

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)04-0105-05

高压配电网不停电作业安全预警方法

张子豪, 孙祯皓

(国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司, 江苏 泰州 225300)

摘要:为了解决传统配电网作业安全监测方法中存在的输电线路目标检测速度慢、精度不高的问题,提出了一种基于数字孪生体的高压友好型配电网不停电作业安全监测预警方法。基于数字孪生体,首先搭建一个配电网带电作业机器人数字孪生系统,采用YOLOv5算法,并加入通道注意力机制,用来增强网络性能。同时对YOLOv5算法的残差模块进行改进,以减少信息损失。将改进后的YOLOv5算法输入到搭建的数字孪生系统中,通过无人机进行航拍含有绝缘子图像、防震锤和间隔棒等电力部件的输电线路图像,共8420张。将网络训练次数设置为100次,图像尺寸和批处理大小分别设置为480×480和25,进行测试配电网不停电作业安全监测和预测效果。实验结果表明,改进算法的检测速度显著提升,对配电网输电线路多目标检测精度明显提高。说明提出的算法可应用于数字孪生配电网不停电作业安全监测预警系统中,具备可行性和有效性。

关键词:数字孪生;配电网;安全监测;YOLOv5算法;通道注意力机制

中图分类号: TP392 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-7241(2026)04-0105-05

Safety early warning method for live working in high-voltage distribution networks

ZHANG Zihao, SUN Zhenhao

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou Power Supply Branch, Taizhou 225300, Jiangsu, China)

Abstract: To address the issues of slow detection speed and low accuracy in traditional power distribution network operation safety monitoring methods, this paper proposes a safety monitoring and early warning method for live-line operations in high-voltage friendly distribution networks based on digital twins. Based on digital twins, this paper first builds a digital twin system for live-line operation robots in distribution networks. The YOLOv5 algorithm is adopted and a channel attention mechanism is added to enhance the network performance. Meanwhile, the residual module of the YOLOv5 algorithm is improved to reduce information loss. The improved YOLOv5 algorithm is input into the built digital twin system. A total of 8420 images of transmission lines containing insulators, vibration dampers, and spacer bars are captured by drones. The number of network training times is set to 100, and the image size and batch size are set to 480×480 and 25 respectively, to test the safety monitoring and prediction effect of live-line operations in distribution networks. The experimental results show that the detection speed of the improved algorithm is significantly increased, and the multi-target detection accuracy of the distribution network transmission lines is significantly improved. It indicates that the proposed algorithm can be applied to the safety monitoring and early warning system of live-line operations in digital twin distribution networks, demonstrating feasibility and effectiveness.

Keywords: digital twinning; distribution network; security monitoring; YOLOv5 algorithm; channel attention mechanism

近年来,随着我国电力行业的飞速发展,我国配电网基础设施得到基本完善,庞大的电力网络得以建成。随着电力系统应用范围的扩大,配电网输电线路里程也随之增加,输电线路由于常年暴露在户外环境中,极易出现电路损坏和部件脱落现象,严重威胁到配电网输电线路安全作业。传统的输电线路检测多采用人工巡检方式,此方式效率低下、危险系数高,无法满足当前配电网输电线路安全监测和预警时效性需求。随着人工智能和机器人、无人机等新兴技术的发展,无人机逐渐被应用到输电线路的巡检工作中,

其提升了电路巡检的安全性和效率,应用成本更低。针对配电网安全作业的监测和预警,陈国炎等^[1]提出基于IEC 61968设备搭建一个配电终端数字孪生体模型,通过该模型实现了电力机器人作业控制;周洋等^[2]提出了目标检测算法中的YOLOv4网络对配电网跳闸数据进行具体分析,通过其实现供电线路异常状态预警;伍济钢等^[3]为实现配电网中输电线路小目标缺陷检测,提出了基于改进YOLOv5的PCB小目标缺陷检测方法。实验发现,此方法可提升目标缺陷检测精度,但检测效率不高。以上研究虽然取得了

收稿日期:2024-11-30;录用日期:2024-12-19

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(BKjP2403)

作者简介:张子豪,(1997—),男,助理工程师,研究方向:电气工程及其自动化。

引用本文:张子豪,孙祯皓. 高压配电网不停电作业安全预警方法研究[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(4): 105-109. (ZHANG Zihao, SUN Zhenhao. Safety early warning method for live working in high-voltage distribution networks[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(4): 105-109.)

一定应用成果,但对于配电网输电线路的监测状态存在检测精度低和检测时间长的问题,无法满足配电网不停电作业监测的实时性需求。基于此,结合以上研究经验,提出搭建一个数字孪生体配电网作业控制系统,并采用改进的YOLOv5进行配电网输电线路缺陷和目标检测。从而实现配电网不停电作业的安全准确监测和预警,对配电网安全运行和作业领域具有实际应用价值和参考意义。

1 YOLOv5s 算法

YOLOv5 算法是目标检测算法中较为常用的算法之一,具备较强的检测和识别能力,十分适用于配电网输电线路特征提取和目标检测。根据特征深度和宽度对 YOLOv5 算法进行划分后,可得到 YOLOv5s、YOLOv5m、YOLOv5x 和 YOLOv5l 网络模型。4 种网络模型中,YOLOv5s 网络的深度和宽度最小,检测速度更快,满足配电网不停电作业安全监测和预警需求,因此,选择 YOLOv5s 网络作为基础网络^[4]。

YOLOv5s 网络基础框架为 Pytorch 框架。该网络结构包括标准卷积模块 Conv 模块、Focus 模块、金字塔池化 SPP 模块、含有残差网络的 BottleneckCSP1 模块和含 0 有 CBL 结构的 BottleneckCSP2 模块。各模块组成结构和功能可表现为:

- 1) 标准卷积 Conv 模块的作用是对提取特征进行降维处理,其主要分为 Conc 层、BN 层和 CBL 模块 3 个部分^[5]。
- 2) Focus 模块的作用是对图像进行压缩、拼接处理,有效整合图像高度、宽度等维度,从而实现输入图像通道数目的增加。
- 3) 金字塔池化 SPP 模块负责提取输入图像特征,并将提取特征进行拼接聚合处理。
- 4) BottleneckCSP 模块基于 CSPNet 原理减少模型参数量,由此提升模型精度和推理速度。其中,BottleneckCSP1 模块和 BottleneckCSP2 模块分别应用于 YOLOv5s 网络中的 Backbone 部分和 Neck 部分^[6]。

2 基于数字孪生体的控制系统

2.1 系统搭建

为实现高压友好型配电网不停电作业的安全监测和预警提出基于数字孪生技术和理论,搭建一个配电网带电作业机器人控制系统。该系统整体结构如图 1 所示。

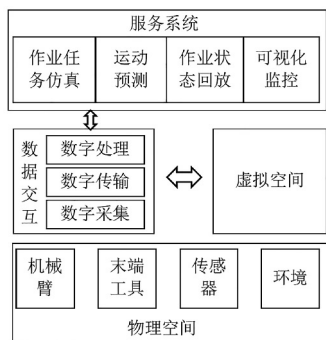


图 1 配电网带电作业机器人数字孪生控制系统

Fig. 1 Digital twin control system of distribution network live working robot

系统架构底层技术为物联网底层技术和虚拟仿真技术,其整体架构主要分为 4 个模块,分别为物理空间、虚拟空间、数据交互和服务系统^[7]。其中,虚拟空间由孪生模型和孪生数据组成。通过物理空间和虚拟空间的结合可实现服务系统搭建,基于服务系统实现数据交互,从而完成配电网带电作业机器人有效控制。

2.2 改进 YOLOv5s 算法

2.2.1 添加通道注意力机制

传统的 YOLOv5s 算法虽然可实现配电网输电线路作业状态的检测和识别,但对于多目标和小目标的输电线路的特征提取精度不高,检测能力还有待提升。基于此,提出在 YOLOv5s 算法基础上引入通道注意力机制和残差模块改进,以减少信息损失,保留原始图像特征^[8]。

通道注意力机制即根据特征相关性从特征图通道中计算重要性得分,基于得分进行通道权重分配,以提升重要特征的相关通道表达能力。若网络中的卷积核表示为 $V = [V_1, V_2, V_3, \dots, V_c]$, V_c 表示第 c 个卷积核^[9];若输入数据表示为 X ,则输出可表示为 $U = [U_1, U_2, U_3, \dots, U_c]$ 。

$$U_c = V_c * X = \sum_{s=1}^c V_c^s * X^s \quad (1)$$

式中, $*$ 表示卷积操作; V_c^s 表示一个卷积核^[10-11]。利用卷积核对输入特征进行学习和提取后,可对原特征通道和学习后的空间进行混合处理,之后采用通道注意力机制抽离混合处理的结果,从而实现各通道特征关系的有效学习。

压缩和激励网络 (squeeze-and-excitation networks, SENet) 是通道注意力中的经典网络。其中,压缩网络负责压缩全局空间信息并进行特征学习^[12-13];激励网络则对各个通道进行权重分配。SENet 模型结构主要分为 3 个部分,分别为 Squeeze 操作、Extraction 操作和 Scale 操作。

1) Squeeze 操作即对输入原始特征图进行全局平均池化,以获得全局特征描述^[14-15]。具体表达式为

$$z_c = F_{ex}(u_c) = \frac{1}{H * W} \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^W u_c(i, j), z \in R^c \quad (2)$$

进行 Squeeze 操作后,可得到尺寸为 $1 \times 1 \times n$ 的特征图。

2) Extraction 操作即利用全连接层对上层传输的特征图进行非线性变换,从而得到对应权重。之后采用含有门控机制对全局特征图进行通道相关性提取。具体表达式为

$$S = F_{ex}(z, W) = \sigma(g(z, W)) = \sigma(W_2(\text{ReLU}(W_1 z))) \quad (3)$$

3) Scale 操作即对 Extraction 操作获取的权重进行重新分配,将其分别与输入特征图的通道特征相乘。

2.2.2 改进残差模块

传统的 YOLOv5s 网络中, CSPNet 结构能够丰富 YOLOv5s 网络的梯度组合信息^[16]。但此结构会导致网络信息损失率增加,并出现梯度混淆现象。基于此,提出将 Resunit 残差模块替换为 LSandGlass 模块。LSandGlass 模块结构如图 2 所示。

由图 2 可知, LSandGlass 模块主要由 2 个 3×3 的深度空间卷积层 Dwise 和 2 个 CBL 组件组成。将 Dwise 置

于残差路径两端, CBL 组件置于中间^[17]。由此提升深度卷积的空间信息编码能力, 增强图像边缘特征提取精度, 降低信息损失。

通过在 YOLOv5s 网络中增加通道注意力机制和改进残差网络后, 得到改进 YOLOv5s 网络模型结构如图 3 所示。

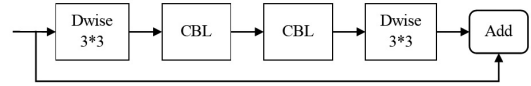


图 2 LSandGlass 模块整体结构

Fig. 2 Overall structure of the LSandGlass module

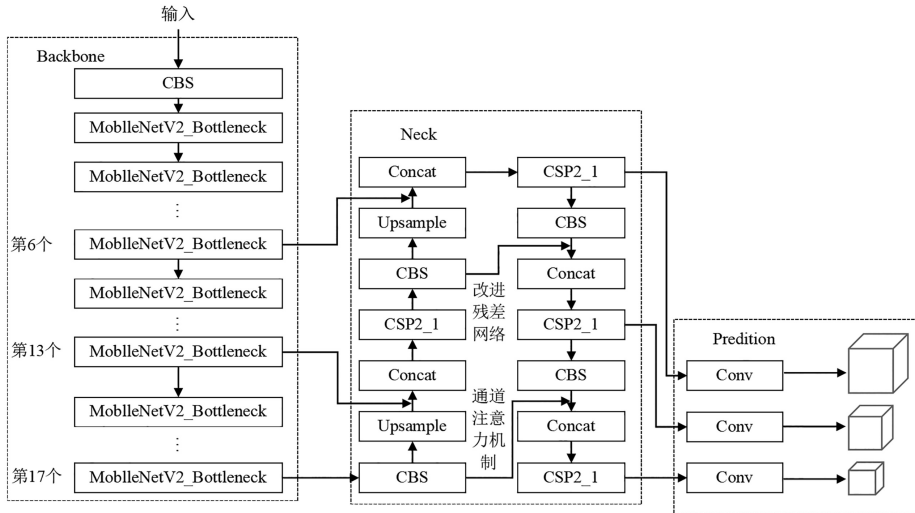


图 3 改进后的 YOLOv5s 网络模型结构

Fig. 3 Structure of the improved YOLOv5s network model

3 实验结果与分析

3.1 实验环境

为取得更好的实验效果, 实验选择采用 4 核的英特尔 i7-7700HQ@2.80 GHz CPU 作为硬件配置, 显卡型号为英伟达 GTX1050 Ti, 显存大小为 12 GB。主硬盘和主板分别选择 256 GB 的 Phisom 固态和 100 Series 芯片组 Family-A136。操作系统选用 Windows 10, 驱动版本选用 NVIDIA studio driver 471.41, 深度学习模型选用 YOLOv5s, 深度学习框架和 Python 框架选用 PyTorch1.8 和 Anaconda3 PyCharm 作为软件配置。

3.2 实验数据

通过无人机进行航拍共得到 8 420 张含有绝缘子图像、防震锤和间隔棒等电力部件的输电线路图像。其中, 绝缘子图像、防震锤图像和间隔棒图像数量分别为 2 570 张、4 620 张、1 230 张, 由于拍摄角度和外部遮挡等因素导致拍摄图像存在输电电路图像不清晰的问题, 为便于后续输电线路安全检测, 提出对采集的原始数据进行数据清洗、图像分割等预处理操作, 最终得到 5 600 张数据集。为实现改进 YOLOv5 网络的训练和测试, 实验将预处理后的数据集按照 8 : 2 分配比例划分为训练集和测试集, 得到 4 480 张和 1 120 张。

3.3 参数设置

为提升网络预警的效果, 实验将网络训练次数设置为 100 次, 图像尺寸和批处理大小分别设置为 480×480 和 25。损失函数选用 GIOU loss 损失函数, 初始学习率设置为 0.01。

3.4 评价指标

实验采用平均精确率、均值平均精度和速度作为评价标准。其中, YOLOv5s 网络的损失函数为 GIOU, 具体表达式为

$$R_{\text{GIOU}} = \frac{\rho^2(b, b^{\text{gt}})}{c^2} + av \quad (4)$$

$$v = \frac{4}{\pi^2} \left(\arctan \frac{w^{\text{gt}}}{h^{\text{gt}}} - \arctan \frac{w}{h} \right)^2 \quad (5)$$

$$a = \frac{v}{(1 - \text{IoU}) + v} \quad (6)$$

$$\ell_{\text{CoU}} = 1 - \text{IoU} + \frac{d^2}{c^2} + av \quad (7)$$

式中, $w^{\text{gt}}, h^{\text{gt}}$ 分别为真实框的宽度和高度; w, h 分别为预测框的宽度和高度。 a 表示权衡参数; v 表示衡量长宽比一致性参数^[18]。在 YOLOv5s 网络的损失函数中加入参数 a 和 v 后, 能够将预测框长宽比纳入损失函数的影响范围。通常认为, 损失值越小, 模型训练效果更佳。

3.5 实验结果

3.5.1 改进前后 YOLOv5s 网络性能对比

为验证改进后的 YOLOv5s 网络对配电网不停电作业时的检测性能是否得到提升, 实验基于实验平台和参数设置, 提出将含有绝缘子、防震锤和间隔棒等电力部件的训练集应用到改进前后的 YOLOv5s 网络中进行网络模型训练, 并采用 mAP 评价指标对两个模型的训练结果进行评估, 具体如图 4、图 5 所示。

由上图对比结果可知, YOLOv5s 进行目标识别的 mAP 值为 74.9%, 训练时长为 196 h。改进后的 YOLOv5s 网络对配电网输电线路小目标识别的 mAP 值高达 95.8%, 网络训练时长仅为 54 h。相较于改进前的 YOLOv5s 网络, 改进后的 YOLOv5s 网络进行小目标识别的 mAP 值高出了 20.9%, 训练时长低了 142 h。由此说明, 在相同训练数据集下, 改进后的 YOLOv5s 网络所用训练时长更短, 对配电网中输电线路小目标识别 mAP 值更高, 检测速度更快。

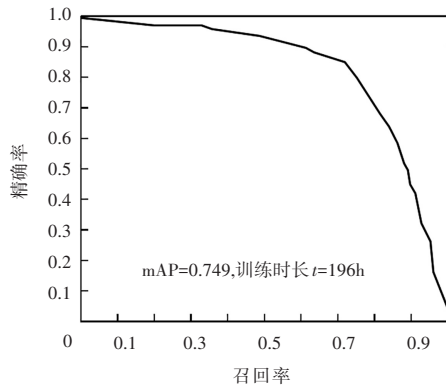


图4 YOLOv5s 网络训练结果

Fig. 4 Training results of the YOLOv5s network

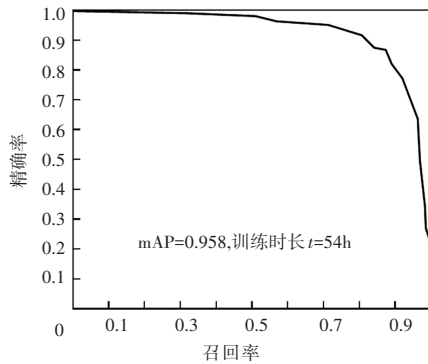


图5 改进后 YOLOv5s 网络训练结果

Fig. 5 Training results of the improved YOLOv5s network

其中,改进前后的 YOLOv5s 网络对配电网中输电线路小目标检测结果如图 6、图 7 所示。

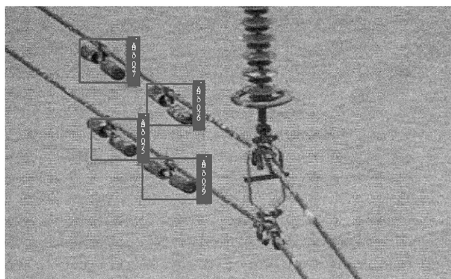


图6 YOLOv5s 网络对输电线路的检测结果

Fig. 6 Detection results of transmission lines by the YOLOv5s network

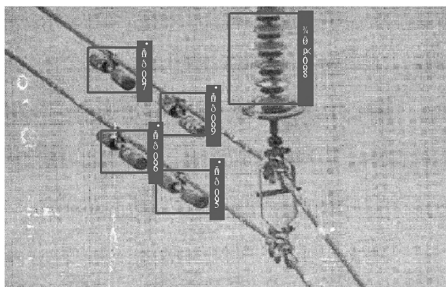


图7 改进后 YOLOv5s 网络对输电线路的检测结果

Fig. 7 Detection results of the improved YOLOv5s network for power transmission lines

由图 6、图 7 检测结果可知,在相同训练集下,改进前的 YOLOv5s 网络对输入图像只检测到 4 个防震锤,检测精度分别为 79%、76%、77% 和 75%;而改进后的 YOLOv5s

网络对配电网输电线路图像分别检测到一个绝缘子和 4 个防震锤,检测精度均保持在 95% 及以上。由此分析可知,改进后的 YOLOv5s 网络对配电网输电线路的检测精度更高,可实现不同电力部件的准确检测。

其中,改进前后 YOLOv5s 网络在 100 次训练过程中的 Box、Objectness 和 Classification 数据的变化过程如图 8、图 9 所示。

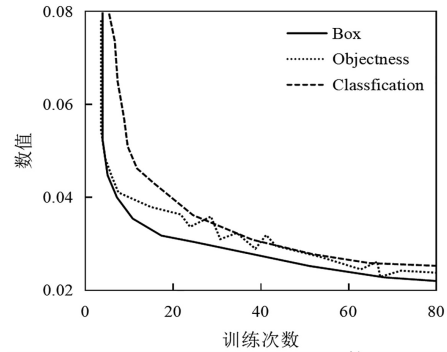


图8 改进前 YOLOv5s 网络其他训练数据变化

Fig. 8 Changes in other training data of the improved YOLOv5s network

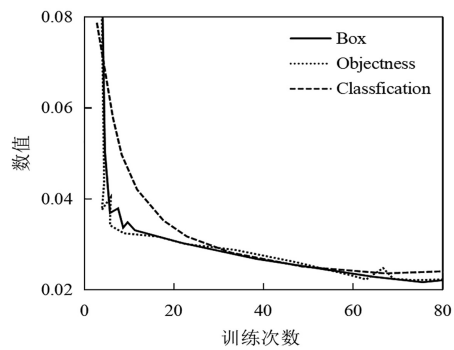


图9 改进后 YOLOv5s 网络其他训练数据变化

Fig. 9 Other training data changes of the improved YOLOv5s network

由上图对比结果可知,相较于改进前的 YOLOv5s 网络,改进后 YOLOv5s 网络的 Box、Objectness 和 Classification 参数均随着训练次数的增加而不断提升,训练效果显著。说明,采用改进后的 YOLOv5s 网络可加快模型收敛速度,可提升模型训练效果。

3.5.2 改进 YOLOv5s 模型与其他模型对比

为进一步验证改进 YOLOv5s 网络的检测性能,实验依旧采用五种算法分别应用到高压友好型配电网不停电作业输电线路检测中,以实现配电网安全监测和预警。实验将 1 120 张含有绝缘子图像、防震锤图像和间隔棒图像的测试集输入五种算法中进行测试分析,得到五种算法的 mAP 对比如图 10 所示。

由图 11 对比结果可知,YOLOv4 算法、YOLOv5 算法、SSD 算法和 Faster R-CNN 算法的 mAP 值分别为 76.3%、81.1%、82.5% 和 84.4%,本算法的 mAP 值为 93%,比前四种算法分别高出了 16.7%、11.9%、10.5% 和 8.6%。由此分析可知,本算法对配电网不停电作业的安全检测的平均精度均值均高于其他目标检测算法,检测效果更佳。

基于以上测试,得到 5 种算法的 FPS 值对比结果如图 11 所示。

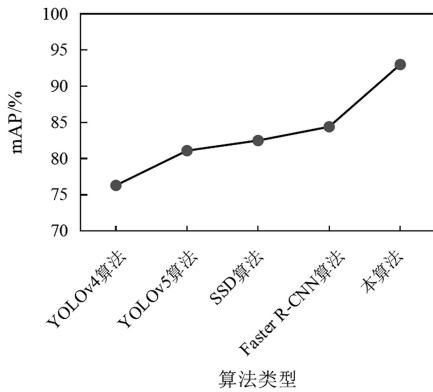


图 10 4 种算法 mAP 对比结果

Fig. 10 Comparison results of mAP for four algorithms

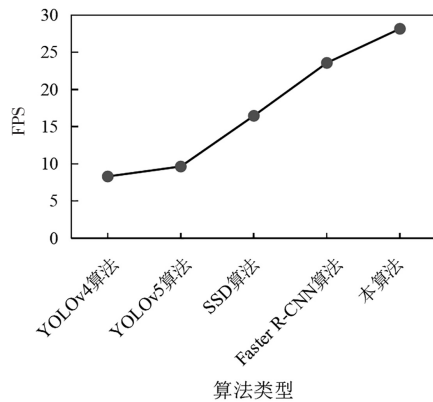


图 11 5 种算法的 FPS 值对比结果

Fig. 11 Comparison results of FPS values for five algorithms

由图 11 对比结果可知,前 4 种算法的检测速度分别为 8.31 帧/秒、9.65 帧/秒、16.47 帧/秒、23.59 帧/秒,本算法的检测速度为 28.18 帧/秒。本算法的 FPS 比前 4 种算法分别提升了 20.49 帧/秒、18.53 帧/秒、11.71 帧/秒、4.59 帧/秒。由此说明,本算法对配电网不停电作业的安全检测速度更快,检测效率更高。

为直观的看出本算法的优越性,实验将基于图 10、图 11 绘制相应的表格,对比出 5 种算法的检测精度和检测速度,具体如表 1 所示。

表 1 5 种算法的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of five algorithms

算法类型	mAP/%	检测速度/(帧·s ⁻¹)
YOLOv4 算法	76.3	8.31
YOLOv5 算法	81.1	9.65
SSD 算法	82.5	16.47
Faster R-CNN 算法	84.4	23.59
本算法	93.0	28.18

由表 1 对比结果可知,本算法的检测精度和检测速度分别为 93%和 28.18 帧/秒,检测精度和检测速度明显优于其他算法。由此说明,本算法的检测性能更为优越,可应用于配电网不停电作业的安全监测和预警工作中。

4 结论

综上所述,提出的基于数字孪生体的高压友好型配电网不停电作业安全监测预警方法具备可行性和有效性,此方法在传统 YOLOv5s 算法的基础上增加通道注意力机制和改进残差模块后,很大程度上提升了配电网作业安全监测输电线路的检测速度和监测精度。加入通道注意力机制和改进残差模块后减少了 YOLOv5s 网络的信息损失率,网络性能显著提升。结果表明,提出的算法可实现基于数字孪生系统中配电网不停电作业安全准确监测和预测。利用数字孪生系统对配电网不停电作业进行虚拟现实构建后,可降低工作人员直接接触配电网输电线路的危险性,从而为输电线路的安全监测和预警提供了有效的技术支撑。同时,提出的方法能够提升配电网中绝缘子图像、防震锤图像和间隔棒图像的检测精度。说明本算法能够满足配电网多目标和小目标的输电线路准确检测需求,具备实用性和实时性。

参考文献

- [1] 陈国炎, 张泽荣, 洪雪梅, 等. 基于 IEC 61968 的配电终端数字孪生体建模方法[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3863-3871.
- [2] 周洋, 施正香, 洪灿梅, 等. 基于电网跳闸数据分析的供电线路异常状态预警方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 40-46.
- [3] 伍济钢, 梁谋, 曹鸿, 等. 基于改进 YOLOv5 的 PCB 小目标缺陷检测研究[J]. 光电子·激光, 2024, 35(2): 155-163.
- [4] 李艳, 杨丽芝, 张磊, 等. 基于时间序列数据库的电网访问服务端风险预警研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(18): 123-126, 131.
- [5] 游越, 伊力哈木·亚尔买买提. 基于改进 YOLOv5 在电力巡检中的目标检测算法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 89-96.
- [6] 伏德粟, 高林, 刘威, 等. 基于改进 YOLOv5 算法的电力工人作业安全关键装备检测[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2022, 40(3): 320-327.
- [7] 袁红春, 陶磊. 基于改进的 Yolov8 商业渔船电子监控数据中鱼类的检测与识别[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(3): 533-542.
- [8] 甘志坚, 黄国方, 张静, 等. 基于数字孪生的电力机器人作业控制系统研究与应用[J]. 机械工程师, 2023(12): 89-93.
- [9] 王林, 李云伟, 任重, 等. 基于数字孪生技术的电力设备不间断巡视系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(3): 220-224.
- [10] 吕宗宝, 徐英博, 谢子殿. 基于轻量化 YOLOv5 的煤矿电力人员作业安全装备检测[J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33(5): 737-742.
- [11] 周文俊, 徐艺敏, 曹毅, 等. 基于多点分布式储能协调控制的配电网时序承载力优化仿真研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5): 103-107.
- [12] 郑含博, 李金恒, 刘洋, 等. 基于改进 YOLOv3 的电力设备红外目标检测模型[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1389-1398.
- [13] 柳伟青, 姚勇, 欧阳磊, 等. 基于主配融合及多源信号的配电网自适应单相接地故障测距方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11): 40-43.
- [14] 林丽霞, 吴悦园. 基于改进 YOLOv7 的电力设备红外过热缺陷检测方法[J]. 电气技术, 2024, 25(1): 42-47.
- [15] 李庆波, 赵昂, 田寿涛, 等. 结合 GRN 和 TGTransformer 的配电网分层分区电力电量平衡方法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(8): 156-160.
- [16] 彭曙蓉, 刘登港, 何洁妮, 等. 基于改进 YOLOv4 的架空线路电力设备故障检测[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 169-176.
- [17] 高伟, 郭美青, 张兴忠, 等. 基于改进 PP-YOLOv2 的红外图像电力设备检测[J]. 计算机仿真, 2023, 40(9): 81-87, 241.
- [18] 陈寅, 赵佰亭. 基于改进的 YOLOv3 在电力设备红外检测中的应用[J]. 兰州工业学院学报, 2022, 29(5): 29-34.