

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.055

轨道接触网融冰装置融冰载流温升异常级联 U-Net 感知技术

张翼翔¹, 李旭日¹, 张向浩², 来宏炳²

(1. 国能朔黄铁路发展有限责任公司, 河北 肃宁 062300;

2. 四川拓及轨道交通设备股份有限公司, 四川 成都 610031)

摘要:融冰装置运行时, 趋肤效应影响了融冰载流温升效应, 无法表征温升异常状态, 难以感知融冰装置异常程度。为此提出轨道接触网融冰装置融冰载流温升异常级联 U-Net 感知技术。收集融冰装置运行时的轨道接触网图像, 利用 U-Net 结构中的下采样模块, 初步抽取温度梯度特征并对其进行降维, 利用上采样模块的反置卷积, 温度梯度特征进行级联恢复, 将多组温度梯度特征进行融合, 抽取温度梯度特征。计算熵值, 将温度梯度特征与温升异常级联恢复阈值进行对比, 判定融冰装置融冰载流温升的异常状态。计算异常程度值, 划分温升的异常程度, 实现感知。实验结果表明: 设计的感知技术在实际应用中的 AUC 值为 0.96, 能够准确感知融冰装置异常程度。

关键词:轨道交通系统; 接触网融冰装置; 级联 U-Net; 温升异常; 异常感知; 异常程度

中图分类号:TH16 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0291-04

Cascade U-Net Perception Technology for Abnormal Temperature Rise During Current Carrying Ice-Melting in Railway Catenary Ice-Melting Devices

Zhang Yixiang¹, Li Xuri¹, Zhang Xianghao², Lai Hongbing²

(1. Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Suning 062300, China;

2. SichuanTogee Rail-transit Equipments Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: During the operation of the ice melting device, the skin effect affects the temperature rise caused by current carrying during ice melting, making it difficult to characterize the abnormal state of temperature rise and difficult to perceive the degree of abnormality of the device. A cascaded U-Net based perception technology is proposed for detecting abnormal temperature rise during current carrying ice-melting in railway catenary ice-melting devices. Images of the railway catenary during device operation are collected. The down-sampling module in the U-Net structure is used to initially extract temperature gradient features and reduce their dimensionality. The up-sampling module's transposed convolution is then employed for cascaded recovery of these features. Multiple sets of temperature gradient features are fused to extract comprehensive temperature gradient characteristics. The entropy value is calculated, and the features are compared with a cascaded recovery threshold for abnormal temperature rise to determine the abnormal state. The abnormality degree value is calculated, and the temperature rise anomaly level is classified, thereby achieving perception. Experimental results show that the designed perception technology achieves an AUC value of 0.96 in practical applications, enabling accurate perception of the abnormality degree of the ice-melting device.

Keywords: rail transit system; catenary ice-melting device; cascade U-Net; abnormal temperature rise; anomaly perception; abnormality degree

0 引言

接触网负责为列车供给电能。在极端低温环境下, 接触网表面极易形成覆冰。覆冰的形成不仅会影响受电弓的正常取流, 降低列车供电的可靠性, 还可能引发导线断线、设备损坏等严重后果, 从而威胁行车安全。

因此, 不少研究学者针对这一问题展开了研究。王志磊等^[1]利用 KNN 算法, 构建温度故障辨识模型, 对开关柜母排的故障状态进行识别。但

该方法处理的数据量较大。杨天谥等^[2]在核密度估计法的基础上, 通过拟合各个值输出检测结果。但该方法在边界附近的估计结果仍然存在一定误差。刘德胜等^[3]利用 Zigbee 技术和温升传感器, 实时监测开关设备内部的温度变化。该方法利用多个阈值对温度异常进行判定, 计算量较大。杨阳等^[4]根据透平轮间内部结构和运行特点, 对发电机组的温度异常进行识别, 制定紧急预案。该方法在应用过程中, 若环境温度较高, 将会导致监测结果出现偏差。

第一作者简介:张翼翔(1968—), 男, 山西原平人, 高级工程师, 学士, 研究方向为铁路供电, zsj5ejddf@163.com。

本文设计了轨道接触网融冰装置,融冰载流温升异常级联 U-Net 感知技术,为后续的故障处理和维修提供可靠的数据支持。

1 轨道接触网融冰装置融冰载流温升异常感知技术设计

1.1 融冰载流温度梯度特征抽取

收集不同载流条件下的轨道接触网图像,并对轨道接触网图像进行增强处理,提高轨道接触网图像质量^[5-7],同步提取出轨道接触网图像的温度梯度特征。

级联 U-Net 获取与融冰过程中相关的温度梯度特征信息,进而提取出不同尺度的温度梯度特征信息^[8-10]。

级联 U-Net 的特征提取结构如图 1 所示。

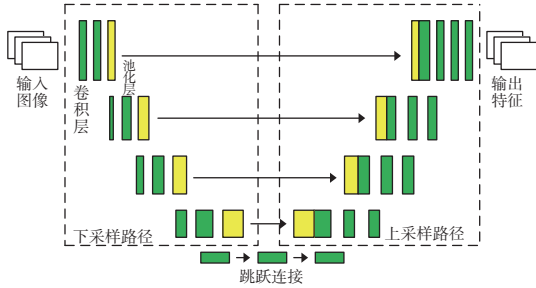


图 1 级联 U-Net 的特征提取结构

由图 1 可知,下采样路径中,利用卷积层和激活函数,可提取出输入数据的局部和全局温度梯度特征^[11-13]。

下采样路径的温度梯度特征提取过程如下所示

$$Y_x = \sum_{i=1}^n X_s \times w_i \times f_i + b_i \quad (1)$$

式中: Y_x 表示下采样路径的温度梯度特征初步提取结果; X_s 表示融冰装置轨道接触网图像; w_i 表示第 i 层卷积层的权重系数; f_i 表示卷积核函数; b_i 表示第 i 层卷积层对应的偏置项。

利用卷积层提取出输入数据的多个温度梯度特征,并在池化层中对温度梯度特征进行降维,输出温度梯度特征提取结果^[14]

$$C_x = \sigma(w_c \times Y_x + b_c) \quad (2)$$

式中: C_x 表示池化层的输出结果; w_c 表示池化层的权重系数; $\sigma()$ 表示池化函数; b_c 表示池化层的偏置项。

通过下采样路径,对温度梯度特征进行逐一降维,借助跳跃连接,将其输入到上采样路径中。

在上采样路径中,利用反置卷积,对输入的温度梯度特征进行级联恢复,再将多尺度温度梯度特征进行融合,由此提取出与融冰装置载流温升异常相关的温度梯度特征^[15-17]

$$Y_s = \sum_{j=1}^m C_x \times J_z \times W_j + B_j \quad (3)$$

$$T_r = \sum_{s=1}^H Y_s \times k_s \quad (4)$$

式中: Y_s 表示上采样路径中的级联恢复函数; J_z 表示转置卷积核函数; W_j 表示转置卷积层权重值; B_j 表示偏置项; m 表示转置卷积层数量; T_r 表示上采样路径输出层结果; k_s 表示温度梯度特征尺度系数; H 表示温度梯度特征尺度数量。

1.2 考虑温度梯度特征的温升异常状态判别

计算多个温度梯度特征的熵值,将其与温升异常级联恢复阈值对比,判定当前融冰装置的温升是否处于异常状态^[18-19]。

温度梯度特征熵值的计算公式如下所示

$$P(T_r) = \frac{T_r}{N} \quad (5)$$

$$H_r = -P(T_r) \log_2 P(T_r) \quad (6)$$

式中: $P(T_r)$ 表示选取温度梯度特征为 T_r 的概率; N 表示温度梯度特征数量; H_r 表示熵值。

基于温度梯度特征熵值 H_r ,将其与温升异常级联恢复阈值进行对比。若高于温升异常级联恢复阈值 H_r ,则融冰装置融冰温升存在异常状态^[20],反之,若低于温升异常级联恢复阈值 H_r ,则当前状态为正常状态^[21]。

基于 H_r ,判定出融冰装置融冰载流温升的异常状态。

计算异常程度值,感知其异常程度^[22]

$$Y_m = \frac{H_r - u_h}{\sigma_h \times P_k \times r_l + M_c \times L_a} \quad (7)$$

式中: Y_m 表示温升异常程度值; u_h 表示异常状态熵值均值; σ_h 表示异常状态熵值标准差; P_k 表示异常状态出现的概率; r_l 表示异常状态窗口值; M_c 表示异常状态持续的时间窗口长度; L_a 表示异常状态变化系数。

基于 Y_m ,确定异常程度。不同程度的异常可以直接反映融冰装置的当前状态^[23-25]。

2 实验

以城市接触网融冰装置为研究对象,融冰过程中,最小融冰装置电流为 200 A,最大融冰电流

为 2 000 A,融冰电压为 500 V。根据冰层的厚度和环境温度的不同,融冰时长区间为 1 min~5 h。利用 Fluke TiX1000 红外热像仪收集融冰装置的轨道接触网图像。探测器分辨率为 1 024×768 px,视场角为 32.4°(H)×24.7°(V),空间分辨率为 0.6 mRad,温度测量范围为-40℃~1 200℃,热灵敏度为 50 mK,帧频为 60 Hz。

引入级联 U-Net 结构,提取出融冰装置的温度梯度特征,如表 1 所示。

表 1 级联 U-Net 结构值

网络层	核大小	步长	填充	输出通道
卷积层 1	3×3	1	1	64
池化层 1	2×2	2	0	64
卷积层 2	3×3	2	2	128
池化层 2	2×2	1	1	128
卷积层 3	3×3	1	0	256
池化层 3	2×2	1	0	256
转置卷积层 1	3×3	1	1	128
转置卷积层 2	3×3	2	2	128
输出层	1×1	1	0	128

如表 1 所示,提取出融冰装置轨道接触网图像的多个温度梯度特征。设定 Dropout 值为 0.3,批量大小为 64,学习率为 0.005。

为验证级联 U-Net 的性能优势,采集铁路现场的 10 000 张红外接触网图像(含正常/异常状态),标注温升异常区域及温度梯度标签,采用对比方法,将其与单 U-Net 方法进行实验。

单 U-Net 模型的参数数量设置为 8.7 M,输入分辨率为 512×512 px,其关键改进为经典编码器-解码器结构;级联 U-Net 模型的参数数量为 12.1 M,输入分辨率设 512×512 px,其关键改进设置为三级级联以及跨层温度梯度特征融合。得到不同方法实验结果如表 2 所示。

表 2 不同方法实验结果

U-Net 模型类型	mIoU	温升误差/℃	FPR/%	FPS
单	78.5	2.1	9	45
U-Net	86.7	1.3	4	32

mIoU 为异常区域分割精度;温升误差为预测异常区域与实际均方温;误报率(FPR)为正常样本被误判为异常的比例;推理速度(FPS)为在 NVIDIA Jetson TX2 上的实时性能。由表 2 可知,级联结构在精度上显著优于单 U-Net(+10.4% mIoU);

温升误差小于另外一种方法;FPR 和 FPS 值也均小于另外一种方法。证明了本文方法具备更优越的综合性能。

在下采样路径和上采样路径中,设定激活函数,以便提取出更为准确的温度梯度特征,实现更为精准的级联恢复。激活函数如图 2 所示。

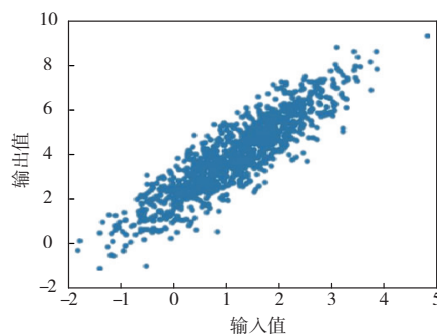


图 2 激活函数

计算温度梯度特征熵值,将其与温升异常级联恢复阈值进行对比,识别融冰装置融冰载流温升的异常状态。

选择基于核密度估计的船舶柴油发电机组冷却水温度异常检测方法、GE 航改型透平发电机组高速动力透平轮间温度监测及异常排除方法两种方法作为对比组,分别将其设定为方法 1 和方法 2。

对轨道接触网图像进行温升异常感知,确定其温升异常区域及程度。3 种方法的感知结果如图 3 所示。

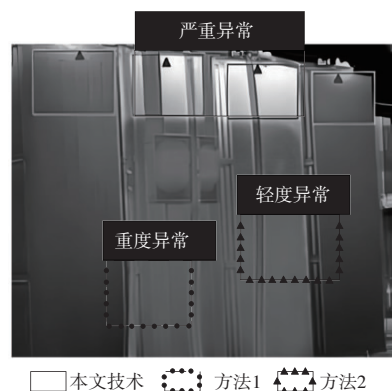


图 3 3 种方法的感知结果

如图 3 所示,本文技术感知到融冰装置温升异常程度与实际的温升异常程度相同。对比组两种方法的感知结果与实际感知结果存在较大差异。本文方法引入级联 U-Net 结构,能够抽取轨道接触网图像的多个温度梯度特征,进而准确感知到融冰装置的温升异常。

基于图 3 所示的感知结果,以感知结果的 AUC 值为评价指标,对比 3 种方法的感知精度,如图 4 所示。

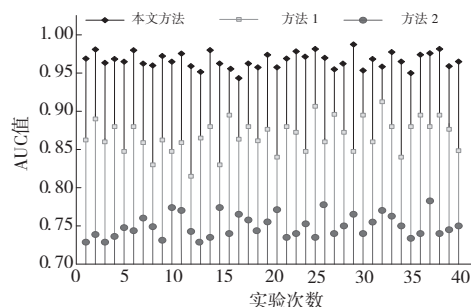


图 4 3 种方法的 AUC 值

如图 4 所示,本文方法的 AUC 值较高,其均值为 0.96,方法 1 的 AUC 均值为 0.85,方法 2 的 AUC 均值为 0.74。这是因为本文方法在设计时应用了 U-Net 结构,其能够提取出更为准确的融冰装置融冰载流温升温度梯度特征,使得方法的感知结果更为准确。

3 结语

本研究在应用过程中,级联 U-Net 凭借其强大的温度梯度特征提取能力,有效地识别出融冰载流过程中的温升异常点,为及时采取维护措施提供了科学依据。它不仅大幅提升了轨道接触网的安全性,还降低了因温升异常导致的潜在事故风险,对保障铁路运输的顺畅与高效具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王志磊,缪希仁,张志锋,等. 开关柜母排多点面阵测温与温升异常辨识方法[J]. 福州大学学报(自然科学版),2023,51(6):790-797.
- [2] 杨天谕,程根钟,杜剑维,等. 基于核密度估计的船舶柴油发电机组冷却水温度异常检测方法[J]. 船舶工程,2022,44(增刊1):487-494.
- [3] 刘德胜,罗进响,张宗森,等. 24 kV 高压开关设备温升异常识别方法研究[J]. 电器工业,2024(3):49-53.
- [4] 杨阳,贾冬冬,姚仲坤,等. GE 航改型透平发电机组高速动力透平轮间温度监测及异常排除方法[J]. 天津科技,2024,51(11):4-7.
- [5] 李岩,刘玉娇,胡凡,等. 电力电缆接头温度异常故障远程在线监测系统[J]. 自动化技术与应用,2024,43(6):90-93,102.
- [6] 张厅瑞,梁曼安,李伯乐. 基于形态学处理和计量测量的端盖图像识别研究[J]. 机械制造与自动化,2025,54(2):181-185.
- [7] 赵海波,周佳明,张帅. 接触网覆冰工况下城市轨道交通线路弓网关系研究[J]. 城市轨道交通研究,

2025,28(2):85-89.

- [8] 郭成英,韩玉,陶梦江,等. 基于自适应支持向量机的变压器温度异常检测方法[J]. 环境技术,2024,42(4):77-83.
- [9] 赵宇,王晓东,吕海华,等. 基于场景判别的风电齿轮箱温度预测及趋势异常预警方法[J]. 电力科学与工程,2024,40(2):61-70.
- [10] 万昊,张锦花,连文磊. 滚动轴承温度场仿真与试验研究[J]. 机械制造与自动化,2024,53(5):108-112.
- [11] 梁花,李玮,高爽,等. 一种基于链形混合拓扑的输电线路温度异常检测方法[J]. 广东电力,2022,35(2):101-109.
- [12] 高建敏,金忠凯,赖思成. 温度梯度荷载对 CRTS II 型板式轨道层间损伤影响[J]. 铁道工程学报,2022,39(1):25-32.
- [13] 勾红叶,陈子豪,刘畅,等. 基于实测数据的高海拔大日温差地区拱上组合梁桥-无砟轨道体系温度场研究[J]. 铁道学报,2024,46(2):159-170.
- [14] 关家华,郑楚韬,简淦杨,等. 基于粒子群优化 SVM 的 LSTM 电缆温度异常预测算法[J]. 工业控制计算机,2024,37(1):55-56,102.
- [15] 袁圆,朱华. 半潜式油气生产平台干气压缩机移相变压器温度异常分析与处理[J]. 化纤与纺织技术,2024,53(1):80-82.
- [16] 付广旭,卢东斌,张靖,等. 特高压直流在线融冰技术及其工程应用[J]. 电气技术,2024,25(4):77-84.
- [17] 甘战,严敏,侯云川. 融冰方式下接地极线路阻抗监视告警原因与改进[J]. 自动化应用,2023,64(8):15-17.
- [18] 郭涵涛,滕伟,高晨,等. 基于状态切分与时间卷积网络的风电齿轮箱系统温度异常故障预警[J]. 风机技术,2023,65(4):65-71.
- [19] 张惠强,高娟娟,任晓旭,等. 基于 CatBoost 机器学习模型的风电机组机舱温度异常预警研究[J]. 太阳能,2023(1):49-55.
- [20] 吴宇,蒋雨良,姜良奎,等. 基于 AHP-熵值法优化决策的轨道车辆轴承异常温升检测模型[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(11):2909-2919.
- [21] 马良玉,耿妍竹,梁书源,等. 基于 Stacking 多模型融合的风电机组齿轮箱油池温度异常预警[J]. 中国电机工程学报,2023,43(增刊1):242-251.
- [22] 李坤泰,余又红. 基于 DAE-iForest 的燃气轮机排气温度异常检测[J]. 舰船科学技术,2023,45(24):132-136.
- [23] 傅振亮,张建敏,罗崑,等. 电池充电状态和电压/温度异常联合故障诊断[J]. 科学技术与工程,2024,24(8):3260-3268.
- [24] 季德惠,肖丽,熊光耀,等. 极端温/湿环境下弓网接触副载流摩擦学特性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2024,21(11):4735-4745.
- [25] 潘浩,周仿荣,耿浩,等. 双导体热地线融冰电流与融冰时间计算方法[J]. 智慧电力,2025,53(3):62-68.

收稿日期:2025-04-01