

架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测方法研究

薛 强

(宁夏送变电工程有限公司)

摘要：架空输电线路图像中的缺陷目标具有多样的形状、尺寸和纹理特征，适当地表示和提取这些特征是一项挑战。为此，提出架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测方法，建立轻量化主干网络，设计架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测整体架构。以此为基础，引入高斯滤波算法，对架空输电线路图像实现预处理，增强图像特征。最终利用 SSD (Single Shot MultiBox Detector) 算法实现架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测。实验结果显示，研究方法的图像特征增强效果明显，且在 300 次的迭代实验中，检测率始终接近 100%，虚警率始终保持在 2% 左右。

关键词：架空输电线路；多类缺陷目标；轻量化检测；高斯滤波算法；SSD 算法

0 引言

架空输电线路作为电力系统的重要组成部分，常常存在各类缺陷，如杆塔倾斜、导线腐蚀、绝缘子破损等。这些缺陷可能由于劣化天气等原因而引发故障。现阶段，研究者们开始关注将目标轻量化技术应用于架空输电线路的缺陷检测中，以提高检测效率和准确率^[1]。该研究背景下的目标轻量化检测技术，能够通过使用无人机、机器视觉等先进技术手段，实现对架空输电线路的快速、准确的缺陷检测与识别，为电力系统维护提供了一种更加便捷高效的方法。

刘兰兰等人^[2]结合了超分辨率重建方法和多尺度特征融合方法，设计了一种输电线路缺陷检测方法。但是，超分辨率重建的计算复杂度较高。超分辨率重建算法需要处理大量的图像数据，并进行复杂的计算和重构过程，这可能导致处理时间长、计算资源要求

高等问题。叶翔等人^[3]改进了 YOLOv3 模型在检测小目标时可能存在一定的精度损失或漏检的情况，特别是当目标尺寸远低于一定阈值时，这可能限制了其在某些特定场景下的实际应用效果。

为了降低复杂度，本文考虑轻量化理念，设计新的架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测方法。

1 架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测

1.1 建立轻量化主干网络

建立轻量化主干网络的原理是通过精细设计和优化网络结构达到模型轻量化的目的。该原理可以通过以下几个关键步骤实现：通过使用更小的卷积核、减少模型层数或通道数量等方式来降低网络的复杂性。应用注意力机制、剪枝算法等技术来进一步精简模型，删除冗余参数以提高效率。通过这些原理和技术

手段，可以在保持较高准确率的前提下，显著减小模型的体积和计算负载，满足对轻量化要求的实际应用场景。

基于以上理论，本节引入分层概念，建立架空输电线路多类缺陷图像目标轻量化主干网络如图 1 所示。



图 1 建立的轻量化主干网络示意图

各层的功能如下：

1) 特征提取层：这一层的主要功能是从输入数据中提取高层次的抽象特征。通常采用卷积操作来实现，通过不同尺寸的卷积核对输入数据进行滤波和特征抽取，将低级别的图像信息转化为更具有语义的高级特征表示。

2) 特征融合层：这一层的功能是将不同层次的特征进行融合，以获取更加全局和多尺度的特征信息。特征融合可以采用不同的方法，如跳跃连接（Skip Connection）、上采样和下采样等，将来自不同层的特征进行拼接或相加操作，以增强网络对不同尺度物体的感知能力。

3) 特征输出层：这一层的功能是将最终的特征表示转化为对应的任务输出。

1.2 架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测整体架构

通过无人机搭载轻量化主干网络实现对架空输电线路的多类缺陷目标进行快速检测。首先，无人机搭载伺服模块，能够控制无人机在空中飞行并保持稳定姿态。其次，无人机通过搭载的轻量化主干网络进行

实时图像传输和处理，将采集到的架空输电线路图像送入主干网络进行缺陷目标的检测和识别^[4]。然后，数据处理中心作为中转站，接收和存储无人机传回的数据，并对检测结果进行分析、处理和存储。最后，无线通信模块用于实现无人机和数据处理中心之间的高效通信，将检测结果及时传递给用户或相关维护人员。这一整体架构的原理在于利用轻量化主干网络和无人机的灵活性和高机动性，在较低的成本和计算资源消耗下，实现对架空输电线路多类缺陷目标的有效检测和预警。架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测整体架构如图 2 所示。

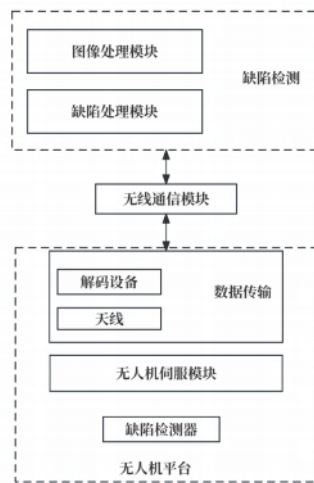


图 2 多类缺陷目标轻量化检测系统总体结构图

1.3 基于高斯滤波算法的架空输电线路图像预处理

在上述的架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测整体架构基础上，设计输电线路缺陷目标的检测。但是，由于架空输电线路图像通常受到多种因素的影响，如天气、光照等，导致图像中可能存在噪声或其他干扰。这些噪声和干扰会影响后续的图像分析算法的效果，可能导致误判或漏检。并且架空输电线路图像中的缺陷往往有着不同的尺度、纹理和形状特征，而直接对原始图像进行处理可能会导致细节丢失或对比度下降。通过预处理方法可以直接提高后续算法的灵

敏度和鲁棒性。因此，对架空输电线路图像进行预处理是为了提高缺陷检测和分析的可靠性与准确性。

基于高斯滤波算法的架空输电线路图像预处理是通过对输入的图像应用高斯滤波器来实现图像的平滑和去噪。高斯滤波器使用一个由高斯函数生成的权重矩阵，将每个像素的值与其周围像素的加权平均值进行替代。通过这种方式，较强的噪声信号可以被抑制，图像的细节得到保留。

高斯滤波的原理基于图像中的噪声往往呈现高频成分的特性，而高斯函数在频域上具有低通滤波的效果。因此，通过对图像进行高斯滤波处理，可以保留图像的整体结构和边缘信息，同时减少图像中的噪声干扰。这使得后续的图像处理和分析任务更加准确和稳定，为架空输电线路图像的缺陷检测和分析提供了更可靠的基础。

设置 x 与 y 分别为架空输电线路图像的横轴坐标与纵轴坐标，定义高斯滤波算法表达式为：

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中， σ 为高斯滤波二维标准差。

通过高斯滤波实现对架空输电线路图像的去噪滤波，完成预处理操作。

1.4 基于 SSD 算法的输电线多类缺陷目标轻量化检测

利用 SSD 算法实现架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测，通过将图像分为多个不同大小的预设锚框，并在每个锚框位置上进行目标分类和边界框回归，从而实现对缺陷目标的快速检测和定位。在每个特征图上，SSD 算法采用不同尺度和长宽比的锚框来覆盖多个可能存在的缺陷目标区域。接下来，SSD 对每个锚框进行分类，利用 softmax 函数预测缺陷目标的类别，得到最终的缺陷目标检测结果。SSD 算法通过结合不同尺度和长宽比的锚框，同时在多个特征图上进行检测，实现了对不同大小和形状的缺陷目标的

有效检测和定位。其轻量化设计使其能够保持较高检测精度。

首先，将架空输电线路多类缺陷图像特征图定义为：

$$x_k = H_k + [x_0, x_1, \dots, x_{k-1}] \quad (2)$$

式中， H_k 为非线性转化函数； x_k 为第 k 层的输出； $[x_0, x_1, \dots, x_{k-1}]$ 为特征函数。

基于 SSD 算法的输电线多类缺陷目标轻量化检测的流程步骤设计如下：

1) 数据准备：收集包含有架空输电线路图像和相应标注信息的数据集 K 。标注信息中应包含不同类别的缺陷目标的位置 (x,y) 和类别标签 c 。

2) 特征提取：利用预训练的卷积神经网络和特征提取器 ResNet 提取图像特征。

3) 多尺度特征层构建：根据特征提取的结果，构建多个特征金字塔层，使网络能够对不同尺度的目标进行检测。

4) 锚框生成：生成一组不同长宽比和尺度的锚框 $G(L,H)$ ，以覆盖各种可能的目标尺寸和形状。

5) 非极大值抑制：根据得分筛选和非极大值抑制 (NMS) 操作，去除重叠度高且低置信度的候选框，得到最终的缺陷目标检测结果。

6) 输出结果：将检测结果返回，包括缺陷目标的位置坐标和类别标签。

2 实验与分析

为了验证架空输电线路多类缺陷图像目标轻量化检测方法的整体有效性，需要对该方法实行实验对比测试。采用研究提出的基于 SSD 的架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测方法、文献 [4] 提出的结合了超分辨率重建和多尺度特征融合的输电线路缺陷检测方法以及文献 [5] 提出的基于改进 YOLOv3 模型的输电线路缺陷检测方法完成对比验证。

2.1 图像预处理效果对比

从 IEEE TransPower 数据集中随机选取 4 幅输电线路缺陷图像（其中包括 2 类缺陷，见图 3）。IEEE TransPower 数据集由中国电力科学研究院提供，包含多类电力设备和线路缺陷图像数据。利用研究方法、文献 [2] 方法以及文献 [3] 方法分别对图像样本完成增强，观察不同方法的图像处理效果，最终结果如图 4~图 6 所示。

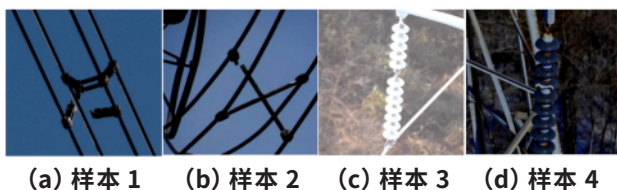


图 3 数据集样本

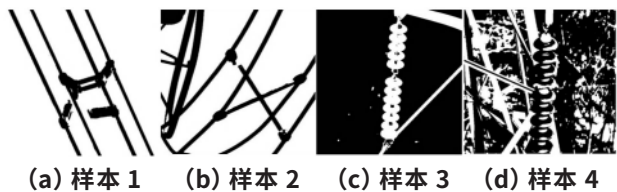


图 4 研究方法的特征增强效果

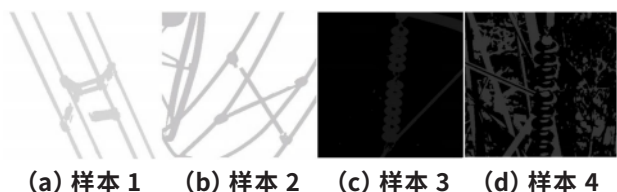


图 5 文献 [2] 方法的特征增强效果

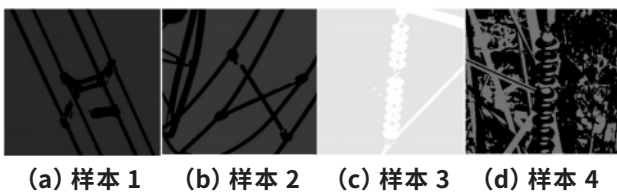


图 6 文献 [3] 方法的特征增强效果

根据上述实验测试结果可知，研究方法的图像特

征增强效果明显，输电线的缺陷目标更加显著。

2.2 检测率测试

检测率衡量了目标检测算法对真实缺陷目标的识别能力。检测率是指在给定所有真实缺陷目标中成功被检测出的比例。高的检测率意味着算法能够有效地找到和识别出更多的缺陷目标，这是衡量算法准确性和性能的重要指标之一。检测率为：

$$\mathfrak{R} = \frac{Q_{hit}}{Q_{target}} \quad (3)$$

式中， \mathfrak{R} 为检测率； Q_{hit} 为架空输电线路多类缺陷图像检测到的真实目标像元数量； Q_{target} 为总数量。

经过统计，不同方法的检测率结果如图 7 所示。

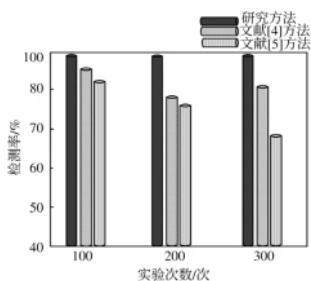


图 7 不同方法的检测率对比

分析图 7 可知，与文献方法相比，研究方法的检测率明显更高，在 300 次的迭代实验中，检测率始终接近 100%。

2.3 虚警率测试

虚警率衡量了目标检测算法在非目标区域中错误报警（误检）的频率。虚警率是指在给定非目标区域中错误报警的比例。低的虚警率意味着算法的误检率较低，即算法很少将非目标区域错误地识别为缺陷目标，从而提高了算法的可靠性和准确性。虚警率计算公式如下：

$$\chi = \frac{Q_{false}}{Q_{total}}$$

式中， χ 为虚警率； Q_{false} 为架空输电线路多类缺陷图像检测到的虚警目标像元数； Q_{total} 为像元总数量。

经过统计，不同方法的虚警率结果如图 8 所示。

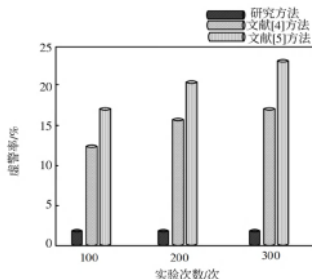


图 8 不同方法的虚警率对比

根据图 8 的测试结果可知，研究方法的虚警率更低，在实验测试期间始终保持在 2% 左右。

3 结束语

本研究提出了一种架空输电线路多类缺陷目标轻量化检测方法。通过建立轻量化主干网络和设计整体架构，实现了对架空输电线路图像的快速检测和定位。同时，引入高斯滤波算法对图像进行预处理，有效增强了图像特征。最后，采用 SSD 算法对图像进行目标检测，实现了对多类缺陷目标的准确识别和定位。该方法旨在提高架空输电线路缺陷检测的准确性和效率，在保持算法轻量化的同时，提升了视觉分析任务的性能。希望这一方法能够为电力行业的缺陷检

测和维护工作提供有力的支持，并为相关领域的研究与实践贡献一定的价值。

参考文献

- [1] 麻卫峰. 机载激光点云输电线路巡检关键技术研究 [J]. 测绘学报, 2023, 52 (9): 1612.
- [2] 刘兰兰, 万旭东, 汪志刚, 等. 基于超分辨率重建与多尺度特征融合的输电线路缺陷检测方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (1): 130-139.
- [3] 叶翔, 孙嘉兴, 甘永叶, 等. 改进 YOLOv3 模型在无人机巡检输电线路部件缺陷检测中的应用研究 [J]. 电测与仪表, 2023, 60 (5): 85-91.
- [4] 陈思雨, 付章杰. 融合高效注意力的多尺度输电线路部件检测 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60 (1): 327-336.

(收稿日期: 2024-02-02)