

压电陶瓷的电特性与功率损耗实验分析

程友信,唐 炜,包 斌,乔 倩

(西北工业大学 自动化学院,陕西 西安 710072)

摘 要:压电陶瓷(PZT)致动器在飞行器的主动振动与噪声控制等航空、航天领域中得到了广泛应用,其电特性和功率损耗的确定对于优化系统结构和设计有效驱动电源均有至关重要的作用。据此,该文提出了一种预测PZT功率损耗的实验方法。该方法通过理论分析与实验测试估计PZT的电容量、介电损耗角正切及功率损耗,最终得到它们与驱动电压峰值和频率的非线性函数关系。这种功率损耗的预测能在主动振动控制领域中为设计压电陶瓷驱动电源提供指标依据。

关键词:压电陶瓷致动器;功率损耗;非线性电容;介电损耗角正切;主动振动控制

中图分类号:TM282

文献标识码:A

Experimental Analysis of Electrical Properties and Power Loss of Piezoelectric Ceramics

CHENG Youxin, TANG Wei, BAO Bin, QIAO Qian

(School of Automation, Northwestern Polytechnical University of China, Xi'an 710072, China)

Abstract: In recent years, the piezoelectric ceramic (PZT) actuators are widely used in active vibration and noise control of aircraft and aerospace applications, and the determination of its electrical properties and power loss has a vital role for optimizing the system architecture and designing an effective drive power. Accordingly, an experimental method to predict the power loss of the PZT is proposed. In this method, the capacitance, dielectric loss tangent and power loss of PZT can be estimated by theoretical analysis and experimental testing, and the nonlinear functional relations among these parameters and the applied voltage peak and frequency can be obtained finally. They are functions of both applied peak voltage and driving frequency. The prediction of power loss can be applied to the active vibration control and provide the basis for the design of piezoelectric ceramic drive power.

Key words: PZT actuator; power loss; nonlinear capacitance; dielectric loss tangent; active vibration control

0 引言

压电材料具有压电效应,可以因机械变形产生电场,也可以因电场作用而产生机械变形,这种固有的机-电耦合效应使压电材料在航空、航天等工程领域中得到了广泛的应用。压电陶瓷作为致动器和传感器已广泛应用在飞行器的主动噪声与振动控制等方面,尤其是在主动振动控制领域的优势已在众多地面测试和风洞实验^[1-6]中得到了体现。如 Matthew C. Brennan 和 Anna-Maria Rivas McGowan^[7]的研究中,曾采用一个 10.16 cm 长粘贴有 72 个表面粘合式压电陶瓷(PZT)致动器的半翼展模型作为主结构,来验证应变驱动能否有效控制气动弹

性响应。可以预见,对于一架全尺寸的大型飞机或其他的大型结构,若要进行主动振动控制的研究,则会需要众多的 PZT 致动器,此时整个系统的功率需求分析将是系统设计时必须考虑的问题。据文献[7]可知,PZT 致动器的功率损耗除与所施加驱动电压的幅值和频率有关外,还与 PZT 致动器的自身电特性的改变有关,这是由于 PZT 致动器的电容和阻抗在实际工作状态下,通常是驱动电压幅值和频率的非线性函数,简单将其视为常数,将会影响功率需求的准确预测。

为此,本文提出了一种准确测定 PZT 功率损耗的实验方法。该方法采用实验手段确定 PZT 的电

收稿日期:2012-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50905140);陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2012JQ7003);教育部博士点新教师基金资助项目(20096102120039);西北工业大学研究生创业种子基金资助项目(Z2012114);长安大学高速公路筑养装备与技术教育部工程研究中心开放基金资助项目(2013G1502054)

作者简介:程友信(1987-),男,河南信阳人,硕士生,主要从事压电智能结构驱动电源及压电能量收集等方面的研究。E-mail:121406214@163.com。

容、阻抗等电特性参数与驱动电压幅值和频率间的非线性函数关系,并结合理论分析,给出了准确预测PZT功率损耗的数学模型,为大型结构的功率需求分析提供了一种解决途径。

1 理论分析

PZT致动器的功率损耗为

$$P = \frac{V_{rms}^2}{|Z|} \cos \theta \quad (1)$$

式中: $V_{rms} = V_p / \sqrt{2}$, V_p 为PZT致动器的驱动峰值电压; $|Z|$ 为PZT致动器的复阻抗模量, $Z = R_c + j / (2\pi f C)$, R_c 和 C 分别为PZT阻抗的电阻和电容, f 为激励信号的频率; θ 为电流超前于电压的相位角。

由于PZT致动器的阻抗大致呈容性,在交变电场的作用下,随着驱动电压和频率的变化,其电容量 C 也会有相应的变化。若假设 C 为常数,将会引起较大的功率估计误差。因此,对于PZT致动器的功率损耗,本文采用以下实验方法进行分析 and 计算。

2 实验设计

本实验由泰克信号发生器、泰克示波器、HPV压电陶瓷驱动电源、便携式电脑、PZT致动器QP16n^[8]和若干电阻等硬件设备完成。实验示意图如图1所示。

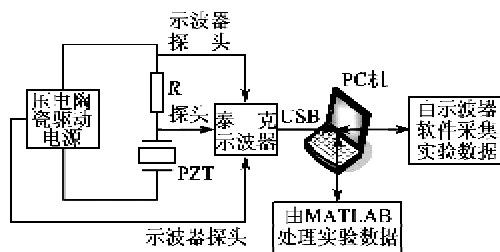


图1 实验示意图

QP16n(4.6 cm×2.08 cm×0.025 cm,见图2)为一种易于连接,密封性良好的PZT致动器,其电容量出厂值为137 nF,可作为传感器、致动器、振动阻尼器及能量捕获器件。

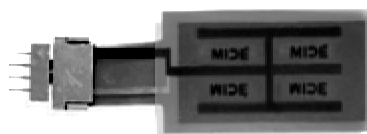


图2 压电陶瓷致动器QP16n

泰克版National Instruments LabVIEW SignalExpressTM^[9]软件可通过PC机迅速采集、分析和存档测量数据,为实验数据的采集和分析带来方便。

为了测量QP16n的功率损耗及其非线性电特

性,需要正弦驱动电压的驱动,电压的幅值和频率由一台信号发生器控制。由于QP16n的最大承受电压为120 V,故在试验中所施加的峰值电压从15 V变化到105 V,频率从10 Hz变化到400 Hz。因PZT(QP16n)主要呈现为容性负载,故其等值电路模型可表示为一个电阻 R_c 和一个电容 C 的串联。图3为PZT致动器的测试电路。在该电路中,将电阻 R_c 和压电致动器串联,选取 $R_c = 1 \text{ k}\Omega$,则通过这个电阻的电压就可用来确定整个电路的电流 $i(t)$ 。将驱动电压 $V(t)$ 和通过 R_c 或PZT的电压都连接到一台数字示波器,示波器则是由PC机通过USB或通用接口总线(GPIB)简便地连接来控制的,从而易实现实时监控数据波形并将波形数据下载到PC机上,以供进一步研究分析。信号的幅值和相位确定后,压电致动器的功率损耗就可计算出来。然而,在较高驱动电压的情况下,由于环路电流的失真会导致压电致动器产生一定的非线性电容效应。

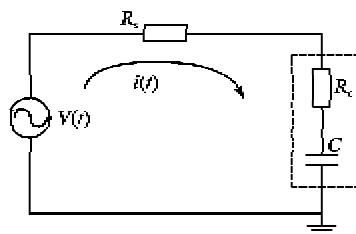


图3 压电陶瓷致动器的测试电路

3 实验数据分析

3.1 相位角 θ 的确定

由于QP16n的 $|Z|$ 可由实验数据得到,而频率 f 已知,因此只要测出环路电流 $i(t)$ 超前于 $V(t)$ 的相位角 θ ,即是通过 R_c 的电压超前于 $V(t)$ 的相位角 β ,即 $\beta = \theta$,就可求得 R_c 和 C 。因此, $V(t)$ 在不同峰值和不同 f 的情况下,都需测量不同的 θ ,通过泰克版NI LabVIEW SignalExpress软件能很直观地测得两电压信号的时间差,如图4所示。

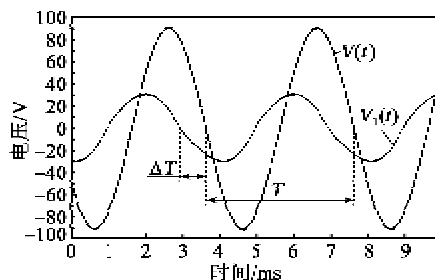


图4 相位法确定相位角示意图

由示波器软件测得波形周期为 T ,通过的电压

$V_1(t)$ 与驱动电压 $V(t)$ 的相位时间差为 $\Delta T^{[10]}$, 则 θ 为

$$\theta = \frac{360 \times \Delta T}{T} \quad (2)$$

3.2 QP16n 的电特性分析

实验数据主要是采集各个频率在不同驱动电压的情况下 QP16n 两端的电压有效值和两端的电压有效值。

QP16n 的复阻抗模量:

$$|Z| = V_{\text{rms}} / I_{\text{rms}} \quad (3)$$

式中: $I_{\text{rms}} = I_p / \sqrt{2}$, I_p 为 QP16n 两端的峰值电流。

由泰克示波器软件 NI LabVIEW SignalExpress 观察可更准确的确定出 $i(t)$ 超前于 $V(t)$ 的 θ , 如图 4 所示。则可写出 QP16n 复阻抗 Z 的实数和虚数部分^[11]:

$$Z = |Z| \cos \theta + j |Z| \sin \theta \quad (4)$$

由前述 QP16n 等值电路模型为 RC 串联电路, 可得其串联电路阻抗为

$$Z = R_c + j / (2\pi f C) \quad (5)$$

由式(4)、(5)可得

$$R_c = |Z| \cos \theta \quad (6)$$

$$C = 1 / (2\pi f |Z| \sin \theta) \quad (7)$$

将实验数据导入 Excel 表格中, 通过其中的函数计算致动器的电容量、阻抗值和正切损耗角, 然后由 MATLAB 处理得到以下各变量间的数函数关系曲线, 最终得到功率损耗的估计曲线。

图 5 为在不同频率下 QP16n 电容量与峰值驱动电压之间的关系曲线。根据实验测试得到的电容量, 采用了一个三阶多项式模型来预测估计 QP16n 电容量, 即

$$C = C_1 V^3 + C_2 V^2 + C_3 V + C_4 \quad (8)$$

式中 V 为驱动 QP16n 的峰值电压, 以此来预测 QP16n 电容量的三阶数学模型。

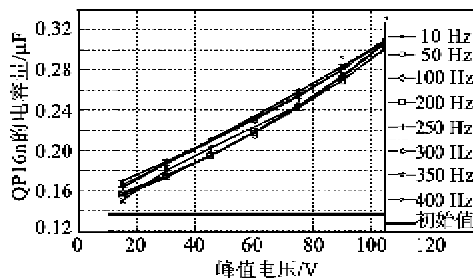


图 5 测量和估计的 QP16n 电容量

由图 5 可知, 压电致动器的电容量初始值

137 nF 由制造厂家提供, 而通过多功能万用表测得其值约为 139 nF。图 5 中, QP16n 的电容量随着驱动电压峰值的增加而不断的增大, 增大范围在 9%~140%。如果在设计中将电容假设为常数, 将引起较大的功率估计误差。

图 6 中, QP16n 电容量是在一个固定的驱动电压峰值下作为驱动电压频率的函数。在低于某个频率时, QP16n 电容量会随着频率线性变化, 而高于这个频率时, 电容量会随着频率非线性变化。由图 6 可知, 电容量的变化在 100 Hz 以下比在 100~400 Hz 更明显。

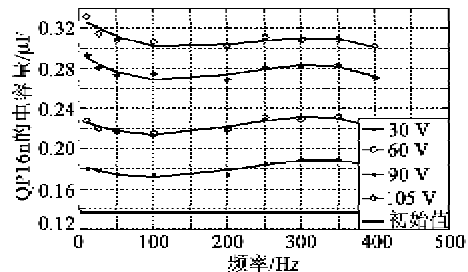


图 6 以频率为变量的 QP16n 电容量的测量值与估计值

图 7 为在不同频率下 QP16n 阻抗中的电阻成分值与峰值驱动电压间的关系曲线。根据实验测试得到的数据, 采用了一个三阶多项式模型来预测估计 QP16n 电阻成分值, 则

$$R_c = R_1 V^3 + R_2 V^2 + R_3 V + R_4 \quad (9)$$

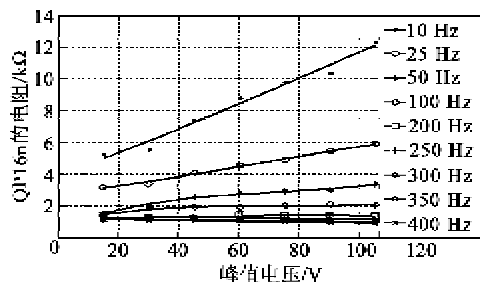


图 7 QP16n 阻抗中电阻成分的测量值与估计值

图 7 是在不同峰值驱动电压下 QP16n 阻抗中的电阻部分曲线图。阻抗值 R 随着驱动电压不断变化, 正如其整体呈容性的特性, 随着频率的增加, QP16n 的总阻抗在不断减小, 其电阻部分也会不断减小。

介电损耗是包括 PZT 在内的任何介质材料所具有的重要品质指标之一, 在交变电场下, 介质所积蓄的电荷有两部分:

1) 有功部分(同相), 由电导过程引起。

2) 无功部分(异相), 由介质弛豫过程引起。而单位容量电容器的损耗则是一个与电容器的容量无

关,仅与电容器内部的介质材料、结构、制造工艺等有关的重要质量参数,并称为电容器的介质损耗角正切($\tan \delta$)^[12],且

$$\tan \delta = \frac{P}{Q} \times 100\% \quad (10)$$

式中 Q 为压电陶瓷致动器的无功功率。

相对于图3所示的PZT(QP16n)的串联等值电路,式(10)可改写为

$$\tan \delta = R_c / X_c = R_c \cdot \omega \cdot C = 2\pi f \cdot R_c \cdot C \quad (11)$$

式中: ω 为角频率; R_c 为PZT的串联等值电阻。

由式(11)可知,PZT的 $\tan \delta$ 可用其 R_c 和 C 来表示。只要能精确测量出电容器的 R_c 和 C 就可计算出PZT的 $\tan \delta$ 值,然后根据其采样数据满足一个三阶多项式模型,则可估计并拟合出整个介质损耗角正切随驱动电压的曲线如图8所示。

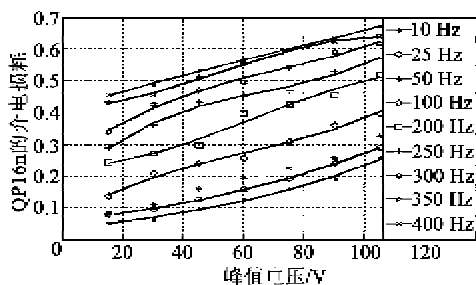


图8 QP16n 介质损耗角正切的测量值与估计值

3.3 QP16n 的功率损耗预测

利用实验所得的数据,压电陶瓷致动器的平均功率损耗为

$$P = I_{rms} V_{rms} \cos \theta \quad (12)$$

通过式(10)及PZT致动器的RC等效串联电路模型可得计算功率损耗估计值为

$$P = Q \tan \delta = 2\pi f C \tan \delta V_{rms}^2 \quad (13)$$

式中 C 和 $\tan \delta$ 分别由多项式拟合得到。

所得压电陶瓷致动器功率损耗的测量值与估计值关于驱动电压和频率的函数曲线如图9所示。由图可知,从10~400 Hz不同的频率点上,PZT在不同驱动电压下的功率损耗各不同;在一个频率点上,PZT的功率损耗随着驱动电压的增大而增加;在同一驱动电压的情况下,驱动频率越高,功率损耗就越大。根据实验数据和曲线图,频率较低时,RC等效串联电路模型能准确预测PZT致动器的功率损耗,随着驱动电压和频率的不断增大,估计误差也会不断地变大。而如果仅将 C 视为常值,功率损耗的最大误差会更大,这一点从图5中就可看出。

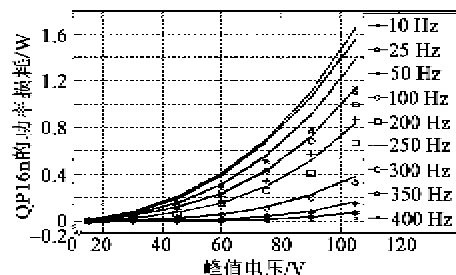


图9 QP16n 功率损耗的测量值与估计值

从图9可知,虽然使用单个或几个PZT的应用,其功率损耗较小,在一些场合甚至会很微小,但在航空、航天等应用领域,特别是在大型飞机机身的主动噪声与振动控制^[7,13-14]的应用中,当采用数量达到数十组甚至上百的PZT阵列进行控制时,功率损耗相当可观,因此这种功率损耗的预测估计十分必要。

4 结束语

本文采用NI LabVIEW SignalExpress Tektronix Edition (SIGEXPTE) 软件对实验数据进行采集、分析和处理,得到了PZT的电容量及功率损耗角正切与驱动电压峰值和频率的函数关系,最终给出了功率损耗估计模型。此外,随着驱动电压增大,压电陶瓷致动器的电特性存在着一定的非线性。这可能与迟滞和蠕变等非线性特性有关。

参考文献:

- [1] CANFIELD R A, MORGENSTERN S D, KUNZ D L. Alleviation of buffet-induced vibration using piezoelectric actuators[J]. Computers and Structures, 2008, 86 (5): 281-291.
- [2] LAYTON J B. An analysis of flutter suppression using adaptive materials including power consumption[J]. AIAA-95-1191-CP.
- [3] PLATT S R, FARRITOR S, HAIDER H. On low-frequency electric power generation with PZT ceramics [J]. IEEE/Asme Transactions on Mechatronics, 2005, 10(2): 240-252.
- [4] HIRSCH S M, MEYER N E, WESTERVE-LT M A, et al. Experimental study of smart segmented trim panels for aircraft interior noise control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(4): 1023-1037.
- [5] PADULA S L, PALUMBO D L, KINCAID R K. Optimal sensor/actuator locations for active structural acoustic control[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-98-1865.

(下转第575页)