

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)04-0116-06

# 基于改进YOLOv5的配网不停电作业人员防护穿戴检测技术研究

冯玉<sup>1</sup>, 吴少雷<sup>1</sup>, 陈振宁<sup>1</sup>, 王鲸杰<sup>1</sup>, 吴凯<sup>2</sup>, 张召亮<sup>3</sup>(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230061; 2. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230041;  
3. 武汉科迪奥电力科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**目前的配网不停电作业人员的防护穿戴检测方法难以实现生产作业的全程安全监管。针对此问题,研究基于改进YOLO系列版本5(you only look once version 5, YOLOv5)算法构建了一种防护穿戴检测模型。该模型利用改进YOLOv5对图像数据中的作业人员进行识别,并利用语义分割模型对检测区域进行分割,之后采用局部二值模式算子进行纹理特征提取。最后将提取到的特征输入支持向量机中对穿戴规范与否进行检测。结果表明,研究设计模型的检测准确率为95.32%,检测时间仅为2.10 s,相较于其他模型更加高效准确。改进后模型的精度和召回率平均值分别为94.08%和93.48%。改进后模型图像相似系数和平均交并比值分别为93.47%和82.55%,且其帧率为36帧/秒。研究设计模型能够在复杂作业环境下,准确识别并检测作业人员的防护穿戴情况,进一步保障作业安全。

**关键词:**防护;穿戴检测;YOLOv5;语义分割;支持向量机;特征提取

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)04-0116-06

## Protective wear detection technology for workers in distribution network without power outage based on improved YOLOv5

FENG Yu<sup>1</sup>, WU Shaolei<sup>1</sup>, CHEN Zhenning<sup>1</sup>, WANG Jingjie<sup>1</sup>, WU Kai<sup>2</sup>, ZHANG Zhaoliang<sup>3</sup>(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hefei 230041, Anhui, China;  
2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230041, Anhui, China;  
3. Wuhan Kediao Power Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** The current methods for detecting the protective wear of distribution network power-off operation personnel are difficult to achieve full safety supervision during production operations. To address this issue, a protective wear detection model was constructed based on the improved YOLO series version 5 (YOLOv5) algorithm. This model uses the improved YOLOv5 to identify the operation personnel in the image data, and uses the semantic segmentation model to segment the detection area. Then, the local binary pattern operator is used to extract texture features. Finally, the extracted features are input into the support vector machine to detect whether the protective wear is in compliance with the regulations. The results show that the detection accuracy of the designed model is 95.32%, and the detection time is only 2.10 seconds. Compared with other models, it is more efficient and accurate. The average precision and recall rate of the improved model are 94.08% and 93.48%, respectively. The image similarity coefficient and average intersection-over-union ratio of the improved model are 93.47% and 82.55%, respectively, and its frame rate is 36 frames per second. The designed model can accurately identify and detect the protective wear of operation personnel in complex operation environments, further ensuring the safety of operations.

**Keywords:** defense; wear detection; YOLOv5; semantic segmentation; support vector machine; feature extraction

随着工业经济的发展以及电力的广泛使用,配网工作的需求也越来越大。特别是人员密集地区,一旦出现停电情况将直接影响当地居民的正常生活和经济运行<sup>[1]</sup>。因此,配网不停电作业成为保障电力供应连续性的重要手段。然而,在不停电作业中,由于带电工作的高风险性,作业人员的防护穿戴成为确保作业安全的关键<sup>[2]</sup>。传统的

防护穿戴检测方法往往依赖于人工巡检,不仅效率低下,而且难以保证检测的准确性和实时性<sup>[3]</sup>。随着人工智能技术的发展,研究者们开始探索使用计算机技术以及新兴传感设备对作业现场人员的穿戴情况进行检测。纪超等<sup>[4]</sup>为保障变电站工作人员的安全,提出了一种基于多分支深度卷积网络和双重注意力机制的穿戴检测算法。该

收稿日期:2025-01-03;录用日期:2025-01-30

基金项目:国网安徽省电力有限公司科技项目资助(52120524000W)

作者简介:冯玉(1986—),男,硕士,高级工程师,研究方向:电气工程。

引用本文:冯玉,吴少雷,陈振宁,等. 基于改进YOLOv5的配网不停电作业人员防护穿戴检测技术研究[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(4):116-121. (FENG Yu, WU Shaolei, CHEN Zhenning, et al. Protective wear detection technology for workers in distribution network without power outage based on improved YOLOv5[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(4):116-121.)

算法将多通道交互注意力和高效通道注意力结合,对检测模型进行改进。结果表明,该算法的全类平均检测精度达到 84.88%。Agarwal 等<sup>[5]</sup>发现在许多工作场景中,大多数人员并不愿意佩戴安全帽,这将存在较大的安全隐患。因此,其提出了一种基于循环神经网络和卷积神经网络的头盔检测方法,通过网络摄像头收集视频数据。结果表明,该方法的检测精度优于现有技术。综合研究现状可知,目前的作业人员穿戴检测方法虽然取得了较为丰富的研究成果,但在实际应用中往往受到现场环境复杂,待测目标多,细分类别杂等因素影响,难以实现对生产作业全过程进行实时监管<sup>[6]</sup>。针对此,研究提出了一种基于改进 YOLO 系列版本 5 (you only look once version 5, YOLOv5) 算法的配网不停作业人员防护穿戴检测模型。研究旨在实时检测作业人员的穿戴规范与否,进而保障配网作业的安全性。研究的创新性在于通过改进主干网络和优化损失函数的方式对 YOLOv5 模型进行改进,提高检测精度。其次,研究将人员识别,防护用具分类以及穿戴检测三者结合,进一步提高在复杂环境下的检测效率。

## 1 检测模型

### 1.1 作业人员识别

研究选择 A 地电网作业现场采集到的视频图像作为训练和测试数据。共计采集图片 123 344 张,研究将其随机打乱,并划分为 80% 的训练数据集和 20% 的测试数据集。图像采集系统使用的是分辨率为 1 920×1 080 像素的高清摄像头。为了提高模型的泛化能力,研究对采集到的图像进行了数据增强处理,包括旋转、缩放、裁剪和颜色变换等操作。在电网作业场景中,通常需要监管人员和实际操作人员同时参加作业,监管人员与实际操作人员的防护穿戴要求并不相同<sup>[7-8]</sup>。若统一将监测范围内的人员视为监测目标,将降低检测精度与效率。针对此,研究首先利用改进 YOLOv5 对配网不停电作业人员进行识别。为进一步提高 YOLOv5 识别模型的识别精度,研究在数据集中通过加噪处理和模糊处理的方式实现数据增广。在预处理之后,需要对数据进行预先标注,以明确标注出图

像中的作业人员。研究采用了 LabelImg 工具进行标注工作。之后,研究将处理完毕的数据输入到 YOLOv5 算法中进行操作人员的识别。

YOLOv5 算法具有较强的实时性和准确性,适合在复杂的电网作业场景中进行作业人员识别。研究选择 YOLOv5 的 YOLOv5s 作为识别算法,YOLOv5s 一般由四层结构组成,分别为 Input 层、骨干网络层、特征融合层以及 Output 层。输入层和骨干网络主要对图像进行预处理并提取其中的特征。骨干网络中的结构包括标准卷积模块、三卷跨阶段局部瓶颈模块 (cross stage partial bottle neck module, C3)、快速空间金字塔池化 (spatial pyramid pooling-fast, SPPF) 等模块。特征融合层中的结构分别为特征金字塔网络 (feature pyramid network, FPN) 和路径聚合网络 (path aggregation network, PAN)。FPN 和 PAN 分别负责自顶向下和自底向上的特征融合。FPN 模块通过上采样操作将高层特征图的语义信息传递给低层特征图。而 PAN 模块则通过下采样操作将低层特征图的位置信息传递给高层特征图,实现了特征信息的双向流动<sup>[9-10]</sup>。输出层将上一层输入的信息进行分类检测。YOLOv5s 的损失函数计算方法如式(1)所示。

$$Loss = Loss_{zhi} + Loss_{lei} + Loss_{ding} \tag{1}$$

式中, Loss 为整体损失函数, Loss<sub>lei</sub> 为类别损失, Loss<sub>zhi</sub> 为置信度损失, Loss<sub>ding</sub> 为定位损失。研究选择二元交叉熵函数计算类别损失和置信度损失。定位损失采用广义并交比 (Generalized Intersection over Union, GIoU) 损失进行计算。GIoU 损失的计算方法如式(2)所示。

$$Loss_{GIoU} = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{st})}{c^2} + \alpha v \tag{2}$$

式中, IoU 为预测框和真实框之间的交并比, ρ 为欧氏距离, c 为类别数量, b 为预测框的中心点, b<sup>st</sup> 为实际框的中心点, α 为权衡参数, v 为衡量特征图像长宽比稳定性的参数。虽然 YOLOv5s 具有较高的识别精度以及计算效率,但在复杂环境下其精度仍然不能保持稳定。针对此,研究在 YOLOv5s 中添加注意力模块,并对损失函数进行改进,以此优化算法。改进后的 YOLOv5s 网络结构如图 1 所示。

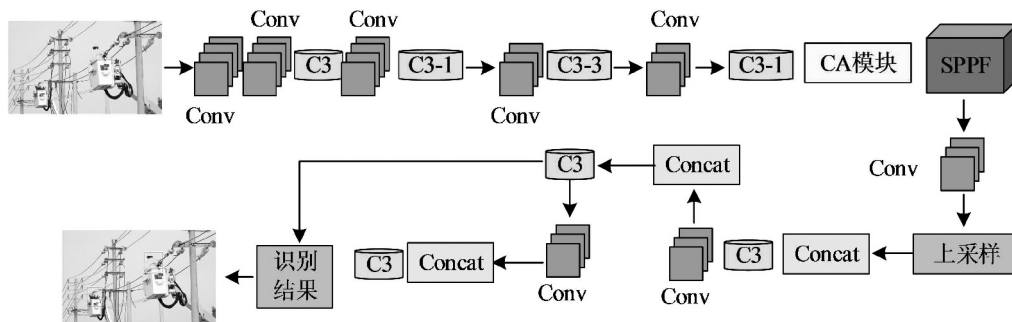


图 1 改进后的 YOLOv5s 网络结构

Fig. 1 The improved YOLOv5s network structure

如图 1 所示,研究在 SPPF 结构之前添加了通道注意力 (channel attention, CA) 模块,通过 CA 模块获取不同通

道特征的权值,并将权重赋值给各通道,进一步提高不同通道信息的融合效果。且在研究过程中发现, YOLOv5s

算法的一般损失函数并不能适用于所有情况下的作业人员识别。特别是在作业人员密集、遮挡严重或背景复杂的场景下,传统的损失函数可能会导致模型对作业人员边界的预测不够准确。因此,研究提出了一种基于结构化并交比(structured intersection over union, SIoU)的新的损失函数。该损失函数通过引入角度损失和距离损失进一步优化模型对作业人员边界的预测能力。改进后的损失函数计算方法如式(3)所示。

$$\text{Loss}_{\text{SIoU}} = 1 - \text{IoU} + \frac{\text{cost}_{\text{angle}} - \text{cost}_{\text{distance}}}{2} \quad (3)$$

式中,  $\text{cost}_{\text{angle}}$  和  $\text{cost}_{\text{distance}}$  分别为角度损失和距离损失。

### 1.2 防护穿戴检测

在对操作人员进行识别之后,需要将工作服和绝缘手套等不同的防护用具的覆盖区域子图从识别出的图像中分离出来,进一步检测其防护穿戴是否规范<sup>[11-14]</sup>。U-Net是一种常用于图像语义分割的卷积神经网络结构,其编码器-解码器的设计使得网络能够同时捕获图像的上下文信息和空间细节。因此,研究利用改进 U-Net 进行图像的多类别语义分割,提取出防护用具的覆盖区域。U-Net 的网络结构如图 2 所示。

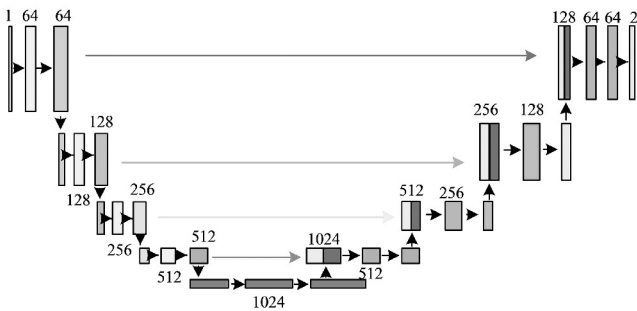


图 2 U-Net 的网络结构

Fig. 2 The network structure of U-Net

针对防护穿戴检测任务,研究对其进行改进,以适应防护用具的特定特征。改进后的 U-Net 网络结构将不同层级的 U-Net 结构融合到同一个网络中,进一步提高网络对图像中不同尺度和形状特征的捕获能力。由于不同层

U-Net 最后得到的特征图维度并不相同,研究利用多尺度特征融合(multi-scale feature fusion, MSFF)模块来整合不同层级的特征信息。MSFF 模块中应用卷积层和池化层来提取和整合不同尺度的特征,确保网络能够充分捕获防护用具的纹理和形状信息。同时,为了进一步提高网络对复杂背景的鲁棒性,研究引入了残差连接对网络结构进行改进。研究选择 ResNet 网络结构替换原特征提取器的 Encoder 部分。训练过程中需要合适的损失函数帮助算法较快实现较为理想的性能。为此,研究将 Lovasz-Softmax 损失函数和二元交叉熵(binary cross entropy, BCE)损失函数结合,得到新的损失函数。具体如式(4)所示。

$$\text{Loss}_{\text{ten}} = \alpha' \cdot \text{Lovasz}(p_i, y_i) + \beta \cdot \text{BCE}(p_i, y_i) \quad (4)$$

式中,  $\alpha'$  和  $\beta$  为权重因子,  $\text{Lovasz}(p_i, y_i)$  和  $\text{BCE}(p_i, y_i)$  分别为 Lovasz-Softmax 损失函数和 BCE 损失函数,  $p_i$  和  $y_i$  分别为预测概率和真实概率。在将不同防护用具从图像中进行分割之后,研究采用基于局部二值模式(local binary pattern, LBP)的纹理特征提取算法进行纹理特征提取,并将其提取得到的特征输入到支持向量机分类模型中,根据类别判定结果输出是否合规。实现对配电网不停电作业人员穿戴规范的监督检测。LBP 算子虽然能够很好地描述图像的局部纹理特征,但在实际应用中,由于光照、视角等因素的影响,可能会导致提取到的纹理特征不够稳定。为了进一步提高纹理特征提取的鲁棒性,研究对传统的 LBP 算法进行了改进,提出了一种基于旋转不变性和均匀模式的改进 LBP 算法。该算法在 LBP 基本思想的基础上,通过引入旋转不变性和均匀模式的概念,使得提取到的纹理特征对光照和视角变化具有更强的鲁棒性。此外,研究将灰度共生矩阵(grey level co-occurrence matrix, GLCM)与 LBP 结合,形成了一种融合灰度共生矩阵和局部二值模式的纹理特征提取方法。综合上述内容,研究首先利用改进 YOLOv5 实现在复杂环境下对操作人员的识别,并将识别后得到的图像利用改进 U-Net 进行防护用具覆盖区域的分割。之后采用基于改进 LBP 的纹理特征提取方法和二分类模型实现对穿戴规范的检测。研究设计的穿戴检测模型的流程如图 3 所示。

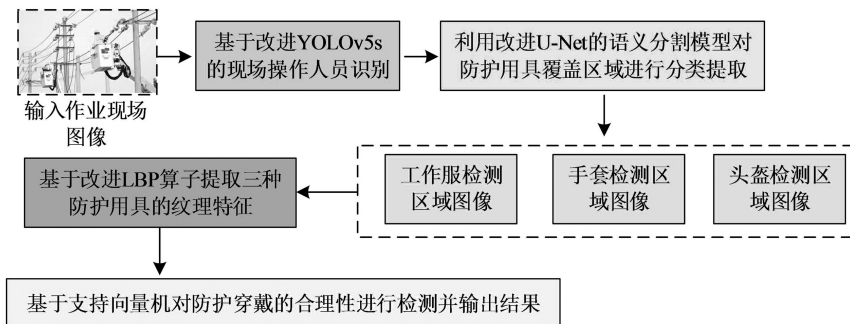


图 3 基于改进 YOLOv5 的配网不停电作业人员穿戴检测模型流程

Fig. 3 The wearing detection model process for distribution network

## 2 模型性能分析

为进一步提高对于操作人员的识别精度,研究引入注意力机制并优化损失函数对 YOLOv5s 进行改进。为检验研究提出的改进方法的有效性,研究将改进后的 YOLOv5s

和仅引入 CA 模块的 YOLOv5s-CA、仅改进损失函数的 YOLOv5s-SIoU、单一的 YOLOv5s 的训练情况进行对比。对比指标包括训练损失值、全类平均精度 (mean Average Precision, mAP)。对比结果如图 4 所示。

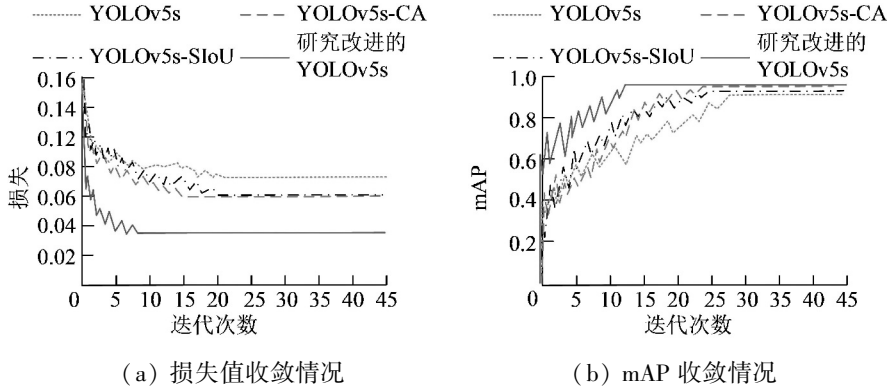


图 4 改进前后的 YOLOv5s 训练情况对比

Fig. 4 Comparison of training situations of YOLOv5s before and after improvement

如图 4(a) 所示,相较于未改进前的 YOLOv5s,另外 3 个模型的训练损失值下降幅度都更大。其中研究改进后的 YOLOv5s 模型的 3 种损失值都下降到了 0.05 以下。YOLOv5s-CA 和 YOLOv5s-SIoU 的损失值皆在 0.06 以上。且研究改进的模型仅迭代至 9 次就收敛了,相对其他模型收敛更快。如图 4(b) 所示,研究改进后的模型的 mAP 值收敛更快,仅在迭代至 11 次就收敛了,相较于其他模型少了 8 次以上。

的防护用具区域进行分割提取。在提取过程中,研究使用改进的 U-Net 建立语义分割模型。为验证研究提出的改进后的 U-Net 能够在保持较高的计算效率的同时,提升分割效果,实验将改进前后的 U-Net 的区域分割情况进行对比。对比指标包括分割准确率 (Precision)、召回率 (Recall)、图像相似系数 (dice similarity coefficient, Dice)、平均交并比 (mean intersection over union, MIoU)、每秒传输帧数 (frames per second, FPS)。对比结果如图 5 所示。

在对操作人员进行识别之后,研究对识别得到的图像

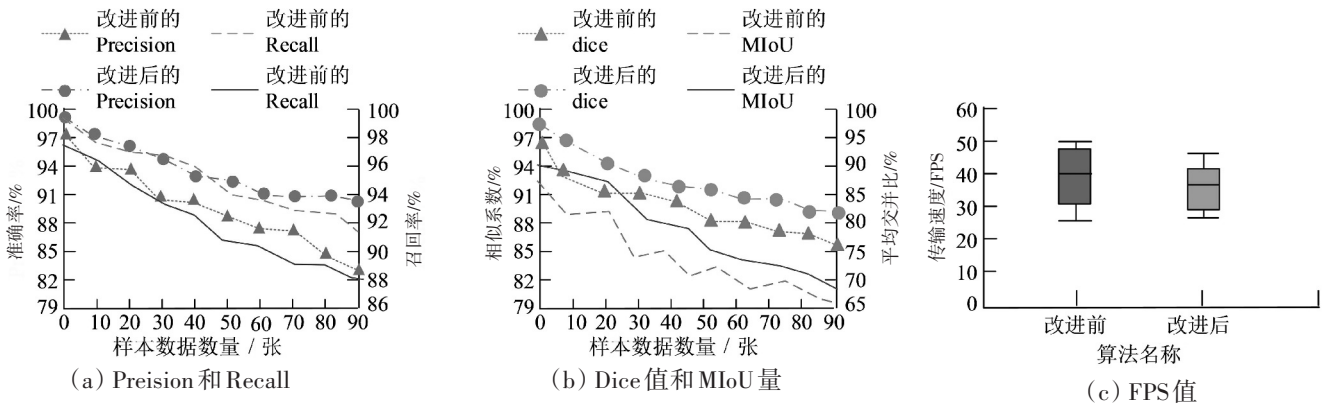


图 5 语义分割模型改进前后的区域分割评价结果对比

Fig. 5 Comparison of regional segmentation evaluation results before and after the improvement of the semantic segmentation model

如图 5(a) 所示,改进前后模型的 Precision 和 Recall 值都随着分割数据数量的增加而下降,但改进后模型的下降幅度更小。改进后模型的 Precision 和 Recall 平均值分别为 94.08% 和 93.48%,相较于改进前分别提高了 7.48% 和 6.93%。如图 5(b) 所示,改进后模型的 dice 和 MIoU 平均值分别为 93.47% 和 82.55%,相较于改进后模型分别提高了 2.47% 和 4.83%。如图 5(c) 所示,改进后模型的传输速度为 36 帧/s,而改进前模型的传输速度为 40 帧/s。可以看出虽然改进后模型的帧率相对更低,但整体与改进前模型差距并不大。

为进一步检验研究提出对防护用具覆盖区域分类提取的实际应用效果,研究利用改进 U-Net 模型与常用的语义分割模型在安徽省合肥市多个配电不停电作业现场进行实地测试。对比的语义分割模型包括:改进前的 U-Net、全卷积网络 (fully convolutional networks, FCN)、语义分割网络 (semantic segmentation network, SegNet)。这些实地测试涵盖了多种复杂环境,包括不同光照条件、不同视角以及作业人员在不同动作状态下的情况。提取出监控照片共计 1 245 张,研究利用语义分割模型对头盔、手套以及工作服区域进行检测,并记录检测结果。具体如图 6 所示。

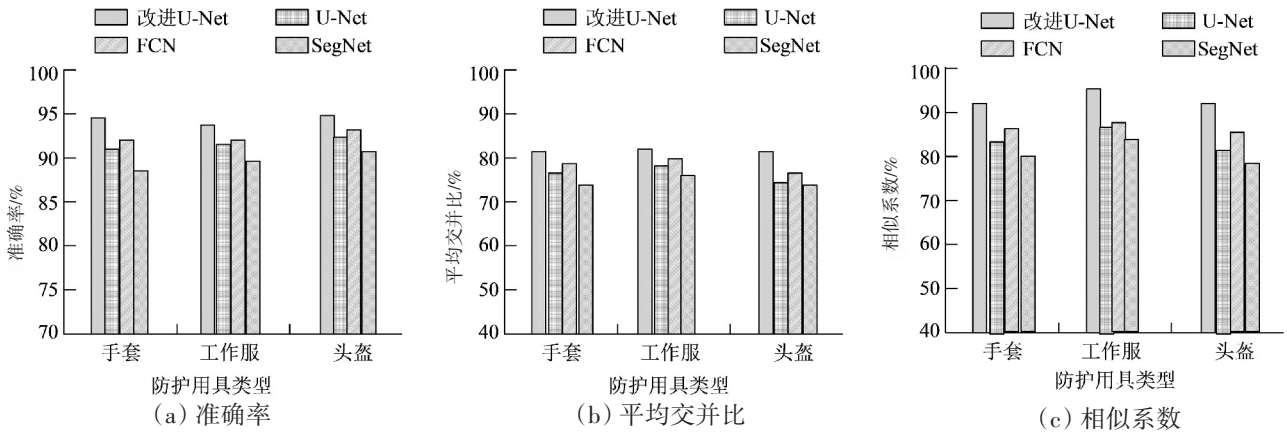


图 6 防护用具覆盖区域分类提取的实例测试对比结果

Fig. 6 The instance test and comparison results of the classification extraction of the covered areas by protective equipment

如图 6(a)、6(b) 和图 6(c) 所示,在实例测试场景中,研究提出的改进 U-Net 的防护用户分类提取准确率、MIoU、Dice 指标皆超过了另外 3 个模型。且在 3 种防具比较中,工作服的语义分割效果相对更好,这是由于工作服在图像中通常占据较大的面积,且颜色、纹理等特征相较于头盔和手套更为明显,使得分割模型更容易捕捉和识别。

为进一步验证研究提出的语义分割模型的分割效果,研究利用在安徽省合肥市提取到的 1 245 张图片进行防护用具区域的分割。从提取的图片中筛选出 466 张包含头盔、手套以及防护工作服的完整图片。将改进前后 U-Net 模型的实际分割实例进行记录,并对比两者的分割效果。对比的实例分割效果如图 7 所示。

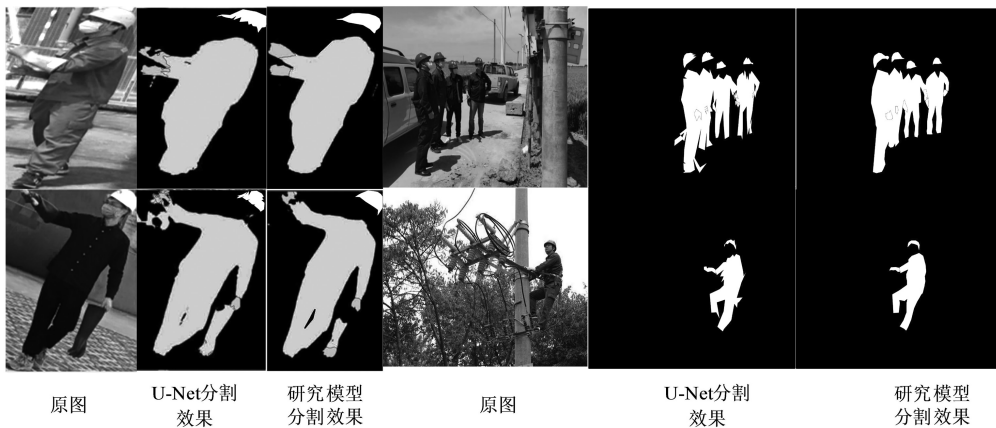


图 7 手套、头盔及工作服的区域分割效果对比

Fig. 7 Comparison of the area segmentation effects of gloves, helmets and work clothes

如图 7 所示,传统的 U-Net 切割得到的 3 种防护用具的区域存在较为明显的边缘模糊、细节丢失以及误分割现象。对于手套的边界分割不够精确,部分手指区域被错误地归类为背景或手部其他部分。头盔的顶部和边缘部分出现了较为明显的模糊,未能清晰地区分头盔与佩戴者的头发和背景。工作服的边缘部分,尤其是在与其他物体接触或重叠的地方,分割效果不够理想,出现了部分区域被错误地归类为其他类别或未分割的情况。相比之下,改进后的 U-Net 模型在区域分割方面表现出了更高的精度和鲁棒性,避免了误分割或漏分割的情况。

为检验所提出的作业人员穿戴规范检测模型(模型 1)的实际应用效果,研究将其与目前较为流行的几个穿戴检测模型进行对比试验。对比模型包括文献[14]中 Zeng L 等提出的穿戴检测模型(模型 2)、文献[15]中郑海洋等提出的穿戴检测模型、文献[16]中许逵等提出的穿戴检测模型(模型 4)。对比实验同样在多个不同的电

力配网不停电作业现场进行。研究测试时间为 2024 年 3 月份至 2024 年 4 月份两个月,共计测试 68 次,研究检测包括手套佩戴情况、工作服穿着情况、头盔佩戴情况。在这 3 种情况下,各个模型的检测准确率以及检测时间的对比结果如表 1 所示。

表 1 各模型对作业人员防护穿戴情况的检测结果对比

Tab. 1 Comparison of the detection results of each model on the protective gear wearing situation of the workers

模型	准确率/%			时间/s		
	手套	工作服	头盔	手套	工作服	头盔
1	95.77	94.98	95.21	1.84	2.47	1.99
2	82.74	81.56	82.00	3.00	4.15	3.65
3	91.08	90.96	91.42	2.55	3.48	2.69
4	88.08	87.92	88.43	2.79	3.87	3.24

如表 1 所示,模型 1 的平均检测准确率和平均检测时

间分别为 95.32% 和 2.10 s。相较于模型 2、模型 3 和模型 4, 模型 1 的检测准确率分别提高了 12.98%、4.24% 和 7.24%, 检测时间则分别缩短了 38.33%、25.49% 和 38.00%。由此可见, 研究提出的基于改进 YOLOv5 的配网不停电作业人员穿戴检测模型在检测准确率和检测速度上均优于其他对比模型, 具有较高的实际应用价值, 能够在复杂环境下对作业人员的防护穿戴情况进行实时监测, 保障电网施工安全。

### 3 结论

针对传统的基于人工的配网不停电作业人员防护穿戴情况的检测手段效率低, 效果差等情况, 研究提出了一种基于改进 YOLOv5 的防护穿戴检测模型。该模型利用改进 YOLOv5 算法、改进 U-Net 和 LBP 纹理特征提取方法实现了操作人员识别、防护用具覆盖区域分割以及防护穿戴情况检测。实验结果表明, 研究改进后的 YOLOv5s 的训练损失下降到了 0.05 以下, 且收敛速度相较于未改进 YOLOv5s 更快。且改进后 YOLOv5s 的 mAP 训练迭代次数仅为 9 次。改进后的语义分割模型的 Precision 和 Recall 值分别为 94.08% 和 93.48%, dice 和 MIoU 平均值分别为 93.47% 和 82.55%, 传输速度为 36 帧/s。能够在保持较快的帧率情况下有效提升模型的语义分割能力。在对各类防护用具穿戴的检测应用中, 模型 1 的平均检测准确率和平均检测时间分别为 95.32% 和 2.10s, 明显优于其他模型。研究设计模型能够在复杂环境下保持较高的检测精度, 为电网施工安全提供有力保障。未来的研究工作中, 可进一步引入更多分类器, 融合更多具有判别性特征, 进一步完善模型性能。

### 参考文献

- [1] 龚建平, 杨天丽. 基于调控云的电力继电隐性安全风险防护技术[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(8):1-6.
- [2] 马富齐, 王波, 董旭柱, 等. 面向电力生产精细化风险解译的高度相似防护工具智能检测技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3):971-980.
- [3] 杨乐, 王金丽, 段祥骏, 等. 基于轻量化改进 YOLOv5 的配网工程质量缺陷检测方法[J]. 电网技术, 2023, 47(9):3864-3872.
- [4] 纪超, 侯威, 高鸣江, 等. 基于 MBDC 和双重注意力的变电站人员穿戴检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(6):247-255.
- [5] AGARWAL A, SINGHAL G, KUMAR S, et al. Helmet detection and number plate recognition for safety and surveillance system [J]. International Journal of Research in Engineering, Science and Management, 2023, 6(3):94-98.
- [6] 高敏, 邹阳林, 曹新旺. 基于改进 YOLOv5 模型的织物疵点检测[J]. 现代纺织技术, 2023, 31(4):155-163.
- [7] 傅荟瑾, 史天运, 王瑞, 等. 基于改进 YOLOv5 的高铁周界入侵人员检测方法研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(9):162-169.
- [8] 王道累, 张世恒, 袁斌霞, 等. 基于改进 YOLOv5 的轻量化玻璃绝缘子自爆缺陷检测研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(10):4382-4390.
- [9] 王超, 张海涛, 郑皓天, 等. 考虑客户用电安全隐患的配电网脆弱线路风险自动预警方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(2):45-48.
- [10] 杨乐, 郭一鸣, 霍勇博, 等. 改进 YOLOv5 在电力生产违规穿戴检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14):160-168.
- [11] 陈富国, 赵盼盼, 牛博, 等. 输电线路带电作业机器人的电磁分析与防护设计[J]. 高压电器, 2023, 59(2):81-88.
- [12] 凌强, 刘宇, 王春举, 等. DN-YOLOv5 的金属双极板表面缺陷检测算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(12):104-112.
- [13] 朱萌, 陈可, 李明, 等. 基于纹理分布特征的高光谱图像模糊区域识别[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11):79-83.
- [14] ZENG L, DUAN X, PAN Y, et al. Research on the algorithm of helmet-wearing detection based on the optimized yolov4[J]. The Visual Computer, 2023, 39(5):2165-2175.
- [15] 郑海洋, 宋纯贺, 武婷婷, 等. 面向绝缘手套佩戴状况检测的小目标检测与匹配算法[J]. 小型微型计算机系统, 2023, 44(9):1989-1995.
- [16] 许逵, 李鑫卓, 张历, 等. 自然场景下配电网施工安全帽佩戴检测算法[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(8):320-328.
- [9] WUZ, LI J, ZUO J, et al. Path planning of UAVs based on collision probability and Kalman filter[J]. IEEE Access, 2018 (6):34237-34245.
- [10] JIANG H, LIANG Y. Online path planning of autonomous UAVs for bearing-only standoff multi-target following in threat environment[J]. IEEE Access, 2018 (6):22531-22544.
- [11] HU H, WU Y, XU J, et al. Cuckoo search-based method for trajectory planning of quadrotor in an urban environment[J]. Proc. Inst. Mech. Eng., G, J. Aerosp. Eng., 2019, 233(12):4571-4582.
- [12] YU Z, GUAN J. Fire and rescue combat technical training system construction for dangerous chemicals[J]. Procedia Engineering, 2023, 135(12):655-667.
- [13] JI J, JIN Y, HUA A. Multiscale theories and applications: from microstructure design to macroscopic assessment for carbon nanotubes networks[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(1):1-18.
- [14] ASHKOUTI F, KHAMFOROOSH K, SHEIKHAHMADI A. DHkmeans-diversity: distributed hierarchical K-means for satisfaction of the-diversity privacy model using apache spark[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 78(6):1-35.
- [15] 刘家辛, 温刚, 田小壮, 等. 基于三维点云的变电站无人机巡检路径规划[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(6):1-4, 9.
- [16] 王远浩, 温秀平, 金承珂, 等. 一种改进的 SA-APF 路径规划算法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(7):12-16.
- [17] 曾庆杨, 王荣浩. 基于目标搜索的无人车路径规划研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(1):5-10, 15.

(上接第 82 页)