**文章编号:**1004-2474(2016)04-0527-04

## 压电变压器三维温度分布研究

邵维维1,潘成亮2,李培洋1,韩志乐1,崔崤峣1

 (1.中国科学院苏州生物医学工程技术研究所,江苏苏州 215163;2.合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院,安徽 合肥 230009)
 摘 要:压电变压器工作中存在的热问题严重阻碍了其在高功率方面的发展和应用。文章分别对输入电压 峰-峰值为 60 V,80 V,100 V 压电变压器轮廓振型的三维温度分布进行了有限元分析和实验测量。分析结果为压 电变压器散热装置的设计提供参考依据。对比实验结果,仿真结果弥补了实验中因焊点位置、制作工艺等对温度 分布带来的影响。

## Research on Three-dimensional Temperature Distributionanalysis of Piezoelectric Transformer

## SHAO Weiwei<sup>1</sup>, PAN Chengliang<sup>2</sup>, LI Peiyang<sup>1</sup>, HAN Zhile<sup>1</sup>, CUI Yaoyao<sup>1</sup>

Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Science, Suzhou 215163, China
 Instrument Science and Photoelectric Engineering College, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract**: Thermal dissipation problems in operation process of piezoelectric transformer have seriously limited its development in high-power applications. A three-dimensional temperature distribution of a monolayer rectangle piezoelectric transformer was simulated and measured in contour vibration mode in this paper. The experiments with input voltage 60 V,80 V,100 V were setup to compare with simulation result. The simulation result supplemented the experiment temperature distribution influenced by the solder joint position and manufacture process.

Key words: piezoelectric transformer; temperature distribution; finite element simulation; infrared measurement; piezoelectric material loss

0 引言

压电变压器利用压电效应,通过机电耦合将电能转换到机械能,再将机械能转换为电能,实现电压改变,达到输入电源与驱动负载匹配的目的。压电变压器具有功率密度高,结构简单,成本低等优势,可以降低电源模块的体积和质量,有望成为电磁变压器的替代产品<sup>[1-2]</sup>。现阶段高压低功率的压电变压器发展较成熟,已成功应用在冷阴极管驱动<sup>[3-4]</sup>及等离子发生器等产品中;在高功率方面的应用,国内、外学者对压电变压器开展了一系列的研究,包括压电变压器的多层化<sup>[5-7]</sup>,高频切向振型压电变压器。,改变传统压电变压器形状<sup>[9]</sup>,改善其驱动电路<sup>[10-11]</sup>,改进连接方式<sup>[12]</sup>,引入新的压电材料<sup>[13-14]</sup>等。这些研究对提升压电变压器功率有一定作用,但压电变压器功率密度一般低于 30 W/cm<sup>3</sup>,而理

论上压电变压器的功率密度可达 400 W/cm<sup>3</sup>。这 种实际和理论功率密度的差距主要是由压电变压器 运行过程中发热造成的。压电变压器工作过程中产 生介电、压电和机械损失,这些损失以热量形式存储 在压电变压器内使其温度升高,压电材料参数逐步 恶化,最后退极化,导致压电变压器不能正常工作, 因此压电变压器的热问题受到越来越多的关注。为 了研究 Rosen 型压电变压器高阶振型的热影响, Kanayama 用有限元法分析了热应力分布<sup>[16]</sup>;Joo 对多层压电变压器温度分布进行了有限元分析<sup>[16]</sup>;Joo 对多层压电变压器温度分布进行了有限元分析<sup>[16]</sup>; Kartashev 通过实验分析了温度对单层压电变压器 特性的影响<sup>[17]</sup>。对于常用的轮廓振型单层压电变 压器的三维温度分布,至今没有研究。本文选择常 用的单层矩形压电变压器作为分析对象,根据压电 变压器轮廓振型发热原理结合有限元软件 ANSYS

收稿日期:2015-10-13

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61301041):江苏省自然科学基金青年科学基金资助项目(SBK201340405)

作者简介:邵维维(1985-),女,安徽宿州人,副研究员,主要从事压电变压器和压电换能器的研究。E-mail: shaowei@sibet.ac.cn。通信作者:崔崤峣(1974-),女,陕西西安人,研究员,主要从事超声图像、超声生物效应、超高频系统和光声成像的研究。E-mail: cuiyy @sibet.ac.cn。

建立完整的压电变压器模型,结合实际实验情况获 得阻尼参数,可以较准确计算出压电变压器运行过 程中的三维温度分布。在匹配负载情况下,仿真输 入电压峰-峰值为 60 V,80 V,100 V的压电变压器 温度分布,并通过对应实验进行了验证,对实验和仿 真误差进行了分析,对单层轮廓振型压电变压器热 问题的研究和解决提供了很好的依据。

1 考虑发热的压电变压器模型

根据线性压电方程,以应力 X 和电场 E 作为自 变量,应变 S 和电位移 D 为因变量,建立适用于压 电变压器分析的 d 型压电方程<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} D = \boldsymbol{\varepsilon}^{X} E + \boldsymbol{d} X\\ S = \boldsymbol{d}^{\mathrm{T}} E + \boldsymbol{s}^{E} X \end{cases}$$
(1)

式中: $s^{E}$ 为弹性柔顺常数矩阵;d为应变压电常数矩阵; $d^{T}$ 是 d的转置矩阵; $e^{x}$ 为介电常数矩阵。

压电变压器在实际工作时,本身有阻尼,为了使 仿真更真实、有效,计算压电变压器的工作过程和输 出状态过程中考虑阻尼,常见的质量阻尼 α 和刚度 阻尼β为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{4\pi\zeta f_1 f_2}{f_1 + f_2} \\ \beta = \frac{\zeta}{\pi(f_1 + f_2)} \end{cases}$$
(2)

式中: $\zeta = 1/(2Q_m)$ , $Q_m$ 为品质因数。考虑阻尼后的 压电体稳态振动偏微分方程为

$$\begin{cases} (-\omega^2 + j_{\alpha\alpha})M\dot{u} + (1 + j_{\alpha\beta})K_{uu}\dot{u} + K_{u\phi}\dot{\phi} = F_{tot} \\ K_{u\phi}^i\dot{u} + K_{\phi\phi}\dot{\phi} = Q_S \end{cases}$$
(3)

式中: $K_{u\phi}$ 为压电耦合矩阵; $K_{uu}$ 为机械刚度矩阵;M为质量矩阵; $K_{\phi\phi}$ 为介电刚度矩阵; $q_s$ 为电表面电荷;  $F_{tot}$ 为机械力; $\phi$ 为电势;u为位移; $\omega$ 为角频率。

压电材料存在介电、压电、机械损耗,当迟滞在较 小范围内时,压电变压器每个节点中总的损失 Q<sub>pp</sub>为

$$Q_{\rm pp} = \sum_{i=1}^{3} f \pi \varepsilon^{X} \varepsilon_{0} (E_{0})_{i}^{2} \tan \delta' + \sum_{i=1}^{6} f \pi s^{E} (X_{0})_{i}^{2} \tan \phi'$$

$$\tag{4}$$

式中:f 为频率; $\epsilon_0$  绝对介电常数; $\phi'$ 为引起机械损 失的主要因素,为恒电场下应变相对应力的相移,即 tan  $\phi' \approx 1/Q_m$ ; $\delta'$ 为引起介电损失的主要因素,为恒 应力情况下电位移相对电场的相移。工作在谐振状 态的压电变压器,不同类型的压电变压器振型不同, 即不同位置对应的应力、应变不同,压电变压器的结 构也直接影响电场和电位移的分布。用解析的算 法,不同振型的压电变压器特别是涉及到二、三维振 动情况,运算量大旦很复杂,而采用有限元法可简单、方便地求解。

压电变压器的有限元温度分布计算方法可总结 为:通过利用 ANSYS 进行三维有限元模型谐响应 分析,模拟输入端施加电压,输出端连接匹配阻抗情 况。根据实际测量的输出电压曲线,得到瑞利阻尼, 可以计算出压电变压器单位体积处的机械位移、机械 应力、电势和电位移。将这些结果代入式(4),算出每 一节点的 Q<sub>PP</sub>。将计算结果导入到 ANSYS 的热分析 中,可计算出压电变压器的三维温度分布情况。

图 1 为矩形压电变压器结构示意图。压电变压器尺寸为 30 mm×20 mm×0.4 mm,图中通过分割电极主平面得到压电变压器的输入、输出部分,另一个主平面作为公共地电极,仿真计算使用的压电材料参数如表 1 所示。



表1 压电参数

介电矩阵/ (F/m <sup>2</sup> )	[804.6 0 0	0 804.6 0	65	0 0 9.7	×8.8	$5 \times 10^{-5}$	-12
	[13.9	7.5	7.7	0	0	0 7	
	7.5	13.9	7.7	0	0	0	
刚度矩阵/	7.7	7.7	12	0	0	0	× 10 <sup>10</sup>
$(N/m^2)$	0	0	0	3.2	0	0	$\times 10^{-1}$
	0	0	0	0	2.7	0	
	0	0	0	0	0	2.7_	
压电矩阵/ (C/m <sup>2</sup> )	Γ 0	0	0 0		0	10.5	07
	0	0		)	10.5	0	0
	-4.1	-4.1	14	. 1	0	0	0_
密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	7 500						

根据选用的压电变压器模型及其参数,得到压 电变压器的升压比,为了保证仿真的可靠性,获得真 实的阻尼参数,压电变压器输出开路情况下,通过实 验进行了压电变压器的谐振特性曲线测试,图2为 带阻尼的有限元仿真计算和实验测量的谐振特性曲 线。由图可知,空载时仿真谐振频率为91.5 kHz, 实验测量的谐振频率为91.0 kHz,误差为0.6%,谐 振点仿真和实验测量升压比误差为1.6%,都在合 理的可接受误差范围。仿真中忽略了引出线焊接点 的影响,可能是造成误差的主要原因。



图 2 带阻尼的有限元仿真计算和实验测量谐振特性曲线

2 仿真结果和实验验证

图 3 为压电变压器输入电压峰-峰值 60 V, 80 V,100 V下的仿真温度分布图。仿真谐振频率 为87.8 kHz,周围环境温度对应于实验实际测量的 环境温度,其中输入电压峰-峰值为 60 V、80 V下的 环境温度为 21.5 ℃,输入电压峰-峰值为 100 V 的 环境温度为 23 ℃。压电变压器的热转换系数为 18 W/m<sup>2</sup> • ℃,介电损耗因子为 0.008,机械品质因 数为750。由图3(a)可知,整个压电变压器温度范 围为 27.1~32.7 ℃,温差为 5.6 ℃。因压电变压器 厚度相对长度和宽度很小,厚度方向上的温度变化 小,为了方便实验验证,选取压电变压器的正视图 (见图 3(b))。由图 3(c)可知,整个压电变压器温度 范围为 31.5~41.4 ℃,温差为 9.9 ℃。图 3(d)中, 整个压电变压器温度范围为 38.7~54.1 ℃,温差为 15.4 ℃。从图 3 可看出,最高温度集中分布在 y 方 向的中心处,不同区域温度分布差大,图3中心区域 为高温区域是致使压电变压器性能下降主要部分, 可以对其进行针对性的散热设计。



图3 有限元计算压电变压器不同电压下的温度分布图 为了证实有限元仿真温度分布计算结果的可靠 性和准确性,使用常用的 Fluke Ti50 红外热像仪分 别测量了在输入电压峰-峰值为 60 V,80 V,100 V 下的压电变压器温度分布情况。图 4 为压电变压器 温度分布的实验测试,为了便于确定热反射系数,保 证温度测试的准确性,将被测试的电极表面用黑漆 喷黑,Fluke Ti50 红外热像仪热反射系数设为 0.95 (参考黑色的一般取值)。实验测试压电变压器谐振 频率为 88.8 kHz,和仿真相比,误差为 1.1%。为了 保证温度稳定,所有测试结果都在施加电压 30 min, 环境温度通过煤油温度计测量的温度来设定。



图 5(a)、(b)的环境温度都为 21.5 ℃。输入电 压峰-峰值为 60 V,温度范围为 25.6~30.8 ℃,压 电变压器本身温差 5.2 ℃;输入电压峰-峰值为 80 V,温度范围为 28.0~40.8 ℃,本身温差为 12.8℃。因实际输入和输出焊点位于压电变压器 中心区域(仿真忽略了焊点和连接线的影响),因此, 中心区域附近的温度分布实验结果被焊点和导线隔 开,和仿真不同。因为实际制作工艺的误差,左、右 和上、下温度分布不对称,高温区域偏向左下方。为 了排除悬挂方向的影响,在输入电压峰-峰值为 100 V下,将压电变压器悬挂方向相对 60 V和 80 V 方向逆时针旋转 180°(见图 5(c)),其高温区域 偏向右上方,结果验证温度分布不对称和悬挂方式 关系不大,高温偏移主要是由输入、输出和地电极焊 点和焊线引起的。输入电压峰-峰值为100 V,环境 温度为 23 ℃,温度范围为 31.0~54.7 ℃,压电变压 器本身温差 23.7 ℃。图 5(d)为不同电压情况下, 长度方向(y=10 mm, z=0.4 mm,见图 5(a)横线 位置)温度值对比曲线。由图 5 可知,长度方向 1/4 和 3/4 区域温度高,其余位置温度低,整体分布上仿 真和实验基本一致,实验中因焊点位置、大小、制作 工艺等对温度分布有一定的影响。输入电压峰-峰 值为60 V,80 V,100 V,压电变压器最高温度点 54.7℃,使用相同的材料参数仿真,和实验结果匹 配较好,说明压电变压器温度在54.7℃及以下的区 域,温升对材料参数影响不大,即对压电变压器性能 参数影响不大。仿真结果更清晰、详细地展现压电 变压器上不同区域的温度分布,一定程度上弥补了 实际温度测量设备的不足。



3 结束语

文章对矩形压电变压器轮廓振型的三维温度分 布进行了有限元和实验测量分析。通过对压电变压 器模型的谐响应特性进行分析,考虑负载和阻尼对 压电变压器的影响,获得和实际一致的应力、应变、 电场和电位移,计算出压电变压器每一点能量损失, 通过 ANSYS 的热分析,获得压电变压器输入电压 峰-峰值为 60 V,80 V,100 V 的三维稳态温度分布。 通过使用红外热像仪对输入电压峰-峰值为 60 V, 80 V,100 V 的压电变压器温度分布情况进行实验 测量和对比。压电变压器仿真的温度分布和实验测 试温度分布结果基本一致,长度方向1/4和3/4区 域温度高,其余位置温度低。压电变压器温度在 54.7 ℃及以下的区域,对压电变压器性能参数影响 不大。实验中因焊点位置、大小、制作工艺等对温度 分布带来一定的影响,仿真温度分布结果可以克服 弥补这些影响,对于后期单层矩形压电变压器提高 功率的散热设计有重要的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 余厉阳,王德苗,董树荣. 压电变压器的研究进展[J]. 功能材料与器件学报,2003,9(3):355-361.
   YU Liyang, WANG Demiao, DONG Shurong. Progress of piezoelectric transformer[J]. Journal of Functional Materials and Devices,2003,9(3):355-361.
- [2] 赵鸣,候育冬,田长生.大功率压电变压器用压电陶瓷 材料发展现状[J].材料导报,2003,17(9):42-44. ZHAO Ming, HOU Yudong, TIAN Changsheng. Current developments in piezoceramics used for high-power piezotransformer[J]. Materials Review,2003,17(9):42-44.
- [3] 黄以华,杨智,陈挚睿,等. 压电变压器在冷阴极管驱动 器中的应用研究[J]. 电子学报,2006,34(5):800-803. HUANG Yihua, YANG Zhi, CHEN Zhirui, et al. The research on the application of the piezoelectric transformer in cold-cathode fluorescent lamp driver[J]. Acta Electronica Sinica,2006,34(5): 800-803.

- [4] 黄以华,周康源. 压电变压器的原理及其应用中的关键问题[J]. 声学技术,2003,22(1):58-60.
  HUANG Yihua, ZHOU Kangyuan. Principle of piezoe-lectric transform and key issues in applications[J].
  Technical Acoustics,2003,22(1):58-60.
- [5] SHIN H, AHN H, HAN D Y. Modeling and analysis of multilayer piezoelectric transformer [J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 92(2/3):616-620.
- [6] HO S T. Modeling and analysis on ring-type piezoelectric transformers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2007, 54(11):2376-2384.
- [7] YE Y, CHENG K W E, DING K. A novel method for connecting multiple piezoelectric transformer converters and its circuit application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012,27(4):1926-1935.
- [8] DU J L, HU J H, TSENG K J. High-power, multioutput piezoelectric transformers operating at the thickness-shear vibration mode[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51(5):502-509.
- [9] XUE H, YANG J S, HU Y T. Analysis of Rosen piezoelectric transformers with a varying cross-section[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2008, 55(7):1632-1639.
- [10] LIU Y P, VASIC D, COSTA F. Wideb and ZVS halfbridge circuit for piezoelectric transformers with small inductance[J]. Electronics Letters, 2012, 48(9):523-524.
- [11] HUANG Y H, HUANG W. Modeling and analysis of circular flexural-vibration-mode piezoelectric transformer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2010, 57(12):2764-2771.
- [12] 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.
  BAI Fengxian, DONG Weijie, XIAO Lei. Analysis of characteristics of series and parallel connected piezoelectric transformers[J]. Acta Electronica Sinica,2010, 36(5):998-1003.
- [13] WANG F F, SHI W Z, LUO H S. Step-down piezoelectric transformer fabricated with (1 - x) Pb (Mg<sub>1/3</sub> Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-xPbTiO<sub>3</sub> single crystal[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(4):043904.
- [14] GUO M, LIN D M, LAM K H, et al. A lead-free piezoelectric transformer in radial vibration modes[J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(3):035102-035102-5.
- [15] KANAYAMA K. Thermal analysis of a piezoelectric transformer[C]//Sendai: IEEE Ultrasonics Symposium, 1998, 1: 901-904.
- [16] JOO H W, LEE C H, RHO J S, et al. Analysis of temperature rise for piezoelectric transformer using finite-element method[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2006, 53(8):1449-1457.
- [17] KARTASHEV I, VONTZ T. Regimes of piezoelectric transformer operation II[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(5):055108.
- [18] MEITZLER A H, BERLINCOURT D, WELSH F S, et al. ANSI/IEEE Std 176-1987 The institute of electrical and electronics engineers[S]. USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1988.