

基于轻量化卷积神经网络的电缆绝缘缺陷在线检测

鲁梦蝶

(中电联(北京)检测认证中心有限责任公司)

摘要: 针对现行方法在电缆绝缘缺陷在线检测中应用存在错检、漏检问题,提出基于轻量化卷积神经网络的电缆绝缘缺陷在线检测。采用缩放重采样策略对电缆局部放电信号感知,通过对电缆局部放电信号图像化转换,生成集合时频特征的电缆二维灰度图像,利用轻量化卷积神经网络对图像处理,识别检测电缆绝缘缺陷,实现基于轻量化卷积神经网络的电缆绝缘缺陷在线检测。经实验证明,设计方法错检率不超过 1%,漏检率不超过 2%,可以实现电缆绝缘缺陷在线精准检测。

关键词: 轻量化卷积神经网络; 电缆; 绝缘缺陷; 在线检测; 缩放重采样策略; 图像化

0 引言

随着电力行业的快速发展,电缆作为电力传输与分配的重要载体,其安全性和可靠性对电力系统的稳定运行至关重要。然而,电缆在长期运行过程中,由于环境侵蚀、机械应力、老化等因素,绝缘层常常会出现各种缺陷,如裂纹、破损、老化等。这些缺陷不仅会影响电缆的绝缘性能,还可能引发短路、漏电等严重故障,对电力系统造成巨大损失。因此,实现电缆绝缘缺陷的及时、准确检测,对于保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。

文献 [1] 提出了基于机器视觉的检测方法,通过 CCD 相机与光学镜头采集电缆绝缘材料的图像,利用畸变校正模型确保图像质量。采用逆直方图均衡化算法增强图像清晰度,通过深度卷积神经网络提取图像中的目标特征,并判断这些特征是否属于老化缺陷

类型,从而实现电缆局部绝缘材料老化缺陷的准确检测。文献 [2] 提出了基于谐波异常特征的检测方法,通过分析电缆在运行中产生的谐波电流特性。通过分析这些谐波异常特征,可以评估电缆的绝缘状态,及时发现并定位绝缘缺陷。传统的电缆绝缘缺陷检测方法在一定程度上能够发现绝缘缺陷,但存在诸多不足,在实际应用中错检率、漏检率较高,无法达到预期的检测效果,为此提出基于轻量化卷积神经网络的电缆绝缘缺陷在线检测。

1 电缆数据感知

电缆绝缘缺陷表现为局部放电,因此在电缆运行过程中,需对电缆局部放电信号感知。在电缆上安装无线传感器,无线传感器采样率设置为 10MS/s,采样时间设置为 0.5s。针对特定场景,假设设定了一

个采样框架，其中将连续接收的 50 个交流周期信号视为一个完整的样本集。为了进一步优化信号质量并降低数据处理的复杂度，采用缩放重采样策略，具体为将每个样本信号按照 556 : 1 的比例进行缩放重采样。在不丢失关键特征的前提下，对原始信号进行大幅度的数据压缩。通过这种方式，从原本庞大的数据中提炼出代表性强的数据点集。在缩放重采样后，每个样本信号被转化为紧凑的数据点，其中每连续 556 个点代表对原始信号的高度概括^[3]。紧接着，为了捕捉这些重采样点中的关键峰值信息，在每个由 556 个点构成的连续序列中搜索并记录最大值。进一步地，为了将处理后的数据更好地映射到实际工况的工频周期中，设定一个界限条件：以 360 个数据点作为代表一个完整的工频周期时间内的局部放电信息。通过对比和分析这些筛选出的 360 个数据点，获取到与工频周期紧密相关的局放活动的信息，包括但不限于其强度、频率及分布特性等。

2 局部数据图像化

通过对电缆局放数据图像化处理实现原始一维时域信号到二维特征图的平滑过渡。这一转换过程不仅仅是数据的简单重排，而是将时域信号中的电流幅值及时序信息映射到特征图的像素值及其空间位置上，从而实现对原始局放信号全部特征的完整保留与直观展示。通过这种转换，原始信号中的复杂特征得以在二维图像中呈现，为后续的基于轻量化卷积神经网络的缺陷特征提取及检测奠定基础^[4]。在转换过程中，局放数据中的噪声成分也被转化为图像中的灰度变化、亮度差异等视觉信息。这些转化后的噪声信息，在轻量化卷积神经网络的识别分类任务中，由于其与有效信号特征的差异性，往往能够被有效抑制或忽略，从而达到自然降噪的效果。为了实现局放数据的图像化，采用滑动窗口取值法^[5]。在原来的局部时

间域信号上设置一个固定尺寸 m 的窗，并且允许该窗在该信号上随意地滑动 n 个单位，从而截取该信号段^[6]。在每一次拦截之后，窗口都会向后移一个单元（需保证 $n \geq m$ ），这样保证所截取到的信号片段间存在某些重叠，提高了数据的多样性。这一过程重复进行，最终得到 k 个长度为 m 的信号片段。为了保证转换过程的顺利进行，需要确保局放时域信号的总数据点数量大于或等于 $n \times n$ ，以满足二维图像生成的需求。将这些随机截取的信号片段进行有序组合，形成一条长度为 $n \times n$ 的连续信号序列。在这个序列中，每个采样点的信号强度被标记为 $s(u)$ ，其中 u 是序列中采样点的索引，取值范围从 1 到 $n \times n$ 。

利用以下公式将信号序列转化为灰度图像：

$$S(i, j) = \text{round} \left\{ \frac{s(u) - \min(s)}{\max(s) - \min(s)} \times 255 \right\} \quad (1)$$

式中， $S(i, j)$ 为转化后的电缆图像；round 为取整函数； $\min(s)$ 、 $\max(s)$ 分别为随机截取连续信号强度最小值和最大值^[7]。在这个过程中，每个采样点的信号强度被映射到图像中对应像素的灰度值上，以此得到一个电缆二维灰度图像。

3 基于轻量化卷积神经网络的缺陷特征提取及检测

在以上基础上利用轻量化卷积神经网络对二维灰度电缆图像分析，提取图像特征并对其进行分类，分成正常与绝缘缺陷两种，实现对电缆绝缘缺陷检测。轻量化卷积神经网络由卷积层、池化层和输出层组成，将二维灰度图像输入到卷积层中，对图像进行深度可分离卷积操作，得到二维灰度电缆图像的特征集合，其用公式表示为：

$$y = f \left(\sum_{i=1}^W S(i, j) \cdot \varpi + b \right) \quad (2)$$

式中， y 为积层输出二维灰度电缆图像特征； f 为激活函数； W 为输入数据集； i 为卷积核数量； ϖ

为卷积核； b 为二维灰度电缆图像偏置项^[8]。输入图像大小用公式表示为：

$$G_{S(i,j)} = H \times L \times P \quad (3)$$

式中， $G_{S(i,j)}$ 为轻量化卷积神经网络输入向量大小； H 为图像长度； L 为图像宽度； P 为通道数。经过卷积操作后输出特征图大小为：

$$G_y = \frac{G_{S(i,j)} - i + 2A}{o} + 1 \quad (4)$$

式中， G_y 为卷积层输出特征图大小； A 为卷积操作步长； o 为边界填充^[9]。将提取的特征图输入到池化层中对其进行池化操作，将每个特征图在空间维度上进行压缩，即无论特征图原本的空间尺寸如何，都通过计算其所有像素值的平均值来得到一个单一的实数。这样做的效果是将每个二维特征通道“挤压”成一个实数，从而构建出全局特征向量。在此基础上对全局特征向量进行 Excitation 操作，通过两个全连接层的串联，首先对全局特征向量进行降维处理，其用公式表示为：

$$V = 1 \times 1 \times G_y / h \quad (5)$$

式中， V 为降维后的电缆特征图全局特征向量尺度； h 为缩放参数。尽管 Excitation 操作在内部进行维度的升降变换，但其最终输出的特征向量维度仍然与输入保持一致。然而，这一过程中特征向量中的每个元素（即每个通道的权重）都得到更新，反映不同通道特征在当前任务中的重要性^[10]。最终，将 Excitation 操作得到的特征与原始特征进行加权相乘，实现对原始特征的重标定。这一过程基于通道间的依赖性，通过强化有用的特征并抑制不重要的特征。整个流程通过“扩张 - 卷积 - 压缩 - 重标定”的方式，对输入图像的特征进行深度挖掘和调整，为后续轻量化卷积神经网络输出层的绝缘缺陷识别任务提供支持，其用公式表示为：

$$Z = f \left(\sum_{i=1}^W V(G_y) \cdot \omega_{we} + b_{tr} \right) \quad (6)$$

式中， Z 为重标定的电缆图像全局特征向量； ω_{we} 为缩放特征图的权重系数； b_{tr} 为偏置项。将提取的电缆图像全局特征输入到输出层，在输出层中将提取特征与参考的绝缘缺陷特征对比，确定输入图像属于绝缘缺陷类别的概率，其用公式表示为：

$$I = f \left(\sum_{i=1}^W (Z - C) \cdot \omega_{bdf} + b_{bdf} \right) \quad (7)$$

式中， I 为输入图像属于缺陷类别的概率； C 为参考绝缘缺陷特征； ω_{bdf} 、 b_{bdf} 分别为输出层连接权重与偏置项。轻量化卷积神经网络自动将概率大于 50% 的样本分类为参考项，以此实现基于轻量化卷积神经网络的电缆绝缘缺陷在线检测。

4 实验论证

4.1 实验设置及指标

为了使此次研究具有一定的学术性和参考性价值，采用对比实验的方式检验本文提出的基于轻量化卷积神经网络的电缆绝缘缺陷在线检测方法的性能，将本文方法与文献 [1] 提出的基于机器视觉的检测方法和文献 [2] 提出的基于谐波异常特征的检测方法对比。以 IKSHFASF 数据包和 KHFASPI 数据包为实验数据样本，两个数据包来源于某电力企业电缆巡检数据库，各包含 800 个数据样本，共计 1600 张图像。利用本文设计方法对电缆绝缘缺陷检测。实验中轻量化卷积神经网络参数设置如下：

卷积核大小设置为 3×3 ，步长设置为 1.52，采样率设置为 1.5%，填充率设置为 3.45%，卷积核数量设置为 52，激活函数设置为 ReUL，通道数量设置为 16。通过轻量化卷积神经网络对图像绝缘缺陷特征提取和分类，识别检测出确绝缘缺陷样本 684 个，正常样本 126 个。出于对方法检测精度检验的目的，对比

三种方法错检率和漏检率。

错检率 = 错误检测样本数量 / 正确检验样本数量，漏检率 = 未检测到的绝缘缺陷样本数量 / 总检测样本数量，错检率和漏检率可以表征出电缆绝缘缺陷检测准确度，错检率、漏检率越高，则表示检测准确度越低。

4.2 实验结果与讨论

对于错检率的检验，实验设计八组，每组实验各检测 100 个样本，表 1 统计三种方法错检率；对于漏检率的检验，以检测样本数量为变量，表 2 统计三种方法漏检率。

表 1 电缆绝缘缺陷错检率 (%)

实验组别	本文方法	基于机器视觉的检测方法	基于谐波异常特征的检测方法
第一组	0.35	4.15	8.16
第二组	0.24	4.56	8.25
第三组	0.26	4.16	8.42
第四组	0.39	4.26	8.36
第五组	0.31	4.53	8.52
第六组	0.33	4.68	8.75
第七组	0.36	4.15	8.96
第八组	0.31	4.42	8.54

表 2 电缆绝缘缺陷漏检率 (%)

样本数量 / 个	本文方法	基于机器视觉的检测方法	基于谐波异常特征的检测方法
100	1.35	10.32	15.26
200	1.26	10.87	15.42
300	1.42	10.62	15.36
400	1.23	10.57	15.57
500	1.62	10.69	15.86
600	1.35	10.58	15.45
700	1.62	10.75	15.96
800	1.47	10.95	15.84

对比表 1、表 2 中数据得出实验结论：本次实验中基于谐波异常特征的检测方法错检率和漏检率最高，本文设计方法错检率和漏检率均最低，错检率不超过 1%，漏检率不超过 2%。因此通过以上对比证明，设计方法在电缆绝缘缺陷在线检测方面具有绝对

的优势，可以实现对电缆绝缘缺陷在线精准检测。

5 结束语

基于轻量化卷积神经网络的电缆绝缘缺陷在线检测技术的研发，不仅标志着电缆维护领域向智能化、自动化迈出了重要一步，也充分体现了在保障电网安全稳定运行方面，技术创新的力量。通过优化网络结构，减少参数数量，轻量化卷积神经网络在提升检测精度的同时，有效降低了计算复杂度与资源消耗，为电缆绝缘缺陷的实时、高效监测提供了强有力的技术支持。展望未来，随着算法的不断优化与硬件性能的提升，该技术有望在更广泛的工业场景中得到应用，为电力系统的安全、可靠运行贡献更大的力量。

参考文献

[1] 吴伟，查姿伊，刘晔，等. 基于机器视觉的电缆局部绝缘材料老化缺陷检测研究 [J]. 自动化技术与应用，2024，43（6）：156-160.

[2] 王安哲，赵健康，王昱力，等. 基于谐波异常特征的配网电缆绝缘缺陷检测技术研究 [J]. 高压技术，2025，51（2）：467-477.

[3] 许国泽，李海波，刘广林，等. 基于工况瞬态放电特征的光伏电缆绝缘缺陷诊断技术研究 [J]. 电气时代，2024（6）：90-94.

[4] 范亚洲. 基于混沌时域反射技术的电力电缆绝缘缺陷检测方法 [J]. 机械与电子，2024，42（3）：50-53，59.

[5] 王昊月，李成榕，王伟，等. 高压频域介电谱诊断 XLPE 电缆局部绝缘老化缺陷的研究 [J]. 电

（下转第 76 页）

(上接第 71 页)

- 工技术学报, 2022, 37 (6) : 1542-1553.
- [6] 叶源, 胡晓. 计及双界面的电缆绝缘水树缺陷时域反射解析模型 [J]. 电工技术学报, 2024, 39 (1) : 55-64.
- [7] 林毅斌, 陈赦, 金雨潇, 等. 基于电容层析成像的电缆绝缘缺陷检测仿真研究 [J]. 电气工程学报, 2023, 18 (3) : 54-62.
- [8] 郑罡, 南钰, 王军亭. 基于高速光感和压力波法的电缆接头缺陷与带电检测技术分析 [J]. 电子技术, 2023, 52 (2) : 136-138.
- [9] 刘三伟, 唐勇明, 周卫华, 等. 基于数字射线检测技术的电缆熔接头主绝缘缺陷研究 [J]. 湖南电力, 2022, 42 (2) : 55-58.
- [10] 王艺璇. 基于卷积神经网络自动提取特征的电缆绝缘缺陷识别 [J]. 电气自动化, 2022, 44 (2) : 29-31, 34.

(收稿日期: 2024-08-01)