

压电变压器端口串并联连接的电气特性分析

白凤仙,董维杰,肖 磊

(大连理工大学电信学院电子系,辽宁大连 116023)

摘要: 基于压电变压器的经典集总参数等效电路模型,分别采用 Y 参数、 G 参数、 H 参数和 Z 参数建立了压电变压器并-并、并-串、串-并和串-串连接的网络方程,将网络方程均转化为用 Y 参数表达,直观地体现了网络电气特性与压电变压器的模型参数和连接个数之间的关系.最后对四种连接的电气特性进行了计算分析,并通过并-并连接实验证明了理论分析的正确性.结果表明,随着压电变压器连接个数的增加,只有并-并和并-串两种连接方式能够提高电压增益和输出功率.

关键词: 压电变压器; 双口网络; 电压增益; 输出功率

中图分类号: TN384, TN601 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 05 0998-06

Analysis of Characteristics of Series and Parallel Connected Piezoelectric Transformers

BAI Feng-xian, DONG Wei-jie, XIAO Lei

(School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: Based on the conventional lumped parameter circuit model, network equations of piezoelectric transformers (PTs) in parallel-parallel, parallel-series, series-parallel and series-series connection are set up using Y parameter, G parameter, H parameter and Z parameter respectively. All equations are then transformed into Y parameter form, which directly exhibit the relationship between the network characteristics and parameters of single PT and the number of connected PTs. Finally, simulation of electrical characteristics of PTs connected in the four ways is performed, and the theoretical analysis is verified by experiments of parallel-parallel connection. It shows that, only the parallel-parallel connection and parallel-series connection can increase voltage gain and output power.

Key words: piezoelectric transformer; two-port network; voltage gain; output power

1 引言

近年来压电变压器 (Piezoelectric transformer, 简称 PT) 作为一种新型电子器件是材料领域和信息领域的研究热点之一,如采用超薄压电变压器制成的逆变电源,具有体积小、超薄、转换效率高、温升小、无电磁干扰等杰出优点,在便携式 VCD、DVD、手机、数码相机、摄像机等彩屏背光电源、笔记本电脑、台式 LCD 显示屏背光电源及家用电器及仪器仪表中有广泛的应用前景.但随着信息产业的高速发展,液晶屏幕越来越大,功率需求也越来越高,低输出功率正成为压电变压器发展的最大障碍.多层压电变压器是提高输出功率的一种方法,但一方面多层制造技术非常复杂,批量生产一致性差、成本很高;另一方面在应用技术上,各个厂家的多层压电变压器差异很大,不能互换,控制回路结构、工作原理也不

相同,这些都妨碍了多层压电变压器的进一步推广应用.要提升 PT 的输出功率,若干压电变压器串并联连接也是一种可行的方法^[1-4].

目前,国内外关于压电变压器串并联特性的研究还不是很多,所见文献报道主要是关于商用 Rosen 型压电变压器的并-并连接.文献[1]用双 LCC 谐振回路模拟 2 个并-并连接的 PTs,提出了压电变压器并-并连接的基本要求是相并联的 PTs 谐振频率保持一致.文献[3]通过分析连接后电压增益的变化,指出了 Rosen 型压电变压器并-并连接个数大于 4 没有意义.尚未见到关于其它连接方式的分析以及四种连接方式比较的文献报道.本文基于压电变压器的经典集总参数等效电路模型,利用双口网络导纳矩阵 Y 参数、逆混合矩阵 G 参数、混合矩阵 H 参数、阻抗矩阵 Z 参数,分别对 PTs 并联输入-并联输出、并联输入-串联输出、串联输入-并联输出和

串联输入-串联输出四种联接方式的电压增益、输出功率、功率传输效率等电气特性作了详细的理论分析和比较; 并通过并-并联接实验验证了理论分析的正确性。

2 压电变压器电路模型和电气特性表达式

2.1 压电变压器等效电路模型

压电变压器的经典集总参数电路模型如图 1 所示^[5,6]。图中各元件的值均为 PT 谐振频率附近的等效值, 其中 R 、 C 、 L 组成串联谐振支路, C_{in} 和 C_o 分别是 PT 输入端和输出端的静态电容, $1:N$ 相当于理想变压器的变比。这些参数均取决于压电变压器的材料参数和几何尺寸^[7]。以下 Matlab 计算采用的模型参数为西安康鸿公司的 PT3906BR 型压电变压器的实测数据, 其中 $R = 19.52\Omega$, $L = 45.81\text{mH}$, $C = 62.78\text{pF}$, $C_{in} = 1.86\text{nF}$, $C_o = 13\text{pF}$, $N = 8$ 。

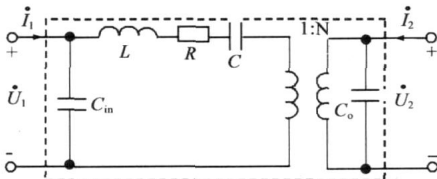


图 1 PT 经典集总参数电路模型

2.2 由 Y 参数表示的压电变压器端口电气特性

图 1 所示单片压电变压器的电路模型为 π 型线性无源双口网络, 其端口电压、电流关系用导纳矩阵 Y 参数描述比较方便, 图 2 用 Y 参数表示的单片 PT 双口网络如图 2 所示^[8]。其中 $Y_L = G_L + jB_L$ 表示负载的导纳, 参数 y_{11} 、 y_{12} 、 y_{21} 和 y_{22} 为 Y 参数的四个元素。对应图 1 所示单片 PT 等效电路模型, 参数 y_{11} 、 y_{12} 、 y_{21} 和 y_{22} 分别为:

$$y_{11} = j\omega C_{in} + Y_m, y_{12} = y_{21} = -\frac{1}{N}Y_m, y_{22} = j\omega C_o + \frac{1}{N^2}Y_m,$$

$$Y_m = \frac{1}{R + j\omega L - j\frac{1}{\omega C}}, \omega = 2\pi f.$$

由 Y 参数描述的单片 PT 的端口电气特性表达式如下:

电压增益 K_u 为:

$$K_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{|y_{21}|}{|Y_L + y_{22}|} \quad (1)$$

由式(1)可见, PT 的电压增益随负载阻抗的变化而变化。

负载有功功率, 即 PT 的输出功率 P_{out} 为:

$$P_{out} = \frac{U_2^2 K_u^2}{R_L} \quad (2)$$

为了研究方便, 取输入电压 $U_1 = 1\text{V}$, 则归一化的输出功率 P_{in} 为:

$$P_{out} = \frac{K_u^2}{R_L} = K_u^2 \text{Re}[Y_L] \quad (3)$$

由式(3)可见, PT 的输出功率不仅与负载阻抗有关, 还与电压增益的平方成正比。

输入导纳 Y_{in} 为:

$$Y_{in} = \frac{I_1}{U_1} = y_{11} - \frac{y_{12}y_{21}}{Y_L + y_{22}} \quad (4)$$

归一化的输入功率 P_{in} 为:

$$P_{in} = U_1^2 \text{Re}[Y_{in}] = \text{Re}[Y_{in}] \quad (5)$$

PT 的传输效率 η 为:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = K_u^2 \frac{\text{Re}[Y_L]}{\text{Re}[Y_{in}]} \quad (6)$$

3 压电变压器四种联接的电气特性分析

通常, PTs 有四种可能的联接方式^[9], 即并-并、并-串、串-并和串-串联接, 以两片 PTs 联接为例, 如图 3 所示。由图 3 可见, PTs 串并联接后的复合网络仍是一个无源线性双口网络, 四种联接方式的不同使端口电压和电流的约束关系不同, 端口作并联联接则端口电压被强制相同; 端口作串联联接则端口电流被强制相同^[10]。

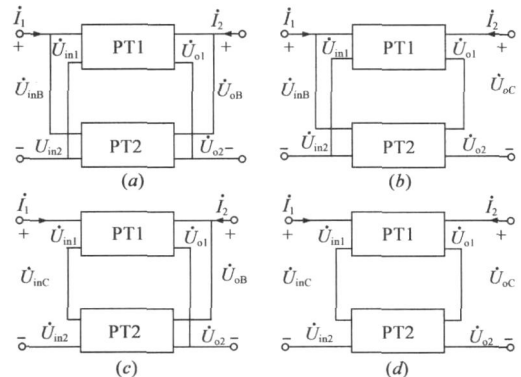


图 3 双口网络中 PTs 的四种联接方式

求复合网络参数方程时, 以相同的端口变量为自变量, 以不相同的端口变量为因变量。那么, 针对不同联接方式的复合网络采用特定的网络参数描述, 其复合网络的参数矩阵就是各子网络的参数矩阵之和。具体来说, 并-并联接采用导纳矩阵 Y 参数描述; 并-串联接采用逆混合矩阵 G 参数描述; 串-并联接采用混合矩阵 H 参数描述; 串-串联接采用阻抗矩阵 Z 参数描述。对子网络参数矩阵求和, 得到四种联接的复合网络 Y 、 G 、 H 、 Z 参数后, 利用参数之间的相互转换关系均转换成 Y 参数^[10], 再将 Y 参数相应元素分别代入式(1)~(6), 即可得到四种联接 PTs 的端口电气特性。串并联接后 PTs 共用一个驱动电路, 以下分析仅针对电路模型参数完全相同的 n 个 PTs 的联接, 并在仿真分析过程中均考虑了 PTs 联接后频率变化引起的 PT 子网络模型参数的变化。

3.1 压电变压器并-并联接电气特性分析

PTs 并-并联接如图 3(a) 所示, 复合双口网络的输入电压和输出电压被分别强制相同, 即 $U_{in1} = U_{in2} = U_{inB}$, $U_{o1} = U_{o2} = U_{oB}$, 总端口电流为两个 PT 各自端口电流之和. 记并-并联接复合网络的 Y 参数为 Y_{BB} , 那么, Y_{BB} 参数等于并联的各子网络的 Y 参数之和. 对于 n 个相同 PTs 并-并联接复合网络, 其 Y_{BB} 为单个 PT 子网络 Y 的 n 倍. 即:

$$Y_{BB} = \begin{bmatrix} ny_{11} & ny_{12} \\ ny_{21} & ny_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{BB}^{11} & y_{BB}^{12} \\ y_{BB}^{21} & y_{BB}^{22} \end{bmatrix} \quad (7)$$

用 Y 参数描述的并-并联接复合 PTs 的电气特性表达式如下:

由式(1), 电压增益 K_{uBB} 为:

$$K_{uBB} = \frac{|y_{BB}^{21}|}{|Y_L + y_{BB}^{22}|} = \frac{|ny_{21}|}{|Y_L + ny_{22}|} = \frac{|y_{21}|}{\left| \frac{1}{n}Y_L + y_{22} \right|} \quad (8)$$

比较式(8)与式(1)可以看出, 与单片 PT 相比, 电压增益 K_{uBB} 随着并-并联个数 n 的增加而增加.

由式(3), 归一化的输出功率 P_{outBB} 为:

$$P_{outBB} = K_{uBB}^2 \operatorname{Re}[Y_L] \quad (9)$$

比较式(9)与式(3)可以看出, 归一化的最大输出功率随并-并联个数 n 的增加而增加, 并受负载的影响.

由式(4), 输入导纳 Y_{inBB} 为:

$$Y_{inBB} = y_{11} - \frac{y_{12}y_{21}}{Y_L + y_{22}} = n \left(y_{11} - \frac{y_{12}y_{21}}{Y_L/n + y_{22}} \right) \quad (10)$$

由式(5), 归一化的输入功率 P_{inBB} 为:

$$P_{inBB} = \operatorname{Re}[Y_{inBB}] \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可以看出, 随着 PT 并联个数 n 的增加, 输入功率也在增加, 并且增加的幅度也在提高. PTs 的传输效率 η_{BB} 为:

$$\eta_{BB} = \frac{P_{outBB}}{P_{inBB}} = K_{uBB}^2 \frac{\operatorname{Re}[Y_L]}{\operatorname{Re}[Y_{inBB}]} \quad (12)$$

传输效率是输出功率与输入功率的比值, 在输出功率与输入功率均随并-并联接个数的增加而增加的情况下, 传输效率与单片 PT 相比变化不大.

由 Matlab 计算得到的 PTs 并-并联接的电气特性结果如图 4 所示, 负载 $Y_L = 1/R_L$, $R_L = 100\text{k}\Omega$

由图 4 可以看出, 并-并联接复合 PTs 的谐振频率随着并联个数 n 的增加略微增大; 电压增益、输入功率和输出功率均随着 n ($n \leq 4$) 的增加而增加; 传输效率则随着 n 的增加而略有降低, 但谐振频率附近效率均在 95% 以上. 从以上理论分析和 Matlab 计算结果可以看出, 压电变压器的并-并联接不仅能够提供更高的输出功率, 而且能提升电压增益. 无论是电压增益、输出功率还是传输效率均与负载有关, 所以, 从实际应用角度看,

n 个并-并联 PTs 的最大输出功率与最大效率的获得均与负载阻抗存在匹配问题.

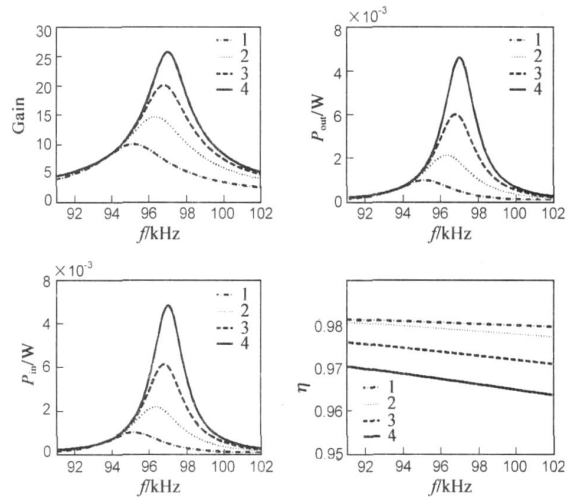


图 4 并-并联接的电压增益、功率、传输效率特性

3.2 压电变压器并-串联接电气特性分析

PTs 并-串联接如图 3(b) 所示, 复合双口网络的输入电压和输出电流被分别强制相同, 总输入电流和输出电压应为两个各自端口电流和电压之和. 并-串联接复合网络采用逆混合矩阵 G 参数来描述, 记为 G_{BC} .

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ U_{oC} \end{bmatrix} = G_{BC} \begin{bmatrix} U_{inB} \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{BC}^{11} & g_{BC}^{12} \\ g_{BC}^{21} & g_{BC}^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{inB} \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

G_{BC} 参数等于并-串联接的各子网络的 G 参数之和. 对于 n 个相同 PTs 并-串联接复合网络, 其 G_{BC} 为单个 PT 子网络 G 的 n 倍. 即:

$$G_{BC} = \begin{bmatrix} ng_{11} & ng_{12} \\ ng_{21} & ng_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{BC}^{11} & g_{BC}^{12} \\ g_{BC}^{21} & g_{BC}^{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

将 G_{BC} 转化为 Y_{BC} 参数, 整理得:

$$Y_{BC} = \begin{bmatrix} ny_{11} & y_{12} \\ y_{21} & \frac{1}{n}y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{BC}^{11} & y_{BC}^{12} \\ y_{BC}^{21} & y_{BC}^{22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

由 Y 参数描述的并-串联接复合 PTs 的电气特性表达式如下:

由式(1), 电压增益 K_{uBC} 为:

$$K_{uBC} = \frac{|y_{BC}^{21}|}{|Y_L + y_{BC}^{22}|} = \frac{y_{21}}{\left| Y_L + \frac{1}{n}y_{22} \right|} \quad (16)$$

由式(16)很容易看出, 与单片 PT 相比, 电压增益 K_{uBC} 随着并-串联个数 n 的增加明显增加.

由式(3), 归一化的输出功率 P_{outBC} 为:

$$P_{outBC} = K_{uBC}^2 \operatorname{Re}[Y_L] \quad (17)$$

由式(17)可以看出, 归一化的输出功率与电压增益的平方成正比, 所以, 最大输出功率随并-串联接个数 n 的增加而明显增加, 并受负载的影响.

由式(4), 输入导纳 Y_{inBC} 为:

$$Y_{inBC} = y_{BC}^{11} - \frac{y_{BC}^{12} y_{BC}^{21}}{Y_L + y_{BC}^{22}} = ny_{11} - \frac{y_{12} y_{21}}{Y_L + \frac{1}{n} y_{22}} \quad (18)$$

由式(5), 归一化的输入功率 P_{inBC} 为:

$$P_{inBC} = \text{Re}[Y_{inBC}] \quad (19)$$

由式(18)和(19)可见, 随着并-串联接个数 n 的增加, 输入功率也在增加。

PTs 的传输效率 η_{BC} 为:

$$\eta_{BC} = K_{uBC}^2 \frac{\text{Re}[Y_L]}{\text{Re}[Y_{inBC}]} \quad (20)$$

与并-并联接一致, 传输效率与单片 PT 相比变化也不大。

由 Matlab 计算得到的 PTs 并-串联接电气特性结果如图 5 所示, 负载 $Y_L = 1/R_L$, $R_L = 100\text{k}\Omega$

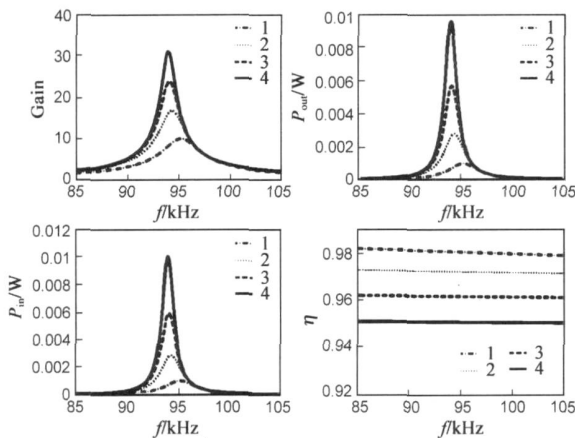


图 5 并-串联接的电压增益、功率、传输效率特性

由图 5 可以看出, 并-串联接复合 PTs 的谐振频率随着联接个数 n 的增加略微减小; 电压增益、输入功率和输出功率均随着 n ($n < 4$) 的增加而增加; 传输效率则随着 n 的增加略有降低, 但谐振频率附近效率也均在 95% 以上。从以上理论分析和 Matlab 计算结果可以看出, 压电变压器的并-串联接不仅能够提供更高的输出功率, 而且能提升电压增益。

3.3 压电变压器串-并联接电气特性分析

PTs 串-并联接如图 3(c) 所示, 复合双口网络的输入电流和输出电压被分别强制相同, 总输入电压和输出电流应为两个 PT 各自端口电压和电流之和。串-并联接复合网络采用 H 参数来描述, 记为 H_{CB} 。

$$\begin{bmatrix} U_{inC} \\ I_2 \end{bmatrix} = H_{CB} \begin{bmatrix} I_1 \\ U_{oB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{CB}^{11} & h_{CB}^{12} \\ h_{CB}^{21} & h_{CB}^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ U_{oB} \end{bmatrix} \quad (21)$$

H_{CB} 参数等于串-并联接的各子网络的 H 参数之和。对于 n 个相同 PTs 串-并联接复合网络, 其 H_{CB} 为单个 PT 子网络 H 的 n 倍。即:

$$H_{CB} = \begin{bmatrix} nh_{11} & nh_{12} \\ nh_{21} & nh_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{CB}^{11} & h_{CB}^{12} \\ h_{CB}^{21} & h_{CB}^{22} \end{bmatrix} \quad (22)$$

将 H_{CB} 参数转化为 Y_{CB} 参数, 整理得:

$$Y_{CB} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & ny_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{CB}^{11} & y_{CB}^{12} \\ y_{CB}^{21} & y_{CB}^{22} \end{bmatrix} \quad (23)$$

将式(23)所示 Y_{CB} 参数的相应元素代入式(1)、(3)、(5)和(6), 很容易看出, 与单片 PT 相比, 输出功率和电压增益均随着 n 的增加而显著降低, 同时传输效率也略有减低。所以, 从提高输出功率的角度, PTs 端口作串-并联接的方法并不适用, Matlab 的计算结果也证明了这点。

3.4 压电变压器串-串联接电气特性分析

PTs 串-串联接如图 3(d) 所示, 复合双口网络的输入电流和输出电流被分别强制相同, 总端口电压应为两个 PT 各自端口电压之和。串-串联接复合网络采用 Z 来描述, 记为 Z_{CC} 。

$$\begin{bmatrix} U_{inC} \\ U_{oC} \end{bmatrix} = Z_{CC} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{CC}^{11} & z_{CC}^{12} \\ z_{CC}^{21} & z_{CC}^{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Z_{CC} 参数等于串-串联接的各子网络的 Z 参数之和。

对于 n 个相同 PTs 串-串联接复合网络, 其 Z_{CC} 为单个 PT 子网络 Z 参数的 n 倍。即:

$$Z_{CC} = \begin{bmatrix} nz_{11} & nz_{12} \\ nz_{21} & nz_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{CC}^{11} & z_{CC}^{12} \\ z_{CC}^{21} & z_{CC}^{22} \end{bmatrix} \quad (25)$$

将 Z_{CC} 参数转 Y_{CC} 参数, 整理得:

$$Y_{CC} = \begin{bmatrix} \frac{1}{n} y_{11} & \frac{1}{n} y_{12} \\ \frac{1}{n} y_{21} & \frac{1}{n} y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{CC}^{11} & y_{CC}^{12} \\ y_{CC}^{21} & y_{CC}^{22} \end{bmatrix} \quad (26)$$

将式(26)所示 Y_{CC} 参数的相应元素代入式(1)、(3)、(5)和(6), 很容易看出, 与单片 PT 相比, 输出功率和电压增益均随着 n 的增加而显著降低, 同时传输效率也略有减低。所以, 从提高输出功率的角度, PTs 端口作串-串联接的方式没有意义, 这点已通过 Matlab 计算结果得到证明。

4 实验测试及结果分析

为了验证理论分析结果, 应对压电变压器并-并和并-串联接进行实验测试。但商用压电变压器多为 Rosen 型, 该压电变压器输入端和输出端共地, 因此, 输出端无法直接串联联接。关于“地”隔离的问题目前正在研究, 以下仅给出与 Matlab 计算相同型号的 Rosen 型压电变压器的并-并联接实验结果。分别测试了 1 片、2 片和 3 片并-并联接的电压增益, 以 2 片并-并联接为例, 测试装置如图 6 所示。图中功率信号发生器提供测试所需频

率的正弦输入电压, PT1 和 PT2 为参数接近的 2 片压电变压器, R_L 为负载电阻, TDS1002 示波器同时记录输入电压和负载端输出电压。

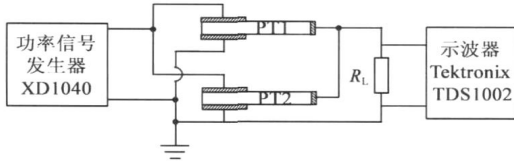


图 6 2 片 PTs 并-并联接特性测试装置

当负载 $R_L = 100\text{k}\Omega$ 时, 2 片并-并联接和 3 片并-并联接与 1 片 PT 的电压增益对比如图 7 所示, 由此得到的归一化输出功率特性如图 8 所示。

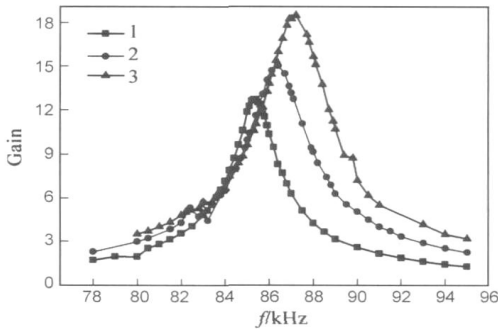


图 7 电压增益测试曲线

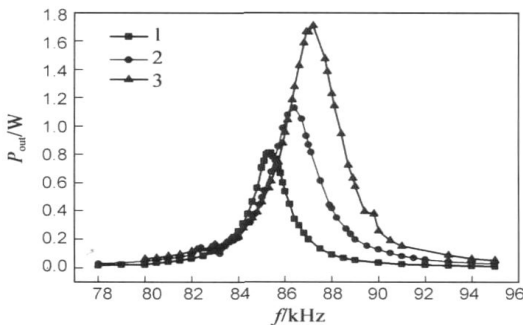


图 8 归一化输出功率测试曲线

1 片 PT、2 片和 3 片 PTs 并-并联接其谐振频率、最大电压增益和最大输出功率的计算数据和实验测量数据如表 1 所示。可以看出, (1) 1 片、2 片、3 片的谐振频率随着并联个数 n 的增加略微增大, 测试与计算所得规律吻合; (2) 2 片、3 片 PTs 并联的最大电压增益分别是 1 片 PT 的 1.181 倍、1.453 倍, 而计算值分别是 1 片 PT 的 1.469 倍、2.018 倍; (3) 2 片、3 片 PTs 并-并联接的最大输出功率分别是 1 片 PT 的 1.395 倍、2.111 倍, 而计算值分别是 1 片 PT 的 2.158 倍、4.069 倍。

表 1 PTs 谐振频率、最大电压增益和最大输出功率的计算值和实验测量值

主要参数 联接个数	谐振频率(f/kHz)		最大增益(K_u)		最大输出功率(P_{max}/W)	
	计算值	测量值	计算值	测量值	计算值	测量值
1 片 PT	95.2	85.3	9.934	12.716	0.987	1.617
2 片 PTs	96.4	86.4	14.596	15.021	2.130	2.256
3 片 PTs	96.8	87.2	20.040	18.476	4.016	3.414

表 1 中测量值与计算值存在差异, 就其原因分析如下:

(1) PTs 模型参数中内部损耗电阻 R 的差异对并-并联接 PTs 的电压增益存在影响, 如表 2 所示, 其中, 2 片 PTs 并-并联接的内部损耗电阻分别为 R_1 、 $R_1 - \Delta R$ 。

表 2 模型参数中 2 片 PTs 并-并联接电阻 R 不同对应的电压增益

$\Delta R/R_1$	-0.9	-0.5	0	1	4	9
增益(K_u)	14.74	14.67	14.59	14.44	14.00	13.33

在实际并-并联接时, 考虑到相同型号的 2 片 PTs 其 $|\Delta R|/R_1 < 1$, 由表 2 可以看出, R 的差异对并联的电压增益影响并不大, 相对误差小于 1.028%。

(2) PTs 模型参数中电容 C 和电感 L 的差异对并-并联接 PTs 的电压增益存在影响。由于谐振频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, 2 片 PTs 的电容 C 和电感 L 的差异引起并-并联接 PTs 谐振频率的变化。图 9 给出了 ΔC 分别为 -1pF 、 -0.5pF 、 0.5pF 和 1pF 对应的电压增益的频率特性曲线, 其中, 2 片 PTs 并-并联接的电容分别为 C_1 、 $C_1 - \Delta C$ 。

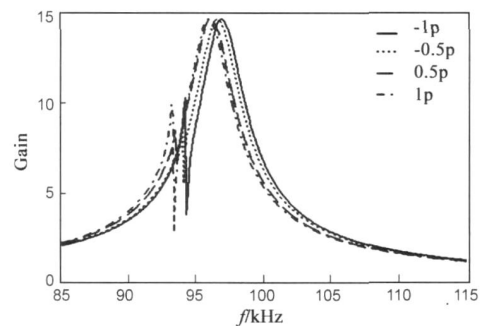


图 9 电容 C 差异对应的电压增益的频率特性曲线

由图 9 可以看出, 由电容差异 ($\Delta C < 1\text{pF}$) 引起的谐振频率相差不大, 其压电变压器的电压增益的相对变化量小于 0.288%。若谐振频率偏差较大时, 并联联接时没有共同的谐振点, 2 片 PTs 联接并没有真正发挥并联的作用。实际并联时 2 片压电变压器的谐振频率必须相当接近^[1]。同理, 2 片 PTs 并联模型参数中电感 L 的差异同样影响压电变压器的谐振频率 f , 其影响结果与图 9 一致。

(3) 模型参数中所忽略的输入、输出漏电阻对并-并联接 PTs 的电压增益存在影响。实验测试所用的 PT 输入、输出漏电阻不可能为零, 但通过仿真分析输入、输出漏电阻较小时对电压增益和最大功率的影响均很小。

综上, 理论分析所忽略的输入、输出漏电阻和实际并-并联接内部损耗电阻 R 的差异对压电变压器的关键参数电压增益和输出功率不是高度敏感, 对压电变压器的电气特性影响非常小; 而实际并-并联接电容 C 或电感 L 的差异影响压电变压器的谐振频率 f , 虽说谐振

频率 f 是敏感参数, 但实际并联时理论上要求两压电变压器的谐振频率必须相当接近, 只是压电变压器批量生产的一致性差, 实际上存在误差。

5 结论

本文从压电变压器的经典集总参数等效模型出发, 利用其线性无源双口网络的特点, 从端口外特性出发分析压电变压器串并联连接的电气特性, 不必考虑压电变压器的种类、结构和振型, 具有通用性; 四种连接的端口电气特性均由导纳矩阵 Y 参数表示, 表达式与单片压电变压器的模型参数及连接个数 n 之间的关系直观, 不仅能够揭示压电变压器连接后提高输出功率和电压增益的本质, 而且方便比较各种连接方式, 为压电变压器的连接提供理论指导。

分析计算表明, 压电变压器并-并和并-串联连接个数 $n \leq 4$ 时, 不仅能够达到更高的输出功率, 而且能提升电压增益, 在谐振频率附近效率均在 95% 以上。通过实验测试, 比较了 2 片和 3 片 PTs 并-并连接与 1 片 PT 的最大电压增益和最大输出功率, 验证了理论分析的正确性, 并分析了损耗及电容和电感差异对并-并连接电压增益的影响。

参考文献:

[1] Svetlana Bronstein, Gregory Ivensky, Sam Berr Yaakov. Parallel connection of piezoelectric transformers[A]. Proceedings of the 35th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2004. 1779- 1785.

作者简介:



白凤仙 女, 1963 年生于山西交城, 汉族, 硕士。主要从事电路与系统、压电变压器的理论与应用研究。E-mail: bai63@163.com

- [2] Yunxiu Li, Wei Chen. AG DC converter with worldwide range input voltage by series and parallel piezoelectric transformer connection[A]. Proceedings of the 35th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference [C]. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2004. 2668- 2671.
- [3] S W Fung, M H Pong. An improved piezoelectric transformers model with parallel connection feature[A]. Proceedings of the 1st Power Electronics Systems and Applications [C]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2004. 210- 215.
- [4] Kwok K F, Dong P, Cheng K W E. General study on piezoelectric transformers[A]. Proceedings of the 1st Power Electronics Systems and Applications [C]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2004. 216- 220.
- [5] W P Mason. Physical Acoustics Principles and Methods [M]. New York: Academic Press, 1A, 1964.
- [6] G Ivensky, I Zafrahy, S B Yaakov. Generic operational characteristics of piezoelectric transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(6): 1049- 1057.
- [7] Huang Yi hua, Zhou Kang yuan, Chen Xin. A study on property and application of piezoelectric transformer [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(11): 1549- 1551. (in Chinese)
- [8] Zhang Dong yan, Zhang Wei ping, D Y Chen, et al. Study on electrical characteristic of piezoelectric transformer by power flow method [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(11): 1648- 1650. (in Chinese)
- [9] L Weinberg. Network Analysis and Synthesis [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1962.
- [10] 邱关源, 罗先觉. 电路理论(第 5 版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 418- 435.



董维杰 女, 1968 年生于吉林白山, 汉族, 博士。主要从事压电功能材料的理论和应用研究、传感器芯片系统及微弱信号检测。E-mail: dongwj@dlut.edu.cn