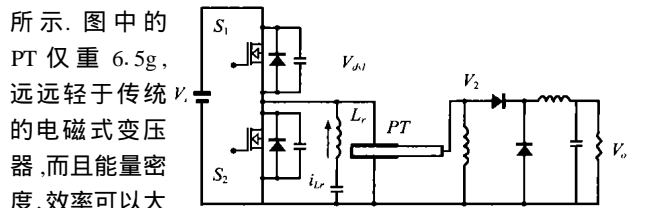


图 8 DC-DC 变换器

所示. 图中的 PT 仅重 6.5g, 远远轻于传统的电磁式变压器, 而且能量密度、效率可以大大提高. 这两种电路前者被广泛应用于 LCD 的背光驱动机构, 后者广泛应用于高频 ($\geq 1\text{MHz}$) 的小功率开关电源上.

5 结束语

压电变压器是一种非常有前途的固态电子器件, 本文采用等效电路模型对该器件的升压比 (增益)、输出功率、功率传输效率进行了理论分析和计算, 并用实验手段对其加以验证. 给出了利用压电变压器的特点制作的 CCHL 驱动器和 DC-DC 变换器的电路. 压电变压器其它的特性及应用还有待我们做进一步的探索和研究.

参考文献:

- [1] C A Rosen. Ceramic transformers and filter [A]. Proc. Electronic Component Symp [C], 1956 : 205 - 211.
- [2] Flynn A M, Sanders S R. Fundamental limits on energy transfer and considerations for piezoelectric transformers [A]. 29th Annual IEEE [C], 1998 : 1463 - 1471.
- [3] Lin R L. Inductor-less piezoelectric transformer electronic ballast for linear fluorescent lamp [A]. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE [C], 2001, 2 : 664 - 669.

作者简介:



黄以华 男, 1973 年 4 月出生于福建省福清县. 1992 年考入南京理工大学, 1999 年毕业于, 获硕士学位. 现为中国科学技术大学电子工程与信息科学系声学专业博士生, 主要从事超声固态电子器件及超声技术应用的研究.