

面向“电气测量技术”实验教学的实践性探索

曹建安 孔忻 白洁 汤晓君 杨爽

(西安交通大学电气工程学院, 咸宁 710049)

摘要:以应用为目标的“电气测量技术”课程,是多门课程的知识综合与贯通,具有实践操作性强等特点。该课程在实践教学环节中从制作罗氏线圈、设计调理电路,到进行大电流检测和数据采集与处理的全过程,均由学生自主完成,实现学生实践能力的培养过程;实验中根据波形噪声与幅值误差,完成参数调试与罗氏线圈的模型分析,实现学生分析能力的提高。实践表明,该实践活动能使学生掌握一个完整电气测量系统;提高学生的实践能力、分析和解决问题的能力,满足辅助理论教学的目标。

关键词:测控技术与仪器;电气测量技术;实践性教学

中图分类号:G426

文献标识码:A

文章编号:1008-0686(2023)01-0157-05

Practical Exploration for Experimental Teaching of Electrical Measuring Technology

CAO Jianan KONG Xin Bai Jie TANG Xiaojun YANG Shuang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The application-oriented Electrical Measurement Technology course is the knowledge synthesis and penetration of multiple courses, and has the characteristics of strong practical operation. In the practical teaching process, the whole steps, from making Rogowski coils, conditioning circuits designing, to large current detection and data acquisition processing, are all completed by students independently, which reaches the training objectives of students' practical ability. In the experiment, due to the waveform noise and amplitude error, the parameter debugging and the model analysis of the Rogowski coil are completed, which improves the analysis ability of the students. This method shows that the practical teaching enables students to master a complete electrical measurement system, improves their practical ability, ability to analyze and solve problems, and meets the goal of auxiliary theory teaching.

Key words: measure-control technology and instruments; electrical measuring technology; practical teaching

作为测控技术与仪器专业核心课程之一的“电气测量技术”课程,是在已修的“传感器原理”“测控电路”“单片机原理”“模拟与数字电路”“电力电子技术”等基础课程^[1]上的综合应用与提升。该课程内容具有应用面广、知识综合能力强、涉及领域宽等特点;既要面向工程应用背景,也要面向科学研究探索。其相应的实践教学环节,既要符合电气工程的应用,也要满足信号测量流程的要求,同时还需要以提高学生的实践能力为目标。

传统的实验教学中,为了避免学生难以复现实验,大部分实践内容都被实验指导教师设计成菜单式的实验平台,如积木式机器人套件^[2];或者设计成实验复现型^[3],这些实验能够激发学生的兴趣,也能提高学生的实践能力。只是学生对这些实验

的体验都是正确的,而真正的实践应该是学生在不断纠错过程中掌握到正确的实验活动,从而提高其分析能力和实践能力。基于虚拟仪器的实验实践教学^[4-6]方法,更关注的是数据采集与信息处理,容易忽略电气工程领域的传感器、信号调理及工程环境等问题,容易形成电气工程测量技术的简单化或片面化现象。面向具体的环境和工况条件,设计合适的传感器及其信号调理才是测量技术的核心内容,而虚拟仪器只是实践教学的辅助工具。

为实验教学提供创新的自主设计和创新环境^[7]是很重要的,更重要的是要让学生自己完成整个实验流程,实现一种自主多样式的实践教学,进而激发学生的思考问题能力。

为该课程的实践教学设计了一个基于罗氏线

收稿日期:2021-06-29;修回日期:2021-11-19

基金项目:2020年西安交通大学教学改革研究与实践项目(2020-36)

第一作者:曹建安(1971—),男,博士,副教授,主要从事测控技术与仪器专业的教学与科研工作,E-mail:Caoja@mail.xjtu.edu.cn

圈检测大电流的实验,学生从自制绕制罗氏线圈开始,自己搭建调理电路,其次是配置数据采集模块,实现大电流的检测;最后进行数据的误差处理与表示,完成全部实验流程。

1 课程内容及实践教学目标

1.1 授课内容及设计

“电气测量技术”课程面向电气工程领域,旨在研究或解决电气工程中的信号检测问题;同时,该课程的讲授内容必须符合测量系统的关键技术。为此,该课程的主要内容设计如图 1 所示。

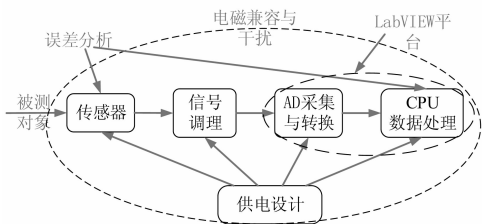


图 1 电气测量技术课程讲授内容

图 1 中,首要讲授的是被测对象的信号转换,即采用各种传感器将被测对象的物理量转换成电量;其次,将该电量信号进行滤波、幅值调理,或信号解调,得到一可供后续的 AD 转换器采集的模拟信号;再次,AD 转换器将该调理后的信号转换成相应的二进制数字信号;然后采用合适的处理器对采集的数据进行处理;最后,通过处理器对采集的数据和被测对象的物理量必须进行对比,以确定测量误差,并需要采用合理的误差处理方法进行补偿或校准。其中 AD 采集与转换和 CPU 数据处理部分,可直接借助 LabVIEW 平台的标准化软件和硬件模块(仅仅需要调整相关参数)完成。

面向电气工程领域的测量技术,工频的强电磁场干扰是引起测量误差的主要因素之一;调理电路的合理设计或高性能指标对其供电质量提出更高的要求。因此,该课程的整体内容设计如表 1 所示。

表 1 课程内容设计

序号	内容模块	具体教学内容
1	传感器与调理技术	1) 电流检测的霍尔传感器和罗氏线圈; 2) 阻容分压的 35 kV 检测与调理; 3) 应变片的信号调理技术 4) 温度检测的热电偶和热电阻传感器
2	数据采集与处理	1) AD 数据采集与转换 2) 数据处理
3	误差分析	1) 系统误差与随机误差处理 2) 测量结果的表示
4	电源管理与抗干扰	1) 不同供电模式的实现 2) 电源变换技术中的噪声抑制 3) 隔离与屏蔽技术

大电流与高电压测量是电气工程中最基本的

检测要求,其典型传感器为罗氏线圈、霍尔电流传感器,以及高压电容分压传感器。该类传感器的原理与应用成为电气测量技术课程的基本内容。电气设备的健康管理是电网可靠性的重要保障,其温度、振动或变形监测也成为重要参数。

将 LabVIEW 虚拟仪器平台模块化,成为虚拟示波器。学生经过简单的操作学习,即可用于数据采集和数据处理,然后进行误差分析与测量结果的表达。测量过程中的电源管理、滤波器设计、隔离、抗干扰与屏蔽措施等,能够有效地减少噪声,这也是提高测量准确度的重要内容。

1.2 实践教学目标

在实践教学中,学生能全面掌握一种传感器的应用,其他传感器的应用就可以举一反三。作为电气工程中电流检测的典型应用 - 罗氏线圈电流传感器,具有结构简单、易于制作、准确度较高等优点。首先从设计传感器开始培养学生的实践能力;其次通过设计调理电路,培养其分析能力和解决问题的能力;然后通过虚拟示波器模块实现数据分析与处理,深化学生对测量误差的认识;最后需要考虑强电磁干扰,采用屏蔽措施,提高大电流检测准确度,最终实现面向电气工程领域测量技术教学的目标。采用如此流程的实践教学活动将更加接近工程应用。

2 实践教学的设计

在设计实验流程中,采用罗氏线圈检测大电流的实验,首先必须了解罗氏线圈的工作原理,其次是进行线圈加工和信号调理,再次是数据采集和处理;最后还需要进行实验数据的校准与测量结果的表示。

2.1 罗氏线圈工作原理

回绕的罗氏线圈是在绝缘骨架上均匀的绕制漆包线,而骨架的截面一般为圆形,半径为 r ;被检测的电流导体一般位于罗氏线圈的几何中心,这形成了一个罗氏线圈的大半径 R ;绕制的匝数一般比较多,设为 N 。

罗氏线圈检测电流 $i(t)$ 时的感应电动势 $e(t)$ 为:

$$e(t) = -\frac{\mu_0 N r^2}{2R} \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

显然,要还原穿过落实线圈被测电流的波形,必须对罗氏线圈感应的电压 $e(t)$ 进行积分,这形成了罗氏线圈的外积分测量电流方案。如果匝数 $N = k \cdot 2\pi R$, k 为填充系数,其被测电流为:

$$i(t) = -\frac{1}{\mu_0 \cdot k \cdot \pi \cdot r^2} \int e(t) dt$$

因此,虽然每个学生绕制出来的罗氏线圈,匝数 N 不一样,线圈半径 R 不一样,但在同样被测电流条件下,其测量结果是和 R 无关的。因此,通过该罗氏线圈检测电流的实验,学生必须学会制作传感器、信号调理及数据采集与处理。

2.2 罗氏线圈的设计与加工

以视频线的外层绝缘为骨架,将漆包线用手电钻均匀的绕制,并将视频线的中心导线作为回绕线,形成了罗氏线圈,如图 2 所示。



图 2 学生加工的不同半径的罗氏线圈

由于每个学生采用的视频线长度不同,绕制匝数也不同;在绕制过程中均匀程度也有所不同,处理漆包线接头的方法也不同。这样,每个学生绕制的罗氏线圈参数不尽相同,但是都可以进行大电流的检测,且测量结果应当比较一致。

2.3 信号调理电路的参数设计与调试

采用罗氏线圈检测工频大电流时,均采用外积分电路,以消除罗氏线圈中的高频噪声。其电路如图 3 所示。

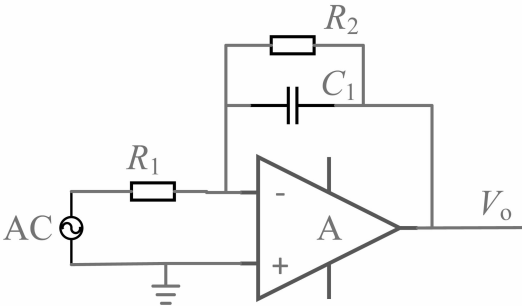


图 3 罗氏线圈的外积分调理电路

学生在设计该电路时,需要明确积分时间常数,即需要确定输入电阻和反馈电容的大小,否则可能会出现信号过弱而无法观察的情况。

2.4 数据采集的虚拟示波器模块

通过积分器出来的电流信号,经过模块化的

LabVIEW 软件控制和数据采集板卡即可完成数据采集,并通过计算机的误差处理,实现测量结果的表示与显示。

由于采集的电流基波为工频 50 Hz,采用 200 kHz 的 NI9501USB 接口的数据采集卡即可实现。

3 实施与效果

由于每个学生的实际操作能力有所不同,罗氏线圈加工和调理电路的接线可能都存在接触不良、线路接反等问题,导致无法输出预期的结果。为此,实验指导教师需要分步骤的指导,或帮学生查找问题。

3.1 实验步骤及结果

1) 罗氏线圈的输出测试

将罗氏线圈套在被测大电流导体上,用示波器观察罗氏线圈的输出端,可以看到变化的感应电压,尽管噪声很大,但能表明罗氏线圈已经正常工作,如图 4 所示。

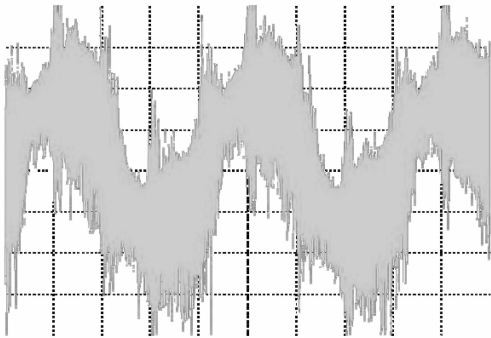


图 4 罗氏线圈输出波形

2) 调理电路的输出波形测试

通过信号源,将方波输入到调理电路中,用示波器观察调理电路的输出波形,应该能得到如图 5 所示的波形。这表明调理电路能够正常工作。

图中,方波为输入波形,经过外积分电路以后,方波变为三角波。虽然积分参数不适合罗氏线圈的积分电路,但是可以表明该调理电路能够正常工作。

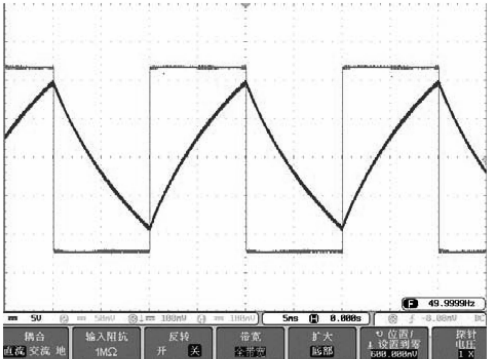


图 5 调理电路输出波形

3) 罗氏线圈检测电流输出波形测试

将罗氏线圈的输出连接到调理电路的输入端;在加载数百安培电流时,可以看到调理电路输出的正弦波形。此时已经表明罗氏线圈已经能够检测导体电流。

通过图 3 的积分器将图 4 的波形进行滤波,实现比较光滑的波形,学生将完全理解积分器实现噪声滤波功能。

4) 调整参数,改善波形输出

当积分电容为 $0.1 \mu\text{F}$ 时,通过改变调理电路的积分参数,将输入电阻从几千欧姆降到 50Ω ,可以发现图 6 输出波形已经比较光滑。这表明,罗氏线圈的外积分器参数比较合适。

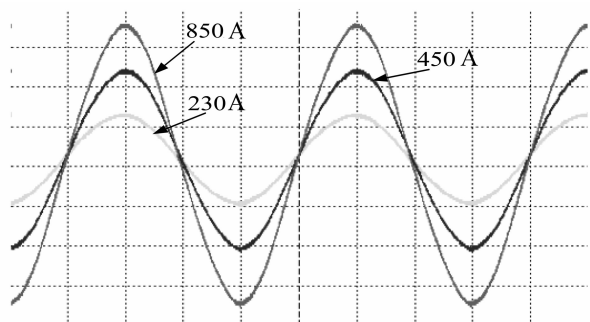


图 6 改善参数的输出波形

该图是将罗氏线圈采集了 230 A 、 450 A 和 850 A 三个不同的电流合成在一起的波形图。

在该过程中,需要学生首先要观察输出电流波形的正弦度,然后试着改变积分器的输入电阻或反馈阻容,再观察其波形失真度的变化,直至优化出合理的积分器参数。

还有,学生在完成全量程的电流检测后发现:全量程电流检测的非线性比较严重。经过指导教师的引导,让学生发现影响非线性的关键因素是运算放大器的输入阻抗太低,罗氏线圈部分电流流入到运算放大器 $\mu\text{A}741$ 中,导致测量偏差过大。学生将该放大器更换为 $\text{TLC}2652$,全量程电流检测线性度明显解决。

在这个过程中,引导学生进行发现问题、分析问题,指导他们解决问题,有助于实现学生实践能力的提高。

5) 数据采集与处理

数据采集卡从调理电路的输出端采集检测的电流波形,并显示;然后通过数据处理得出采集电流的有效值;在电流从 10 A 变化到 850 A 的范围内,给出全量程的测试结果,并进行直线拟合,如图 7 所示。

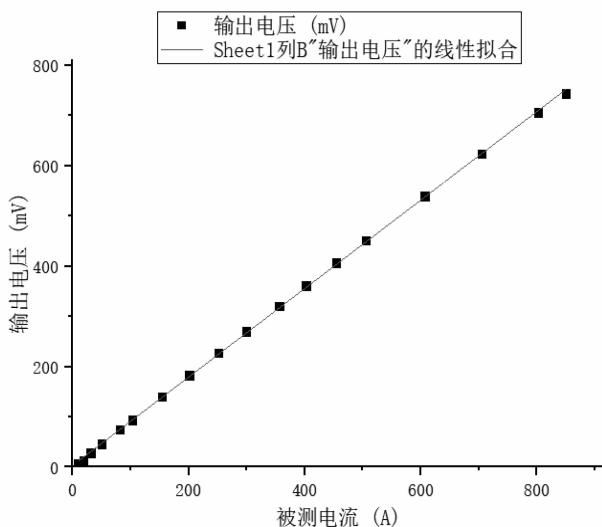


图 7 数据处理

通过线性拟合,得出方程为 $y = 0.881x + 3.190$ 。据此作为该罗氏线圈的理论曲线,使用该电流传感器,给出其检测误差。

通过该数据处理过程,学生能够加深对系统误差、随机误差的认识,并能够应用误差处理的方法提高测量准确度。

3.2 实验误差分析

该实验检测大电流的结果,可以肯定每个学生给出的误差都比较大,指导教师可以和学生一起探索影响罗氏线圈传感器误差的主要因素。

分析 1: 电流导体是否和罗氏线圈平面垂直,是否在罗氏线圈中心。该因素引起的误差,使得学生在做实验时,都会做个固定架,将导体垂直的安放在罗氏线圈的中心。

分析 2: 罗氏线圈半径 R 和 r 的影响。从公式中可以发现,匝数半径 r 越大,感应电势越大;半径 R 越大,感应电势应该越小,但是匝数 $N = k * 2\pi R$ (k 作为填充系数),这样就与 R 无关。如果采用视频同轴线,所有自制的罗氏线圈的 r 半径都一样,这样,不同学生绕制的罗氏线圈将输出同样的电压。

分析 3: 测量结果的误差分析。①不同输入阻抗的运放,其较大的偏置电流将使得积分输出的电压误差增大;②不同的积分时间常数,将导致不同的输出电压。改变积分电阻和电容,发现出输出的电流波形幅值和噪声都不一样,学生可以根据输出结果,确定一个优化的调理电路参数。

当然,还有其他因素的影响,如果有学生感兴趣,可以继续进行深入研究和探索。从整个实验过程考核,大部分学生都能够有能力、有兴趣、自主实

践,完成该实验,并能够进行罗氏线圈检测电流的理论分析和误差分析。

4 结语

综上所述,通过学生的自主实践活动,完成“电气测量技术”的实验教学,实现了自主设计与实践、实验分析与误差处理的测量全过程;加强了对“电气测量技术”的理解,掌握了电气测量技术的全流程,达到了辅助学习“电气测量技术”的目标。

参考文献

[1]曹建安,杨爽.测控技术与仪器专业教学改革思考[J].电气电子教学学报,2011,33(S1):4-5,17.
[2]王素娟,张希靓.创新型人才培养的实践课课程设计与实施[J].电气电子教学学报,2020,42(1):

159-162.
[3]张超,赵金玲,陶翀骢.综合案例设计在“传感器与测试技术”课程教学中的应用[J].电气电子教学学报,2020,42(4):139-142.
[4]董海波,廖红梅,唐守锋,等.基于专业认证的“检测技术”课程创新教育实践[J].电气电子教学学报,2019,41(4):21-24.
[5]戴巨川,杨书仪,王广斌,等.测控专业多维互动型培养体系构建与实践[J].电气电子教学学报,2017,39(3):76-79,83.
[6]杨家强,赵建勇,潘再平.“电气测试技术”研讨式实验教学方法探讨[J].电气电子教学学报,2013,35(3):66-68,74.
[7]白洁,曹建安.“电气测试技术”课程实践教学改革[J].电气电子教学学报,2014,36(5):47-48,54.
[8]马中斌.大电流发生器的研制及其测量[D].西安:西安交通大学,2012.