

文献标识码: B 文章编号: 1003-0492 (2024) 07-090-04 中图分类号: TP206+.3

基于计算机视觉的高压配电开关状态监测与诊断研究

Research on State Monitoring and Diagnosis of High Voltage Distribution Switches based on Computer Vision

★ 欧阳道生, 蒋志龙, 胡均实, 邹益强, 苏轶群 (宁波天安智能电网科技股份有限公司, 浙江 宁波 315700)

摘要: 计算机视觉通过图像采集、分析处理来获取对象关键特征信息, 其已被广泛应用于工业监测和故障诊断中。通过计算机视觉技术, 可以实现对高压配电开关状态的实时监测和精准诊断, 并及时发现和预防潜在的故障问题, 从而提高电力系统的可靠性和安全性。本文首先介绍了计算机视觉在高压配电开关状态监测与诊断中应用的理论基础和关键技术, 包括图像处理、特征提取和模式识别, 接着详细阐述了高压配电开关自诊断系统的设计要求, 包括硬件设计和软件架构的构建, 最后通过一系列的技术测试验证了所提方案的有效性, 展现了计算机视觉技术在电力系统高压配电开关监测与诊断中的应用潜力和实际效益。

关键词: 计算机视觉; 高压配电开关; 状态监测与诊断

Abstract: Computer vision can obtain key feature information of objects through image acquisition, analysis and processing, which has been widely used in industrial monitoring and fault diagnosis. Through computer vision technology, real-time monitoring and accurate diagnosis of high-voltage distribution switch status can be realized, and potential fault problems can be discovered and prevented in time, thus improving the reliability and safety of the power system. This paper first introduces the theoretical basis and key technologies of computer vision application in state monitoring and diagnosis of high voltage distribution switches, including image processing, feature extraction and pattern recognition. The design requirements of self-diagnosis system of high voltage distribution switch are described in detail, including hardware design and software architecture construction. Through a series of technical tests, the effectiveness of the proposed scheme is verified, and the application potential and practical benefits of computer vision technology in the monitoring and diagnosis of high-voltage distribution switches in power systems are demonstrated.

Key words: Computer vision; High-voltage distribution switches; Condition monitoring and diagnosis

计算机视觉, 作为一门研究如何使机器“看”世界并理解图像或目标识别的学科, 通过算法和模型处理图像数据, 实现对目标对象的识别、定位、跟踪和分类, 为高压配电开关的状态评估和故障诊断提供了一种无接触、更安全、高效率和高精度的技术手段。人工智能和图像处理技术的飞速发展, 尤其是深度学习在图像识别和视觉感知方面取得的重大进展, 极大地推动了计算机视觉技术在电力行业的应用研究。

1 计算机视觉关键技术

1.1 图像处理

图像处理作为计算机视觉领域的基础性技术之一, 致力于通过算法和数学模型改善图像数据的质量, 以便更好地进行后续的特征提取和模式识别操作。在高压配电开关状态监测与诊断的研究中, 图像处理技术的应用不仅能够显著提高监测的准确性和效率, 而且对于分析和判断开关设备的健康状态具有至关重要的作用^[1]。

1.2 特征提取

特征提取是指能够从图像中准确提取有用的特征信息, 这对后续的图像分析和理解至关重要。在高压配电开关的图像处理过程中, 特征提取的目的是将图像数据转化为更加易于分析和理解的形式, 通常是向量形式, 以便于进行有效的模式识别和分类。特征提取技术大致可分为基于统计的方法、基于模型的方法以及基于深度学习的方法, 每种方法都有其独特的优势和应用场景。

1.3 模式识别

模式识别是通过算法和统计学方法对数据进行分类和解析，特别是在处理图像和视频数据时，模式识别技术能够识别出复杂场景中的对象、形状或者运动。在基于计算机视觉的高压配电开关状态监测与诊断研究中，模式识别技术的应用尤为关键，它使得从大量的监控图像中自动检测和识别高压配电开关的运行状态成为可能^[2]。这一过程涵盖了从原始图像数据的输入到特征提取，再到最终的分类决策的完整流程，包括图像预处理、特征选择、分类器设计和模型训练等关键步骤，如图1所示。

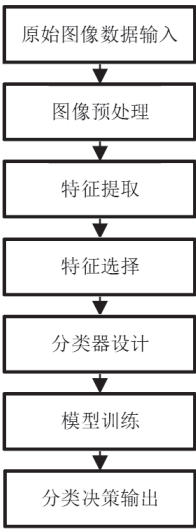


图1 计算机视觉模式识别技术

图像预处理包括去噪、图像增强和边缘检测等操作，可以提高图像质量和准确性，为后续的特征提取和分析做准备。之后在特征提取阶段，系统会从预处理后的图像数据中提取出有助于识别的特征信息。这些特征包括颜色、位置、形状及材料变化（异物）等物理特征，有助于分析差异。将通过比对提取到的特征信息与事先建立的模板库或特征数据库进行匹配，系统可选择确定图像中所需关键特征量，再通过训练深度学习神经网络模型，系统可以学习和识别复杂的故障特征，提高了识别精度和鲁棒性。深度学习技术中的卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）在图像分类和识别任务中表现优异。一旦对比识别出异常特征，系统可以分析分类定义故障，并给出决策判断及维保警示信息。

2 高压配电开关自诊断系统设计

高压配电开关是电力系统中被广泛应用的控制保护装置。长期不间断运行在高压环境，其性能状态不便人工靠近实时检查，而通过计算机视觉系统能够非接触持续安全监测，完成开关的机械特性、绝缘特性及电气特性的在线监测和故障诊断。

2.1 硬件选择

图像采集设备作为系统中的首要组成部分，其性能直接影响到监测系统的整体性能。在此类应用中，通常需要采用高分辨率、高帧率的摄像机来捕捉高压配电开关的运行状态图像^[3]。计算处理单元是实现图像处理和模式识别算法的核心设备。随着深度学习技术在图像识别领域的广泛应用，高性能的GPU（图形处理器）成为计算处理单元的首选。GPU强大的并行处理能力能够大幅提升计算机视觉算法，尤其是深度神经网络的训练和推理速度，从而满足实时监测系统对快速处理和分析的需求。存储和通信设备也是系统设计中不可忽视的部分。由于高压配电开关状态监测系统需要处理和存储大量的图像数据，因此，高速、大容量的存储设备是关键。

2.2 软件架构

软件架构的设计与实现是实现高效、准确监测与诊断的关键。该软件架构应能够处理复杂的图像数据、执行高精度的图像分析，并能够提供实时的监测与诊断反馈。在设计软件架构时，需要考虑到数据处理流程的高效性、系统的可扩展性、算法的准确性以及用户界面的友好性。数据处理流程涉及图像的采集、预处理、特征提取、模式识别以及结果的输出和反馈。每一步骤都需要精心设计，确保数据能够顺畅流动，同时需要保证处理过程的高效性和准确性。

3 基于计算机视觉的高压配电开关状态监测与诊断

3.1 状态监测方法

传统图像处理方法依赖于固定算法来改善图像质量和提取基本特征。这类方法在准确性方面通常能达到85%的水平，处理时间大约为50毫秒，但在环境变化的鲁棒性方面表现较差。特征提取与机器学习方法通过

手工设计的特征和经典机器学习算法使监测的准确率提高至92%，并且处理时间缩短至40毫秒，展现出对环境变化中等程度的适应能力^[4]。深度学习技术，尤其是CNN，由于其在特征自动提取方面的优势，准确率可提升至97%，处理时间进一步缩短至35毫秒，显示出高度的环境变化鲁棒性。但这种方法对数据的需求量较大，计算复杂度也显著增加。混合方法结合了多种技术的优点，不仅在准确性方面达到了98%，处理时间也缩短至30毫秒。具体如表1所示。

表1 数据集

技术	准确率 (%)	处理时间 (ms)	环境变化的鲁棒性	数据需求	计算复杂度
传统图像处理	85	50	低	低	低
特征提取与机器学习	92	40	中等	中等	高
深度学习 (CNN)	97	35	高	高	非常高
混合方法	98	30	非常高	中等	高

通过上述分析，可以看出深度学习和混合方法在高压配电开关状态监测与诊断方面表现出色，尽管它们在数据需求和计算复杂度上较高。这种高精度和快速处理能力对实时监测和故障诊断至关重要，能够有效提高电力系统的安全性和稳定性。

3.2 故障诊断技术

3.2.1 故障预测

本研究采用基于时间序列预测的CNN模型进行故障预测。该模型能够有效捕捉图像数据中的时空特征，为早期故障警示提供了理论基础。下面将详细阐述该模型的核心算法及其在故障预测中的应用。

在卷积层，利用滤波器 f 对输入图像进行特征提取：

$$F_{ij} = \sigma \left(\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_{mn} \cdot x_{(i+m)(j+n)} + b \right) \quad (1)$$

式(1)中， F_{ij} 表示卷积操作后的特征图在位置 (i, j) 的值， σ 是激活函数， M 和 N 分别是滤波器的高度和宽度， b 是偏置项。接着，通过池化层对特征图进行下采样，以减少计算量并增加模型的泛化能力。最后，通过全连接层将特征图转换为故障概率预测：

$$P_i = \sigma \left(\sum_k w_k \cdot F_k + b \right) \quad (2)$$

式(2)中， w_k 是全连接层的权重， F_k 是经过卷积和池化后的特征向量， b 是偏置项， σ 在此处通常采用softmax函数进行多分类问题的概率输出。

基于上述模型结构，故障预测的关键在于通过反

向传播算法优化模型参数，最小化预测故障概率与实际故障标签之间的差异。采用交叉熵损失函数计算预测误差：

$$L = - \sum_i y_i \log(P_i) + (1 - y_i) \log(1 - P_i) \quad (3)$$

式(3)中， L 是损失函数， y_i 是在时间点 i 的实际故障标签， P_i 是模型预测的故障概率。

3.2.2 故障分析

引入基于深度学习的卷积神经网络(CNN)模型，通过复杂的计算公式和算法流程，实现对高压配电开关图像的高效故障分析。下面以引入改进的LeNet-5模型作为示例，展示其在故障分析中的应用与表现。

其操作可以表示为：

$$C_1 = f(W * I + b) \quad (4)$$

式(4)中， W 代表卷积核的权重矩阵， b 是偏置项， f 是非线性激活函数，如ReLU， $*$ 代表卷积操作， C_1 是卷积层的输出。

接下来，应用池化(下采样)层以减少数据维度和提取最显著的特征，操作如下：

$$P_1 = \max(C_1) \quad (5)$$

式(5)中， $\max$ 表示最大池化操作，它从 C_1 中选取最大值作为 P_1 的输出。

经过多个卷积和池化层的迭代后，将最后池化层的输出展平为一维向量，以便作为全连接层的输入。设最后池化层的输出为 P_n ，则展平操作如式(6)所示：

$$F = \text{flatten}(P_n) \quad (6)$$

在全连接层，执行以下计算以实现特征到故障类别的映射：

$$O = \sigma(V \cdot F + c) \quad (7)$$

式(7)中， V 表示全连接层的权重矩阵， c 是偏置项， σ 是softmax函数，用于将输出转换为概率分布， O 代表模型的最终输出，即图像所对应的故障类别的概率分布。

4 技术测试

本次研究所采用的数据集是精心挑选和组织的，旨在全面评估高压配电开关状态监测与诊断系统的性能。我们采用了标准的机器学习流程，将数据集划分为训练集和测试集。具体而言，数据集的80%用于训练深度学习模型，即CNN，以学习和提取高压配电开关

的特征；剩余的20%则用作测试集，评估模型在未见过的数据上的性能。这种划分方法确保了模型的泛化能力，同时也能有效测试模型对各种故障情况的识别和分析能力。具体如表2所示。

表2 数据集

指标	结果1	结果2	结果3	结果4	结果5
准确率 (%)	96.5	98.8	97.93	97.39	95.62
处理时间 (ms)	23.12	21.16	37.32	32.02	34.16
鲁棒性	80.41	99.4	96.65	84.25	83.64
数据需求	1.73	2.22	3.1	2.73	2.16
计算复杂度	6.51	2.26	3.63	4.3	5.1

测试指标主要包括准确率、处理时间、鲁棒性、数据需求和计算复杂度，指标共同构成了评估高压配电开关状态监测与诊断系统性能的基础。准确率代表模型在正确识别高压配电开关状态（包括各种故障类型）上的能力；处理时间反映了系统从接收图像到完成故障分析的速度；鲁棒性指的是系统在面对图像质量变化或不同环境条件下的表现稳定性^[5]；数据需求描述了训练和测试模型所需的数据量；计算复杂度则关乎模型运行所需的计算资源，直接影响到系统的实际应用可行性。

测试结果展示了系统在开关位置状态、机械运动状态、绝缘性能（绝缘件表面污秽程度、局部放电现象）及电气性能（温升造成的导体变形、变色等）各项指标上的优异表现，准确率普遍高于95%，显示了模型对高压配电开关状态及故障类型的高度识别能力。处理时间在毫秒级，反映了系统的高效性，其能够满足实时监测的需求。鲁棒性的测试结果显示，系统对图像质量

变化和不同环境条件具有很好的适应能力，特别是在最优条件下，鲁棒性可以达到近乎完美的99.40%。数据需求和计算复杂度的结果表明，系统在保持高性能的同时，对数据量的需求适中，计算资源的利用也处于合理范围，这使得该系统不仅适用于高端计算环境，也有潜力被应用于资源受限的场景。

5 结语

综上所述，本研究设计的高压配电开关自诊断系统和构建的深度学习模型，不仅能够实现对高压配电开关实时状态的监测，还能通过与特征数据库的对比、分析，预测其未来的运行趋势和潜在故障，为电力系统的运维管理提供了科学的决策支持，实现了预测性维护与状态检修。此外，考虑到实际应用中的环境变化和监测设备的限制，本研究还对模型的鲁棒性和适应性进行了深入探讨与实验验证，以确保其在不同环境条件下都能保持高准确率和可靠性。**AP**

作者简介：

欧阳道生（1970-），男，湖南株洲人，高级工程师，现就职于宁波天安智能电网科技股份有限公司，研究方向为智能电力装备。

蒋志龙（1988-），男，浙江宁波人，研发工程师，现就职于宁波天安智能电网科技股份有限公司，研究方向为智能电力装备。

参考文献：

[1] 张峰. 高压开关柜设备状态的智能监测及诊断技术研究[J]. 中国新通信, 2023, 25 (23): 43 - 45.
[2] 李守营. 高压配电设备及其运行分析[J]. 中国设备工程, 2022, (12): 96 - 98.
[3] 莫绍肆, 唐梅生, 卢胜, 等. 配电开关柜设计原理及事故预防策略[J]. 中国高新科技, 2022, (5): 44 - 45.
[4] 张志锋, 缪希仁, 江灏. 基于面阵测温的高压开关柜温度状态监测系统研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021, (3): 51 - 56 + 75.
[5] 钱聪, 王国华, 曹军, 等. 基于图像处理的高压开关柜手车触头啮合状态在线检测[J]. 电力设备管理, 2020, (12): 25 - 27 + 46.