DOI:10.19789/j.1004-9398.2023.06.014
文献引用:胡敬安,徐法艳,方敬.利用Excel提升信号处理类硬件实验品质的研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2023,44(6):99-105.
HU J A, XU F Y, FANG J. Using Excel to improve the quality of hardware experiments of signal processing[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2023,44(6):99-105.

利用Excel提升信号处理类硬件实验品质的研究*

胡敬安[1**]，徐法艳[2]，方　敬[1]

(1. 山东师范大学物理与电子科学学院，山东 济南　250014；
2. 山东省教育科学研究院，山东 济南　250000)

摘要:仿真实验是电子类专业实验课程中的研究热点,但硬件实验仍是不可或缺的,如何提高硬件实验的品质依然具有重要意义。本文介绍实验教学中利用Excel软件对硬件实验数据进行处理,扩展了硬件实验内容,提升了硬件实验教学品质,填补了当前信号处理类硬件实验研究方面的不足。

关键词:Excel;硬件实验;信号处理
中图分类号:TN911.6　　**文献标识码**:A

Using Excel to improve the quality of hardware experiments of signal processing*

HU Jing'an[1**], XU Fayan[2], FANG Jing[1]

(1. School of Physics and Electronics of Shandong Normal University, Jinan Shandong　250014;
2. Shandong Provincial Institute of Education Sciences, Jinan Shandong　250002)

Abstract: Simulation experiment is the hot issues in the experiment course of electronic specialty, but hardware experiment is still indispensable, and how to improve the quality of hardware experiment is still of great significance. This paper introduces some application research of Excel in the hardware experiment in the experiment teaching, and points out that the content of hardware experiment can be expanded and the quality of hardware experiment teaching can be improved by using Excel to process the data of hardware experiment. This paper also makes up the insufficiencies of current research on the signal processing hardware experiment.

Keywords: Excel; hardware experiment; signal processing
CLC: TN911.6　　**DC**: A

0　引　言

电子及信号处理类的实验可分为硬件实验和仿真实验2类,后者在实验内容的可设计性和灵活性上相对于硬件实验拥有不可比拟的优势,因而受到广泛重视和研究。目前关于电子类专业仿真实验的研究很多:王桂忠[1]介绍了虚拟仪器的概念和图形化编程软件开发系统LabView的特点,以及基

收稿日期:2022-11-18
* 山东省教育科学"十三五"规划2020年度课题(2020ZC426);山东师范大学2021年度本科教学改革立项项目(2021BJ059);山东师范大学2021年度"专创融合"特色示范课程建设项目(SDNU2021ZCRH019);山东师范大学第五批实验教学改革项目(SYJG050212)
** 通信作者:tchhja@163.com

于LabView开发的虚拟仿真实验平台的部分实验内容;任峻和张红燕[2]及程如岐等[3]研究了硬件实验与仿真实验相结合的通信原理实验方案,前者将通信原理实验分为基础硬件实验和综合性仿真实验2个部分,后者则是将每个实验项目均分为硬件与仿真实验2个部分,强调对比分析,二者均给出了基于System View的仿真实验设计实例;杨敏和陶家祥[4]在保留部分硬件实验的基础上增加了基于Matlab的仿真实验,以此解决硬件实验误差偏大、实验内容扩展性不强等问题,并给出了一个具体的信号与系统实验体系;田莹等[5]利用Matlab的可视化仿真工具Simulink进行仿真实验,使用Simulink功能模块、调用M函数或编写S函数等开发仿真实验所需的虚拟仪器库,按各实验要求将虚拟仪器连接成相应的实验系统。另外也有研究对不同仿真工具的特点进行对比,刘晓山等[6]对比了LabView和Matlab在信号与系统仿真实验中的优劣。近年也有不少研究引入其他工具软件,李志与陈入云[7]将Python引入到数字图像实验中,介绍了Python相对Matlab的优点及可能用到的扩展库,并介绍了其实验内容安排和可用的Python函数;韦仙等[8]详细介绍了如何利用Python对RLC串联电路的暂态过程进行模拟仿真,同时指出了利用Python进行仿真的优势;郭琳和赵睿[9]则基于Matlab和Python混合编程技术开发了一个数字信号处理教学的辅助软件,既充分发挥了Matlab强大的信号仿真能力,又扩展一些基于Python的实验案例。部分实验仪器厂家也适时推出了在线虚拟仿真实验平台,仿真实验的研究大有全面取代硬件实验之势。

仿真实验受到广泛重视和研究的原因在于实验内容的可设计性和灵活性上相对于硬件实验拥有不可比拟的优势,同时还能更好地帮助学生掌握相关原理和理论,并提高其分析设计能力。虽然仿真实验有诸多优点,但仿真系统毕竟不是真实的物理系统,且实验的目的不仅帮助学生掌握和理解实验相关的结论和原理,还训练学生对常见仪器的熟练使用能力。因此,硬件实验仍具有不可替代性,除了研究仿真实验的教学以弥补硬件实验的不足以外,研究如何在现有硬件平台的基础上提升硬件实验的品质也有其必要性,另外本文的研究也扩展了硬件实验内容,解决了实验平台功能与教学需求脱节的问题。

与LabView、Matlab以及Python这些软件相比,Excel在使用的便捷性和掌握的难易程度方面更有优势。Excel是一款电子表格软件,出色的数据处理和图表功能使其大量应用于财务、会计及统计分析中。工业领域也大量应用其数据处理功能,如多维气相色谱分析数据的自动处理[10],化工计算中的数学问题[11],利用精馏分离液体混合物时进行精馏塔理论板数的计算[12],工业$MgCl_2$化验数据的处理[13]等。实验教学中Excel也被广泛用于实验数据的处理,特别是利用其图表功能取代手工绘图以提升实验效果,如生物化学检验实验中Levey-Jennings质控图的绘制[14],乙醇-水溶液常压相平衡曲线的拟合及精馏塔梯级图的绘制[15],夫兰克-赫兹实验中极板电流与加速电压的关系曲线[16-17]等。不仅如此,还可利用Excel对实验数据进行直线或曲线拟合,如分析化学磺基水杨酸铁(III)配合物的组成及稳定常数测定实验中的中心体摩尔分数-吸光度图[18],杨氏模量实验中平均标尺刻度与砝码质量关系[19],光电效应与普朗克常数测定实验中截止电压和入射光频率关系[20]的直线拟合,稳态平板法测导热系数实验中散热平板温度随时间的变动曲线的拟合[21]等。除此之外,也有利用Excel的VBA编程功能进行实验数据处理的研究[22]。由于Excel是常用的办公软件,甚至可以引入到中学阶段实验数据的处理中,如在高中物理实验中的应用研究[23]。

但Excel在电子类专业实验课程中的应用研究较少,目前能够检索到的研究论文仅有几篇而已。翁硕[24]研究利用Excel对实验数据进行简单的数值运算;江长双等[25]和王建平[26]研究将实验结果的理论公式利用Excel进行波形绘制,并与实际实验结果或仿真实验结果进行对比;严华刚等[27]则是利用Excel的VBA编程功能实现对实验数据的曲线拟合。近年也有利用Python对实验数据进行处理的研究[28-29]。不管是利用Excel还是Python,这些研究仍然涉及对实验数据的辅助运算及基于这些数据图形的生成与拟合,没有涉及对信号的处理与分析。对信号处理类实验而言,其主要内容一般是对信号波形的变换、观察、分析和对比,这似乎与Excel的用途相去甚远,毕竟Excel作为一个电子表格软件其主要用途是数值、数据的分析、存储、运算、处理和图表展示,因此目前没有相关的研究。但其实信号波形也是数据的一种,在当今这个大数据的时代,一切皆为数据。将信号波形数字化存储后便可以利用Excel的数据处理功能和图表生成能力来对

波形进行变换、分析和展示,以此提高信号处理类硬件实验的品质,通过教学实践表明,Excel的数据处理及图表生成功能在弥补信号处理类硬件实验平台的不足方面大有可为。

本文研究将电子表格软件Excel引入到信号处理类课程的硬件实验中,利用Excel的数值运算和图表功能实现信号波形的变换和运算,不但可以直观展示硬件平台无法直观展示的结果,还可以突破硬件平台功能的限制,拓展实验内容,提升实验的深度。

1　Excel在信号处理类实验中的应用研究

现在带有USB口的数字存储示波器已被广泛应用,而且部分实验平台本身就具备波形显示及存储功能[30]。因此,可将示波器显示波形的数据存储至U盘等外部存储设备上,视实验内容利用Excel对波形数据进行必要的运算处理,然后利用其散点图功能对处理后的波形数据进行演示、对比和分析。通过将Excel与硬件平台相结合,既可以弥补硬件平台波形显示能力不足的缺陷,又可以利用Excel的数据处理功能扩展实验的内容,提升实验品质,甚至可以方便灵活地取代部分硬件或仿真实验。本文在硬件实验的教学实践中对Excel的主要应用加以介绍。

1.1　展示实验结果,提升实验效果

一般验证性实验需要通过电平或频率等参量的测量来验证结论,但部分实验中这些参量的测量不可能准确进行,容易引入较大误差,以至影响结论,并且单纯利用测量数据验证结论的方法也不直观,而利用Excel则可以用直观的方式将结论展示出来。以零输入响应、零状态响应及全响应实验为例,示波器显示的全响应及零状态响应波形如图1所示。可见2个波形几乎完全相同,要验证全响应为零输入响应和零状态响应的叠加,传统的方法是测量波形在一些特定时刻的电平值再加以对比,但结果不直观,且各波形在时间轴上存在相对位置偏移导致测量结果存在较大误差。而在Excel中根据所采集的波形数据很容易判断响应的起始时刻,进而确定零状态响应和全响应波形的相对位置偏移,将全响应与零状态响应波形数据对齐后相减并生成散点图,再与输入响应波形对比即可直观地展示实验结论。

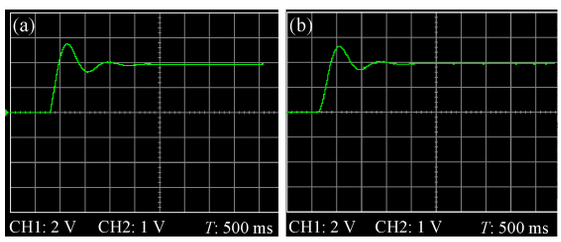


图1　全响应与零状态响应波形
(a)全响应;(b)零状态响应

零输入响应、零状态响应及全响应实验部分波形数据如表1所示,其中只列出了Excel表中第33~35行的数据。全响应与零状态响应波形数据对齐后,其中B、C和D列分别为全响应、零状态响应和零输入响应的波形数据;E列为B和C列数据的差,即全响应与零状态响应的差。E列数据是可通过在E33单元格中输入公式"=B33-C33"并复制到其以下各单元格得到。利用E和D列数据,通过Excel的散点图功能生成的零输入响应波形与响应差波形对比如图2所示。通过对比可知2个波形很相似,从而直观地得到实验结论,即全响应为零状态响应与零输入响应的叠加。诸如线性与非线性系统的输出特性和电路的波特图等,皆可利用Excel直观演示或生成,提升实验效果。

1.2　扩展实验内容,提升实验品质

受硬件平台的限制,实验内容的扩展一般难以进行,而利用Excel丰富的数据处理功能可对部分实验的内容进行扩展,从而提升实验品质。如冲激响应与阶跃响应实验,一般只能观察电路在欠阻尼和过阻尼下的响应波形,并定性分析随电路参数的变化响应波形一些参量的变化情况。若利用Excel则可扩展实验内容,如可分析阶跃响应与冲激响应的关系,验证阶跃响应为冲激响应的积分,冲激响应和阶跃响应波形如图3所示。

由于定积分为分割求和的极限值,因此,积分运算在Excel中可利用求和运算来实现。冲激响应

表1　零输入响应、零状态响应及全响应实验部分波形数据

行号	时间(A)	全响应(B)	零状态响应(C)	零输入响应(D)	响应差(E)
33	−2.38	0.039 216	−0.039 220	−0.117 650	0.078 431
34	−2.36	0.509 804	0.117 647	0.117 647	0.392 157
35	−2.34	0.980 392	0.352 941	0.431 373	0.627 451

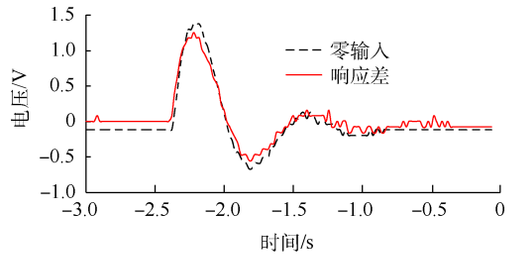


图2　零输入响应波形与响应差波形对比

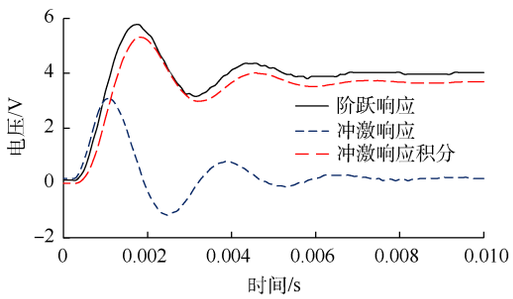


图3　冲激响应和阶跃响应波形

和阶跃响应实验部分波形数据如表2所示。对C列数据累加求和即可得冲激响应的积分波形,这可通过在D2单元格键入“=sum(c2:c2)”并复制到以下各单元格实现。公式中第1个参数“c2”为绝对引用,第2个参数“C2”为相对引用,即在D列各单元格利用公式对C列求和时,起始单元格固定为C2,而终止单元格取决于D列各单元格相对D2的行偏移。

需要说明,表2中B和C列前面若干行的数据其理论值应为0,因为此时激励尚未接入,但由于实验电路其实存在一个低电平输入,导致输出电平并不为0。如对C列冲激响应数据,此值为0.176 471 V。此数值虽然很小,但在积分(求和)时会被累积,所以应设法消除。消除方法是将D列公式更改为“=0.2×(sum(c2:c2)−c2×count(c2:c2))”,其中第2项“−c2×count(c2:c2)”的作用便是对冲激响应中的非零输出电平累积求和并去掉。公式中的参数“0.2”是将积分(求和)后的波形幅度修正至与阶跃响应波形大小相近,毕竟实验电路中的脉冲信号并非阶跃信号经微分运算所得,二者存在强度差异,再者积分(求和)时是直接进行求和,而没有先将各样值与样值间隔相乘。

1.3　对比观察多路信号,弥补示波器通道数的不足

一些实验往往需要同时显示多路信号,对比观察并分析各信号之间的关系,而一般实验室配备的都是双踪示波器。多踪示波器虽然能显示更多信号,但价格比较高,容易受实验经费的限制,且其通道数也有限。利用Excel则可方便地解决多路信号的对比观察问题。以二进制幅移键控(amplitude shift keying,2ASK)调制、解调实验为例,先利用数字示波器采集各波形数据并存储,然后用Excel的散点图进行展示,2ASK实验波形如图4所示。不管有几路信号,都可通过Excel同时显示出来以便对比分析。需要说明的是,在Excel中要对各列波形数据分别添加不同的直流分量,即加上不同的常数,然后再绘制散点图,这样可以将各路信号在不同的纵向位置进行显示,方便对比观察。

表2　冲激响应和阶跃响应实验部分波形数据

行号	时间(A)	阶跃响应(B)	冲激响应(C)	冲激响应积分(D)
2	−0.015 0	0.117 647	0.176 471	0
3	−0.014 9	0.117 647	0.176 471	0
4	−0.014 8	0.117 647	0.176 471	0
5	−0.014 7	0.117 647	0.176 471	0

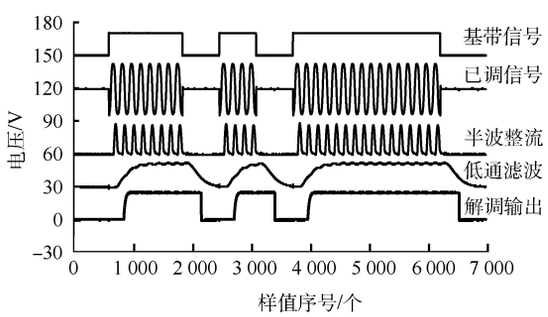


图4　二进制幅移键控(2ASK)实验波形

1.4　取代部分硬件实验或仿真实验

部分硬件实验或仿真实验可以用Excel来实现,且可以非常方便地修改实验参数并实时得到参数修改后的结果。以信号的时域变换实验为例,信号变换实验部分波形数据如表3所示。A列为时间,B和C列分别为变换前后信号的波形数据,D2与E2单元格分别存储变换“$f(at+b)$”中参数a和b的数值。设原信号$f(t)=e^{-t}\varepsilon(t)$,其中$\varepsilon(t)$为阶跃信号,则B列数据可通过在单元格B2键入公式“=if(A2<0,0,exp(−A2))”并复制到其以下各单元格得到,公式中的if函数用来实现阶跃函数的功能。C列数据是通过在单元格C2键入“= if($D$2×A2+$E$2<0,0,exp(−($D$2×A2+$E$2))”并复制到其以下各单元格得到,公式中“$D$2”和“$E$2”是对存储参数a和b单元格的绝对引用。

表3　信号变换实验部分波形数据

行号	时间（A）	单边指数函数（B）	变换后的指数函数（C）	变换参数 a（D）	变换参数 b（E）
2	−4.00	0	0.000 911 882	−2	−1
3	−3.95	0	0.001 007 785	—	—
4	−3.90	0	0.001 113 775	—	—

注：—表示无数据。

根据表3所示B和C列数据生成的散点图，得到时域变换前后的单边指数函数波形如图5所示。

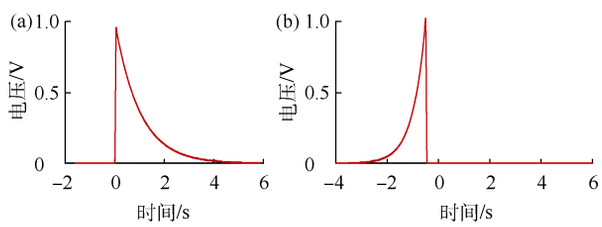


图5　时域变换前后的单边指数函数
（a）原信号波形；（b）变换后的波形

改变表3中D2和E2单元格参数 a 和 b 的数值，可实时得到参数改变后的波形，帮助学生理解信号的反转、平移及伸缩变换对波形的影响。因此在参数改变后波形的实时展示方面，Excel的便利性是硬件实验和仿真实验无法比拟的。

再如方波信号的分解与合成实验，其中谐波合成部分也可用Excel实现。方波信号的傅立叶级数为

$$f(t)=\frac{4}{\pi}\left[\sin(\Omega t)+\frac{1}{3}\sin(3\Omega t)+\frac{1}{5}\sin(5\Omega t)+\cdots\right]。$$

方波合成实验部分波形数据如表4所示。A列为时间，B至F列分别为1、3、5、7及9次谐波的波形数据，其初相位由第3行对应单元格给出。如D列5次谐波数据是通过在单元格D4键入“=SIN(5×A4+$D$3)”并复制到其以下行得到，其中“$D$3”是对存储初相位的单元格D3的绝对引用。G列为合成波形的数据，合成时各谐波的加权系数由第2行数值的倒数给出，G列数据的产生方法是在G4单元格输入公式“=SUMPRODUCT(B4:F4,1/$B$2:$F$2)”并复制到其下各单元格，其中“1/$B$2:$F$2”是对第2行的参数取倒数，SUMPRODUCT函数的功能是对两数组对应元素相乘后求和。选中A和G列数据后可生成其散点图，合成波形如图6所示。由于各次谐波初相位不一致导致合成波形产生了失真，修改第2和3行的参数值可实时看到谐波幅度和初相位的改变对合成波形的影响。

2　将Excel引入硬件实验的优点

利用Excel对硬件实验得到的波形数据进行处理和展示，解决了很多硬件实验的缺陷问题，相比于传统的硬件实验和仿真实验，引入Excel后的硬件实验具有如下优点：

（1）实验结论的展示或分析更直观。仿真实验因其灵活性相较硬件实验更适合设计性实验，而硬件实验更适合于验证性实验，毕竟硬件实验平台是真实的物理系统。通过Excel可以将原本需要数据分析才能得到的结论用直观的波形对比将结论展示出来，更容易被学生理解和接受，对结论的分析也方便。

（2）突破了硬件平台功能的制约，让实验更具深度。由于实验平台提供的功能在设计之初便已固定，要扩展或重新设计实验内容不太方便，甚至完全没有可行性，利用Excel的数据处理和运算功能可以不受硬件平台的制约，增添实验内容，使实验更具深度性，提升实验的品质。

（3）提高学生的参与度，增加实验的趣味性。传统的硬件实验特别是验证性实验，实验内容和过程都是固定的，是流程化的实验，枯燥乏味。通过引入Excel，学生可以利用其数据处理和运算功能对自己的一些疑问进行验证或分析，从而参与实验过程的设计，让实验过程变得有趣，化被动学习为主动学习。

（4）Excel比各类仿真工具容易掌握，不受专业教学计划的制约。虽然一般电子类专业的教学计划都会有常用仿真工具使用的相关课程，但这些课程安排往往比较靠后，而Excel作为常用的办公软件，与Matlab、LabView、SystemView及近年开始被应用的Python这些仿真软件和工具相比更容易掌握，且Excel无需编程，因此不受专业教学计划安排的制约。

不仅如此，Excel与仿真软件之间也是可以互相传送数据甚至进行功能调用的：任杉等[31]给出一个

表4 方波合成实验部分波形数据

行号	时间(A)	基波(B)	3次谐波(C)	5次谐波(D)	7次谐波(E)	9次谐波(F)	合成波形(G)	H
2	—	1	3	5	7	9	—	谐波幅度倒数
3	—	0	−0.196 35	−0.392 70	−0.589 05	−0.785 40	—	谐波初相位
4	−6.500	−0.215 12	−0.749 16	−0.995 58	−0.859 78	−0.393 89	−0.830 55	—
5	−6.475	−0.190 64	−0.697 42	−0.976 11	−0.935 56	−0.589 03	−0.817 44	—
6	−6.450	−0.166 04	−0.641 76	−0.941 41	−0.982 76	−0.754 48	−0.792 47	—

注:—表示无数据。

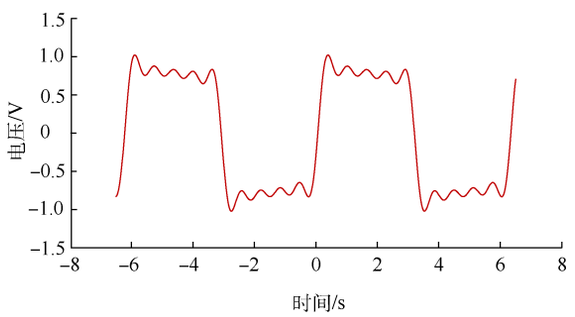


图6 合成的方波波形

利用Excel link从Excel向Matlab传送数据的实例;高世鹰[32]给出了在LabView中利用ActiveX技术建立和读写Excel报表的流程。因此,完全有可能以Excel为中介将仿真系统与硬件平台结合起来设计真正的“软硬”结合的实验,这有待于进一步研究。

3 教学实施的一些建议

将Excel引入到硬件实验的波形处理中,是对原有硬件实验内容的巨大改变,在教学实施中要注意以下几点:

(1)做好教学规划,确定仿真实验项目和硬件实验项目,结合实验教学大纲的要求及每个硬件实验项目的实验目的,确定哪些信号波形需要利用Excel进行处理、如何处理以及展示哪些结果。最好能编写新的实验讲义,纳入需要利用Excel进行处理的实验内容。

(2)专门用1个课时提前讲解实验需要用到的Excel功能,主要讲解内容是一些基本操作,如公式的插入和复制、散点图的生成、有关设置(如通过设置坐标轴格式选择波形显示范围等)以及单元格的相对引用与绝对引用,数据的对齐以及常用的函数公式等。每个实验要用到的函数也可在实验时进行讲解,同时告知学生采用哪路信号作为示波器的触发源以尽量避免人工对齐数据。采用Excel处理数据使得学生在实验室的主要任务是采集数据,可以将部分实验合并,可节省足够的实验课时用以讲解Excel的使用,对实验项目的安排影响不大。

(3)在验证性实验中也可引入探究分析性的内容,提醒学生针对自己的疑问,可以利用Excel的数据处理和运算功能自行验证、分析,化验证性实验为探究性实验。如冲激响应和阶跃响应实验中,可将冲激响应直接积分后的结果与阶跃响应相比,二者波形的差异产生的原因有哪些,如何解决等。

(4)若条件允许,可在硬件实验室中配备计算机设备并安装Excel,方便学生采集硬件实验波形,并在计算机中对波形数据进行处理,存储相关结果。这样学生在实验课堂中即可完整地完成实验,也方便学生对实验中的一些困惑能及时进行分析验证。

4 结束语

本文介绍了Excel在信号处理类硬件实验中应用的一些初步研究和探索,创新性地将Excel引入到信号处理类硬件实验中,同时分析了引入Excel后的硬件实验相比于仿真实验和传统的硬件实验所具有的优点,并给出了相关的教学建议。结果表明,利用Excel对实验中的信号进行处理、变换和运算,能更直观地展示实验结论,突破硬件平台功能的限制,拓展实验内容,提升实验的深度,有效提高硬件实验的品质。

参 考 文 献

[1] 王桂忠.基于LabVIEW的虚拟仿真实验平台的设计[D].青岛:中国海洋大学,2009:21-29.

[2] 任峻,张红燕.运用虚拟仿真实验改革通信原理实验教学[J].实验技术与管理,2014,31(3):95-97.

[3] 程如岐,鞠兰,高艺.“通信原理”软硬件相结合的实验教学方法探索[J].实验室科学,2012,12(5):24-26.

[4] 杨敏,陶家祥.基于MATLAB的信号与系统实验教学改革[J].信息通信,2016(6):280-282.

[5] 田莹,卢金玉,刘宴涛.基于Matlab/Simulink的通信原理虚拟仿真实验教学方法研究[J].现代电子技术,2015,38(14):28-31.
[6] 刘晓山,付国兰,刘正奇,等.LabVIEW和MATLAB在“信号与系统实验”课程中的应用比较[J].内蒙古师范大学学报(教育科学版),2017,30(11):94-96.
[7] 李志,陈入云.Python在数字图像处理课程教学中的应用探索[J].创新创业理论研究与实践,2022(10):11-13.
[8] 韦仙,冯中营,杨文锦.基于Python对方波激励下的RLC串联电路暂态过程实验的模拟仿真[J].物理通报,2022(6):126-130.
[9] 郭琳,赵睿.基于Python和Matlab的《数字信号处理》教学辅助软件设计[J].长江信息通信,2022,35(5):232-234.
[10] 张铁柱,肖景娴.基于Excel的小型多维气相色谱分析数据处理系统[J].广州化工,2018,46(19):93-94+97.
[11] 赵宏策,高晓宁.EXCEL在化工数值计算中的应用[J].山东化工,2019,48(4):123-126.
[12] 刘景梅,马凤云,王德民.用Excel进行精馏塔理论板数的计算[J].山东化工,2018,47(19):102-106.
[13] 孙鹏,马西忠.Excel在工业氯化镁产品检测中的应用[J].化学工程师,2016(2):23-25+55.
[14] 王治西,孙彦坪.Microsoft Excel 2013在生物化学检验实验数据处理中的应用[J].实验与检验医学,2017,35(6):958-960.
[15] 倪化境.利用Excel软件处理化工原理精馏实验数据[J].广州化工,2022,50(18):252-255.
[16] 吴小娟.应用Excel处理夫兰克赫兹实验数据[J].大学物理实验,2015,28(2):103-105.
[17] 胥佳颖,马鹏飞.两种常用软件在夫兰克-赫兹实验数据处理中的应用与比较[J].大学物理实验,2020,33(6):91-95.
[18] 刘俊桃,陈晓培,吴金松,等.Excel在分析化学实验数据处理中的应用[J].云南化工,2018,45(9):224-226.
[19] 吴小娟.最小二乘法在杨氏模量实验中的应用[J].大学物理实验,2017,30(6):119-120.
[20] 刘利娜,郭广磊.借助Excel程序处理光电效应及普朗克常数的测定实验数据[J].大学物理实验,2018,31(2):106-108.
[21] 骆敏,余观夏,林杨帆.利用Excel处理稳态法测定导热系数的实验数据[J].大学物理实验,2019,32(3):120-124.
[22] 于红,郭梓骞,宫礼坤,等.基于“宏”的大学物理实验数据处理方法[J].实验室研究与探索,2020,39(9):142-147.
[23] 徐玲.Excel在高中物理实验数据处理中的应用研究[D].桂林:广西师范大学,2018:23-42.
[24] 翁硕.Multisim和Excel在模拟电子线路教学中的应用[J].科技信息,2014(12):207-208+210.
[25] 江长双,丁玮蓉,钟健松,等.Excel环境下正弦信号源RLC串联电路的模拟[J].大学物理实验,2012,25(2):59-62.
[26] 王建平.基于Multisim与Excel的二极管限幅器仿真实验[J].实验技术与管理,2017,34(1):143-145.
[27] 严华刚,李海云,张智河,等.RC暂态电路实验的一个简易改进[J].物理通报,2014(12):72-75.
[28] 杨俊秀,赵文来,姚青,等.高频电子线路实验数据的Python处理分析[J].实验技术与管理,2021,38(10):227-231.
[29] 赵文来,杨俊秀,陈秋妹.Python在电路实验数据处理中的应用[J].电气电子教学学报,2022,44(4):159-161.
[30] TD-SAS+信号与系统实验教程[M].西安:西安唐都科教仪器公司,2015.
[31] 任杉,赵欣,韩青.基于Matlab和Excel数字信号的传送与分析[J].红河学院学报,2012,10(4):26-28.
[32] 高世鹰.基于虚拟仪器技术的雷达起伏回波模拟和检测概率测试[D].绵阳:中国工程物理研究院,2007:46-50.

(责任编辑:兰丽丽)