[状态检测系统]

基于计算机识别技术的电气化铁路接触网设备状态检测系统

文/张利新
黄大铁路公司

针对电气化铁路接触网设备状态检测的需求，提出一种基于计算机识别技术的检测系统。该系统通过高速摄像机和激光扫描仪采集数据，经预处理和特征提取后，利用深度学习和机器学习算法实现设备状态的精准识别与故障诊断。实验结果表明，该系统能有效监测接触网设备的电气状态，为铁路安全运营提供有力保障。

电气化铁路作为国家重要的交通基础设施，在我国经济发展中发挥着关键作用。为适应高速铁路发展需求，提高铁路运输能力和服务质量，铁路部门高度重视电气化铁路接触网设备的运行安全与维护管理。传统的人工巡检方式效率低、劳动强度大，无法满足现代电气化铁路的管理要求[1]。近年来，随着计算机视觉、人工智能等技术的不断发展与成熟，将其应用于接触网设备状态检测成为行业关注的热点。本文在分析电气化铁路接触网设备检测需求的基础上，提出一种基于计算机识别技术的状态检测系统，以期为相关领域提供有益参考。

计算机识别技术概述

计算机识别技术是人工智能领域的重要分支，其核心在于通过算法模型实现对目标对象的自动检测、分类和识别。该技术涉及计算机视觉、模式识别和机器学习等多个学科，综合运用图像处理、特征提取和分类器设计等方法，构建能够模拟人眼视觉感知的智能系统。以卷积神经网络（CNN）为代表的深度学习算法，凭借其强大的特征提取和分类能力，在图像识别领域取得突破性进展[2]。同时，一些经典的机器学习算法，如支持向量机（SVM）、随机森林（RF）等，在特定场景下也展现出良好的性能。近年来迁移学习、小样本学习和增量学习等新兴技术为识别系统的优化提供了新思路。例如，采用预训练的VGG-16模型进行迁移学习，在自行采集的数据集上Fine-tuning，可大幅提升模型的泛化能力，降低训练成本。总的来讲，计算机识别技术正朝着更精准、更高效和更智能的方向不断发展，为智能交通、智慧城市和工业自动化等领域带来广阔的应用前景。

电气化铁路接触网设备类别及检测需求

电气化铁路接触网设备是列车获取电能的关键装置，其类别多样，包括导线、支柱、支臂、绝缘子和接触悬挂装置等。随着列车运行速度的提升，对接触网设备的电气性能提出了更高要求。例如，在高速铁路中，接触网导线的额定电压可达25 kV，电流传输能力需达到1 000 A以上，而普速铁路的额定电压一般为22.5 kV，电流传输能力在500 A左右。为确保列车牵引供电的可靠性和稳定性，接触网设备需进行全面的状态检测，重点关注导线磨损、接触力和电弧等电气参数[3]。以接触悬挂装置为例，其作用是实现车载受电弓与接触网导线的稳定接触，接触力的动态变化范围一般控制在80～120 N。若超出该范围，易引发导线磨损加

剧、电弧放电等问题，进而威胁行车安全。因此，亟需建立一套基于计算机识别技术的在线检测系统，实时监测接触网设备的电气状态，及时发现潜在故障，为检修维护提供决策依据，进而保障电气化铁路的安全运营。

系统设计

1. 系统基本原理

该系统利用计算机识别技术，通过高速摄像机、激光扫描仪等设备实时采集电气化铁路接触网设备的图像和点云数据。经过高斯滤波等预处理后，系统采用并行计算架构进行特征提取，识别设备的几何与缺陷特征。然后，通过深度学习与机器学习算法构建特征数据与设备状态的映射关系，实现精准的状态识别与故障诊断，最终生成报警信息和维护建议，保障铁路安全运营。系统的基本原理如图1所示。

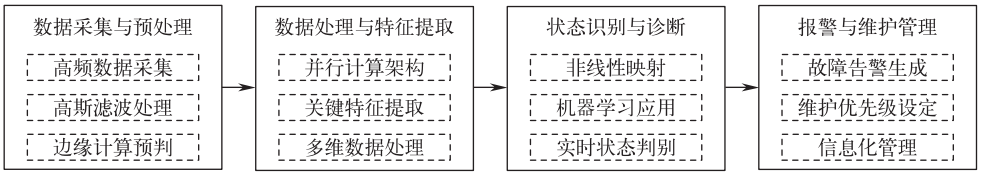

图1　系统原理

2. 系统组成及主要工作流程

（1）数据采集与预处理

数据采集与预处理是接触网设备状态检测系统的首要环节，其作用在于获取高质量的原始数据，为后续的特征提取与状态识别奠定基础。该环节主要由高速摄像机、激光扫描仪和惯性测量单元（IMU）等传感器设备组成，用于采集接触网导线、支柱和绝缘子等部件的图像与三维点云数据。其中，高速摄像机的帧率可达1 000 fps，分辨率达到1920 × 1080，满足高速运动场景下的数据采集需求。为减小数据冗余，提高信噪比（Signal-to-Noise Ratio，SNR），通常需对原始数据进行预处理[4]。设采集到的原始图像为$I(x,y)$，经过高斯滤波后得到预处理图像$I'(x,y)$，滤波过程可表示为

$$I'(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}I(u,v)e^{-\frac{(x-u)^2+(y-v)^2}{2\sigma^2}}\mathrm{d}u\mathrm{d}v \quad (1)$$

式中，σ为高斯核的标准差，取值一般为1.5～2.0。

预处理后的数据将被传输至边缘计算节点，进行特征提取与初步的状态判别，以减轻中心服务器的计算负荷。

（2）数据处理与特征提取

在接触网设备状态检测系统中，数据处理与特征提取环节接收来自数据采集与预处理阶段的图像与点云数据，通过一系列算法实现关键特征的自动提取。为处理海量的高维数据，该环节采用基于FPGA的并行计算架构，可实现高达100 TOPS的计算性能。同时，还集成了高速缓存模块和数据压缩模块，用于优化数据传输与存储效率。

该环节的核心在于设计高鲁棒性的特征提取算法，自动识别接触网导线、支柱和绝缘子等部件的几何特征与缺陷特征。以导线的磨损特征提取为例，首先采用Canny算子对图像进行边缘检测，得到二值化边缘图像$B(x,y)$。然后，通过霍夫变换提取导线边缘的直线方程

$$\rho=x\cos\theta+y\sin\theta \quad (2)$$

式中，ρ为直线到原点的距离；θ为直线与x轴的夹角。

通过计算导线上下边缘直线的距离变化，即可得到导线的磨损程度。类似地，支柱和绝缘子等部件的特征提取也可通过边缘检测、区域分割和形态学等计算机视觉算法实现。

（3）状态识别与诊断

在计算机识别技术驱动下的接触网设备状态检测系统中，状态识别与诊断直接决定着系统的检测准确度与可靠性。该环节以特征提取阶段得到的多源异构特征数据为输入，综合运用机器学习、深度学习等人工智能算法，对设备的健康状态进行精准判别与故障诊断。为实现实时在线的状态识别，该环节采用了基于GPU的高性能计算平台，并结合知识蒸馏等模型压缩技术，将识别时延控制在100 ms以内[5]。

状态识别与诊断的核心在于构建设备状态与特

征数据间的非线性映射关系。以接触网导线的状态识别为例，假设导线磨损量为y，导线电阻、电压和温度等特征变量分别为$x_1,x_2,\cdots,x_n$，则状态映射函数可表示为

$$y = f(x_1,x_2,...,x_n) = \sum_{i=1}^{m} w_i \phi_i(x_1,x_2,...,x_n) \tag{3}$$

式中，$\phi_i(\cdot)$为第i个核函数；w_i为对应的权重系数；m为核函数的数量。

该公式本质上是一个非线性回归模型，可通过支持向量机（SVM）、随机森林等经典机器学习算法进行训练。在实际应用中，还需结合专家知识构建故障诊断规则库，对识别结果进行进一步的推理与解释，提升诊断的可信度。

（4）报警与维护管理

作为接触网设备状态检测系统的终端环节，报警与维护管理模块肩负着将检测结果转化为实际运维行动的重任。该模块接收状态识别与诊断阶段的输出信息，通过预设的阈值规则生成故障告警，并结合设备重要性、故障严重程度等因素，给出维修优先级建议。同时，该模块还集成了工单管理、备件管理和维修评估等功能，实现检修全流程的信息化与智能化管理。系统采用微服务架构，可灵活拓展新的管理功能。

报警与维护管理的关键在于制定科学合理的阈值规则。以接触网导线磨损量ΔS为例，可基于导线安全电流承载能力，建立如下报警阈值模型

$$I_{\max} = \alpha \sqrt{\frac{S_0 - \Delta S}{S_0}} I_0 \tag{4}$$

式中，$I_{\max}$为导线安全载流量；I_0为额定工作电流；S_0为导线原始截面积；α为导线材质修正系数，取值范围0.8～1.2。

当ΔS超过一定比例时，导线载流量将显著下降，需及时触发故障告警α提示运维人员进行检修或更换。该模块还可挖掘设备故障发生的时空规律，建立预测性维修模型，在故障发生前主动采取预防措施。报警信息可通过APP推送、短信和邮件等方式自动下发至相关人员，实现运维管理的闭环。

系统实验与结果分析

1. 实验环境与实验方案

为全面评估本文提出的基于计算机识别技术的电气化铁路接触网设备状态检测系统的性能，在某高速铁路供电系统现场开展了为期3个月的测试实验。实验选取了6个典型供电分区，每个分区配备一套完整的检测装置，包括高速CCD相机（分辨率2048×1536，帧率500 fps）、工业红外热像仪（测温范围−20～800 ℃，热灵敏度0.06 ℃）、基于FPGA的边缘计算单元（计算能力200 TOPS）等。检测系统采集频率为每10 min 1次，单次采集数据量约2 GB。采集到的原始数据首先进行自适应直方图均衡化预处理，然后提取导线表面温度、电弧发生频次和接触悬挂装置振动幅度等电气特征，构建支持向量机（SVM）分类器实现设备状态识别。同时，通过搭建故障诊断专家知识库，提高检测结果的可解释性。实验评估指标包括状态识别准确率、故障检出率和误报率等。

结果分析

表1展示了基于计算机识别技术的接触网设备状态检测系统在不同运行工况下的电气特征参数监测结果。从表1中可以看出，接触网导线表面温度与列车运行速度密切相关，当速度从200 km/h提高至350 km/h时，导线平均表面温度从45.6 ℃上升至78.2 ℃，最高温度点可达95.1 ℃，接近铜导线的长期允许工作温度（100 ℃）。这一现象主要是由于高速状态下电流密度急剧增大，焦耳热效应显著所致。针对这一问题，系统及时发出高温预警，提示相关部门采取降温措施，如加大张力、增设散热装置等，避免导线过热而引发安全事故。

表1　不同运行工况下接触网设备电气特征参数

运行速度/（km/h）	平均温度/℃	最高温度/℃	电弧发生频次/（次/min）	接触悬挂装置平均振幅/mm
200	45.6	62.8	1.2	8.5
250	58.3	77.5	1.8	10.2
300	69.1	88.4	2.5	12.6
350	78.2	95.1	3.3	15.8

此外，系统还对接触网供电设备的故障状态进行了识别。表2给出了不同类型故障的检出性能指标。实验结果表明，该系统对闪络放电、接触不良等常见故障的检出率平均达到95.8%，且误报率控制在1%以内。系统识别出的故障设备可结合专家知

（下转第136页）

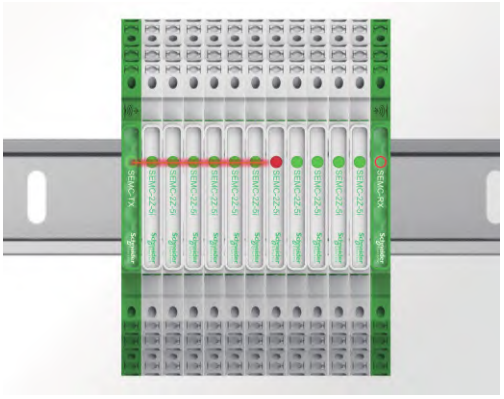

图8　智能遥信监测

本，更简单的选型，可以为石化工厂提供更加可靠，安全的电涌防护措施。创新型信号类电涌保护器解决了传统SPD的运维难题，更小的尺寸可以胜任更加苛刻的安装环境，同时智能监控功能将故障信号上传至后台监控系统，为石化行业提高自动化程度提供支持，为仪表控制系统的稳定性和可靠性提供了保障。

综上所述，新型电涌保护器解决方案的出现满足了石化行业发展的需求，促进了石化企业向更可靠，更安全，更高效的方向迈进。EA

（收稿日期：2024-10-12）

结束语

石化行业的生产环境相对复杂。因存在大量易燃、易爆物质，所以对电气设备的安全性要求极高。同时，石化工厂通常处于空旷地区或靠近海岸，容易遭受雷击等自然因素引起的电涌冲击。因此，石化行业迫切需要可靠、高效的电涌保护器来保障电气系统的稳定运行和生产安全。

一体式SPD因其更优秀的性能，更低的安装成

参考文献

[1] 低压电涌保护器（SPD）第11部分：低压电源系统的电涌保护器——性能要求和试验方法：GB/T 18802.11—2020[S].

[2] 低压电涌保护器专用保护装置：NB/T 42150—2021[S].

[3] 建筑物电子信息系统防雷技术规范：GB 50343—2012[S].

（上接第 127 页）

识库给出诊断原因与维修建议，如更换绝缘子、调整接触压力等，保障供电设备的可靠运行。综上，该系统利用计算机视觉与机器学习技术，实现了对电气化铁路接触网设备的电气状态实时监测，为精准维修、状态预警提供了新思路。

表2　接触网供电设备故障状态识别性能

故障类型	样本数量	检出数量	检出率（%）	误报数量	误报率（%）
闪络放电	120	118	98.3	1	0.8
接触不良	200	190	95.0	2	1.0
断股股	50	47	94.0	0	0.0
弓网脱离	80	75	93.8	1	1.3

结束语

本文成功研发了一套基于计算机识别技术的电气化铁路接触网设备状态检测系统，实现对设备状态的实时监测与故障诊断。实验验证系统的有效性和可靠性。未来，将继续优化算法模型，探索复杂环境下的数据增强方法，进一步提升系统的鲁棒性与实用性，为电气化铁路的安全运营贡献更多力量。EA

（收稿日期：2024-09-02）

参考文献

[1] 李振兴．基于远程数据采集的电气化铁路接触网设备状态检测[J]．自动化技术与应用，2024，43(4)：124-127+163．

[2] 李明军．3C装置在电气化铁路接触网设备运行中的应用研究[J]．机电产品开发与创新，2023，36(6)：156-158．

[3] 王志华．电气化铁路接触网设备维修的对策研究[J]．石河子科技，2022(4)：47-48．

[4] 孟大维．电气化铁路接触网设备维修策略[J]．光源与照明，2022(5)：183-185．

[5] 贺金圣．电气化铁路接触网设备维修策略探究[J]．中国设备工程，2022(5)：71-72．