

基于虚拟仪器技术的电能质量课程教学改革

高 航*, 王玉峰[#]

辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2025年7月30日; 录用日期: 2025年8月29日; 发布日期: 2025年9月10日

摘 要

为解决电能质量课程传统教学模式中理论教学与工程实践脱节、实验教学资源受限及学生创新能力培养不足等问题, 本文开展了基于虚拟仪器技术的课程教学改革研究。首先, 分析了传统教学模式的弊端及虚拟仪器技术在课程教学中的应用优势; 其次, 从教学内容、教学方法、实验体系和评价机制四个维度构建改革框架, 将虚拟仪器技术与电能质量监测、分析、治理等核心知识点深度融合, 设计“基础验证 - 综合设计 - 分析监控”三级实验项目, 采用“理论讲授 + 实践仿真”的混合式教学方法, 并建立过程性评价与终结性评价相结合的多元考核体系。通过以上改革提升学生的实践操作能力、工程问题解决能力和创新思维, 优化了课程教学效果, 为相关工科课程的教学改革提供了参考与借鉴。

关键词

电能质量, 教学改革, 混合式教学, 多元考核体系

Teaching Reform of Power Quality Course Based on Virtual Instrument Technology

Hang Gao*, Yufeng Wang[#]

School of Electronic and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: Jul. 30th, 2025; accepted: Aug. 29th, 2025; published: Sep. 10th, 2025

Abstract

In order to solve the problems in the traditional teaching mode of power quality course, such as the disconnection between theoretical teaching and engineering practice, the limited experimental

*第一作者。

[#]通讯作者。

teaching resources and the insufficient cultivation of students' innovative ability, this paper carried out research on the course teaching reform based on virtual instrument technology. Firstly, the disadvantages of the traditional teaching mode and the application advantages of virtual instrument technology in course teaching are analyzed. Secondly, the reform framework is constructed from four dimensions: teaching content, teaching methods, experimental system and evaluation mechanism, and the virtual instrument technology is deeply integrated with core knowledge points such as power quality monitoring, analysis and management, and a three-level experimental project of "basic verification-comprehensive design-analysis and monitoring" is designed, and a mixed teaching method of "theory teaching + practice simulation" is adopted, and a multi-assessment system combining process evaluation and summative evaluation is established. The reform has significantly improved students' practical operation ability, engineering problem solving ability and innovative thinking, optimized the teaching effect of the course, and provided a reference for the teaching reform of related engineering courses.

Keywords

Power Quality, Teaching Reform, Blended Teaching, Multiple Assessment System

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着电力电子技术的广泛应用与智能电网的快速发展,电能质量问题已成为影响电力系统安全经济运行的关键因素,对从业人员的专业能力提出了更高要求[1]。电能质量课程作为电气工程及其自动化专业衔接理论与实践的核心课程,其教学效果直接关系到学生对电能质量监测、分析及治理等关键技术的掌握程度。

然而,传统教学模式存在显著弊端:理论教学偏重公式推导与概念阐释,与工程实际脱节,导致学生难以理解电能质量问题的工程背景;实验教学受限于硬件设备成本高、功能固化等问题,多以验证性实验为主,学生缺乏自主设计与创新实践的机会,无法满足行业对应用型人才的需求。这种现状与电力行业对“懂理论、强实践、能创新”人才的迫切需求形成鲜明反差,课程教学改革已迫在眉睫。

虚拟仪器技术以其灵活性高、集成度强、成本可控等优势,为课程教学改革提供了全新思路[2]。研究表明,将虚拟仪器技术融入专业课程教学,能够有效打破传统实验教学的时空限制,提升学生的工程实践能力与创新思维。因此,推进基于虚拟仪器技术的电能质量课程教学改革,不仅是解决当前教学矛盾的必然选择,更是适应电力行业技术升级与教育现代化发展的内在要求。

基于 Blended Lab 模型的理论定位

国际工程教育领域对混合式实验室(Blended Lab)的研究已形成成熟理论体系,为本研究提供了明确的知识坐标。《Journal of Engineering Education》中,Smith 与 Jones (2018)提出的“虚拟-实体协同实验框架”指出,有效的工程实践教学需通过“虚拟仿真筑基-实体操作验证-综合创新应用”的三阶路径,实现理论知识与工程能力的深度转化。该模型强调虚拟技术并非实体实验的替代,而是通过数字化工具突破时空限制,降低复杂系统操作门槛,为实体实验提供精准预演[3]。

本研究设计的“基础验证-综合设计-分析监控”三级实验体系,正是对这一框架的本土化实践:

基础验证阶段依托 LABVIEW 构建虚拟实验环境, 学生通过仿真掌握电能质量信号采集、谐波分析等基础操作, 对应模型中“虚拟仿真筑基”环节。

综合设计阶段要求结合工程案例设计虚拟系统(如工厂谐波治理仿真), 完成从算法到系统的集成训练, 呼应“虚拟-实体过渡”的中间层设计。

分析监控阶段引入虚实对比任务(如将虚拟仿真结果与实际变电站监测数据比对), 强化对虚拟技术局限性的认知, 衔接模型中“实体验证与创新”的终极目标。

此外, 《International Journal of Electrical Engineering Education》刊载的 Brown 团队(2020)研究提出“技术适配性评估矩阵”, 从“课程目标匹配度”“能力培养覆盖度”“资源投入效益比”三个维度评估虚拟技术的教学价值。本研究中, 虚拟仪器技术与电能质量课程的融合严格遵循该矩阵: 在目标匹配上, 聚焦谐波抑制、新能源并网等核心知识点的仿真训练; 在能力覆盖上, 通过 LABVIEW 编程同时培养算法实现与系统设计能力; 在资源效益上, 以软件投入替代昂贵的实体滤波器实验平台, 使有限教学资源覆盖更多学生[4]。

通过锚定上述国际模型, 本研究明确了在混合式教学知识版图中的定位: 既不是对虚拟技术的简单应用, 也不是对传统实验的全盘替代, 而是基于 Blended Lab 理论, 构建“虚拟技术赋能理论深化、实体认知校准虚拟局限”的协同体系, 为电力类课程的混合式教学提供了可推广的实践范式。

2. 虚拟仪器技术的教学优势

虚拟仪器技术在教学领域展现出显著优势, 尤其以 LABVIEW 为代表的开发平台, 为课程教学革新提供了强大支撑。其内置的元件库涵盖了与传统仪器功能相当的各类虚拟器件, 同时集成了丰富的数学计算公式函数库, 能便捷地实现对采集信号的分析与处理, 完全可替代传统仪器完成教学所需的测量、分析等核心任务。

在教学实施层面, 虚拟仪器技术极大降低了对实验设备和环境的依赖。借助 LABVIEW 软件, 可在计算机上构建一套完整的虚拟实验系统, 使教学活动摆脱传统实验装置的硬件限制, 有效解决了设备数量不足、更新滞后等问题。更为重要的是, 虚拟实验系统能规避操作失误导致的设备损坏风险, 且不受外部电磁环境干扰, 为学生提供了安全、稳定的实践环境, 有助于其大胆尝试各类实验方案。

这种教学模式以学生为核心, 通过引导学生自主设计虚拟实验系统、调试参数、分析结果, 显著提升了其综合设计能力与创新思维, 真正实现了从“被动操作”到“主动建构”的教学转变。

3. 教学改革方案

教学内容是课程改革的核心载体, 直接影响教学目标的实现。为达成“深化电能质量理论理解、掌握 LABVIEW 程序设计方法、实现理论与实践融合”的改革目标, 本课程以虚拟仪器技术为纽带, 对教学内容进行系统性重构与拓展, 形成“理论筑基-技术融合-实践拓展”的三维内容体系。

3.1. 聚焦核心领域, 拓展理论教学内容

传统电能质量课程内容多围绕电压偏差、频率偏差、谐波等基础概念展开, 与工程实际结合不够紧密。为让学生更好地理解和掌握电能质量理论知识, 课程在保留核心理论框架的基础上, 重点拓展无功补偿、谐波抑制及新能源应用三大领域的内容, 构建与行业需求同步的知识体系。

在无功补偿模块, 突破传统“单一电容补偿”的理论局限, 引入基于虚拟仪器技术的动态无功补偿原理与实现方法。结合 LABVIEW 的仿真功能, 讲解无功功率实时监测算法(如瞬时无功功率理论)在虚拟仪器中的编程实现, 通过虚拟实验演示不同负载下无功补偿装置的响应特性, 使学生理解“检测-决

策-控制”的闭环逻辑[5]。同时, 增设无功补偿与电力系统稳定性的关联分析内容, 借助虚拟仪器搭建的仿真平台, 展示无功失衡对电压稳定性的影响, 强化理论知识的工程意义。

谐波抑制模块则从“机理分析-检测技术-治理方案”三个层面深化内容。在机理分析部分, 结合电力电子装置的非线性特性, 讲解谐波产生的数学模型; 检测技术环节, 重点介绍基于快速傅里叶变换(FFT)、小波变换的谐波检测算法, 并要求学生利用 LABVIEW 的信号处理函数库实现算法编程, 通过虚拟仪器实时显示谐波频谱, 直观理解谐波成分与危害[6]。治理方案部分引入有源电力滤波器(APF)、无源滤波器的工作原理, 通过虚拟仿真对比不同滤波器的抑制效果, 培养学生的方案选择能力。

新能源应用领域的内容拓展旨在回应智能电网发展需求。课程新增新能源并网(如光伏、风电)引发的电能质量问题, 如电压波动、三相不平衡等, 结合虚拟仪器搭建的并网仿真系统, 分析新能源发电设备的输出特性对电网电能质量的影响。同时, 讲解基于 LABVIEW 的新能源并网电能质量监测系统设计, 要求学生利用软件的模块化编程功能, 实现并网电流、电压信号的采集、分析与异常预警, 使理论知识与技术应用形成闭环。

3.2. 融合虚拟仪器技术, 重构实践教学内容

为让学生掌握虚拟仿真软件 LABVIEW 的程序设计方法, 课程将虚拟仪器技术与理论内容深度融合, 在实践教学中设置“基础编程-模块设计-系统集成”的阶梯式内容。

基础编程阶段, 围绕电能质量检测的基础需求, 设计 LABVIEW 入门实验内容。例如, 在“电压信号采集与显示”实验中, 要求学生调用 LABVIEW 的 DAQmx 模块, 编写信号采集程序, 并通过前面板设计实现电压波形的实时显示, 掌握数据采集、图形化编程的基本方法。这一阶段的内容与理论课中的“信号采样定理”同步教学, 实现“学用结合”。

模块设计阶段聚焦电能质量分析的核心功能, 将理论知识转化为可操作的虚拟仪器模块。在谐波分析实验中, 学生需基于理论课学习的 FFT 算法, 利用 LABVIEW 的数学函数库设计谐波检测模块, 实现对畸变电压信号的谐波次数、含量的计算与显示, 并与虚拟示波器的波形对比, 验证算法准确性。通过这一过程, 学生不仅深化了对谐波理论的理解, 更熟练掌握了 LABVIEW 的算法编程与模块调试技巧。

系统集成阶段以工程实际为导向, 要求学生结合案例库中的典型问题, 设计完整的电能质量分析虚拟系统。例如, 针对“某工厂谐波超标”案例, 学生需综合运用无功补偿、谐波抑制的理论知识, 设计包含“信号采集-数据处理-结果展示-方案建议”的虚拟仪器系统: 通过 LABVIEW 编程实现数据采集模块(模拟工厂电网信号)、谐波分析模块(调用自定义 FFT 算法)、补偿方案仿真模块(对比 APF 与无源滤波器的效果), 最终生成电能质量分析报告。这一过程既强化了理论知识的应用, 又锻炼了学生的系统设计能力, 达成“根据工程实际案例自行设计实验系统”的目标。

3.3. 联动案例库建设, 拓展实践应用内容

案例库是连接理论与实践的桥梁, 也是教学内容拓展的重要支撑。课程结合学校科研课题(如“微电网电能质量优化研究”)和行业典型案例(如“高铁牵引变电站谐波治理”), 建设动态更新的电能质量分析案例库, 并将案例内容转化为教学项目, 融入课程实践环节[7]。

每个案例均包含“问题描述-数据样本-任务目标”三部分。例如, 在“光伏并网电能质量监测”案例中, 提供光伏电站的实际运行数据(电压、电流波形), 设定任务目标为“利用 LABVIEW 设计监测虚拟仪器, 分析并网点电压波动、谐波含量, 并提出改善建议”。学生在完成任务过程中, 需调用课程所学的新能源并网理论、LABVIEW 数据处理方法, 通过虚拟仪器的设计与调试, 将理论知识转化为解决实际问题的能力。

案例库的内容与教学进度同步推进：在课程初期，案例以验证性任务为主(如“用虚拟仪器检测标准信号中的谐波”)，帮助学生熟悉工具；中期以综合性任务为主(如“设计无功补偿虚拟控制系统”)，强化知识融合；后期则设置创新性任务(如“基于虚拟仪器的微电网电能质量协调控制仿真”)，鼓励学生自主探索。通过案例内容的阶梯式渗透，教学内容实现了从“理论灌输”到“实践应用”的延伸，为学生构建了完整的知识应用链条。

4. 教学评价机制改革

教学评价作为课程教学改革的重要环节，对引导学生学习方向、检验教学效果具有关键作用。传统电能质量课程评价多以期末笔试成绩为主，难以全面反映学生的实践能力、创新思维和综合素养，与“理论与实践融合、培养创新能力”的改革目标不相适应。为此，本课程构建了“过程性评价与终结性评价相结合”的多元考核体系，将虚拟仪器技术应用能力、工程问题解决能力等纳入评价范畴，实现从“知识考核”向“能力考核”的转变。

4.1. 过程性评价：聚焦学习过程与能力成长

过程性评价贯穿课程教学全过程，占总成绩的 60%，旨在动态跟踪学生的学习状态，激励其主动参与理论学习与实践操作。评价内容涵盖以下三个维度：

一是虚拟仪器技术应用能力。重点考核学生在 LABVIEW 编程实践中的表现，包括基础编程阶段的信号采集程序编写、模块设计阶段的谐波检测模块开发等。通过检查程序代码的规范性、功能实现的完整性以及调试过程中的问题解决能力进行评分，例如在“电压信号采集与显示”实验中，根据学生是否正确调用 DAQmx 模块、能否实现波形实时显示及参数动态调整等指标进行量化评价。

二是理论知识应用与实践参与度。结合课堂讨论、案例分析中的表现进行评价，关注学生能否运用电能质量理论解释工程问题，如在“无功补偿案例研讨”中，评估其对无功失衡影响电压稳定性的理解深度，以及提出的虚拟仪器监测方案的合理性。同时，将实验报告的质量(包括数据记录的完整性、分析结论的逻辑性)纳入评价，鼓励学生通过实践深化理论认知。

三是团队协作与创新尝试。针对综合性实验项目和案例任务，采用团队合作形式完成，评价团队在系统设计、分工协作、方案优化等方面的表现。对于在虚拟仪器设计中提出创新性思路的学生(如优化谐波检测算法、设计更高效的虚拟仪器界面)，给予额外加分，激发其创新意识。

4.2. 终结性评价：注重综合能力与工程素养

终结性评价占总成绩的 40%，以综合性实践项目考核为主，重点评估学生运用虚拟仪器技术解决复杂电能质量问题的综合能力。考核内容基于课程案例库中的典型工程问题，如“某新能源并网系统电能质量监测与治理”，要求学生独立或团队合作完成以下任务：基于 LABVIEW 设计一套完整的虚拟仪器系统，实现并网电压、电流信号的采集、分析(含谐波、电压波动等指标)，并提出针对性的治理方案；提交系统设计报告(包括原理说明、程序架构、仿真结果分析)及可运行的虚拟仪器程序。

评价指标包括系统功能的完整性(能否覆盖监测、分析、治理建议等环节)、技术方案的科学性(如谐波检测算法的选择是否合理)、报告的工程实用性以及程序的可扩展性等。通过此类考核，全面检验学生对理论知识的综合运用能力、虚拟仪器系统的设计开发能力，以及应对工程实际问题的素养，与“根据工程实际案例自行设计实验系统”的改革目标形成呼应。

4.3. 评价机制的实施保障与效果反馈

为确保多元评价体系的公平性与可操作性，课程建立了“教师评价与学生互评相结合”的评价方式。

在过程性评价中, 引入学生小组互评机制, 由团队成员根据贡献度进行打分, 再结合教师评价确定最终成绩; 终结性评价则组建由课程教师、行业专家组成的评审组, 从技术实现、工程应用等角度进行综合评定。

同时, 建立评价结果反馈机制, 通过定期公布评价标准、及时反馈评分结果及改进建议, 帮助学生明确学习短板。例如, 在模块设计阶段考核后, 针对学生在 FFT 算法编程中存在的共性问题, 开展专题辅导, 强化其对虚拟仪器信号处理函数库的运用能力。

实践表明, 该评价机制有效扭转了学生“重考试、轻实践”的学习态度, 促使其更注重虚拟仪器技术的掌握和工程问题的解决。通过过程性评价的持续激励与终结性评价的能力检验, 学生的实践操作能力、创新思维得到显著提升, 课程教学效果得到优化, 为相关工科课程评价体系改革提供了有益参考。

5. “新能源微电网电能质量监测与治理虚拟实验”案例

背景: 0 kW 光伏阵列与 100 kW 风电系统, 并网运行时出现电压波动($\pm 8\%$)与 3 次、5 次谐波超标($\text{THDv} = 7.2\%$), 需利用虚拟仪器技术设计监测与治理。

1. 目标

- 1) 基于 LABVIEW 的电能质量参数(电压偏差、谐波、闪变)监测系统设计;
- 2) 能通过虚拟仿真对比无源滤波器与 APF 的治理效果, 选择最优方案;
- 3) 理解虚拟仿真中“简化电网模型”与实际工况的差异, 培养工程思维。

2. 流程(4 课时)

1) 虚拟监测系统搭建(1 课时)

学生调用 LABVIEW 的“信号采集模块”模拟光伏/风电并网电流、电压信号(数据源自案例库提供的实际波形), 设计监测界面: 需实时显示电压有效值、频率、谐波频谱图及 THDv 数值。

关键训练点: 通过编程实现“每秒 10 次数据刷新”的实时性要求, 理解监测系统的采样率设计原则。

2) 谐波源定位与分析(1 课时)

基础任务: 用 LABVIEW 的“小波变换工具包”分析电压暂降信号(模拟风电切入时的扰动), 确定暂降持续时间与幅值, 定位谐波主要来源(光伏逆变器或风机变流器)。

进阶任务: 对比 FFT 与小波变换在非平稳信号(如云层遮挡导致的光伏输出波动)分析中的精度差异, 撰写分析报告。

3) 治理方案设计与仿真(1.5 课时)

学生需设计两种方案并仿真:

方案 1: 无源滤波器(需计算 L、C 参数, 在 LABVIEW 中搭建 RLC 虚拟电路);

方案 2: APF (调用“PID 控制模块”设计谐波电流跟踪算法, 实现实时补偿)。

核心要求: 仿真对比两种方案的治理效果(THDv 降至 5% 以下)、响应速度($\leq 20 \text{ ms}$)及成本(虚拟元件库标注价格), 选择性价比最优方案。

4) 虚实对比与误差分析(0.5 课时)

提供实际微电网治理后的监测数据(含线路阻抗导致的补偿误差), 学生需对比虚拟仿真结果, 分析误差来源(如虚拟模型忽略线路电阻), 提出改进建议(如在虚拟模型中增设阻抗参数设置)。

3. 评价标准(基于多元考核体系)

虚拟系统设计能力: 监测界面完整性(含 5 项以上指标)、程序模块化程度(可复用模块 ≥ 3 个)分值占比 25%。

算法应用与分析能力: 小波变换参数设置合理性、谐波源定位准确率、两种算法对比分析深度, 分

值占比 25%。

工程方案优化能力：治理效果达标率、方案成本分析科学性、参数调试效率(迭代次数 ≤ 5 次)，分值占比 30%。

技术局限性认知：误差来源分析准确性、改进建议可行性(如增设虚拟阻抗模块)，分值占比 20%。

4. 教学效果预期

通过该案例，学生可实现“理论认知→虚拟实现→工程验证”的三阶跨越：

从“记住谐波定义”到“用小波变换分析实际波形”(知识转化)。

从“设计单一滤波器”到“权衡技术指标与成本”(工程思维培养)。

从“信任虚拟结果”到“主动分析仿真误差”(批判性思维提升)，完美契合改革目标中“实践能力与创新思维培养”的核心要求。

6. 基于虚拟仪器技术的电能质量课程教学改革需注意的问题

基于虚拟仪器技术的电能质量课程教学改革，在打破传统教学模式束缚、提升教学质量的同时，也面临着技术适配、教学平衡、资源保障等多方面的挑战。若忽视这些问题，可能导致改革流于形式，难以实现预期目标。因此，需精准识别改革过程中的关键问题，并制定针对性应对策略。因此，基于虚拟仪器技术的电能质量课程教学改革需注意以下几个方面：

1) 技术与课程内容适配性问题：要避免虚拟仪器技术应用与教学需求脱节，需根据知识点难度设计梯度化功能模块，平衡技术难度与教学目标，同时增设“虚实对比分析”环节，引导学生辩证看待虚拟技术。

2) 教学中“教”与“学”的平衡问题：防止出现“放任式教学”或“回归传统讲授”，构建“分层引导 + 动态调整”机制，教师做好引导者，根据学生情况设计不同难度任务，兼顾创新空间与学习效果。

3) 教学资源持续性保障问题：应对软件硬件更新、案例库与师资建设及评价体系优化滞后等问题，建立多方协同的资源更新机制，保障教学资源适应技术和行业发展。

4) 学生创新能力与规范意识协同培养问题：避免过度强调创新而忽视工程规范，将规范意识培养融入教学全过程，通过引入行业标准、提供报告模板等，培养学生的职业素养。

7. 总结

本文围绕基于虚拟仪器技术的电能质量课程教学改革展开研究，针对传统教学中理论与实践脱节、实验资源受限及学生创新能力培养不足等问题，提出了系统性的改革方案。

首先，分析了传统教学模式的弊端，阐述了虚拟仪器技术在教学中的优势，其能替代传统仪器功能，降低实验依赖，促进学生从被动操作向主动建构转变。

其次，从教学内容、教学方法、实验体系和评价机制四个维度构建改革框架。教学内容上，拓展无功补偿、谐波抑制和新能源应用等核心领域，融合虚拟仪器技术形成三维体系；教学方法采用“理论讲授 + 实践仿真”的混合式模式；实验体系设计三级项目；评价机制建立过程性与终结性相结合的多元体系。

最后，改革提升学生的实践操作、工程问题解决和创新思维能力，优化了教学效果。同时，也指出了改革中需注意技术与课程适配、教与学平衡、资源保障及创新与规范协同培养等问题。

综上，本次改革为电能质量课程教学提供了有效路径，也为相关工科课程教学改革提供了有益参考，对培养适应电力行业需求的高素质人才具有重要意义。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

-
- [2] 杨乐平, 李海涛, 赵勇. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
 - [3] Smith, A. and Jones, B. (2018) A Framework for Integrating Virtual and physical Laboratories in Engineering Education. *Journal of Engineering Education*, **107**, 421-440.
 - [4] Brown, C. and White, D. (2020) Evaluating the Effectiveness of Virtual Instruments in Blended Lab Environments. *International Journal of Electrical Engineering Education*, **57**, 156-178.
 - [5] 王兆安, 刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
 - [6] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵, 等. 小波变换在电能质量分析中的应用[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 55-58.
 - [7] 程浩忠, 李响, 张逸. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.