

# 压电传感器动态特性数字化补偿方法应用研究

高全芹

(长沙学院 机电工程系,湖南 长沙 410073)

**摘要:**从压电式传感器物理原理出发,导出了压电式传感器动态特性的物理数学方程;提出了压电式传感器动态特性补偿原理,并给出了具体的数字化动态补偿实现方法。通过扫频原理获得了一种新型钵状差动式压电加速度传感器精确模型,运用该文数字化动态补偿方法,完成了该型传感器补偿器。对比补偿前后的产感器扫频曲线,表明该文方法可以达到很好的动态特性补偿效果。

**关键词:**压电传感器;动态特性;数字化;补偿网络

**中图分类号:**TM22;TP212.3 **文献标识码:**A

## Study on Digital Compensation Method for the Dynamics of Piezoelectronic Sensor

GAO Quanqin

(Dept. of Mechatronic Engineering, Changsha College, Changsha 4100703, China)

**Abstract:** From the basic physical principles, the mathematical equations are deduced to describe the piezoelectric sensor dynamic characteristics. The compensation principle for dynamic of the piezoelectric sensor is given. And the digital dynamic compensation method is proposed. The method has been successfully used to an accurate model of a new bowl-shaped differential piezoelectric accelerometer, and its dynamics characteristics have been improved significantly.

**Key words:** piezoelectronic sensor; dynamics; digitization; compensation network

### 0 引言

压电式传感器是一种基于某些电介质压电效应的有源传感器,主要用于测量能转换为力的非电物理量,如压力、振动加速度、位移等。受物理原理限制,压电式传感器在有效频段内的幅值增益大都会有起伏,这时需对其进行动态特性补偿,即通过修正补偿网络处理后,将其幅值增益的起伏变化限制在有限范围内,以达到有效频段内具有恒定幅值增益的传感器动态特性设计目标。压电式传感器动态特性补偿通常有两种方法:

1) 改变压电式传感器的结构和设计参数,以改善其动态特性<sup>[1]</sup>,但这种方法往往要受到许多客观条件的限制,且很难达到较理想效果。

2) 通过动态补偿网络修正,即通过对压电式传感器输出信号进行后续信号处理,以满足所期望的动态特性<sup>[2]</sup>。目前,动态补偿网络修正方法以其灵

活性好、调控性强、易实现等特点备受关注。

本文通过分析压电式传感器动态特性物理数学方程,提出了一种基于其传函特征和应用频带宽度特征的数字化补偿网络设计方法。该方法可显著提高压电式传感器的动态特性,为压电式传感器动态特性的设计提供了新思路。

### 1 压电式传感器动态特性分析

压电式传感器相当于一个有源式电容器,具有高内阻、小功率的特点。其输出能量微弱,必须经前置放大电路将其微弱信号放大才能有效输出信号。压电传感器敏感部件具有一定的质量、阻尼和弹性系数,具有典型的机械结构动力学特征。压电传感器动态特性由电荷放大电路、力-电耦合系数及力学敏感装置共同决定。压电传感器相当于电荷源,其前置端为电荷放大器,等效电路如图1所示。其中 $Q$ 为压电效应感生电荷量; $C$ 为前置端等效电容值;

收稿日期:2011-07-20

作者简介:高全芹(1976-),女,河南封丘人,讲师,工学硕士,主要从事材料成型与控制、自动检测与传感器领域的研究。E-mail:sunhyy@xinhuanet.com。

$R$  为等效电阻值;  $A_0$  为前置放大电路放大增益值。

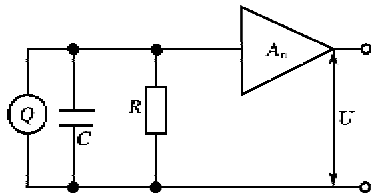


图1 压电传感器前置端电路原理图

由图1可得,  $Q$  与前置放大电压  $U$  之间的传递函数:

$$G_q(s) = \frac{U(s)}{Q(s)} = A_0 \frac{RCs}{RCs + 1} \quad (1)$$

在外界压力  $F$  作用下, 压电传感器将感生电荷,  $Q$  与压电常数  $d_{33}$  线性相关; 同时, 压电片受力后会发生弹性变形, 变形量  $y$  与压电材料的弹性系数  $k$  线性相关。这就是力-电耦合效应。其数学表达式为

$$Q = d_{33}ky \quad (2)$$

对于压电传感器, 假设被测物理量为  $a$ , 根据力-电耦合效应, 将  $a$  转化为压电传感器的压缩形变量  $y$  后才能转化为电信号。故  $a$  与  $y$  之间的变换关系由传感器机械结构动力学方程决定:

$$G_a(s) = \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_ms^m}{a_0 + a_1s + \dots + a_ns^n} \quad (3)$$

式中: 参数  $b_0, \dots, b_m, a_0, \dots, a_n, m, n$  等参数值依赖于压电传感器的具体机械结构设计, 通常  $m < n$ 。由式(1)~(3)可知, 对于压电式传感器, 其输入量为敏感物理量  $A(s)$ , 输出量为信号电压值  $U(s)$ , 描述其动态特性的传递函数  $G(s)$  可描述为

$$G(s) = d_{33}k \left( \frac{A_0RCs}{RCs + 1} \right) \left( \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_ms^m}{a_0 + a_1s + \dots + a_ns^n} \right) \quad (4)$$

由式(4)可知, 压电式传感器动态特性方程的阶次主要依赖于其机械结构动力学方程。

### 2 动态特性补偿原理

对于传感器传递函数  $G(j\omega)$ , 若存在补偿器  $G_c(j\omega)$ , 使在有效带宽  $\omega_0$  内,  $G(j\omega)G_c(j\omega)$  为稳定系统, 且  $\|G(j\omega)G_c(j\omega)\| = 1, 0 \leq \omega \leq \omega_0$ , 那么  $G_c(j\omega)$  即为传感器  $G(j\omega)$  的匹配补偿器。理论上, 最理想的补偿网络为原系统的逆系统  $G(s)^{-1}$ , 此时  $\|G(s)^{-1}G(s)\| = 1$ , 具有无限带宽。但  $G(s)^{-1}$  是非因果系统, 物理上无法实现。且无限带宽会引入大量噪声, 无实用价值。因此,  $G(s)^{-1}$  补偿网络需根据具体特定应用对象的频率特征进行修正补偿。根据

应用要求, 假设期望的频带宽度为  $\omega$  (角频率), 在  $G(s)^{-1}$  补偿器的基础上, 增加  $h$  重主导极点  $s = -\omega_0$ , 一般  $h = 1 \sim 3$  的整数。则修正后补偿器为

$$G_c(s) = G(s)^{-1} \left( \frac{\omega_0}{s + \omega_0} \right)^h \quad (5)$$

式(5)表明, 补偿后的传感器动态特性由其主导极点  $s = -\omega_0$  决定, 在  $0 \leq \omega \leq \omega_0$  频段内  $\|\tilde{G}(s)\| = 1$ 。

实际应用中,  $G(s)$  的精确模型参数可通过系统辨识方法获取。因此, 如何物理实现式(5)给出的补偿器网络是问题的关键。若在连续域实现补偿, 系统稳定性和鲁棒性均无法保证。然而, 借助数字化技术, 式(5)给出的补偿网络则很易实现。对式(5)进行  $z$  域离散化, 得到数字化离散补偿器:

$$G_c(z) = \frac{a_0 + a_1z^{-1} + \dots + a_Nz^{-N}}{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_Mz^{-M}} \quad (6)$$

传感器动态特性补偿原理即为设计内嵌数字处理器电路, 对传感器电信号进行高速采样后, 经式(6)动态特性数字化补偿网络, 再由 D/A 输出, 还原模拟输出量, 则可实现整个动态特性的改善。其实现原理框图如图2所示。该方法的关键是根据式(4)给出的传函结构计算辨识出较准确的补偿网络参数。

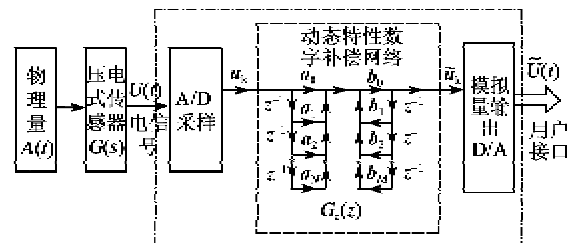


图2 压电式传感器动态特性数字化补偿内嵌电路原理

### 3 应用实例

钵状差动式压电加速度传感器是我们自主研发的一种具有超高灵敏度的新型加速度传感器, 其结构如图3所示。

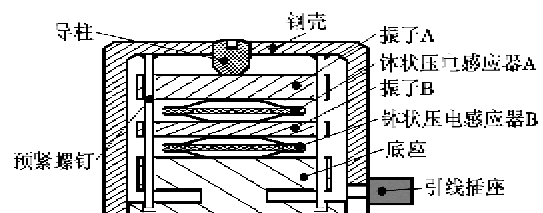


图3 钵状差动式压电加速度传感器结构简图

该型加速度传感器采用双振子差动结构, 且钵

状压电感应器件本身具有较高的位移放大系数<sup>[3]</sup>,因此其具有超高灵敏度。由于机械结构属于多级振子串联方式,使其动态响应在有效频段内有较大起伏。图 4 为无补偿时传感器 CHIRP 信号扫频原始曲线。图 5 为无补偿时的扫频法测得的幅频相频特性曲线,从图 5 中曲线可知,在有效频段内幅频曲线最大起伏约 8 dB,将严重制约应用效果。因此,需对其进行数字化补偿。

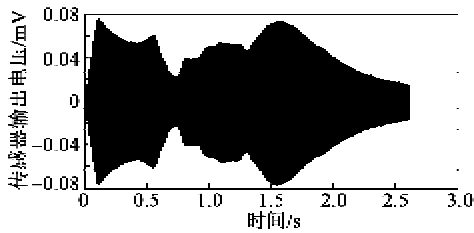


图 4 无补偿时传感器 CHIRP 信号扫频原始曲线

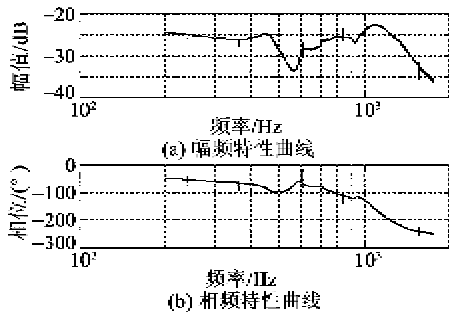


图 5 无补偿时扫频法测得的传感器幅频相频特性曲线

动态特性数字化补偿法首先需知道传感器的精确模型参数。借助 MATLAB 系统辨识工具箱,根据式(4)给出的传函结构,基于扫频法的频域模型辨识工具能得到最佳的频域模型匹配辨识结果。

图 6 分别给出了传感器传递函数预设为九至十二阶条件下的模型匹配结果,观察扫频试验曲线与计算得到的不同阶次模型拟合曲线匹配程度,则可直观看出十一阶次是匹配精度最高。因此,可采用该十一阶模型参数对该传感器  $G(s)$  进行精确描述,具体参数为

$$G(s) = \left[ -5.835s^{10} - 1.458 \times 10^4 s^9 + 1.411 \times 10^7 s^8 - 1.171 \times 10^{10} s^7 + 4.509 \times 10^{13} s^6 + 5.084 \times 10^{15} s^5 + 3.309 \times 10^{19} s^4 + 5.022 \times 10^{21} s^3 + 9.06 \times 10^{24} s^2 + 8.36 \times 10^{28} s + 8.153 \times 10^{30} \right] / \left[ s^{11} + 1.315s^{10} + 3.928 \times 10^6 s^9 + 3.512 \times 10^9 s^8 + 5.177 \times 10^{12} s^7 + 3.251 \times 10^{15} s^6 + 2.919 \times 10^{18} s^5 + 1.281 \times \right.$$

$$\left. 10^{21} s^4 + 7.18 \times 10^{23} s^3 + 2.106 \times 10^{26} s^2 + 6.214 \times 10^{28} s + 1.084 \times 10^{31} \right] \quad (7)$$

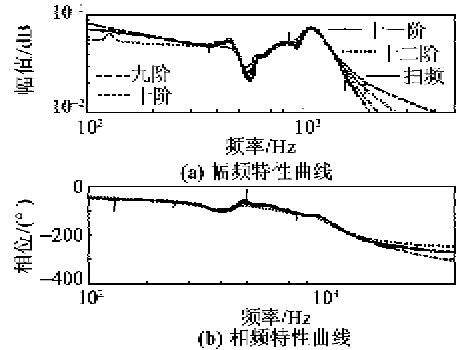


图 6 传感器频域模型匹配辨识结果

通过对扫频试验曲线结果分析,式(5)中确定  $k=2$ ,主导极点对  $G(s)^{-1}$  进行修正,主导极点位置设置在  $s=-1500$  处。按照式(5)计算出动态特性补偿网络  $G_c(s)$ 。对  $G_c(s)$  进行离散化,采样频率为 10 kHz,离散算法采用零极点匹配模式,即“matched”模式。则

$$G_c(z) = \left[ -237.5 + 2.522z^{-1} - 1.22 \times 10^4 z^{-2} + 3.549 \times 10^4 z^{-3} - 6.899 \times 10^4 z^{-4} + 9.409 \times 10^4 z^{-5} - 9.186 \times 10^4 z^{-6} + 6.421 \times 10^4 z^{-7} - 3.149 \times 10^4 z^{-8} + 1.032 \times 10^4 z^{-9} - 2.034z^{-10} + 182.6z^{-11} \right] / \left[ 1 - 10.58z^{-1} + 50.93z^{-2} - 147.6z^{-3} + 286.5z^{-4} - 392.2z^{-5} + 387.9z^{-6} - 279.1z^{-7} + 144.9z^{-8} - 52.84z^{-9} + 12.84z^{-10} - 1.866z^{-11} + 0.1225z^{-12} \right] \quad (8)$$

离散后的动态特性补偿网络  $G_c(z)$  的伯德图如图 7 所示,表明其能在有效频段内实现原系统的逆系统。

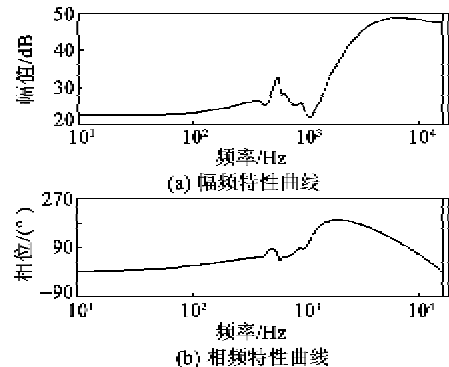


图 7 离散动态特性补偿网络的伯德图

采用高性能 TI DSP2812 硬件处理电路<sup>[4]</sup>, 实现式(8)数字补偿器算法设计, 并按照图 2 给出的流程, 对该型加速度传感器动态特性进行数字化实时补偿。补偿后的扫频法测得的幅频相频曲线如图 8 所示, 与补偿前(见图 4)相比, 其动态特性曲线取得了较理想的平整效果, 得到了很大改善。

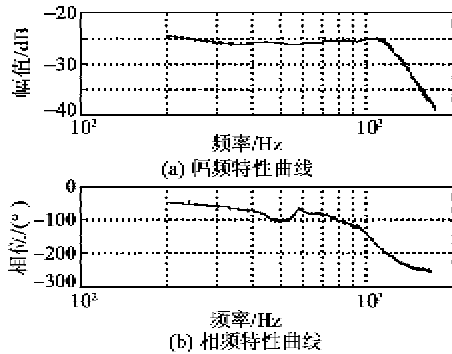


图 8 补偿后扫频法测得的传感器幅频相频特性曲线

(上接第 556 页)

#### 参考文献:

- [1] KAMAKURA T, CHOU I M, IKAGAYA K. Parametric transmitting array in air[J]. Journal of the Acoustical Society of Japan, 1980, 36(1): 36-41.
- [2] YONEYAMA M, FUJIMOTO J I. The audio spotlight: an application of nonlinear interaction of sound waves to a new type of loudspeaker design[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 73(5): 1532-1536.
- [3] POMPEI F J. The use of airborne ultrasonics for generating audible sound beams[A]//Proceedings of the Audio Engineering Society 105th Convention[C]//San Francisco, AES, 1998: 503-507.
- [4] POMPEI F J. Sound from ultrasound: the parametric array as an audible sound source[D]. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [5] JAMES J, NORRIS J O. HSS white paper[M]. USA: American Technology Corporation, 2005: 6-8.
- [6] NAKASHIMA Y, YOSHIMURA T, OHYA T. Prototype of parametric array loudspeaker on mobile phone and its acoustical characteristics[A]//Proceedings of Audio Engineering Society 118th Convention[C]//Barcelona, Spain, AES, 2005: 205-209.
- [7] WANG Z, ZHU W, MIAO J, et al. Micromachined thick film piezoelectric ultrasonic transducer array[J].

#### 4 结束语

本文从压电式传感器物理原理出发, 给出了描述压电式传感器动态特性的物理数学方程; 并对压电式传感器动态特性补偿原理和数字化补偿方法进行了详细阐述; 以一种新型的钵状差动式压电式加速度传感器为应用对象, 获得了很好的动态特性补偿效果, 验证了该方法的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 刘俊, 秦岚, 李京成, 等. 一种新型差动式压电加速度传感器[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6): 904-912.
- [2] 王义. 可用于多种压电传感器动态特性补偿方法的研究[J]. 传感器技术学报, 2007, 20(8): 34-36.
- [3] 潘仲明. 大作用距离超声测距技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [4] 徐科军. TMS320F2812 DSP 应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 130/131(SI): 485-490.
- [8] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 2 版. 南京: 南京大学出版社, 2001: 344-362.
- [9] PERCIN G. Plate equations for piezoelectrically actuated flexural mode ultrasound transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(1): 81-88.
- [10] YAO L, LU L, WANG Z, et al. Exact solution of multilayered piezoelectric diaphragms [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2003, 50(10): 1262-1271.
- [11] LI Xuesheng, DU Hualong, XU Limei, et al. Optimization of a circular thin-film piezoelectric actuator lying on a clamped multilayered elastic plate[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(7): 1469-1475.
- [12] LI Hui, DU Hualong, XU Limei, et al. Analysis of multilayered thin-film piezoelectric transducer arrays [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(11): 2571-2576.
- [13] XU Limei, DU Hualong, HU Yuantai, et al. Size optimization of a piezoelectric actuator on a clamped elastic plate[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(9): 2015-2021.
- [14] 栾桂东, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 修订版. 北京: 北京大学出版社, 2005: 380-383.