

# 基于 YOLOv4 目标检测算法的城市轨道交通刚性接触网悬挂状态智能检测系统的设计与应用<sup>\*</sup>

马志鹏<sup>1</sup> 袁万全<sup>2\*\*</sup> 周于翔<sup>2</sup> 魏志恒<sup>2</sup>

(1. 中国铁道科学研究院, 100081, 北京; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司城市轨道交通中心, 100081, 北京//第一作者, 硕士研究生)

**摘要** 目的:为提高城市轨道交通刚性接触网典型病害的检测效率与精度,降低成本,保障线路运营安全,需对刚性接触网悬挂状态检测方法进行进一步研究。方法:介绍了 YOLOv4 目标检测算法,阐述了该算法的优点;提出了基于 YOLOv4 目标检测算法的刚性接触网悬挂状态智能检测系统,详细介绍了该系统的架构组成及技术参数;将基于 YOLOv4 目标检测算法的刚性接触网悬挂状态智能检测系统应用于北京地铁某线路刚性接触网悬挂状态的检测中。结果及结论:基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统实现了对刚性接触网悬挂状态的快速巡检及全面高清成像,以及对接触网零部件悬挂状态病害的智能分析及数据管理。该系统在北京地铁某线路上取得了良好的工程应用效果,可在车载运行状态下完成对接触网悬挂状态的智能检测。

**关键词** 城市轨道交通;刚性接触网;悬挂状态;智能检测系统

**中图分类号** U226.8<sup>+</sup>1

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.10.027

## Design and Application of Intelligent Detection System for Urban Rail Transit Rigid Catenary Suspension Status Based on YOLOv4 Object Detection Algorithm

MA Zhipeng, YUAN Wanquan, ZHOU Yuxiang, WEI Zhiheng

**Abstract** Objective: To enhance the detection efficiency and accuracy of typical defects in the rigid catenary of urban rail transit, reduce costs and ensure operational safety, further research on the detection method of rigid catenary suspension status is necessary. Method: The YOLOv4 (You Only Look Once version 4) object detection algorithm is introduced, and its advantages are elaborated. An intelligent detection system

for rigid catenary suspension status based on YOLOv4 object detection algorithm is proposed, providing a detailed description of the system architectural composition and the required technical parameters. This is applied to the detection of rigid catenary suspension status of a Beijing Subway line. Result & Conclusion: The YOLOv4-based intelligent detection system for rigid catenary suspension status realizes rapid inspection and comprehensive high-definition imaging of the suspension status, as well as intelligent analysis and data management of defects in the catenary component suspension status. The system has demonstrated positive engineering application results on a Beijing Subway line, enabling intelligent detection of the catenary suspension status during on-board operation.

**Key words** urban rail transit; rigid catenary; suspension status; intelligent detection system

**First-author's address** China Academy of Railway Sciences, 100081, Beijing, China

刚性接触网长期工作在振动环境中,其零部件易出现脱落、缺失、断裂等典型病害,如果不及时处理,将引发严重的弓网故障,给线路运营带来安全隐患<sup>[1]</sup>。刚性接触网结构型式多样,一般由悬挂系统、汇流排及接触线等部分组成<sup>[2]</sup>,其中悬挂系统是刚性接触网的重要组成部分。目前,对接触网悬挂状态的检查主要依赖于天窗期内人工登梯定期巡视,具有故障隐患发现不及时、工作效率低、强度大等缺点。随着近年来机器视觉技术的不断发展,采用视觉成像技术进行接触网巡检成为一种有效的手段<sup>[3]</sup>。

本文简述了 YOLOv4 目标检测算法,并将该算法应用于城市轨道交通(以下简称“城轨”)刚性接

<sup>\*</sup> 北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金项目(L221001);中国铁道科学研究院集团有限公司科研开发基金项目(2022YJ235)

<sup>\*\*</sup> 通信作者

触网悬挂状态检测中,分析了该算法在城轨线路中的实际应用效果。

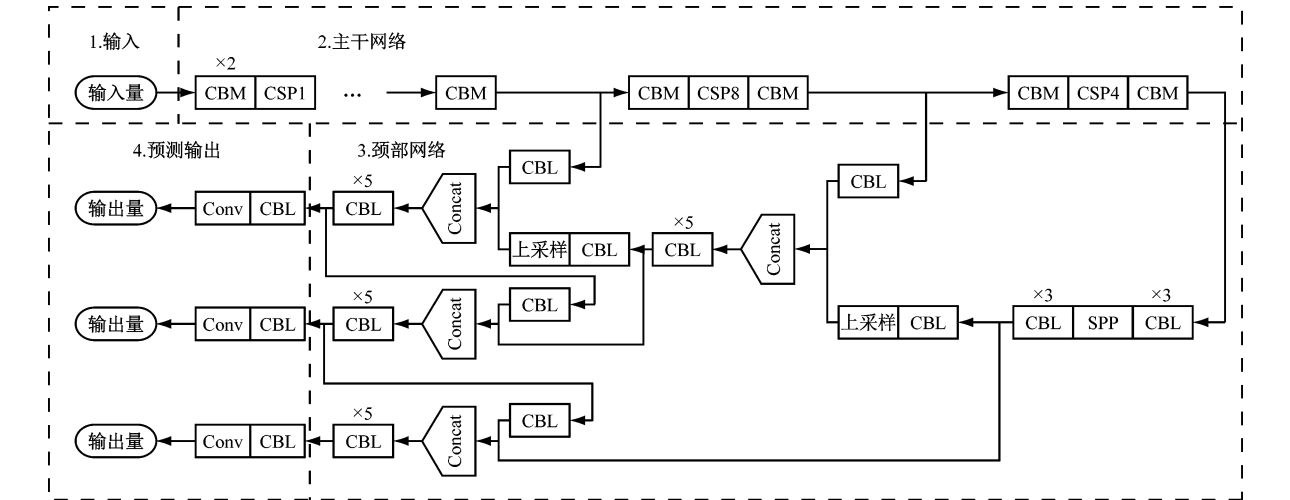
### 1 YOLOv4 目标检测算法

目标检测是计算机视觉中的重要分支,广泛应用于图像分割、物体追踪及关键点检测等任务<sup>[4]</sup>。YOLO 是目标检测算法中应用比较广泛的一种,

YOLOv4 则是在原有 YOLO 目标检测架构的基础上,在加强特征提取、增强网络模型非线性、防止过度拟合等方面进行了优化<sup>[4-5]</sup>。

#### 1.1 YOLOv4 目标检测算法网络

本文使用的 YOLOv4 目标检测算法网络(见图 1)主要包括输入模块、主干网络模块、颈部网络模块及预测输出模块。



注:CBM、CBL 为该网络结构中的最小组件,不同在于其激活函数分别为 Mish 和 Leaky relu;CSPx 为卷积层和残差组件组成的网络结构;SPP 为空间金字塔池化模块;Conv 为卷积模块;Concat 为张量拼接模块;“×2”“×3”“×5”分别代表 2 次、3 次和 5 次运算。

图 1 YOLOv4 目标检测算法网络图

Fig. 1 Diagram of YOLOv4 object detection algorithm network

其中,YOLOv4 目标检测算法网络将特征提取网络 CSPDarknet53 作为其主干网络,在该主干网络与预测输出模块之间设置颈部网络模块,包括 SPP 模块和 PANet(路径聚合网络)。另外,预测输出模块使用 YOLOv3 结构,详见文献<sup>[5]</sup>。

#### 1.2 YOLOv4 目标检测算法的优点

YOLOv4 目标检测算法具有一系列优点,在刚性接触网悬挂状态检测系统的应用中体现出良好的应用效果。

1) YOLOv4 目标检测算法采用了 Mosaic 数据增强方式。相较 CutMix 数据增强方式,Mosaic 数据增强方式选取了 4 张图片通过随机缩放、裁剪等方式进行拼接,变相提升了单次训练抓取的样本数量,大大丰富了检测数据集,具有明显的优势。图 2 为不同方法下刚性接触网悬挂状态的使用效果对比图。

2) YOLOv4 目标检测算法的另一个创新在于对骨干网络的改进。该算法使用的 CSPDarknet53 特征提取网络,是在 YOLOv3 Darknet53 网络结构



a) 原始图片      b) CutMix 算法      c) Mosaic 算法

图 2 不同方法下刚性接触网悬挂状态的使用效果对比图

Fig. 2 Comparison of application effects of rigid catenary suspension status using different methods

的基础上引入了 CSPNet 跨阶段局部网络,在占用更小内存的同时保证了计算的速度与精度。

3) YOLOv4 使用平滑连续的 Mish 激活函数,相比于传统的 Leaky relu 激活函数具有显著的优势<sup>[6]</sup>。除此以外,YOLOv4 目标检测算法还采用了 DropBlock 的正则化方式<sup>[7]</sup>。传统的 Dropout 方式被广泛应用于全连接层的正则化技术,但对于卷积层的处理效果较差。DropBlock 方式将特征图连续区域的单元进行丢弃,准确性更高。图 3 为不同方法下刚性接触网悬挂状态检测数据处理效果对

比图。

4) YOLOv4 的颈部网络采用 PANet 结构,且在 FPN(特征金字塔网络)的基础上进行了加强。该颈部网络包含自上向下和自下向上两种路径。

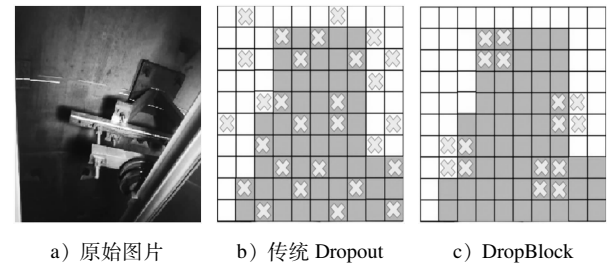


图 3 不同方法下刚性接触网悬挂状态检测数据处理效果对比图

Fig. 3 Comparison of processing effects of rigid catenary suspension status detection data using different methods

## 2 基于 YOLOv4 目标检测算法的刚性接触网悬挂状态智能检测系统

### 2.1 系统架构

基于 YOLOv4 目标检测算法的刚性接触网悬挂状态智能检测系统(以下简称“基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统”)选择以工程车或列车为载体,由高清成像模块与数据管理分析模块组成,其总体架构如图 4 所示。

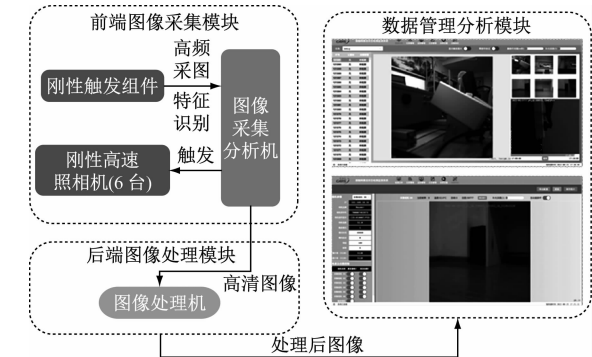


图 4 基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统总体构架

Fig. 4 Overall architecture of YOLOv4-based rigid catenary suspension status intelligent detection system

#### 2.1.1 高清成像模块

高清成像模块包含触发装置、高速照相机及补光设备等,采用数字激光、光电测量等技术,使用高性能、低功耗的电路板设计,控制补光灯工作及巡视照相机、刚性拍摄照相机拍摄,通过实时获取的里程信息,并匹配基础数据中的杆号信息,形成一

杆一档并分组存储。

触发装置用于对定位点设备进行定位并输出触发信号。该装置由激光发射器、刚性触发照相机构成。工作时,激光发射器垂直向上发射高亮激光,在接触网上形成 1 条高亮的激光轮廓(见图 5),刚性触发照相机将成像数据实时传递到图像分析服务器中,服务器经图像识别给巡视照相机、刚性拍摄照相机及补光设备输出触发信号。

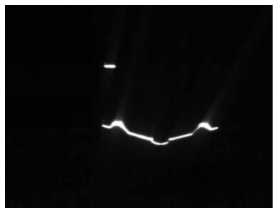


图 5 接触网激光轮廓

Fig. 5 Laser profile of catenary

刚性悬挂检测设备的车顶采集单元由 1 台巡视照相机和 6 台刚性拍摄照相机组成,对接触网及刚性悬挂零部件进行实时检测。图 6 为基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统车顶布置图。

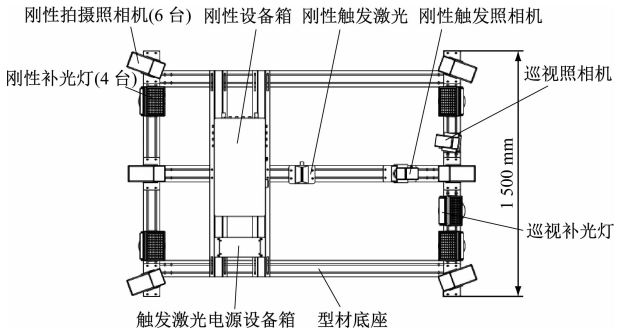


图 6 基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统车顶布置图

Fig. 6 Roof layout diagram of YOLOv4-based rigid catenary suspension status intelligent detection system

由于隧道内及夜间运行时光线不佳,为防止高速照相机检测时出现亮度偏暗、图像模糊、零部件遗漏的情况,还需要 LED(发光二极管)光源对拍摄区域进行补光。

#### 2.1.2 数据管理分析模块

数据管理分析模块可实现对检测数据的治理与深度应用,提升检测分析效率。该模块主要具有基础数据管理、检测数据管理、检测数据分析及检测设备管理等功能。

其中,检测数据分析单元采用 YOLOv4 目标检测算法对检测数据进行缺陷识别和处理,以及数据

统一及标准化,在此基础上实现不同时段拍摄的接触网数据的比对,进而开展关联分析、对比分析等多维度可视化分析,最终依据分析结果与标准实现对线路健康状态的综合评价,为线路安全评估以及日常检修维护提供数据支持。

2.2 系统的技术参数

基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统,使用残差网络提取对象特征,将 Mish 作为激活函数,能够解决接触网零部件种类、数量众多以及不同导线高度造成的提取对象特征困难等问题。基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统的技术参数如表 1 所示。

表 1 基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统的技术参数

Tab.1 Technical parameters of YOLOv4-based rigid catenary suspension status intelligent detection system	
参数	取值或说明
成像范围	轨顶连线以上 3 900 ~ 5 000 mm 与轨顶连线的垂直中心线左侧 350 mm 至右侧 350 mm 范围的交叉区域
照片/万像素	≥2 500
图像分辨率/(mm/像素)	≤0.5

基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统可实现对刚性接触网的快速巡检,检测范围覆盖行车沿线的所有接触网设施。基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统拍摄的刚性接触网视野分析图如图 7 所示。

由图 7 可知,基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统可全面覆盖刚性接触网各零部件视角,实现对其悬挂状态的全面高清成像。

3 基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统应用分析

城轨领域并未具备较为成熟的刚性接触网悬挂状态检测手段,也无相应的标准和规范。在此背景下,本文将 YOLOv4 目标检测算法应用于城轨刚性接触网的悬挂状态检测。以北京地铁某线路为例,基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统相比传统刚性接触网悬挂状态检测系统检测精度更高,能够检测出一些不易发现的零部件悬挂状态病害问题。图 8 为基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统识别的刚性悬挂零部件

病害。

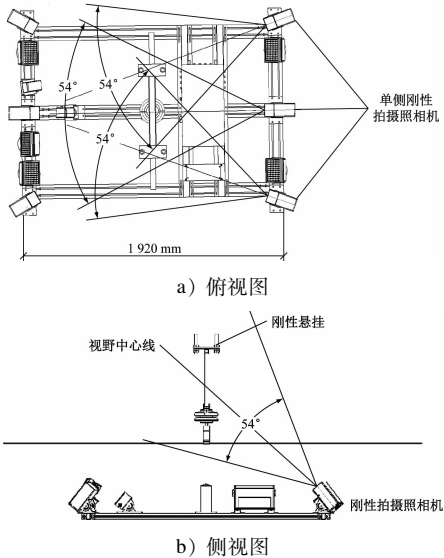


图 7 基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统视野分析图

Fig. 7 Visual field analysis diagram of YOLOv4-based rigid catenary suspension status intelligent detection system

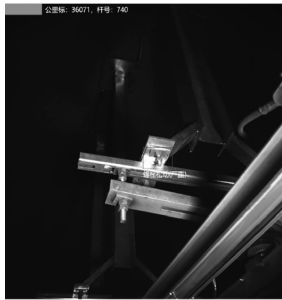


图 8 基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统识别的刚性悬挂零部件病害

Fig. 8 Defects of rigid suspension components identified by YOLOv4-based rigid catenary suspension status intelligent detection system

基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统具有如下技术优势:

1) 便于统计分析:从缺陷案例、线路里程等多种维度,结合各期检测数据及线路基础设施进行统计,基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统的检测精度更高,且能够从不同维度发现问题的分布特点。

2) 便于对比分析:基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统可以将同一类型设备两次或多次的检测数据,或不同类型设备数据进行叠加对比分析,同时可以计算同一杆一档数据的差

异,以及发现数据异常变化,以指导设施设备养护维修工作。

截至目前,基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统于北京地铁某线已发现各类故障隐患近百处,为线路运营安全提供了极大的保障。基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统识别的系列病害如图 9 所示。

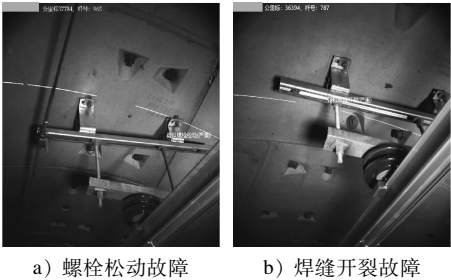


图 9 基于 YOLOv4 的刚性接触网悬挂状态智能检测系统识别的系列病害

Fig. 9 A series of defects identified by YOLOv4-based rigid catenary suspension status intelligent detection system

### 4 结语

伴随着城轨线网规模的不断扩大以及设计速度的不断提高,以小型设备和人工目视检查为主的检测方式已经不能满足城轨的检测需求<sup>[8]</sup>。本文将 YOLOv4 目标检测算法应用于刚性接触网悬挂状态检测系统,取得了良好的检测效果。该系统的应用将有效提高检测精度,节省人力、物力成本,推进基础设施智能运维体系建设,推动城轨基础设施运维工作由计划修向状态修的转变,同时协助运营单位构建形成专业数据资产,实现数据的规范化管理和智能化应用。

### 参考文献

[1] 徐鸿燕,王刘辉,梅桂明,等. 地铁刚性接触网滑板磨损优化

的试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(4): 177.  
XU Hongyan, WANG Liuhui, MEI Guiming, et al. Experimental study on wear optimization of metro rigid pantograph-catenary system contact strips[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(4): 177.  
[2] 王熙楠. 基于激光雷达的地铁接触网几何参数实时检测系统改进设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
WANG Xi'nan. Improvement design of real-time geometric parameter detection system for metro catenary based on lidar[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.  
[3] 吴光龙. 基于机器视觉的接触网巡检关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.  
WU Guanglong. Key technology research on catenary inspection based on machine vision method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.  
[4] 张宝朋,康谦泽,李佳萌,等. 轻量化的 YOLOv4 目标检测算法[J]. 计算机工程, 2022, 48(8): 206.  
ZHANG Baopeng, KANG Qianze, LI Jiameng, et al. Lightweight YOLOv4 target detection algorithm[J]. Computer Engineering, 2022, 48(8): 206.  
[5] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLO v4: optimal speed and accuracy of object detection[EB/OL]. (2020-04-23)[2023-03-08]. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.  
[6] 朱衍波. 基于改进 YOLOv4 算法的目标检测算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.  
ZHU Yanbo. Research on object detection algorithm based on improved YOLOv4[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.  
[7] GHIASI G, LIN T Y, LE Q V. DropBlock: a regularization method for convolutional networks[C]//Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems. Montréal: Curran Associates Inc., 2018: 10750.  
[8] 靳守杰,魏志恒,王文斌,等. 城市轨道交通综合检测车应用分析[J]. 现代城市轨道交通, 2021(11): 69.  
JIN Shoujie, WEI Zhiheng, WANG Wenbin, et al. Application analysis of comprehensive inspection trainset for urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2021(11): 69.

(收稿日期:2023-03-08)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址:tougao. umt1998. com