

压电变压器的原理、研究及应用*

朱奕蔓[†] 张光斌 贺西平 李 瑁

(陕西师范大学应用声学研究所 西安 710062)

摘 要 压电变压器是一种性能优良的电子器件,它的转换效率高,变压比大,结构简单,体积小,无电磁噪声,稳定性好,相对于传统的电磁变压器优势明显.文章对压电变压器的原理及器件结构、特点作了简单的介绍,对目前的研究和应用状况作了简要综述,对压电变压器的发展趋势进行了展望.

关键词 压电变压器,压电效应,变压器

The principle and applications of piezoelectric transformers

ZHU Yi-Man[†] ZHANG Guang-Bin HE Xi-Ping Li Jun

(Applied Acoustics Institute, Shannxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract A piezoelectric transformer is a high-performance electronic device with high conversion efficiency, high variable ratio, simple structure, small size, no electromagnetic noise, and good stability, so compared to traditional electromagnetic transformers it has obvious advantages. We present a brief introduction to the principle of the piezoelectric transformer, as well as an overview of the device structure and characteristics, current research status, and applications. Future development trends are also forecast.

Keywords piezoelectric transformer, piezoelectric effect, transformer

1 引言

自问世以来,电磁变压器一直在电力系统领域发挥着重要的作用.然而,随着电子系统朝着微型化和集成化的方向飞速发展,传统的电磁变压器越来越不能满足需要,体积大、笨重、易受干扰等缺点限制了它在很多领域的应用和发展.压电变压器作为一种新型电子器件,以其自身良好的特点,解决了电磁变压器所面临的问题,符合目前电子系统的发展趋势,有着良好的应用前景.

压电变压器是一种基于压电效应的固体电子器件.它利用压电陶瓷材料的正压电效应和逆压电效应,完成机械能与电能之间的相互转换,实现电压的高低变换.1956年,Rosen^[1-4]利用压电陶瓷材料首次研制出压电变压器.从20世纪70年代起,压电变压器开始发展,但受到压电材料缺少限制,研究进展比较缓慢.近年来,随着压电材料的发展和应用要求的提高,压电变压器的研究越来越受关注.目

前,Rosen型压电变压器已经市场化,应用在静电复印机高压电源、负离子发生器、小功率激光管电源、警用电击器高压电源、液晶显示背景光源等场合.随着电子工业的不断发展,电子器件越来越小型化,国内外研究人员开始研究多层变压器、薄膜型变压器以及压电变压器与半导体芯片的集成技术.压电变压器将是未来的电路系统中一个很重要的应用部件.

2 基本原理及器件结构特点

2.1 基本原理

当压电晶体(大多为陶瓷)在外力作用下发生形变时,它的某些相对应的面上会产生异种电荷,使晶体的总电矩发生改变,产生极化,从而将机械能转

* 陕西省自然科学基金基础研究计划(批准号 2007a07)资助项目
2008-03-07 收到初稿 2008-05-14 收到修改稿

[†] 通讯联系人. Email: zyiman0201@sohu.com

化成了电能,这种将机械能转化成电能的现象称为正压电效应;反之,将电能转化成机械能的现象称为逆压电效应.正压电效应和逆压电效应合称为压电效应.

压电变压器就是利用压电效应工作的.最常见的压电变压器是 Rosen 型变压器,其结构可分为左右两部分,分别称为“驱动部分”和“发电部分”,如图 1 所示.图中 L 表示压电变压器的半长, W 表示宽, f 表示高, P 表示极化方向, T 表示振动方向.驱动部分的上、下两个端面都有烧渗的银电极,沿厚度方向极化,作为电压输入端;发电部分的右端有烧渗的银电极,沿长度方向极化,作为电压输出端.当交变电压 V_{in} 加到压电变压器的输入端时,通过逆压电效应,使压电变压器产生沿长度方向的伸缩振动,输入的电转换为机械能;而发电部分通过正压电效应,使沿长度方向伸缩振动的机械能转换为电能,产生输出电压 V_{out} .可以看出,压电变压器的工作原理可以简单地认为是驱动器和传感器的结合,即电能经过机械能又再转换成电能.

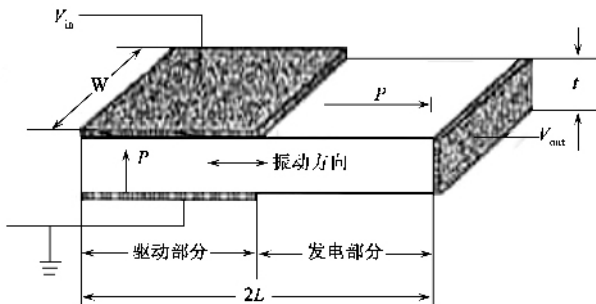


图 1 Rosen 型升压压电陶瓷变压器示意图

2.2 分类及其特点

根据升压比的不同,压电变压器可以分为升压变压器和降压变压器.可以通过对陶瓷片长度和厚度尺寸的控制来改变其工作方式,当输入阻抗小于输出阻抗时,实现的是升压;当输入阻抗大于输出阻抗时,实现的是降压.升压变压器工作在超音频范围,而降压变压器则工作在工频范围内.根据机械振动方式的不同,可以分为沿长度振动型、沿厚度振动型、轮廓扩张振动型和弯曲振动型^[5-7]等,如图 2 所示.图中 P 表示极化方向, T 表示振动方向, V_{in} 表示输入电压, V_{out} 表示输出电压.根据结构不同,压电变压器又可以分为纵纵式、横纵式、横横式和环状式等.上述的 Rosen 型压电变压器为横纵式结构.

相对于普通的电磁变压器,压电变压器有着突

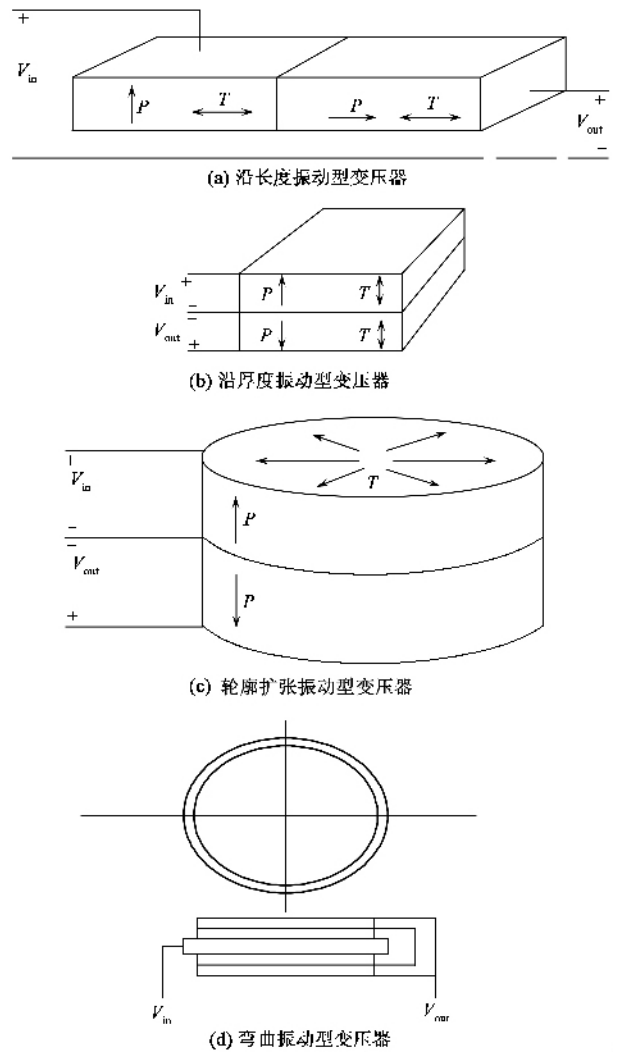


图 2 按不同振动模式分类示意图

出的优点^[8-12] (1)压电变压器有很高的转换效率.空载变压器效率可达 90% 以上,即使在应用中,平均转换效率也比电磁变压器高出十个百分点以上.这一优势使压电变压器在产品开发设计中有着相当大的吸引力.(2)工艺性好,结构简单,制作简便,易批量生产,能节约有色金属,不用磁芯.(3)升压比高.空载升压比可以高达 800 以上.调整升压比对变压器外形影响不大.(4)耐高压,不怕潮湿,不怕燃烧,抗电磁干扰,因而稳定性,可靠性较好.(5)不怕短路,使用时不会击穿.(6)输出波形好.非常有利于延长负载的寿命和工作稳定性,而且有利于提高负载的能量转换效率.(7)体积小,重量轻,符合电子产品小型化、轻薄化的发展趋势.(8)适用于电子集成领域.在与集成电路工艺兼容方面有着相当好的发展前景.

2.3 等效电路

等效电路是研究压电器件工作原理的一种重要的手段,它能直观地显示出器件的电学特性,便于分析其工作过程,利于设计和优化器件.尽管压电变压器具有不同的振动模式和机械结构,但其特性都可以用图3^[13]所示的等效电路模型来描述.

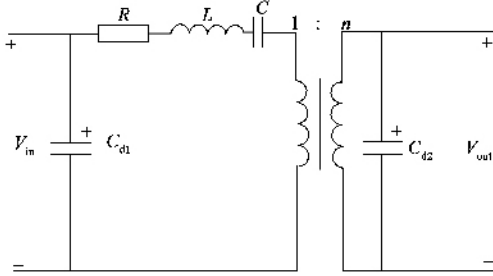


图3 等效电路图

图中 C_{d1} 和 C_{d2} 是压电变压器金属极板间的寄生电容,电感 L 与压电变压器的质量有关,电容 C 与材料的弹性劲度张量有关,它是由压电体的运动方程导出的,电阻 R 由压电变压器的介质损耗和机械品质因数 Q 决定,模型中升压比为 n 的“理想变压器”代表3个单独变换过程,即电能到机械能的转换,输入部分到输出部分的机械能转换以及机械能到电能的转换.该等效电路模型为不考虑压电变压器的多谐振或反谐振基础上根据基本的压电方程和运动方程得出的.

3 国内外研究现状^[14-16]

目前,国内外对压电变压器的研究主要集中在陶瓷材料及新型压电材料,压电变压器结构及工作模式的改进,输入输出负载及外部电路以及等效物理模型4个方面.

3.1 材料方面

对压电材料研究的主要目的是为了获得高机电耦合系数、低温度系数、低烧结温度、大功率的压电体.目前采用的研究方法主要有三种:(1)对现有材料进行掺杂改变其性能.应用最广泛的压电材料是锆钛酸铅($PbZrTiO_3$,简称PZT)陶瓷.对PZT掺杂引起晶格畸变和空间电荷的变化,改变载流子浓度,可以改善PZT材料机电特性.(2)寻找新的多元系压电材料.如清华大学研制出了低烧三元组分压电材料,湖北大学研究出了四元系PMMN压电材料等.(3)新工艺方法的研究.目前最常用的工艺是溶胶

-凝胶法,它能制备出高纯超细粉体的均匀、致密的压电陶瓷材料,但是不能与集成工艺相兼容,而其他一些技术如磁控溅射技术、脉冲激光沉积(PLD)、化学溶液沉积(CSD)和物理气相沉积(PVD)等可能会更利于集成.

3.2 结构及工作模式的改进

尽管Rosen型压电变压器的应用已经比较普遍,但是它在很多方面依然存在着不足.对其结构进行优化和对其工作模式进行改进,有利于扩展其应用范围,提高其应用性能.

目前的研究主要集中于变压器结构的改进和新振动模式的探索两个方面.美国宾州州立大学Kenji Uchino等人研制开发的月牙形电极的圆片形压电陶瓷变压器,输入电极为月牙形,极化方向和Rosen型压电陶瓷变压器相似,外形简单,设计巧妙.在负载为 50Ω 到 $200k\Omega$ 之间时,变压比介于43—60之间,而同样尺寸的方形片的变压比在40左右,工作频率在 $100kHz$ 以下,适合彩色液晶显示器背光源的应用;韩国的Juhyun Yoo等人研制的环/菱形点型电极的方形压电陶瓷变压器具有较高的转换效率,其输出端电容增加,输出端阻抗降低,使输出电流和功率都得到了有效的提高;清华大学李龙土院士率先提出了“多层压电变压器”设计思想;日本NEC公司研发出的三次多层Rosen型压电变压器,具有三个节点,所有的引出导线都焊接在这三个节点处,提供了很高的转换效率、输出功率和可靠性;香港理工大学的J Hui Hu等人研制的低压用压电变压器环形压电变压器,结构简单,制作极其方便,容易大规模批量生产,成本低,适合于低压使用,并且如果把多个环形变压器并联,可以获得更高的输出功率,它在电子系统的低压电源模块上有很不错的应用前景;浙江大学提出了利用半导体工艺制备高度集成化的薄膜型压电变压器的思想;随着复合组分体系的功能陶瓷材料的研究开发,将电子陶瓷材料与半导体集成电路工艺相结合的研究逐渐成为一个趋势,压电薄膜技术的开发成为一个全新的研究热点,基于此,研究开发膜式压电陶瓷变压器的和将压电变压器集成到半导体芯片的技术展现出了广阔的前景.

3.3 外部电路及负载匹配

压电变压器的输入电源一般为低压直流电源,外部驱动电路的作用是产生一个频率与压电变压器

振动频率相等的信号,实现良好匹配。M. Sanz 等人提出了应用在不同场合的压电变压器驱动电路;E. Dallago 等人采用频率跟随技术,优化了驱动电路,克服了因负载变化和温度变化引起的频率匹配问题。

压电变压器的输出级可以看成是等效阻抗。为了使等效阻抗与理想负载阻抗匹配,必须设计合适的输出匹配电路;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、压电变压器和匹配电路之间的关系;基于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(pulse width modulation, PWM)和在固定负载下通过脉冲频率调制(pulse frequency modulation, PFM)有效地控制了压电变压器功率转换器的输出电压。

3.4 等效物理模型

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 等人提出的 ID modeling 方法描述了多层压电变压器的工作模式;Hyun-Woo Joo 等人采用有限元和等效电路的方法,分析了压电变压器的工作特性,包括其频谱特性、输出阻抗、升压比等的变化机理;E. M. Syed 等人提出的采用传输线理论方法计算压电变压器的动态特性等;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。更多的研究还在进行当中。

4 应用及发展趋势

4.1 目前的应用

压电变压器的诸多优点为其开辟了广阔的应用前景。目前,压电变压器的应用已经相当广泛。

压电变压器可用作高压发生器。在高压发生器应用领域,多以 Rosen 型压电变压器为主,通过增加长厚比,来达到提高升压比的目的。压电变压器可用于在冷阴极管的驱动器中,利用压电变压器替代电磁式变压器,克服了电磁式变压器用于冷阴极管驱动器时易被击穿、电磁干扰严重、功率损耗较大、难以使驱动器实现平面化和轻量化的缺点,使冷阴极管驱动器的整体性能得到大幅度提高,应用的实例有静电复印机高压电源、警用电击器高压电源、高压连续可调稳压器、高压脉冲点火器等;压电变

压器用于 AC-DC、DC-DC 等功率器件,解决了传统的电磁变压器工作于高频时存在的电磁泄漏严重、损耗大的缺点,已经开发出的产品有手机充电器、电脑笔记本的整流器等;压电变压器还可用于负离子发生器、小功率激光管电源、液晶显示背景光源、手机的背景光驱动、臭氧发生器、等离子激发器、打印机等;近来又出现了把变压器用于驱动超声马达的研究。

4.2 发展趋势和前景

微电子技术的发展促进了薄膜技术的出现,使得低温沉积择优取向的压电薄膜成为可能,从而使压电薄膜工艺与半导体工艺的兼容也成为可能。利用半导体工艺制备高度集成化的薄膜型压电变压器的研究已经在进行中,它将比目前的压电变压器具有更高的效率、更大的功率、更低的损耗和更加稳定的输出,体积也会大幅度缩小,有望成为一种新型的高效微型化的压电变压器。而且由于微电子机械系统(MEMS)制造技术的成熟,压电变压器可以直接与半导体芯片集成或者二次集成。所以,压电变压器的发展趋势将是由块状向薄膜化发展,由分立器件向集成化的方向发展。在未来的应用中,它将不仅仅是传统的电磁变压器的替代,更重要的是将成为电路系统微型化后电压转换必不可少的部件。

参 考 文 献

- [1] Rosen C A. Ceramic transformers and wave filters. In: Proceedings of Electronic Component Symposium. 1957:205
- [2] 张福学. 现代压电学(中册). 北京:科学出版社,2002. 152 [Zhang F X. The Study of Modern Piezoelectric. Beijing: Science Press 2002:152(in Chinese)]
- [3] 深圳富佳成电子有限公司. 世界产品与技术,2000(3):7 [Shenzhen's Fujiacheng Electronics. World Products and Technologies, 2000(3):7(in Chinese)]
- [4] 彭军,谢运祥,徐九玲. 电工技术志,2002(10):71 [Peng J, Xie Y X, Xu J L. Electrotechnical Journal, 2002(10):3(in Chinese)]
- [5] 黄以华,施俊,周康源. 电子学报,2003,31(11):1164 [Huang Y H, Shi J, Zhou K Y. Chinese Journal of Electronics, 2003, 31(11):1164(in Chinese)]
- [6] 陈超,黄以华. 电子学报,2003,31(8):1190 [Chen C, Huang Y H. Chinese Journal of Electronics, 2003, 31(8):1190(in Chinese)]
- [7] 白辰阳,桂治轮,李龙土. 压电与声光,1998,20(3):175 [Bai C Y, Gui Z L, Li L T. Piezoelectrics and Acoustooptics, 1998, 20(3):175(in Chinese)]
- [8] Conference and Exposition 2002 (APEC 2001) Seventeenth Annual IEEE, Volume 1, 2002

- [9] Joo Hyun-Woo , Lee Chang-Hwan , Jung Hyun-kyo. Ultrasonics Symposium 2001 IEEE , 2001 , 1 :459—462
- [10] 黄耀庭 , 凌志远. 电子元件与材料 2004 , 23(1) :7[Huang Y T , Ling Z Y. Electronic Components and Materials , 2004 , 23(1) :7(in Chinese)]
- [11] 柴荔英 , 夏冬林 , 张向红等. 湖北大学学报(自科版) , 2000 , 22(4) : 352[Chai L Y , Xia D L , Zhang X H *et al.* Journal of Hubei University 2000 22(4) 352(in Chinese)]
- [12] Dallago E , Danioni A , Ricotti G. Electron Lett. , 2002 , 38(22) :1400
- [13] 胡晓冰 , 李龙士 , 功能材料 2002 , 33(6) :590[Hu X B , Li L S. Journal of Functional Material , 2002 , 33(6) :590(in Chinese)]
- [14] 侯育冬 , 高峰. 电子元件与材料 2003 , 22(11) :16[Hou Y D , Gao F. Electronic Components and Materials , 2003 , 22(11) :16(in Chinese)]
- [15] 金浩 , 董树荣 , 王德苗. 电子元件与材料 , 2002 , 21(9) :28 [Jin H , Dong S R , Wang D M . Electronic Components and Materials 2002 21(9) 28(in Chinese)]
- [16] Anon. 世界电子元件 , 1997(12) :50[Anon. World Electronic Components , 1997(12) 50(in Chinese)]

· 书评和书讯 ·

科学出版社物理类重点书图书推荐

| 书名 | 作(译)者 | 书名 | 作(译)者 |
|-------------------------|---------------------|----------------------|--------|
| 狭义相对论(第二版) | 刘辽等 | 量子信息物理原理 | 张永德 |
| 经典黑洞与量子黑洞 | 王永久 | 量子力学 | 张永德 |
| 量子非阿贝尔规范场论 | 曹昌祺 | 晶体振荡器 | 赵声衡 |
| 普朗特流体力学基础(翻译) | H. 欧特尔等 | 凝聚态物理的格林函数理论 | 王怀玉 |
| 冲击相变 | 唐志平 | 惯性聚变物理 | 沈百飞 |
| 液晶物理学(影印) | P. G. de Gennes | 激光的衍射及热作用计算(修订版) | 李俊昌 |
| 临界现象理论(影印) | J. J. Binney | 微纳米 MOS 器件失效机理与可靠性理论 | 郝跃 刘红侠 |
| 软凝聚态物质(影印) | Richard A. L. Jones | 量子统计力学(第二版) | 张先蔚 |
| 量子力学原理(第四版)(影印) | P. A. M. Dirac | 输运理论(第二版) | 黄祖洽 |
| 基本粒子物理学的规范理论(影印) | T. P. Cheng | 聚变能及其应用 | 邱励俭 |
| 介观物理导论(第二版)(影印) | Y. Imry | 拉曼 布里渊散射(第二版) | 程光煦 |
| 纳米薄膜分析基础(影印) | T. L. Alford | 现代物理学前沿选讲 | 黄祖洽 |
| 统计力学(第二版)(影印) | F. Schwabl | 半导体的检测与分析(第二版) | 许振嘉 |
| 磁性量子理论—材料的磁学性能(第三版)(影印) | R. M. White | 薄膜结构 X 射线表征 | 麦振洪等 |
| 半导体物理电子学(第二版)(影印) | Sheng S. Li | d 波超导体 | 向涛 |
| 碳纳米管—从基础到应用(影印) | A. Loiseau | 薄膜材料—应力、缺陷的形成和表面演化 | 卢磊 |
| 大气声学 | 杨训仁、陈宇 | 亚稳金属材料 | 胡壮麒 |
| 3D 纤维增强聚合物基复合材料 | 仝立勇等 | 高等原子分子物理学(第二版) | 徐克尊 |
| 仿真影像学技术 | 罗立民、舒华忠 | 激光光散射谱学 | 张明生 |
| 现代声学理论基础 | 马大猷 | 拉曼光谱学与低维纳米半导体 | 张树霖 |

凡购书者免邮费,请按以下方式联系我们:

电话 010-64017957 64033515 电子信箱:mlhukai@yahoo.com.cn yandeping@cspg.net

通讯地址 北京东黄城根北街16号 科学出版社 100717 联系人:胡凯 鄢德平 主页 <http://www.sciencep.com>

· 读者和编者 ·

欢迎订购《物理学学科发展报告(2007—2008)》一书

由中国科协主编、中国物理学会编著的《物理学学科发展报告(2007—2008)》一书,及时总结和报告了2007—2008年物理学最新研究进展,对广大物理工作者以及交叉学科的读者跟踪、了解和掌握物理学及其交叉学科的发展动态,促进研究工作创新和发展具有重要意义.欢迎广大读者与《物理》编辑部联系订购,每本订价28元(7折).联系人:王进萍(电话010-82649266;Email:physics@iphy.ac.cn).