[人工智能]

基于AI识别技术的火电厂设备缺陷智能诊断系统

文/施陆兴　胡中岳　王翔　张恒　蒋伟磊　孙平
浙江浙能嘉华发电有限公司

针对火电厂设备缺陷诊断工作量大、效率低、准确性有限等问题，引入深度学习和计算机视觉技术，建立一套基于AI识别的设备缺陷智能诊断系统。该系统集成了图像预处理、特征提取、缺陷识别和智能预警等功能模块，实现对锅炉、汽轮机和电气设备等关键设备的自动化巡检和缺陷诊断。

随着火电厂智能化转型的深入推进，传统人工巡检方式已难以满足设备状态监测和故障预警的需求。设备缺陷的及时发现和准确诊断是保障机组安全稳定运行的关键。近年来，人工智能技术在工业领域的应用日益成熟，特别是在图像识别、模式分类等方面取得显著进展。将AI识别技术应用于火电厂设备缺陷诊断，不仅能够提高检测效率和准确性，还能实现设备状态的智能分析和预警。为此，研究开发一套基于AI识别的设备缺陷智能诊断系统具有重要的工程应用价值。

系统总体设计

1. 系统架构设计

火电厂设备缺陷智能诊断系统采用分层架构设计，从底向上依次为数据采集层、数据处理层、业务应用层和用户交互层。数据采集层通过移动终端、智能摄像头、工业传感器等设备完成数据采集工作[1]。数据处理层负责对采集的原始数据进行预处理、特征提取和深度学习训练，通过分布式计算框架提升处理效率。业务应用层集成设备巡检、缺陷识别、故障诊断、预警分析等功能模块，并内置专家知识库。用户交互层采用B/S架构，提供Web端和移动端访问，支持多终端数据协同。系统各层通过标准接口实现数据交互，采用微服务架构确保系统扩展性和可维护性。

2. 功能模块划分

系统功能划分为设备管理、缺陷识别、智能诊断、预警分析和系统管理五大模块。设备管理模块实现设备台账维护、巡检计划制定和巡检任务执行，支持设备信息的动态更新和历史数据查询。缺陷识别模块基于深度学习算法，对采集的设备图像进行实时分析和分类标注。智能诊断模块结合设备运行参数和历史缺陷数据，利用专家知识库进行故障分析。预警分析模块对识别出的缺陷进行等级划分和风险评估[2]。系统管理模块负责用户权限管理和系统配置，各模块通过数据总线共享信息。

3. 数据流程设计

数据流程设计遵循"采集-处理-分析-应用"的闭环流程，如图1所示。设备图像数据由移动终端和固定摄像头采集后，经过图像增强、噪声消除和尺寸归一化等预处理，生成标准化输入数据。处理后的数据输入深度学习模型进行特征提取和缺陷识别，识别结果与设备基础信息和运行参数相结合，进入智能诊断环节[3]。诊断系统基于专家规则库，生成诊断结论和处理建议。分析结果推送至管理人员并存入历史数据库，通过持续评估和优化提升诊

断效果，实现设备缺陷的全过程智能化管理。

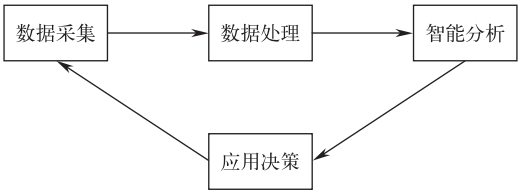

图1　数据流程设计图

关键技术实现

1. 图像处理与特征提取

图像处理采用多级预处理方案，通过增强、降噪和标准化处理提升识别准确性。移动终端采集的原始图像经自适应直方图均衡化处理，改善对比度和细节表现[4]。系统引入基于Retinex理论的照明补偿算法，实现图像亮度自适应调节。图像降噪采用改进的双边滤波算法，保留缺陷边缘特征同时抑制噪声。经处理后的图像通过仿射变换进行几何校正。特征提取基于Haar小波变换进行多尺度分析，特征向量定义为

$$F=\{H_1,H_2,\ldots,H_n\}\times W \tag{1}$$

式中，H_i为不同尺度下的小波系数；W为权重矩阵。

形状特征通过改进的HOG描述符提取，计算公式为

$$D(x,y)=\frac{\sum(G_i\times M_i)}{\sum M_i} \tag{2}$$

式中，G_i为梯度方向直方图；M_i为归一化系数。通过特征融合策略生成统一特征表达。

2. 深度学习模型构建

深度学习模型基于改进的YOLOv5架构构建，针对火电厂设备缺陷特点优化网络结构和推理效率。模型主干网络采用CSPDarknet53结构，通过深浅层特征融合和注意力机制提升特征提取能力。针对样本不平衡问题，引入Focal Loss损失函数和在线难样本挖掘策略优化训练过程。采用迁移学习方法提高模型泛化能力，利用预训练模型进行权值初始化。训练数据包括裂纹、磨损、变形等多类缺陷图像，通过多角度数据增强扩充样本。训练过程采用批量梯度下降和动态学习率调整策略，提高模型收敛性能。

3. 智能诊断决策方法

智能诊断决策采用基于知识图谱的推理机制，结合深度学习模型识别结果进行综合诊断和可靠性分析。知识图谱包含设备结构关系、缺陷类型、故障模式和维修经验等多维信息，通过本体建模和关系推理建立诊断知识网络[5]。诊断过程结合设备历史数据、运行参数和专家规则，采用改进的模糊综合评判方法进行故障严重程度量化评估。系统自动生成诊断报告和维修建议，通过机器学习持续优化诊断规则，实现从数据到决策的智能转化，为设备维护提供科学依据。

系统功能实现

1. 设备巡检管理

设备巡检管理模块通过智能移动终端和工业级摄像头实现设备状态的自动化监测。巡检任务管理系统根据设备重要程度和历史缺陷情况，制定差异化的巡检计划和巡检路线。移动终端集成高清摄像头和红外热成像仪，支持多角度的设备图像采集。固定式摄像头布置在关键设备区域，实现24 h监测。巡检人员通过扫描设备二维码，调取设备信息和历史记录，完成巡检数据采集。系统支持离线巡检模式，确保数据可靠记录。巡检数据经标准化处理后存入数据库，为设备评估提供支撑。

2. 缺陷识别分析

缺陷识别分析模块对采集的设备图像进行实时处理和分析，实现设备缺陷的智能识别和分类。系统针对不同类型设备建立专门的识别模型，涵盖裂纹、磨损、变形和腐蚀等多种缺陷类型。识别过程引入空间注意力机制和深度残差网络，提高对局部细节特征的提取能力和模型性能。系统对识别出的缺陷进行智能定位标注和面积测量，生成特征参数和可视化分析图表。识别结果与历史数据对比分析，通过缺陷演变规律模型预测发展趋势，为维护决策提供科学参考。

3. 预警分析与报告生成

如图2所示，预警分析模块基于多级预警机制，将缺陷风险划分为一般、重要和紧急三个等级。预警规则引擎结合设备运行工况、历史故障数据和专家经验，动态调整预警阈值。预警信息通过短信、邮件、APP等多渠道实时推送至责任人，系统支持预警处理的闭环管理。诊断报告生成模块采用智能化引擎，自动编制包含设备信息、缺陷图像、识别

结果和处理建议的标准化报告。系统支持多种格式导出和在线浏览，通过分级授权确保信息安全，并可根据用户需求自定义报告模板和统计分析功能。

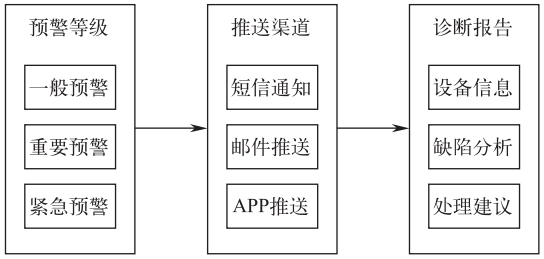

图2　预警分析与报告生成流程图

应用效果验证

1. 系统运行性能

火电厂设备缺陷智能诊断系统在某大型发电集团下属电厂进行为期6个月的试运行验证。系统服务器采用双机热备方案，配置32核CPU和128 GB内存，搭建分布式计算集群提升数据处理能力。系统平均响应时间小于100 ms，单张图像的缺陷识别处理时长控制在2 s以内，满足实时诊断需求。数据存储采用分布式架构，支持每日100 GB以上的数据写入，系统运行稳定可靠。移动端APP在4G网络环境下，图像上传速度可达2 MB/s，满足现场巡检要求。系统在试运行期间未发生重大故障，可用性达到99.9%以上。

2. 识别准确率分析

设备缺陷识别模型经过持续优化和数据积累，识别准确率显著提升。系统对不同类型设备缺陷的识别效果见表1。通过深度学习模型的迭代训练和专家知识库的不断完善，系统对典型设备缺陷的识别准确率普遍超过90%。模型在处理复杂工况和新型缺陷时，通过在线学习方式持续提升识别能力。

表1　不同类型设备缺陷识别准确率统计

缺陷类型	样本数量	识别准确率（%）	误报率（%）	漏检率（%）
裂纹	1 250	95.6	2.3	2.1
磨损	980	93.8	3.1	3.1
变形	850	92.4	3.8	3.8
腐蚀	760	91.2	4.2	4.6

3. 经济效益评估

智能诊断系统的应用显著提升设备缺陷管理效率，降低设备故障损失。系统投入使用后的经济效益分析见表2。通过及时发现和处理设备缺陷，减少非计划停运时间，提高设备可靠性。相比传统人工巡检方式，系统每年可节省巡检人工成本约50万元，同时通过预防性维护降低设备维修成本约150万元。

表2　系统应用经济效益分析

效益项目	应用前	应用后	改善程度（%）
年均停运次数/次	12	5	58.3
年均停运时长/h	96	35	63.5
检修人工成本/万元	180	130	27.8
备件消耗/万元	220	170	22.7

结束语

基于AI识别技术的火电厂设备缺陷智能诊断系统通过深度学习算法和计算机视觉技术的有机结合，实现了设备缺陷的自动识别和智能诊断。系统在某火电厂的实际应用表明，对典型设备缺陷的识别准确率达到91%～96%，年均设备非计划停运次数从12次降至5次，年均停运时长从96 h降至35 h，每年节省检修成本约200万元。该系统的成功应用为火电厂设备状态监测和故障预警提供了新思路，对推进发电企业设备管理智能化具有重要的示范意义。后续将进一步优化算法模型，拓展应用场景，为火电厂设备健康管理提供更加可靠的技术支撑。EA

（收稿日期：2025-03-10）

参考文献

[1] 孙林．基于人工智能技术的变电站二次设备智能巡检技术[J]．通讯世界，2024，31(8)：100-102．

[2] 王宣军，于虹，祁兵，等．基于注意力机制的混合神经网络电力设备缺陷文本挖掘方法[J]．电力信息与通信技术，2023，21(9)：44-51．

[3] 林卓，刘文哲．基于人工智能的竹条缺陷检测及分选技术应用研究[J]．海峡科学，2023(2)：91-95．

[4] 吴世席，夏选莉，李根健，等．深度学习在输配电线路缺陷检测中的研究现状与发展展望[J]．云南电力技术，2022，50(6)：9-13+22．

[5] 谢庆，张煊宇，王春鑫，等．新一代人工智能技术在输变电设备状态评估中的应用现状及展望[J]．高压电器，2022，58(11)：1-16．