

压电陶瓷变压器的发展——回顾与展望

黄以华, 周康源, 陈昕, 胡耀辉
(中国科学技术大学工程与信息科学系, 合肥 230027)

摘要: 文章简要介绍了压电变压器的工作原理, 给出了压电变压器几个重要工作特性的数学表达式, 并对压电变压器的发展过程进行了简要的回顾。在此基础上, 文章着重对压电变压器在研发过程中所涉及的五方面的问题进行了详细的探讨与说明, 作者讨论了压电变压器等效电路模型的改进措施及压电变压各个特性的研究状况, 分析和对比了各种用于制作压电变压器的压电材料的优缺点及其性能的改进方法, 探讨了各种振动模式作用于压电变压器的效果, 总结了压电变压器的制作工艺及结构对其特性的影响效果, 给出了压电变压器的具体应用的例子, 并指出了压电变压器今后的发展方向及有待解决的问题。

关键词: 压电变压器; 陶瓷材料; 振动模式
中图分类号: TB552 **文献标识码:** A

The development of piezoelectric transformer—review and expectation

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)

Abstract: In this paper, the basic operating principle of the piezoelectric transformer is introduced, the major formulas about the characters of the piezoelectric transformer are given, and the history of the piezoelectric transformer is reviewed. After this, the author discussed and explained five important problems about the research and development status of the piezoelectric transformers in detail. The improvement methods of the equivalent circuit and the research status of the piezoelectric transformer are discussed, the advantages and disadvantages of the piezoelectric materials used to fabricate the piezoelectric transformers are compared, the effects of several vibration modes used in piezoelectric transformer are explained, the fabricating crafts and the structure of the piezoelectric transformers are summed. At last, the problems that need to be solved and the developing directions in the future are showed.

Key words: piezoelectric transformer; ceramic material; vibration mode

1 引言

压电陶瓷变压器(以下简称压电变压器)最早由美国 G. E. Motorola Zenith 的 C. A. Rosen 等发明并申请专利, 是一种工作在音频或超音频范围内的固体电子变压器。同传统的铁芯线绕电磁变压器相比, 具有体积小、重量轻、使用时不击穿、变压器本身耐高温、不怕燃烧、无电磁干扰且结构简单, 制作工艺简便, 易批量生产等优点。

尽管压电变压器有多种多样的形式, 但其基本工作原理是一样的。以 Rosen 型中的一种为例(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(或接近), 则压电变压器内部形成驻波, 产生大幅度的应力和应变分布, 如图 2 所示。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。

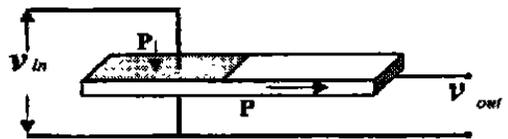
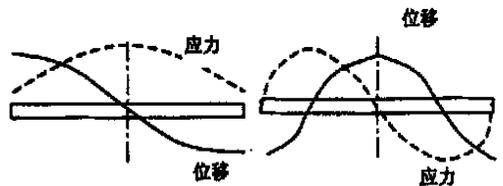


图 1 Rosen 型压电变压器



a. 半波模式

b. 全波模式

图 2 应力和位移分布

收稿日期: 2001-02-19; 修订日期: 2001-04-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目

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

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^[1,2,3]。空载的情况下, 压电变压器在谐振时的开路升压比为:

$$G_{\infty} = \frac{V_0}{V_i} = \frac{4}{\pi^2} Q_m k_{31} k_{33} \frac{L}{t} \quad (1)$$

最大功率传输效率为 $\eta_m = \frac{1}{1 + (\pi^2 / 2k_{33}^2 Q_m)}$ (2)

最大效率时的升压比为 $G_{\eta_m} = G_{\infty} / \sqrt{2} [1 + (2k_{33}^2 Q_m / \pi^2)]$ (3)

最大输出功率时的升压比为 $G_{p_m} \approx \frac{1}{2} G_{\infty}$ (4)

各式中 G_{∞} 为空载时的升压比; Q_m 为材料的机械品质因数; 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) 式可以看出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。

压电变压器的发展历经了 40 多年的历程。50 年代时, 由于材料性能限制, 所制成的实际器件的升压比仅为 50~60 倍, 实用上未引起人们的重视; 60~70 年代, 由于 PZT 材料的发展, 压电变压器的研究工作进入较活跃的时期。土屋英俊对压电变压器进行了深入的理论分析和特性改良, 使其在升压比和输出功率等特性上初步达到实用的水准, 但应用范围仍很有限; 80 年代主要侧重于驱动方式和等效电路等方面的基础研究工作; 进入 90 年代, 随着薄型电源和高频 (> 2MHz) 开关电源对压电变压器的迫切需要, 加之三原系、四原系压电材料的出现, 压电变压器的基础研究工作 and 应用研究工作空前活跃。实用专利和实用产品的数目明显增加。

压电变压器的研发过程涉及许多方面的内容, 包括基础理论、材料、振动模式、工艺结构、应用等方面的研究工作, 下面分别就这几个重要的方面进行详细的说明。

2 基础研究

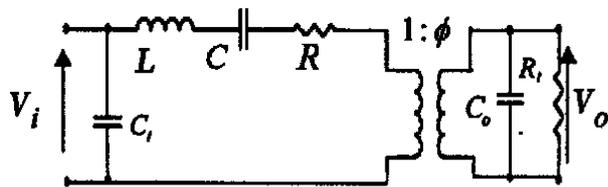
2.1 理论等效模型的研究与发展

压电变压器的理论等效模型 (图 3) 源自于 Mason^[4], 70 年代土屋英俊^[5] 利用其对压电变压器进行了深入的分析, 奠定了理论基础, 主要结论即为公式 (1)~(4)。后人在对原有等效电路模型进行了继承和发展, 如: 在输入输出端各串联一个电阻, 或用受控源代替理想变压器等。事实上这些模型及改进都是一维的, 但实际的压电变压器是三维的, 所以 Y. Jin、C. F. Food 和 W. G. Zhu 提出了三维模型。

这两种模型不仅对压电变压器的优化设计有很大的作用, 而且对于压电变压器各项性能的分析有很大的帮助。

2.2 基本特性的研究

进入 90 年代以来, 日、美、韩等国及 Philips、Siemens 等世界知名的大公司相继资助一些研究机构和个人对现有的和处于开发过程中的压电变压器的基本特性进行广泛深入的研究, 以下是对其特性研究的一些主要结果:



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 3 压电变压器的等效电路

(1) 负载特性。当负载一定时, 压电变压器的输出电压与输入电压在一定范围内成线性关系, 当负载阻抗足够大时升压比可达到千倍以上, 并且随着负载阻抗的增大, 升压比还可进一步提高。另外, 压电变压器的谐振频率会随着负载的变化而波动。

(2) 功率特性。美国的 Anita M. Flynn^[6] 对压电变压器在一个工作周期中机电能量转换与能量传输过程中的基本限制进行了研究和计算。其研究表明, 若分别将最大电场力、最大表面电荷密度、最大应变及最大应力施加于压电变压器上, 会发现, 真正对压电变压器的功率承载能力造成限制的原因是施加于其上的最大机械应力。对于 PZT-5H 样品而言, 在其一个工作周期中 (100kHz), 其上的功率密度可达 $330\text{W}/\text{cm}^3$ 。

(3) 温度特性^[7]。Kouichi Kanayama 使用有限元分析的方法, 模拟了由温度引起的压缩应力在压电变压器的分布状况。结果表明, 在压电变压器的输入和输出部分的中部存在压缩应力集中的现象, 并且, 随着输出功率的增加, 压缩应力也会加大。这种应力在一定的条件下 (输出功率 14W) 对由极化处理过程中产生在压电变压器上的残余张应力的补偿作用可达 23%。所以, 如果选择具有适当的各向异性温度扩张系数的压电陶瓷材料制作的变压器, 则其在大功率信号驱动下工作时, 沿振动方向的热应力对防止输入部分的毁坏可起到预防的作用。

另外, 温度还会对压电变压器的谐振频率产生影响^[8], 从而影响到升压比和效率。理论分析表明,

压电变压器的工作频率 $f = v/2l$, 式中 v 为压电变压器中的声速, l 为压电变压器的长度。当温度升高时, v 和 l 均发生变化, 导致 f 的变化。随着温度逐渐升高, 压电变压器的谐振频率先是升高, 达到一定温度时(视材料而定), 反而随着温度的继续升高而下降。

(4) 谐振特性。压电变压器相当于一个具有放大功能的窄带滤波器, 只有当输入信号(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, 当输入信号的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, 这与本实验室的实验结果是一致的。

(5) 几何尺寸的影响。压电变压器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及研究结果表明: 压电变压器的升压比(增益) G 、功率传输效率 η 在一定程度上取决于长宽比 l_L/l_W 和长厚比 l_L/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, 长宽比 l_L/l_T 小的压电变压器其性能要优于长宽比 l_L/l_T 大的压电变压器; 对于大阻抗负载, 情况正好相反。

3 压电陶瓷变压器材料的研究与发展

制作压电变压器的陶瓷材料从钛酸钡到锆钛酸铅和以锆钛酸铅为基础的三元系、四元系压电陶瓷材料, 其发展的种类日益增多, 成分结构渐趋复杂, 性能不断提高。

3.1 钛酸钡(BaTiO_3)

BaTiO_3 在二战中的 1942-1945 年间由美、日、苏分别发现, 它是一种具有高介电常数的电介质材料。进一步着眼于其异常大的介电常数开展研究的 MIT 的 Hippel, 曾于 1946 年证实了 BaTiO_3 是新的铁电体。但是对于由微小晶粒组成的烧结体陶瓷的压电效应当时还未知晓。与 Hippel 同一实验室研究电压对 BaTiO_3 陶瓷介电常数影响的 Robert 于同一年发现了在这种铁电体陶瓷上加直流高压后会显示出压电效应。这一发现与压电陶瓷的诞生同时成为压电效应实用化达到飞跃提高的主要原因。 BaTiO_3 的特点是: 不溶于水、高耦合因子、易于制备和加工、价格低廉等。同时, 它也是最先用于压电变压器的一元系陶瓷材料。但是, 这种材料带有致命的缺点——在室温条件下, 由于晶体的第二相变所产生的恶劣的温度系数。另一个缺点是居里点偏

低, 老化过快。这两个缺点制约了该材料在压电变压器上的进一步应用, 同时也在一定程度上制约了压电变压器的发展和应用。

3.2 锆钛酸铅系压电陶瓷

研究人员试图通过改变 BaTiO_3 的第二相变来改善其温度特性。他们发现, 在 BaTiO_3 原料中加入 Ca 或 Pb 后, 特别是加入 Pb 后会产生巨大的效果, 材料的第二相变点 $< -20^\circ\text{C}$, 居里点 $> 120^\circ\text{C}$ 。对钛酸铅和锆酸铅中第二相变的研究导致了 PZT 系陶瓷材料的发现。这种材料是 PbZrO_3 和 PbTiO_3 的固溶体, 是一种二元系的压电材料。较 BaTiO_3 而言, PZT 具有良好的温度、抗老化及压电效应等。其性能可通过调节材料中的锆钛比或加入 Fe^{2+} 、 Co^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 等杂质得到提高。应用于压电变压器的材料配方为类似于 PZT-8 的组分。特点为: k_{31} 、 k_{33} 、 d_{31} 、 d_{33} 及 Q_m 均较高, ϵ 低, 温度系数低, 性能稳定。

3.3 三元系压电陶瓷材料

该材料是在 PZT 的基础上发展起来的, 其特点为: 烧结性好, 烧结温度低, 因此在烧结过程中 PbO 挥发少, 成品的气孔率低, 质地均匀致密。该材料的性能还可在大范围内调整。加之通过同价位元素取代和添加杂质等方法改性, 能得到比 PZT 更为优越的压电材料。所以 60 年代后期得以迅速发展。常见的可用于压电变压器的三元系压电陶瓷材料有以下几种:

(1) 铌镁锆钛酸铅系。主成分为 $x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - y\text{PbTiO}_3 - z\text{PbZrO}_3$ 。特点是高 k_p 、高介电常数、较大的 Q_m 、和较好的稳定性, 用途广泛。改变 x 、 y 、 z 的比例, 添加微量的 NiO 、 MnO_2 、 Fe_2O_3 , 可得到用于压电变压器的压电陶瓷材料。

(2) 铌锌锆钛酸铅系。主成分为 $x\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - y\text{PbTiO}_3 - z\text{PbZrO}_3$ 。特点是稳定性好、致密度高、绝缘性能和压电性能优良。通过改变 x 、 y 、 z 的比例及适当掺入 MnO_2 、 Ni_2O_3 , 可获得高 k_p 、 Q_m , 低介电损耗, 工艺性好的压电变压器陶瓷材料。

(3) 铈锰锆钛酸铅系。主成分为 $x\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - y\text{PbTiO}_3 - z\text{PbZrO}_3$ 。特点是压电性能受机械应力和电负载的影响极小。应用于压电变压器时 10000h 后, 特性几乎没有变化。

(4) 铈锰锆钛酸铅系。主成分为 $x\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3 - y\text{PbTiO}_3 - z\text{PbZrO}_3$ 。特点是 k_p 、 Q_m 都很高, 谐振频率的时间和温度稳定性好, 特别适用于

压电变压器。

3.4 四元系压电陶瓷材料

为了得到更好的压电陶瓷材料, 研究人员在三元系压电陶瓷材料的基础上发展出了四元系压电陶瓷材料。其特点为: 高 k_p 、高 Q_m 、高 ϵ 、高矫顽场 E_c 和高机械强度, 低损耗、低劣化, 稳定性好, 工艺性好等优点。适用于压电变压器的四元系压电陶瓷材料很多, 如 $Pb(Sn_{1/3}Nb_{2/3})_A(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_B TiC ZrD_3$ 系 $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_A(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_B TiC ZrD_3$ 系和 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_A(Mn_{1/3}Nb_{2/3})_B TiC ZrD_3 O_3 Pb(Li_{1/4}Nb_{1/4})_0.06(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_0.06(Zr_{0.88-x}Ti_x)O_3$ 等等。

4 振动模式的研究

选择何种振动模式将直接影响到压电变压器的性能, 多年来研究人员尝试了多种振动模式的效果, 下面就几种适用于压电变压器的振动模式作一总结。

4.1 纵波振动模式

此模式使用最为广泛, 最早的 Rosen 型的压电变压器即采用此模式。即输入端采用横向逆压电效应, 输出端采用纵向压电效应。当输入端施加交变的电压时, 压电变压器内部形成驻波, 产生大幅度的应力和应变分布。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。

4.2 厚度扩张振动模式^[9-11]

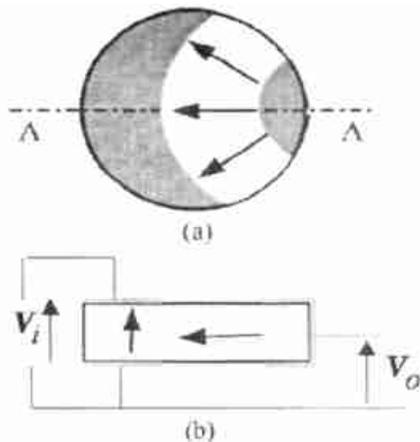
除了纵波振动模式之外, 厚度扩张振动模式是目前开展研究最广泛、深入和最成熟实用的模式。最值得引起注意的是 Tishiyuki Zaitso 等人开发的大功率叠层变压器(单层输入多层输出), 工作于 2MHz, 90% 的效率, 4.4W 的输出功率。他们还开发出另一种降压变压器(单层输入单层输出), 并将其与 ZVS 技术相结合制作出 DC-DC 变换器, 效率达 72%, 输出功率 5W, 降压比约 8:1。NEC 公司的 Osamu Ohnishi 等人也开发出类似的变压器, 理论效率 90%, 功率密度 20W/cm³。

4.3 剪切模式

对于大多数以 PZT 为基本材料而言, 剪切模式的机电耦合系数是横向模式的两倍。Burthanettin KOC, Sedat ALKOY^[12] 等人利用这一点设计出圆形的压电变压器(图 4), 其输入端为新月形电极, 输出端的极化方向为放射状, 这样就可以利用平面和剪切耦合模式而不是横向耦合模式。他们还采用了

声学技术

ATILA 有限元分析软件分析变压器的工作特性及优化电极的形状和极化方向的布置。制成的实际器件的性能要优于同等材料的长方型变压器。



(a) 俯视图; (b) 截面图(A-A)
图 4 圆型的压电变压

4.4 能陷模式

传统的平板式压电变压器其支撑点仅在其振动的节点上。对于高功率应用, 刚性支撑是必要的。为了将压电变压器应用于大功率电子线路, 富士通公司的 M. Ueda, M. Satoh 等人^[13], 研究了功率传输及如何支撑压电片。他们提出了一种使用 LiNbO₃ 晶片工作在宽度剪切能陷振动模式的压电变压器, 该器件不同于常见的变压器, 其上下表面沉积有离散叉指电极, 能量被限制在压电片中间叉指电极部分, 因此压电片的上下表面能够牢固支撑。此外离散叉指电极在上下表面的这种布置方式可以减小内部损失, 提高功率极限, 抑制干扰模式。新型的压电变压器使用 X 切割 LiNbO₃ 晶片, 用 5MHz 信号驱动。

除了上述振动模式, 还有平面振动模式, 但实用范围有限, 在此不再赘述。

5 结构与工艺

Rosen 型压电变压器虽然仍是目前最常用的类型, 但是这种类型的压电变压器存在一个致命弱点, 即: 工作在谐振状态下时, 压电片上有两个振幅为零的节点, 位于离两端端面四分之一处。这类变压器的输入导线焊接在一个节点的位置, 而输出导线焊接在输出电极上, 而这正是振动位移最大的位置, 严重影响了导线和电极连接的可靠性。另外, 导线的重量和连接方式也阻碍了变压器的振动^[10, 14], 变压器的功率也不易做得很大。因此大量研究人员投入到变压器的改进工作上来。他们所做的工作从工艺

与结构的角来讲,包含三方面的工作:压电片的外形、电极的形状、分布和叠层变压器。当然这三者之间是相互关联的。从目前出现的压电变压器的形状来说有圆形^[12]、正方形^[15,16]、哑铃形^[17]等等。从电极的形状、分布来说, NEC 公司的 3 次 Rosen 型压电变压器很有特点,其两端为输入端,中间为输出端,整个变压器瓷片上有 3 个节点,引出引线都焊接在这 3 个节点的位置。以这种 3 次 Rosen 型压电变压器制作的 LCD(液晶显示器)背景光 CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp,冷阴极管。下同)电源包括驱动电路在内整体尺寸为 75mm × 22mm × 7.6mm,重量 14g,输入电压范围 7V~20V,转换效率为 92%,工作于 130kHz。另外还有叉指形电极^[13]、新月形电极等。从叠层技术来讲,分为单层输入单层输出^[9,18]、单层输入多层输出^[11]、多层输入单层输出^[19]及多层输入多层输出^[20,21]等 4 大类。值得一提的是,叠层技术的实现同陶瓷流延成膜和陶瓷/内电极共烧技术(即多层片电容器 MMLC 技术)是密不可分的。

6 应用研究

压电变压器经过前 30 年的研究与发展,近 10 几年来开始得到大量应用。

6.1 CCFL 驱动器

压电变压器最典型的应用之一就是驱动 CCFL,原因是 CCFL 的工作特性非常适合于压电变压器的特性。压电变压器的特点是输出阻抗高,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,阻抗较启动时下降数 10kΩ。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。

6.2 DG-DC(直流-直流)变换器

直流变换器也必须做到小型化和轻量化。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(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)、IEC(国际电工委员会)和 CISPR(无线电干扰特别委员会)等的标准。特别是其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

制作的 DC-DC 变换器如图 5 所示。

基本的工作过程为:开关 S_1 和 S_2 以非常短暂的同时截止时间(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。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型 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。本实验室在此图中所用的压电变压器仅重 6.5 克,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。

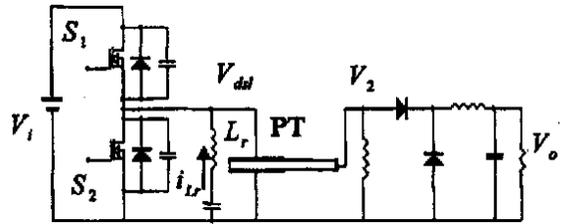


图 5 DG-DC 变换器

6.3 其它应用及专利

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,即利用其输出电极引线尖端放电引爆高压雷管。民用方面的应用就更多了。例如霓虹灯驱动器、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、田村制作所先后向市场推出的用压电变压器制成的 LCD 背光电源,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 的第三代手机背景驱动电源, Tamura 公司的 HBL 系列产品等。

7 今后的发展

压电变压器今后将向高功率、高效率、高可靠性的方向发展,所以必须进一步做好以下工作:①对各种成分的压电陶瓷的高功率特性进行研究;②建立完整的压电变压器设计方法;③建立叠层压电变压器电特性估计的方法;④研究压电变压器的驱动方法(由恒定电流驱动而稳定工作以及完全无电感的变压器);⑤建立压电变压器特性的精确测定方法。通过上述工作,压电变压器的应用范围必将得到进一步拓展。

参考文献

- [1] Rosen C. A. Ceramic transformers and wave filters[C].

- [2] Katz H. W. Solid state magnetic and dielectric devices [M]. London: John Wiley & Sons, 1959. 170-197.
- [3] Li Longtu, Yao Yijing, Mu zhenhan. Piezoelectric ceramic transformer [J]. Ferroelectrics, 1980, 28(1): 403-406.
- [4] W. P. Mason Electric-Mechanical Transducers and Wave Filters [M]. New York: D. Von Nostrand co, 1948. 735-741.
- [5] 土屋英俊 使用强介电特性材料的压电变压器 [J]. 电子学报 (日), 1961, 4(3): 6369.
- [6] Flynn A. M. , Sanders S. R. Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformers [A]. IEEE Power Electronics Specialists Conference Vol. 2, [C], 1998. 1463-1471.
- [7] Kanayama K. Thermal analysis of a piezoelectric transformer [A]. IEEE Ultrasonics Symposim Vol. 1. [C], 1998. 901-904.
- [8] 白辰阳, 桂治轮, 李龙土 多层压电变压器基本工作特性的研究 [J]. 压电与声光 1998. 20(6): 321-324.
- [9] Zaitzu T. , Ohshini O. , Innuue T. Piezoelectric transformer operating in thickness extensional vibration and its application to switching converter [A]. Power Electronics Specialists Conference 1994. PESC 94 Record. 25th Annual IEEE Vol. 1 [C], 1994. 595-589.
- [10] Oshini O. , Kishie H. , Iwamoto A. Piezoelectric ceramic transformer operating in thickness extensional vibration mode for power supply [A]. Ultrasonics Symposium 1992 Proceedings. 1992 IEEE Vol. 1 [C], 1992. 981-984.
- [11] Zaitzu T. , Inuo T. , Oshini O. 2 MHz power converter with piezoelectric ceramic transformer [A]. Telecommunication Energy Conference 1992. INTELEC' 92. 14th International [C], 1992. 430-437.
- [12] Koc B. , Alkoy S. , Uchino K. A circular piezoelectric transformer with crescent shape input electrodes [A]. Ultrasonics Symposium 1999 Proceedings. 1999 IEEE Vol. 2 [C], 1999. 931-934.
- [13] Ueda M. , Satoh M. , Ohtsu S. Piezoelectric transformer using energy trapping of width shear vibration in LiNbO₃ plate [A]. Ultrasonics Symposium 1992. Proceedings. , 1992 IEEE, Vol. 1 [C], 1992. 977-980.
- [14] Shoyama M. , Horikosh K. , Ninomiya T. Steady-state characteristics of the push-pull piezoelectric inverter [A]. Power Electronics Specialists Conference 1997. PESC. 97 Record. 28th Annual IEEE Vol. 1 [C], 1997. 715-721.
- [15] Kawashima S. , Oshini O. , Kawamata H. Third order longitudinal mode piezoelectric ceramic transformer and its application to high-voltage power inverter [A]. Ultrasonics Symposium. 1994. Proceedings. 1994 IEEE, Vol. 1 [C], 1994. 525-530.
- [16] Sung-Jin choi. , Kyu-Chan Lee. , Cho B. Design of fluorescent lamp ballast with PFC using a power piezoelectric transformer [A]. Applied Power Electronics Conference and Exposition. 1998. APEC' 98. Conference Proceedings 1998. 13th Annual 1998 Vol. 2 [C], 1998. 1135-1139.
- [17] Sakurai K. , Shindou S. , Oshinishi K. Piezoelectric ceramic transformer using radial vibration mode disks [A]. Ultrasonics Symposium 1998. Proceedings. , 1998 IEEE, Vol. 1 [C], 1998. 939-944.
- [18] Smidt P. J. M. , Duarte J. L Powering neon lamps through piezoelectric transformers [A]. Power Electronics Specialists Conference. 1996. PESC 94 Record. 27th Annual IEEE Vol. 1 [C], 1996. 310-315.
- [19] Zaitzu T. , Shigehisa T. , Inoue T. Piezoelectric transformer converter with frequency control [A]. Telecommunication Energy Conference 1995. INTELEC' 95. 17th International 1995 [C], 1995. 175-180.
- [20] Yamane T. , Hamamura S. , Zaitzu T. Efficiency improvement of piezoelectric transformer DG-DC converter [A]. Power Electronics Specialists Conference 1998. PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Vol. 2 [C], 1998. 1255-1261.
- [21] Katsuno M. Fuda Y. Piezoelectric transformer using interdigital internal electrodes [A]. Ultrasonics Symposium 1998 Proceedings, 1998 IEEE Vol. 1 [C], 1998. 897-900.

(上接第 121 页)

进行主动控制。本文采用压电陶瓷作动器作为控制力源,进行有源控制的数值计算。结果表明,抵消前 k 阶声辐射模态和声功率最小化这两种控制策略的控制效果基本相同。

参考文献:

- [1] Fuller C R. Optimal placement of piezoelectric actuators and polyvinylidene fluoride error sensors in active structural acoustic control approach [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1992, 92(3): 1521-1533.
- [2] Borgiotti G V. The power radiated by a vibrating body in an acoustic fluid and its determination from boundary measurements [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1990, 88(4): 1884-1893.
- [3] Photiaia D M. The relationships of singular value decomposition to wave-vector by three-dimensional structures [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1990, 88(4): 1152-1159.
- [4] Cunfare K A. On the exterior acoustic radiation modes of structure [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1994, 96(4): 2302-2312.
- [5] 毛崎波, 姜哲. 对声辐射模态的讨论 [J]. 振动工程学报, 2000, 13(4): 633-637.
- [6] 毛崎波, 姜哲. 通过声辐射模态研究结构噪声的有源控制 [J]. 江苏理工大学学报, 2000, 21(4): 1-6.
- [7] 毛崎波, 姜哲. 通过声辐射模态研究结构声辐射的有源控制 [J]. 声学学报, 2001, 26(3): 277-281.