

# “电力设备在线监测与故障诊断”案例库建设与实施

赵晓轶, 王佳乐, 梁永春

河北科技大学电气工程学院, 河北 石家庄

收稿日期: 2023年3月20日; 录用日期: 2023年4月18日; 发布日期: 2023年4月25日

## 摘要

研究生课程理论知识点多、授课学时少, 授课质量有待提高。在《电力设备在线监测与故障诊断》课程中, 根据课程内容, 教师选择和设计了两个教学案例, 构建了案例库, 给出了案例库教学的实施方法。针对研究生的主要任务是开展科学研究, 在研究生课程案例教学中, 教师从系统设计、机理和特性分析出发, 在信号采集系统、信号处理方法、特征量提取、故障识别方法、场分析等环节, 结合实际的硬件、软件、算法、数值分析, 展开讲授, 有机地将所学知识应用于科学研究, 直接培养了研究生科学生产能力。

## 关键词

案例教学, 系统设计, 信号采集, 故障识别, 科学研究

# Case Construction and Implementation of “On-Line Monitoring and Fault Diagnosis of Electric Power Equipment”

Xiaoyi Zhao, Jiale Wang, Yongchun Liang

School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2023; accepted: Apr. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Apr. 25<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Due to many theoretical knowledge points and less teaching hours of graduate courses, teaching quality needs to be improved. In the course of on-line monitoring and fault diagnosis of electric

文章引用: 赵晓轶, 王佳乐, 梁永春. “电力设备在线监测与故障诊断”案例库建设与实施[J]. 教育进展, 2023, 13(4): 2067-2073. DOI: 10.12677/ae.2023.134325

power equipment, this paper selects and designs two teaching cases, constructs the case base, and gives the implementation method of real-time case teaching. Because the main task of graduate students is to carry out scientific research, the case teaching of graduate courses is starting from the system design and mechanism and characteristics analysis. The introduction of signal acquisition system, signal processing methods, feature extraction, fault identification methods, field analysis and other links are combined with the actual hardware, software, algorithms, numerical analysis, to teach. The organic application of the learned knowledge in scientific research directly trains the scientific research ability of graduate students.

## Keywords

Case Teaching, System Design, Signal Acquisition, Fault Identification, Scientific Research

Copyright © 2023 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

地方院校中的研究生几乎全部来自地方院校，而地方院校受到经费、实验条件、师资能力的限制，导致本科教学中存在一定的局限性，直接结果是研究生新生不具备较好的实践基础和科研技能。例如，地方院校电气专业本科生大多开设了《微机原理》、《嵌入式系统》、《智能仪表》等多门课程，但很多课程更多地停留在课本理论知识阶段，很难与工程实践相结合，学生基本不具备相关的软、硬件设计能力，无法单独完成一个简单检测系统开发。有些院校开设了《高电压技术》等课程，而很多院校并没有开设这个方向的课程。即使开设该课程的学校也基本没有相关实验室，教学仅仅停留在理论阶段[1][2]。这就造成了大学本科阶段知识的欠缺，如果在研究生阶段采用与重点大学相同的教学模式，将直接导致较差的教学效果，也无法构建起理论知识与科研的纽带。

通过建设案例库，在研究生课程中以案例为引导，展开理论教学，在案例中不断地重复和延伸本科相关知识，将相关知识点的讲解直接与案例相结合，必将带动学习兴趣。学生也能够将理论知识与科学的研究紧密联系在一起，掌握直接将方法应用于工程实践的手段和能力。这就为研究生开展后期的课题研究奠定了扎实的基础，提高了快速进入课题研究的时间[3][4][5][6]。

## 2. 教学案例的选择

《电力设备在线监测与故障诊断》是一门综合性课程，前期学生应具备高电压技术、高压试验技术、软硬件技术、数字信号处理方法、人工智能算法等多方面知识。在此基础上，课程阐述了电力设备故障在整个电力系统安全运行中的重要性、电力设备故障机理、状态监测的必要性、各种介质的击穿机理、传感器技术、信号处理、电力设备绝缘故障信号的特征提取、模糊算法、神经网络、以及相关试验等等多方面的知识。课程的教学内容较多、较杂，但课程的教学学时较少，只有 36 学时。

由于学生前期知识储备不充分，而课程知识体系又很庞杂，造成了学习中的困难，讲授中的理论与实践的平衡很难把握。通过分析可知，《电力设备在线监测与故障诊断》中电力设备故障诊断的必要性、介质击穿机理等是基础，且具有共性，因此利用少量的学时进行讲解，后期的在线监测与故障诊断的内容全部结合具体案例展开讲解。另外，从需要培养学生科研素养和科研技能的角度考虑，需要选取既能反映电力设备典型性，又能锻炼科研必备工具和操作技能的案例。在课程中，选取高压断路器和电力电

缆两个案例。

在课程体系中，包含了信号的选择、传感器的选择、信号的采集、信号的处理、特征值的提取、故障的智能诊断与分类等多方面的知识，因此需要选择能够反映这些方面的案例来促进教学。考虑到电力设备的体积、造价，以及院校自身的条件，这里选择一个 10 kV 高压断路器的故障诊断作为一个典型案例库，在诊断过程中就包含了信号的检测、信号的处理、特征量的提取、人工智能诊断算法等多方面知识，可将其分解为多个子案例来展开教学。

电力设备故障不仅包含了电的故障，同时过热也会带来极大的危害。电力电缆是一个大批量使用的电力设备，便于在教学和试验中使用。电力电缆的热状态可以通过温度场的分析和计算评估，而电力电缆温度场计算的准确方法是数值分析。因此，电力电缆的温度场分析可以作为另一个案例。

在整个信号检测与故障诊断的过程中，需要用到 LabVIEW 和 MATLAB 工具。在电力电缆的温度场分析中，ANSYS/COMSOL 等工具软件也是必备的。因此在两个案例库讲解中，同时展示了多个工具软件的使用，有助于研究生掌握相关工具软件操作技能，学会利用相关工具开展科学的研究的思路。

### 3. 案例库教学的实施方法

引入案例库是为了改进教学，因此如何将案例库有机融入到课堂教学是关键。《电力设备在线监测与故障诊断》课程中包含了丰富的教学内容，无论是信号的分析，还是模糊算法、神经网络的讲解都是理论性很强的知识点，如果能够将这些知识点的讲解与案例的展开结合起来，从案例引导出所需要的算法，然后又将算法应用与案例，并给出算法分析的结果，必然能够提高枯燥的理论教学知识点的授课效果。

同时，研究生的主要任务是科研，如果能够在教学中融入科研的元素，将有助于学生科研素养的提高，快速开展科学研究，提高效率。因此在建设和讲授的过程中，遵循从系统到各个环节实施的思路。

#### 1) 断路器故障诊断案例

该案例可以分解为 5 个子案例，为了帮助梳理科研的思维，案例的讲解从阐述断路器故障诊断的意义开始：断路器是可靠开断电力线路的关键设备，其不能可靠工作，将带来供电不可靠，特别是线路存在故障时，可能会导致故障的扩散，引发大面积的电力故障，带来巨大的经济和社会损失。帮助学生树立从对社会和经济有意义的角度选择科研对象。

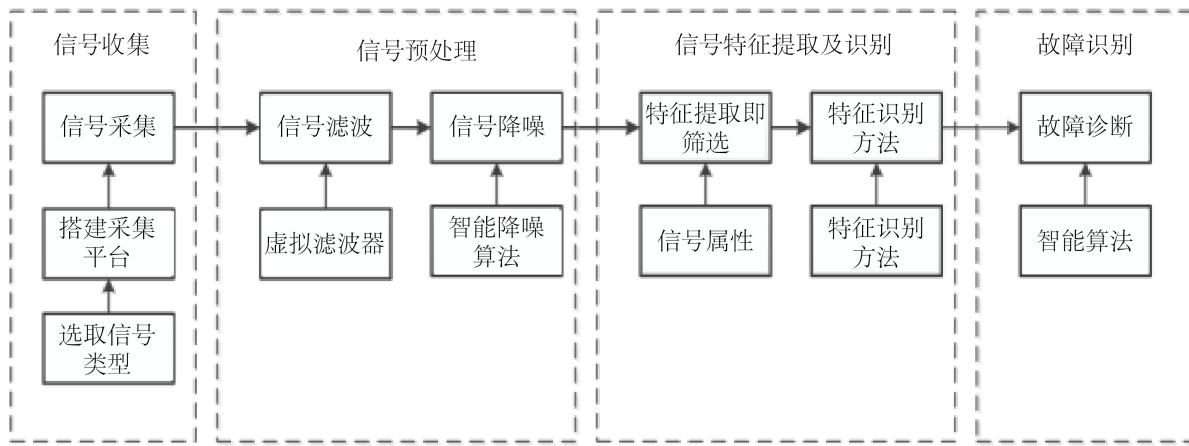
然后，教学中阐明断路器的结构和可能产生故障的部件，对断路器故障进行分类，以及现有断路器故障诊断的现状。国际大电网会议(CIGRE)在全球范围内对高压断路器进行的可靠性调查显示高压断路器的故障程度在很大程度上取决于其机械部件的损伤程度，对高压断路器的机械部件状态进行检测，可以判断其运行状态，及时发现故障并处理，可有效提高电力系统经济性、可靠性和安全性。因此在案例教学中主要开展断路器机械部件故障的诊断。这部分主要锻炼学生通过查阅文献和调研，明确研究任务的能力。

最后，从断路器故障诊断系统研究角度出发，展开多学科知识讲授和应用，帮助学生掌握系统研究思路和各环节知识的应用。采用启发式教学模式，逐步引导学生学习相关知识。

子案例 1：通过构建故障诊断系统，培养系统开发能力。从诊断需要信号、信号可能含有噪声、信号的滤波和降噪、如何建立信号与故障之间关系等问题引导学生建立系统的概念。典型的断路器故障系统如图 1 所示。诊断系统的讲解可帮助学生在研究中首先建立系统框图，对研究任务进行分解的能力。

子案例 2：结合案例讲解信号的选择、传感器的选择和信号的采集等教学内容。以 ZN63-12 型高压断路器为例，在断路器机械部件发生故障，必然会伴随着多种信号的出现，例如声音信号、振动信号、触头位移信号、温度信号等，其中声音信号是非接触测量，因此可以选取声音信号作为特征信号来进行

故障诊断。



**Figure 1.** Fault diagnosis system of breaker

**图 1.** 断路器故障诊断系统

结合信号的选择,教师在教学中引导学生如何选择传感器、如何将模拟信号导入计算机的相关知识:由于断路器机械部件的惯性较大,其产生的声音信号的频率也较低,而家用笔记本内置有声卡,其采样频率通常在 22 kHz 以上,辅助电脑自带的麦克风可以直接实现信号的采集,学生也可以利用自己的笔记本电脑采集不同的声音来锻炼自己的能力;在采集时可以采用 LabVIEW 软件,通过构建采集模块、设置采样率实现断路器动作声音信号的采集和存储。在授课中,结合具体模块来搭建采集系统,有助于快速学习和掌握 LabVIEW 软件的使用。

**子案例 3:** 讲解信号的滤波降噪。由于采集到的声音信号难免包含环境噪声,且采集到的动作信号中那个信号可以用于诊断、那个信号对诊断无用等,均需要后期对信号进行处理。教师在教学中启发学生需要对信号进行滤波,讲授硬件滤波和软件滤波方法。LabVIEW 自带有多种滤波模块,供研究者选用。

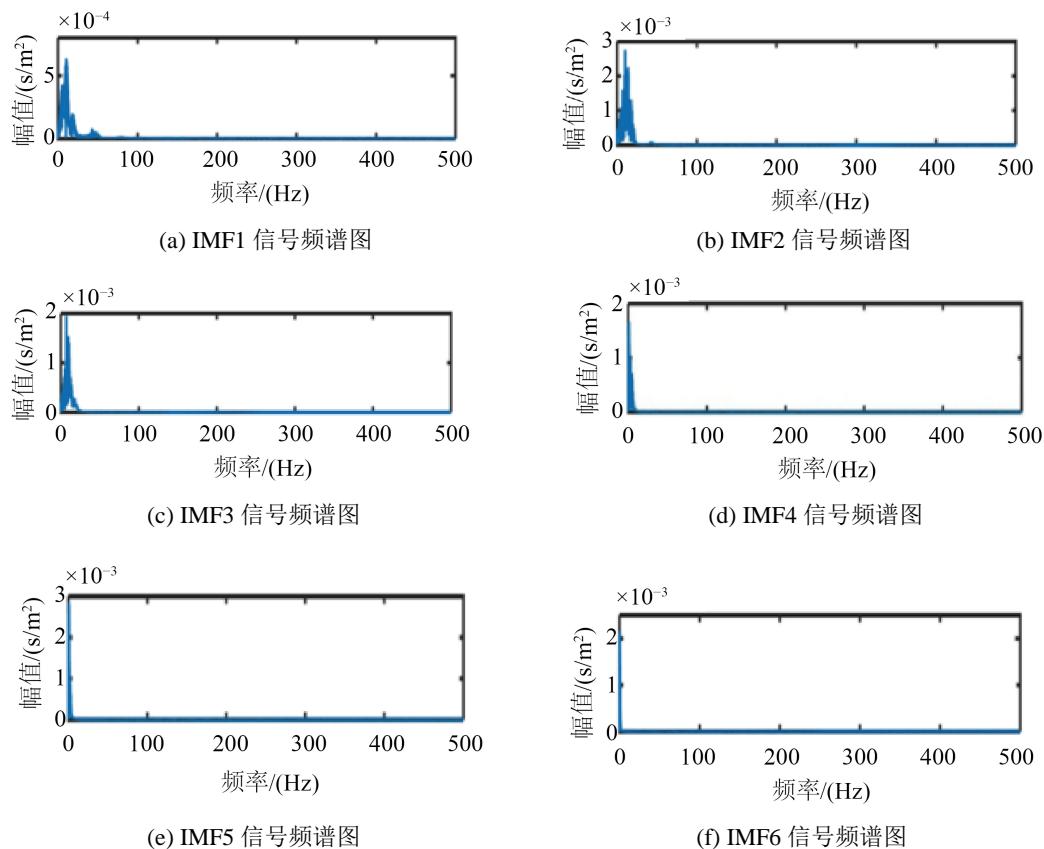
该部分主要将《数字信号处理》中的数字滤波方法应用于工程实际,在课堂上给出相关数据,鼓励学生对数据进行分析。在自我探索中可以分别采用不同的滤波器进行试验,观察滤波后的波形,从而验证不同滤波器的功能。

**子案例 4:** 特征值提取方法及其应用。滤波和降噪后,信号仍然特征不明显,因此需要进行进一步的处理。这里采用模态分解法,即经验模态分解法(EMD)进行进一步降噪。经过模态分解后的 IMF 分量一般都为一个单独的信号。**图 2** 给出了利用 EMD 分解后的 6 层 IMF 分量。可以看出信号分解后比较简单,可以计算其能量熵作为诊断的特征值。将算法分解的结果直接呈现在课堂上,通过对信号的分析使得学生明确了算法的重要性。

**子案例 5:** 人工智能算法及其应用。由于断路器的机械部分是一个惯性量,同时机械部分带动弹簧跳闸,是多个部件的联动,因此断路器的机械故障是一个非线性问题。此外,断路器的机械部分较多,因此对应的故障类型也多,在所选择的案例中,设定了 5 种状态(正常分闸、储能弹簧脱落、储能弹簧疲劳、触头磨损、半轴脱口片变形)。断路器机械部分的故障诊断必然是一个非线性的多分类问题,需要采用人工智能的方法来进行分类。特别是当机械故障还处于潜伏性状态时,信号特征不明显时,更需要人工智能算法的帮助。

在讲解完信号的采集、滤波和分解算法后,需要针对非线性的复杂故障类型进行分类。本案例中,采用自适应神经模糊推理系统(Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, ANFIS)进行故障的分类,

提高了故障诊断的准确率。



**Figure 2.** IMF component spectrum of EMD  
**图 2.** EMD 各 IMF 分量频谱图

从诊断案例的需要出发展开模糊推理和神经网络智能诊断的理论教学，然后再将理论算法应用于断路器非线性多分类故障诊断中。

案例中，每种故障类型采集 200 组数据，其中 180 组作为训练样本，20 组作为测试样本，最后测试的诊断准确率如表 1 所示，总体诊断的准确率较高。在诊断的过程，可以简要介绍其他的诊断方法，并进行对比。例如：采用 BP 网络的诊断准确率为 75.11%，RBF 网络的诊断准确率为 81.00%，三者比较可知，ANFIS 的诊断准确率较高。

**Table 1.** Fault diagnosis rate of ANFIS  
**表 1.** ANFIS 故障诊断率

运行状态	故障诊断准确率	总体诊断率
状态 1	96.7213%	
状态 2	96.6667%	
状态 3	95.0820%	96.6771%
状态 4	98.3051%	
状态 5	96.6102%	

将相关软硬件知识、各种算法理论知识与具体的断路器故障诊断案例有机结合，利用案例已有的故障数据，由学生对数据进行分析和诊断，实现了理论方法从实际需求出发展开论述，又回归到实际应用。极大地提高了教学效果，又助力研究生掌握了一个系统研发的思路和技能。

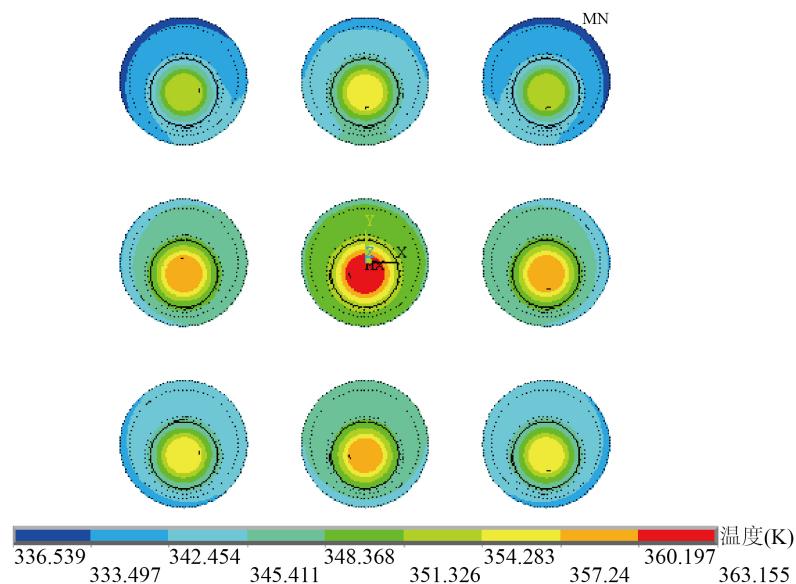
案例采用 LabVIEW 实现了信号的采集和滤波，采用 MATLAB 实现了信号的降噪和特征提取，以及人工智能诊断。因此在案例教学中锻炼了学生对这两个工具软件的使用技能。

## 2) 电力电缆热状态评估案例

为了全面评价电力设备的状态，其热状态是一个重点。首先，阐述电力电缆热状态评估意义：对电力电缆缆芯温度进行准确评估，有助于准确把握电力电缆热状态，从而合理安排电力电缆负荷电流，在保证安全可靠的前提下，充分挖掘电力电缆输送电能的能力，提高电力电缆的利用率。培养学生从企业需求出发、从工程实际出发挖掘问题的能力。

然后，明确电力电缆热状态评估的机理：电力电缆的温度决定于发热和散热，而发热即电缆通过电流后在缆芯导体、绝缘层、金属套、铠装层等产生导体损耗、涡流损耗、介质损耗等，产生的热量要通过电缆本体、外围介质向四周扩散，当两者平衡时，电力电缆的温度进入一个平衡状态。培养学生从基本概念出发、从基本理论出发分析问题的能力。

最后，从培养学生解决场类问题能力出发，展开电力电缆热状态评估研究。从机理分析可知，电力电缆热状态评估需开展电缆损耗和温度场计算，而两个计算最有效的方法是有限元法。于是，展开电磁场和温度场有限元方程的讲授，结合电力电缆和环境的结构，分别讲解泊松方程和拉普拉斯方程，以及场域的三个边界条件，采用三角形或四边形剖分，形成节点的求解矩阵，利用迭代法对矩阵进行求解，得到场域分布图，求得缆芯的温度。



**Figure 3.** Temperature distribution of duct cables

**图 3.** 排管电缆温度场分布

这样结合具体案例，展开有限元方程讲解，比单纯地理论讲解相比，更有趣，也更有助于学生在掌握有限元基本理论的基础上，具备在工程实践中应用有限元分析问题的能力。**图 3** 给出了排管电缆群的温度场分布图。

在电力电缆热状态评估案例中，直接采用 ANSYS/ANSOFT 等有限元工具软件课堂演示排管电力电缆的建模和仿真，以及结果的演示。在课堂教学中培训了学生使用这两个软件的技能，可以独立开展相关场域问题的分析计算。

#### 4. 结论

从断路器故障诊断和电力电缆热状态评估两种典型案例出发系统展开研究思路，将理论知识的讲解从实际课题需求引出，然后又回归实际课题应用，有助于学生从实践中学习理论知识，并掌握将理论知识应用于实践的能力，提高了学习效果，提升了科研素养。

#### 基金项目

项目资助：河北科技大学教育教学改革重点项目。

#### 参考文献

- [1] 周君华, 宫照玮. 案例、案例库、案例教学再认识[J]. 中国成人教育, 2021(2): 37-40.
- [2] 韩宪军, 王立平. 地下结构工程案例库教学改革与实践[J]. 大学教学, 2021(4): 52-54.
- [3] 芦碧波, 雒芬, 侯守明, 郑艳梅. 专业学位研究多媒体技术案例库建设[J]. 计算机教育, 2015(23): 11-13.
- [4] 王家忠, 戈景刚, 王泽河. 基于职业特征和 CDIO 的机械工程专业学位研究生案例库教学与实践[J]. 高教学刊, 2022(11): 1-4+8.
- [5] 王艳飞, 沈利民, 朱荣涛, 窦东阳, 李海生. 化工过程机械研究生“结构完整性原理”课程案例库建设与案例教学实践[J]. 科教文汇, 2021(21): 104-106.
- [6] 修俊山, 白永刚, 赵岳, 刘慧强. 新工科背景下案例教学模式探讨——激光光谱技术课程案例库设计与应用[J]. 教育信息化论坛, 2021(9): 39-40.