

压电变压器的研究进展

黄耀庭, 凌志远

(华南理工大学电子材料科学与工程系, 广东 广州 510640)

摘要: 压电变压器是一种很有发展前景的固体电子器件, 有高转换效率、高能量密度、结构简单、体积小、无电磁噪声及不可燃烧等特点。介绍了压电变压器的结构、工作原理、制造方法, 综述了国内外压电变压器陶瓷材料、结构设计、理论模型和应用研究的进展情况, 并对压电变压器未来的发展趋势作了展望。

关键词: 压电陶瓷; 压电变压器; 研究进展

中图分类号: TN6; TM282

文献标识码: A

文章编号: 1001-2028 (2004) 01-0007-04

Progress in Research on Piezoelectric Transformers

HUANG Yao-ting, LING Zhi-yuan

(Department of Electronic Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Piezoelectric transformer (PT) is a kind of promising solid electronic component. It is characterized by high voltage gain, high power density, simple structure, small size, non-electromagnetic noise and being flame retarded. The structure, working principle and fabrication of PT are presented, the progress in the research on piezoelectric ceramic, structure designing, modeling and simulation of PT reviewed, and the development trends discussed.

Key words: piezoelectric ceramics; piezoelectric transformers; progress in research

压电变压器是 20 世纪 50 年代后期开始研制的一种新型压电器件, 最早由 C.A. Rosen 于 1956 年发明。但是, 那时的压电陶瓷材料是以钛酸钡 (BaTiO_3) 为主, 其压电性能低, 制成的压电变压器升压比很低, 仅有 50~60 倍, 输出电压仅为 3 kV, 实用价值不大, 故未能引起人们的重视。随着锆钛酸铅 (PbZrTiO_3) 等高 k_p 和高 Q_m 压电陶瓷材料的出现, 压电变压器的研制才取得了显著的进展。目前已能生产升压比为 300~500, 输出功率 50 W 以上的压电变压器。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, 加上功能陶瓷材料的迅猛发展, 压电变压器的应用范围越来越广。目前压电变压器已用于电视显像管、雷达显示管、静电复印机、静电除尘、小功率激光管、离子发生器、高压极化等高压设备中。

与传统的电磁变压器相比, 压电变压器有以下的优点^[1, 2]:

- (1) 体积小, 重量轻;
- (2) 无噪声, 无电磁干扰, 无需电磁屏蔽;

(3) 耐高温, 安全性高, 不会被高压击穿, 不会起火燃烧;

(4) 无需磁心和铜线, 可节省有色金属材料;

(5) 升压比大, 转换效率高, 输出波形好;

(6) 结构简单, 制作简便, 易于批量生产。

1 工作原理和结构

压电变压器是利用压电材料的逆压电效应和正压电效应来实现高压输出。即在压电陶瓷片输入低电压信号, 通过逆压电效应转换成机械振动能, 再通过正压电效应又转变成电能。在压电陶瓷的电能-机械能-电能的机电能量的二次变换中实现阻抗变换, 从而在陶瓷片的谐振频率上获得高的电压输出。

根据振动模式的不同, 压电变压器可分为 Rosen 型、厚度振动型、径向振动型等^[3]。其中 Rosen 型压电变压器最为常用。

Rosen 型压电变压器结构简单, 制作容易, 升压比非常高, 特别适合于驱动高电压小功率器件, 比如驱动冷阴极荧光灯 CCFL (Cold Cathode Fluorescent

Lamps), 可为手机、笔记本电脑的 LCD 显示器提供背光源。图 1 示出普通的 Rosen 型压电变压器的结构及其原理。整个压电变压器可分成两部分, 左半部的上、下面都有烧渗的银电极, 沿厚度方向极化, 作为输入端, 称为驱动部分; 右半部分的右端也有烧渗的银电极, 沿长度方向极化, 作为输出端, 称为发电部分。当交变电压加到压电变压器输入端(驱动部分)时, 由于逆压电效应, 压电变压器产生沿长度方向的伸缩振动, 将输入电能转换成机械能; 而发电部分则通过正压电效应将机械能转换成电能, 产生高压输出。由于压电变压器的长度远大于厚度, 故输入端为低阻抗, 输出端为高阻抗, 因此输出电压远大于输入电压。一般输入几伏到几十伏的交变电压, 就可以获得几千伏以上的高压输出。

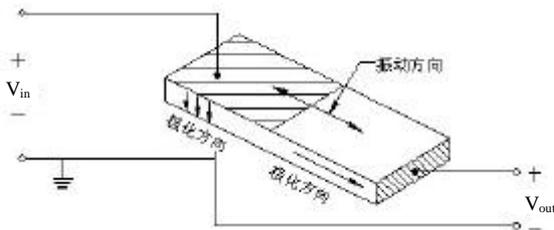
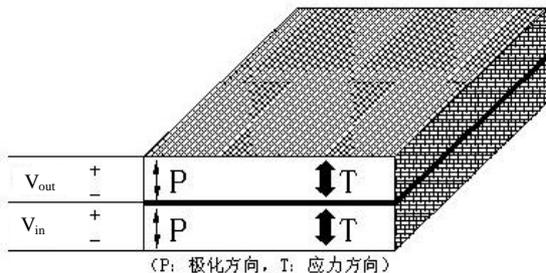


图 1 Rosen 型压电变压器

Fig.1 Rosen-type piezoelectric transformer

厚度振动型压电变压器又称为纵纵式压电变压器, 是由两块纵向振动压电陶瓷片胶合而成, 中间有一层绝缘层, 如图 2 所示。在输入端加上交变电压, 由于逆压电效应, 输入端就会产生厚度扩张振动。这种机械振动传到输出端, 由正压电效应转换成电能。转换比率 N 等于输入端跟输出端厚度之比。通过调整输入端和输出端陶瓷片的厚度比例, 就可以很方便地调整压电变压器的升压比^[4]。厚度振动型压电变压器的特点是功率较大、工作频率很高, 能够降低电压, 多用于高频开关电源中。



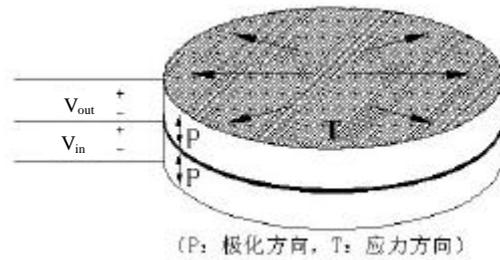
(P: 极化方向, T: 应力方向)

图 2 厚度振动型压电变压器

Fig.2 Thickness vibration mode piezoelectric transformer

径向振动型压电变压器是一种处于发展中的新型压电变压器, 其结构如图 3 所示。这种压电变压器的突出优点是结构简单, 制作方便, 能以很小的尺寸实现低频和大功率, 可用在电子整流器、适配器及 DC/DC 变换器中^[5]。这种压电变压器已由美国

Transoner 公司制作出来。



(P: 极化方向, T: 应力方向)

图 3 径向振动型压电变压器

Fig.3 Radial vibration mode piezoelectric transformer

根据升压比的不同, 压电变压器又可分为升压变压器和降压变压器。升压变压器工作频率一般在超音频范围, 降压变压器工作频率则较低, 一般在工频范围。

2 研究进展

目前人们主要从采用新型压电材料、提高驱动电路效率和采用合理的物理模型等方面设计制造小型化、高功率、高效率的压电变压器。

(1) 新型压电变压器材料的研究

由于压电变压器是利用机电能量的二次变换在谐振频率上获得升压输出, 因此要求材料具有高的机电耦合系数, 高的机械品质因数 Q_m 和高的电学品质因数 Q_e , 以获得高的升压比, 小的机械损耗和介质损耗。此外还要求材料的频率稳定性好, 机械强度高, 以承受工作时的强的振动。

未经改性的 PZT 材料各项性能指标往往达不到压电变压器材料的要求。通过对 PZT 材料进行掺杂, 微量取代 A 位或 B 位离子, 产生晶格畸变, 改变载流子浓度, 可以改善 PZT 材料的性能。采用微细晶粒的材料, 可使材料的机械强度比通常的材料提高一倍以上。例如在 PMN-PZT 材料中掺入适量的 CeO_2 烧结出组成为 $Pb_{0.94}Ba_{0.06}(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{0.925}(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.075}O_3 + 0.25\% \cdot CeO_2$ (掺杂量为摩尔分数) 的压电材料, 可减小材料的晶胞参数, 提高材料的机械品质因数 Q_m 和机电耦合系数 k_p ^[6]。在 PNW-PMN-PZT 材料中掺入适量的 PbO 、 Fe_2O_3 和 CeO_2 烧结出组成为 $Pb_{0.94}Sr_{0.06}(Ni_{1/2}W_{1/2})_{0.02}(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.07}(Zr_{0.51}Ti_{0.49})_{0.91}O_3 + 0.5\% PbO + 0.3\% Fe_2O_3 + 0.25\% CeO_2$ (掺杂量为质量分数) 的高介电常数、高机械品质因数和谐振频率温度稳定性好的压电变压器材料^[7]。在 PMN-PZT 材料中加入微量的 PNN 固溶体, 得到成分为 $Pb[(Ni_{1/3}Nb_{2/3})_{0.01}(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.08}(Zr_{0.505}Ti_{0.495})_{0.91}]O_3 + 0.5\% PbO$ (掺杂量为质量分数) 的压电材料, 不但可以提高材料的相对介电常数和机电耦合系数, 还可以降低材料的烧结温度^[8]。

(2) 压电变压器的振动模式和几何结构的改进

随着电子工业的不断发展，要求电子器件向小型化方向发展，国内外研究人员开始研究多层变压器 (MPT: Multilayer Piezoelectric Transformer, 如图 4 所示), 因为多层变压器不仅可以减少占用的空间, 节省材料, 还能提高升压比和输出功率^[9]。清华大学是国际上最早研究多层压电变压器的单位, 通过添加少量低熔点助烧剂 $B_2O_3-Bi_2O_3-CdO$ 使 PZT 陶瓷的烧结温度从 1250 降到 960 , 并采用 Ag/Pd 电极共烧成多层压电变压器, 交流无空载时的升压比比传统的单层压电变压器高 30~40 倍。Philips 公司在单层 Rosen 型压电变压器的基础上研发出多层 Rosen 型压电变压器, 其设计尺寸约为 $28\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 层数最多可达 44 层, 每层厚度最小为 $40\text{ }\mu\text{m}$ 。这种多层 Rosen 型压电变压器无论是输出功率还是升压比都比单层的 Rosen 型压电变压器要大。

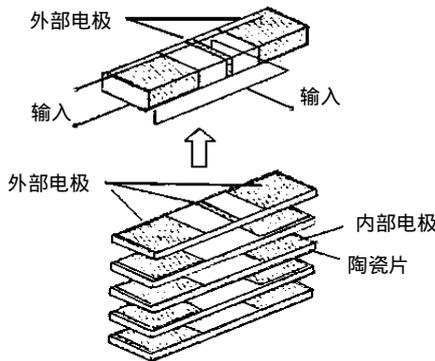


图 4 多层压电变压器结构图
Fig. 4 Multilayer Piezoelectric Transformer

普通 Rosen 型压电变压器, 不管是单层还是多层压电变压器, 都有一个严重的缺点, 输出端导线焊在输出端电极上, 而这正是振动位移最大的位置, 这样会导致导线和电极之间的连接可靠性比较差, 并且导线的重量和连接的方式也阻碍了变压器的振动。为此, NEC 公司研发出三次 Rosen 型多层压电变压器, 如图 5 所示。这种新型的压电变压器具有更高的可靠性、转换效率和更薄的尺寸, 整个变压器瓷片上有三个节点, 引出导线都焊在这三个节点处, 这就克服了普通 Rosen 型压电变压器的缺点。

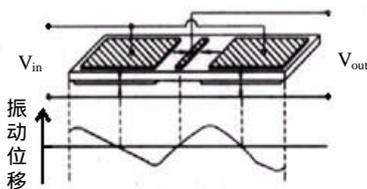


图 5 三次 Rosen 型压电变压器结构及振动模式
Fig.5 The structure of third order rosen type PT and its displacement profile

(3) 压电变压器驱动电路和输出匹配电路的优化及应用研究

驱动电路对于压电变压器性能的发挥起着关键的作用。压电变压器的工作频率在谐振频率和反谐振频

率之间。而压电变压器的输入电源一般为低压直流电, 因此驱动电路必须产生一个频率与压电变压器振动频率相等的信号, 使压电变压器正常工作。M. Sanz 等人分析对比了几种驱动电路的复杂度和压电变压器的效率之间的平衡关系, 提出了应用在不同场合的压电变压器驱动电路^[10]。E. Dallago 等人采用频率跟随技术, 优化了驱动电路 (如图 6 所示), 克服了因负载变化和温度变化引起的频率匹配问题^[11]。

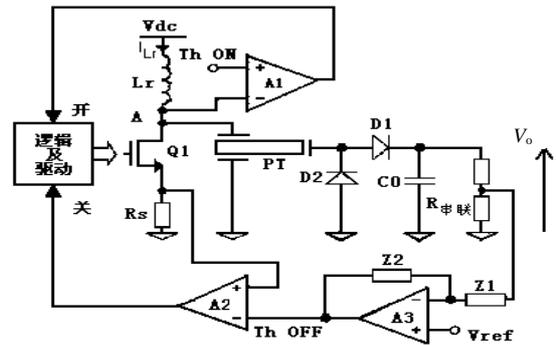


图 6 压电变压器 DC/DC 转换器及其驱动电路
Fig.6 Piezoelectric transformer DC/DC converter and proposed driving circuit

高压压电变压器输出端为高阻抗, 当外加负载等于输出阻抗的时候, 压电变压器就有最大转换效率。从输出端看过去, 压电变压器的输出级可以看成一等效阻抗。为了使等效阻抗与理想负载阻抗匹配, 必须精心设计输出匹配电路。C.Y.Lin 等人设计了一种压电变压器及其匹配电路, 研究了驱动电路(信号放大器)、压电变压器和匹配电路之间的关系^[12]。

J. Diaz 和 M.J. Prieto 等人把压电变压器应用在 AC/DC 和 DC/DC 转换器中。压电变压器的转换效率是开关频率和负载的函数。T.Zaitso 和 S.Hamamura 等人研究了在固定开关频率下通过脉冲宽度调制 (PWM: Pulse Width Modulation) 和在固定负载下通过脉冲频率调制 (PFM: Pulse Frequency Modulation) 有效控制压电变压器功率转换器的输出电压^[13], 如图 7 所示。

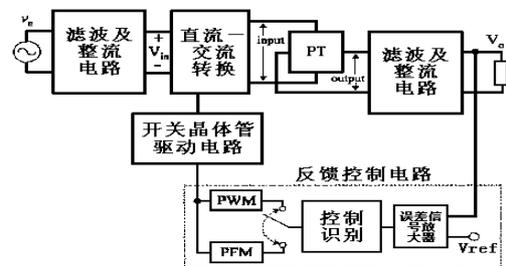


图 7 PWM 和 PFM 控制压电变压器转换器简图
Fig.7 Block diagram of PWM and PFM controlled piezoelectric transformer converter

(4) 压电变压器等效物理模型的研究

压电变压器物理模型的建立, 有利于研究人员弄清压电变压器的各种特性与压电材料特性参数和压电变压器结构尺寸之间的关系, 分析压电变压器等效电

路和等效参数，对制定压电变压器合理的设计方案、对器件性能的改进和提高以及压电变压器在实际电路中的应用都具有重要的指导意义。常见的对压电变压器工作模式分析的物理模型有两种：等效电路分析和有限元方法。J.A. Oliver 等人提出 1D 模型结合电路定向模拟程序 SPICE 从激励层、体材料、电极连接、温度效应等方面描述了多层压电变压器的工作模式^[14]。Y. Jin 等人则利用有限元分析软件提出了一种 Rosen 型压电变压器 3D 模型，分析了压电变压器工作状态下的位移、应力和电场分布^[15]。E. Dallago 等人则利用动态系统模拟软件 SIMILINK 对压电变压器 DC/DC 转换器及其控制电路进行开路模拟和闭合回路模拟，并用实验数据加以验证。L.H.Hwang 等人则用 MATLAB 和 PSPICE 软件模拟了压电变压器驱动冷阴极荧光灯 CCFL 时输出电流和电压随输入信号频率和负载变化的特性。Hyun-Woo Joo 等人采用等效电路方法结合有限元分析（如图 8 所示），模拟了压电变压器的频率-阻抗、升压比-负载等等之间的关系。黄以华等人使用线性压电方程结合相关的弹性理论对正在发展中的径向振动型压电变压器进行了分析和研究，导出了该压电变压器的等效电路模型（如图 9 所示），并根据电路模型得出径向振动压电变压器的输入阻抗、输出阻抗、升压比、输出功率及效率等特性的数学表达式，并通过实验加以验证。

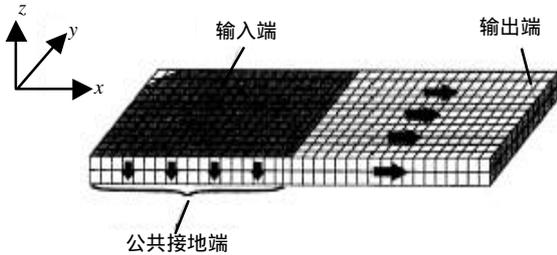


图 8 Rosen 型压电变压器有限元分析模型

Fig.8 Finite element model for Rosen-type piezoelectric transformer

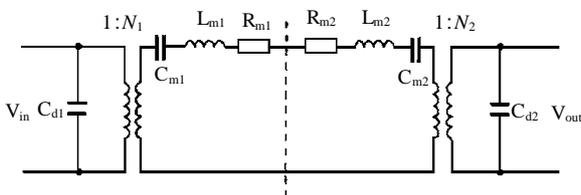


图 9 径向振动压电变压器集总参数等效电路

Fig.9 Equivalent circuit of radial vibration piezoelectric transformer

3 未来展望

根据压电变压器对陶瓷材料的性能要求：机械强度高，能在大功率下工作、较高的压电常数 d_{33} 、高的机电耦合系数 k 、低的介质损耗 $\text{tg}\delta$ 值、高的机械品质

因数 Q_m ，今后压电变压器的发展依然从高性能压电材料、合适的几何结构设计、高效的匹配电路等方面考虑。由于功率较小和可靠性等问题，目前商品化的压电变压器产品不多，与传统的电磁变压器比较，压电变压器还有很大的发展空间。

随着电子工业的发展，要求电子元器件向小型化和集成化方向发展，压电变压器也要向这个方向发展。目前过高的烧结温度不利于压电变压器的集成化。因此，薄膜化、多层化、低温制备将是压电变压器的一个强烈的发展趋势。

参考文献：

- [1] 白辰阳, 桂治轮, 李龙土. 压电变压器的研究和开发进展[J]. 压电与声光, 1998, 20(3): 175-179.
- [2] 张福学, 孙慷. 压电学(下册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984. 426-449.
- [3] Lin Ray L, Lee Fred C, Baker Eric M, et al. Inductor-less piezoelectric transformer electronic ballast for linear fluorescent lamp[A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2001 (APEC 2001) Sixteenth Annual IEEE Volume 2[C]. 2001. 664-669.
- [4] Zaitso T, Ohnishi O, Inoue T, et al. Piezoelectric transformer operating in thickness extensional vibration and its application to switching converter[A]. Power Electronics Specialists Conference 1994 (PESC 1994) IEEE 25th Annual Volume 1[C]. 1994. 585-589.
- [5] Baker E M, Huang W, Chen D Y, et al. Radial mode piezoelectric transformer design for fluorescent lamp ballast applications[A]. Power Electronics Specialists Conference 2002 (PESC 2002) IEEE 33rd Annual Volume 3[C]. 2002. 1289-1294.
- [6] Yoo J H, Yoon H S, Yoon K H, et al. Piezoelectric characteristics of PMN-PZT ceramics for piezoelectric transformer[A]. Ultrasonics Symposium 1998 IEEE Volume 1[C]. 1998. 981-984.
- [7] Yoo J H, Lee Y W, Hwang S M, et al. Piezoelectric properties of PNV-PMN-PZT ceramics for high power piezoelectric transformer[A]. Applications of Ferroelectrics 2000(ISAF 2000) Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on Volume 1[C]. 2000. 495-498.
- [8] Hwang S M, Yoo J H, Hwang J H, et al. Piezoelectric and dielectric properties of $\text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ ceramics for piezoelectric transformer[A]. Applications of Ferroelectrics(2002 ISAF) 2002 Proceedings of the 13th IEEE International Symposium[C]. 2002. 367-370.
- [9] De Vries J W C, Jedeloo P, Porath R, et al. Co-fired piezoelectric multilayer transformers[A]. Ferroelectrics 1996 (ISAF 1996) Proceedings of the Tenth IEEE International Symposium on Applications of Volume 1[C]. 1996. 173-176.
- [10] Sanz M, Alou P, Prieto R, et al. Comparison of different alternatives to drive piezoelectric transformers[A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition 2002 (APEC 2001) Seventeenth Annual IEEE Volume 1[C]. 2002. 358-364.
- [11] Dallago E, Danioni A, Ricotti G. Resonant driving control for low power supplies with piezoelectric transformer[J]. Electron Lett, 2002, 38(22): 1400-1401.
- [12] Lin C Y, Lee F C. Design of a piezoelectric transformer converter and its matching networks[A]. Power Electronics Specialists Conference 1994 (PESC 1994) IEEE 25th Annual Volume 1[C]. 1994. 607-612.
- [13] Hamamura S, Kurose D, Ninomiya T, et al. Piezoelectric transformer AC-DC converter over a worldwide range of input voltage by combined PWM and PFM control[A]. Power Electronics Specialists Conference 2001 (PESC 2001) IEEE 32nd Annual Volume 1[C]. 2001. 416-421.
- [14] Oliver J A, Prieto R, Sanz M, et al. 1D modeling of multi-layer piezoelectric transformers[A]. Power Electronics Specialists Conference 2001 (PESC 2001) IEEE 32nd Annual Volume 4[C]. 2001. 2097-2102.
- [15] Jin Y, Foo C F, Zhu W G. Three-dimensional simulation of piezoelectric transformer for the switching power supply[A]. Industrial Electronics Society 1999 (IECON 1999) Proceedings. IEEE 25th Annual Conference Volume 1[C]. 1999. 295-299.

(编辑：傅成君)