

# 基于LabVIEW的压电陶瓷强场机械品质因数测量系统

郑广斌, 陈赵江, 赵恒莉, 刘世清

浙江师范大学物理与电子信息工程学院, 浙江 金华

收稿日期: 2023年11月29日; 录用日期: 2024年1月1日; 发布日期: 2024年1月10日

## 摘要

压电材料在强场和弱场条件下的机械品质因数 $Q_m$ 存在较大差别, 而目前国际上尚没有通用和成熟的压电材料强场 $Q_m$ 表征方法和测量系统。本文设计了一套基于LabVIEW的压电振子强场机械品质因数测量系统并提出一种新的数据处理方法, 实现了仪器控制、波形数据读取、信号滤波和拟合, 以及 $Q_m$ 值自动计算功能。用该系统测量了圆环和长条压电振子的 $Q_m$ 值随电压和振动速度变化关系, 结果表明随着驱动电场和振动速度的增大, 样品的机械品质因数急剧减小。该测量系统运行稳定, 可实现仪器控制和数据采集的自动化处理, 可以满足压电陶瓷强场机械品质因数测量的需要, 能极大地提高测试效率。

## 关键词

压电陶瓷, 强场机械品质因数, 虚拟仪器, LabVIEW, 自动测量

## Measurement System for High-Field Mechanical Quality Factor of Piezoelectric Ceramics Based on LabVIEW

Guangbin Zheng, Zhaojiang Chen, Hengli Zhao, Shiqing Liu

College of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Nov. 29<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 1<sup>st</sup>, 2024; published: Jan. 10<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

There is a significant difference in the mechanical quality factor  $Q_m$  of piezoelectric materials under high- and low-field conditions, however, currently there is no universal characterization me-

thod and testing system for high-field  $Q_m$  of piezoelectric materials. In this paper, a LabVIEW-based measurement system for the high-field mechanical quality factor ( $Q_m$ ) of piezoelectric ceramic resonators is designed, and a new method of data processing is proposed to realize the functions of instrument control, waveform data acquisition, signal filtering and fitting, and  $Q_m$  calculation. The system is applied to determine the electric field and vibration velocity dependences of  $Q_m$  values for thin disk and rectangular piezoelectric ceramic resonators. The results demonstrate a significant decrease of  $Q_m$  with increasing electric field and vibration velocity. The system provides automated instrument control and data acquisition processing, which meets the needs of high-field mechanical quality factor measurement of piezoelectric ceramics and greatly enhances testing efficiency.

## Keywords

Piezoelectric Ceramics, High-Field Mechanical Quality Factor, Virtual Instrument, LabVIEW, Automatic Measurement

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

压电陶瓷是一种可以将机械能和电能相互转换的材料, 由于其轻型、成本低和能量转换效率高的优点, 被广泛应用于能源(超声化学和超声采油等)、环保(超声清洗和污水处理等)、机械(超声加工和超声焊接等)、医疗(超声热疗和高强度聚焦超声治疗等)等领域[1] [2]。在压电陶瓷的应用中, 机械品质因数  $Q_m$  是评价能量损耗的重要参数[3]。 $Q_m$  的本质为一个周期内总储存的能量和损失的能量之比。为了计算  $Q_m$  的值, 传统有两种方法: 一种是定义式法, 从机械品质因数的定义出发, 利用阻抗曲线得到压电陶瓷的谐振和反谐振频率、最小阻抗和自由电容等数据进行计算[4]; 另一种方法是 3 dB 法, 3 dB 法只需要从阻抗曲线中读出压电陶瓷的谐振频率和半功率带宽就可以计算  $Q_m$  [5] [6]。

传统机械品质因数  $Q_m$  的测量方法通常是在电场强度为 1 V/mm 或更小的电场下利用阻抗分析仪测试得到。但是, 大多数压电陶瓷的工作电场远远大于 1 V/mm, 如超声波换能器的工作电压有可能达到 1000 V 以上。由于压电材料的非线性特性, 在弱场下测得的  $Q_m$  值不足以评价压电陶瓷的真实工作性能[7]。为了得到压电陶瓷的强场  $Q_m$  值, 且避免强场下材料的自发热特性, K.Uchino 教授等提出一种新型的测试方法, 即脉冲驱动法[3]。该方法通过给压电振子施加一定循环数的电压脉冲, 短路后利用压电振子电流衰减曲线计算得到机械品质因数。以往的瞬态法研究通过测量电流衰减曲线两个不同时刻的电流幅值计算  $Q_m$  值, 由于电流噪声的影响, 该方法存在误差较大和重复性差的问题。

为了提高测量准确性, 在本文中我们提出通过拟合衰减曲线衰减系数的方法得到  $Q_m$  值, 能显著减小测量误差。同时, 本文基于虚拟仪器 LabVIEW 设计了一种测量大功率下压电陶瓷机械品质因数的软硬件系统, 该系统可以实现激励信号的生成、数据采集、信号处理并实时计算  $Q_m$  值的功能。整个测量过程在 LabVIEW 环境中完成, 能提高测量效率, 满足实验需求。

## 2. 脉冲驱动法原理

脉冲驱动法(瞬态法)是指通过对压电陶瓷施加 Tone-Burst 脉冲[8], 测量其瞬态振动从而得到压电陶瓷强场下  $Q_m$  值的方法。这种对瞬态振动的实时监测在数学上等同于通过傅里叶变换使用共振/反共振技

术的频域测量[9]。瞬态法的具体步骤为：在压电陶瓷两端施加  $n$  次循环的交流电压脉冲  $U = U_0 \sin \omega t$ ，直到振动速度上升到足够的振幅，即其振动达到稳态。这里， $U_0$  是驱动电压的幅值， $\omega$  是压电陶瓷该驱动电压下的共振角频率。接着，将压电陶瓷的电端短路从而得到电流的瞬态衰减曲线。图 1 为脉冲驱动法下压电陶瓷的电压、电流和振动速度波形。

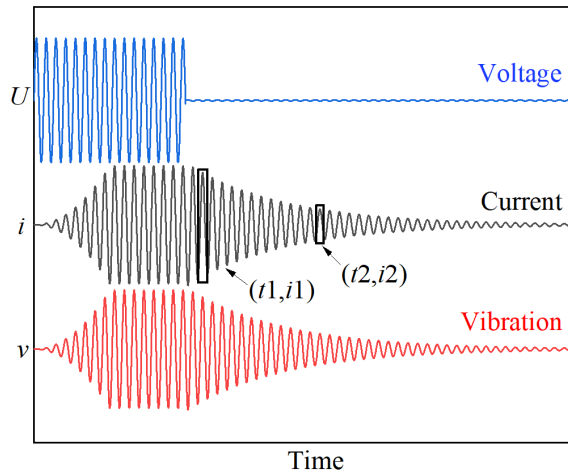


Figure 1. Schematic diagram of the waveform of the transient method  
图 1. 瞬态法波形示意图

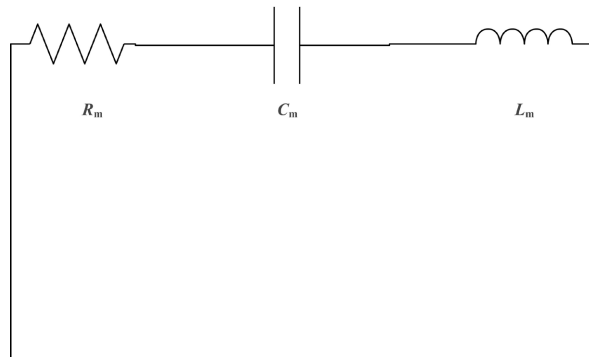


Figure 2. Equivalent circuit when piezoelectric ceramic resonates  
图 2. 压电陶瓷谐振时等效电路

压电陶瓷谐振短路时的等效电路如图 2 所示，与  $RLC$  电路谐振特性相似。根据基尔霍夫第二定律，可以得到压电陶瓷谐振时的电流电压关系：

$$L_m \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_m} \int idt + R_m i = 0 \quad (1)$$

其中， $L_m$  是等效电感， $C_m$  是等效电容， $R_m$  是等效电阻。

对式(1)进行微分处理，整理可得：

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\beta \frac{di}{dt} + \omega^2 i = 0 \quad (2)$$

其中， $\beta = \frac{R_m}{2L_m}, \omega^2 = \frac{1}{L_m C_m}$

求解式(2)，可得到电流表达式：

$$i(t) = \frac{q_0}{\omega L_m C_m} e^{-\beta t} \sin \omega t = q_0 \omega e^{-\beta t} \sin \omega t \quad (3)$$

式中， $q_0$  为压电振子短路时电容和电感储存的电荷量。从  $i(t)$  的表达式可以看出，谐振短路时压电陶瓷的电流幅值变化曲线为指数衰减的正弦曲线。谐振时，压电振子的振动速度和电流成正比，因此瞬态法中压电振子的振动速度变化曲线也为指数衰减的正弦曲线[10]。实验中测得的电压电流变化曲线如图 3 所示，由图可知施加电压后，压电振子将达到稳定振动；将电源短路后，压电振子的电流曲线存在衰减阶段。根据电流的衰减曲线，提取其包络线可以拟合得到电流衰减系数  $\beta$ 。

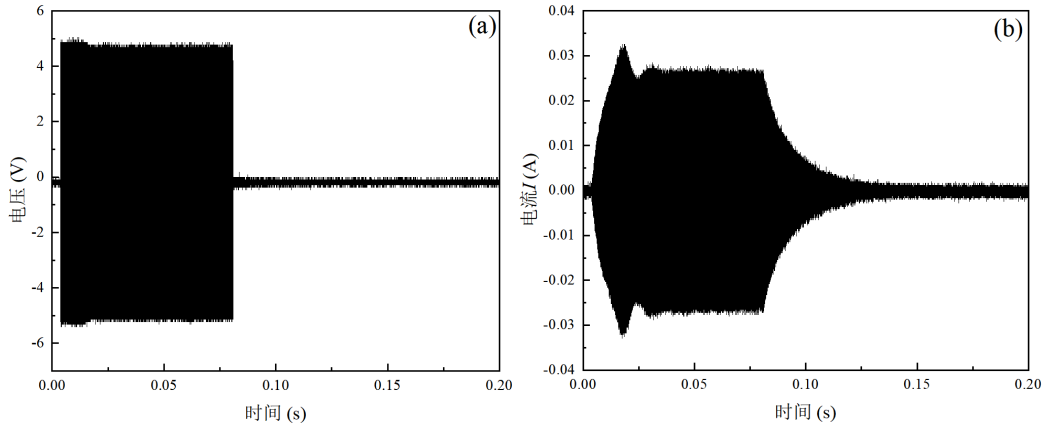


Figure 3. (a) Voltage and (b) current variation curves of piezoelectric ceramics  
图 3. 压电陶瓷(a) 电压和(b) 电流变化曲线

通过等效类比的方法，RLC 振荡电路的电学量和阻尼弹簧振动模型的力学量可以建立一定的联系[11]。阻尼弹簧模型中，阻力在一个振动周期做功为  $W_1$ ：

$$W_1 = \int_0^T f \frac{dx}{dt} dt \quad (4)$$

其中， $f = -\gamma \frac{dx}{dt}$ ， $\gamma = 2m\beta$ ，将阻力公式代入式(4)：

$$W_1 = -4\beta \int_0^T \frac{1}{2} m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 dt \quad (5)$$

弹簧振子在一个周期内的平均动能为：

$$E_k = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 dt \quad (6)$$

将式(5)用式(6)表示：

$$W_1 = -4\beta T E_k \quad (7)$$

在弱阻尼振动中，一个周期内的平均动能等于平均势能[12]。在一个谐振周期内，储存的能量为平均动能和平均势能之和，损耗的能量为阻力做功。那么根据机械品质因数  $Q_m$  的定义式可得：

$$Q_m = 2\pi \frac{E_k + E_p}{W_1} = 2\pi \frac{2E_k}{4\beta T E_k} = \frac{\pi f (\text{谐振频率})}{\beta} = \frac{\omega}{2\beta} \quad (8)$$

### 3. 系统设计和功能实现

#### 3.1. 硬件构成

为了实现压电陶瓷强场机械品质因数的测量,本文设计了基于 LabVIEW 的瞬态法测量系统,示意图如图 4 所示。该系统主要由 LabVIEW 程序、任意波形信号发生器(Rigol DG5072)、功率放大器(NF HSA4011)和示波器(Rigol MS05074)、高压探头(PINTECH DP-25)、电流探头(TEK A6302)和激光测振仪(Polytec OFV-505)组成。首先,由 LabVIEW 程序控制信号发生器脉冲信号参数并产生 Tone-Burst 脉冲信号,再由功率放大器将生成的脉冲信号放大,加载到待测压电陶瓷上;然后,由示波器读取通过高压探头和电流探头测量得到的压电陶瓷的电压和电流值,并将采集的电压电流信号传输到 LabVIEW 中进行数据处理。同时,利用激光测振仪测量压电振子达到稳态时的边界振动速度以表征不同振动速度时压电振子的  $Q_m$  值。

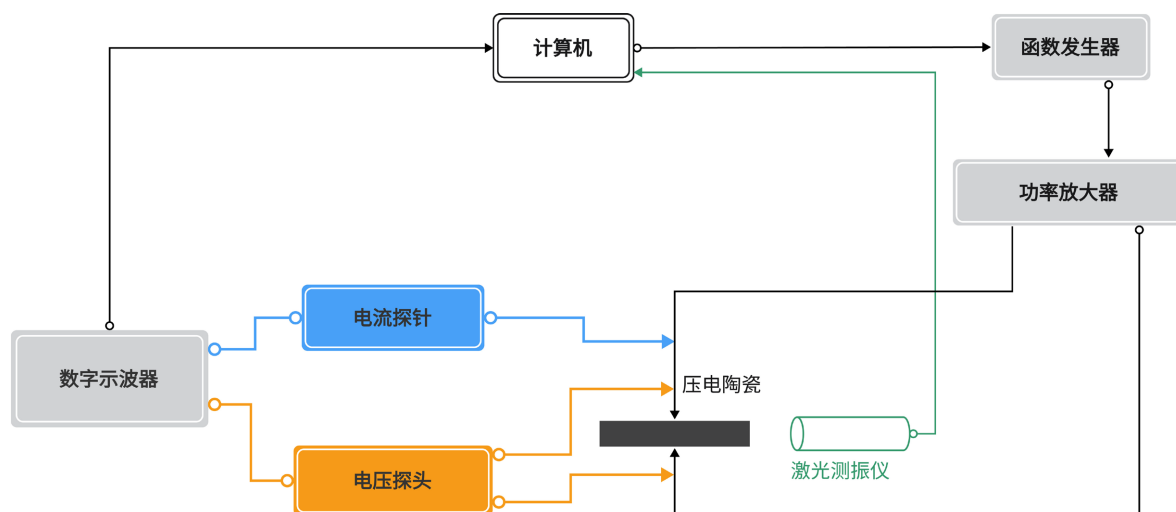


Figure 4. Schematic diagram of piezoelectric ceramic strong field  $Q_m$  measurement system

图 4. 压电陶瓷强场  $Q_m$  测量系统示意图

#### 3.2. 软件设计

在 20 世纪 80 年代,美国 NI 公司提出了虚拟仪器技术,该技术利用软件设计将计算机与实验仪器相连接,通过 I/O 接口实现计算机对实验仪器的参数设置和数据采集[13][14]。本文中开发的测量系统基于 LabVIEW 2020 平台,主要由四个部分组成,分别为函数发生器参数设置与信号产生、示波器波形采集与处理、频率自动跟踪和机械品质因数计算。软件开发主要分为前面板和后面板两部分,前面板是仪器操作界面,后面板则是具体的程序编写界面。

前面板主要分为仪器连接、示波器参数输入、函数发生器脉冲信号参数输入和示波器波形读取及处理四个方面。函数发生器脉冲信号的参数设定,主要包括频率、电压、脉冲驱动中的波形循环数和脉冲周期设定;而示波器参数输入,包括读取示波器的通道选择和低通滤波的设置。程序运行流程为:首先计算机向函数发生器发送命令检测通信是否正常;其次,若通信正常后,则将设定的相关参数写入函数发生器产生波形信号;然后,示波器读取电流信号并传输到计算机,计算机检测此时是否为谐振频率;若为谐振频率,结束电压驱动,处理读取的电流信号并计算机械品质因数;若不是,则改变频率参数,再次写入函数发生器产生波形信号。图 5 为测量过程的软件流程图。

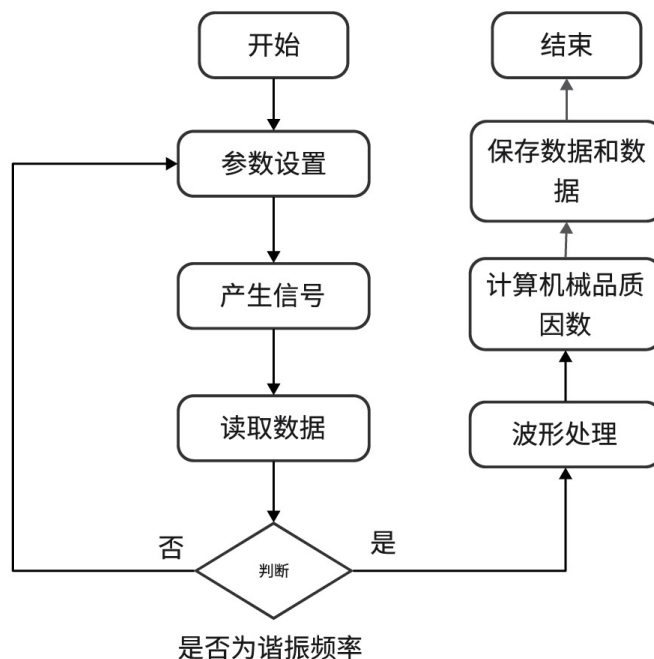


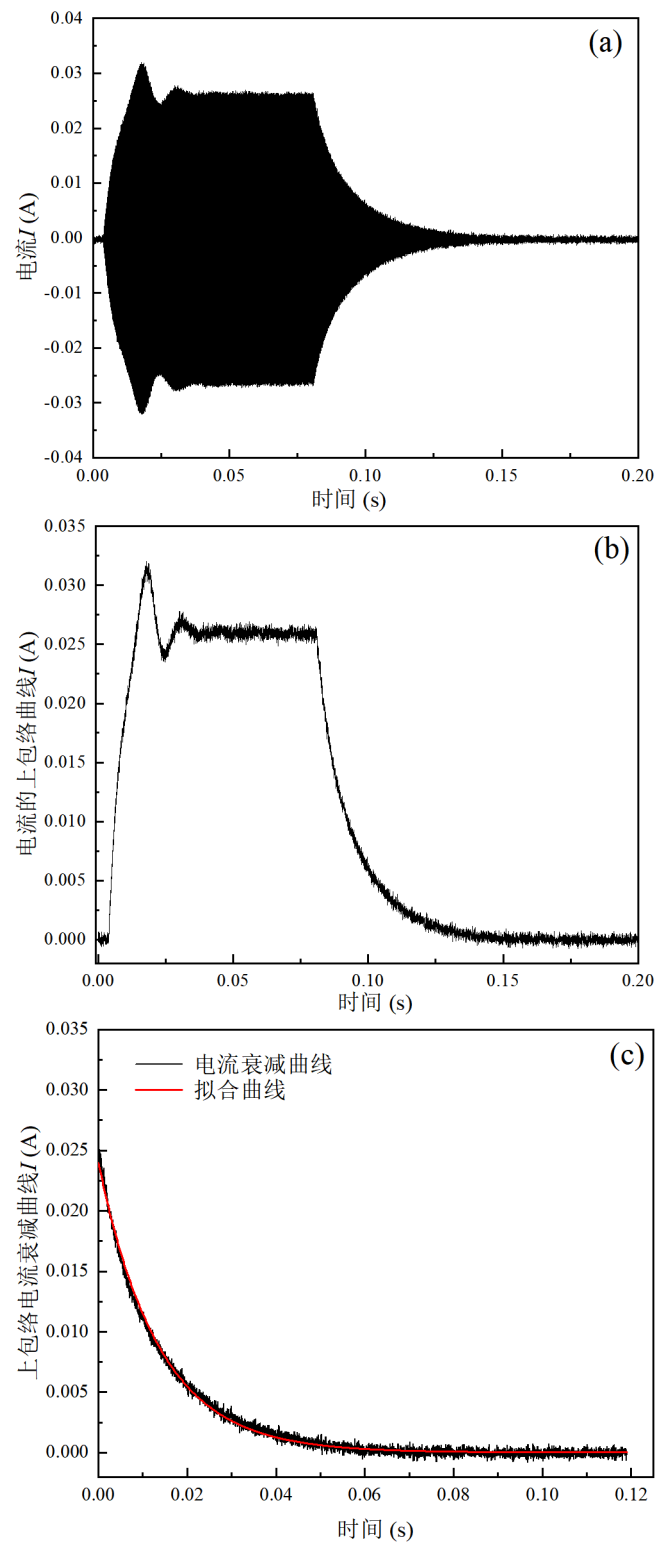
Figure 5. Software flow chart of measurement process  
 图 5. 测量过程软件流程图

压电振子的阻抗谱会随着驱动电场的增加而发生畸变，且其谐振频率和反谐振频率大幅降低[15]。这是因为压电材料在强场驱动下表现出的非线性弹性特性[16] [17]。为了寻找强场下的谐振频率，一般需要调节脉冲信号的频率，并观察示波器上的电流幅值。根据压电陶瓷的阻抗特性，当电压恒定时，电流最大时的频率近似等于其谐振频率。为了简化寻找谐振频率过程，设计自动化的频率跟踪程序非常必要。本文的测量系统采用以下方法进行频率跟踪：首先设定一个起始频率和频率步长，将参数设定和信号采集的程序置于 While 循环中，然后通过寄存器将上一个频率下的起振完全的电流幅值  $I_1$  保存，并将下一个频率下的电流幅值  $I_2$  与其进行比较。若频率向下扫描，则通过判断  $I_1 < I_2$ ，确定  $I_2$  对应的频率为谐振频率。

为了得到压电陶瓷的机械品质因数  $Q_m$ ，需对得到的电流数据做滤波和提取包络线提取等相应的数学处理。按照传统的处理方法，通常需要将电流数据导入 Origin 和 Matlab 等软件中进一步分析，该方法不能实时处理数据，操作效率低。本文通过调用 LabVIEW 中的信号处理和数学分析模块，实现测量数据的实时处理和分析。本文数据处理的基本步骤为：首先，将得到的电流数据通过低 a 通滤波程序去除噪声；之后，提取滤波后电流信号的包络线，即得到电流的幅值变化曲线；其次，找到电流衰减的起始点，截取需要的电流衰减曲线；最后，将得到的电流衰减曲线导入拟合程序得到电流衰减系数  $\beta$ ，根据衰减系数  $\beta$  和谐振频率就可以求得机械品质因数  $Q_m$ 。

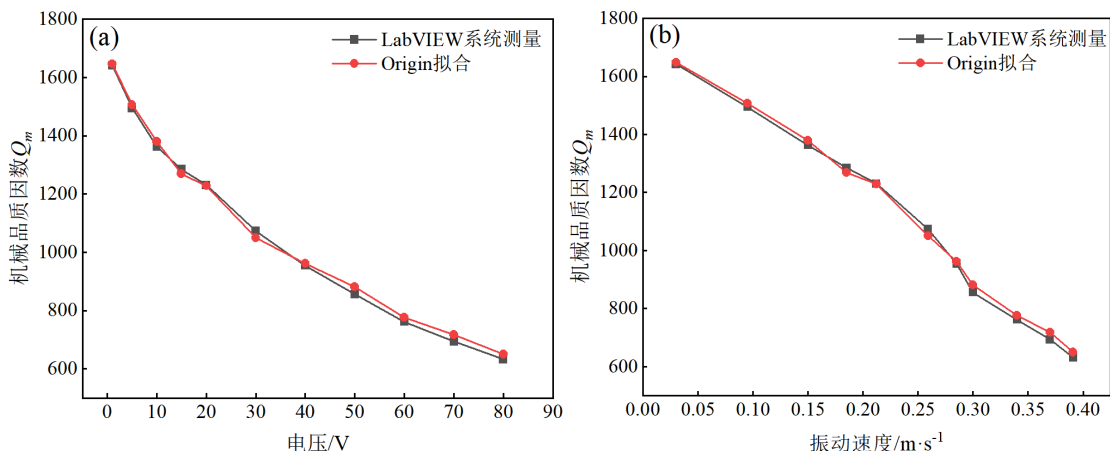
#### 4. 测量结果和分析

在本文实验中，采用尺寸为 45 mm (外径) × 20 mm (内径) × 6 mm (高)的 PZT-8 圆环压电振子和 20 mm (长) × 6 mm (宽) × 2 mm (高)的 PZT-5 长条压电振子作为实验样品，测量其在不同驱动电压和振动速度下的  $Q_m$  值，测量过程如图 6 所示。由 6 可知，测量系统可以得到理想的电流衰减曲线，并且自动拟合出相应的  $Q_m$  值。为了测试本系统数据处理结果的准确性，将 LabVIEW 计算结果与 Origin 软件处理得到的结果进行了比较分析。



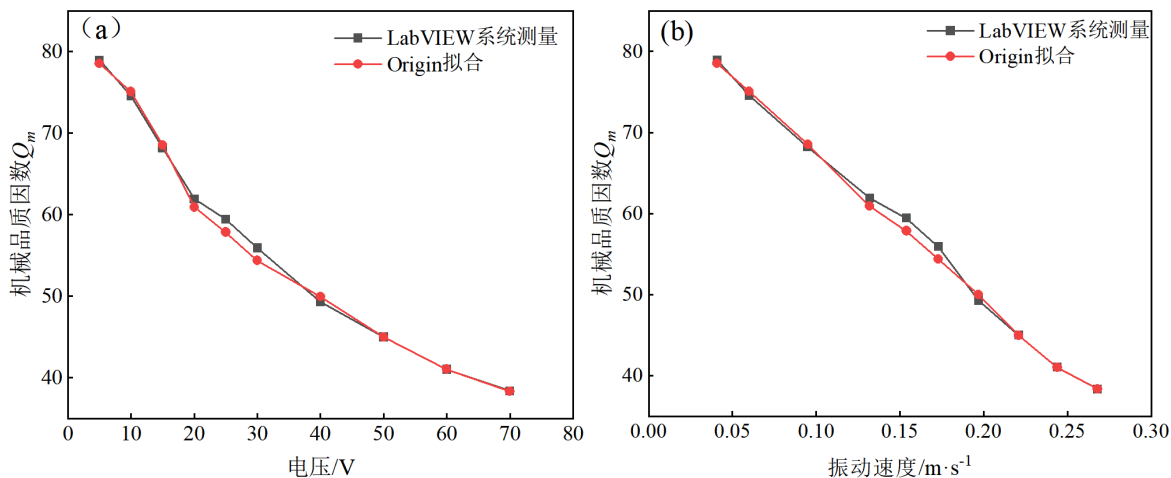
**Figure 6.** Piezoelectric vibrator in strong fields change curve in the process of  $Q_m$  measurement: (a) current curve after filtering; (b) upper envelope of the current; (c) Attenuation coefficient fitting of upper envelope attenuation curve

**图 6.** 压电振子在强场下的  $Q_m$  测量过程中的变化曲线: (a) 滤波后的电流曲线; (b) 电流的上包络线; (c) 上包络衰减曲线衰减系数拟合



**Figure 7.** PZT-8 circle of piezoelectric vibrator  $Q_m$  value with voltage (a) and (b) curve of vibration velocity change  
**图 7.** PZT-8 圆环压电振子的  $Q_m$  值随(a)电压和(b)振动速度变化的曲线

图 7 为 PZT-8 压电圆环的  $Q_m$  随电压变化和振动速度变化的曲线。由图可见，随着电压和振动速度的增大，PZT-8 圆环压电振子的机械品质因数急剧减小。这是由于当加在样品两端电压的增大，一方面畴壁运动的能量增强，内摩擦增大使得机械品质数变小；另一方面，随着振动速度的增加，压电材料的介电损耗也会增加，由于介电损耗与机械品质因数成反比，导致机械品质因数进一步减小[16]。从结果中也可以发现，由 LabVIEW 测量系统得到的  $Q_m$  值与 Origin 软件拟合得到的  $Q_m$  值符合较好，两种计算方法的最大误差为 3.48%，进一步验证了 LabVIEW 测量系统的可靠性，满足了压电陶瓷强场  $Q_m$  值实时测量的需要。



**Figure 8.** Piezoelectric ceramic PZT-5 strip of  $Q_m$  with voltage (a) and (b) the curve of vibration velocity  
**图 8.** PZT-5 长条压电陶瓷的  $Q_m$  随(a)电压和(b)振动速度变化曲线

此外，由图 8 可知 PZT-5 长条压电振子的  $Q_m$  值随电压和振动速度的变化规律与 PZT-8 圆环压电振子的较为相似。随着电压和振动速度的增大，PZT-5 长条的机械品质因数也快速下降。不同之处在于，在相同的电场和振动速度条件下，PZT-5 压电振子的  $Q_m$  值远小于 PZT-8 压电振子的  $Q_m$  值，其原因在于 PZT-5 压电陶瓷的畴壁比 PZT-8 的更容易运动，从而导致其 PZT-5 材料的内摩擦更大，机械品质因数更小。



## 5. 结论

本文基于 LabVIEW 软件提出了一种压电陶瓷强场机械品质因数测量的数据处理方法和测量系统。该系统能够控制函数发生器生成脉冲信号, 采集压电振子短路条件下的衰减电流波形数据, 并通过系统对数据采取滤波、包络线提取和电流衰减系数拟合等操作, 从而准确实时地测量出强场下压电陶瓷的机械品质因数。实验结果表明, 本文开发的压电振子强场机械品质因数测量系统具有很好的准确度(误差为 5% 以下)、稳定性和使用便捷性; 同时, 从实验结果可知在同一电压下, PZT-5 压电振子的机械品质因数远小于与 PZT-8 压电振子, 且两种压电振子的机械品质因数都随驱动电压的增大和随振动速度的增大而减小。本文开发的压电振子强场机械品质因数测量系统为全面表征强场下压电振子性能奠定了一定的实验基础。

## 参考文献

- [1] 张沛霖, 张仲渊. 压电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [2] 贾宝贤, 边文凤, 赵万生, 等. 压电超声换能器的应用与发展[J]. 压电与声光, 2005, 27(2): 131-135.
- [3] Uchino, K., Zheng, J.H., Chen, Y.H., *et al.* (2006) Loss Mechanisms and High Power Piezoelectrics. *Journal of Materials Science*, **41**, 217-228. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-7201-0>
- [4] Meitzler, A.H., Berlincourt, D., Welsh, F.S., *et al.* (1988) IEEE Standard on Piezoelectricity.
- [5] Liu, G., Zhang, S.J., Jiang, W.H., *et al.* (2015) Losses in Ferroelectric Materials. *Materials Science & Engineering R Reports*, **89**, 1-48. <https://doi.org/10.1016/j.mserr.2015.01.002>
- [6] 刘云, 隆志力, 李华, 等. 压电器件阻抗测试系统的研制[J]. 压电与声光, 2015, 37(6): 1061-1065.
- [7] Priya, S., Viehland, D., Ryu, J., *et al.* (2001) High-Power Resonant Measurements of Piezoelectric Materials: Importance of Elastic Nonlinearities. *Journal of Applied Physics*, **90**, 1469-1479. <https://doi.org/10.1063/1.1381046>
- [8] Shi, H.R., Chen, Z.J., Chen, X., *et al.* (2021) Self-Heating Phenomenon of Piezoelectric Elements Excited by a Tone-Burst Electric Field. *Ultrasonics*, **117**, Article ID: 106562. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2021.106562>
- [9] Uchino, K., Zheng, J.H., Joshi, A., *et al.* (1998) High Power Characterization of Piezoelectric Materials. *Journal of Electroceramics*, **2**, 33-40. <https://doi.org/10.1023/A:1009962925948>
- [10] Sadayuki, T. and Seiji, H. (1992) Vibration-Level Characteristics of Lead-Zirconate-Titanate Ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*, **31**, 3055-3057. <https://doi.org/10.1143/JJAP.31.3055>
- [11] 蒋朝金, 朱宏宇, 周衍, 等. 阻尼作用下振子相图的电路模拟[J]. 大学物理, 2011, 30(2): 43-45.
- [12] 蔡伯濂. 大学物理力学教学研究[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982.
- [13] 王霞. 虚拟仪器的发展过程及应用[J]. 机械研究与应用, 2009, 22(4): 12-14.
- [14] 樊炜. 虚拟任意波信号发生器研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [15] Li, G., Tian, F.H., Gao, X.Y., *et al.* (2020) Investigation of High-Power Properties of PIN-PMN-PT Relaxor-Based Ferroelectric Single Crystals and PZT-4 Piezoelectric Ceramics. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, **67**, 1641-1646. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2020.2979217>
- [16] Maeda, M., Washihira, M., Hashimoto, H., *et al.* (2007) Measurement of Nonlinear Elastic Constants of Piezoelectric Ceramics. *Journal of the Physical Society of Japan*, **76**, Article ID: 084704. <https://doi.org/10.1143/JPSJ.76.084704>
- [17] Liu, Y.Y., Ozaki, R. and Morita, T. (2015) Investigation of Nonlinearity in Piezoelectric Transducers. *Sensors and Actuators A: Physical*, **227**, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.03.036>