

Zynq-7000 嵌入式多功能阻抗测试仪的设计与校准

赵冬青, 逯宏超, 储成群

(中北大学 仪器与电子学院 太原 030051)

摘要: 介绍一种基于 Zynq-7000FPGA 和运算放大器相结合的阻抗测试仪。它利用 XC7Z020 系统板上的 D/A 转换器产生激励信号,通过内部的 A/D 转换器来采集被测阻抗的响应,并使用外部模拟电路来获取待测电压和电流,使用 3 参数正弦拟合算法来评估电压、电流的幅度和相位。提出了完整的校准和精度测试方法,在可用频率 0.1 Hz ~ 100 kHz 范围内对阻抗范围 10 Ω ~ 100 k Ω 的测试精度不低于 2%。

关键词: 阻抗分析仪; 嵌入式系统; 三参数正弦拟合

中图分类号: TN 702 文献标志码: A

文章编号: 1006-7167(2019)09-0099-05



Design and Calibration of Embedded Multifunctional Impedance Analyzer Based on Zynq-7000

ZHAO Dongqing, LU Hongchao, CHU Chengqun

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: An impedance analyzer based on Zynq-7000 FPGA and operational amplifier is designed in this paper. It uses the DAC 7621 installed on the XC7Z020 development board to generate the excitation signal, and then the internal ADC collects the response of the measured impedance. It also uses the external analogue circuits to obtain the excitation signal and measure voltage and current. The magnitudes and phase shifts of voltage and current are evaluated using the three parameter sine fitting algorithm. The calibration procedure of completed device is presented and its accuracy is tested. The device is allowed for measurements at frequency range between 100 mHz and 100 kHz, and in 10 Ω to 100 k Ω impedance range and has 2% accuracy.

Key words: impedance analyzer; embedded system; three parameters sinusoidal fitting

0 引言

阻抗测量在电子器件的性能检测、传感器、仪器仪表、生物医学和国防领域有着广泛的应用。在实验室中通常使用的 RLC 表测量的频率范围和阻抗范围都有限,而且测量精度低。具体实践应用中,一般需要嵌入在便携测量系统或小型且简单的设备中,但这些设备测量频率和范围都有限,或者缺乏实验室阻抗分析

仪的典型特征,例如宽范围的激励信号幅度、直流偏置测量等。市场上定制的阻抗分析仪大多数是采用嵌入式微处理器控制专用的阻抗测量芯片 AD5993^[1],但是若要实现宽范围的频率和阻抗测量,就要增加外部电路来实现;例如:可变时钟发生器、电流-电压转化(Current-to-Voltage Converter, CVC)等,通过外加电路可以实现宽范围的频率和阻抗测量,同时也增加了电路的复杂性。基于上述分析,本文提出了 Zynq-7000 的阻抗测试系统,该测试系统不包含任何专用的阻抗转换集成电路,它完全基于系统本身的 A/D 和 D/A 以及通用的仪表放大器、模拟电路配合来实现阻抗的测量。

收稿日期: 2018-10-11

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(61771434)

作者简介: 赵冬青(1978-),男,山西晋城人,博士,副教授,研究方向: 嵌入式开发与应用。

Tel.: 18634315308; E-mail: 1439654890@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 硬件平台介绍和阻抗测量原理

Zynq-7000FPGA 系列是一款强大的全可编程(All Programmable) 处理器,不同于传统的采用 FPGA 架构和 ARM 芯片,它是在 FPGA 内部集成了 ARM 的硬核处理器^[2]。用户可以创建基于 AXI 总线的 IP 核,实现软、硬件的协调设计。Zynq-7000 阻抗测试仪采用的主控芯片是 XC7Z020clg484-2,它的 ARM 内核是两块独立的 Cortex-A9 处理器,最高时钟频率可达到 1 GHz。

为了得到最佳测量效果,激励信号的频率范围应满足测试端子的测量范围要求,因此要求激励信号可以灵活多变。阻抗测量系统可以充分利用“FPGA + ARM”架构,采用直接数字合成(Direct Digital Synthesizer, DDS) 技术产生正弦激励信号。DDS 技术是一种采用数字控制信号的相位增量技术,具有频率分辨率高、稳定性好,可灵活产生多种信号的优点^[3]。基于 DDS 的波形发生器是通过改变相位增量寄存器的值来改变输出频率的,同时 DDS 通过相位累加查表法(Look-Up Table, LUT) 实现任意波形的合成,波形的幅值可以改变查找表中的内容来调整^[4],最后将波形参数存储在波形存储器中。

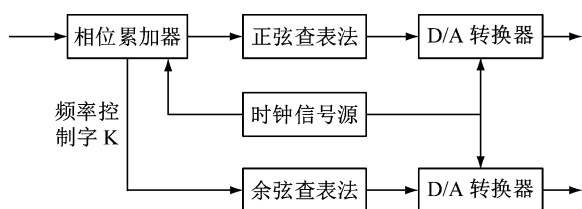


图1 DDS产生激励信号原理图

Zynq-7000 阻抗测试仪 D/AC 的分辨率是 12 bit 的,DDS 调谐字为 32 bit 字长,所以激励信号的分辨率为 $1 \text{ MHz}/2^{32} \approx 0.23 \text{ mHz}$,虽然理论带宽很宽,但是通过 4 阶巴特沃斯低通抗混叠滤波器后,利用 Matlab 仿真得出,在激励信号为 100 kHz 时有 3 dB 的衰减,频率越高,衰减越明显。此外正弦激励信号还有 1.65 V 的直流偏置,其正好为 Zynq-7000 系统工作电压的一半,为了方便起见可以利用电平移位器去除该直流偏置,此时被测阻抗的电压即为零位电压,而测量系统上的 D/AC 和 A/DC 都工作在满量程范围。

2 Zynq-7000 阻抗测试仪阻抗测量

Zynq-7000 阻抗测试仪可以同时测量被测电阻的电压和电流,如图 2 所示,在测试端子 1、2 之间测量电压,并通过电压放大器放大 16 倍后通过电平移位器送入嵌入式系统中供 A/DC 采集,然后经 DMA 总线存储在预先分配的缓存器中^[5]。电平移位器的主要作用

是让 A/DC 的输入电压为满量程输入。而被测阻抗电流的获取需要通过电流电压转换环节,而后经电平移位器送入 A/DC 采集系统。电流电压转换的范围主要是通过模拟开关 ADG706 改变反馈回路中反馈电阻的阻值来改变的。与反馈电阻并联的电容可以提高电流电压转换电路的稳定性,而且还可以降低高频测量阻抗时的噪声电平^[6]。图 2 为 Zynq-7000 阻抗测试仪整体结构框图。

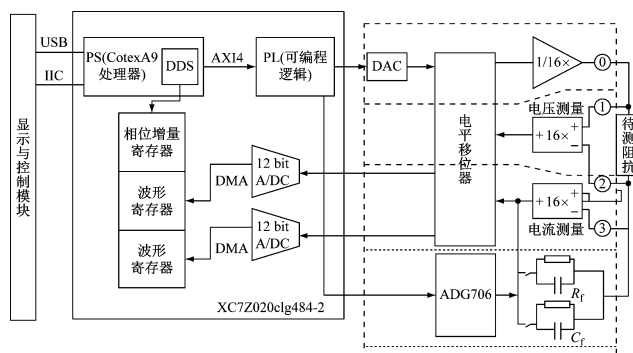


图2 Zynq-7000 阻抗测试仪整体结构框图

Zynq-7000 系列 FPGA 内部集成的双核 ARM 独立的 I/O 外设为阻抗分析仪的控制和显示提供了极大的便利。PS(ARM 处理器) 通过控制 AXI 总线读取 PL(可编程逻辑资源) 缓存器里采集的电压数据到 DDR 以备 Linux 上位机软件处理。同时采用 GP 端口来下发命令,HP 端口传输数据来达到 PS 和 PL 之间交互的最优化。Zynq-7000 阻抗测量系统允许控制的阻抗测量参数为: 测量频率、电压激励幅度、电压转换器范围切换以及每次测量的样本数和电压激励信号的周期等。

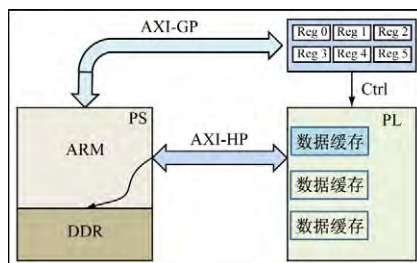


图3 PS和PL数据和命令交互机制

3 Zynq-7000 阻抗测试仪的校准

由于离散傅里叶变换算法存在频谱泄露和栅栏效应,而且它对采样周期有一定的要求^[7]。所以本文采用 3 参数正弦拟合算法对采集信号进行处理分析来确定正弦电压、电流的幅值和初相。在测量采集过程中,对测试对象处的电压、电流瞬时值进行采样,经 A/DC 转换后存储在相应的缓存器中。最后用 3 参数正弦拟合算法来确定正弦电压、电流的幅值和相位。

ZYNQ-7000 阻抗测量系统同样需要校准来确定电流-电压转换特性以及外围模拟电路的频率特性。在校准测量系统时,使用 11 组电阻来作为校准参考,这 11 组电阻包括 9 个金属膜电阻和 2 个碳合成电阻,阻值覆盖范围依次为 100 mΩ ~ 800 MΩ。

图 4 是使用 4294A 精密阻抗分析仪对参考电阻实际测量值。从图中可以看出测量结果和实际阻抗值的一致性良好;根据参考文献[8]中得知:在较高频率下对较大阻抗进行测量时,电阻的寄生串联电感和寄生并联电容会影响电阻的测量结果。同时查询 4294A 精密阻抗分析仪在 50 Hz ~ 1 MHz 频率范围内阻抗谱得到的结果也与上述结论一致。由于 4294A 精密阻抗分析仪在低阻抗和低频率范围内的精度不足,阻抗低于 1 Ω 的阻抗被截断。

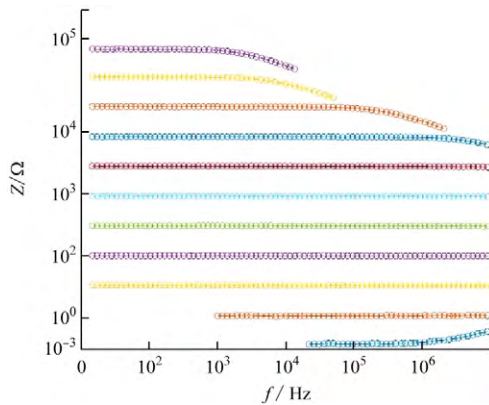


图 4 参考电阻在 4294A 精密阻抗分析仪下的测量阻抗谱

ZYNQ-7000 阻抗测量系统前端模拟电路的传输可靠性直接决定阻抗测量的精度。例如,在 100 Hz 的测试频率下,16 倍的电压放大器会使信号产生大约 5° 的相移。尽管在实际测量中采用的是增益带宽积为 10 MHz 两个 4 × 4 电压放大器的级联,但如果这种误差没有得到适当的补偿,这种相移也会对阻抗测量的精度产生影响。对于校准之前的阻抗在不考虑电流-电压转换特性的时候,根据 3 参数正弦拟合算法计算得到的结果:未校准阻抗值 Z_{nc} 可以表示为施加在其本身电压(U_{φ_U})和电流(I_{φ_I})的比值:

$$Z_{nc} = \frac{U}{I} e^{\varphi_U - \varphi_I} \quad (1)$$

根据 3 参数正弦拟合算法得到的值并非实际阻抗值,要获得实际值还需要根据参考电阻标定和校准来求出。对于不同频率测量点,校准参数是不同的,所以在不同的频率点上要分别计算校准参数;通过改变反馈回路中反馈电阻 R_f 的大小来改变电流-电压转换范围,在每个范围内重复测量,得到的测量结果如图 5 中的点图所示。此外测量过程中可以通过标定电阻的测量范围来优化测量性能。理论上测量标定范围越小,测量结果越准确。

待测阻抗的频率特性使用多项式近似表达为^[6]:

$$|Z_{nc}/Z_{ref}| = m_0 + m_1 \cdot f_m + m_2 \cdot f_m^2 \quad (2)$$

$$\arg\left(\frac{Z_{nc}}{Z_{ref}}\right) = a_1 \cdot f_m + a_2 \cdot f_m^2 \quad (3)$$

式中: m_i 为幅值校准参数; a_i 为相位校准参数; Z_{ref} 为参考阻抗。测量系统的校准结果见图 5。

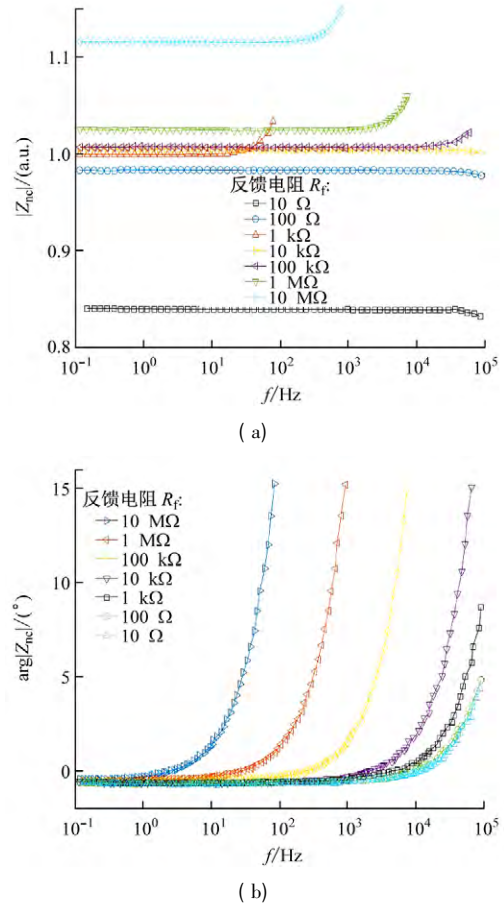


图 5 参考电阻在 ZYNQ-7000 阻抗测试仪下测量结果

根据式(2)和(3)可知,利用校准参数来补偿测量系统的频率特性;此时 Z_{ref} 就可以用待测阻抗 Z_x 来代替,表达式为:

$$|Z_x| = \frac{Z_{nc}}{m_0 + m_1 f_m + m_2 f_m^2} \quad (4)$$

$$\arg(Z_x) = \arg(Z_{nc}) - (a_1 f_m + a_2 f_m^2) \quad (5)$$

此外,对于不同相角偏移范围需要考虑激励信号的最大频率。

4 Zynq-7000 阻抗测试仪精度的评估

ZYNQ-7000 阻抗测量系统在 1 mHz ~ 100 kHz 频率范围内使用 25 mV RMS 的正弦激励信号测量阻抗,将测量阻抗值与 4294A 精密阻抗分析仪所测阻抗值进行比较,并计算出阻抗幅值的相对误差和相角的绝对误差。阻抗幅值的相对误差百分比计算式为:

$$\delta_{mod} = \left| \frac{|Z_{ref}| - |Z_m|}{|Z_{ref}|} \right| \quad (6)$$

这里选取几组参考电阻的阻值在固定的几个频率下测试;考虑到 ZYNQ-7000 阻抗测量系统在低阻抗和低频率范围内阻抗谱会被截断的因素^[9],所以参考电阻和测试频率的选取都进行了折中。从图 6 可以得出,在 0.1 Hz ~ 10 kHz 范围内几个频率点测量 10 Ω ~ 100 k Ω 阻抗,测量结果非常理想,阻抗幅值的相对误差基本控制在 1.5% 以下,相角的绝对参数精度都低于 0.2°。对于更高范围的测量频率和更大的电阻值会受到电流-电压转换频率特性的影响^[10],此处不做测试评估。

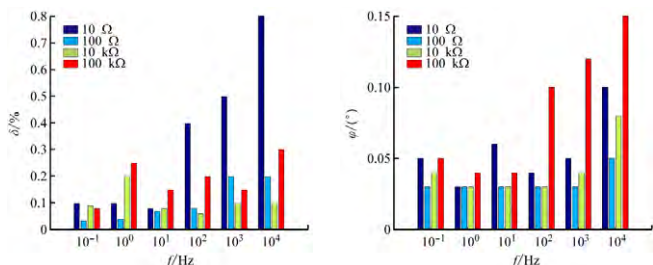


图 6 参考电阻在 ZYNQ-7000 阻抗测试仪下幅值和相位偏移的误差

需要引起注意的是这里所做的准确度评估只是针对对于本方案提出的测量方法和模拟电路采集传输的质量,它并未涉及由于电路中使用的器件发热和时间漂移所引入的误差^[11-12]。为了验证测量系统对温度的敏感度,将系统放置在恒温箱中,并在 35 ~ 45 °C 的温度范围内进行类似测量,并且以与之前相同的方式评估幅值和相位的相对误差和绝对误差。结果如图 7。

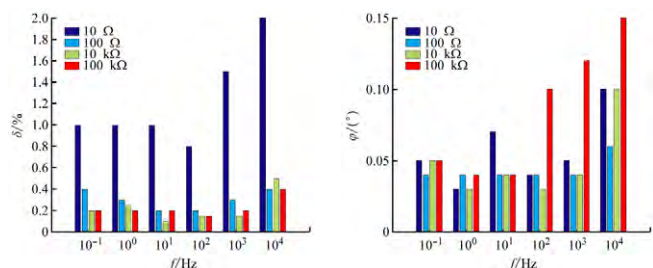


图 7 恒温箱中参考电阻在 ZYNQ-7000 阻抗测试仪下幅值和相位偏移的误差

与图 6 比较可以得出:温度主要影响阻抗幅值测量的误差,而相角受温度影响很小。这里不难得出原因,导致测量系统幅值误差增加主要是由于电压放大器温度漂移所造成的。在低阻抗测试范围内,用于切换量程的模拟开关的温度系数是主要影响因素^[13],随着测量阻抗值的增大,电子元器件的温度系数受温度变化成为影响幅值误差的主要因素^[14-15],虽然相角的误差变化小的多,但也增加了。

5 RC 网络的测量

Zynq-7000 阻抗测量系统还可以对电容及 RC 网

络进行测量。选取待测对象:100 nF 和 220 nF 的瓷片电容以及由 4.9 k Ω 电阻和 10 Ω 电阻并联然后和 20 nF 电容组成的 RC 网络;分别使用 Zynq-7000 阻抗测量系统和 4 294 A 精密阻抗分析仪在 100 Hz ~ 100 kHz 频率范围下进行测试,并将 4 294 A 精密阻抗分析仪的测试结果作为参考值进行对比,并计算两者的差异。图 8 由两部分组成,点线图分别是 Zynq-7000 阻抗测试仪和 4 294 A 的测试结果,条形图是两者之间的误差对比。结果表明:Zynq-7000 阻抗测试仪与 4 294 A 精密阻抗分析仪两者之间存在着良好的一致性;随着测试频率的增加,电容和 RC 网络的阻抗模会一直减小,RC 网络的阻抗值越来越接近于电阻 R 值,并且将始终大于电阻 R 值。

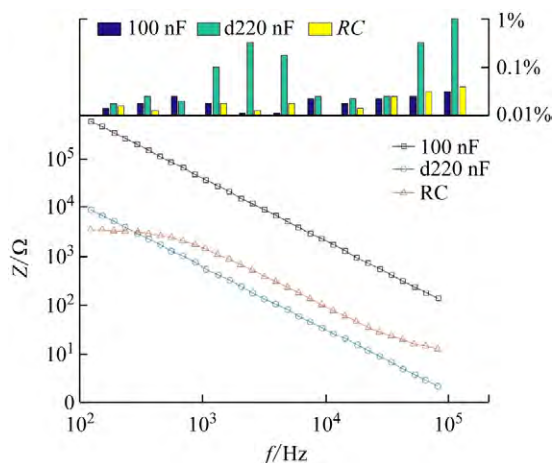


图 8 Zynq-7000 阻抗测试仪与 4 294 A 精密阻抗分析仪对电容和 RC 网络测量对比图

6 结 语

Zynq-7000 阻抗测试仪不仅测量精度高、激励信号频率范围宽,而且还能够对 RC 网络实现测量。Zynq-7000 阻抗测试仪可以同时进行电压和电流测量,它不需要可变时钟源来覆盖宽范围的频率,在可用频率 0.1 Hz ~ 100 kHz 范围内,阻抗幅值和相角的测量误差通常不超过 1.5% 和 0.5°。只有在最高频率 (≥ 100 kHz) 和最小阻抗 (≤ 10 Ω) 的最差组合才能观察到 3% 的差异。

参考文献(References):

- [1] 刘俊杰,杨卫东,李 涛,等. 一种小型阻抗分析仪的设计[J]. 电子制作, 2015(13): 67-69.
- [2] 何 宾,张艳辉. Xilinx Zynq-7000 嵌入式系统设计与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [3] 高松巍,李 冰,邢燕好. 一种基于 DDS 技术的电磁超声激励电源[J]. 现代电子技术, 2009, 32(13): 5-7.
- [4] Piasecki T, Chabowski K, Nitsch K. Design, calibration and tests of versatile low frequency impedance analyser based on ARM microcontroller[J]. Measurement, 2016, 91: 155-163.

- [5] Chabowski K, Piasecki T, Dzierka A, *et al.* Simple wide frequency range impedance meter based on AD5933 integrated circuit [J]. *Metrology & Measurement Systems*, 2015, 22(1): 13-24.
- [6] Simiä M. Complex impedance measurement system for the frequency range from 5 kHz to 100 kHz[J]. *Key Engineering Materials*, 2015, 644: 133-136.
- [7] 张玉祥,刘明春. 基于 AD5933 的小型压电阻抗分析仪设计[J]. *电子测量技术*, 2009, 32(11): 76-79.
- [8] 郭建强,宁小伟,高晓蓉,等. 基于 MSP430 单片机的智能阻抗测量仪设计[J]. *现代电子技术*, 2012, 35(12): 182-185.
- [9] Piasecki T. Fast impedance measurements at very low frequencies using curve fitting algorithms [J]. *Measurement Science & Technology*, 2015, 26(6): 75-85.
- [10] Ramos P M, Janeiro F M, Tlemcani M, *et al.* Uncertainty analysis of impedance measurements using DSP implemented ellipse fitting algorithms [C]// *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*. [s. l.]: IEEE, 2008: 463-467.
- [11] Schwarzenberger T, Wolf P, Brischwein M, *et al.* Impedance sensor technology for cell-based assays in the framework of a high-content screening system [J]. *Physiological Measurement*, 2011, 32(7): 977-993.
- [12] Schwarzenberger T, Wolf P, Brischwein M, *et al.* Impedance sensor technology for cell-based assays in the framework of a high-content screening system [J]. *Physiological Measurement*, 2011, 32(7): 977-993.
- [13] Memier G, Hasenkamp W, Piacentini N, *et al.* Multiple-frequency impedance measurements in continuous flow for automated evaluation of yeast cell lysis [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2012, 170(4): 2-6.
- [14] Broeders J, Duchateau S, Grinsven B V, *et al.* Miniaturised eight-channel impedance spectroscopy unit as sensor platform for biosensor applications [J]. *Physica Status Solidi*, 2011, 208(6): 1357-1363.
- [15] Chabowski K, Junka A F, Szymczyk P, *et al.* The Application of impedance microsensors for real-time analysis of pseudomonas aeruginosa biofilm formation. [J]. *Polish journal of microbiology*, 2015, 64(2): 115-126.
- [16] Van Duuren J B J H, Müsken, Mathias, Karge B, *et al.* Use of single-frequency impedance spectroscopy to characterize the growth dynamics of biofilm formation in pseudomonas aeruginosa [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 5223-5229.

(上接第 98 页)

浊音、清音、无声段的检测对于语音增强、语音识别都有重要的意义。以语音增强为例,通过对各种典型语音使用小波收缩法进行消噪^[10]时,在小波基的选择上,对浊音段使用 dmey 小波,对无声段使用 haar 小波能够取得更好的效果。同时,其他消噪参数,如阈值算法等的选择,也需要分辨语音是否是清音^[4-6],然后再进行处理。

本文中,判决门限,包括浊音判决和清音判决,对于结果而言都是非常重要的。本文使用的门限估算方法为全部语音信号前后的无音帧的(谱)熵最大值与最小值的加权处理。因此,该方法要求语音前后要有一定的无声段用来估计门限,若能与自适应方法相结合使用,会取得更好的效果。

参考文献(References):

- [1] 周健,赵力,梁瑞宇. 基于噪声鲁棒性特征和 SVM 的耳语音可懂度增强[J]. *东南大学学报(英文版)*, 2012, 28(3): 261-265.
- [2] 陆慧娟,刘亚卿,刘砚秋. 基于特征值合并的语音增强算法[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(7): 1622-1627.
- [3] 易克初,田斌,付强. 语音信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [4] Jong Won Seok, Keun Sung Bae. Speech enhancement with reduction of noise components in the wavelet domain[C]//ICASSP. Munich [s. n.], 1997: 1323-1326.
- [5] Zhang X, Zhang Y, Shi Y, *et al.* Power control algorithm in cognitive radio system based on modified Shuffled Frog Leaping Algorithm [J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2012, 66(6): 448-454.
- [6] Fuji Y, Yamamoto K, Nakagawa S. Hidden conditional nearal fields for continuous phoneme speech recognition[J]. *IEICE Transactions on Information System*, 2012, 95-D(8): 2094-2104.
- [7] 王薇,杨丽萍,魏丽. 语音情感特征的提取与分析[J]. *实验室研究与探索*, 2013, 32(7): 91-94, 191.
- [8] 张潇丹,胡峰,赵力. 基于改进的蛙跳算法与支持向量机的实用语音情感识别[J]. *信号处理*, 2011, 27(5): 678-689.
- [9] 张雪英. 数字语音处理及 Matlab 仿真. [M]. 北京: 电工业出版社, 2012.
- [10] 赵力. 语音信号处理[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2016.

· 名人名言 ·

只有严格的专业化能使学者在某一时刻,大概也是他一生中唯一的时刻,相信自己取得了一项真正能够传至久远的成就。今天,任何真正明确而有价值的成就,肯定也是一项专业成就。

——马克斯·韦伯