

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.025

起重设备钢丝绳视觉识别方法研究

路成龙, 庆光蔚, 杨玉

(南京市特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210002)

摘要:针对起重机械钢丝绳检测中存在精度低、效率低下、易受环境干扰等问题,提出一种基于 YOLOv8n 的算法 ADS-YOLOv8,以提高钢丝绳断丝、点蚀等外观缺陷的识别精度。在主干网络中引入 AKConv,替换 C2f 中瓶颈层中卷积,重构为 C2f-AK 模块,降低参数数量的同时提高特征提取能力。在颈部网络引入多尺度序列特征融合机制,以提高模型对不同尺度特征的整合能力。通过融合深层与浅层特征的信息,增强模型对全局信息与局部细节的理解。在头部网络中引入 SEAM 模块,提高对遮挡物体的特征提取和语义表达能力。经实验改进后的算法 $mAP_{0.5}$ 值达到 96.6%,相对于改进前提高 2.4 个百分点,更符合钢丝绳视觉检验的应用需求。

关键词:钢丝绳; YOLOv8n; AKConv; 多尺度序列特征融合; 检测头

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)04-0130-05

Research on Visual Recognition Method of Steel Wire Rope for Lifting Equipment

Lu Chenglong, Qing Guangwei, Yang Yu

(Nanjing Special Equipment Safety Supervision Inspection and Research Institute, NanJing 210002, China)

Abstract: To address issues such as low accuracy, low efficiency, and susceptibility to environmental interference in the inspection of steel wire ropes in lifting machinery, an algorithm ADS-YOLOv8 based on YOLOv8n is proposed to improve the recognition accuracy of appearance defects such as broken wires and pitting. In the backbone network, AKConv is introduced, replacing the convolution in the bottleneck layer of C2f and reconstructing it as the C2f-AK module, reducing the number of parameters while enhancing feature extraction capability. A multi-scale sequential feature fusion mechanism is introduced in the neck network to improve the model's ability to integrate features at different scales. By fusing information from deep and shallow features, the model's understanding of global information and local details is enhanced. The SEAM module is introduced in the head network to improve feature extraction and semantic expression capability for occluded objects. Experimental results show that the improved algorithm achieves an $mAP_{0.5}$ value of 96.6%, an increase of 2.4 percentage points compared to before improvement, better meeting the application requirements of visual inspection for steel wire ropes.

Keywords: steel wire rope; YOLOv8n; AKConv; multi-scale sequential feature fusion; detection head

0 引言

钢丝绳作为起重设备中重要的牵引装置,在货物搬运和提升中发挥着重要的作用。但其在使用过程中容易产生断丝、点蚀等损伤现象,累计损伤会存在严重的安全隐患,且危及生命和财产安全。当下钢丝绳损伤检测普遍采用人工检测^[1]和传感器检测^[2]两种手段,前者效率低下且容易漏检、误判,难以适应大规模检测任务,后者利用电磁检测^[3]、声发射检测法^[4]、光学检测法^[5]、X射线检测法^[6]等手段,虽提高了检测效率但容易受

到环境的干扰,无法识别损伤类型,且成本较高,对人体有一定的辐射危害^[7]。随着目标检测算法的发展,深度学习技术在起重机械钢丝绳视觉缺陷识别中具有自动识别缺陷分类、准确性高、环境适应能力强的优点,其有着广阔的应用前景^[8-9]。方旭东等^[10]提出一种轻量化的 YOLOv5s 算法,能够提高矿井钢丝绳断丝检测能力。高嘉等^[11]提出一种基于 YOLOv5 的改进算法(TWRD-Net),能够提高对钢丝绳挤出、磨损及断丝的检测能力。李志星等^[12]提出一种改进后的 YOLOv8 算法,能够提高煤矿用钢丝绳表面视觉缺陷检测

基金项目:江苏省市场监督管理局科技计划项目(Kj2025050);南京市市场监督管理局科技计划项目(Kj2024030)

第一作者简介:路成龙(1990—),男,山东齐河人,工程师,硕士,研究方向为特种设备安全检验,xinluchenglong88@126.com。

通信作者简介:庆光蔚(1985—),女,江苏南京人,正高级工程师,高检师,博士,研究方向为特种设备安全检验,297028322@qq.com。

精度。考虑到起重设备钢丝绳多根布置且在运动时容易抖动造成小目标识别精度不足的缺点,本文以 YOLOv8n 为基准算法,针对起重设备钢丝绳的缺陷特征识别进行模型改进,以提高钢丝绳断丝、点蚀等外观缺陷的识别精度。

1 改进的 ADS-YOLOv8 算法

1.1 改进策略

YOLOv8 算法是 Ultralytics 公司于 2023 年 1 月 10 日提出,它在检测精度、效率方面表现出色^[13]。YOLOv8 算法主要包括 3 部分,主干网络^[14](Backbone)、颈部网络^[15](Neck)和头部网络^[16](Head)。其中主干网络由卷积、C2f 和下采样模块 SPPF 模块组成,主要用于输入图像特征提取。颈部网络部分用于将来自不同层、不同尺度的特征图进行融合。头部网络采用解耦头结构和无锚框策略,利用 3 个解耦头在不同尺度上完成图像检测与分类任务,最终输出目标类别及检测框位置信息。

针对起重设备钢丝绳视觉缺陷识别中存在的小目标检测性能不佳、漏检、误检和遮挡等突出问题,提出了一种 ADS-YOLOv8 改进算法,用于提高钢丝绳视觉缺陷检测性能。它的主要贡献表现为:主干网络中引入 AKConv^[17],同时替换 C2f 中瓶颈层 Bottleneck 中卷积,重构 C2f-AK 模块,在降低参数量的同时能提高特征提取能力;颈部网络引入多尺度序列特征融合,从而更好地结合深层和浅层特征图信息,提高多尺度信息的提取能力和特征融合能力;在头部网络中引入 SEAM 模块^[18],能提高对遮挡物体的特征提取和语义表达能力。

1.2 C2f-AK 模块

现行标准卷积的卷积核为固定的 $A \times A$ 大小,

其计算的范围是有限且固定的。然而从起重设备采集的钢丝绳图片中的视觉缺陷位置和大小都是不同的,这导致传统卷积无法很好地适应检测目标的变化。因此,在主干网络中引入了 AKConv,该卷积通过一种新的坐标生成算法定义了任意大小卷积核的初始位置,并通过引入偏移量来调整每个位置的样本形状,以适应目标的变化。AKConv 首先计算偏移量 offset,然后基于偏移量和其他几何操作来调整采样点的位置,实现双线性插值的过程,从而完成对输入特征 x 的卷积操作^[19]。通过调整卷积核采样位置的偏移量,AKConv 能够动态调整卷积采样的形状和位置,相比传统的固定形状卷积核,其灵活性更强。起重设备的作业环境通常变化多端,且起重绳周围的物体可能会干扰缺陷目标的检测。AKConv 的设计能够显著提升模型在复杂背景下对小尺寸目标的检测精度,同时保证对大尺寸目标的高检测性能,从而能在多变的起重机作业环境中提供更加稳健和精准的缺陷识别能力。

YOLOv8n 主干网络中 C2f 模块中残差连接导致该模块参数量较大且针对小目标检测精度不佳,因此在 C2f 模块中引入可以具有任意数量参数和任意采样形状的卷积核 AKConv。由于其参数增长趋势相对线性,与传统卷积操作相比,可以在不大幅度增加计算复杂度和参数数量的情况下实现性能的显著提升,这对于实时目标检测任务尤为重要,特别是在边缘计算设备上运行的应用。设计思路是把 C2f 中瓶颈层 Bottleneck 中的标准卷积替换成 AKConv,选择较小卷积核,从而降低模型的参数量。改进后的 C2f-AK 算法结构如图 1 所示。

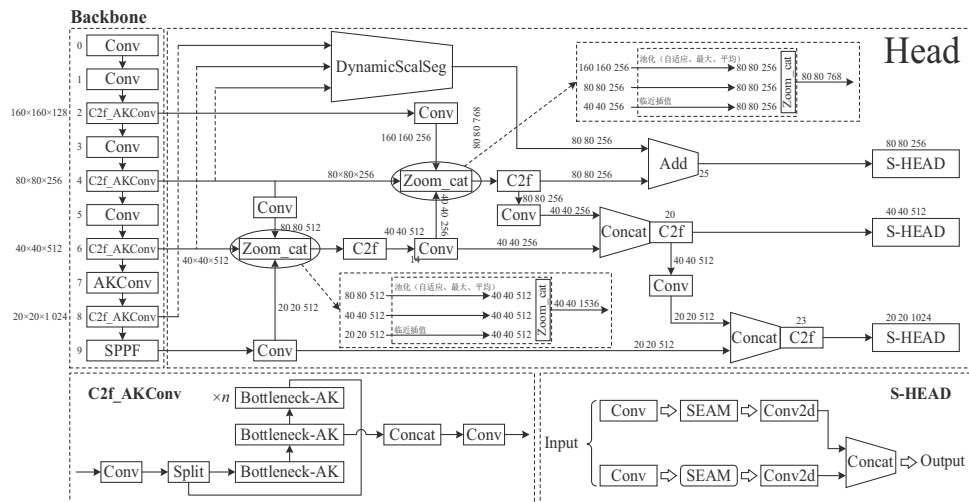


图 1 改进后的算法模型图

1.3 引入注意力尺度序列融合 AZD

YOLOv8n 的颈部网络中采用 PAN-FPN 结构,利用上采样和下采样操作进行跨层融合特征信息,这种操作忽略了不同尺度之间的信息交互,这在钢丝绳视觉缺陷微小目标特征融合检测任务中容易丢失关键信息。因此,在颈部网络中引入注意力尺度序列融合模块^[20],结合空间和尺度特征,提高微小目标检测精度。注意力尺度序列融合模块包括 Zoom-cat、DynamicScalSeg 和 ADD 3 个模块。

Zoom-cat 模块将输入的大、中、小 3 种尺度的钢丝绳视觉缺陷特征进行特征融合,以提高信息融合的丰富度。对大尺度特征图使用自适应平均池化和自适应最大池化混合模块进行下采样,对中尺度特征图操作保持不变,对低尺度特征图使用最近邻插值法进行上采样。将 3 个尺寸的特征图进行拼接,得到尺寸大小为中尺寸且 3 倍通道数的融合特征图。

DynamicScalSeg 模块利用三维卷积提取 P4 层、P6 层和 P8 层中的尺度序列特征,经过批量归一化和激活函数激活后完成尺度序列特征提取。

ADD 模块将 DynamicScalSeg 模块提取的特征与 P2 层、P4 层进行融合,P2 层信息的融入有效减少了小目标检测信息的丢失。ADD 将 Zoom-cat 中的信息送入通道注意力机制中进行加权处理,处理后的结果跟 DynamicScalSeg 中的信息一起送入位置注意力中进行加权处理,最终得到处理后的结果。ADD 模块结构如图 2 所示。

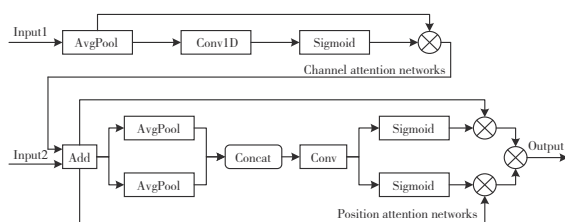


图 2 ADD 模块结构图

1.4 SEAM 检测头

在起重机械钢丝绳视觉缺陷检测任务中,并排布置的钢丝绳在检测时会出现遮挡重叠,这会导致特征缺失、误检、漏检等问题的发生。为此,在头部网络中引入 SEAM 模块,利用特征图之间的相互关系增强未遮挡部分的特征信息进而弥补遮挡导致的信息丢失,从而解决遮挡导致检测精度下降的问题^[21]。

SEAM 注意力模块结构如图 3 所示。

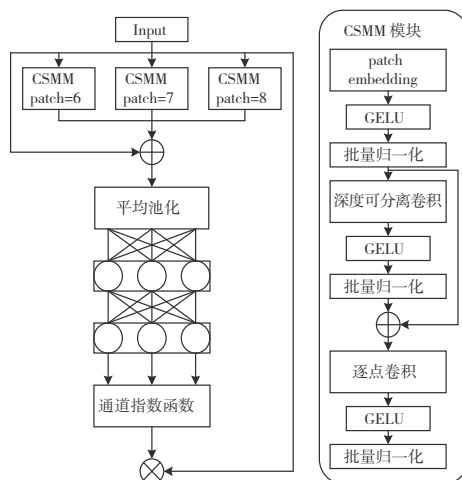


图 3 SEAM 结构图

首先将深度可分离卷积和逐点卷积进行串联构成 CSMM 模块,模块中深度可分离卷积可以学习不同通道的重要信息并降低参数量,但对不同通道之间的特征联系获取能力不足;串联逐点卷积可以强化通道间的关联性,方便信息在通道间流动,从而整合通道间信息弥补深度可分离卷积造成的信息丢失。其次,3 个不同尺度的 CSMM 模块经过平均池化后使用一个两层的全连接网络进行各通道信息融合,可以进一步增强通道间信息流动的通畅性。全连接层网络输出结果经过通道指数函数处理,将取值范围从 $[0, 1]$ 扩大到 $[1, e]$,它能够减少位置误差。最后,在头部网络中引入 SEAM 模块,改进后的模块包含一个卷积层 Conv、一个用于特征增强的 SEAM 模块,以及一个最终的用于预测卷积层。由于 SEAM 模块开发了通道和空间混合注意力机制,因此其既可以提取局部特征信息,利用上下文语义信息推测被遮挡信息,又可以利用全局平均池化操作整合全局信息,调整通道间权重以适应检测任务,从而提高检测的准确性和鲁棒性。

2 实验环境搭建及评价指标

2.1 实验数据集

为了验证改进后的 ADS-YOLOv8 算法的性能,通过引入 RoboflowDBTT 数据集同时现场采集断丝、点蚀图片构成新的数据集。该数据集共包括 1 318 张图片,主要包括断丝和点蚀两种类别,在使用 Labelimg 工具进行标注后按照 8 : 1 : 1 的比例分为训练集、验证集和测试集。数据集包含

的 2 种外观缺陷类别如图 4 所示。

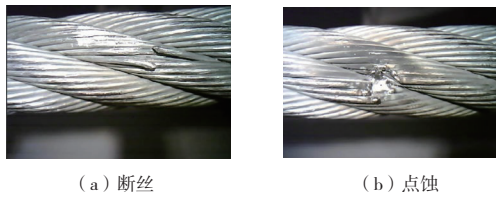


图 4 数据集中两种缺陷类别

2.2 实验环境搭建

实验环境搭建的具体参数如表 1 所示。

表 1 实验环境参数

实验环境	配置参数
操作系统	Ubuntu20.04.4
CPU	Inter(R) i9-13900K
GPU	NVIDIA RTX A6000
深度学习框架	Pytorch 1.11.0
编辑语言	python 3.8
CUDA 版本	11.3.0
优化器	Adam
迭代次数(epoch)/次	200
训练批次/次	8

2.3 评价指标

评价改进后的算法在起重设备钢丝绳外观缺陷视觉识别方面的性能,选择准确率^[22](precision, P)、召回率^[23](recall, R)、平均精度均值^[24](mean average precision, mAP)作为评价指标,其中 $mAP_{0.5}$ 表示交并比阈值为 0.5 时的平均精度均值, $mAP_{0.5:0.95}$ 表示交并比 0.5~0.95 之间 10 个 mAP 值的均值,可以用来评估模型整体的预测性能

$$P = \frac{TP}{TP+FP} \times 100\% \quad (1)$$

$$R = \frac{TP}{TP+FN} \times 100\% \quad (2)$$

$$AP = \int_0^1 P_r dR \quad (3)$$

$$mAP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AP(n) \quad (4)$$

式中: TP 为正样本被正确识别的数量; FP 是误检的负样本数量; FN 为即漏检的正样本数量; n 为数据集类别总数; i 为检测次数。

3 实验结果分析

3.1 模块消融实验

为了验证 AKConv、AZD 和 SEAM 3 个模块在起重机械钢丝绳视觉缺陷识别中的单独及联合效果,进行了模块消融实验。消融实验结果如表 2 所示,其中 P 表示精确率, R 表示召回率, P 、 R 、 mAP 值的单位均是%;“√”表示采用该模块,“-”表示未采用该模块。通过消融实验可以得知,相对于改进前的基准算法 YOLOv8n,在主干中替换成 AKConv、在颈部网络中引入 AZD 模块和在头部网络中引入 SEAM 模块, $mAP_{0.5}$ 值均得到了不同程度的提升,即分别提高了 0.8 个百分点、1.7 个百分点和 1.4 个百分点,颈部网络引入 AZD 模块后 $mAP_{0.5}$ 值提升最高,达到了 95.9%。将 AKConv 与 AZD 模块联合使用时, $mAP_{0.5}$ 值达到 96.2%,相较于基准算法和各模块单独使用时均有提高。特别的,将 3 个模块一起使用时,最终的 $mAP_{0.5}$ 值达到最大 96.6%,证明了改进后的算法检测性能的优越性。

表 2 各模块消融实验 单位: %

AK	AZD	SEAM	P	R	$mAP_{0.5}$	$mAP_{0.5:0.95}$
-	-	-	92.0	91.7	94.2	49.1
√	-	-	91.2	94.4	95.0	53.5
-	√	-	93.2	93.8	95.9	53.1
-	-	√	93.8	94.8	95.6	56.5
√	√	-	92.6	95.4	96.2	57.1
√	√	√	95.4	93.5	96.6	61.5

3.2 对比实验

为了进一步验证改进后的算法的性能,与主流算法模型进行对比实验,包括 YOLO 系列和 SSD^[25]。实验结果显示,改进后的算法模型相对于主流算法模型, mAP 值均表现最佳,充分证明了改进后的算法在小目标检测任务中的优越性。改进后的算法与主流算法的 $mAP_{0.5}$ 值对比结果如图 5 所示。

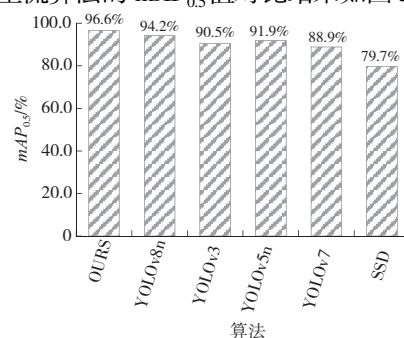


图 5 对比实验结果图

3.3 可视化效果图

最终,起重机械钢丝绳外观缺陷视觉识别的可视化效果如图6所示。

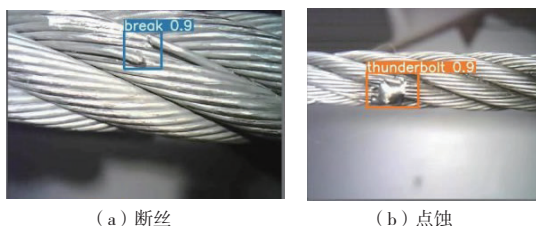


图6 可视化效果图

4 结语

本文提出了一种视觉识别起重机械钢丝绳外观缺陷的检测方法 ASD-YOLOv8。该算法在主干网络中融入了 AKConv,从而增强钢丝绳断丝点蚀缺陷提取性能;在颈部网络中引入注意力尺度序列融合增强空间和尺度之间的信息融合能力;在头部网络中引入 SEAM 模块优化遮挡导致检测精度下降的问题。实验表明,改进后的算法 mAP_{0.5} 值达到了 96.6%,相对于改进前提高了 2.4 个百分点,这更符合现阶段起重机械钢丝绳视觉检验的应用需求。

参考文献:

- [1] 陈荣信,井陆阳,白晓瑞,等. 基于残差网络的钢丝绳损伤图像定量识别[J]. 机床与液压,2023,51(12): 24-29.
- [2] 武新军,王峻峰,杨叔子. 钢丝绳无损检测技术的研究现状[J]. 煤炭科学技术,2000,28(11): 22-24,49.
- [3] 周前飞,丁树庆,冯月贵,等. 起重机械钢丝绳漏磁-视觉多模态高精度检测系统研究[J]. 起重运输机械,2025(9): 25-35.
- [4] 郝允娟. 一种基于 X 光的钢丝绳芯输送带无损检测方法[J]. 自动化与仪器仪表,2025(5): 48-53.
- [5] 李耀东. 煤矿智能化运输中钢丝绳芯输送带检测技术[J]. 工矿自动化,2023,49(增刊2): 18-19,80.
- [6] 任建浩. 基于 B/S 系统的钢丝绳状态实时监测与断丝识别方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2024.
- [7] 王晗宇. 基于红外热视觉的钢丝绳表面断丝缺陷检测方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2024.
- [8] 郭鑫,马行,穆春阳,等. 基于 YOLOv8-SLA 轻量化钢丝绳缺陷检测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2025(3): 140-144.
- [9] 苏立鹏,娄益凡,杨吴奔,等. 基于改进 Faster-RCNN 的起重机钢丝绳表面缺陷识别方法[J]. 机电工程,2025,42(7): 1341-1349.

- [10] 方旭东,于正,杨发展,等. 基于注意力机制的轻量化矿井钢丝绳断丝检测算法研究[J]. 中国煤炭,2024,50(8): 152-164.
- [11] 高嘉,刘涛,王显峰,等. TWRD-Net:一种用于曳引钢丝绳缺陷的实时检测网络算法[J]. 仪器仪表学报,2023,44(6): 223-235.
- [12] 李志星,杨啸龙,李天昊,等. 基于 YOLOv8 的煤矿用钢丝绳损伤检测算法[J]. 电子测量技术,2024,47(9): 120-128.
- [13] 闫建红,冉同霄. 基于 YOLOv8 的轻量化无人机图像目标检测算法[J]. 图学学报,2024,45(6): 1328-1337.
- [14] 李乐军,梁国伟. 基于改进 YOLOv9 算法的钢丝绳表面缺陷检测[J]. 计算机测量与控制,2025,33(9): 56-62,73.
- [15] 陈嘉琪,王勇,刘少清,等. 基于 YOLOv7-tiny 优化的轻量钢丝绳缺陷检测算法[J]. 工业控制计算机,2025,38(2): 88-90.
- [16] 姜泓宇,董增寿,贺之靖. 基于机器视觉的钢丝绳表面缺陷检测[J]. 太原科技大学学报,2023,44(5): 434-439,446.
- [17] 符世琛,孟博,岳丽荣,等. 基于改进 YOLOv8 的煤泥浮选表层非均匀矿化气泡智能检测方法研究[J]. 中国煤炭,2025,51(7): 221-234.
- [18] 王道累,方梦信,张振,等. 融合注意力机制及改进 YOLOv8 多模态模型的光伏功率损耗预测方法[J]. 太阳能学报,2025,46(9): 602-610.
- [19] 肖振久,严肃,曲海成. 基于多重机制优化 YOLOv8 的复杂环境下安全帽检测方法[J]. 计算机工程与应用,2024,60(21): 172-182.
- [20] 孙佳宇,徐民俊,张俊鹏,等. 优化改进 YOLOv8 无人机视角下目标检测算法[J]. 计算机工程与应用,2025,61(1): 109-120.
- [21] 马恒,刘利灿,高科. 融合多尺度特征的轻量化煤炭输送带异物检测方法[J]. 安全与环境学报,2024,24(12): 4617-4629.
- [22] 路成龙,冯月贵,庆光蔚. 基于改进 YOLOv8 的电梯内电动车识别方法研究[J]. 机械制造与自动化,2024,53(4): 219-223,229.
- [23] 马跑,文志诚,王佳. 改进 YOLOv8s 的无人机航拍图像目标检测算法[J]. 计算机工程与设计,2025,46(10): 2795-2802.
- [24] 刘震,杨贤昭,陈洋,等. 基于改进 YOLOv8s 的雾天目标检测算法[J]. 电子测量技术,2024,47(20): 186-194.
- [25] 李殿奎,王振豫,陈育德,等. 改进 YOLOv8 算法的胃肠道息肉检测[J]. 哈尔滨理工大学学报,2025,30(3): 32-41.

收稿日期:2025-02-05