

浅谈压电陶瓷变压器

Discuss for Piezoelectric Ceramic Transformer

高适 供稿

摘要：随着电子产品尤其是移动通信、个人计算机、数码相机等向轻小薄和多功能化方向发展，以及一些电子装备如雷达、静电复印机等要求超高压供电的需要，压电陶瓷变压器等这一类适应其结构与性能要求的电子元件进一步受到人们关注。本文主要论述压电陶瓷变压器的基本概念、工作原理、种类及其主要特点，介绍压电陶瓷变压器的一些应用与其相关技术特点。文章还将压电陶瓷变压器与电磁式变压器作了性能、特点等等的优劣比较。

关键词：压电陶瓷，电子变压器，铁电材料，高压电源，变换器

中图分类号：TM4 文献标识码：A 文章编号：1606-7517(2013)10-7-136

1 引言

随着社会的发展进步，人们日常工作与生活中的一些常用办公或个人产品，如移动通讯设备，个人计算机、传真机、数码相机等，以及一些特殊场合应用的装备如航天航空电子、汽车电子…都要求实现轻小薄型化、高效率、高功率密度和多功能化。这些产品的电源供应特点是，或者是低压大电流，如办公与个人用电子产品，或者是超高压，如雷达、静电复印机…。以往，这些产品的供电电源中多采用电磁式变压器。在实际使用中，我们很熟悉电磁式变压器的主要缺点，例如，体积大，往往占电源系统总体积的 25% 左右；对其高压侧的绕组及其绝缘层的处理比较困难，致使在高压下工作时容易发生打火甚至击穿，因此，故障率较高。同时，电磁式变压器在高频状况下工作时，其磁性损耗和涡流损耗增大。还有，电磁式变压器难以实现小型扁平化，目前它们是三大被动元件中小型化程度最低的。在终端产品需求的推动下，人们发现，采用压电陶瓷变压器可以较好地解决电磁式变压器的这些不足。使用铁电材料如 PZT、PCM、PCM、PSM、PMMN 等经过高温烧结，高压极化等一系列工艺操作所获得的压电陶瓷变压器可以达到体积小、重量轻、不会击穿、不怕短路、不受潮湿影响、变压比高等要求。但是，常规结构的压电陶瓷变压器（见图 1 所示）的工作频率较低，输入阻抗较大，所以

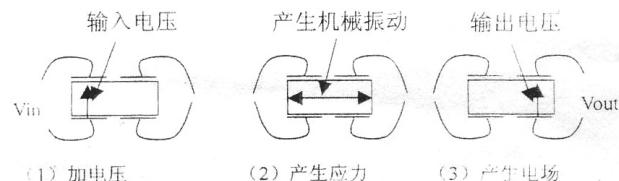


图1 压电陶瓷变压器工作原理示意图

不适宜用作高频功率变换器的电源变压器，但可以通过改变其结构和振荡模式来实现。

2 压电陶瓷变压器的一般概念与工作原理

2.1 一般概念

与传统的电磁式变压器比较，压电陶瓷变压器所用的材料、产品的结构、工艺技术及工作原理均不相同。电磁式变压器所用的主材是磁性材料和导电材料，分别用作结构的磁心和绕组，其能量变换形式是电—磁—电。而压电陶瓷变压器所用的主材是二元系压电陶瓷材料（PZT）如锆钛酸铅，三元系压电陶瓷材料(PCM、PSM)——即在 PZT 基础上添加其它元素以及四元系压电陶瓷材料(PMMN)等。经高温烧结和高压极化而制成产品，其能量变换方式是电—机—电。由此可见，电磁式变压器的能量变换按其结构形式需要在一个正交的立体空间完成，而压电陶瓷变压器可以在一个平面内进行能量变换，因此，压电陶瓷变压器容易设计成片式化结构。

2.2 工作原理

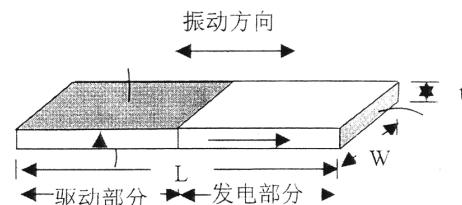
压电陶瓷变压器的工作原理是利用压电陶瓷材料的特性——正压电效应和逆压电效应。所谓正压电效应就是这种材料在力的作用下(或变形)产生电荷或电压,而逆压电效应就是施加电压时,该材料产生变形或振动。压电陶瓷变压器的工作原理,就是利用压电陶瓷材料的正、逆压电效应特性,通过对压电陶瓷体的电极和极化方向取向特点进行设计,利用逆压电效应使与输入端相连接的压电陶瓷体在电压作用下产生机械振动,再通过正压电效应使与输出端连接的压电陶瓷体产生电压。当输入端和输出端的阻抗不相等时,则导致其两端的电压和电流也不相等,由此实现输入端和输出端之间电压与电流大小变换的功能。

图1所示为压电陶瓷变压器工作原理的示意图。当其左端的驱动部分(输入端)加上电压以后,导致整个压电陶瓷体振动,使发电部分(输出端)产生输出电压,因此实现变压器功能。

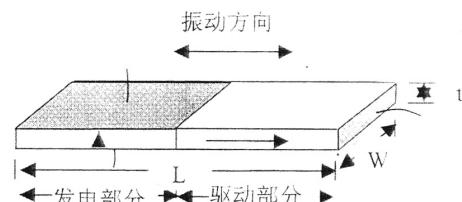
3 压电陶瓷变压器结构及主要特点

3.1 压电陶瓷变压器的发展简介

压电材料及其应用的划时代进展开始于第二次世界大战中发现的 BaTiO_3 陶瓷付诸应用之后。1947年,美国科学家S.Roberts在 BaTiO_3 陶瓷体上加高电压进行极化处理,获得了压电陶瓷的压电特性。随后,美国、前苏联、日本等都积极地应用 BaTiO_3 压电陶瓷开展超声换能器、音频换能器、压力传感器等计测器件、滤波器件以及谐振器等压电器件研究。1956年,美国科学家C.A.Rosen研制成功用 BaTiO_3 压电陶瓷材料制作的具有升高输出电压的压电陶瓷变压器,其结构示意图见图2。但该变压器的升压比较低,仅50~60倍,故在应用上未引起人们重视。需要指出的是,几乎与此同时,美国科学家B.Jaffe等人发现了比 BaTiO_3 性能优越得多的锆钛酸铅压电陶瓷材料等二元压电陶瓷材料(PZT),这大大地加快了压电陶瓷材料应用速度和前景。PZT压电陶瓷的发明,不仅在许多应用领域几乎取代了 BaTiO_3 ,而且也带动了压电陶瓷变压器等压电元器件的研究与发展。如当时日本的科学家们用PZT研发成功了数百倍升压比的压电陶瓷变压器,其输出功率也大为提高。1960年以后,对压电陶瓷材料的研究快速发展。如前苏联科学家T.A.Cmonehcker等提出了新型复合钙钛矿型化合物



(a)Rosen型压电陶瓷变压器结构示意图



(b)Rosen型压电陶瓷降压变压器

图2

的合成法,对压电陶瓷材料的发展起到了积极的推动作用。1965年之后,三元系压电陶瓷材料(PCM、PSM)和四元系压电陶瓷材料(PMMN)等新材料不断被推出,这也更推动了多种新型压电陶瓷器件以及材料的研究和应用。

图2示出了Rosen设计的压电陶瓷变压器结构示意图。在图2(a)中,左半部分为变压器的输入电压端,被称为驱动部分,右半部分为输出电压端,被称为发电部分。驱动部分和发电部分的极化方向不同:前者是沿着陶瓷单片厚度的方向,后者则是沿着陶瓷单片的长度方向。陶瓷体上的银制电极分别与输入和输出电压相连接。当压电陶瓷在驱动部分加上与压电陶瓷横向(即长度方向)谐振频率相同的交流电压时,由于压电陶瓷的逆压电效应,压电陶瓷体在长度方向产生机械共振;又因为正压电效应的作用,使输入的电能变换成为机械能。由于压电陶瓷发电部分的长度大于驱动部分的厚度,故输入阻抗远大于输出阻抗,致使输出电压大于输入电压,成为升压变压器。这种结构的压电变压器在数伏或数十伏输入电压时,可以获得数千伏的输出电压。图3所示为Rosen型压电升压变压器的等效电路图。图3中之左边为压电陶瓷变压器的驱动部分,右边为压电陶瓷变压器的发电部分,中间部分为压电陶瓷的机械振动部分。图3中, C_{01} 、 C_{02} 、 N_1 、 N_2 分别为压电陶瓷变压器输入端和输出端的电容值和电压变比, R_m 、 L_m 、 C_m 分别是压电陶瓷变压器机械振动的等效电阻、等效电感和等效电容。

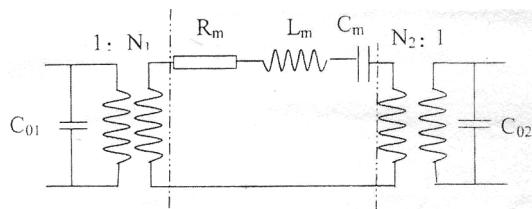


图3 压电陶瓷变压器等效电路

我们再看图2(b)这是利用Rosen型压电陶瓷变压器相似的结构制作的压电陶瓷降压变压器。由图2(b)可以看到,它是将图2(a)中的发电部分作为降压变压器的驱动部分,同时将驱动部分作为降压变压器的发电部分。通过这种变换,发电部分的输入阻抗大于驱动部分的输出阻抗,这样使得输出端的电压降低、电流增大,输出阻抗通常很难小于100以下,因此输出电流比较小。为了使压电变压器的输出阻抗降低并接近负载阻抗,达到输出大电流的目的。故通常采用发电部分的多层陶瓷/内电极结构,如图4所示。这种叠层式降压型压电陶瓷变压器是以厚度扩张振动模式工作的一种压电变压器结构。由图4可见,该变压器的输入部位是一单层的压电陶瓷,输出部位由叠装在一起的多层压电陶瓷组成,在层与层之间设置有导电电极,电极与电极间每相隔一层进行连接,引出负电极。在输入部位和输出部位之间有一绝缘层,在底部和顶部各有一层压电活性很低的绝缘层。输入部位沿变压器厚度方向极化,输出部位也沿厚度方向极化,但是输出部位相邻叠层的极化方向相互相反(图4中的箭头方向表示极化方向)。绝缘层设在厚度方向的中央,它们对输入端和输出端进行电学隔离,在高压与低压之间阻挡电压差以保护介电体的安全性。

当在该变压器的输入端加上一个交流电压时,由于逆

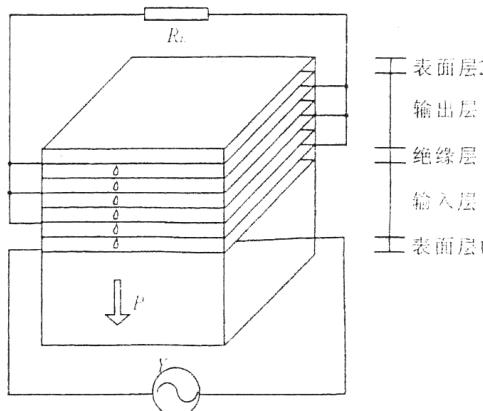


图4 叠层式降压型压电陶瓷变压器的结构

压电效应,产生沿厚度方向的扩张振动。这种机械振动被传递到输出端,并通过正压电效应产生一个交流输出电压。输出电压与输入电压之比值取决于输出部位与输入部位单一压电陶瓷层之间的厚度比。

图5所示为用集总常数等效电路方法分析叠层降压型压电陶瓷变压器的等效电路。

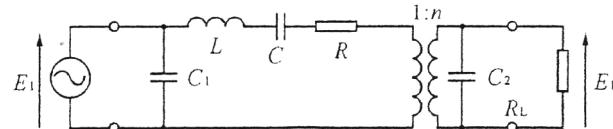


图5 压电陶瓷变压器的集成常数等效电路图

升压型压电陶瓷变压器和叠层降压型压电陶瓷变压器的电学参数计算简述如下。

升压型压电陶瓷变压器的变压比 $G_{升}$:

$$G_{升} = \frac{E_2}{E_1} \approx \frac{4}{\pi^2} Q_m K_{31} K_{33} \frac{L}{t} \quad (1)$$

式中: $G_{升}$ 为压电变压器空载升压比; Q_m 是陶瓷材料的机械品质因数; K_{31} 、 K_{33} 为材料的机械耦合系数; L 、 t 分别是发电部位的长度和厚度。

叠层降压型压电陶瓷变压器的电学参数:

a. 变压比 $G_{降}$:

$$G_{降} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{n}{1 + \frac{n^2 R}{R_L} + j W_s C_2 n^2 R} \quad (2)$$

当 R_L 为无穷大时, $G_{降}$ 达到最大值:

$$G_{降max} = \frac{n}{\sqrt{1 + (W_s C_2 n^2 R)^2}} \quad (3)$$

b. 计算输出功率 P_2 :

$$P_2 = \frac{|E_2|^2}{R_L} = \frac{n^2 E_1^2}{R_L \left\{ \left(1 + \frac{n^2 R}{R_L} \right)^2 + (W_s C_2 n^2 R)^2 \right\}} \quad (4)$$

$$P_{2max} = \frac{n^2 E_1^2}{2R \left[1 + \sqrt{1 + (W_s C_2 n^2 R)^2} \right]} \quad (5)$$

当 $(W_s C_2 n^2 R)^2 \gg 1$ 时, P_{2max} 可以简化为:

$$P_{2max} = \frac{n^2 E_1^2}{4R} \quad (6)$$

c. 输出功率最大时的 R_L 计算:

$$R_L = \frac{n^2 R}{\sqrt{1 + (W_s C_2 n^2 R)^2}} \quad (7)$$

当 $(W_s C_2 n^2 R)^2 \ll 1$ 时，则：

$$R_L = n^2 R \quad (8)$$

d. 计算功率变换效率 η ：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1}{1 + \frac{n^2 R}{R_L} + (W_s C_2)^2 n^2 R R_L} \quad (9)$$

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + 2 W_s C_2 n^2 R} \quad (10)$$

以上式中的符号为（见图 5）： C_1 —输入端电容， C_2 —输出端电容， L —等效电感， C —等效电容， R —等效电阻， n —变压比， R_L —负载电阻。

由于不同形状的压电陶瓷体的振动模式不同，随着压电陶瓷新材料研究与成果的不断产生，以及压电变压器应用领域的扩大，将会有更多不同结构形式压电陶瓷变压器出现。

3.3 不同几何形状压电陶瓷体的振动模式和材料参数

a. 振动模式（见图 6 所示）

扁平长方体为长度方向和厚度方向振动 [图 6(a)、图 6(d)]；

扁平圆盘体为径向和厚度方向振动 [图 6(b)、图 6(d)]；

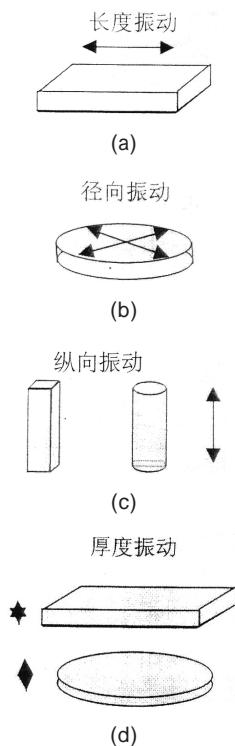


图6 不同形状压电陶瓷的振动模式

条形长方体与圆柱体是纵向振动。

b. 材料参数：介电系数和损耗 ϵ ， $\tan\delta$ ，压电系数 d_{31} ，机电耦合系数 K_{31} ，机械品质因数 Q_m ，居里温度 T_C 。

由于压电陶瓷变压器的工作原理是电—机械力耦合传输能量，所以压电陶瓷变压器的性能与上述压电体材料的参数优劣之关系十分密切，根据压电变压器的结构与材料参数，可以获得其电压比率等技术参数。

3.4 压电陶瓷变压器的特点

与电磁变压器比较，压电陶瓷变压器有以下一些特点：

a. 结构：只有压电陶瓷片和电极，不需要电磁式变压器中的绕组，结构相对简单；

b. 外观形状与尺寸：压电变压器的几何形状为扁平结构，尺寸小；同时，可根据要求选用不同的振动模式设计压电变压器，以控制其形状与尺寸，如以长度或宽度振动的长方体变压器，或以径向振动的圆柱体变压器；

c. 压电陶瓷变压器的结构件不可燃，不怕短路，对外界没有电磁干扰；

d. 工作频率：其工作在压电陶瓷体的谐振频率或高阶振动频率，与压电变压器的外形尺寸有关；

e. 负载特性：当负载阻抗发生变化时，其谐振频率将发生偏移，因此，压电陶瓷变压器的电压和电流变比、功率变换效率等随着负载阻抗而发生变化。

3.5 压电陶瓷变压器的主要技术参数

a. 输出功率：压电陶瓷变压器的输出功率基本上由其尺寸决定。因为压电陶瓷体的功率密度为 $15\sim20\text{W/cm}^3$ ，故一般的压电陶瓷变压器的输出功率在 10W 以下更为适合，超过 30W 时，就要在结构设计上做文章。

b. 输入电压：设计压电陶瓷变压器应根据产品要求的输入电压确定其结构形式和机械振动模式，同时应注意到压电陶瓷在极化方向相反的高电场作用会使压电性能消失，因此，设计压电变压器必须考虑其安全性。

c. 输出电压：与输入电压一样，应根据使用需求选择输出电压。

d. 工作频率：压电陶瓷变压器是在其陶瓷体的谐振频率上工作，且工作频率主要由器件的尺寸决定，所以，变压器的结构和尺寸由实际应用的工作频率决定。

e. 负载阻抗：由于压电陶瓷变压器的一些性能与负载

有关，所以需要根据使用要求的负载阻抗确定其输出端的电容，以使压电变压器获得较高的功率变换效率。

f. 功率变换效率：输出功率与输入功率是比值为其效率。理想的压电陶瓷变压器的功率变换效率可以接近100%。

g. 器件尺寸：小型薄型化体现了压电陶瓷变压器的主要特点，是设计这类变压器关键点。

h. 工作温度：压电陶瓷变压器在振动状态下会发热，由此还影响其谐振频率，为保证其功率变换效率，通常把压电陶瓷变压器的工作温度设计为60℃以下。

3.6 压电陶瓷变压器的负载阻抗特性

压电陶瓷变压器的一些技术性能与负载阻抗大小与变化的关系密切，简述如下：

a. 输出功率——负载阻抗特性：图7所示为输出功率——负载阻抗关系曲线。其测试条件为：输入电压 V_{in} 为275V，室温是25℃。由图7可见，当负载阻抗 $R_L=9M\Omega$ 时，输出功率的最大值为65W，而在减少或增加负载阻抗时，输出功率减少。这是因为压电陶瓷变压器的输入阻抗、升降压比均随负载阻抗的变化而变化，同时，不同输入电压值、输出功率与负载阻抗变化关系不完全相同。

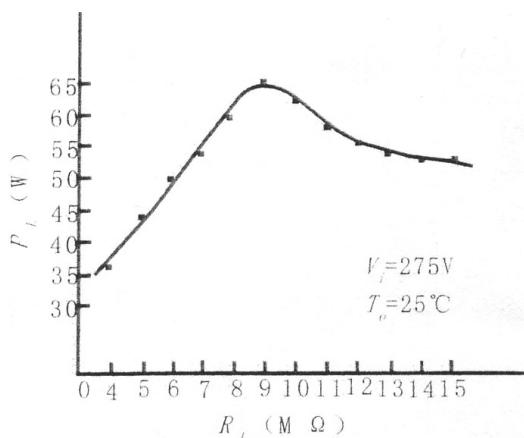


图7 输出功率-负载阻抗特性

b. 变换效率——负载阻抗特性

压电陶瓷变压器的变换效率随输出功率变化的关系如图8所示，图中曲线是负载电阻 $R_L=8M\Omega$ ，室温 $T_0=25^\circ\text{C}$ ，及压电变压器热平衡后测得的。图中的输出功率是在负载电阻上测得的，其总的功率损耗包括了压电变压器和整流电路的损耗，因此，压电陶瓷变压器的实际变换效率要大于曲线所示出的变换效率。实验表明，10W以内运行的变

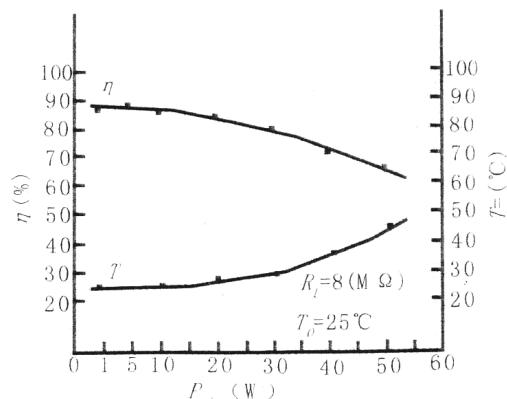


图8 转换效率、波节温度-负载特性

压器，变换效率达86%以上；输出功率在40W时，变换效率达70%；而在50W工作时，其变换效率仍有63%。

c. 波节温度——负载阻抗特性

由于压电陶瓷变压器的波节处应力最大，因此温度也最高，而两端的温度最低。图8中的曲线示出了负载电阻 $R_L=8M\Omega$ 、室温 $T_0=25^\circ\text{C}$ 时测得的最高温度点的温度与输出功率的关系。实验点温度的测量均是在压电变压器运行一小时后，即变压器的温度处于热平衡后。在图8中不难看到，压电变压器输出功率在40W时，最高温度点的温度为34℃，输出功率为50W时，最高温度点的温度为47℃，其它点的温度则更低。

d. 谐振频率——环境温度特性

一般情况下，压电陶瓷材料的谐振频率因为本身发热和环境温度变化而发生漂移，因此，压电陶瓷变压器谐振频率的温度特性是决定该变压器性能好坏的重要指标。尤其在压电变压器工作在较大输出功率时，谐振频率温度特性的研究更为重要。图9表示压电陶瓷变压器谐振频率随环境温度的变化关系，其测定条件为输出功率 $P_L=50\text{W}$ ，

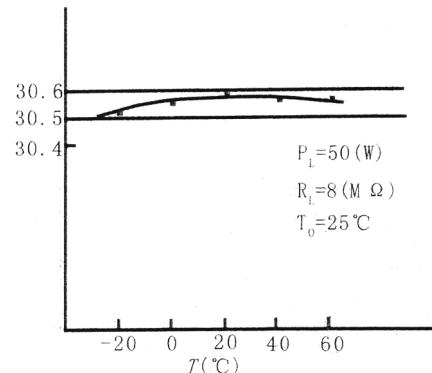


图9 谐振频率-环境温度特性

负载电阻 $R_L=8\text{M}\Omega$ ，环境温度 $T_0=25^\circ\text{C}$ ，且每个温度点的测定都是在变压器热平衡之后。从图 9 中可以看到，当温度从 -20°C 升至 60°C 时，谐振频率最大的偏离值为 58Hz ，室温 $T_0=25^\circ\text{C}$ 时的 f_r 值为 $30584(\text{Hz})$ ，最大相对偏高值 $(\delta f_r)_m < 0.2\%$ 。

4 压电陶瓷变压器的应用

4.1 应用领域

小、薄、轻型化产品：由于压电陶瓷变压器具有以上所概括的一些特点，所以适合用于以电池供电的消费类电子产品，如蜂窝电话、笔记本电脑、折叠式计算机、摄录一体化 VTR、PAD 等产品的电源系统。

需要用极高电压、小电流供电的特种设备如雷达、静电复印机、静电除尘器等电源系统。

液晶显示器 (LCD)(包括 LCD 照明) 背面照明用压电逆变器。因为 LCD 要求具有高的输出功率、传输效率，且要求结构上低高度、重量轻。同时，因为背面照明冷阴极荧光灯的特点：点灯前的阻抗大，必须供给高电压，点灯后阻抗变小，电压就下降。压电陶瓷变压器逆变器的特性正好可以与此相匹配。

用于电池性能、尺寸和重量均受到严格限制的自供电系统中，如汽车、直升飞机、航空航天器、卫星、声纳、医疗设备等使用的压电制动驱动系统。这些设备的供电一般要求为 $100\text{V}\sim1000\text{V}$ ，这与普通电池的 $9\text{V}\sim24\text{V}$ 的供电大不相同，而压电陶瓷变压器则可实现这个指标。

总之，压电陶瓷变压器的应用领域非常广泛。

4.2 应用举例：叠层式降压型压电陶瓷变压器在高频开关电源中的应用

a. 驱动与控制

在 DC-DC 变换器中采用压电陶瓷变压器必须在其输入端加一个开关驱动回路，在输出端使用整流回路。当一个矩形波交流电压作用在压电陶瓷变压器的输入端电极时，输入能量的大部分消耗在输入电容器 C_1 的充电和放电过程中，如图 10 所示，其余的能量通过压电陶瓷变压器的 LC 振荡电路产生谐振，并传输到整流电路。因此，要降低压电陶瓷变压器型高频开关电源的功率损耗，减小压电陶瓷变压器输入端的电容值 C_1 是最关键的。

由图 10 可见压电陶瓷变压器输入输出端的控制方式、频率调节方式、电压变换特性，其应用非常简便。因此，

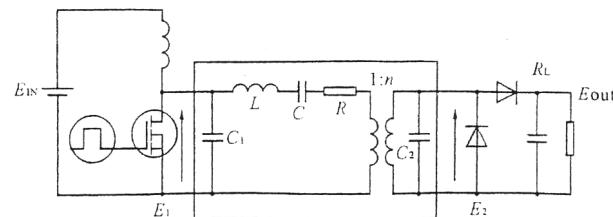


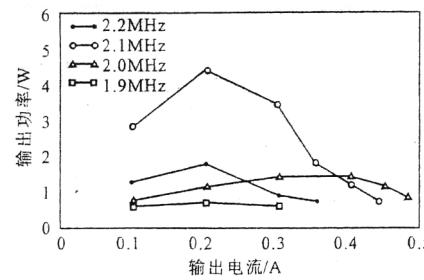
图 10 采用叠层式降压型电陶瓷变压器的高频开关电源电路图

受频率变化影响的变压比及高的变换效率可以在非常宽的频率范围内获得。

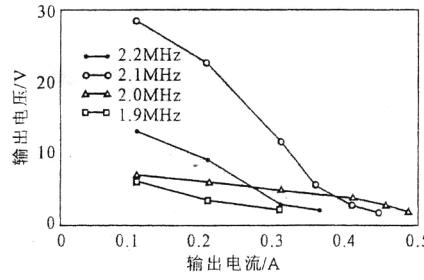
b. 叠层式降压型压电陶瓷变压器高频开关电源的实验和测试结果

图 10 所示为压电陶瓷变压器型高频开关电源电路图。因为降压型压电陶瓷变压器在二次模式下工作最合适，所以选择 2MHz 的电路工作频率。在电路中，开关驱动装置选用了 $250\text{V}/6\text{A}$ 的 MOSFET，整流电路则选用两个 $60\text{V}/1\text{A}$ 的肖特基二极管。

图 11 所示为输出电压、输出功率以及效率与负载



(a)



(b)

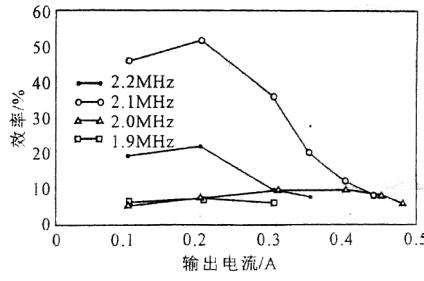


图 11 输出功率、输出电压和效率与负载电流的关系曲线

阻抗的关系。图中，开关电源的工作频率变化的范围1.9MHz~2.2MHz，分别选择1.9、2.0、2.1和2.2(MHz)等四种情况测试，图中示出了测试结果。从图11可见，输出功率和效率对输出电流变化存在着峰值，因此，压电陶瓷变压器的负载特性对开关电源的性能影响较大。

图12所示为高频开关电源输出电压、输出功率以及变换效率与频率的关系。图中所示的输出电流为0.2A，由此可见，频率为2.1MHz时的输出功率最大，为4.4W，效率是52%。

5 小结

文章简要介绍了压电陶瓷变压器的一般概念、工作原理，主要是与电磁式变压器比较，指出压电陶瓷变压器的结构和主要特点，得出的结论是：压电陶瓷变压器容易实现小型化和片式化，功率密度高，没有磁心损耗和导线（铜）损耗，不存在电磁噪声，升压比高，功率变换效率高等。文章还介绍了压电陶瓷变压器的应用领域并以实例进行了剖析。

（参考资料略）

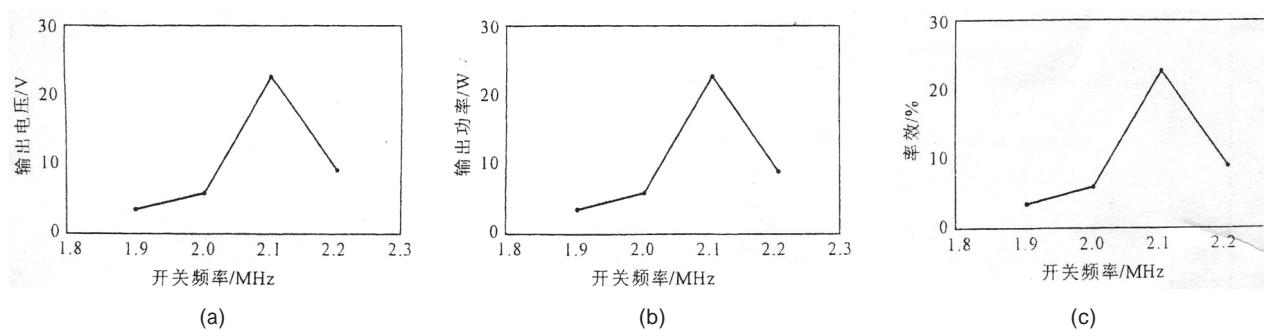


图12 叠层式降压型压电陶瓷变压器型高频开关电源的输出电压、输出功率和效率与开关频率的关系曲线

上接123页

参考文献

- [1] 姜学东等. 大容量蓄电池组充放电设备的研制. 电力电子技术, 1999, 33(2): 39—41.
- [2] Bor-Ren Lin, Tsung-Yu Yang. Three-phase high power factor rectifier with unidirectional power flow[C]. Proceedings of International Conference on PEDS. 2003, 11: 2375—2379.
- [3] 张纯江, 顾和荣, 王宝诚, 朱艳萍, 刘彦民. 基于新型相位幅值控制的三相PWM整流器数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 28—31.
- [4] Ke-Yen Lee, Yue-Lin Wu, Yen-Shin Lai. Novel Bidirectional Three-phase Rectifier without using DC-link Current Sensor [c]. IEEE PESC Korea, 2006, 6: 3302—3306.

[5] Yu Fang, Yan Xing and Yuwen Hu. A Fast Algorithm for SVPWM in Three Phase Power Factor Correction Application [C]. IEEE PESC2004, Germany. 976—979.

[6] 方宇, 裴迅, 邢岩等. 基于预测电流控制的三相高功率因数PWM整流器研究[J]. 中国电机工程学报. 2006, 26(20): 69—73.

作者简介

王儒, 男, 1982年生, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

方宇, 男, 1972年生, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

邢岩, 女, 1964年生, 教授, 博导, 研究方向为电力电子与电力传动。