

基于机器视觉的摇枕吊裂纹识别与探伤评价

杨帆¹ 赵梦娇² 陈颖¹ 蒋雪³

(1. 长春中车轨道交通装备有限公司, 130062, 长春; 2. 大连交通大学詹天佑学院, 116028, 大连;

3. 沈阳大方电气有限公司, 110003, 沈阳)

摘要 [目的]摇枕吊作为摇枕弹簧悬挂装置中的关键组成部分,因动载荷过大、使用年限长等因素,摇枕吊极易产生疲劳裂纹,对铁路的行车安全有重大影响。为满足摇枕吊磁粉探伤智能化的需求,辅助检测人员完成探伤工作,特开展基于机器视觉的摇枕吊裂纹识别与探伤评价研究。[方法]针对 YOLOv5 算法主干网络在捕捉裂纹信息能力上的局限,提出将 SimAM(相似性感知激活模块)机制融入主干网络,旨在增强模型对裂纹信息的敏感度,并同步提升其抵抗背景噪声干扰的能力。另外,针对 Neck(颈部)网络部分在特征融合阶段可能遭遇的信息丢失挑战,引入了一种 BiFPN(增强的特征金字塔网络)结构,以实现不同尺度特征图的高效融合。通过实施加权融合策略与双向连接机制,有效减少了底层关键信息的损失,进而优化了特征融合的整体效果。[结果及结论]通过搭建的摇枕吊图像采集系统对 YOLOv5-SA-BF 模型进行性能测试,试验表明改进算法的 M_{AP} (均值平均精度)指标达到了 98.08%,较原模型提升了 2.91%, R_{call} (召回率)指标提升了 4.13%,该模型有效解决了背景误判、检测精度低的问题,满足了实际检测中的需求。**关键词** 铁路客车;摇枕吊;裂纹识别;磁粉探伤;探伤评价;YOLOv5-SA-BF 模型

中图分类号 TP391.4;U270.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.02.027

Crack Identification and Flaw Detection Evaluation of Bolster Hanger Based on Machine Vision

YANG Fan¹, ZHAO Mengjiao², CHEN Ying¹, JIANG Xue³

(1. Changchun CRRC Rail Vehicles Facilities Co., Ltd., 130062, Changchun, China; 2. Zhan Tianyou College, Dalian Jiaotong University, 116028, Dalian, China; 3. Shenyang Dafang Electric Co., Ltd., 110003, Shenyang, China)

Abstract [Objective] The bolster hanger, as a critical component of the bolster spring suspension system, is highly susceptible to fatigue cracks due to excessive dynamic loads and prolonged service life, significantly impacting railway operational safety. To meet the intelligent magnetic particle flaw

detection requirements for bolster hangers and assist inspection personnel in the flaw detection work, special research on crack identification and flaw detection evaluation of bolster hangers is conducted based on machine vision. [Method] To address the limitations of the YOLOv5 algorithm backbone network in capturing crack information, it is proposed to integrate the SimAM (similarity-aware attention module) mechanism into the backbone network to enhance the model's sensitivity to crack information and its resistance to background noise interference synchronously. In addition, to overcome the potential information loss during the feature fusion stage of the Neck network, an enhanced BiFPN (bidirectional feature pyramid network) structure is introduced for efficient fusion of multi-scale feature maps. By implementing a weighted fusion strategy and bidirectional connection mechanism, the loss of critical bottom-level information is effectively reduced. [Result & Conclusion] The performance of the YOLOv5-SA-BF model is tested using an image acquisition system for bolster hangers. Experimental results demonstrate that the improved algorithm achieved a M_{AP} (mean average precision) of 98.08%, representing a 2.91% increase over the original model, and a R_{call} increase of 4.13%. The model effectively addresses background false positives and low detection accuracy issues, meeting the requirements in actual inspection.

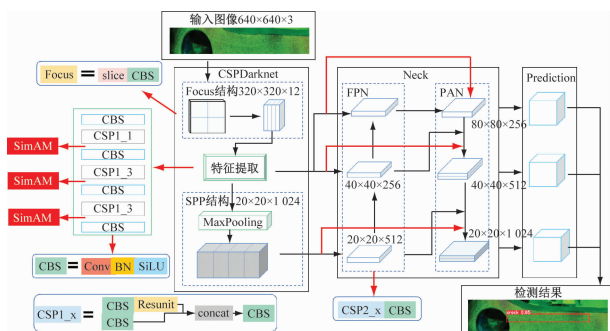
Key words railway passenger vehicle; bolster hanger; crack identification; magnetic particle flaw detection; flaw detection evaluation; YOLOv5-SA-BF model

本文以铁路客车摇枕吊作为研究主体,针对其线性裂纹的检测问题,基于 YOLOv5 算法,提出了一种改进的磁粉探伤图像识别算法,用于识别摇枕吊的磁粉探伤图像。同时,开发了裂纹识别软件。该软件能够实现裂纹数量、尺寸、位置等探伤评价参数的自动提取,为摇枕吊磁粉探伤的全自动化检测提供了有力支持。

1 基于改进 YOLOv5 算法的探伤图像识别算法研究

1.1 改进 YOLOv5-SA-BF 的模型结构

本文在 YOLOv5 算法的 CSPDarknet(跨阶段局部网络)上添加了注意力机制,通过对比试验后证明 SimAM(相似性感知激活模块)机制对裂纹信息更加敏感,对背景区域的抗干扰能力更强,然后在 Neck(颈部)网络部分引入一种 BiFPN(增强的特征金字塔网络)结构,通过加权融合和双向连接加强特征融合,使网络模型对裂纹特征信息的利用更加充分。YOLOv5-SA-BF 模型结构如图 1 所示。



注: CBS—基础卷积模块; CSP1_1—跨阶段部分连接模块, 余类同; FPN—特征金字塔网络; MaxPooling—最大池化; Focus 结构—焦点结构; SPP 结构—空间金字塔池化; Conv—卷积; BN—批量归一化; SiLU—Sigmoid 线性单元; ResUnit—残差单元; Concat—拼接; 图中数值单位均为像素。

图 1 YOLOv5-SA-BF 模型结构图

Fig. 1 YOLOv5-SA-BF model structure diagram

该改进模型通过引入 SimAM 机制和 BiFPN 结构,对模型的特征提取和整合能力进行了优化,从而取得了更好的检测效果。

1.2 SimAM 机制

SimAM 机制与通道注意力和空间注意力机制不同,其特点在于无需增加额外的参数量,即可为生成的特征图提供三维权重。该机制通过提出的优化能量函数,为每个神经元分配权重,并且所生成的三维权重能够赋予神经元更高层次的信息,从而在提升网络模型精度方面展现出更为显著的效果。具体而言,对于每一个特征通道 C ,都对应有 H (高度) $\times W$ (宽度) 个能量函数。SimAM 机制的核心目标是衡量神经元之间的可分性,这一可分性可以通过能量函数来计算得出。该能量函数 E_i 的具体表达式为:

$$E_i = \frac{4(\sigma^2 + \lambda)}{(t - \alpha)^2 + 2\sigma^2 + 2\lambda} \quad (1)$$

式中:

σ ——输入特征图中 C 的方差;

λ ——超参数;

t ——当前神经元个数;

α ——输入特征图中 C 的均值。

得到 t 的重要性之后,需要对特征进行增强处理,增强计算式如下:

$$\tilde{x} = \delta\left(\frac{1}{E}\right) \odot X \quad (2)$$

式中:

\tilde{x} ——增强的特征图;

E ——求得的能量函数;

δ ——sigmoid 函数,将 E 经过激活函数可以控制 E 的值位于 $0 \sim 1$ 之间,并且不会影响每个神经元;

X ——输入特征图。

SimAM 机制结构图如图 2 所示,通过利用能力函数对特征图中的不同通道之间进行自适应权重计算,从而使网络更关注重要的特征信息,提高模型性能。

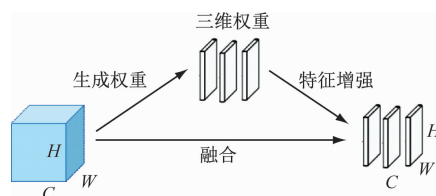


图 2 SimAM 机制结构图

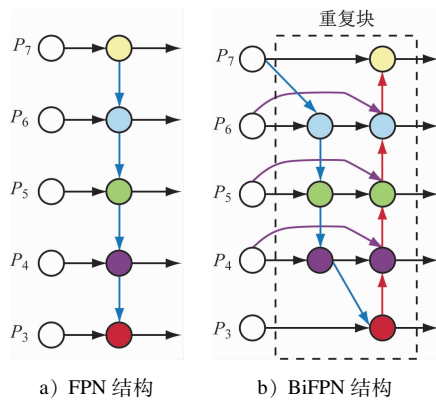
Fig. 2 Diagram of SimAM mechanism structure

1.3 加权双向特征金字塔网络 BiFPN 结构

BiFPN 结构是一种改进版的 FPN 结构,主要用于目标检测任务。BiFPN 结构中的加权融合方式采用的是快速量纲一化融合。该融合方式是针对训练速度慢提出的,将权重放缩至 $0 \sim 1$ 范围内,因没有使用 Softmax(量纲一化指数)函数方式,所以训练速度很快。FPN 与 BiFPN 结构对比如图 3 所示。

2 摇枕吊探伤图像采集系统的搭建

摇枕吊探伤图像采集硬件系统主要包含以下组件:工业相机、镜头、计算机、三脚架、相机固定板以及连接线等。计算机在该系统中承担关键角色,负责相机的控制、参数的设定以及图像数据的存储等功能。该图像采集系统的示意图如图 4 所示。



注: P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 、 P_7 —5 个不同尺度的特征层标识;其中数字越大,表示特征图的分辨率越低,但感受野越大,适合检测较大的目标。

图3 FPN 与 BiFPN 结构对比

Fig. 3 Comparison of FPN and BiFPN structures

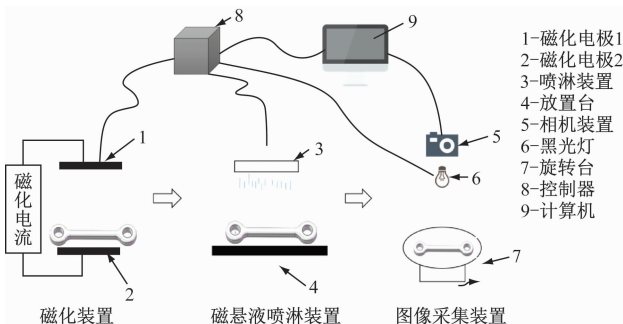


图4 摇枕吊探伤图像采集系统示意图

Fig. 4 Diagram of bolster hanger flaw detection image acquisition system

为确保采集图像的精度,需根据摇枕吊的实际尺寸及所需的测量精度来选择相机与镜头。基于检测物体的视野范围及精度要求,可推导出分辨率的计算式如下:

$$P = F_{ov}/\mu \quad (3)$$

式中:

P ——所求分辨率;

F_{ov} ——视野范围,即工件大小;

μ ——检测所需精度。

以尺寸为 732 mm(长) × 152 mm(宽)的摇枕吊为例,若检测精度要求为 0.1 mm,则代入式(3)可计算出该系统所需分辨率为 2 000 万像素。因此,本系统最终采用了迈德威视的 MV-GE2000C 型工业照相机,其分辨率为 5 488 像素 × 3 672 像素。

镜头的选型亦需综合考虑多种因素,焦距的计算式如下:

$$f = W_D h / H \quad (4)$$

式中:

f ——所求镜头的焦距;

W_D ——镜头与摇枕吊之间的工作距离;

h ——镜头的靶面高度;

H ——视场高度,即摇枕吊的尺寸。

将摇枕吊的尺寸(732 mm(长) × 152 mm(宽))、设定的工作距离(980 mm)及镜头的靶面高度(由像元尺寸与分辨率计算得出),代入式(4)并综合考量各参数,选定迈德威视的 MV-LD-16-20M-B 型镜头,其分辨率为 2 000 万像素,焦距为 16 mm。摇枕吊图像采集实验系统的实景图如图 5 所示。

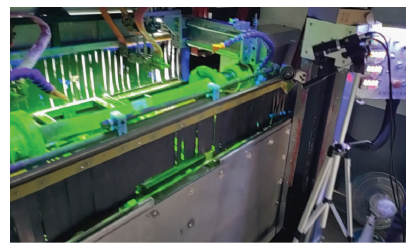


图5 摇枕吊裂纹图像采集实验系统实景图

Fig. 5 Photo of bolster hanger crack image acquisition lab system

3 裂纹识别算法性能测试

3.1 数据集与测试环境的建立

本文所研究的摇枕吊探伤裂纹图像数据集包含 52 张图片,其中裂纹图像 39 张,无裂纹图像 13 张。通过空间变换、像素颜色调整及样本合成等 15 种数据增强方法,最终用于网络模型训练的裂纹样本数量增至 1 073 张。在试验过程中,样本图片被按照 8:1:1 的比例划分为训练集、验证集和测试集。

3.2 性能测试与结果分析

利用图像采集系统对摇枕吊的探伤图像进行采集,并对提出的改进算法进行性能测试。性能评估分别使用三个评价指标(召回率 R_{ecall} ,均值平均精度 M_{AP} ,检测时间)通过与七种常规模型进行对比测试分析,具体的模型评价指标如表 1 所示。

由表 1 可知:YOLOv5-SA-BF 模型的 M_{AP} 达到 98.08%,较原模型提升了 2.91%,且显著优于其他模型; R_{ecall} 达到了 96.43%,较原模型提升了 4.13%。同时可以看出,YOLOv5-SA-BF 模型检测时间为 179.1 ms,相比而言花费时间最长,但仍然为毫秒级,故可以满足现场检测的需求。改进模型的预测结果对比如图 6 所示。

表1 改进模型评价指标

Tab.1 Improved model evaluation index

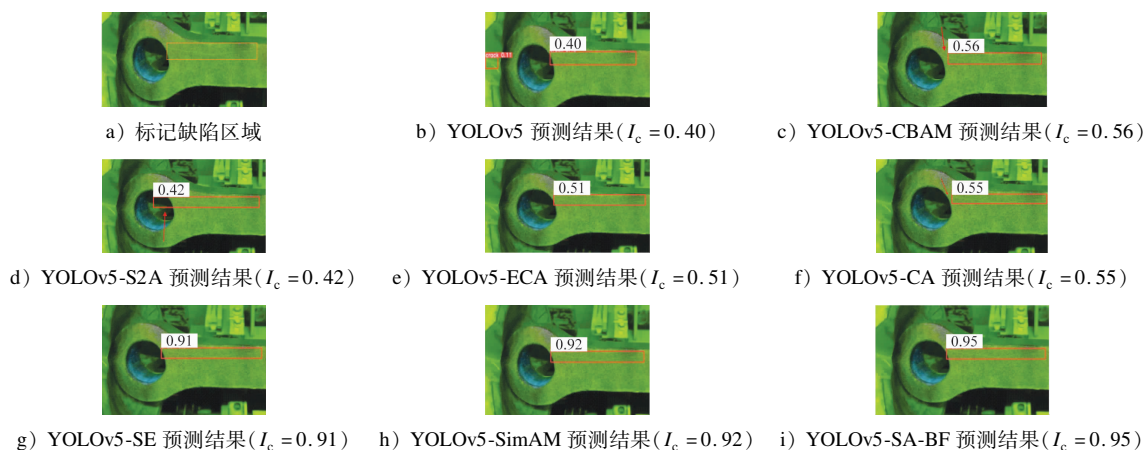
模型	M_{AP}	R_{call}	时间/ms
YOLOv5	0.951 7	0.923 0	37.2
YOLOv5-CA	0.961 8	0.936 4	45.9
YOLOv5-SE	0.963 7	0.943 7	23.0
YOLOv5-CBAM	0.958 2	0.932 7	51.3
YOLOv5-ECA	0.965 0	0.928 4	41.8
YOLOv5-S2A	0.952 1	0.928 2	55.4
YOLOv5-SimAM	0.970 6	0.942 7	150.4
YOLOv5-SA-BF	0.980 8	0.964 3	179.1

由图6可知:YOLOv5-SA-BF模型的置信度较高,且检测框较为准确,达到了预期需求。

4 基于三维模型的摇枕吊裂纹评价

4.1 摇枕吊裂纹探伤评价

裂纹评估首先通过图像采集系统获取裂纹图像,并对裂纹磁痕进行识别。为获取像素当量,对相机进行尺寸标定,实现像素尺寸与实际尺寸的转换,从而得到裂纹的实际长度。



注: I_c —置信度。

图6 改进模型的置信度预测结果对比

Fig.6 Comparison of improved model confidence level prediction results

将像素当量设为 K , L 为裂纹实际长度, D 为像素尺寸,则转换关系计算式为:

$$K = L/D \quad (5)$$

工作距离下像素当量 K 与工作距离 x 关系为:

$$K = 0.000\ 2x - 0.039\ 2 \quad (6)$$

联立式(5)和式(6),可推导出 L 的计算式为:

$$L = (0.000\ 2x - 0.039\ 2)D \quad (7)$$

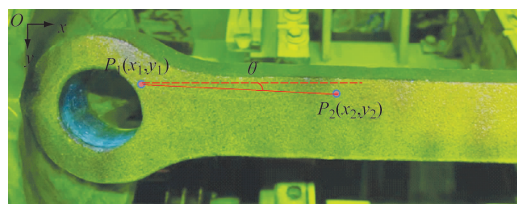
如图7中所示, P_1 为该裂纹起点, P_2 为裂纹终点,两点之间的直线距离记为 L 即所求裂纹长度。

在实际图像采集中,相机工作距离为 1 200 mm,代入式(6)得像素当量为 0.200 8。测量的裂纹长度与实际长度的最小误差为 0.028 mm,相对误差 0.40%;最大误差为 0.619 8 mm,相对误差 8.85%。测量精度受拍照角度影响,当拍照角度与摇枕吊平行时,测量准确,相对误差较小。总的来说,裂纹尺寸测量的误差较小,平均误差为 0.371 8 mm,平均相对误差为 5.31%,满足实际检测要求。

4.2 基于三维模型的裂纹定位

构建摇枕吊的三维模型,实现裂纹定位功能。

将局部裂纹在三维模型中显示,定位结果如图8所示,检测人员可直接根据三维模型位置复核裂纹。



注: P_1 、 P_2 —识别出来的裂纹两端点位置; (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) —两端点 P_1 、 P_2 的横、纵坐标; θ —裂纹两端点连线与水平方向的夹角。

图7 摇枕吊线性裂纹长度分析

Fig.7 Length analysis of bolster hanger linear crack

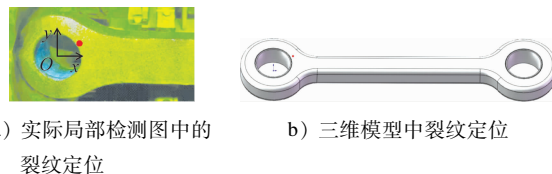


图8 裂纹定位分析结果

Fig.8 Crack location analysis results

(下转第 139 页)

4 结语

通过对6种典型铰接转向架轻轨车辆的综合性调研,本研究深入剖析了该类车型的发展历程、应用范畴及其核心技术特性,这一研究对同类产品的设计与开发具有重要的导向价值。

1) 对发展脉络及应用场景的深入洞察,为设计出更加贴合市场实际需求的产品奠定了坚实基础。

2) 所收集的6种车型关键技术参数信息,为评估同类产品开发项目的可行性及迅速确立顶层车辆技术参数提供了有效指引。这些参数可助力快速决策,如依据载客量信息确定编组规模与车身长度;依据适应的最小曲线半径设定车辆定距与车间距离;以及综合坡道条件、车辆自重与载客量信息来确定动力配置等。

3) 基于调研成果,提出了开发具备更高市场竞争力的轻轨车辆的设计方向,包括降低地板高度以

(上接第133页)

5 结语

本文针对摇枕吊裂纹图像,构建了裂纹检测网络模型,提出了一种融合YOLOv5、注意力机制与加权双向BiFPN的算法。为解决特征信息与背景区域信息相似的问题,引入SimAM注意力机制提高模型对裂纹信息的敏感度。同时,针对Neck部分特征融合时信息丢失的问题,采用BiFPN网络加强特征融合。将两个改进模块进行融合得到YOLOv5-SA-BF模型,该模型的 M_{AP} 达到了98.08%, R_{ecall} 也达到了96.43%,相比之前分别提高了2.91%和4.13%,这充分表明了所提算法的可行性和有效性。本文还搭建了摇枕吊图像采集平台,在裂纹检测基础上进行探伤评估,通过尺寸标定实现物像空间转换,获取裂纹长度信息。裂纹长度测量的相对误差控制在5.31%以内,满足实际检测需求。此外,通过构建摇枕吊三维模型,在模型上展示裂纹位置及长度信息,根据探伤标准实现了对摇枕吊的探伤评估。

提升乘客便利性,以及增强牵引与制动系统性能等。

参考文献

- [1] 李猛,周敏,于松伟. 轻轨车辆特征与适应性研究: 轻轨之术[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(1): 21.
LI Meng, ZHOU Min, YU Songwei. Multimodal characteristics of light rail transit: the characteristics of LRT[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2019, 32(1): 21.
- [2] 王显民,高永存. 欧洲的轻轨车辆与轻轨线路[J]. 城市轨道交通研究, 2000(3): 66.
WANG Xianmin, GAO Yongcun. Light rail vehicles and light rail lines in Europe[J]. Urban Mass Transit, 2000(3): 66.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 第一作者:王明举,正高级工程师,013200021729@errcgcc.cc
通信作者:张云峰,正高级工程师,013200019025@errcgcc.cc
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

参考文献

- [1] TAN M, PANG R, LE Q V. EfficientDet: scalable and efficient object detection[C] // 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle: IEEE, 2020: 10778.
- [2] JIANG K, XIE T, YAN R, et al. An attention mechanism-improved YOLOv7 object detection algorithm for hemp duck count estimation[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1659.
- [3] HUSSAIN M, AL-AQRABI H, MUNAWAR M, et al. Domain feature mapping with YOLOv7 for automated edge-based pallet racking inspections[J]. Sensors, 2022, 22(18): 6927.
- [4] KASPER-EULAERS M, HAHN N, BERGER S, et al. Detecting heavy goods vehicles in rest areas in winter conditions using YOLOv5[J]. Algorithms, 2021, 14(4): 11.

· 收稿日期:2024-08-05 修回日期:2024-09-05 出版日期:2025-02-10
Received:2024-08-05 Revised:2024-09-05 Published:2025-02-10
· 通信作者:杨帆,高级工程师,81460601@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821