

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211170

基于微信小程序的语音频谱分析实验教学系统设计*

谢家兴 梁高天 高鹏 代秋芳 刘洪山
(华南农业大学电子工程学院(人工智能学院)广州510642)

摘要:为解决高校电子信息类专业通信类课程教学实验时长受限、地点受限等问题,帮助学生更好地理解频谱分析原理,开发基于小程序的信号发生器与频谱分析仪,利用互联网的优势,实现随时开展实验教学的效果。信号发生器可产生一定频率范围内的正弦波、方波、三角波、随机噪声、洛伦兹脉冲以及辛普森脉冲共6种常用的信号,并通过手机扬声器或耳机孔输出;频谱分析仪可对手机麦克风接收到的语音进行加窗频谱分析,并把频谱结果展现在屏幕上。使用固定型号手机进行测试,结果表明,信号发生器在产生100 Hz~10 kHz的正弦波时频率相对误差为0%,产生其它波形的频率相对误差 $\leq 1\%$;频谱分析仪在对正弦波音频输入做频谱分析时,峰值频率测量误差在5 Hz以内,具有良好的实验教学指导意义与现场应用适用性。

关键词:微信小程序;信号发生器;频谱分析仪;傅里叶变换;加窗

中图分类号: TN911.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Design of speech spectrum analysis experimental teaching system
based on WeChat appletXie Jiaying Liang Gaotian Gao Peng Dai Qiufang Liu Hongshan
(College of Electronic Engineering (College of Artificial Intelligence), South China Agricultural University,
Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to solve the problems of limited duration and location of communication experiments of the Electronic Information Specialty in Universities and help students better understand the principle of spectrum analysis, a small program-based signal generator and spectrum analyzer were developed, and the advantages of the Internet were used to realize the effect of conducting experiments at any time. The signal generator can generate 6 kinds of commonly used signals including sine wave, square wave, triangle wave, random noise, Lorentz pulse and Simpson pulse in a certain frequency range, and output them through the mobile phone speaker or headphone jack. The speech received by the microphone is subjected to windowed spectral analysis, and the spectral results are displayed on the screen. Using a fixed type of mobile phone to test, the results show that the relative error of the frequency of the signal generator is 0% when generating a sine wave of 100 Hz to 10 kHz, and the relative error of the frequency of other waveforms is less than 1%. During spectrum analysis, the peak frequency measurement error is within 5 Hz, which has good experimental teaching guiding significance and field application applicability.

Keywords: WeChat applet; signal generator; spectrum analyzer; Fourier transform; windowing

0 引言

根据教育部发布的《教育信息化十年发展规划(2011-2020年)》指出,高教信息化建设要加强基础设施和信息资源建设,推进信息技术与高等教育的深度融合,促进高等教育改革创新和全面提高教育质量的国家战略^[1]。对于高校

电子信息类专业学生,信号发生器和频谱分析仪是必不可少的工具,各大高校投入了大量资金购买设备,但仍存在以下问题:

- 1)时长受限:学生做实验通常只在实验课期间进行,导致练习少、学不会、理论和实践比例失调^[2]。
- 2)地点受限:疫情期期间,学生在家没有实验仪器,无法

收稿日期:2022-08-25

* 基金项目:教育部产学合作协同育人项目(201802070020)、华南农业大学质量工程建设项目(zlgc20017, zlgc21035)、华南农业大学教育教学改革与研究项目(JG20081, JG21033)资助

进行相关通信技术实验;对于出差工作者,随身携带笨重的信号发生器和频谱分析仪不太现实,难以实时便利使用这类工具。

近年来,随着移动通信技术的发展,手机越来越普及,截止至 2021 年 6 月,我国网民使用手机上网的比例达 99.6%^[3],微信小程序依托于手机运行,具有良好的应用前景与极低的普及成本,已有不少学者将微信小程序应用于教学^[4-6]、实验^[7-9]和设备管理^[10-11]中。

因此,本文针对语音频谱分析实验需求,开发《通信人的工具箱》微信小程序集成信号发生器和音频频谱分析仪功能。信号发生器实时生成音频数据,通过音频播放接口实现信号输出;音频频谱分析仪通过麦克风采集音频数据,利用快速傅里叶变换算法对其进行频谱分析,通过 ECharts 可视化插件显示频谱信息。信号发生器和音频频谱分析仪构成完整的语音频谱实验系统并进行实验测试。

1 信号发生器设计

信号发生器通过扬声器或耳机孔输出用户设定的信号波形,可选波形一个周期的计算公式如式(1)~(6)所示。

正弦波:

$$f(t) = a \times \sin(t) \quad (1)$$

方波(占空比固定为 50%):

$$f(t) = a \times \text{sign}(\sin(t)) \quad (2)$$

三角波:

$$f(t) = \begin{cases} a \times t, & -T/4 \leq t < T/4 \\ -a \times t, & T/4 \leq t < 3T/4 \end{cases} \quad (3)$$

随机噪声:

$$f(t) = a \times \text{rand}(t) \quad (4)$$

洛伦兹脉冲:

$$f(t) = 1/(1+t^2), -T/2 \leq t \leq T/2 \quad (5)$$

辛克森脉冲:

$$f(t) = \sin(t)/t, -5T \leq t \leq 5T \quad (6)$$

其中, a 表示信号幅度,可通过用户界面配置; T 表示一个周期所需要的时间; rand 表示 $-1 \sim 1$ 的随机数; sign 表示取符号函数,其定义如式(7)所示。

$$\text{sign}(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases} \quad (7)$$

信号发生器的用户界面如图 1 所示,用户在频率输入框输入想产生信号的频率,通过波形选择器选择信号类型,点击“播放”按钮,等待波形加载后,信号即可通过手机扬声器或者耳机孔输出。

按下“播放”按钮,程序根据用户选择的波形与频率,利用波形计算公式得到信号的数值样点数组,把样点数组保存为 wav 音频文件,并调用音频播放应用程序接口(application programming interface, API)播放该文件实现信号输出,当用户按下“停止”按钮时,结束信号输出。

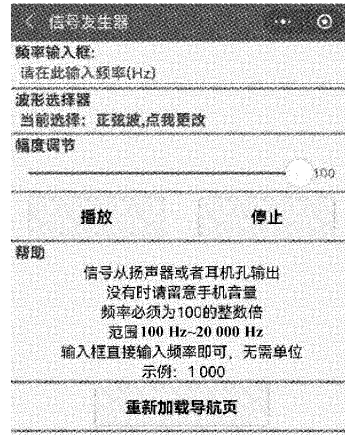


图 1 信号发生器用户界面

2 频谱分析仪设计

频谱分析仪对手机麦克风接收到的音频信号进行频谱分析,用户界面如图 2 和 3 所示。

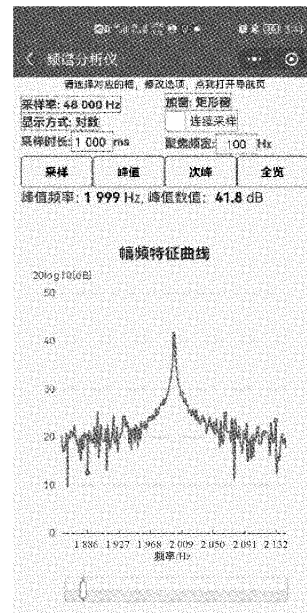


图 2 频谱分析仪“聚焦”界面

可改变的参数包括采样率、窗类型、显示方式、是否连续采样、采样时长以及聚焦宽度。用户点击“采样”按钮时,程序根据设定,对手机外部声音进行录制,利用快速傅立叶变换进行频谱分析,结果通过折线图呈现给用户。

频谱分析仪处理流程主要分为:音频采集、数据预处理、加窗处理、快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)、数据展示与交互。

2.1 数据采集与预处理

用户可以设置录音文件的采样率,可选值包括:8 000、11 025、12 000、16 000、22 050、24 000、32 000、44 100、48 000,单位为 Hz。根据奈奎斯特定理,采样率必须大于

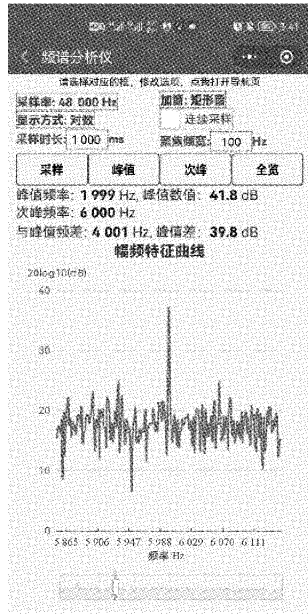


图3 频谱分析仪“次峰”界面

被采样信号频谱最大频率成分的两倍,否则将发生频谱混叠影响信号观测^[12]。

用户点击“采样”按钮时,小程序调用录音 API 以设定的采样率和采样时长对手机外部音频进行录制。API 在录音结束后返回 uint8(8 位无符号整型)数组,阅读手册可知音频流为脉冲编码调制(pulse code modulation,PCM)格式的 16 位有符号整型(int16)小端序数据^[13]。因此,录音后利用位移和按位或逻辑运算实现把 uint8 数据转换成 int16 数据。

频谱分析采用基二快速傅里叶变换算法,输入的序列长度必须是 2 的幂次方,如式(8)所示对采样数据进行截短。

$$k = 2^{\lfloor \log_2 in \rfloor} \quad (8)$$

其中, k 为 FFT 点数; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。

2.2 加窗处理

在大多数情况下,语音是很长的序列,而离散傅里叶变换(discrete Fourier transform,DFT)只能工作在有限长的序列上,具体为使信号乘上一个有限长的序列,即“加窗”^[14-15]。“加窗”如下:

$$y[n] = x[n] \cdot w[n], 0 \leq n \leq N-1 \quad (9)$$

其中, N 表示数组长度; $x[n]$ 表示加窗前数组; $w[n]$ 为窗序列,通过窗函数计算得到; $y[n]$ 为“加窗”结果。

小程序支持的窗函数如下:

矩形窗:

$$w[n] = 1, 0 \leq n \leq N-1 \quad (10)$$

三角窗:

$$w[n] = \begin{cases} 2n/N-1, & 0 \leq n \leq (N-1)/2 \\ 2-2n/N-1, & (N-1)/2 \leq n \leq N-1 \end{cases} \quad (11)$$

汉宁窗:

$$w[n] = 0.5[1 - \cos(2\pi n/(N-1))], 0 \leq n \leq N-1 \quad (12)$$

汉明窗:

$$w[n] = 0.54 - 0.46\cos(2\pi n/(N-1)), 0 \leq n \leq N-1 \quad (13)$$

布莱克曼窗:

$$w[n] = 0.42 - 0.5\cos(2\pi n/(N-1)) + 0.08\cos(4\pi n/(N-1)), 0 \leq n \leq N-1 \quad (14)$$

上述窗函数及其相应的属性如表 1 所示,用户可以选择不同的窗分析同一个信号,观察信号的变换,加深理解窗函数对频谱分析的影响。

表 1 窗函数的属性

窗的类型	最大旁瓣幅度 (相对值)	主瓣近似宽度 (数字频率)	最大逼近误差 $20\lg\delta/\text{dB}$
矩形窗	-13	$4\pi/(N+1)$	-21
三角窗	-25	$8\pi/N$	-25
汉明窗	-31	$8\pi/N$	-44
汉宁窗	-41	$8\pi/N$	-53
布莱克曼窗	-57	$12\pi/N$	-74

2.3 傅里叶变换

傅里叶变换是信号分析的基本方法,通过它可以把信号从时间域变换到频域,从而研究信号的频谱结构和变化规律。音频采样得到离散信号,所以频谱分析采用 DFT,该变换的定义式如式(15)所示。

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{i2\pi nM} \quad (15)$$

式中: $x[n]$ 和 $X[k]$ 分别表示变换前和变换后的复数数组; N 表示数组长度; M 表示变换前数组的长度; e 为自然常数; i 表示单位虚数,即 $\sqrt{-1}$ 。

在实际应用中,直接使用定义计算 DFT 的复杂度为 $O(N^2)$,使用 FFT 算法^[16]可以把时间复杂度减少为 $O(n\log n)$ ^[17],小程序使用后者作为变换算法。

2.4 数据展示与交互

数据呈现基于 ECharts 插件,该插件基于 JavaScript 的开源可视化图表库,可以流畅运行在 PC 和移动设备上,底层依赖矢量图形库 ZRender,提供直观、交互丰富、可高度个性化定制的数据可视化图表^[18]。

离散傅里叶变换后得到复数序列,对变换结果的复数序列的每一个元素做取模处理得到幅度序列,截取前半显示到用户界面上实现频谱分析。数据展示的纵坐标可选为“线性”或“对数”,如果为“对数”显示,则对幅度序列取对数,公式如式(16)所示。

$$y[k] = \begin{cases} 20\lg(|X[k]|), & flag = true \\ |X[k]|, & flag = false \end{cases} \quad (16)$$

式中： $flag$ 表示是否使用“对数显示”模式； $y[k]$ 为绘图数组。离散傅里叶变换后序列的索引为归一化频率，根据该频率计算模拟频率作为图表的横坐标，计算方法如式(17)所示。

$$f_x[n] = f_s \times n/N \quad (17)$$

式中： f_s 为音频采样率，单位为 Hz； N 为 FFT 点数； $f_x[n]$ 表示第 n 点的模拟频率，单位为 Hz； n 为序列索引，取值范围为 $[0, N/2]$ 。

用户界面显示频谱数据时，点击“峰值”按钮可使图表聚焦到频谱峰值最大处(如图 2)，上方字体显示峰值频率与幅度，此时点击“次峰”按钮，图表聚焦到谱峰值次大处(如图 3)，同时上方字体显示当前聚焦的“次峰”与峰值最大处的频偏值与幅度差。点击“全览”按钮，图表重新显示整个频谱。

3 实验测试

3.1 信号发生器测试

信号发生器测试使用“华为-畅享 9e”和“小米 9”两个型号手机，“普源 DS1042C”示波器，对照用的信号发生器型

号为“明禾 JUNTEK-JDS6600”，测试环境如图 4 所示。

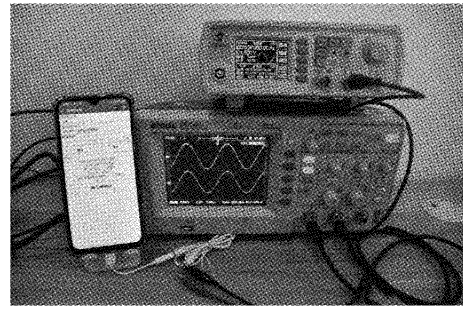


图 4 信号发生器测试环境

用 3.5 mm 音频公对公输出线把信号引出到示波器通道 1，标准波形的对照信号输入到示波器通道 2，观察波形是否正常。每一种波形(随机噪声除外)分别选择 100、200、500、1 000、2 000、5 000、10 000、11 000、12 000、15 000、20 000 作为测试频率(Hz)。部分波形测试结果如图 5 所示，示波器显示界面上方波形为手机输出的信号，下方波形为标准对照，可见微信小程序信号发生器与实际的信号发生器在一定频率范围内波形差别不大。

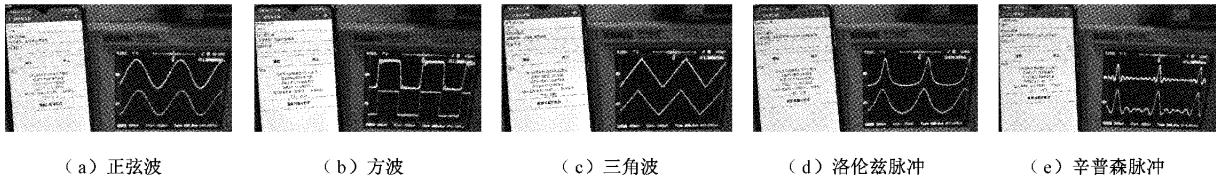


图 5 信号发生器部分波形测试结果

“华为-畅享 9e”和“小米 9”手机频率测试结果分别如表 2 和 3 所示，数据为空表示波形已严重失真，测试结果不可靠，相对误差的计算公式如式(18)所示。

$$\delta = (test - real)/real \times 100\% \quad (18)$$

其中， δ 为相对误差； $test$ 和 $real$ 分别为测量值和真值，单位为 Hz。

表 2 “华为-畅享 9e”信号发生器实验结果

频率真值/ Hz	正弦波		方波		三角波		洛伦兹脉冲		辛普森脉冲	
	测量值	相对误差/%	测量值	相对误差/%	测量值	相对误差/%	测量值	相对误差/%	测量值	相对误差/%
100	100	0	100	0	100	0			100	0
200	200	0	200	0	200	0			199	-0.50
500	500	0	500	0	500	0	500	0	500	0
1 000	1 000	0	1 000	0	1 000	0	1 000	0	1 000	0
2 000	2 000	0	1 998	-0.10	2 000	0	2 004	0.20	2 002	0.10
5 000	5 000	0			5 000	0	4 950	-1.00		
10 000	10 000	0								
11 000	11 013	0.12								
12 000	12 121	1.00								
15 000	15 038	0.25								
20 000	20 000	0								

表3 “小米9”信号发生器测试结果

频率真值/ Hz	正弦波		方波		三角波		洛伦兹脉冲		辛克森脉冲	
	测量值	相对 误差/%	测量值	相对 误差/%	测量值	相对 误差/%	测量值	相对 误差/%	测量值	相对 误差/%
100	100	0	100	0	100	0	100	0	100	0
200	200	0	200	0	200	0	200	0	200	0
500	500	0	500	0	500	0	500	0	500	0
1 000	1 000	0	1 000	0	1 000	0	1 000	0	1 000	0
2 000	2 000	0	2 000	0	2 000	0	2 000	0	2 000	0
5 000	4 999	-0.02			5 000	0				
10 000	10 000	0								
11 000	10 998	-0.02								
12 000	11 998	-0.02								
15 000	15 000	0								
20 000	19 996	-0.02								

可见,信号发生器可在“华为畅享 9e”手机上产生 100 Hz~20 kHz 正弦波、100 Hz~2 kHz 方波、100 Hz~5 kHz 三角波;500 Hz~5 kHz 洛伦兹脉冲和 100 Hz~2 kHz 辛克森脉冲,在产生 100 Hz~10 kHz 的正弦波时频率相对误差为 0%,产生其它波形的频率相对误差 $\leq 1\%$ 。信号发生器可通过“小米 9”手机产生 100 Hz~2 kHz 的正弦波、方波、三角波、洛伦兹脉冲与辛克森脉冲,在误差低于 0.02%的前提下产生 5~20 kHz 的正弦波。需要注意本测量结果仅针对测试用的手机,波形实际输出范围和失真程度由具体使用的手机决定。

手机不是专业信号发生设备,其音频功放模块有一个通带为 20 Hz~20 kHz 的带通滤波器,除了正弦波以外的波形信号均带有谐波成分,在频率为 1~2 kHz 时,可以把主要谐波成分也发送出去,此时波形失真度较低,发射频率逐渐提高或降低时,信号谐波成分会被带通滤波器滤除,无法传输到接收端,所以接收端收到的波形会发生失真。

3.2 频谱分析仪测试

本部分的测试采用两台手机,一台手机使用本小程序的信号发生器,利用扬声器以音频的方式输出信号,另一台使用频谱分析功能,通过手机的麦克风录制外部声音并进行频谱分析。信号发生使用的手机为“小米 9”,频谱分析使用“荣耀 V10”手机,测试结果如图 6 所示。

正弦波如图 6(a)所示,峰值频率显示正确,波形符合理论;2 kHz 方波峰值频率显示有 1 Hz 的误差,方波中仅含有奇数倍谐波,二次谐波频率应为 6 kHz,与图 6(b)中的频谱分析结果对应;三角波如图 6(c)所示,可见频谱中出现了偶数倍谐波,但奇数倍谐波更为明显,符合理论;随机噪声如图 6(d)所示,理论上频谱应该布满整个分析频率,但手机不是专业设备,在音频输出以及录音时会通过带通滤波器,所以波形呈现中间高,两边低的特征;对于图 6(e)和(f),因为洛伦兹脉冲与辛克森脉冲同时存在幅

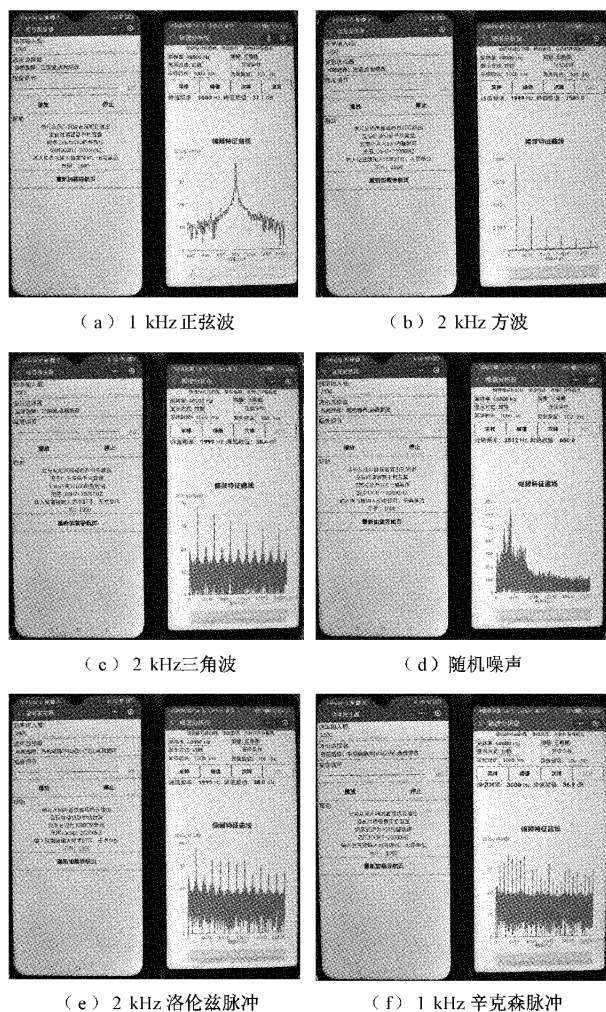


图6 频谱分析仪测试结果

度相当的偶数倍与奇数倍谐波,所以无法通过峰值频率判断信号的频率。

需要注意本测量结果仅针对测试用的手机,系统性能由具体使用的手机决定。

4 结 论

为解决高校电子信息类专业通信类课程实验教学时长受限、地点受限等问题,本文基于微信小程序平台,开发可以运行在手机上的信号发生器与频谱分析仪,大大节约了硬件成本,提升了通信实验的即时性与便捷性。试验测试表明,信号发生器可在“华为畅享 9e”手机上产生 100 Hz~20 kHz 正弦波、100 Hz~2 kHz 方波、100 Hz~5 kHz 三角波、500 Hz~5 kHz 洛伦兹脉冲和 100 Hz~2 kHz 辛克森脉冲,共 6 种常用的信号,在产生 100 Hz~10 kHz 的正弦波时频率相对误差为 0%,产生其它波形的频率相对误差 $\leq 1\%$ 。信号发生器可通过“小米 9”手机产生 100 Hz~2 kHz 的正弦波、方波、三角波、洛伦兹脉冲与辛克森脉冲,在误差低于 0.02%的前提下产生 5~20 kHz 的正弦波。频谱分析模块可对手机外部的声音信号采样,并利用快速傅里叶变换做频谱分析,分析结果符合理论。

然而,由于手机设备的音频产生模块以及录音模块非专业设备,其只能分析在 20 Hz~20 kHz 范围内的信号,所以对于更高端的应用场景,还应该使用专业的仪器设备。

参考文献

- [1] 刘广武,周淑红,王志琼,等. 高校实验教学示范中心信息化体系建设[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(1): 165-169.
- [2] 段祝庚,陈丰田,岳雄,等. 虚实结合无人机摄影测量实验教学改革与效果评价[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(10): 201-205.
- [3] 中国互联网络信息中心. 中国互联网络发展状况统计报告第 48 次[R]. 北京:中国互联网络信息中心, 2021.
- [4] 李逸璇. 基于德育渗透的高中英语微信小程序开发与应用实践[D]. 北京:中央民族大学, 2021.
- [5] 许静,蔡斌,黄响昉,等. 微信小程序辅助的过程考核评价体系在生物工程专业“无机化学实验”课程中的应用与实践[J]. 生物工程学报, 2021, 37(12): 4430-4438.
- [6] 秦淑芳,王岗,陶爱峰,等. 小程序和二维码在海岸动力学实验教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(7): 154-157.
- [7] 佟林金,陈曲扬,陈薇薇,等. 基于微信小程序的大
- 学物理实验移动学习平台的设计[J]. 大学物理实验, 2021, 34(3): 115-118.
- [8] 王乐,王慧,谷迎松,等. 面向振动理论类课程课堂教学的互动虚拟实验平台[C]. 第十四届全国振动理论及应用学术会议(NVTA2021)摘要集, 2021: 21.
- [9] 万乐玲,行鸿彦. 基于微信小程序的人体尺寸测量系统[J]. 电子测量技术, 2021, 44(22): 141-147.
- [10] 董傲通,文俊浩. 基于小程序·云开发的实验室设备管理系统的设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(10): 282-284, 288.
- [11] 黄积雄,欧少敏,高笛,等. 智能教室管理系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2): 147-150.
- [12] ALAN V O, ALAN S W, HAMID N. 信号与系统[M]. 第二版. 刘树棠译. 北京:电子工业出版社, 2013. 339-340.
- [13] 微信官方. 小程序开发指南[EB/OL]. 微信官方文档·小程序. (2021-04-28) [2021-5-18]. <https://developers.weixin.qq.com/miniprogram/dev/framework>.
- [14] 熊德智,肖宇,胡军华,等. 矩形窗三点插值傅里叶变换高精度频率估计方法[J/OL]. 中国测试: 1-6 [2022-10-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20220627.1137.002.html>.
- [15] 徐从裕,胡宗久,杨雅茹,等. 基于 FFT 及 IFFT 的超声波相位差检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 180-186.
- [16] COOLEY J W, TURKEY J W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series [J]. Mathematics of Computation, 1965, 19 (90): 297-301.
- [17] FRIGO M, JOHNSON S G. FFTW: An adaptive software architecture for the FFT[J]. Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1998, 3: 1381-1384.
- [18] 李双双. 图表工具平台的设计与实现[D]. 长春:吉林大学, 2021.

作者简介

谢家兴,博士,讲师,主要研究方向为电子科学与技术。

E-mail: xjx1998@scau.edu.cn

刘洪山(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为电子科学与技术。

E-mail: hugoliu@scau.edu.cn