

基于Y参数的压电变压器端口串-并联接特性研究

白凤仙^{*1}, 董维杰¹, 解永平²

(1. 大连理工大学 电子科学与技术学院, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 信息与通信工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于压电变压器的经典集总参数等效电路模型, 压电变压器串-并联接的电气特性由导纳矩阵Y参数描述, 导出了电压增益、输出功率和效率与单片压电变压器的模型参数和压电变压器联接个数的关系表达式, 并采用径向振动型压电变压器模型参数进行了仿真分析. 测试了电压增益为0.0816、输入和输出隔离的两片降压压电变压器, 在相同负载 $20\ \Omega$ 时, 端口串-并联接后的电压增益达到0.0406. 计算和实验结果表明, 压电变压器端口串-并联接能够进一步提升降压比. 因此, 压电变压器串-并联接可以作为实现降压的一种方法.

关键词: 等效电路; Y参数; 串-并联接; 电压增益; 降压

中图分类号: TM282 **文献标志码:** A

0 引言

目前, 压电变压器 (piezoelectric transformer, 简称 PT) 主要为升压型, 应用于高压小功率电源方面, 如驱动冷阴极荧光灯管 (CCFL), 而 CCFL 是笔记本电脑和手机等的 LCD 显示屏所必需的背光电源^[1,2]. 然而, 在现代通讯、电子计算机、传真机等高技术领域和家用电器方面, 需要大量低压微型开关电源^[3,4], 小型灵巧的压电陶瓷降压变压器有着广阔的应用前景. 但相对于升压型 PT 而言, 降压型 PT 结构比较复杂. 通常采用叠层结构来达到理想的降压效果^[5,6]. 但由于叠层压电变压器制造技术复杂、批量生产一致性差、成本高等妨碍了降压陶瓷压电变压器的进一步推广应用. 为了达到较好的降压效果, 文献[6]采用电磁自耦变压器 (tapped-inductor) 来调节压电变压器的输入电压, 从而改变压电变压器的输出电压, 达到改变变比的目的, 并将其实际应用到 DC/DC 转换器, 其优点为使用方便、调节范围大, 缺点就在于引入了 tapped-inductor. 文献[7、8]提出了结构简单、制作方便, 既可作为升压也可作为降压的径向振动、单向极化的压电变压器, 但该压电变

压器无论是作为升压还是降压其电压增益均不高. 就叠层结构的特点而言, 若干压电变压器端口串-并联接也是提升压电变压器电压增益的一种可行的方法^[9]. 文献[10]提出并验证了 PTs 的并-并和并-串联接是提升升压型压电变压器输出功率和电压增益的有效方法.

本文提出压电变压器的串-并联接是实现压电变压器降压的一种方法. 推导由 Y 参数描述的 PTs 串-并联接电气特性表达式, 采用径向振动模式的压电变压器模型参数对 PTs 串-并联接的电气特性进行仿真分析, 并与文献[6]所提供的结果作比较. 最后, 采用自制的同一极化方向的降压压电变压器验证方法的可行性.

1 压电变压器电路模型和电气特性表达式

1.1 压电变压器等效电路模型

PT 经典集总参数电路模型如图 1 所示. 图中各元件的值为 PT 谐振频率附近的等效值, 其中 R 、 C 、 L 组成串联谐振支路, $1:N$ 相当于理想变压器的变比, C_{in} 和 C_{out} 是 PT 的输入电容和输出电容, Z_L 表示负载阻抗.

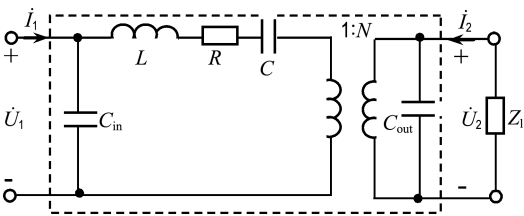


图 1 PT 经典集总参数电路模型

Fig. 1 Conventional lumped parameter circuit model of PT

1.2 由 $\mathbf{Y}$ 参数表示的压电变压器端口电气特性

基于压电变压器的等效电路模型为 π 型线性无源双口网络,由图 1 可以看出,其端口电压、电流关系用导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 参数描述比较方便^[11],如式(1)所示.

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = y_{11}\dot{U}_1 + y_{12}\dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 = y_{21}\dot{U}_1 + y_{22}\dot{U}_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中参数 y_{11} 、 y_{12} 、 y_{21} 和 y_{22} 为 $\mathbf{Y}$ 参数的 4 个元素,分别为

$$y_{11} = j\omega C_{in} + Y, \quad y_{12} = y_{21} = -\frac{1}{N}Y,$$

$$y_{22} = j\omega C_{out} + \frac{1}{N^2}Y$$

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

由 $\mathbf{Y}$ 参数表示的压电变压器端口电气特性如下:

电压增益为

$$G_v = \frac{U_2}{U_1} = \frac{|y_{21}|}{|Y_1 + y_{22}|} \quad (2)$$

式中 $Y_1 = 1/Z_1$,即为负载导纳.由式(2)可见,PT 的电压增益随负载阻抗及工作频率的变化而变化.

PT 的输出功率为

$$P_{out} = \frac{U_1^2 G_v^2}{R_1} \quad (3)$$

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.

输入导纳为

$$Y_{in} = \dot{I}_1 / \dot{U}_1 = y_{11} - \frac{y_{12}y_{21}}{Y_1 + y_{22}} \quad (4)$$

输入功率为

$$P_{in} = U_1^2 \operatorname{Re}(Y_{in}) \approx \frac{U_1^2}{R} \quad (5)$$

PT 的传输效率为

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = G_v^2 \frac{\operatorname{Re}(Y_1)}{\operatorname{Re}(Y_{in})} \quad (6)$$

2 压电变压器串-并联接电气特性分析

如图 2 所示为 PTs 串-并联接示意图.从电学的角度,PTs 串-并联接是指输入端口作串联联接,则端口电流被强制相同;输出端口作并联联接,则端口电压被强制相同.

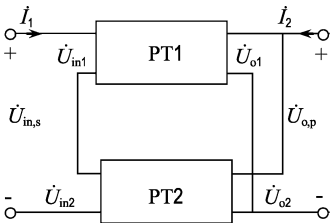


图 2 PTs 串-并联接示意图

Fig. 2 Series-parallel connected PTs

PTs 串-并联接组合之后仍为双口网络.求组合双口网络参数方程时,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.串-并联接可采用混合矩阵 $\mathbf{H}$ 参数描述,利用参数之间的相互转换关系转换为 $\mathbf{Y}$ 参数^[12],再将 $\mathbf{Y}$ 参数相应元素分别代入式(2)~(6),即可得到 PTs 串-并联接的端口电气特性. PTs 串-并联接共用一个驱动电路,以下分析仅针对电路模型参数完全相同的 m 个 PTs 的联接.

2.1 压电变压器串-并联接端口电气特性分析

由图 2 可见,串-并联接组合后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-并联接组合网络采用 $\mathbf{H}$ 参数来描述,记为 $\mathbf{H}_{sp}$.

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_{in,s} \\ \dot{I}_2 \end{pmatrix} = \mathbf{H}_{sp} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_{o,p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{sp}^{11} & h_{sp}^{12} \\ h_{sp}^{21} & h_{sp}^{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{U}_{o,p} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$\mathbf{H}_{sp}$ 参数等于串 - 并联接的各子网络的 $\mathbf{H}$ 参数之和.对于 m 个相同 PTs 串 - 并联接组合网络,其 $\mathbf{H}_{sp}$ 为单个 PT 子网络 $\mathbf{H}$ 的 m 倍.即

$$\mathbf{H}_{sp} = \begin{pmatrix} mh_{11} & mh_{12} \\ mh_{21} & mh_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{sp}^{11} & h_{sp}^{12} \\ h_{sp}^{21} & h_{sp}^{22} \end{pmatrix} \quad (8)$$

由 $\mathbf{Y}$ 参数表示的单个 PT 子网络的 $\mathbf{H}$ 参数为

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{y_{11}} & -\frac{y_{12}}{y_{11}} \\ \frac{y_{21}}{y_{11}} & \frac{\Delta y}{y_{11}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

其中 $\Delta y = y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}$.

将式(9)代入式(8)得 $\mathbf{H}_{\text{sp}}$ 参数,再将 $\mathbf{H}_{\text{sp}}$ 参数转化为描述 PTs 串-并联接的 $\mathbf{Y}_{\text{sp}}$ 参数,整理得

$$\mathbf{Y}_{\text{sp}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m}y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & my_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{\text{sp}}^{11} & y_{\text{sp}}^{12} \\ y_{\text{sp}}^{21} & y_{\text{sp}}^{22} \end{pmatrix} \quad (10)$$

将式(10)的对应元素代入式(2)~(6),从而得到由 $\mathbf{Y}$ 参数描述的 PTs 串-并联接的电气特性表达式如下:

电压增益为

$$G_{\text{v,sp}} = \frac{|y_{21}|}{|Y_1 + my_{22}|} = \frac{1}{m} \frac{|y_{21}|}{\left| \frac{1}{mR_1} + y_{22} \right|} \quad (11)$$

输出功率为

$$P_{\text{out,sp}} = \frac{U_1^2 G_{\text{v,sp}}^2}{R_1} = \frac{1}{m} \frac{U_1^2 (mG_{\text{v,sp}})^2}{mR_1} \quad (12)$$

输入导纳为

$$Y_{\text{in,sp}} = \frac{1}{m}y_{11} - \frac{y_{12}y_{21}}{Y_1 + my_{22}} = \frac{1}{m} \left(y_{11} - \frac{\frac{y_{12}y_{21}}{1}}{\frac{1}{mR_1} + y_{22}} \right) \quad (13)$$

输入功率为

$$P_{\text{in,sp}} = U_1^2 \text{Re}(Y_{\text{in,sp}}) \approx \frac{U_1^2}{mR} \quad (14)$$

PTs 的传输效率为

$$\eta_{\text{sp}} = \frac{P_{\text{out,sp}}}{P_{\text{in,sp}}} = \frac{G_{\text{v,sp}}^2}{R_1 \text{Re}(Y_{\text{in,sp}})} \approx \frac{mR G_{\text{v,sp}}^2}{R_1} = \frac{R(mG_{\text{v,sp}})^2}{mR_1} \quad (15)$$

比较式(11)~(15)与相应的式(2)~(6)可以看出,串-并联接后压电变压器的电压增益 $G_{\text{v,sp}}$ 、输出功率 $P_{\text{out,sp}}$ 和输入功率 $P_{\text{in,sp}}$ 均随联接个数 m 而减小.具体而言,串-并联接后压电变压器的 $G_{\text{v,sp}}$ 、 $P_{\text{out,sp}}$ 和 $P_{\text{in,sp}}$ 在负载为 R_1 的值为单个压电变压器在负载为 mR_1 时的 $1/m$,而效率 η_{sp} 在 R_1 的值与单个 PT 在 mR_1 的值相当.

2.2 压电变压器串-并联接电气特性仿真与验证

仿真分析采用的单片压电变压器模型参数由文献[6]提供,如表 1 所示.

由 Matlab 仿真得到 PTs 串-并联接的电压增益、 $U_1=1\text{ V}$ 的输出功率和传输效率频率特性曲线分别如图 3~5 所示.其中负载 $Y_1=1/R_1$, $R_1=100\ \Omega$.

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

参数	数值
L_{m}/mH	16.7
C_{m}/pF	70.8
R_{m}/Ω	51.5
C_{in}/pF	755
C_{out}/nF	18.5
N	0.2

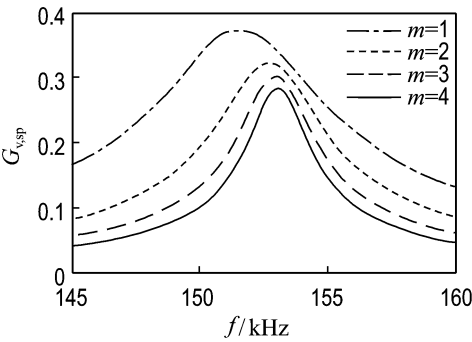


图 3 PTs 串-并联接电压增益频率特性曲线

Fig. 3 Voltage gain vs. frequency for series-parallel connected PTs

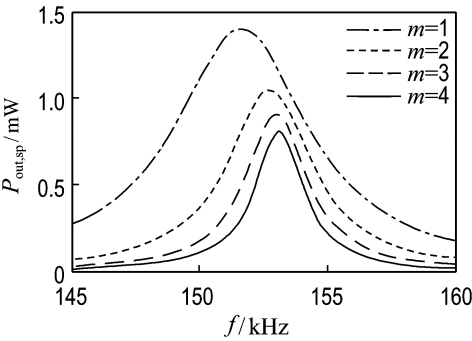


图 4 PTs 串-并联接输出功率频率特性曲线

Fig. 4 Output power vs. frequency for series-parallel connected PTs

由图 3 可见,与单片 PT 比较,PTs 串-并联接后电压增益明显降低,谐振频率略有增大.但随着串-并联接个数的增加,电压增益降低的幅度不

大,谐振频率点基本不变,联接个数超过 4 个时电压增益降低的幅度很小。

由图 4 可见,与单片 PT 比较,PTs 串-并联接后输出功率明显降低,但随着串-并联接个数的增加,降低的幅度不大。由于输出功率与输出电压的平方成正比,与所带负载的电阻值成反比,应根据负载的需要确定串-并联接的个数。

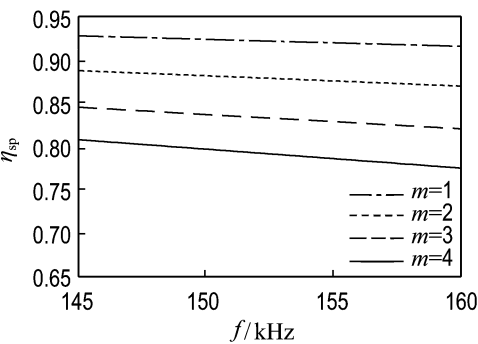


图 5 PTs 串-并联接传输效率频率特性曲线
Fig. 5 Efficiency vs. frequency for series-parallel connected PTs

由图 5 可见,随着串-并联接个数的增加,传输效率有所降低,但联接个数不超过 4 个时效率基本在 80% 以上。

文献[6]提供的实验结果如图 6 所示。可见,图 3 所示电压增益随联接个数 m 变化的频率特性曲线的变化规律与图 6 通过减小自耦变压器的线圈匝数比 n 调节电压增益的变化规律相吻合。因此,压电变压器串-并联接是可行的一种降压方法。

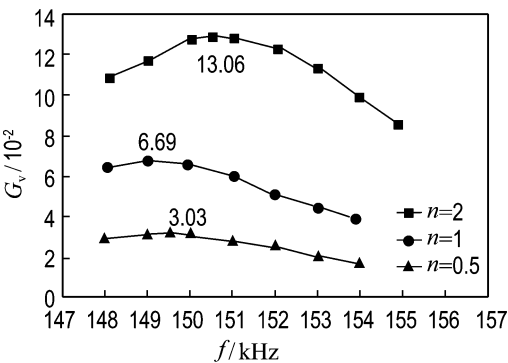


图 6 文献[6]提供的电压增益频率特性曲线
Fig. 6 Voltage gain vs. operating frequency in Lit. [6]

3 实验测试及结果分析

为了验证理论分析结果,本文采用自制的同一极化方向的降压压电变压器(外直径 26 mm,内直径 5 mm,厚度 1 mm),分别测试了 1 片 PT、2 片 PTs 串-并联接的电压增益,该 PT 串-并联接电气特性的仿真结果与上述采用文献[6]的参数所得变化规律完全一致。以 2 片串-并联接为例,测试装置如图 7 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。

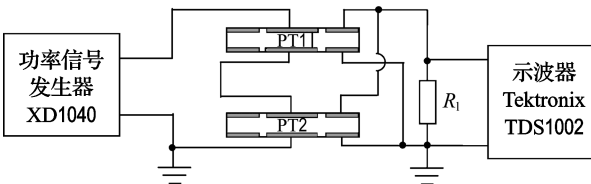


图 7 2 片 PTs 串-并联接特性测试装置
Fig. 7 Measuring system of the two series-parallel connected PTs

当负载 $R_L=20\ \Omega$ 时,2 片 PTs 串-并联接与 1 片 PT 的电压增益对比如图 8 所示,由此得到 $U_1=1\text{ V}$ 的输出功率特性如图 9 所示。

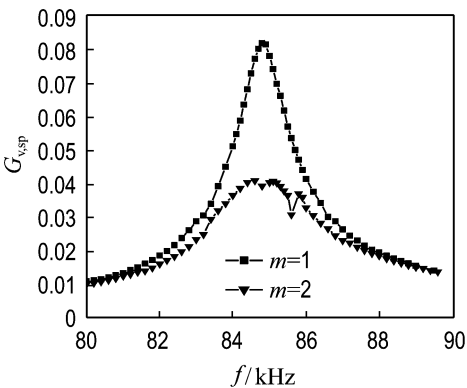


图 8 电压增益频率特性测试曲线
Fig. 8 Relation between voltage gain of PTs and driving frequencies

由图 8 和 9 可以看出,1 片 PT、2 片 PTs 串-并联接电压增益和输出功率频率特性曲线的变化规律与上述仿真结果相吻合。其谐振频率、最大电压增益和最大输出功率的计算和实验测量数据如

表 2 所示.可以看出①1 片 PT、2 片 PTs 串-并联接的谐振频率测试与计算所得规律吻合;②1 片 PT、2 片 PTs 串-并联接的最大电压增益分别是 0.091 75和 0.046 72,而计算值分别是 0.081 59 和 0.040 60,虽说测量值偏高,但串-并联接后 PTs 电压增益降低的程度几乎相同.

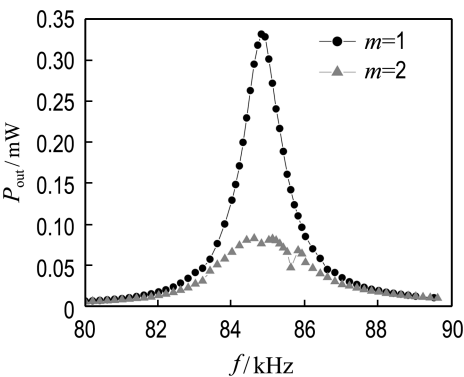


图 9 输出功率频率特性测试曲线
Fig. 9 Relation between output power of PTs and driving frequencies

表 2 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

Tab.2 The simulated and measured results of the resonant frequency, the maximum voltage gains and output power of PTs

联接 个数	f/kHz		$G_{v,max}$		P_{max}/W ($U_{in}=110\text{ V}$)	
	计算值	测量值	计算值	测量值	计算值	测量值
1	94.8	84.8	0.091 75	0.081 59	5.093	4.027
2	94.8	84.8	0.046 72	0.040 60	1.321	0.999

表 2 中测量值与计算值存在差异,就其原因分析如下:

(1)实际测试使用的 2 片 PTs 其模型参数 R 、 L 和 C 存在差异,而分析计算采用完全相同的 R 、 L 和 C 参数.

(2)分析计算所采用的等效电路模型均忽略输入、输出漏电阻,而实际测试输入、输出漏电阻不可能为零.

综上,等效电路模型所忽略的输入、输出漏电阻和实际 PTs 内部损耗电阻 R 的差异对串-并联接后 PTs 的电气特性影响非常小.但 PTs 串-并

联接理论上要求 PTs 的谐振频率必须相同,而实际 PTs 的模型参数电容 C 或电感 L 尚存在误差.文献[13]详细讨论了 PT 的模型参数取决于尺寸、压电系数和压电元件的工作模式等,并指出 PTs 在同一生产工艺过程下,其尺寸、能量传播速度、所有的质量和力学性能等完全相同.因此,只要 PTs 是同一生产工艺,模型参数 L 和 C 就非常接近,PTs 的谐振频率几乎相同.所以,实际 PTs 的串-并联接可以实现.

4 结 论

(1) 压电变压器串-并联接后的电压增益、输出功率和最大效率仍满足压电变压器的性能要求.

(2) 压电变压器的串-并联接可以作为实现降压的一种方法.即对于升压型压电变压器而言,如果电压增益较高不满足要求,可以根据需要,通过串-并联接降低电压增益;对降压型压电变压器,若降压效果不理想,可以通过串-并联接达到理想的降压效果.

(3) 压电变压器的最大效率随着联接个数的增加有所降低.但联接个数不超过 4 个时,最大效率基本在 80%以上.

(4) 压电变压器的串-并联接的个数取决于所需输出电压及所带负载.从效率和电压增益增加的幅度考虑,联接个数超过 4 个时,意义不大.

参考文献:

[1] CHOI S J, LEE K C, CHO B H. Design of fluorescent lamp ballast with PFC using a power piezoelectric transformer [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2005, **52**(6):1573-1581

[2] TERANISHI K J, ITOH H U. A compact excimer lamp constructed by piezoelectric transformer [J]. **Journal of Light and Visual Environment**, 2007, **31**(1):5-10

[3] RYU M H, CHOI S J, LEE S. A new piezoelectric transformer driving topology for universal input AC/DC adapter using a constant frequency PWM control [C] // **21st Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06**.

Piscataway:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. , 2006:1314-1317

[4] LIM K J, KANG S H, KIM H H, *et al.* Design and performance of miniaturized piezoelectric step-down transformers [J]. **Journal of Electroceramics**, 2004, **13**(1-3):433-442

[5] OSAMU O, YASUHIRO S, TOSHIYUKI Z, *et al.* Piezoelectric ceramic transformer for power supply operating in thickness extensional vibration mode [J]. **IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences**, 1994, **E77-A**(12):2098-2105

[6] PARK J H, CHOI S J, LEE S M, *et al.* Gain-adjustment technique for resonant power converters with piezoelectric transformer [C] // **38th IEEE Power Electronics Specialists Conference**. Piscataway:Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. , 2007:2549-2553

[7] PRIYA S, URAL S, KIM H W, *et al.* Multilayered unipoled piezoelectric transformers [J]. **Japanese Journal of Applied Physics, Part 1:Regular Papers and Short Notes and Review Papers**, 2004, **43**(6A):3503-3510

[8] HEMSEL T, PRIYA S. Model based analysis of piezoelectric transformers [J]. **Ultrasonics**, 2006, **44**(s1):e741-e745

[9] WANG Rui-hua. **Electronic Transformer Design Manual** [M]. Beijing:Science Press, 1993:350-351

[10] 白凤仙,董维杰,肖磊. 压电变压器端口串并联接的电气特性分析[J]. 电子学报, 2008, **36**(5):998-1003

[11] 张东彦,张卫平,CHEN D Y,等. 用功率流方法研究压电陶瓷变压器的电气特性[J]. 电子学报, 2003, **31**(11):1648-1650

[12] 邱关源,罗先觉. 电路理论[M]. 5 版. 北京:高等教育出版社, 2006

[13] LIN R L. Piezoelectric transformer characterization and application of electronic ballast [D]. Blacksburg:Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001

Research on characteristics of series-parallel connected piezoelectric transformers based on Y parameter

BAI Feng-xian^{*1}, DONG Wei-jie¹, XIE Yong-ping²

(1. School of Electronic Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the conventional lumped parameter equivalent circuit model, the electrical characteristics of piezoelectric transformers (PTs) in series-parallel connection were analyzed using Y -parameter matrix. The voltage gain, output power and efficiency as function of parameters and the number of connected piezoelectric transformers were derived and simulated. And the electrical characteristics were simulated by using radial-mode vibrating PTs. Two piezoelectric transformers at the voltage gain of 0.081 6 with input and output parts isolated were tested. After series-parallel connection the voltage gain was reduced to 0.040 6 on the same load of 20 Ω . The computed and experimental results verify the fact that the series-parallel connection of piezoelectric transformers can enhance the voltage step-down ratio. Series-parallel connected piezoelectric transformers can realize voltage step-down.

Key words: equivalent circuit; Y parameter; series-parallel connection; voltage gain; voltage step-down