

文章编号: 1674—8247(2023)03—0021—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.03.005

## 基于图像处理的高速铁路轨道巡检系统

李兆洋 刘红娇 李毅 刘洋

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

**摘要:** 轨道基础设施部件的检测对保障高速铁路的正常运行至关重要。针对人工巡检工作效率低、既有巡检设备巡检精度低及巡检数据分析能力低等方面的不足, 本文设计了一种基于图像处理的高速铁路轨道巡检系统。巡检系统由轨道数据采集、数据分析和信息管理3个子系统构成。数据采集系统以专业轨检小车为承载平台, 在平台上安装图像采集装置来完成基础设施的可见光图像数据采集。数据分析系统对采集的图像数据进行分析处理, 对高速铁路线路维修规则定义的典型轨道病害进行检测。信息管理系统将数据分析后的缺陷信息记录到信息管理中, 后续生成包含各项缺陷相关信息的报表及相应的数据分析报告, 为工务人员现场维修提供信息指导。

**关键词:** 图像处理; 轨道巡检; 数据采集; 数据分析; 信息管理

中图分类号: U216.3 文献标识码: A

## A High-speed Railway Track Inspection System Based on Image Processing

LI Zhaoyang LIU Hongjiao LI Yi LIU Yang

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** The inspection of track infrastructure components is critical to ensure the normal operation of a high-speed railway. In view of the low efficiency of manual patrol inspection, low precision of existing patrol inspection equipment, and low-level analysis of patrol inspection data, a high-speed railway track inspection system based on image processing is designed in this paper. The patrol inspection system consists of three subsystems: track data acquisition, data analysis, and information management. The data acquisition subsystem takes the professional track inspection trolley as the bearing platform, on which the image acquisition device is installed to complete the visible light image data acquisition of the infrastructure. The data analysis subsystem analyzes and processes the collected image data, and detects the typical track diseases defined by the maintenance rules of high-speed railways. The information management subsystem records the defect information after data analysis into the information management database, and then generates reports containing relevant information on various defects and corresponding data analysis reports to provide guidance on information for on-site maintenance of track maintenance personnel.

**Key words:** image processing; track inspection; data acquisition; data analysis; information management

截至2021年底, 全国高速铁路运营里程突破4万km, 这得益于突飞猛进的装备技术、完整先进的

技术装备体系<sup>[1]</sup>。庞大的高速铁路网络对高速铁路安全检测提出新的目标和要求, 线路安全检测面临的

收稿日期: 2022-04-19

作者简介: 李兆洋(1994-), 男, 助理工程师。

基金项目: 中国铁路设计集团有限公司(2020YY340915)

引文格式: 李兆洋, 刘红娇, 李毅, 等. 基于图像处理的高速铁路轨道巡检系统[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 21-26.

LI Zhaoyang, LIU Hongjiao, LI Yi, et al. A High-speed Railway Track Inspection System Based on Image Processing[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 21-26.

压力逐渐增大<sup>[2-3]</sup>。

近年来,以人工智能应用为基础的图像检测技术飞速发展。2000年前后,澳大利亚、德国、意大利等发达国家开始研制智能化轨道状态巡检设备,意大利 Mermec 和美国 Ensco 等公司研制了智能化轨道状态巡检系统并投产;2005年起,我国和法国等国开始研制轨道巡检系统,程雨<sup>[4]</sup>等提出了基于 FPGA 和 DSP 的高速实时轨道巡检图像采集处理系统,实现了对轨道区域和扣件的自动定位;杜馨瑜<sup>[5]</sup>等基于视觉系统神经电理试验提出了 RGC 的 nCRF 模型,显著增强了轨道巡检图像的清晰度。然而,以上巡检装置在巡检精度、项目 and 数据分析应用等方面尚不能满足全面精准掌握轨道设备状态信息的需要,轨道设备日常养护维修中在轨道板裂缝、轨枕裂缝、轨面波磨、光带异常、道床异物掉落等方面仍需人工巡检作业<sup>[6-7]</sup>。因此,有必要开展高速铁路轨道巡检系统的应用研究,深度分析、挖掘巡检信息,弥补基于轨行车辆搭载轨道巡检系统的不足。

本文基于图像处理技术和具备图像采集系统功能的轨检小车设备系统,实现对轨道基础部件表面状态伤损的自动检测,进一步提高高速铁路轨道养护维修作业的效率和质量。

22

## 1 整体技术构架

现有自动检测装置多针对某一特定设施缺陷(如钢轨或扣件缺陷),难以全面掌握轨道设备状态信息。本系统与其他巡检系统的主要区别在于:(1)系统增大了图像采集的视场,避免轨道部件数据丢失;考虑到图像采集的平顺性,硬件系统增加了车体平衡装置;(2)系统通过集合多种部件的检测算法来掌握轨道设备状态信息。

该系统的总体设计方案包括图像采集系统的搭建和缺陷检测系统的设计。其中,图像采集系统包含轨检小车硬件机构模块、光学成像模块、测速定位模块,缺陷检测系统由数据分析和信息管理两部分构成。

对于轨道巡检系统,构造可搭建图像采集装置和适应复杂多样线路环境的轨检小车,将图像采集设备分散布置于轨检小车,以实现对轨道基础设施的图像数据采集;采集到的高清轨道图像数据通过数据传输接口传入高性能服务器,随后对轨道典型病害进行处理分析;通过人工复查、缺陷检索、生成报表等形式为工务人员提供可视化场景和轨道基础设施缺陷的详细信息。

考虑到轨道巡检系统至少需要两名工务人员操作轨检小车,轨检小车载重应不小于 250 kg。根据 TB 10621-2014《高速铁路设计规范》<sup>[8]</sup>的规定,无砟轨道线路维修工区管辖范围宜为 50 km,有砟轨道线路维修工区管辖范围宜为 30 km,因此轨道巡检系统续航里程应不低于 50 km。根据《高速铁路无砟轨道线路维修规则》<sup>[9]</sup>,高速铁路应严格实行天窗修制度,因此轨道巡检系统续航时间应不低于 4 h,最高持续检测速度不小于 15 km/h。另外,为适应夜间作业的需要,系统应具备主动照明功能。同时,基于非接触式检查测量理念,系统应以数字高清成像、视觉测量、图像处理、模式识别等技术,对轨道图像信息进行采集、分析和处理。

系统通过深度结合机器视觉相关理论及技术,从功能及工作流程上可将轨道巡检系统分为数据采集、数据分析和信息管理 3 个子系统,如图 1 所示。

## 2 数据采集系统

数据采集系统的主要功能是在运动状态下采集轨道表面包含钢轨、扣件、轨枕、道床等关键部件的清晰、完整的数字图像。系统采用专业轨检小车作为搭载基础平台,在平台上配套图像采集系统,并根据软件系统的指令对场景进行感应,结合里程等信息完成轨道基础设施图像采集工作。数据采集系统的工作流程如图 2 所示。

数据采集系统由轨检小车硬件机构模块、光学成像模块、测速定位模块 3 部分组成,主要包含轨检小车机械结构、线阵 CCD 相机、配套光源系统、电源模块、PLC 控制器、光电编码器、工控机等硬件设备。

### 2.1 轨检小车硬件结构模块

基于机器视觉的轨检小车的结构如图 3 所示。轨检小车由车体结构、行走轮、立柱车灯、锂电池组、电动机、控制器显示屏、光源、线阵相机、光电编码器、工控机组成。

车体底部有可与钢轨夹紧并保持车体平衡的行走轮,为便于夜间工作,在车体尾部安装了立体灯柱。为了保证轨检小车走形作业以及相机、工控机等设备的正常工作,轨检小车在车体末端配备锂电池组以及电动机。轨检小车前端配有工控机及控制器显示屏,控制器可根据导入的里程数据控制操控单元自动行走并对走形距离进行测量和记录,确定缺陷的位置,同时控制数据采集设备工作。车体下方主要为数据采集设备,其中,光源安装在车体底部左右两侧,该光源采用柱面透镜聚光,有 4 个超高光照强度可供调节,

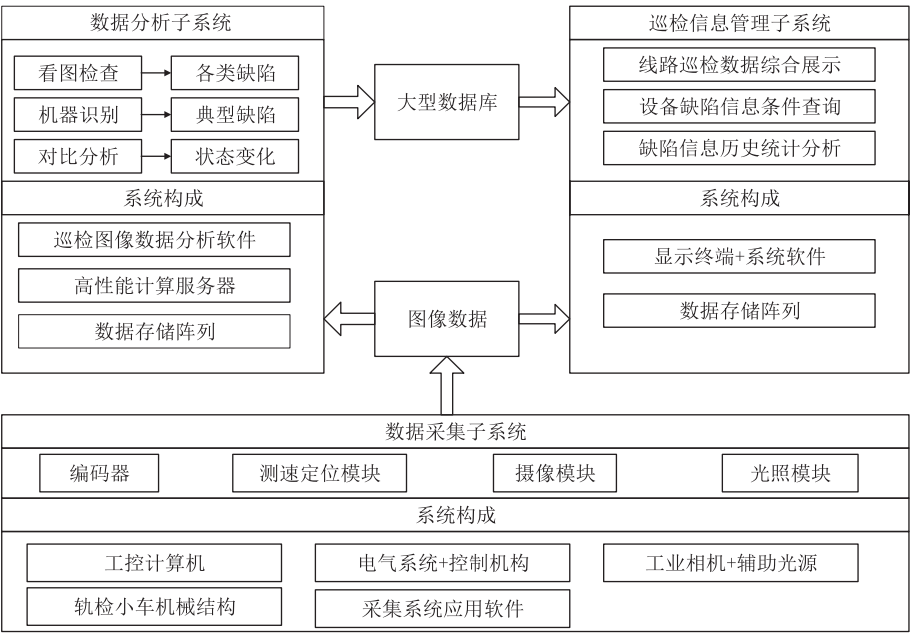


图 1 轨道巡检系统整体构架图

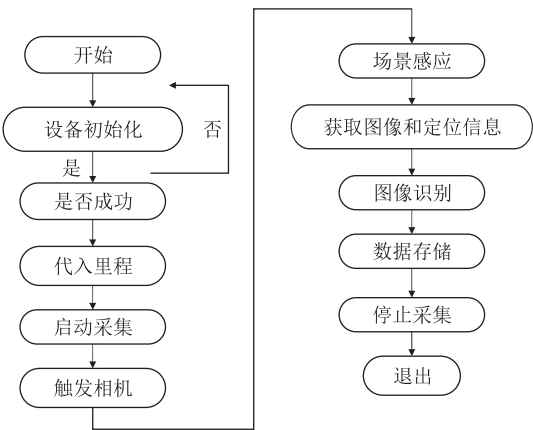


图 2 数据采集系统工作流程图

可满足不同环境下的光照需求。相机系统选择 6 套相同的线阵工业相机, 固定在车体悬挂梁的底部, 线阵 CCD 相机可以实现道床、轨枕和钢轨表面的拍摄任务。测速定位模块采用增量式光电编码器, 安装在行走轮的轴承部位。

图像采集需要较为平稳的环境, 因此轨检小车增设了车体平衡装置。车体平衡装置包括辅助框架、悬挂组件、减震器和辅助板, 每组车轮左右两侧的辅助框架与车底板之间均设置悬挂组件, 组件的两端与车底板转动连接, 组件的中间与下方的辅助框架固定连接; 在 2 个悬挂组件之间的轮套上设置 2 个减震器分别与车底板连接, 减震器的两端分别与轮套、车底板

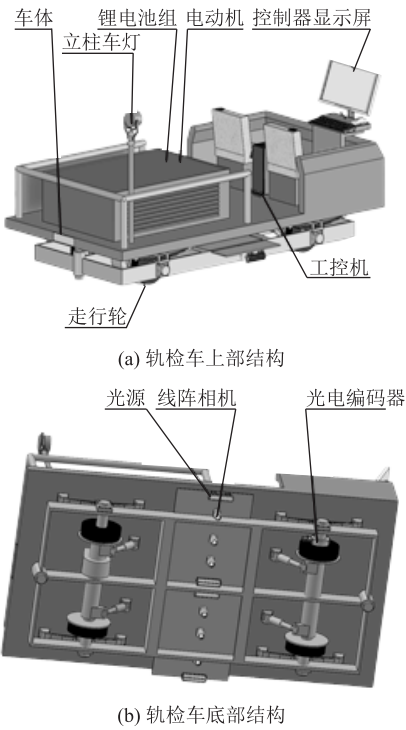


图 3 轨道巡检小车示意图

铰接; 辅助板安装在辅助框架的中部, 辅助板的底面安装图像采集装置和光源。

### 2.2 光学成像模块

线阵相机基于线扫描成像, 具有高速、高稳定性检测的优点, 可应用于轨道表面缺陷检测。随着轨检小车的运动, 相机沿线路方向进行扫描, 形成包含轨



道全局的面阵图像。

作为光学成像模块的核心部件,相机还需配套光源系统进行工作;为了便于夜间工作,减少噪声干扰,系统采用了主动照明的方式补充环境光照。LED光源具有无频闪、寿命长、亮度高、直流供电的特点,同时,LED光源形状可自由设计,针对轨道巡检的特点,光源选择为长条形。

图像采集装置和光源在辅助板上呈“一”字排布且与轨道垂直布置,如图4所示;每根钢轨上方安装3个图像采集装置和2个光源。光源位于图像采集装置两侧,图像采集装置的照准面处于光源所形成的光亮面之内,且照准面所覆盖的区域不存在死角。图像采集装置包含6套相机,其中相机1和相机2用于检测钢轨及其外侧的区域,如轨枕、道床、钢轨,相机3用于检测轨道内侧区域,如内侧的轨道板、道床,相机4、5、6用于检测另一侧的轨道。

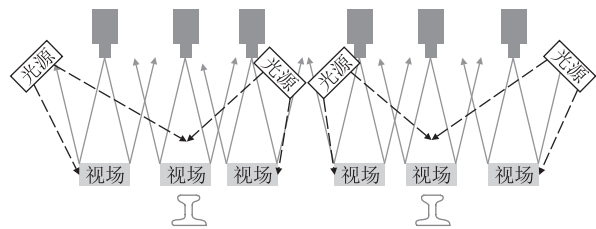


图4 相机视场示意图

系统后续通过电源模块、传输总线等控制相机,并将图像数据存储至工控机中,工控机内装有应用软件,可为工务人员运用系统提供操作平台。

2.3 测速定位模块

为确定缺陷区域具体位置并进行及时维修,在图像数据采集过程中应将铁路里程信息与图像对应。测速定位模块为检测系统提供速度信息和里程信息的记录,该模块主要包括光电编码器、编码器信号检测装置、编码器电源信号转换设备、摄像机触发信号发生装置等。

将光电编码器安装于车轮轴承处,车轴的旋转带动光电编码器的旋转,根据信号频率确定车速及走行距离,并将信息传入到工控机中与图像数据对应,实现图像数据与轨道空间位置点的关联。

3 数据分析系统

数据分析系统主要是对数据采集系统获取的所有图像数据进行分析处理,确定并报告轨道基础设施表面缺陷图像。系统基于机器视觉的模式,可对高速铁路线路维修规则定义的典型轨道病害进行检测,如

表1所示。数据分析系统采用软件识别为主、配合人工复核的作业形式,能够有效地识别缺陷图像。

表1 轨道部件表面失效形式表

检测内容	表面失效形式	技术指标
钢轨	钢轨光带不均、轨面擦伤、波形磨耗、钢轨表面裂纹	光带不均:正常光带上、下15 mm 轨面擦伤:长度15~25 mm,且深度大于0.35 mm 波形磨耗:钢轨表面有周期性波磨,平均谷深超过0.04 mm,波长不大于300 mm
扣件	扣件丢失、断裂、变形	弹性铁垫板或弹性基板的橡胶与铁件严重开裂 弹条、弹性夹、拉簧、弹片等损坏或不能保持应有的扣压力。弹性夹、弹片、挡板损坏。弹性夹离缝、弹片与滑床板挡肩离缝、挡板前后离缝大于2 mm
道床	道床裂缝、异物	道床裂缝宽度达到0.2 mm
轨枕	挡肩缺损、轨枕裂缝、钢筋外露	挡肩缺损:挡肩缺损长度为总长度的1/3~1/2 轨枕裂缝:裂缝长度为枕高1/2~2/3。新Ⅱ型高速铁路轨下截面高度为205 mm,即裂缝长度超过102 mm,轨枕存在严重损伤 钢筋外露:长度超过100 mm

鉴于轨道基础设施部件的多样性,部件表面失效形式存在较大差异,不同缺陷所采用算法的差异性也较大,因此涉及不同的识别算法。后续将建立相应的机器学习模型,不断补充数据库中缺陷图片,通过训练提高模型的鲁棒性和适应性。

3.1 轨道基础部件识别模块

轨道基础部件识别模块工作流程如图5所示,主要包含图像预处理、轨道区域分割定位、缺陷分类识别3个部分。

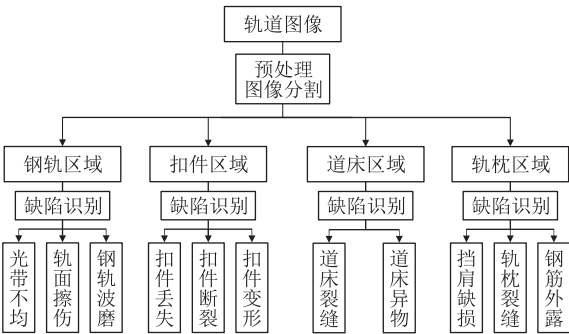


图5 轨道基础部件识别模块图

3.1.1 图像预处理

阴天、雨天、隧道等特殊条件下高速铁路基础部件的图像受外部条件影响较大,产生的灰度差值和噪点影响算法对图像底层特征的提取。该系统可通过直方图均衡化、滤波、形态学操作等方式对图像预处

理,以减少图像数据噪点,提高算法的识别率。

3.1.2 轨道区域分割定位

相机采集的图像数据量巨大且复杂,如直接对整幅图像的各部件进行缺陷状态识别,不易形成针对性识别,易造成误检。另外,轨道图像中无关信息很多,若系统直接对全局进行识别,会极大地增加图像数据的处理时间,难以满足检测的实效性。根据轨道区域的差异性,系统将图像分为若干个包含不同部件的区域,每个区域内部件不同,但同一区域的纹理、灰度等特征相似,通过提取感兴趣区域的方式,将轨道区域分为钢轨区域、扣件区域、道床区域、轨枕区域,为下一步的缺陷识别提供识别对象。

3.1.3 缺陷分类识别

在轨道部件缺陷识别中,轨道图像的特征提取是最重要的一步,特征提取的有效性将直接影响扣件状态识别的准确性。一般来说,特征提取包括局部特征的提取和全局特征的提取。在描述局部特征时,SIFT、LBP 等算子表现俱佳,具有鲁棒性强、独特性好、特征产量多、对旋转、尺度缩放、亮度变化保持不变形的特点,对视角变化及噪声也有一定的稳定性的优点。然而,局部特征缺少了图像的空间几何信息以及图像高层语义的描述,而深度学习提取的特征对轨道图像的局部细节的描述欠佳。因此,本文对不同的特征进行优化组合,可有效地保留轨道图像中具有代表性的特征信息。局部特征融合和深度特征融合扣件状态识别算法流程如图 6 所示。

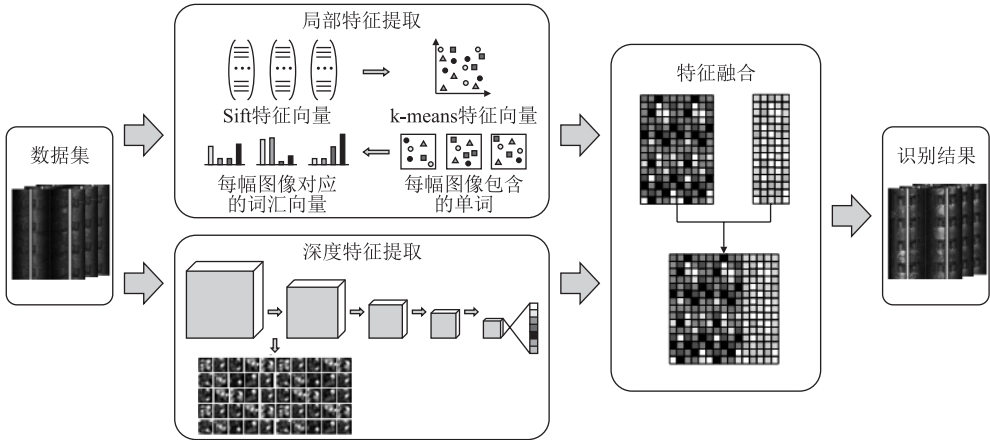


图 6 缺陷分类识别流程图

3.2 轨道病害深度学习模型

深度学习网络模型的构建是在大量的数据集上训练模型的参数,以神经网络为依托通过学习目标的方式自主提取数据特征。随着轨道缺陷图像数据的大量补充,轨道典型病害的状态也会越来越丰富,底层特征也会更具象化。因此,构建轨道病害深度学习模型有助于提升系统的适应性。

在模型的设计过程中,首先需对初始特征进行分类,并建立初始特征数据库,同时根据特性形成特征分类器。在后续实际应用及样本采集过程中,在特征数据库中也会补充更新更多病害类型,并根据新的病害特征进行归纳,形成更新后的特征分类器,从而使系统不断进行自适应调整并提升系统的学习能力,进而确保系统检测的鲁棒性和应用程序的可持续性。

4 信息管理系统

高速铁路轨道巡检信息管理系统主要将数据分

析后的缺陷信息记录到信息管理库中。同时,信息管理库具有检索功能,能够根据缺陷类型、缺陷里程、检测时间等信息在数据库中进行检索。系统通过生成包含各项缺陷相关信息的报表及相应的数据分析报告,为工务人员现场维修提供信息指导。

在信息管理系统中,存储的缺陷图像主要包含“疑似缺陷图像”与“缺陷图像”,通过在机器视觉算法中设置不同的阈值,实现对缺陷图像的准确分类。针对数据库中“疑似缺陷图像”,一般通过人工判断的方式,对数据库中线路扫描的图像进行复核并判别,若轨道图像存在缺陷并达到维修要求,则将“疑似缺陷图像”归为“缺陷图像”。另外,针对轨道基础设施部件存在缺陷但未达到维修要求的情况,系统根据设定的阈值将缺陷图像归为“疑似缺陷图像”数据库,检测人员可根据疑似缺陷图像对轨道部件进行状态预测。对于已归为“缺陷图像”数据库的轨道部件图像,检测人员也可通过人工判别的方式进行二次检测,并将误

检图像从“缺陷图像”数据库中剔除。

信息检索功能可对已添加至缺陷数据库中的轨道病害图像进行查找,并根据线路名称、数据采集时间、缺陷类型、线路里程、上下行轨道等条件组合检索,有针对性地分析查询缺陷图像并生成相应报表和图表,为后续的轨道养护工作提供技术支持。

5 系统验证

高速铁路轨道巡检系统中,正常部件被预测为失效类别时称为误检,按式(1)计算分类误检率;部件失效被预测为正常时称为漏检,按式(2)计算分类漏检率。

误检率 =  $\frac{\text{误检图像数量}}{\text{正常部件数量}} \times 100\%$  (1)

漏检率 =  $\frac{\text{漏检图像数量}}{\text{失效部件数量}} \times 100\%$  (2)

巡检系统误检率在5%~8%之间,漏检率在8%以内,如表2所示。

表2 巡检系统检测结果表

检测内容	误检率/%	漏检率/%
钢轨缺陷	5.6	6.7
扣件劣化	5.2	6.3
道床裂缝	6.8	7.5
轨枕缺陷	6.3	6.9

6 结束语

本文基于图像处理技术,通过构造包含图像数据采集、数据处理、信息管理子系统的轨道巡检系统,来实现对道床、轨枕、钢轨及扣件区域的分割及缺陷识别。本系统旨在提升工务作业时基础设施外观检测的自动化程度,提高检测的精度及效率,便于工务人员及时了解基础设施外观状态,为后续维修提供一定的技术支持,进而保证高速铁路的安全运营。

参考文献:

[1] 谢毅,寇峻瑜,姜梅,等. 中国铁路发展概况与技术展望[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(1): 11-16.

XIE Yi, KOU Junyu, JIANG Mei, et al. Development and Technical Prospect of China Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 11-16.

[2] 仲崇成,李恒奎,李鹏,等. 高速综合检测列车综述[J]. 中国铁路, 2013(6): 89-93.

ZHONG Chongcheng, LI Hengkui, LI Peng, et al. Summary of High-speed Comprehensive Inspection Train [J]. Chinese Railways, 2013(6): 89-93.

[3] 马臣希,张二永,方玥,等. 车载轨道状态巡检技术发展及应用[J]. 中国铁路, 2017(10): 91-95.

MA Chenxi, ZHANG Eryong, FANG Yue, et al. Development and Application of Onboard Patrol Inspection Technologies for Rail Status [J]. China Railway, 2017(10): 91-95.

[4] 程雨,杜馨瑜,顾子晨,等. 基于FPGA和DSP的高速实时轨道巡检图像采集处理系统[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(1): 32-42.

CHENG Yu, DU Xinyu, GU Zichen, et al. High-speed Real-time Acquisition and Processing System of Track Inspection Images Based on FPGA and DSP [J]. China Railway Science, 2021, 42(1): 32-42.

[5] 杜馨瑜,程雨,顾子晨,等. 轨道巡检图像增强方法研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(2): 33-37.

DU Xinyu, CHENG Yu, GU Zichen, et al. Research on Image Enhancement Method of Track Inspection [J]. Railway Engineering, 2022, 62(2): 33-37.

[6] 安小雪,郑树彬,柴晓冬,等. 基于图像识别的轨道扣件定位系统研究[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(7): 132-136, 146.

AN Xiaoxue, ZHENG Shubin, CHAI Xiaodong, et al. Location System for Track Fasteners Based on Image Recognition [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(7): 132-136, 146.

[7] 张博,刘秀波,赵志荣,等. 基于视觉的钢轨表面缺陷识别方法综述[J]. 铁道建筑, 2020, 60(9): 136-140.

ZHANG Bo, LIU Xiubo, ZHAO Zhirong, et al. Overview of Rail Surface Defect Recognition Methods Based on Vision [J]. Railway Engineering, 2020, 60(9): 136-140.

[8] TB10621-2014 高速铁路设计规范[S].

TB10621-2014 Code for Design of High Speed Railway [S].

[9] 铁运[2012]83号,高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)[S].

Tie Yun [2012]No. 83, Maintenance Rules for High-speed Railway Ballastless Track Line( Trial ) [S].