

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.024

基于迁移学习与残差网络的配电网故障诊断

周庭栋¹, 尚海², 何永涛², 李盼盼³, 甘平³

(1. 云南电网有限责任公司红河供电局, 云南 蒙自 661100; 2. 云南电网有限责任公司, 昆明 650000;
3. 合肥溢鑫电力科技有限公司, 合肥 230000)

摘要: 配电网单相接地故障占比较高, 存在多种故障类型。如果不同类型的接地故障进行适当的处理, 能有效提高配电网的可靠性和可用性。然而, 如何快速区分不同的故障类型, 一直以来是一个研究热点。本研究针对高阻接地故障电流和电压特征不明显导致的高阻接地故障检测困难的问题, 提出了一种创新的解决方法, 即采用迁移学习和深度残差网络对高阻接地故障进行识别。首先, 提取单相接地故障后2个周期内的零序电压数据, 利用小波变换将零序电压映射为二维时频图; 其次, 搭建深度残差网络, 通过冻结底层参数实现小样本迁移, 微调参数对不同的故障样本分类。为了验证算法有效性, 搭建了10 kV配电网模型进行仿真。经实验证明, 采用该方法可有效检测弧光高阻接地故障信号, 并准确识别出这类接地故障。

关键词: 配电网; 深度残差网络; 迁移学习; 小波变换; 弧光高阻接地

Fault Diagnosis for Distribution Networks Based on Transfer Learning and Residual Network

ZHOU Tingdong¹, SHANG Hai², HE Yongtao², LI Panpan³, GAN Ping³

(1. Honghe Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Yunan Mengzi 661100, China; 2. Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China; 3. Hefei Yixin Electrical Science and Technology Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: The single-phase grounding faults in the distribution network account for a relatively high proportion, and there are various types of faults. If different types of grounding faults are handled appropriately, both reliability and availability of the distribution network can be effectively improved. However, how to quickly distinguish different types of faults has always been a research hotspot. In this study, an innovative solution is proposed to solve the problem of high resistance grounding fault detection difficulties caused by the unobvious characteristics of high resistance grounding fault current and voltage, that is, the high resistance grounding fault is identified by using transfer learning and deep residual network. First, the zero-sequence voltage data in 2 cycles after the single-phase ground fault is extracted, and the zero-sequence voltage is mapped into the two-dimensional time-frequency map. Then, a deep residual network is built, the small sample migration is achieved by freezing underlying parameters, and different fault samples is classified by fine-tuning parameters. To verify the effectiveness of the algorithm, a 10 kV distribution network simulation model is set up. It is proved by experiment that application of this method can effectively detect arc high resistance grounding fault signals and accurately identify such grounding faults.

Key words: distribution network; deep residual network; transfer learning; wavelet transform; arc high resistance grounding

0 引言

配电网中单相接地故障发生频率较高^[1-4], 在线准确识别配电网故障是及时处理故障的关键步骤,

也是保障配电网正常运行和快速恢复的重要环节。如果不能及时判定故障类型, 故障可能沿着配电网向上游或向下游传播, 发展为相间故障等, 严重威胁电网的安全运行。

收稿日期:2025-09-17; 修回日期:2025-11-25

基金项目:云南电网公司科技项目计划资助(YNKJXM20220105)。

Project Supported by Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Company(YNKJXM20220105).

单相接地故障类型识别的一个重要挑战来自于类型多样。根据过渡电阻的大小,可以将单相接地故障划分为金属性接地、低阻接地以及高阻接地。与金属性接地与低阻接地相比,高阻接地故障特征不明显,零序电压可能小于相电压的15%,故障电流可能小于1 A,给故障的检测带来困难^[5-6]。

值得庆幸的是,可以根据配电网的故障暂态电气量包含的丰富的故障信息理解并识别故障的类型,即将故障信号提取特征后再进行故障的分类识别。例如白浩等通过S变换变换与随机森林实现特征提取与特征筛选,再使用随机森林组成的协同训练半监督分类器进行分类^[7]。曾晶等对零序电流进行广义S变换,将时频矩阵各行所对应的能量处理后输入到极限学习机进行识别^[8]。郑星炯等对零序电流采样进行傅里叶变换,将其基波、谐波及间谐波的能量组成特征向量输入支持向量机^[9]。当接地电阻故障合闸角在特定情况下,算法会发生误判。许光等应用大数据技术理论、模糊C-均值聚类分析法来提取故障特征量的阈值,进而提升单相接地故障准确性研究^[10]。然而,目前算法的研究仍然存在两个挑战。

1) 频谱分析容易受到与高阻故障的特征相似的扰动(如开关操作、负荷投切、电容器投入等)的影响而失效^[7]。

2) 算法抗噪能力较弱,易受噪声影响,致使算法灵敏性较低。

为了应对挑战,提出了基于迁移学习与深度残差网络的弧光高阻接地故障辨识算法。首先,对零序电压故障特征提取。然后,搭建深度残差网络识别故障类型。根据实际某地配电网的参数,搭建了配电网模型进行仿真。通过采集零序电压的故障数据,对高阻接地故障、低阻接地故障及电弧接地发生后配电网零序电压的时频域分布特征进行提取,搭建迁移学习与深度残差网络进行配电网故障类型检测。实验表明,针对中性点不接地系统,此方法可以有效判断故障类型,具有较高的有效性和实效性,能有效解决本领域的两个挑战问题。

1 研究背景

1.1 高阻接地故障

高阻接地定义:按照过渡电阻的不同,可将单相接地故障划分为3类:金属性、低阻和高阻。根据实验数据以及故障成因,当过渡电阻达500 Ω 以上时,判断为发生高阻接地故障^[11]。

高阻接地故障类型:根据故障成因将树障、导线坠地等称为高阻接地,实验数据表明,高阻抗地面阻值通常在500~1000 Ω 以上,对于干燥柏油路面,阻值甚至能达上万 Ω ^[12],树闪放电时可达3 k Ω 以上,人体触电电阻可达1.5~2.5 k Ω 以上^[13]。

高阻接地危害:由于高阻接地故障在检测方面存在一定的困难,在配电线路发生高阻接地故障时,如果不能及时处理,就会导致相间绝缘损坏,甚至可能引起相间故障,对电网的安全运行构成严重威胁。此外,在高阻接地故障发生时,常常会产生电弧,引起相邻线路故障和保护装置错动,甚至引发触电和火灾等严重事故,对设备和人身安全带来极大的风险和损失。

1.2 高阻接地故障检测算法调研

李天友等通过系统中性点偏移电压估算过渡电阻大小,识别故障为高阻接地故障或低阻接地故障^[14]。但是当过渡电阻很小时,线路正、负序阻抗会使得计算误差过大。耿建昭等提出了基于零序电流波形凹凸性分析的高阻接地故障检测方法,并通过延时躲过电容器投切带来的干扰^[15]。但在零序电流幅值较小或信噪比较小时容易出现故障检测失效。

时域分析法易受噪声影响,抗噪能力较弱致使算法灵敏性较低。周封等利用高阻接地故障时故障相相电压中高次谐波作为判别依据。频域分析法的优势在于能够通过对不同频率范围、基波和谐波的分析,有效地解决故障电气量波形畸变复杂、信息量巨大等问题^[16]。但是电容器投切、负荷变化等暂态扰动以及不同的故障条件同样会影响到频域分析法的可靠性,不能仅考虑零序电压的频率分布^[17]。

深度学习方法被广泛用于时间序列分类进行故障诊断^[18-20],如多级小波分解网络、时间序列注意原型网络。通过对电压、电流等各种监测信号进行采集和处理,提取数据特征。时间序列分类技术可以有效的分类和识别,帮助工程师及时发现故障并进行维修,保障配电网系统的正常运行和稳定性。

2 基于深度残差网络的高阻接地故障类型检测

2.1 问题描述

中性点不接地系统单相接地故障示意图见图1, E_A 、 E_B 、 E_C 分别为系统三相电源电势, N 为系统中性点。K 处发生 A 相单相接地故障,其中弧光高阻接地故障模块采用电弧模型和故障电阻串联而成,表示为故障点的过渡电阻。发生单相接地故障时,故障电阻产生分压,反映到故障相电压中,从而

可以通过零序电压反映出来。

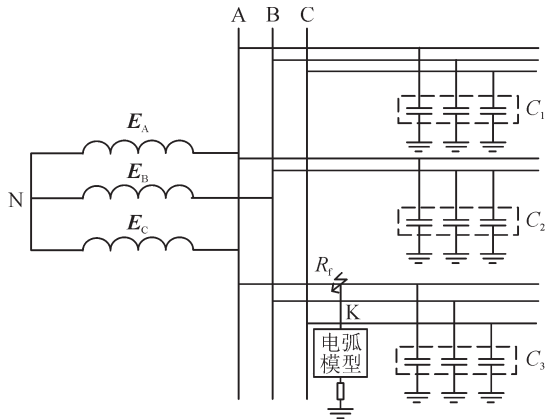


图1 中性点不接地系统单相接地故障示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-phase grounding fault of neutral ungrounded system

高阻接地故障伴随着间歇性电弧的产生,电弧的重燃与熄灭和接地介质的非线性是故障电流出现非线性畸变的主要原因。以A相接地故障为例,故障点的电流见图2(a),故障电流波形在过零点发生畸变,电流上升(下降)缓慢,出现明显的“零休”且不超过20 A。

如图2(b)所示,将故障信号进行频谱分析得到功率谱,可看出频域特征无法表征“零休”现象周期性出现的规律。此外,发生负荷、电容器投切时,线路电流会产生相同数量级的波动,导致频谱分析时各馈线中会产生与高阻故障时零序电流相似的干扰^[21]。高阻接地故障在不同的接地介质、中性点接地方式下故障电流特征发生变化,并且“零休”现象可能变得微弱,或出现偏移等情况。

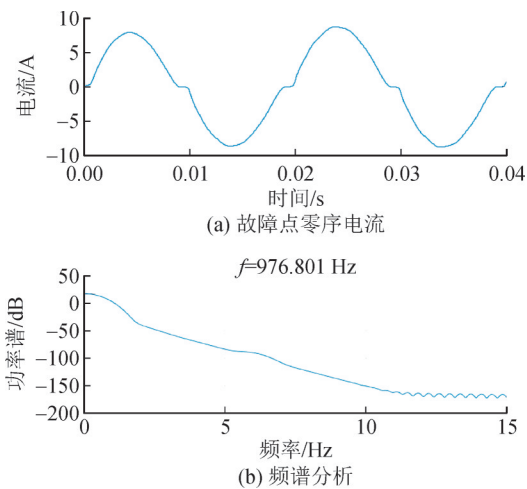


图2 弧光高阻接地故障电流

Fig. 2 Fault current of arc high resistance grounding

由于负荷、电容器投切干扰往往只是存在于相当短的一段时间内,只采样两个周期的零序电压信号不能判断是否发生弧光高阻接地故障。文中选

取采样频率为1 MHz。当零序电压出现周期性的故障特征才判定为弧光高阻接地。因为收集到的信号时间较短,以采集50次为一轮,验证时算法的执行时间不过2 s。

2.2 算法流程

针对上述挑战,提出了如下故障类型识别流程图3。

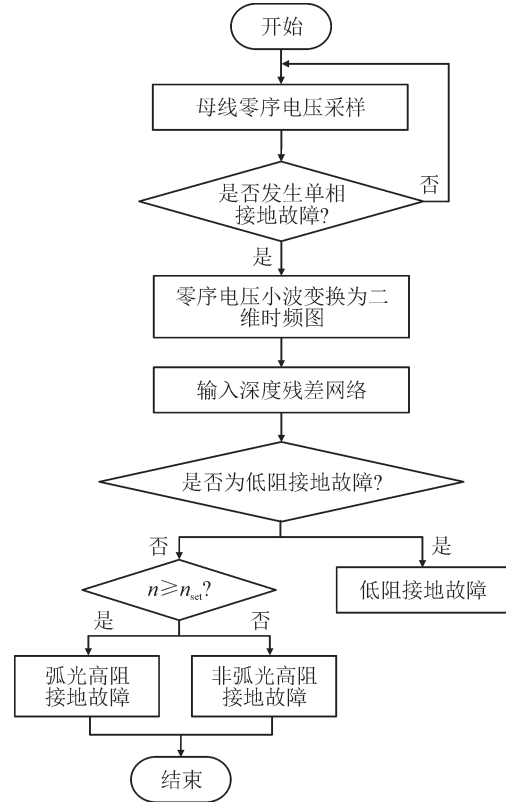


图3 单相接地故障类型识别流程图

Fig. 3 Flow chart of single-phase ground fault type identification

步骤1,对配电网零序电压进行采样,若零序电压有效值超过 $0.15 U_m$,则认为配电网中发生了故障。

步骤2,采样时长为两个周期的零序电压信号,对零序电压进行时频分析。

步骤3,时频图输入深度残差网络进一步判断故障类型。在确定不是低阻接地故障后,采集50轮零序电压信号,若排除为负荷、电容器投切干扰的可能性,则判断为弧光高阻接地故障。

2.3 根据时域信号进行特征提取

连续小波变换优于短时傅里叶变换(STFT)^[22],基于小波变换,提出了一个一维电压信号特征提取算法,将一维信号转换为二维时频信号,连续小波变换定义为:

$$W_{\psi}(S, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(x) \psi_{s, \tau}(x) dx \quad (1)$$

$$\psi_{s, \tau}(x) = \frac{1}{\sqrt{S}} \psi\left(\frac{x - \tau}{S}\right) \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $S > 0$ 为尺度因子; τ 为平移因子;

$\psi(\frac{x-\tau}{S})$ 是尺度因子和平移因子函数。

研究采样频率选取为 1 kHz。根据小波在频率和时间上的能量扩展, 自动确定最小和最大尺度。如图 4 所示, 与时域信号中微弱的“零休”现象相比,

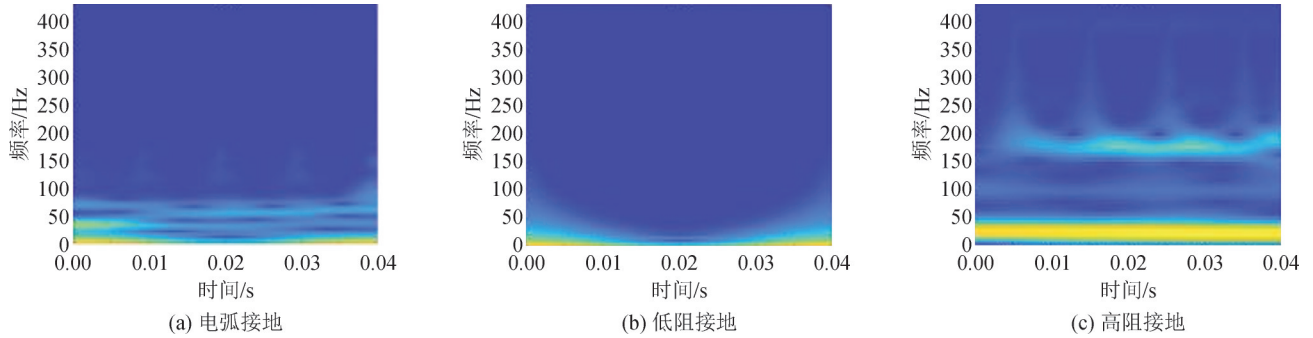


图 4 不同接地故障下零序电压时频图

Fig. 4 Time frequency diagram of zero-sequence voltage under different ground faults

2.4 故障类型识别的网络设计

提出了一种基于迁移学习与残差网络故障检测算法。观察到零序电压波形作为一个强时间序列, 其前后输入具有强烈的关联性, 因此本研究中采用深度残差网络来辨识, 学习时序图像中潜在的时间关联性。模型选用在 ImageNet 图像数据集上训练的 ResNet18 模型^[23], 见图 5。

网络层数的增加可以增强神经网络的表达能力, 但是根据神经网络反向传播原理会导致梯度消失和梯度爆炸。深度残差网络通过残差学习试图从根本上解决退化的问题。其中, ResNet18 中的残差结构图见图 6。与传统的卷积网络相比, 残差块的捷径连接通过恒等映射实现了输入的直接连接, 使得有参层的输出 x 可以与输入通过恒等映射 $I: x \rightarrow x$ 实现连接, 从而提高了神经网络的学习效率。两部分连接对应的映射关系可以分别表示为 $F(x)$ 与 x , 残差块的整体映射为 $F(x)+x$ 。若残差块期望学到的映射为 $H(x)$, 则残差块中卷积层的期望映射关系对应为 $F(x)=H(x)-x$, 即为期望映射与恒等映射间的残差。归一化层的引入提高模型训练的速度。研究表明, 这种结构降低了学习的难度可以搭建出深层神经网络。

迁移学习指的是其他领域训练好的模型参数迁移到新的模型。其中底层卷积层的特征具有普适性, 可以迁移到不同的任务中使用; 相比之下, 高层卷积层的特征更为抽象, 更加关注于特定任务的特征提取。对于差别比较大的数据集需要对较多的高层卷积层参数进行训练更新^[24]。

采用迁移学习的方法提取浅层故障特征, 进一步学习深层故障特征。训练出来的网络架构可以

时频图中的高频谐波含量的周期性变化更为明显。通过对比零序电压时频图, 可以发现在中性点不接地系统发生弧光高阻接地故障时, 奇次谐波含量显著, 导致零序电压波形畸变。

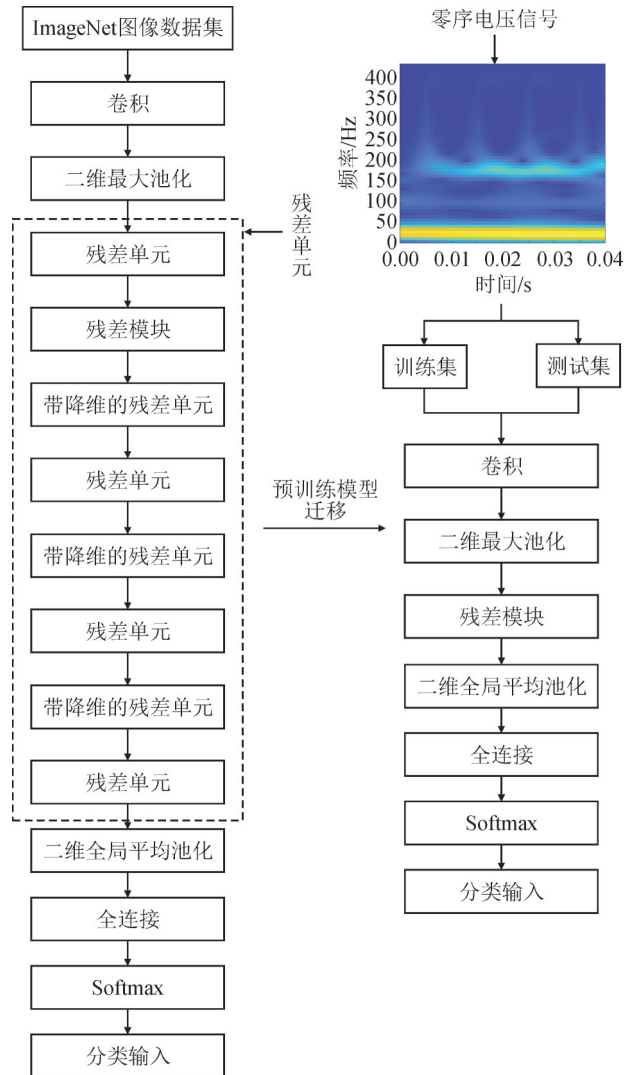


图 5 基于 ResNet18 的接地故障类型识别模型架构

Fig. 5 The ResNet18-based grounding fault type identification model architecture

通过冻结参数实现小样本迁移, 微调参数在不同的

拓扑结构下进行测试。

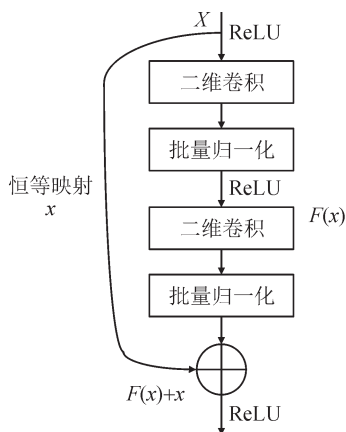


图6 ResNet18中的残差结构

Fig. 6 Residual structure in ResNet18

3 仿真

3.1 配电网模型搭建

为了进一步研究单相接地故障特征,搭建了10 kV单相接地故障的仿真模型,见图7。线路的参数见表1,该电路可仿真模拟线路多种接地故障类型。系统总仿真时间0.2 s,采样频率在1 MHz。

高阻接地故障伴随着间歇性电弧的产生,通过自定义组件搭建电弧模型,低阻电弧接地故障采用Cassie模型。Cassie电弧模型主要适用于电流过零前大电流燃弧期间,比较适合于低电阻电弧的数学模型^[25]。

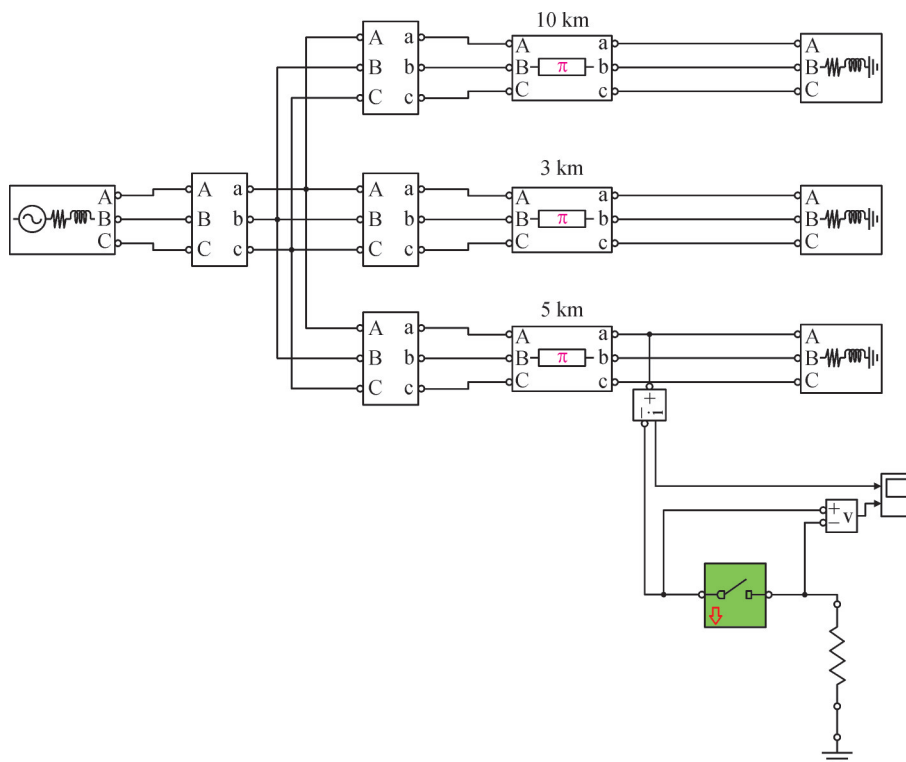


图7 单相接地故障仿真图

Fig. 7 Single phase ground fault simulation diagram

表1 电缆线路和架空线路参数

Table 1 Parameters of cable line and overhead line

参数	数值	
	架空线	电缆
$R_l/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.17	0.27
$C_l/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	9.70×10^{-9}	3.39×10^{-7}
$L_l/(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	1.210×10^{-3}	0.255×10^{-3}
$R_o/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.23	2.70
$C_o/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	8.0×10^{-9}	2.8×10^{-7}
$L_o/(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	5.478×10^{-3}	1.019×10^{-3}

仿真数据类别见表2,针对深度学习数据样本过少,

改变接地电阻和故障初始相角扩充训练数据样本集。

表2 单相接地故障数据样本统计表

Table 2 Statistics table of single phase ground fault data sample

故障类别	故障类型	过渡电阻/ Ω	故障初相角/ $^\circ$	样本数量
含电弧接地故障	高阻接地	800 ~ 1 400	0、60、120、180	360
	低阻接地	5 ~ 95	0、60、120、180	360
不含电弧接地故障	低阻接地	5 ~ 95	0、60、120、180	360

3.2 网络框架搭建

单相接地故障数据集的规模比起原始的 ImageNet 数据集小得多。因此,为了快速识别故障类型,文中采用预训练网络的参数作为深度残差网络框架的初始化参数。根据上述分析,构建了深度残差网络框架。其中,将输入图像大小转变为 $224 \times 224 \times 3$, 图片经过卷积层输入到残差模块。最后,通过平均池化层、全连接层,后跟 Softmax 层和分类层,指定 3 个类别判断故障类型。指定求解器为 sgd, 训练参数见表 3。

表 3 网络参数

Table 3 Parameters of network

参数	数值
初始学习率	0.01
批大小	64
训练轮次	5

4 实验结果分析

实验在 Windows11 操作系统上完成,仿真软件版本为 MATLAB R2022b。首先随机选取 80% 的数据作为训练集,20% 的数据作为测试集。仿真测试数据中包含弧光高阻接地故障、低阻接地故障样本及电弧接地故障样本。

运行效果见图 8,经过 2 个 epoch 可以实现 100% 的准确率。通过引入残差结构,可以缩短训练时间,提高故障诊断准确率。

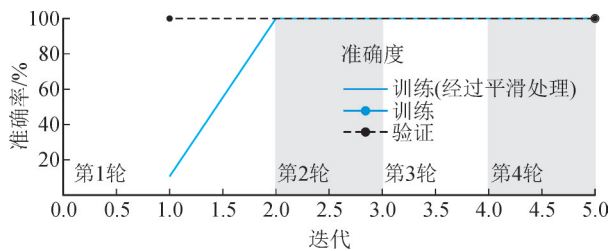
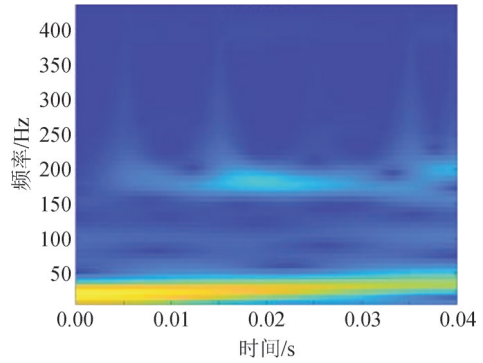


图 8 准确率曲线

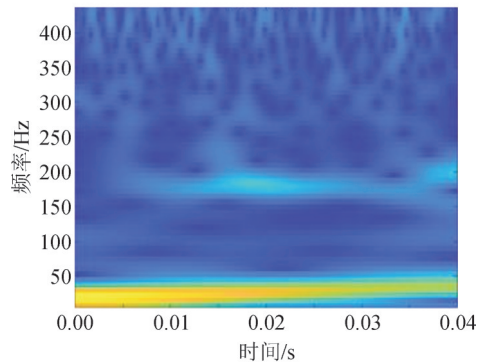
Fig. 8 Accuracy curve

将部分实验数据加入 30 dB 的高斯白噪声,添加噪声前后的高阻接地故障时频图见图 9。添加噪声后,采用基于迁移学习的 Resnet18 模型经过 2 个 epoch 的训练依然可以实现 100% 的准确率,证明该算法具有一定的抗噪能力。

将带噪声的数据集分别输入到含有 256 个隐藏层单元的 LSTM 模型以及加载初始预训练网络的参数的 Resnet18 模型。训练效果对比见表 4。Resnet18 模型训练时间更短、诊断准确率更高。



(a) 高阻接地故障无噪声



(b) 高阻接地故障有噪声

图 9 添加噪声前后高阻接地故障效果对比图

Fig. 9 Comparison of the effects of high resistance grounding faults before and after adding noise

表 4 LSTM 和 Resnet18 模型测试结果

Table 4 LSTM and Resnet18 model test results

模型	训练轮数	验证准确率/%	训练时间/s
LSTM	30	80.95	191
Resnet18	5	100.00	108

5 结论

提出了一种基于迁移学习与深度残差网络的弧光高阻接地故障检测方法,并验证了算法的有效性以及抗噪性。测试结果表明:

- 1) 对于“零休”现象总会周期性出现,可以使用连续小波变换,提取时频信息作为故障特征;
- 2) 零序电压波形是一个强时间序列,利用迁移学习的原理,使用 ImageNet 图像数据集上训练 ResNet18 模型可以有效辨别,故障诊断准确率高,模型训练时间短。

参考文献:

[1] 田君杨,李海勇,蒋连钿,等.含多分布式电源的小电阻接地系统单相接地故障特征分析[J].电力系统保护与控制,2024,52(14): 103-110.
TIAN Junyang, LI Haiyong, JIANG Liandian, et al. Analysis of single-phase grounding fault characteristics of low resistance

- grounding system with multi - distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 103-110.
- [2] 赵福平, 范松海, 尚 豪, 等. 配电网单相接地故障无源柔性消弧策略[J]. 电测与仪表, 2025, 62(8): 93-99.
ZHAO Fuping, FAN Songhai, SHANG Hao, et al. Passive flexible arc suppression strategy for single phase grounding fault in distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(8): 93-99.
- [3] 廖德辉, 金 鑫, 田君杨, 等. 灵活接地配电网单相接地故障全过程特征分析[J]. 智慧电力, 2024, 52(5): 90-97.
LIAO Dehui, JIN Xin, TIAN Junyang, et al. Analysis of the entire process characteristics of single phase-to-ground faults in flexible grounded distribution networks[J]. Smart Power, 2024, 52(5): 90-97.
- [4] 王笑然, 范春菊, 胡 炎, 等. 含有储能电站的主动配电网单相接地故障选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(5): 59-70.
WANG Xiaoran, FAN Chunju, HU Yan, et al. Single - phase grounding fault line selection method for active distribution network with energy storage power stations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(5): 59-70.
- [5] 王 宾, 崔 鑫, 董新洲. 配电网弧光高阻故障检测技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 96-107.
WANG Bin, CUI Xin, DONG Xinzhou. Overview of arc high impedance grounding fault detection technologies in distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 96-107.
- [6] 罗国敏, 杨雪凤, 尚博阳, 等. 基于改进堆叠降噪自编码器的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24): 149-160.
LUO Guomin, YANG Xuefeng, SHANG Boyang, et al. High impedance grounding fault detection method of a distribution network based on an improved stacked denoised autoencoder[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 149-160.
- [7] 白 浩, 潘妹慧, 邵向潮, 等. 基于小波去噪与随机森林的配电网高阻接地故障半监督识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 79-87.
BAI Hao, PAN Shuhui, SHAO Xiangchao, et al. A high impedance grounding fault semi - supervised identification method based on wavelet denoising and random forest[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 79-87.
- [8] 曾 晶. 配电网高阻接地故障诊断方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
ZENG Jing. Research on high impedance grounding fault detection method of distribution network[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [9] 郑星炯. 基于支持向量机的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 电子设计工程, 2015, 23(14): 122-125.
ZHENG Xingjiong. SVM-based method of high impedance fault detection in distribution network[J]. Electronic Design Engineering, 2015, 23(14): 122-125.
- [10] 戴栩生. 配电网故障检测与保护方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
DAI Xusheng. Research on fault detection and protection methods for distribution networks[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [11] 许 光, 刘漫雨, 王兴念, 等. 基于多信息融合的自适应单相接地故障在线定位研究与应用[J]. 电测与仪表, 2019, 56(12): 64-72.
XU Guang, LIU Manyu, WANG Xingnian, et al. Research and application of adaptive single phase ground fault online locating based on multi - information fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(12): 64-72.
- [12] 林雨丰, 薛毓强, 高 超. 基于多故障特征量提取的配电网单相接地故障类型识别[J]. 供用电, 2020, 37(6): 40-47.
LIN Yufeng, XUE Yuqiang, GAO Chao. Distribution network single-phase grounding fault type identification based on multi - fault feature extraction[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(6): 40-47.
- [13] 黄建业, 钱 健, 陈春生, 等. 配电网单相接地现场试验及结果分析[J]. 供用电, 2018, 35(5): 31-37.
HUANG Jianye, QIAN Jian, CHEN Chunsheng, et al. Field test and result analysis of single phase grounding for distribution network [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(5): 31-37.
- [14] 李天友, 徐丙垠, 薛永端. 配电网高阻接地故障保护技术及其发展[J]. 供用电, 2018, 35(5): 1-6.
LI Tianyou, XU Bingyin, XUE Yongduan. High - impedance fault protection of distribution networks and its developments[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(5): 1-6.
- [15] 耿建昭, 王 宾, 董新洲, 等. 中性点有效接地配电网高阻接地故障特征分析及检测[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 85-91.
GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Analysis and detection of high impedance grounding fault in neutral point effectively grounding distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 85-91.
- [16] 李景丽, 袁 豪, 徐铭铭, 等. 小电阻接地系统高阻接地故障检测技术综述[J]. 电测与仪表, 2023, 60(6): 10-18.
LI Jingli, YUAN Hao, XU Mingming, et al. Overview of high impedance fault detection technology in small resistance grounding system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(6): 10-18.
- [17] 周 封, 朱 瑞, 王晨光, 等. 一种配电网高阻接地故障在线监测与辨识方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 685-693.
ZHOU Feng, ZHU Rui, WANG Chengguang, et al. Online criterion and identification of single-phase ground fault with high resistance in distribution network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 685-693.
- [18] 许校晨, 崔双喜, 邓顺黎. 基于时间序列分析与预测的电一气互联综合能源系统运行风险评估[J]. 智慧电力, 2024, 52(11): 40-47.
XU Anchen, CUI Shuangxi, DENG Shunli. Operational risk assessment of electricity - gas interconnected integrated energy system based on time series analysis and prediction[J]. Smart Power, 2024, 52(11): 40-47.
- [19] 李 嵩, 夏成军, 刘译夫, 等. 基于KAN和误差时间序列自相关性特征的多时间尺度光伏功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(24): 176-187.
LI Song, XIA Chengjun, LIU Yifu, et al. Multi-time scale PV power forecasting based on KAN and error time series autocorrelation features[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(24): 176-187.

- Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—2021 [S].2021.
- [20] 常亚楠,王 健,李庆民,等. 交直流气体绝缘管道输电设备微粒污染治理措施研究进展[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 91-100.
CHANG Yanan, WANG Jian, LI Qingmin, et al. Research progress of particle contamination suppression measures in AC and DC gas-insulated transmission equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 91-100.
- [21] 张国宝,赵恒阳,杨 为,等. 基于局放与X射线成像检测的GIS缺陷联合诊断及应用[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 197-202.
ZHANG Guobao, ZHAO Hengyang, YANG Wei, et al. Joint diagnosis and application of GIS defects based on partial discharge and X-ray imaging detection[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 197-202.
- [22] 刘长银,宋人杰,赵 萌,等. 基于变权重和组合隶属度函数的GIS气体绝缘状态评估[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 102-106.
LIU Changyin, SONG Renjie, ZHAO Meng, et al. Gas insulation state assessment of GIS equipment based on variable weight and combined membership function[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 102-106.
- [23] 何 清,邓万婷,王 伟,等. GIS典型放电条件下SF₆气体分解产物与故障能量和故障类型对应关系研究[J]. 湖北电力, 2022, 46(2): 89-96.
HE Qing, DENG Wanting, WANG Wei, et al. Study on relationship between SF₆ gas decomposition products and fault energy and fault types under typical GIS discharge[J]. Hubei Electric Power, 2022, 46(2): 89-96.
- [24] 薛乃凡,李庆民,刘智鹏,等. 微纳粉尘运动行为与微弱放电探测技术研究进展[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3380-3392.
XUE Naifan, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Research advances of the detection technology for kinetic behavior and weak discharge of the micro-nano dust[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3380-3392.
- [25] 国家电网公司. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
SGCC. Eighteen major anti-accident measures for power grids of state grid corporation of China[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- 雷志城(1994—),男,硕士,工程师,研究方向为高电压与绝缘技术(通信作者)(E-mail: lei.zhicheng@qq.com)。
黄焯城(1983—),男,本科,高级工程师,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: hxcmz@163.com)。

(上接第214页)

- [20] 陈容均,严宣辉,杨超城. 面向时间序列的混合图像化循环胶囊分类网络[J]. 计算机应用, 2023, 43(3): 692-699.
CHEN Rongjun, YAN Xuanhui, YANG Chaocheng. Fusion imaging-based recurrent capsule classification network for time series[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(3): 692-699.
- [21] 袁智勇,白 浩,邵向潮,等. 基于一维多尺度轻量级DenseNet的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(6): 33-43.
YUAN Zhiyong, BAI Hao, SHAO Xiangchao, et al. Detection method of high impedance grounding fault in distribution network based on one-dimensional multi-scale lightweight DenseNet[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(6): 33-43.
- [22] 黄宜军,汪金友. 小波分析在微弱信号测量中的应用研究[J]. 计量学报, 2007, 28(2): 163-166.
HUANG Yijun, WANG Jinyou. Application of wavelet threshold denoising to weak signal measurement[J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28(2): 163-166.
- [23] HE Kaiming, ZHANG Xiangyu, REN Shaoqing, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR). USA: IEEE, 2016: 770-778.
- [24] 吴忠强,卢雪琴. 基于深度迁移学习和LSTM网络的微电网故障诊断[J]. 计量学报, 2023, 44(4): 582-590.
WU Zhongqiang, LU Xueqin. Microgrid fault diagnosis based on deep transfer learning and LSTM network[J]. Acta Metrologica Sinica, 2023, 44(4): 582-590.
- [25] 李长鹏,吴小钊,张文凯,等. 中压气体绝缘金属封闭开关设备泄压孔设计方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(7): 155-160.
LI Changpeng, WU Xiaozhao, ZHANG Wenkai, et al. Research on the design method of pressure relief hole of medium voltage gas insulated metal-enclosed switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 155-160.
- 周庭栋(1986—),男,工程师,本科,主要从事电网基建工作(E-mail: 1621146145@qq.com)。
尚 海(1988—),男,工程师,本科,主要从事主要电网工程建设、工程管理研究(E-mail: 715129161@qq.com)。
何永涛(1986—),男,工程师,本科,主要从事输电线路工程工作(E-mail: 465238000@qq.com)。
李盼盼(1989—),女,助理工程师,本科,主要从事电力系统自动化研究(通信作者)(E-mail: 2150476830@qq.com)。
甘 平(1984—),女,助理工程师,本科,主要从事电力系统继电保护研究与应用研究(E-mail: 328929758@qq.com)。