

压电变压器与传统变压器之比较

变压器是电子设备中的重要元件。传统变压器是用来变换电能，并把它从一个电路传输到另一个电路的静止的电磁元件。在交流电路中，变压器可用来变换电压、电流、频率、相数，改变信号极性，变换信号波形，使初次级电路彼此隔离，使电路阻抗匹配等。

变压器的种类很多。按照工作原理、使用线路等主要特征，大致可分为小功率电源变压器，音频和超音频变压器、脉冲变压器等，而压电变压器是新近发展起来的一种新型变压器。

压电陶瓷变压器是一种实现电能--机械能--电能转换的新型元件。压电陶瓷变压器的工作原理是利用压电陶瓷的正和逆压电效应，它通过对压电陶瓷体的电极和极化方向取向的不同进行设计，利用逆压电效应使输入端相连接的压电陶瓷在电压作用下产生机械振动，再通过正压电效应使输出端连接的压电陶瓷产生电压。当输入和输出端的阻抗不相等时，导致它们的电压和电流也不相等，从而实现输入和输出端之间的电压和电流大小变换的功能。其主要器件压电陶瓷片是用无机非金属材料经高温烧结和高压极化等一系列工艺而制成的新型功能陶瓷材料。此类变压器与传统电磁变压器相比，具有体积小、重量轻、结构简单、不用铜铁材料、不怕受潮、不会燃烧、不受电磁干扰等优点。压电陶瓷变压器具有转换效率高、无电磁辐射、体积小、不燃烧、安全和可靠的特点。

压电陶瓷变压器的优势主要有以下几个方面：

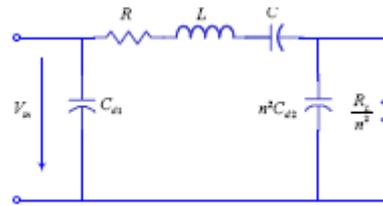
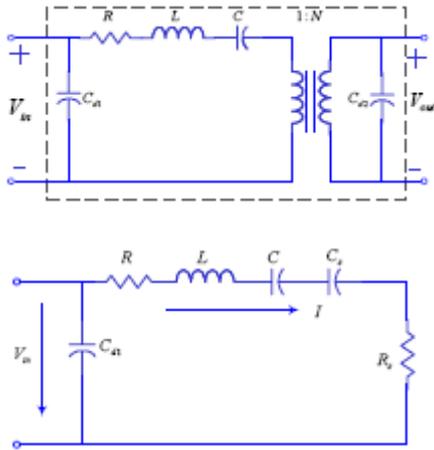
- ①转换的效率很高，与传统变压器的效率相比，压电陶瓷变压器很容易做到 98%以上；
- ②能量密度很大，相应体积可以做到很小，很薄；
- ③没有电磁干扰，由于换能的过程是由机械振动完成，并不是电磁转换；
- ④环境适用性强，耐低温、耐高湿、耐酸耐碱、不会霉变，寿命长；
- ⑤标准正弦输出，不受变压器输入波形畸变的影响；
- ⑥变压器输入输出之间耐压高，漏流低，一般情况下，变压器的输入输出之间在 3700VDC/分下，漏流 $<20\mu\text{A}$ ，在 3000VAC/分下，漏流 $<200\mu\text{A}$ ；
- ⑦变压器自身具有很好的滤波功能；
- ⑧变压器具有短路自动保护功能。

第一个压电陶瓷变压器是由美国的 Rosen 在 1956 年提出的，它具有升高输出电压的功能。变压器的输入电压端称为驱动部分，输出电压端称为发电部分。驱动和发电部分的极化方向不同，前者沿着陶瓷单片厚度方向，后者沿着陶瓷单片的长度方向。陶瓷上的银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(长度方向)谐振频率相同的交流电压时，因压电陶瓷的逆压电效应，压电陶瓷在长度方向产生机械共振，又因正压电效应使输入的电能转换成机械能。由于压电陶瓷发电部分的长度大于驱动部分的厚度，输入阻抗远大于输出阻抗，因而输出电压大于输入电压，成为升压变压器。这种结构的变压器在数伏或数十伏的输入电压，可以获得数千伏的电压。

一. 两种变压器在线路中的作用对比

像传统电磁变压器那样，压电变压器也可以变换阻抗、电压或电流信号，因此，压电变压器同样可用在整流、放大、振荡等一般线路中。下面从电路的角度简单介绍一下压电变压器的电性能：

1. 压电变压器等效电路



当 $R_L = 0$ 时

$$f_{sc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$$

当 $R_L = \infty$ 时

$$f_{oc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot (C \parallel n^2 C_n)}} = f_{sc} \cdot \sqrt{1 + \frac{C}{n^2 C_n}}$$

当为 R_L 时

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot \frac{C \cdot C_n}{C + C_n}}}$$

式中：

$$C_n = n^2 \cdot C_{n2} \cdot \frac{1 + (2\pi f_r \cdot C_{n2} \cdot R_L)^2}{(2\pi f_r \cdot C_{n2} \cdot R_L)^2}$$

从上可看出，变压器工作频率在其短路和开路频率之间。下图是变压器在其开路 and 短路状态下的阻抗曲线照片。



压电变压器和电磁变压器间存在如下的差别：

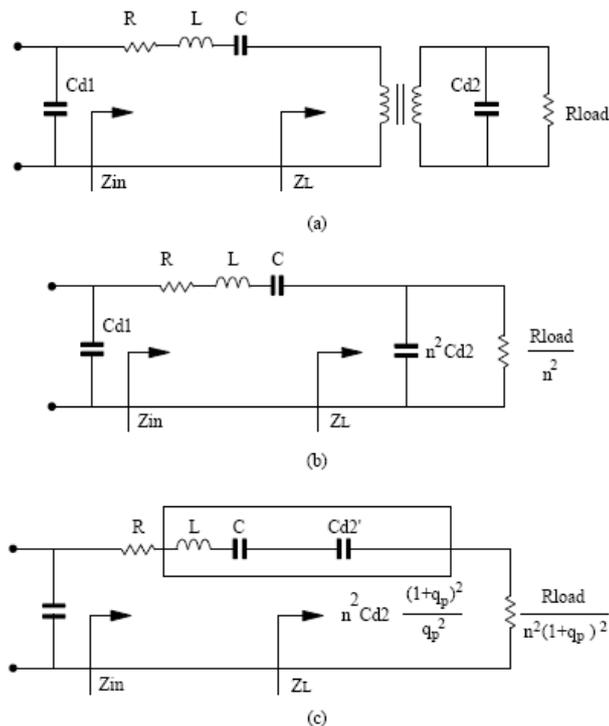
从物理观点来看，压电变压器上是两次变换机电能量的器件，即初次级电路之间的联系是机械的，电磁变压器初次级电路间的联系是电磁的。

压电变压器是各种形状的固体机电谐振器，包含一个压电元件，压电元件上有电极。驱动部分的电极接初级电路，发电部分的电极接负载。电磁变压器由两个或两个以上的绕组组成，绕组绕在铁心上，其中一个绕组接初级电路，次级接负载。

压电变压器的谐振频率由压电元件的尺寸决定，因此，它的效率、变比都和负载阻抗及工作频率有关。把电能变换为机械能，以及把机械能变为电能的效率，用机电耦合系数来表征。能量从驱动部分向发电部分的传输还和压电元件的机械品质因数有关，机械品质因数表征谐振器中机械能量的损失。机械品质因数等于振动的一个周期内压电元件中储存的总的机械能和机械损耗的能量之比。机电耦合系数和机械品质因数的乘积越大，压电变压器的效率越高。此外，机械品质因数确定了压电变压器在空载和短路状态的通频带。电磁变压器是宽频带器件，由于采用了高磁导率材料做成的闭合磁导体，绕组间的耦合系数在很宽的频率范围内都接近于1。因此，加到初级电路的所有能量几乎都传输到负载了，电磁变压器的效率和变比都与负载阻抗关系不大。

压电变压器的等效线路和电磁变压器不同。在压电变压器的等效线路中，作为谐振器件可以画成在谐振频率范围内具有等值集总参数的谐振回路。如果不考虑寄生参数，电磁变压器的等值线路中没有这个回路。压电变压器由介电材料制造，它的驱动部分和发电部分都由电容构成，因此，电流的直流分量是不能通过压电变压器的输入和输出电路的。电磁变压器的输入和输出电路包含有电感，电流的直流分量可以通过输入和输出电路。这种差别导致变压器在电路中的连接方法不同，变压器输入和输出参数与频率的关系也不同。随工作频率的提高，压电变压器输入和输出的容抗降低，变压器容易小型化。电磁变压器则相反，它的输入和输出电感随频率的降低而减少，因此小型化比较困难。

电磁变压器的工作状态有三种：空载、额定负载、短路状态。由于压电变压器的工作原理比较复杂，运行状态也比较多，一般分为五种。下图是变压器通用等效电路，各种状态的名称以及对应的压电变压器参数见下表：



图中 $q_p = \omega \cdot R_{load} \cdot C_{d2}$,

压电变压器的工作状态

工作状态	负载电阻	变压比	负载功率	效率
空载状态	$R_f = \infty$	$K_{\infty 0}$	$P_{\infty 0}$	$\eta_{\infty 0}$
最大功率状态	$R_{f1} = R_{f2}$	K_f	P_f	η_f
最高效率状态	$R_f = R_L$	K_L	P_L	η_L
短路状态	$R_f = 0$	K_D	P_D	η_D

2. 各种工作状态的特点

(1) 在空载状态下: $R_f = \infty$, $\eta_{\infty 0} = 0$, 变压器输出端等效电阻 $R_{20} = \frac{R_{load}}{n^2(1+q_p)^2} = 0$, 变压器输出

端等效容抗 $X_{20} = \frac{X_{Cd2}}{n^2}$, 变压比 $K_{\infty 0} = \frac{X_{20}}{R}$

(2) 在短路状态下: $R_f = \eta_D = 0$, 变压器输出端等效电阻及容抗 $R_{2D} = X_{2D} = 0$, $K_D = 0$

(3) 匹配负载状态, 既最大功率状态。对于压电变压器来讲, 在 $R = R_2 = \frac{R_{load}}{n^2(1+q_p)^2}$ 时就是这

种状态。此时变压器的效率等于 50%。

由于压电变压器的输出阻抗和它的输出电容是并联的, 在 $R_L = X_{Cd2}$ 时具有最大值, 在空载和短路状态具有最小值。因而可以有两个阻抗 R_{f1} 和 R_{f2} 值, 它们都对应压电变压器效率等于 50% 时的匹配状态。

(4) 最高效率状态。负载电阻 $R_f = R_L$, 可用下式求得:

$$R_L = X_{Cd2}, R_{2L} = \frac{R_{load}}{n^2(1+q_p)^2}$$

$$\eta_L = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_{2L}}} = \frac{R_L}{R_L + 2n^2 \cdot R} = \frac{K_{\infty 0}}{2 + K_{\infty 0}}$$

$$\therefore K_{\infty 0} = \frac{X_{20}}{R} = \frac{1}{\frac{1}{n^2 \omega C_{d2}}} = \frac{Q_m C}{n_2 C_{d2}} = \frac{Q_m k^2}{n^2(1-k^2)}$$

$$\therefore \eta_L = \frac{1}{1 + \frac{2n^2(1-k^2)}{Q_m k^2}}$$

因此, 压电材料的参数 Q_M 、 $K_{\infty 0}$ 或 k 越高, 压电变压器的效率也越高。

3. 变压比

像电磁变压器一样，把压电变压器输入和输出电压之比成为变压比，用 K 表示，在一般情况下，这个比值为

$$K = \frac{R_f \cdot \sqrt{1 + (\omega C_{d2} R_f)^2}}{n^2 \cdot R \left[1 + (\omega C_{d2} R_f)^2 \right] + R_f}$$

在空载状态下， $R_f = \infty$ $K_{\infty 0} = \frac{1}{n^2 \cdot R \cdot \omega C_{d2}} = \frac{X_{Cd2}}{n^2 \cdot R} = \frac{X_{20}}{R}$

在最高效率状态下 $R_f = R_L = X_{Cd2}$

$$K_L = \sqrt{2} \eta_L = \frac{\sqrt{2}}{1 + \frac{2n^2(1-k^2)}{Q_M k^2}}$$

在短路状态下 $R_{fd} = 0$ ， $K_D = 0$

4. 负载有功功率

$$P_f = \frac{U_i^2 K^2}{R_f}$$

在空载状态下， $R_{f0} = \infty$ ，在短路状态下， $K_0 = 0$ ，即负载功率为零。

在匹配状态下，输出功率为 $P_{f1} = P_{f2} = \frac{U_i^2 K^2}{4X_{Cd2}}$

在最高效率状态 $R_L = X_{Cd2}$ ， $K_L = \sqrt{2} \eta_L$

$$P_L = \frac{2U_i^2 \eta_L^2}{X_{Cd2}} = \frac{2U_i^2 \eta_L^2}{R_L}$$

用压电材料的参数表示，则得

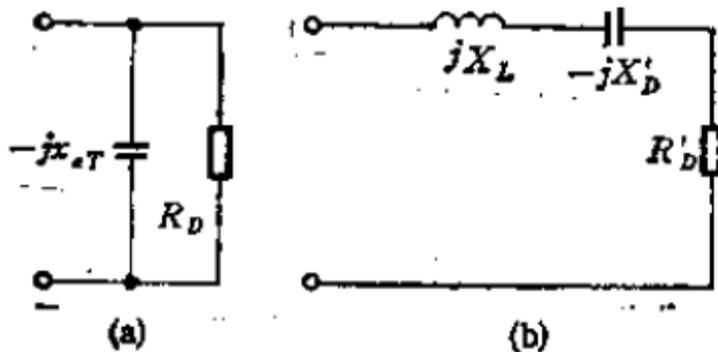
$$P_L = \frac{2Q_M^2 k^4 \epsilon_{33}^T U_i^2 \omega S}{n^4 (1-k^2) t}$$

式中 S 、 t 为变压器的结构参数。

从导出的公式可见，在给定电源电压的输出功率和压电变压器的尺寸有关，也和压电材料的参数有关。在 U_i 一定的条件下， ϵ_{33}^T 、 k 、 Q_M 值越大，传输的功率越多。

5. 压电变压器的输入参数

把压电变压器的输入端变换为等效电路，就可以计算压电变压器的输入参数。当压电变压器工作在 $X_R = X_2 = 0$ ，即串联谐振频率时，等效线路具有下图所示的 (a) 形式，其中 $R_D = R_2 + \frac{R}{n^2}$ ，



在谐振频率下，从输入方看，压电变压器的等效线路

因此，在该频率下，从输入方看，压电变压器可以表示成容抗 X_{Cd1} 与电阻 R_D 并联的电路。 R_D 及 R_D/X_{Cd1} 值和压电变压器的工作状态有关。

实际上，输入阻抗的无功分量可以用在压电变压器输入端串联一个相应的电感来补偿。通常，在该状态下的电压增益将最大。为了求得这个补偿电感，把上图 (a) 变换为 (b)，其中

$$X_D' = X_L \quad Z_D' = R_D' - jX_D'$$

这时

$$R_D' = \frac{R_D}{1 + \left(\frac{R_D}{X_{Cd1}}\right)^2} \quad X_D' = \frac{X_{Cd1}}{1 + \left(\frac{X_{Cd1}}{R_D}\right)^2}$$

为了求得接入电感时电压增益的公式，应使 R_D' 的有功部分的功率和消耗在电阻 R_D 上的功率相等。

在空载、短路和匹配状态下， X_{Cd1}/R_D 值很大，因此，接入电感对变比影响不大。

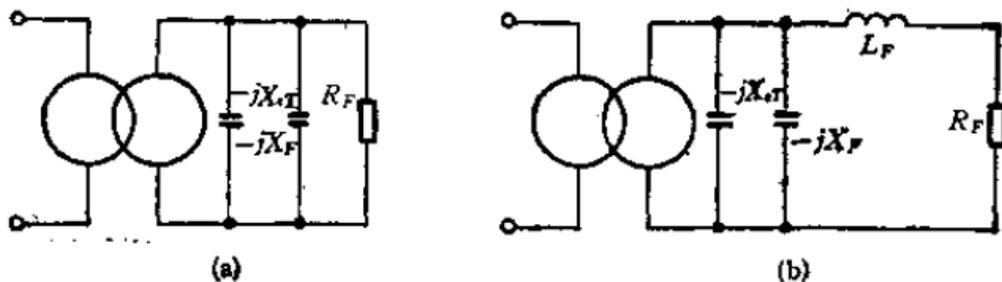
在最高效率状态下，附加的增益为 $\sqrt{\frac{R_D}{R_D'}} = \sqrt{1 + \left(\frac{R + n^2 R_2}{n^2 X_{Cd2}}\right)^2}$ ，由此可见，接入电感在最高

效率状态下是有效的，远离时对变压器影响很小。

6. 在感性及容性负载下压电变压器的工作特点

实际上最感兴趣的是压电变压器输出端并联电容 C_F 及串联电感 L_F 负载的情况。

先研究并联电容 C_F 的情况，由于负载电容和压电变压器输出电容并联，使总的电容变大了，这不仅导致压电变压器参数的变化，而且导致压电变压器工作状态的变化，输出阻抗降低，效率也低于没有 C_F 时的值，变比也同样低于没有 C_F 时的值。



接有容性和感性负载的压电变压器

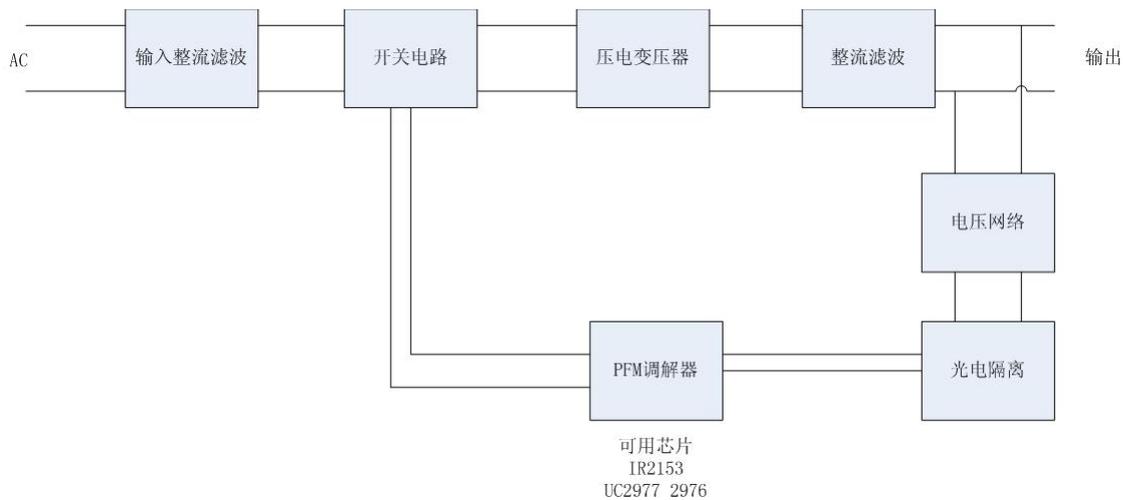
当电感 L_F 和电阻 R_F 串联时，压电变压器输出端形成附加的谐振回路，如果 $\omega_0 L_F \ll X_{CT}$

(X_{Cd2}), 则压电变压器的工作状态接近无电感时的情况, 如果 $\omega_0 L_F \gg X_{CT}$ (X_{Cd2}), 压电变压器的工作状态接近无电感时的空载, 如果 $\omega_0 L_F = X_{CT}$ (X_{Cd2}), 附加的谐振回路产生谐振, 电阻 R_F 越小, 压电变压器的等效负载阻抗将越大, 因此, 最高效率状态相应于 R_F 趋近于零。

从上述分析中可知, 采用串联电感, 不仅可以保证变压器的匹配, 而且能保证压电变压器在低欧姆负载下有高的效率。

7. 压电变压器的基本驱动电路和控制电路

压电电源原理框图如下:



1): 基本驱动电路

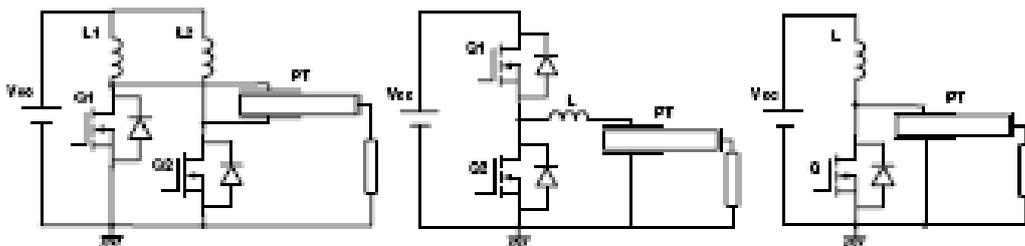


Figure 5. Piezoelectric transformer driven using push-pull (left) and half-bridge (center) and Class-E (right) topologies

2): 基本控制电路

为了保证变压器在电路中能有稳定的输出, 它的控制方法基本有以下几种:

- i) 测量输出电压进行频率控制
- ii) 测量输出电流进行频率控制(Figure 6, left)
- iii) 测量输入电压、电流的相位差进行频率控制
- iv) 测量输入、输出相位差进行频率控制 (Figure 6, right).

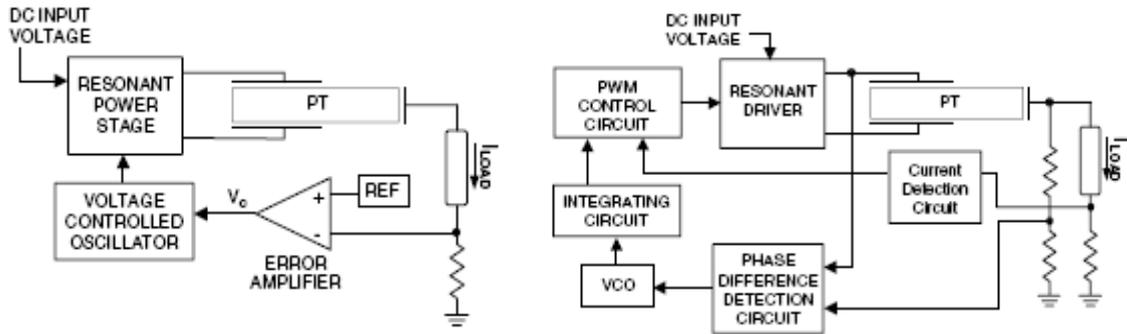


Figure 6. Different tracking control schemes for piezoelectric transformers: (right) based on measuring the output current; (left) based on the input to output phase difference.

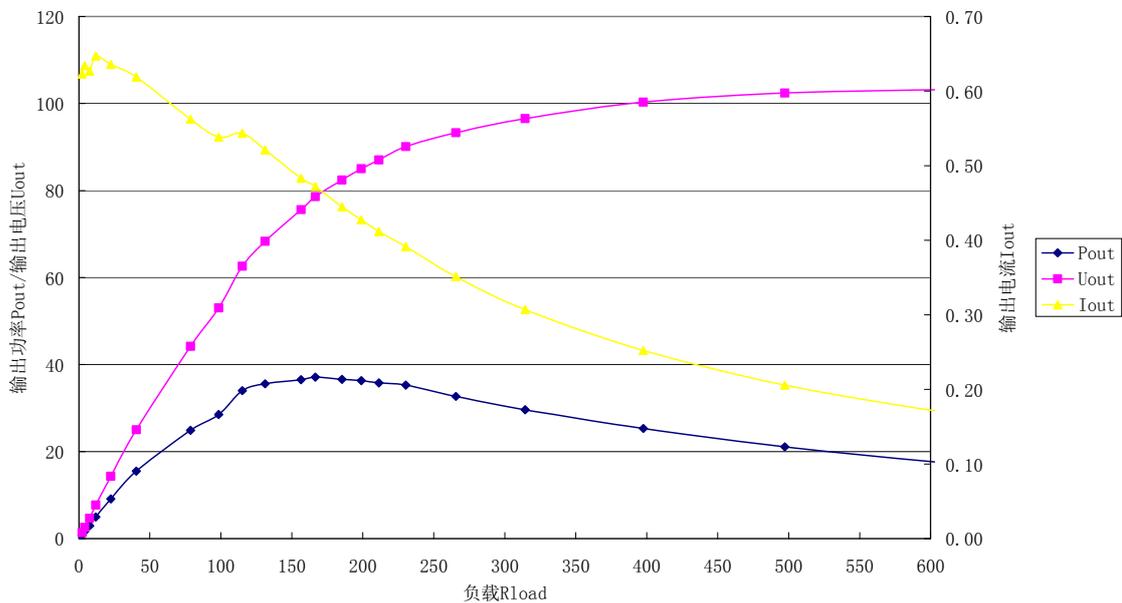
上述控制方法连同过压、短路保护功能等已经集成到IC芯片中，如Rohm (BA9802 [23]), Sanyo (LA5663V), Texas Instrument (UCC3975 [24])等芯片已经商业化了，利用这些芯片可以对变压器进行更简单、可靠的控制和应用。

二. 压电变压器的基本参数

变压器基本参数详见《压电变压器使用说明》，下面介绍一下变压器的另一个特性：恒功率特性

变压器恒功率特性（灯用）

汽车头灯Pout-Rload关系图



综上所述，压电变压器与传统变压器不同之处可总结如下：

1. 压电变压器在负载特性方面，当负载阻抗发生变化时，它的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、功率转换效率等随负载阻抗的变化而发生变化。
2. 在低于变压器谐振频率时，压电变压器表现为电容特性，在高于谐振频率以上表现为电感特性，只有在谐振频率附近才为电阻特性(它对应着压电陶瓷的机械共振)。所以，压电陶瓷变压器的工作频率受谐振频率的限制，具有一定的工作带宽。电磁式变压器无工作带宽的限制，频率范围宽，但是，由于电磁式变压器是由绕线和磁性材料组成，主要表现为电

感特性，所以，在低频时输入和输出随频率降低而下降，为了制作低频小功率的电磁式变压器，必须增加绕线的电感，因而难以实现器件的小型化。

3. 压电陶瓷变压器瓷片极化方式、尺寸基本决定了器件的输出功率及频率。压电陶瓷变压器是在谐振状态下工作（实际上工作在谐振频率与反谐振频率之间），该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需要的工作频率决定。

4. 由于压电变压器性能的频率特性与负载有关，在空载时产生较高电压，易造成变压器瓷片的破坏，故变压器工作时应避免长时间开路。

5. 压电变压器本身是压电陶瓷材料，随温度的变化其电参数也发生变化。

6. 压电变压器独有恒功率特性及开路高压特性，特别适用于灯类产品用，这是传统变压器所没有的。

7. 经特殊设计的压电变压器输入、输出间抗电强度可达到 3000VAC，漏电流小于 200 微安，特别适用于医疗器械行业电源使用。

中国电子为华技术中心
周伟革