

[监测系统]

基于智能控制的高效电力变压器监测系统设计

文/郑福春
山东济钢众电智能科技有限公司

设计一种基于智能控制的高效电力变压器监测与维护系统。实验表明，与传统的联邦学习故障诊断方法和基于SMOTE与贝叶斯优化的LSTM网络诊断方法相比，该系统在监测准确率和维护效果上均有显著提升，具备广泛的应用前景。该系统为电力变压器的智能运维提供一种可靠、高效的解决方案，为智能电网的安全、稳定运行奠定基础。

随着全球对可持续能源的关注度不断增加，电力系统的稳定性和可靠性变得愈发重要。电力变压器作为电力系统中的关键设备，承担着电能传输和转换的重要任务。然而，传统的变压器监测和维护方法往往依赖于人工操作和定期检查，这不仅效率低下，而且容易遗漏潜在的故障。为提高电力变压器的监测效率和维护精度，智能控制技术的引入成为一个重要的研究方向。

智能控制技术利用先进的传感器、数据分析和决策算法，实现对电力变压器的实时监测与故障诊断。通过对变压器运行状态的持续跟踪与分析，能够及时发现异常，提供有效的维护策略，从而降低停机时间和维护成本。当前，许多电力公司已经开始探索智能监测系统在变压器管理中的应用，旨在通过技术创新提升电力系统的智能化水平。本文基于智能控制的高效电力变压器监测与维护系统，并通过实验验证系统的实际应用效果。

高效电力变压器监测与维护系统硬件设计

1. 采集器

采集器的主要功能是将模拟信号转换为数字信号，以便后续数据处理与分析。采集器由传感器模块、信号调理模块、模数转换器（ADC）、微控制

器和通信模块组成。采集器结构如图1所示。

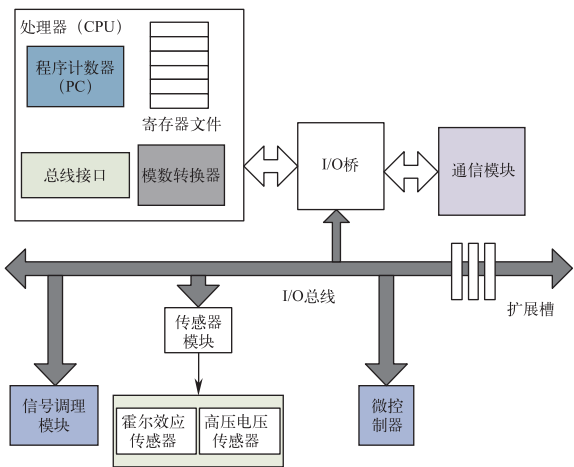


图1 采集器结构

传感器是采集器的核心部分，负责监测变压器的各种运行状态。电流传感器使用霍尔效应传感器，实时监测变压器的输入和输出电流，确保其在安全范围内运行。采用高压电压传感器监测变压器的输入和输出电压，以便及时发现过电压或欠电压情况。选择热电偶或热敏电阻，监测变压器的绕组和油温，防止因温度过高而导致的设备损坏。安装加速度传感器，用来监测变压器的振动情况，及时发现设备故障或不平衡运行的迹象。通过信号调

理模块对传感器输出的模拟信号进行处理，包括放大、滤波和整形等，以提高信号的质量和稳定性。利用16位模数转换器将经过调理的模拟信号转换为数字信号，以便微控制器进行处理。微控制器是采集器的“大脑”，负责控制整个采集过程、处理采集的数据并进行初步分析。本文选用性能稳定、功耗低的微控制器，以确保采集器在长时间运行中的可靠性。微控制器具备丰富的接口，支持与其他硬件组件的连接。使用RS485通信技术，使采集器与监控系统或云平台进行数据传输，以适应不同的应用场景。

采集器的安装位置和布局应考虑到传感器与变压器之间的距离、信号传输的稳定性以及环境的干扰。在设计时，应确保传感器的安装位置能够方便地获取数据，并且避免干扰源对信号的影响。同时，采集器本身的防护设计也非常重要，应具备良好的防潮、防尘和防腐蚀性能，以确保其在恶劣环境中长时间稳定工作。

2. 处理器

处理器是核心组件之一，负责数据的接收、处理、分析和控制。处理器需对来自采集器的实时数据进行快速处理，包括滤波、归一化及数据存储等操作，以确保后续分析的准确性。通过内置的算法，由处理器进行故障分析，识别潜在的故障并生成相应的维护建议。

处理器的硬件结构划分为中央处理单元（CPU）、存储单元、输入输出接口（I/O接口）、通信模块几个主要模块，处理器结构如图2所示。

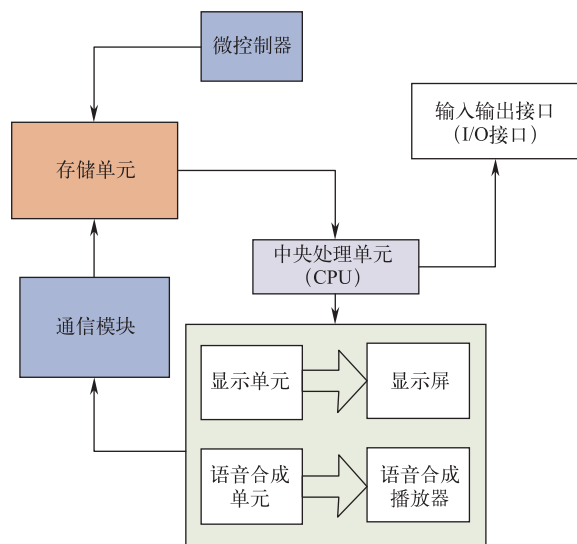


图2 处理器结构

CPU是处理器的核心，负责执行指令和处理数据，算术逻辑单元（ALU）负责执行基本的算术和逻辑运算，在考虑到处理速度和功耗后，适应高效变压器监测的需求。

控制单元（CU）负责指挥CPU内部的运算过程，控制指令的执行顺序，并管理各个组件之间的数据流动。寄存器用于临时存储数据和指令。

处理器内部的存储单元用于存储处理过程中需要的数据和程序。本文选用随机存取存储器（RAM）存放运行时的数据和程序，提供快速读写能力，以满足实时处理的需求。通过只读存储器（ROM）存储系统固件和启动程序，确保系统能够正常启动和运行。ROM中的数据不可更改，设计时应保证其内容的可靠性与稳定性。

输入输出接口（I/O接口）是处理器与外部设备之间的数据交互通道，用于接收来自传感器的数字信号和发送控制指令。使用MODBUS协议进行工业设备间的通信，通过MQTT协议实现与云平台的数据交互。

3. 显示器

显示器作为用户与系统之间的主要交互界面，不仅负责实时显示变压器的运行状态、监测数据和故障信息，还提供了人机交互的操作界面，帮助用户进行系统设置、数据查询和故障处理。

显示面板是显示器的核心组成部分，负责信息的呈现。本文使用发光二极管显示器（LED），LED显示器具有更高的亮度和对比度，适合在各种环境里使用。利用图形处理单元（GPU）快速渲染复杂图形和动画效果，提升用户界面的流畅性和响应速度。通过微控制器（MCU）管理显示面板的操作，执行显示更新、故障提示等任务。设计时应选择处理能力强、功耗低的MCU，以保证显示效果的实时性和稳定性。显示器能够实时呈现变压器的运行状态数据，包括电压、电流、温度、湿度等参数，以图形、数字和趋势图的形式展示，便于用户快速理解和分析。在变压器出现故障或异常情况时，显示器能够通过图形化界面提供故障报警信息，准确指出故障类型、位置和建议处理措施，帮助用户及时采取行动。

通过电容式或电阻式触摸屏技术，用户可以直接在显示面板上进行操作，选择菜单、输入参数和

确认设置。这种界面直观易用，提高用户的操作体验。除了触摸屏外，显示器还配备物理按钮，以支持用户进行基本的操作，如开关机、菜单选择和数据查询等。显示器的分辨率为1 920×1 080（全高清）。显示器的响应时间应较短，以确保实时数据更新的流畅性和准确性。特别是在监测数据频繁变动的场景中，能够快速响应。

高效电力变压器监测与维护系统软件设计

1. 数据分析与处理

通过安装在变压器上的传感器，系统实时获取各项数据，采集电流、电压、温度、油位、湿度等多种监测参数，并对其进行初步处理。采集的数据 D 表示为

$$D(t) = \{I(t), U(t), T(t), H(t)\} \quad (1)$$

式中， $I(t)$ 为电流； $U(t)$ 为电压； $T(t)$ 为温度； $H(t)$ 为湿度； t 为时间变量。

在数据采集后，系统对原始数据进行预处理，消除噪声和异常值，以确保数据的准确性。采用滤波算法对采集到的数据进行平滑处理。滤波后的数据 $D_{\text{filtered}}(t)$ 表示为

$$D_{\text{filtered}}(t) = D(t) * H(t) \quad (2)$$

式中， $H(t)$ 为滤波器的冲激响应； $*$ 为卷积运算。

使用 Z-score 方法检测并剔除异常数据。设定阈值 $Z_{\text{threshold}}$ 判断数据是否异常，公式为

$$Z = \frac{D(t) - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

式中， μ 为数据的均值； σ 为标准差。

当 $|Z| > Z_{\text{threshold}}$ 时，数据被认为是异常值。

在完成数据预处理后，系统需要从处理后的数据中提取特征，以便后续分析。特征提取的关键在于识别数据的潜在模式，通过均值反映监测参数的平均水平

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{\text{filtered}}(t_i) \quad (4)$$

利用标准差衡量数据的离散程度

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_{\text{filtered}}(t_i) - \mu)^2} \quad (5)$$

通过峰值因子判断信号的突变程度，其定义为信号峰值与均方根值的比值

$$CF = \frac{\max(D_{\text{filtered}}(t))}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{\text{filtered}}(t_i)^2}} \quad (6)$$

在特征提取完成后，系统利用多种数据分析方法对变压器状态进行评估。

通过对特征数据的统计分析，判断变压器的运行状态是否正常，是否存在潜在故障。利用机器学习技术进行故障分类和预测。通过训练历史故障数据，模型能够准确地识别不同的故障类型并进行预测。

2. 故障诊断

故障检测是故障诊断的第一步，其目的是通过监测系统运行状态，及时识别是否存在故障。对于多变量系统，使用状态方程和监测指标进行检测

$$y(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (7)$$

式中， $y(t)$ 是系统输出； A 是状态矩阵； $x(t)$ 是系统状态向量； B 是输入矩阵； $u(t)$ 是控制输入。

建立监测模型，比较实际输出与预期输出之间的差异，本文利用残差检测法，当残差超过某一设定阈值时，系统判定存在故障。

一旦故障被检测到，接下来需要定位故障源，结合不同传感器的输入信息确定故障的位置。使用加权最小二乘法对传感器数据进行融合

$$\hat{x} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} y \quad (8)$$

式中， H 是观测矩阵； R 是测量噪声协方差矩阵； y 是测量值； $\hat{x}$ 是估计的状态。

通过这一过程精确地定位故障部件，从而指导后续的维修工作。

采用基于模型的故障分类方法，利用故障模式和影响分析（FMEA）模型，将故障分为不同类别，如临界故障、非临界故障等。同时结合机器学习技术，通过历史故障数据训练分类模型，使其能够自动识别和分类新出现的故障。

3. 故障维护

根据故障诊断结果，确认故障类型，并评估故障的严重程度。根据故障评估结果，制订有针对性的维护计划。根据维护计划，实施具体的维护措施。维护完成后，需对变压器进行测试和验证，以确保故障已被有效修复。记录维护过程中的所有信息，包括故障类型、维护措施和结果，以便于后续的故障分析和经验总结。

通过定期检查和保养，防止故障的发生。基于实时监测数据，运用数据分析和故障预测模型，提前识别潜在故障，从而进行针对性的维护。通过监测变压器的关键参数，结合历史数据进行趋势分析，得到故障预测模型。

通过物联网技术，实现对变压器的远程监控与控制。利用大数据技术，对海量的监测数据进行分析，挖掘潜在的故障模式和规律。通过建立数据驱动故障维护模型，提高维护决策的科学性和准确性。将人工智能与机器学习技术应用于故障维护，实现智能决策和优化维护方案。通过历史数据训练模型，能够为维护人员提供智能化的维护建议和决策支持。

实验研究

为验证本文提出的基于智能控制的高效电力变压器监测与维护系统的实际应用效果，选用本文系统和传统的基于联邦学习的含不平衡样本数据电力变压器故障诊断方法和基于SMOTE与Bayes优化的LSTM网络变压器故障诊断方法进行实验对比，比较监测准确率与维护效果，得到的实验结果见表1。

表1 监测准确率实验结果

故障类型	监测准确率（%）		
	基于智能控制系统	基于联邦学习系统	SMOTE与Bayes优化的LSTM网络系统
绕组故障	97.2	90.1	93.5
短路故障	96.5	88.9	91.7
温度异常	96.8	89.5	92.6
电压不平衡	97.0	87.3	92.2
电流过载	96.4	89.0	92.9
平均准确率	96.8	89.2	92.5

根据表1可知，基于智能控制的系统在所有故障类型中，准确率均保持在96%以上，平均准确率达到96.8%，显示出对多种故障模式的高度敏感性和识别准确性。基于联邦学习的系统由于数据不平衡问题影响识别准确率，在各类故障检测中的平均准确率为89.2%，略低于其他方法。SMOTE与Bayes优化的LSTM网络系统虽然在不平衡数据上进行了优化，提升整体准确率，但与智能控制系统相比仍有差距，平均准确率为92.5%。

故障修复率实验结果如图3所示。

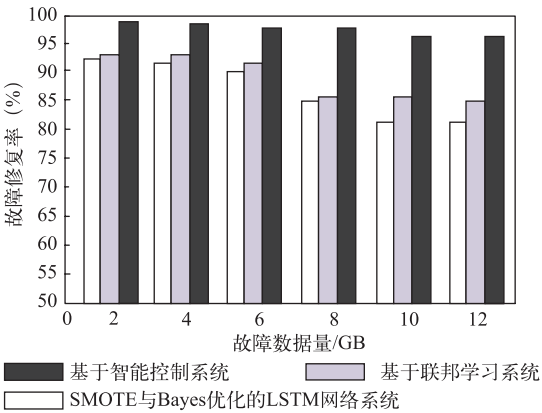


图3 故障修复率实验结果

根据图3可知，本文设计的系统故障修复率远远高于传统系统。本文系统在所有测试的故障类型中均表现出较高的修复率，平均修复率达到95.5%，相比于传统的基于联邦学习方法（平均修复率85.8%）和基于SMOTE与Bayes优化的LSTM网络方法（平均修复率89.4%）具有明显的优势。

综上所述，本文设计的基于智能控制的监测与维护系统不仅在故障识别上具有较高的准确性，而且在故障修复上也表现出显著的效率优势。系统为电力变压器的智能化运维提供高效、稳定的技术支持，能够有效减少因故障停机带来的经济损失，并保障电力系统的安全稳定运行。

结束语

本文基于智能控制技术设计了高效电力变压器监测与维护系统，旨在提高变压器运行的可靠性和运维效率。系统硬件由采集器、处理器和显示器组成，能够实现多维度、实时的数据采集和处理。通过数据分析与处理模块、故障诊断模块和故障维护模块构建一套智能化的监测与维护流程。

实验结果表明，与传统的联邦学习故障诊断方法和基于SMOTE与贝叶斯优化的LSTM网络诊断方法相比，本文系统在监测准确率和维护效果上表现更优。系统在复杂的运行环境里依然能够高效地检测并诊断故障，为及时维护提供有力支持。未来，将进一步结合大数据分析和更高级的机器学习模型，提升故障诊断的精准性和系统的自适应性，为实现智能电网的高效、安全运行奠定基础。EA

（收稿日期：2025-06-25）