

压电变压器的原理及其应用中的关键问题

黄以华, 周康源, 陈 昕, 胡耀辉

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 合肥 230027)

摘 要: 文章简要介绍了压电变压器的工作原理, 着重对压电变压器在应用过程中的关键技术问题做了研究与探讨, 并根据压电变压器的特性设计制作出两种实用的电子线路。

关键词: 压电变压器; 冷阴极管驱动器; 直流变换器

中图分类号: TB565

文献标识码: A

Principle of piezoelectric transform and key issues in applications

HUANG Yi-hua, ZHOU Kang-yuan, CHEN Xin, HU Yao-hui

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

Abstract: The principle of piezoelectric transform is briefly introduced. The key techniques involved in the applications of piezoelectric transforms are studied. Design and construction of two practical circuits based upon piezoelectric transforms are described.

Key words: piezoelectric transformer; CCFL driver; DG-DC converter

1 引 言

压电变压器是一种工作在音频或超音频范围内的声学电子器件, 在结构、原理和所用的材料上与传统的电磁式变压器完全不同。压电变压器最早由 C. A. Rosen^[1]于 1957 年发明, 其特点为: (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(100kHz 谐振条件下, 330w/cm^{3[2]})。但是 90 年代以前, 由于压电陶瓷材料在功率和可靠性等方面的原因, 压电变压器的发展曾一度停滞不前。近年来, 信息处理设备和通讯设备日益小型化的发展, 对微型化开关电源的需求越来越高, 而微型化的主要方法就是提高电源的开关频率, 这样一方面可有效减小变压器的重量和体积, 另一方面也可有效减小整流电路元件的尺寸。但是电磁变压器在高频下应用有很多缺点, 如高频下磁性材料的磁滞损耗、涡流损耗和导体趋肤效应产生的损耗急剧增加, 所以电磁变压器很难微型化。但是压电变压器在高频范围仍具有高能量密度、无铜损、无电磁干扰等优点, 加之功能陶瓷材料的迅猛发展, 压电变压器重新得以重视, 国际上的许多大公司和研究机构如 Mo-

torola, Philips, NEC, Epson, Tokin、东京工业大学、Siemens, Smart Materials 实验室和德克萨斯仪器公司(TI)均对压电变压器的材料制备、新型结构设计及器件性能进行深入研究。

2 基本原理及特性

尽管目前有各种各样的压电变压器^[2~5], 但在实用产品中最常用的仍为 Rosen 型(图 1)。整个压电变压器可分为两部分: 左半部为输入端, 其上下表面有烧渗的银极, 沿厚度方向极化; 右半部为输出端, 沿长度方向极化, 右端面有烧渗的银极。当输入端施加交变的电压时, 通过横向逆压电效应, 使压电变压器产生纵向伸缩振动, 如果输入的交变电压的频率同压电变压器的谐振频率相同, 则压电变压器内部形成驻波, 产生较大幅度的应力和应变, 二者的分布如图 2。在压电变压器的右端(即输出部分), 出现最大的应变, 此应变经由正压电效应转换为电压输出。由于压电变压器的长度大于厚度, 故输入端为低阻抗, 输出端为高阻抗, 以此达到升压的目的。目前的 Rosen 型变压器输入几伏到几十伏的交变电压就可得到几千伏以上的高压。空载情况下, 压电变压器在谐振频率上的升压比为:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{4}{\pi^2} Q_m k_{31} k_{33} \frac{L}{t} \quad (1)$$

式中 $\frac{V_o}{V_i}$ 为空载时的升压比, Q_m 为材料的机械品质

收稿日期: 2001-02-22; 修回日期: 2001-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59877023)

作者简介: 黄以华(1973-), 男, 福建省福清市人, 博士研究生, 主要从事超声固态电子器件的研究。

因数, k_{31} 、 k_{33} 为材料的机电耦合系数, L 为压电变压器的全长, t 为压电变压器的厚度。由(1)式可知, 适当改变压电变压器的长厚比及选择高 k_{31} 、 k_{33} 和 Q_m 的材料可提高压电变压器的升压比。

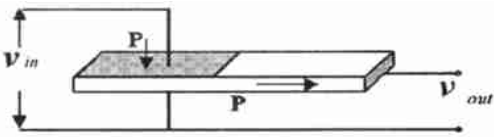
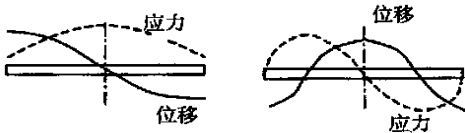


图 1 Rosen 型压电变压器



(a) 半波模式 (b) 全波模式

图 2 振动模式

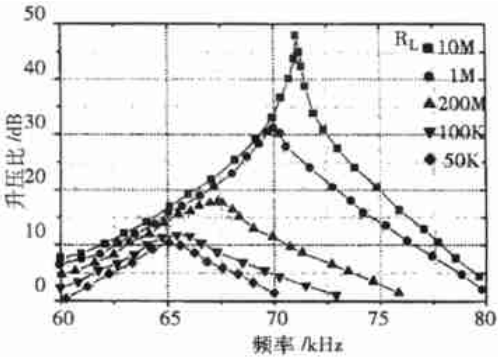
为了能够正确合理地使用压电变压器, 必须了解其主要特性, 其中负载特性及谐振特性的测试结果如图 3 所示。从测试曲线可以观察到, 随着负载阻抗的逐渐减小, 压电变压器的谐振频率有所下降, 如图 3(a) 所示。图 3(b) 显示了压电变压器的频率谐振特性, 从图中可以看出, 压电变压器相当于一个具有放大功能的窄带滤波器, 只有当输入电压的频率接近压电变压器的谐振频率时, 此电压才被大幅放大, 当输入的电压频率偏离压电变压器的谐振频率较大时($\geq 1\text{kHz}$), 放大倍数大大降低。

3 压电变压器的应用

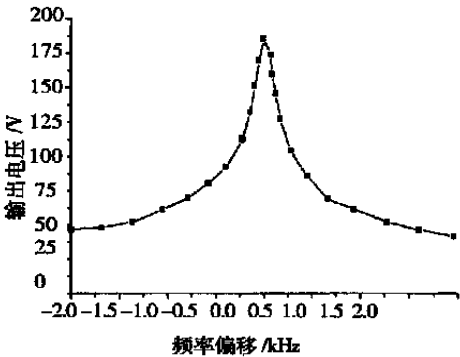
压电变压器经过 30 多年的发展, 器件的材料、驱动电路及控制电路均已发展成熟, 目前已被应用于笔记本电脑及手机的 LCD 的背光驱动高压源、直流开关电源和霓虹灯驱动等方面。本文对压电变压器的前两种应用中的关键技术作了研究, 具体情况阐述如下。

3.1 CCFL 驱动器

压电变压器最典型的应用之一就是驱动 CCFL (cold cathode fluorescent lamp, 冷阴极管。下同), 因为 CCFL 的工作特性非常适合于压电变压器的特性, 即输出阻抗高、输出电流小、输出电压随阻抗变化大等。而 CCFL 在启动时需要 1000V 左右的高压, 平稳工作状态下需 400V~ 500V 左右的电压, 其阻抗较启动时下降数十千欧。此外, CCFL 对电流的要求不高, 一般为 5mA~ 6mA。CCFL 的这些特性恰好与压电变压器的上述特性相符。在实际应用压电变压器时, 必须解决以下几个关键技术问题:



(a) 负载特性



(b) 谐振特性

图 3 特性曲线

(1) 选择合适的材料; (2) 振动模式的选择; (3) 器件的安装; (4) 驱动与控制电路的设计。

3.1.1 选择合适的材料

理论分析表明^[6], 压电变压器在工作时本身所受到的机械应力是制约其工作效能的主要因素, 所以材料的机械强度要特别高。为了满足这一要求, 应当选择微细晶粒的材料。另外材料的耦合系数 (k_{31} 、 k_{33}) 要大。最终选定的 PZT 材料的参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

d_{31} [$\times 10^{-12}\text{C/N}$]	d_{33} [$\times 10^{-12}\text{C/N}$]	k_{31}	k_{33}	ρ [g/cm^3]	ϵ/ϵ_0
- 163	419	42%	75%	7.7	2100

3.1.2 振动模式的选择

通常情况下, 压电变压器工作在半波模式或全波模式(图 2 的(a)、(b))。半波模式的零应变点在器件的中点, 全波模式的零应变点有两处, 分别位于距器件左右两端 $l/4$ 处, l 为器件的长度。考虑全波模式安装方便, 更重要的是其升压比和转换效率高, 所以采用此模式。

3.1.3 器件的安装

本文中的压电变压器尺寸为 $48\text{mm} \times 8\text{mm} \times 2\text{mm}$, 安装在 $55\text{mm} \times 10\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的支架上, 如图

4 所示。支架由上下对称的两部分构成, 每部分由金属壳体和三棱型支撑物组成。金属壳体有利于散热。为满足 UL(美国安全检定公司, 是一个独立的、非盈利的、为公共安全做试验的专业机构) 和 IEC(国际电工委员会) 等标准, 支撑物采用 UL-94V-0 级阻燃材料加工而成, 粘结于金属壳体上, 间距为 $l/2$, l 为器件的长度。金属壳体的两端各有一个小螺栓, 用于将支架固定于驱动电路印刷板上, 同时可以调节支撑物对器件的压紧力。

3.1.4 驱动与控制电路的设计

压电变压器驱动电压的频率需要与压电变压器的谐振频率保持一致, 而实际上, 压电变压器的谐振频率会因负载阻抗、环境温度、元件尺寸及其误差的影响而变化。为了得到最佳输出, 需跟踪压电变压器谐振频率的变化从而对驱动电压的频率进行自动调整, 所以驱动与控制电路的方案如图 5 所示。

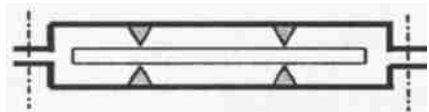


图 4 支架

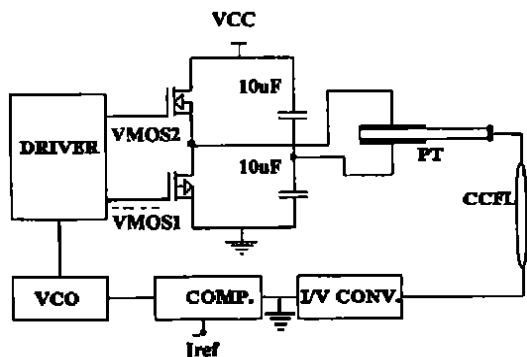


图 5 CCFL 驱动器

门驱动部分提供 50% 占空比的方波, 使 VMOS1 和 VMOS2 轮流导通, 为压电变压器提供交变的激励电压, 此电压经压电变压器升高, 供给 CCFL。CCFL 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 CCFL 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。

3.2 DC-DC(直流-直流)变换器

当今的电子设备小型化、轻型化的需求日益突出, 因此为其提供直流电压的直流变换器也必须做到小型化和轻型化。另外从低能耗的角度来讲, 其

能量转换的效率也必须提高。但是这些要求对传统的直流变换器来说是难以达到的, 因为其必须符合严格的安全及噪声规范, 如 UL, IEC 和 CISPR(无线电干扰特别委员会) 等的标准。特别是因为电磁变压器的存在, 直流变换器的重量和体积更是难以降低。用压电变压器取代电磁变压器, 上述问题便可迎刃而解。由压电变压器制做的 DG-DC 变换器如图 6 所示。

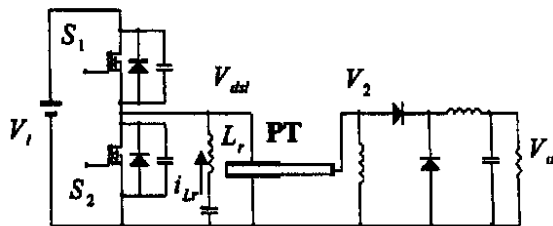


图 6 DC-DC 变换器

基本的工作过程为: 开关 S_1 和 S_2 以非常短暂的切换时间(称为 dead time)轮流导通。在此时间内, 电磁电流 i_{Lr} 通过 L_r 向 S_1 和 S_2 的并联输出电容充电, 因此 ZVS(零电压切换)技术得以实现^[7]。通过 S_1 和 S_2 的零电压切换, 压电变压器的输入端会产生准方波波形 V_{ds1} , 由于压电变压器良好的谐振特性, 其输出端产生正弦波 V_2 , V_2 经整流后成为直流电压供给负载。图中的压电变压器仅重 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。

3.3 其它应用研究及实用产品

上述两种应用是压电变压器最典型的应用。除此之外, 压电变压器还被应用于军事方面, 即利用其输出电极端子放电引爆高压雷管。民用方面的应用有高压防盗器、高压电击棒、小型 X 光机、雷达、复印机、氦氖和小型二氧化碳激光器等等。目前实用产品也比较多。如 NEC 公司及田村制作所先后向市场推出的用压电变压器制成的 LCD(液晶显示器)背光源, 京都技术研究所开发的效率高达 90%, 包含驱动电路在内仅重 1.78g 的第 3 代手机背景驱动电源, Tamura 公司的 HBL 系列产品等。

4 结束语

本文就压电变压器的两种典型应用即 CCFL 驱动器和 DC-DC 变换器的关键问题做了研究, 并对其它的应用做了简要的说明。可看出, 由于压电变压器具有体积小、重量轻、不击穿、不需绕组、不怕燃

(下转第 64 页)

- [6] Suslick K S, Doktycz S J, Flint E B, On the origin of sonoluminescence and sonochemistry [J]. Ultrasonics, 1990, 28(5): 280-290.
- [7] J. L. Huang, R. Feng, C. P. Zhu. Low MHz Frequency Effect on a Sonochemical Reaction Determined by an Electrical Method[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1995, 20(5): 93-96.
- [8] Feng Ruo, Zhao Yiyun, Bao Ciguang, Sonochemistry in China[J]. Ultrasonics Sonochemistry 1997, 27(4): 183-187.
- [9] 冯若, 朱昌平, 赵逸云等. 双频正交辐照的声化学效应研究[J]. 科学通报, 1997, 42(9): 925-928.
- [10] 陈兆华, 朱昌频, 赵逸云等. 用碘释放法研究低频超声的声化学产额[J]. 声学技术, 1997, 16(4): 192-193, 197.
- [11] 朱昌平, 冯若, 陈兆华等. 双频辐照的声化学产额及其

频率效应的研究[J]. 南京大学学报, 1998, 34(1): 93-96.

- [12] 朱昌平, 冉勇, 冯若. 非同频水平正交超声束的声化学效应[J]. 声学技术, 2000, 19(2): 86, 89.
- [13] 尹业高, 朱昌平, 李良学. 双低 MHz 超声束水平正交辐照的声化学产率及其效应[J]. 荆州师专学报 (自然科学版), 1998, 21(5): 50-51.
- [14] 昌平, 李林, 徐勇. 用碘释放法研究三维正交超声辐照的空化产率的增强效应[J]. 荆州师范学院学报 (自然科学版), 1999, 22(5): 70-71.
- [15] Huang J, Feng R, Zhu C, et al. Low MHz Frequency Effect on a Sonochemical Reaction Determined by an Electrical Method[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 1995, 2(2): 93-98.
- [16] 王双维, 莫喜平, 冯若等. 混响场中超声化学效应的研究[J]. 声学学报, 1993, 18(2): 122-129.

(上接第 32 页)

4 结 语

本文提出了一种海洋宽带环境噪声场的数值模拟方法。在直径为 1.5m 的 24 元均匀圆环阵上, 对提出的方法产生的均匀噪声场数据进行了空间方位谱及噪声的空间相关性的验证, 其方位谱的逼真度较佳, 不均匀性在 $\pm 1\text{dB}$ 以内, 空间相关性与理论模型一致, 本文提出的环境噪声场模拟方法是有效的。基于该方法产生的空间均匀噪声场设计的最优波束, 其处理结果已经得到了千岛湖湖上试验的验证。参考文献:

- [1] 鄢社锋, 马远良. 圆环形声基阵低频超增益性能研究 [J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(1): 79-82.
- [2] W. A. Kuperman, F. Ingenito. Spatial correlation of sur-

face generated noise in a stratified ocean[J]. J. Acoust. Soc. Am. , 1980, 67(6): 1988-1996.

- [3] B. F. Cron, C. H. Sherman. Spatial correlation functions for various noise models[J]. J. Acoust. Soc. Am. , 1962, 34(11), 1732-1736.
- [4] 张忠兵, 童立, 倪晋平等. 水声基阵设计中的噪声场数值模拟及其应用[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(5): 602-604.
- [5] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 216-224.
- [6] 王永德, 龙宪惠译. 自适应信号处理[M]. 成都: 四川大学出版社, 1991. 165-175.
- [7] D. C. M. Horvat, J. S. Bird, M. M. Groulding. True time-delay bandpass beamforming[J], IEEE J. Oceanic Eng. , 1992, 17(2): 185-192.

(上接第 60 页)

烧、无电磁干扰等优点, 所以将在很多方面取代传统的电磁式变压器, 其应用前景一片光明。

参考文献:

- [1] C. A. Rosen. Ceramic transformers and filter[C]. Proc. Electronic Component Symposium, 1956. 205-211.
- [2] K. Sakurai, S. Shindou, etc. Piezoelectric ceramic transformer Using radial vibration mode disks[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1998. 939-944.
- [3] Burhanettin KOC, Sedat ALKOY, etc. A circular piezoelectric transformer with crescent shape input electrodes[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1999. 931-934.

- [4] Toshiyuki Zaitu, Takeshi Inoue, etc. 2MHz Power converter with piezoelectric Ceramic Transformer[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1992. 430-437.
- [5] C. Y. Lin, F. C. Lee Design of a piezoelectric transformer converter and Its Matching Networks[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1994. 604-612.
- [6] Anita M. Flynn Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformer[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1998. 1463-1471.
- [7] Masahito Shoyama, Koosuke Harada. Zero-voltage-switched push-pull DG-DC converter[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1991. 223-229.