



基于漏磁检测的钢丝绳无损检测 实验设计及实践

肖 茜, 刘志亮*, 杨 平, 杨磊磊

(电子科技大学 机械与电气工程学院, 成都 611731)

摘要: 以科研项目为基础, 以实际工程问题为导向, 搭建了基于霍尔传感器的钢丝绳无损检测实验平台。该实验平台通过双回路励磁结构磁化钢丝绳, 利用霍尔传感器阵列检测并采集磁化后钢丝绳径向的磁场分布, 再通过信号处理技术识别出钢丝绳断丝漏磁信号, 进而判断钢丝绳的局部损伤。实验过程涉及信号“产生—传感—采集—传输—记录—处理—应用”的全过程, 构成知识闭环, 有助于学生全方位地理解课程知识体系, 激发学生的学习兴趣, 培养学生的科研能力和创新能力。

关键词: 钢丝绳; 无损检测; 科研育人; 测试信号分析与信息处理

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230010

Experiment Design and Independent Practice of Broken Wire of Steel Wire Rope Based on Magnetic Flux Leakage Detection

XIAO Qian, LIU Zhiliang*, YANG Ping, YANG Leilei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: An education experimental platform based on nondestructive testing of steel wire ropes is designed based on a research project and practical engineering problem. The steel wire rope is magnetized through the excitation mechanism, and the Hall sensor array is used to detect the radial magnetic field of the magnetized steel wire rope, then the signal processing technology is used to identify fault signature, and local flaw of the steel wire rope is finally recognized. This project involves a whole process of the signal through “generation—sensing—acquisition—transmission—recording—processing—application”, and forms a complete closed knowledge cycle. Thus, the students can understand the course knowledge system in an all-round way. It helps to stimulate students’ interest and cultivate students’ scientific research ability and innovation ability.

Key words: steel wire rope; non-destructive testing; scientific-research-based education; test system and signal processing

测试信号分析与信息处理课程是面向电子信息类和自动化类专业的一门专业基础课, 旨在建立工程测试的系统分析与处理的知识体系, 使学生具备分析和解决工程测试实际问题的理论基础和专业能力。该课程理论性强、概念抽象、工程性要求高, 实践教学平台需要覆盖课程相关知识闭环全过程, 并引入新工科背景下的前沿科技, 为学生提供全程的物理感知体验。

科教协同育人是高校人才培养的重要模式^[1],

为适应高等教育的人才培养需求, 高校应结合自身的特点和优势, 将最新科研成果及时转化为教学资源, 以科研支撑和带动教学。因此本课程将笔者“基于漏磁检测理论的钢丝绳无损检测方法”科研项目的硬件平台改造为实验教学平台应用于教学中, 并制作了教学案例。该实验教学平台通过双回路励磁结构磁化钢丝绳, 利用霍尔传感器阵列检测磁化后的钢丝绳径向磁场, 再通过信号处理技术识别出钢丝绳是否存在异常漏磁

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-09-30

基金项目: 电子科技大学研究生精品课程建设项目(JPKC20192-21); 国家重点研发计划(2018YFB1702400)。

作者简介: 肖茜(1988-), 女, 硕士, 实验师, 主要从事机电一体化方面的研究。

*通信作者: 刘志亮(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事复杂装备智能运维方面的研究。E-mail: Zhiliang_Liu@uestc.edu.cn

场,进而判断钢丝绳的局部损伤。相较于其他案例及方法^[2-3],为了将课程中抽象的问题具体化、形象化,本实验在检测原理、检测方式及信号处理等方面模拟了工业中的典型案例,并分析了信号在时域、频域及空域上的分布特征。同时,该实验过程涉及信号“产生—传感—采集—传输—记录—处理—应用”的全过程,构成知识闭环,可使学生全方位地了解课程知识结构。该案例以实际工程问题为导向,以提出问题—寻找解决方案—实验验证的思路完成教学过程,使学生了解其所学知识在科研实践中的应用,促进学以致用,培养学生的科研思维与能力^[4]。

1 钢丝绳漏磁检测原理

常用的钢丝绳损伤检测技术有电磁检测法、涡流检测法、光学检测法、计算机视觉检测法、射线检测法和声发射检测法等^[5-9]。电磁检测通常使用永磁铁、励磁线圈或它们的组合^[10-12]来磁化检测对象,再利用霍尔传感器、感应线圈和磁阻传感器^[13]等磁传感器实现漏磁检测。由于钢丝绳绝大多数采用导磁性能良好的高碳钢制成,且表面结构复杂,使得漏磁检测成为钢丝绳探伤的首选方法^[14]。

漏磁检测原理如图1所示,通过永磁铁对钢丝绳进行磁化。与空气相比,钢丝绳具有更高的磁导率,因此,当两个具有不同磁极的环形永磁铁连接在完好钢丝绳的两侧时,磁力线将限制在钢丝绳内部,如图1(a)所示。若钢丝绳出现损伤时,由于损伤位置的磁导率降低而无法维持与完好位置相同的磁感应强度,一部分磁感应线将从钢丝绳间隙泄漏并进入钢丝绳上方的空间,如图1(b)所示。因此,可以通过传感器检测漏磁信号,进而识别被检测钢丝绳的损伤位置及种类^[15]。

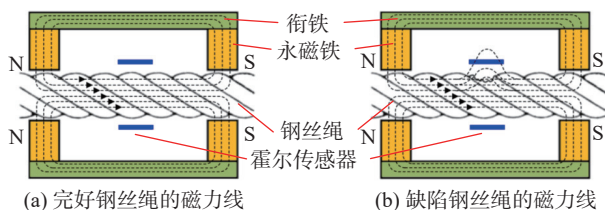


图1 漏磁检测原理图

2 钢丝绳无损检测系统硬件结构

实验教学硬件平台由漏磁传感器和上位机组

成,如图2所示。漏磁传感器穿过待检测的钢丝绳,检测钢丝绳表面的磁感应强度的大小,并通过信号传输线传输至上位机。钢丝绳断丝检测传感器为开合结构,可以将传感器套在试验台的钢丝绳上。在工程实践中,该传感器有两种工作模式:固定模式和便携模式。固定模式下将传感器安装在某个固定点,钢丝绳沿轨道移动;便携式模式下,可手动握住探测器并沿钢丝绳手动移动。在本次实验中,传感器以便携模式工作,即手持传感器沿钢丝绳移动以测量漏磁信号。

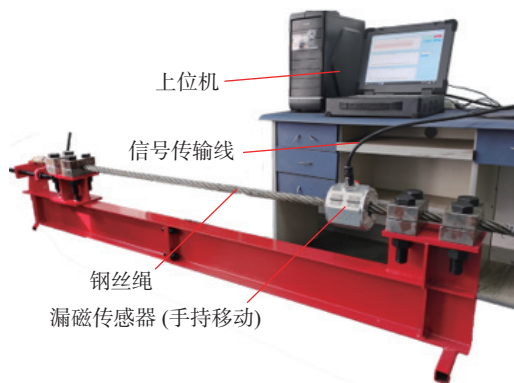


图2 钢丝绳无损检测试验台

2.1 永磁励磁回路

永磁励磁结构通常由磁铁、衔铁和钢丝绳3部分组成,形成闭合的励磁回路,从而实现钢丝绳的均匀磁化^[16]。通常有单回路励磁、双回路励磁和多回路励磁3种永磁励磁结构。单回路磁化方式通过将永磁结构单边放置,进而增加钢丝绳中磁通量,但难以对检测部位均匀磁化;多回路结构虽能够有效提升大直径钢丝绳内部磁化强度,但往往结构复杂。

本实验平台以直径26 mm的钢丝绳为检测对象,为保证能够有效磁化钢丝绳的同时避免冗余结构,钢丝绳无损检测系统硬件平台采用双回路励磁结构,其内部结构如图3所示,由外壳、霍尔传感器阵列、绝缘管套和永磁铁构成。由磁铁、衔铁、目标钢丝绳和空气组成闭合磁路,沿钢丝绳轴向建立了励磁回路,通过磁铁的矫顽力和剩磁完成磁化。衔铁采用相对磁导率 $\mu_r = 4000$ 的纯铁材料,磁铁的矫顽力 $H_c = 880 \text{ kA/m}$,剩磁 $B_r = 1.8 \text{ T}$,主要用于构成闭合磁路。当漏磁传感器沿钢丝绳轴向移动时,钢丝绳将被均匀饱和磁化。

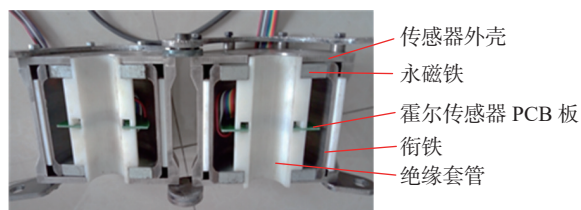


图 3 漏磁传感器内部结构图

2.2 传感器阵列

在钢丝绳产生损伤时，其周向、轴向和径向都可检测到漏磁信号。由于空气中存在一些沿半径分布不均匀的轴向漏磁，并且轴向磁感应线密度随不同的提升距离(霍尔传感器到钢丝绳表面的距离)而变化，导致与径向漏磁信号相比，轴向漏磁信号会存在严重噪声，而周向漏磁信号则较弱^[17]。因此，实验平台采用如图 4 所示的径向分布设计，在 PCB 板上安装了 16 个霍尔传感器作为传感器阵列，在漏磁传感器移动期间覆盖并扫描整个钢丝绳表面，从而检测钢丝绳径向的漏磁信号。

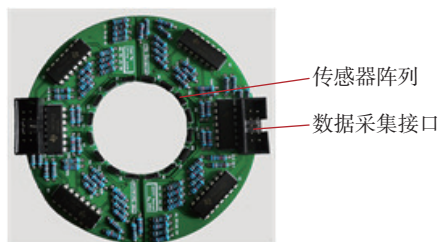


图 4 霍尔传感器阵列 PCB

本项目中使用的霍尔传感器为 UGN3503，其典型灵敏度为 13 mV/mT。该传感器在 4.5~6.0 V 的电压下工作，最大电源电流为 13 mA。由于传感器为开合结构，霍尔传感器阵列也分为两部分，即两个 PCB 各集成 8 个霍尔传感器，进而覆盖钢丝绳全圆周。

2.3 漏磁信号采集装置

实验中霍尔传感器输出模拟信号，需要经过 A/D 转换为数字信号才能传送到 PC 端。由于漏磁传感器内部使用 16 路霍尔传感器阵列，需采用多通道技术来采集和传输断丝漏磁信号。

漏磁信号采集电路采用 Altera 公司的 Cyclone IV 为主控芯片，用来完成漏磁信号的采集与传输。Cyclone IV 芯片可与通用的 A/D 或 D/A 转换器协同工作，且可同时采集和传输多通道的信号。电路板各接口如图 5 所示，搭配了 16 位的

A/D 转换器，该 A/D 转换器有 16 路通道，可一次转换 16 个霍尔传感器采集到的数据。信号采集电路采用等时间采样，采样频率为 100 Hz，采集到的信号分辨率为 16 位。

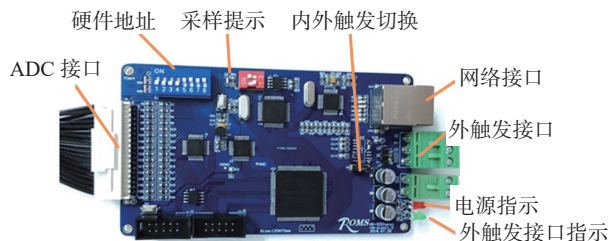


图 5 漏磁信号采集电路板

该信号采集电路采用 UDP 网络传输协议，如表 1 所示，单帧长度为 514 字节，相邻帧的采样数据保持时域连续。其中第一个字节为板卡硬件地址，地址范围为 0x00~0xFF；第二个字节为帧序，用于丢帧校验，每发送一帧数据，帧序自动加一，其值范围为 0x00~0xFF 循环。ADC 有效数据为 512 字节，每个采样点有 16 路通道，每个通道 2 个字节，其数据范围为 0~65 535，对应 0~5 V，16 个采样点一起传送。

表 1 钢丝绳漏磁信号采集电路通信协议格式说明

硬件地址	帧序	ADC有效数据共计512字节			
0x00~0xFF	0x00~0xFF	采样点1 (16通道)	采样点2 (16通道)	...	采样点16 (16通道)

3 钢丝绳损伤识别信号处理案例





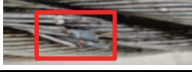
实验时学生自主设计信号处理方案及钢丝绳损伤识别算法，利用 MATLAB 编程实现对钢丝绳损伤的识别。为引导学生不断优化信号处理方案，提高识别准确率，设计了钢丝绳损伤识别信号处理教学案例。

实验时选用直径为 26 mm、长为 4 m、6 股捻制(每股 19 根钢丝线)的钢丝绳作为测试样本，该钢丝绳上有 5 个如表 2 所示的不同规格的断丝损伤，断丝宽度分别为 2、3、4、6、20 mm，断丝根数分别为 3、3、5、5、8 根。

3.1 信号处理整体流程

钢丝绳信号主要包含了断丝漏磁信号、股波噪声信号、抖动噪声信号^[17]及趋势项。从霍尔传感器阵列获得 16 路通道漏磁信号后，经 A/D 转换后传输至电脑端，就可对信号进行处理。

表 2 钢丝绳断丝损伤说明

序号	断丝图像	断丝根数	断丝宽度/mm
1		3	2
2		3	3
3		5	4
4		5	6
5		8	20

传感器检测的原始信号如图 6 所示, 16 路通道的信号由不同颜色表示, 并已经标记出 2 处抖动噪声信号和 5 处断丝漏磁信号。观察可得, 抖动噪声信号与断丝漏磁信号有明显不同, 抖动噪声信号是手持传感器采集信号时人为抖动造成, 16 路信号都有波动; 而断丝漏磁信号只存在于部分通道信号中, 这是由于钢丝绳只有部分断丝, 在励磁饱和的情况下, 只有正对断丝位置的霍尔传感器会检测到明显断丝信号。

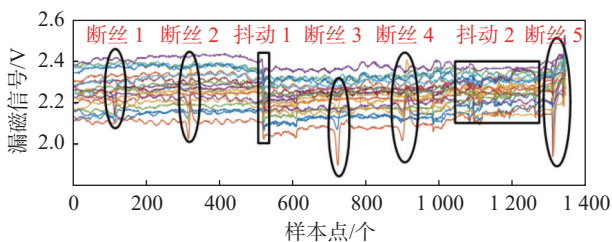


图 6 原始漏磁信号

股波信号是由钢丝绳的螺旋结构引起的, 以正弦信号的形态周期性存在于 16 路信号中。趋势项是由传感器和钢丝绳间的提高值变化而导致的, 使得 16 路通道的漏磁信号不在同一基线上。

信号预处理如图 7 所示, 首先将 16 路信号统一到同一基线从而消除趋势项, 并通过样条插值提高信号分辨率。然后对抖动噪声信号和股波信号进行降噪, 以提高信号信噪比, 最后形成二值化漏磁信号图像^[18]。

3.2 去趋势项

漏磁传感器工作在便携模式下, 在测试过程中, 手动握住探测器并沿钢丝绳匀速移动。移动过程中传感器相对于钢丝绳的晃动几乎是不可避

免的, 同时由于风力、碰撞和钢丝绳运行环境中的诸多不确定因素, 都会导致钢丝绳偏离霍尔传感器阵列的中心, 导致霍尔传感器和钢丝绳之间的距离发生变化, 使得漏磁信号变化。同时, 不同霍尔传感器间存在个体差异, 使得直接采集得到的 16 路检测信号并不在同一基准线上, 出现通道不平衡现象。

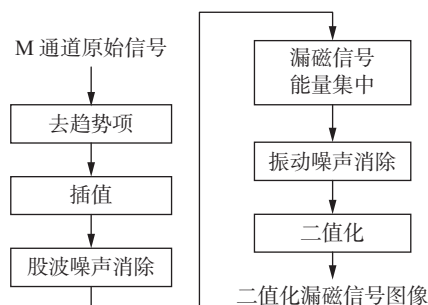


图 7 信号预处理流程图

为降低硬件成本并有效提升信号的信噪比, 采用了滑动平均法对原始信号进行均衡化, 以消除趋势项:

$$t[n] = \frac{x[n] + x[n-1] + x[n-2] + \dots + x[n-N+1]}{N} \quad (1)$$

$$y[n] = x[n] - t[n] \quad (2)$$

式中: $x[n]$ 为原始信号, $t[n]$ 是滑动平均计算的趋势, $y[n]$ 为去趋势之后输出的信号, N 代表滑动平均法的跨度。

如图 8 所示, 滑动平均处理消除了信号中存在的 不平衡现象, 将 16 路信号统一到同一基线。相较于抖动会影响所有通道信号, 由于钢丝绳断丝位置不同, 断丝信号表现为部分通道信号的显著变化。图 8 中 2 处信号表现为 16 路信号同时变化, 可与其他断丝信号进行区分, 判定其为抖动信号。

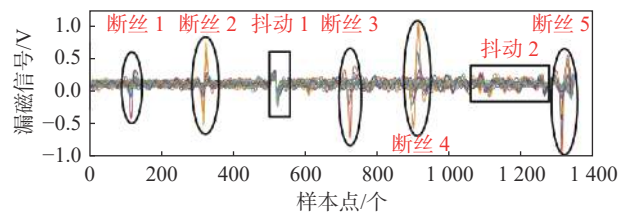


图 8 去趋势后的漏磁信号

3.3 插值

本实验平台漏磁检测传感器内部布置有 16 个霍尔检测元件, 因此在同一维度上只有 16 个样

本，直接信号成像分辨率较低，不利于断丝信号检测。实验中采用了样条插值算法将样本数量增加到 100 个，并将分辨率拓展为 100N 的漏磁图像绘制出来。如图 9 所示，图中 5 处圆点即为成像的断丝信号，而周期性的斜向条纹是成像的股波噪声^[19]，竖状条纹则是成像的抖动噪声。



图 9 插值后的漏磁图像

3.4 滤除股波漏磁信号

钢丝绳独特的捻制结构导致其表面不均匀，因此在漏磁检测中会产生股波噪声。股波噪声与断丝信号在时域和频域中都有信号重叠，若采用常用的信号处理方法对股波噪声进行降噪，会在滤除股波噪声的同时造成断丝信号能量损失，导致较弱的断丝信号消失，使得钢丝绳故障诊断出现漏报。

在漏磁图像上，断丝信号为点状，抖动信号为竖状条纹。股波噪声为周期性的斜条纹。因此，可以应用图像处理技术滤除特定方向的条纹，如采用拉普拉斯算子构造滤波器模板，找出股波噪声成像的斜条纹方向上响应最强的值，从而滤除股波噪声。

实验中分别采用了对 0°、45°、90°、135° 的条纹具有最强响应的 4 种线检测滤波器模板对股波噪声进行降噪。根据结果得出，90° 的线检测滤波器模板对股波噪声的降噪效果最好，结果如图 10 所示，几乎完全滤除了斜条纹，即股波噪声；而表征断丝的小圆点和表征抖动噪声的竖向条纹被保留下来。



图 10 样条插值后的漏磁图像

如图 11 所示，线检测滤波后的图像上断丝信号的点被放大，中间有沟道，会造成误报。膨胀处理可连接被断开的区域，填充沟道^[20]，并且对信号进行增强。

因此利用菱形结构元素对线检测滤波后的图像进行了膨胀处理，结果如图 12 所示，断丝处的沟道得到了较好的填充，形成了菱形的点状，同时抖动信号也被加强，成了竖状条纹，提升了断

丝及抖动信号的对比度。虽然两种信号同时有所增强，但与抖动噪声对比，断丝信号能量更为集中，可采用阈值方式对抖动噪声进行滤除。



图 11 线检测后断丝 4 处的漏磁图像



图 12 菱形膨胀后的漏磁图像

3.5 局部损伤检测

本实验案例通过分析、对比断丝信号和抖动信号的特点，得到两种信号的主要差别在于断丝信号只存在于部分通道，而抖动噪声存在于所有通道，同时抖动噪声的幅值往往比断丝信号的幅值要小，能量也比较分散。

因此采用二值化的方法来滤除抖动噪声。二值化通过设定的像素阈值 X 将像素点分为大于 X 和小于 X 的两部分像素群，然后将两部分像素群的灰度值分别设置为 0 和 255，整个图像就呈现出黑白两色，从而滤除图像中的抖动噪声。采用二值化处理后的检测图像如图 13 所示，白色部分即为断丝处，图像中抖动噪声信号被滤除，可直观展现断丝位置。



图 13 二值化处理后的漏磁图像

4 实验结果分析

为了验证本文提出的钢丝绳断丝检测方法的有效性，用传感器采集了另一根有 3 处断丝的钢丝绳漏磁信号，然后用本文提出的算法对信号进行处理，处理结果如图 14 所示。

首先，对如图 14(a) 所示的原始信号应用滑动平均法进行去趋势处理，然后对如图 14(b) 所示的去趋势后的信号进行样条插值，并对插值后的信号进行了成像处理，结果如图 14(c) 所示；接着，如图 14(d) 所示采用线检测成功滤除了股波噪声，

如图 14(e)所示通过菱形膨胀成功填补断丝处的沟道, 并增强了图像中的断丝信号; 最后, 选定像素阈值将图像二值化, 结果如图 14(f)所示, 成功滤除了抖动噪声, 仅保留断丝信号。检测到的断丝个数与实验中的真实情况相吻合, 证明了该方法的有效性。

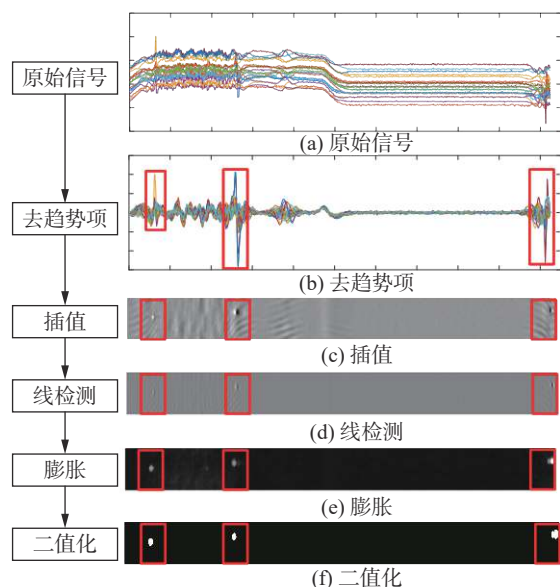


图 14 基于漏磁信号处理的钢丝绳断丝检测全过程

5 实验教学实施过程

实验前详细介绍硬件平台的组成、功能和使用方法, 实验时提供多根具有不同损伤的钢丝绳。学生两人一组, 在实验室利用实验硬件平台采集至少两根钢丝绳的漏磁信号, 不同组采集时更换含有不同损伤类型且直径不同的钢丝绳, 以增加样本的多样性。学生自主设计信号处理方案及钢丝绳损伤识别算法, 利用 MATLAB 编程实现对钢丝绳损伤的识别。

为引导学生不断优化信号处理方案, 提高识别准确率, 设计了实验教学案例。该案例首先用滑动平均法对 16 路漏磁信号进行均衡化, 使信号处于同一基准线; 接着采用样条插值提高了周向方向的分辨率, 并用线检测对插值后的图像进行处理, 实现了股波降噪; 然后对图像进行膨胀和二值化, 滤除抖动噪声, 识别断丝信号; 最后对该案例提出的信号处理方法进行实验验证。结果表明该方法对于钢丝绳的断丝检测可靠准确。

实验前对断丝数量和断丝程度的识别准确率提出要求, 并将识别结果与案例中的结果进行对

比, 引导学生不断优化信号处理方案。最后学生需要提交实验报告, 报告中需要详细阐述信号处理方案、流程、信号的特征提取与识别以及识别准确率。

6 结束语

本实验以科研项目的硬件平台为基础, 以实际工程问题为导向, 搭建了基于霍尔传感器的钢丝绳无损检测实验平台。该实验平台通过双回路励磁结构磁化钢丝绳, 利用霍尔传感器阵列检测并采集磁化后钢丝绳径向的磁场分布。实验教学中学生自行使用该硬件平台采集钢丝绳漏磁信号, 以实现钢丝绳局部损伤检测为目标, 自主设计信号处理方案。实验过程将信号“产生—传感—采集—传输—记录—处理—应用”的全过程物理化, 构成知识闭环, 将抽象概念和理论具象化为可观察和测量的变量和指标, 使学生全方位地了解课程知识结构。实验过程以设计和实现信号处理方案为主, 硬件为辅的形式展开, 有助于激发学生的学习兴趣, 培养学生解决实际工程问题的能力、科研能力和创新能力。

参考文献

- [1] 中共中央文献研究室编. 习近平关于科技创新论述摘编[M]. 北京: 中央文献出版社, 2016.
- [2] 刘琳, 姜定杰, 张登国, 等. 融合慕课与微课的翻转课堂教学模式探究: 以“测试信号分析与处理”课程为例[J]. 教育现代化, 2019, 6(54): 179-181.
- [3] 吴祥, 陈杰来, 冯伟, 等. 测试技术与信号处理课程建设和改革的研究与实践[J]. 科教文汇(中旬刊), 2015(23): 54-55.
- [4] 别锋锋, 刘雪东, 陆怡, 等. 基于案例的测试类课程模块化教学方法研究[J]. 高教学刊, 2021, 7(30): 94-97.
- [5] 杨理践, 赵东升, 耿浩, 等. 漏磁信号增强算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 176-186.
- [6] 黄松岭, 孙燕华, 康宜华, 等. 现代漏磁无损检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [7] DRUMMOND G, WATSON J F, ACARNLEY P P. Acoustic emission from wire ropes during proof load and fatigue testing[J]. NDT & E International, 2007, 40(1): 94-101.
- [8] PENG P C, WANG C Y. Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges[J]. NDT & E International, 2015, 75: 80-86.

(下转第 113 页)