

压电变压器等效电路参数测量及性能模拟

叶星宏, 吴志明, 蒋亚东

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

【摘要】压电变压器与传统的电磁变压器相比较, 具有体积小、重量轻、升压比高、不易燃、无电磁污染等特点, 是电子信息系统中不可或缺的重要元件, 因而获得广泛应用。该文用Y参数等效电路模型, 通过Agilent-4294A测得了径向振动压电变压器的相关等效电路参数: R 、 L 、 C 、 C_{d1} 和 C_{d2} , 并比较了参数的测试值与理论值, 分析了其误差。将所得参数带入物理等效电路模型, 模拟和分析了径向振动压电变压器的升压比、输出功率和转换效率随负载变化的特性。

关键词 等效电路参数; 压电变压器; 径向振动; Y参数

中图分类号 TN384

文献标识码 A

Measurement of Equivalent Circuit Parameters and Characteristic Simulation of Piezoelectric Transformer

YE Xing-hong, WU Zhi-ming, JIANG Ya-dong

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Compared with conventional electromagnetic transformer, piezoelectric transformer has many advantages such as compact volume, high step-up ratio, non-flammability, and none-electromagnetic pollution. In this paper, the parameters of equivalent circuit of radial vibration mode piezoelectric transformer are measured through Y-parameter equivalent circuit model using Agilent-4294A impedance analyzer. The values of measurement and model are compared, and the causes of the differences are analyzed. Then the characteristics of variety of step-up ratio, output power, and efficiency with load are simulated and analyzed by turning the measured results into the formula.

Key words equivalent circuit parameter; piezoelectric transformer; radial vibration; Y-parameter

压电变压器是压电激励器与压电换能器的组合, 它能传输电能而不含有传统的磁性单元, 通过压电激励器和换能器之间的机电耦合而实现变压。由于它的特殊性能, 使它在许多领域得到了广泛的发展和运用, 如DC/DC转换器、荧光灯电子镇流器等。压电激励器和压电换能器都由压电陶瓷材料制成, 可为分离的部分, 也可为一体的结构如Rosen型。它们可以利用压电振子不同的工作模式组合形成压电变压器以达到不同的应用目的。如Rosen型为横向振动的激励器与长度振动的换能器组合在谐振频率下实现了升压的目的^[1-3]; 而厚度振动型压电变压器的激励器与换能器均为厚度振动的压电振子, 主要用于降压用途^[4-8]。经过几十年的发展, 压电变压器在材料研制、结构设计、电路模型建立、参数测量、器件制造、性能表征、驱动电路设计、应用设计等方面取得了长足的进步, 但是应用依然有限。如升压压电变压器的比功率还很有限, 传统的Rosen

型压电变压器比功率不超过10 W/cm³, 限制了其在大功率场合的应用。

近年来, 出现了一种大功率的新型压电变压器, 它的比功率可达到40 W/cm³, 是利用径向振动压电振子的组合来实现的。这种压电变压器的器件已由美国Transoner公司制作出来, 但有许多理论问题尚待解决。最近也有学者撰文建立了该器件较为准确的等效电路模型和等效参数。本文对此等效电路稍加简化和改进, 利用Agilent-4294A阻抗分析仪测试相关等效电路参数, 将测试结果与理论结果带入模型进行分析。

1 径向振动压电变压器的物理等效电路模型与相关参数

径向振动压电变压器的结构为径向振动的压电陶瓷圆片堆叠而成, 其等效电路如图1所示^[9], 它是参照文献[10-11]将等效电路参数进行了修正和简

收稿日期: 2005-09-06

作者简介: 叶星宏(1977-), 男, 硕士生, 主要从事压电变压器方面的研究。

化, 相关参数为:

$$R = \frac{(t_1 + t_2) \sqrt{2\rho S_{11}^{E3}(1-\sigma)^3}}{r \cdot 32Q_m d_{31}^2}, L = (t_1 + t_2) \frac{\rho S_{11}^{E2}(1-\sigma)^2}{16\pi d_{31}^2}$$

$$C = \frac{32r^2}{(t_1 + t_2) \pi S_{11}^E(1-\sigma)}, C_{d1} = \frac{\pi r^2 \varepsilon_{33}^T \left[1 - \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T S_{11}^E(1-\sigma)} \right]}{t_1}$$

$$C_{d2} = \frac{\pi r^2 \varepsilon_{33}^T \left[1 - \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{33}^T S_{11}^E(1-\sigma)} \right]}{t_2}, f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中 R 为等效电阻; L 为等效电感; C 为等效电容; C_{d1} 为输入电容; C_{d2} 为输出电容; f_0 为谐振频率。

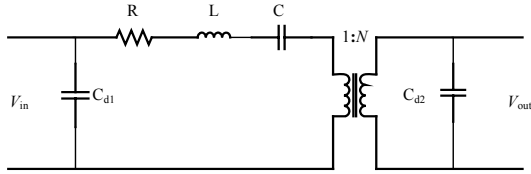


图1 径向振动压电变压器等效电路

2 径向振动压电变压器的相关等效参数测试及性能分析

2.1 Y参数等效电路模型及测试模型

Agilent-4294A阻抗分析仪支持Y参数等效电路模型, 如图2、图3所示的导纳等效电路。

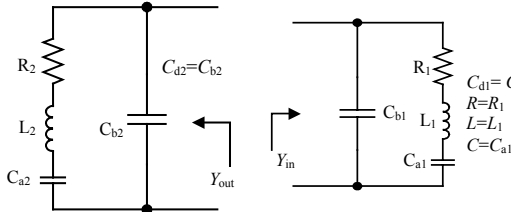


图2 输入端等效电路 图3 输出端等效电路

通过对压电变压器输入或输出端短路, 其物理等效电路与图2、图3的Y参数等效电路模型相同。因此Y参数等效电路模型可用于压电变压器等效电路模型的参数测试和表征。

(1) 输出端短路, 即压电变压器的 V_{out} 两端短路。输入导纳 Y_{in} 可以通过 Agilent-4294A 阻抗分析仪测得。然后分析仪可以用 Y 参数等效电路建立输入导纳模型。Y 参数等效电路包括四个参数: R_1 、 L_1 、 C_{a1} 和 C_{b1} , 如图2所示。压电变压器等效电路的四个参数可以通过相应参数得到。

(2) 输入端短路, 即压电变压器的 V_{in} 两端短路。输出导纳 Y_{out} 可以通过 Agilent-4294A 阻抗分析仪测得。然后分析仪可以用 Y 参数等效电路建立输出导纳

模型。Y 参数等效电路包括四个参数: R_2 、 L_2 、 C_{a2} 和 C_{b2} , 如图3所示。得到物理等效电路的参数 C_{d2} 。

2.2 测试径向振动压电变压器试样

用上述测试方法测试单层样品的等效电路参数, 将测试结果与推导的物理等效电路模型的参数进行比较。样品的尺寸是相同的: 直径 $r=12.5$ mm; 输入端厚度 $t_1=2$ mm; 输出端厚度 $t_2=4$ mm。样品采用 PZT-8 压电材料, 参数如表1所示。表2比较了等效电路模型相关参数 C_{d1} 、 C_{d2} 、 R 、 L 、 C 、 f_0 的测试结果与计算结果。

表1 PZT-8压电材料参数

$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	泊松比密度 σ	相对介电常数 ε_{33}^T
7.6	-0.32	$800\varepsilon_0$
机械品质因数 Q_m	压电常数 $d_{31}/\text{m}\cdot\text{V}^{-1}$	柔顺系数 $S_{11}^E/\text{m}^2\cdot\text{N}^{-1}$
1 100	-109×10^{-12}	8×10^{-12}

表2 相关参数的测试值与理论值比较

	C_{d1}/nF	C_{d2}/pF	R/Ω	L/mH	C/pF	F_0/kHz
理论值	1.46	731	3.24	5.68	448	99.8
样品1	1.69	907	2.83	6.31	459	93.2
样品2	1.42	848	3.35	6.33	378	93.5
样品3	1.50	865	2.64	6.71	430	93.7
样品4	1.66	868	2.67	6.89	415	94.1
样品5	1.58	826	2.62	6.75	427	93.7
样品6	1.75	803	2.55	6.64	431	94.2
样品7	1.15	972	3.15	7.04	358	93.7
样品8	1.70	829	2.35	6.27	460	93.7
样品9	1.68	848	2.83	6.25	463	93.5
样品10	1.68	904	2.51	6.74	427	94

可见, 使用Y参数等效电路模型测得的 R 、 L 、 C 值能与物理等效电路模型计算所得的数值较好地符合。谐振状态下的升压比为^[10]:

$$A_v = \frac{R_L \sqrt{1 + (2\pi f_0 C_{d2} R_L)^2}}{R [1 + (2\pi f_0 C_{d2} R_L)^2] + R_L} \quad (1)$$

式中 R_L 为负载电阻。

将测定的参数值代入得到测量结果的计算值, 将其与由材料参数计算所得的理论值比较, 可以分析 R 、 L 、 C 的误差带来的升压比的漂移。取 $R_L=10$ k Ω , 得到升压比的测试计算值与理论值的关系如图4所示。虽然测试计算值与理论值能较好地吻合, 但误差难以避免。它可能由三个因素造成:

- (1) 压电陶瓷材料参数的误差。
- (2) 尺寸误差。
- (3) 由于粘接剂和引出电极引起的额外的机械损耗。

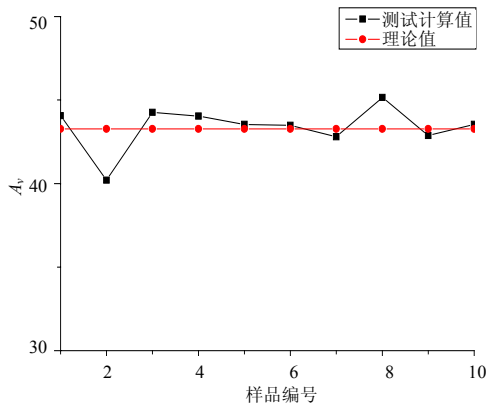


图4 升压比的测试计算值与理论值的比较

2.3 径向振动压电变压器的性能分析

根据RLC等效电路还可以对径向振动压电变压器进行性能分析,以便对不同的应用环境进行优化分析。根据物理等效电路及式(1)可得^[10]输出功率和转换效率分别为:

$$P_o = \frac{V_{in}^2 R_L^2 [1 + (2\pi f_o C_{d2} R_L)^2]}{[R[1 + (2\pi f_o C_{d2} R_L)^2] + R_L]^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + [1 + (2\pi f_o C_{d2} R_L)^2](R/R_L)} \quad (3)$$

由前面测得的等效参数值可模拟出径向振动压电变压器的特性曲线。取4号样品, $V_{in}=10\text{ V}$, 根据测得的参数值,可模拟得到图5~图7。

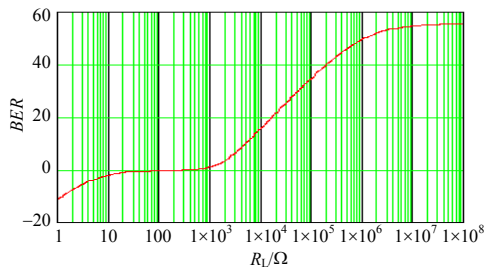


图5 谐振频率下升压比的负载特性曲线

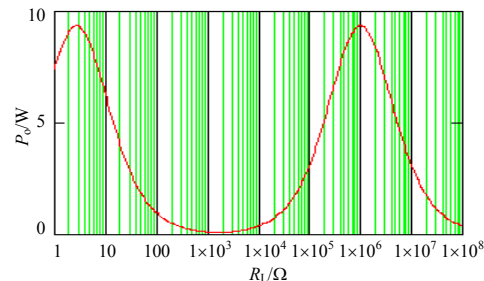


图6 谐振频率下输出功率的负载特性曲线

由图可知,4号样品的升压比随负载的增加而增大,刚开始较为平缓,随后有一段激增区,当负载

较大时,升压比的增加已经不太明显,为一平缓的曲线。而输出功率特性为:刚开始增大有一峰值,随后降低到一最小值,又开始增大到一峰值后又随负载的增大逐渐降低。转换效率在负载为1~10 kΩ时有最大值,其他区段较小,当负载过大(>10 MΩ)时,转换效率非常低。

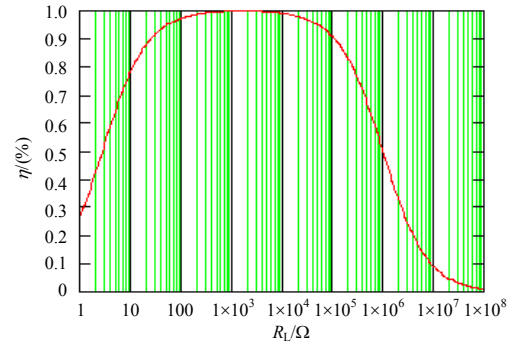


图7 谐振频率下转换效率的负载特性曲线

3 结束语

Y 参数等效电路模型可以较为准确地测得径向振动压电变压器的等效电路参数: R 、 L 、 C 、 C_{d1} 和 C_{d2} 。准确测量这些参数将有助于筛选压电振子,剔除有缺陷的振子,选择性能更出色、谐振频率更接近设计要求的压电振子。将所得参数代入物理等效电路模型,可以模拟和分析径向振动压电变压器的工作特性。本文的测量和分析对于更精确模拟、更深入了解、更优化设计径向振动压电变压器都将有所帮助。

参考文献

- [1] SYED E M, DAWSON F P, ROGERS E S S. Analysis and modeling of a Rosen type piezoelectric transformer[J]. IEEE PESC, 2001, 4: 1761-1766.
- [2] FUKUNAGA H, KAKEHASHI H, OGASAWARA H, et al. Effect of dimension on characteristics of Rosen-type piezoelectric transformer[J]. PESC, 1998, 2: 1504-1510.
- [3] HSU Yu-hsiang, LEE Chih-kung, HSIAO Wen-hsin. Electrical and mechanical fully coupled theory and experimental verification of Rosen-type piezoelectric transformers[J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions, 2005, 2: 1829-1839.
- [4] ZAITSU T, OHNISHI O, INOUE T, et al. Piezoelectric transformer operating in thickness extensional vibration and its application to switching converter[C]//PESC '94. [S.l.]: [s.n.], 1994: 585-589.
- [5] OHNISHI O, KISHIE H, IWAMOTO A, et al. Piezoelectric ceramic transformer operating in thickness extensional vibration mode for power supply[J]. Proceedings, IEEE 1992 Ultrasonics Symposium, 1: 483-488.

(下转第812页)

学习在每一个迭代步骤上进行。在得到角色值调整向量的基础上, 系统对机器人的角色值进行整体调整。

针对FIRA规则, 比赛通过积分来判定胜出者, 把积分作为判定的标准。表1中的数据分别表示了参赛的次数及平均得分。实验数据显示本方法可用来进行动作优化, 实现了足球机器人的智能行为学习。

表1 比赛的次数及平均得分

队	次数				
	100	200	300	400	500
对比队	2	3	4	3	2
Q学习队	3	6	8	7	9

4 结论

本文将基于角色值的Q学习方法用于机器人行为参数的优化, 开辟了一个新的研究思路。仿真实验证明该方法是有效的, 降低了机器人丢球、漏球、不作为的可能性, 弥补了按区域分配固定角色的不足, 有明显的实用性。

参考文献

[1] 王 琰, 章 毅, 吴 跃. MAS环境下实现Agent交互协作的关键技术[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(2): 158-163.

[2] 宁春林, 田国会, 尹建芹, 等. 机器人足球比赛及其发展[J]. 山东大学学报(工学版), 2002, 32(5): 81-82.
 [3] CALLAN R. 人工智能[M]. 黄厚宽, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
 [4] LIU Ji-ming, 张世武. 多智能体模型与实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
 [5] 张汝波, 顾国昌. 强化学习理论、算法及应用[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 637-642.
 [6] SUTTON R S, BARTO A G. Reinforcement learning[M]. [S.l.]: MIT Press, 1998.
 [7] 战 强, 王树国. 世界多机器人技术的研究现状[J]. 机器人技术与应用, 1999, 12(2): 10-12.
 [8] 安 刚, 马宏鹏. 多机器人系统研发平台的功能、结构与实现[J]. 自动化与仪表, 2001, 16(1): 62-65.
 [9] KIM Jong-hwan. Lecture notes on multi-robot cooperative system development[M]. Seoul, Korea: Green Publishing Company, 1998.
 [10] CLAUS C, BOUTILIER C. The dynamics of reinforcement learning in cooperative multi-agent systems[C]//Proc. of 5th National Conference on Artificial Intelligence. Cambridge, MA: [s.n.], 1998: 235-262.
 [11] KAELHLING L P, LITTMAN M L. Reinforcement learning[J]. A Survey Journal of Artificial Intelligence Research, 1996, 4: 237-285.

编辑 黄 莘

(上接第783页)

[6] ZAITSU T, INOUE T, OHNISHI O, et al. 2 MHz power converter with piezoelectric ceramic transformer[C]//14th International Telecommunications Energy Conference, INTELEC '92. [S.l.]: [s.n.], 1992: 430-437.
 [7] INOUE T, INOUE S, OHDE N. Thickness mode vibration piezoelectric transformer[S]. U. S. Patent 8, 118, 982, 1992.
 [8] ZAITSU T. Power conversion using piezoelectric transformer[D]. Fukuoka: Kyushu University, 1997.
 [9] 黄以华, 周康源. 径向振动压电变压器的等效电路模型

及特性研究[J]. 电子学报, 2002, 30(11): 1 585-1 588.
 [10] LIN C Y. Design and analysis of piezoelectric transformer converters[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
 [11] 张福学, 王丽坤. 现代压电学(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

编辑 漆 蓉