

有轨电车线路槽型轨自动清洁系统研究^{*}

谢勇君¹ 林泽楠^{1,2} 李海建^{1,3} 李进桂¹ 黄衍铭¹ 黄晓杰¹

(1. 暨南大学轨道交通研究院, 519070, 珠海; 2. 华南理工大学自动化科学与工程学院, 510641, 广州;

3. 桂林电子科技大学机电工程学院, 541004, 桂林//第一作者, 副教授)

摘要 针对有轨电车线路槽型轨内异物清洁效率低下的问题,提出了槽型轨异物快速检测算法及基于此算法研发的槽型轨自动清洁系统。通过该算法,自动清洁系统可快速检测且定位出槽型轨内异物的位置,并控制轨道清洁车利用高压水流和负压吸口进行自动清洁。试验结果表明:该快速检测算法对槽型轨内异物检测成功率超过 92%;平均每帧图像的处理时间为 31.6 ms;轨道清洁车能够在以 20 km/h 速度行驶过程中实现对槽型轨内异物的自动清理。该自动清洁系统既节约了水资源,又提高了槽型轨的清洁效率,有助于有轨电车在城市公共交通中的进一步推广。

关键词 有轨电车; 槽型轨; 异物检测; 自动清洁

中图分类号 U482.19

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.013

Research on Automatic Cleaning System for the Grooved Track of Tram Line

XIE Yongjun, LIN Ze'nan, LI Haijian, LI Jin'gui, HUANG Yanming, HUANG Xiaojie

Abstract Targeting the problem of low cleaning efficiency of foreign objects in the grooved track of tram line, a grooved track foreign object rapid detection algorithm and an automatic cleaning system for grooved track based on this algorithm are proposed. By the algorithm, the automatic cleaning system can detect rapidly and allocate the foreign object in grooved track. The track cleaning vehicle is operated to carry out automatic cleaning using high-pressure water jet and negative-pressure suction ports. The experiment results show that the target detection success rate of the algorithm is over 92%. The average time per frame for processing is 31.6 ms, and the track cleaning vehicle can clean the foreign objects in the grooved rail at the speed of 20 km/h. This automatic cleaning system saves water resources and improves cleaning efficiency of grooved track, promoting tram popularization in urban public transit.

Key words tram; grooved track; foreign object detection; automatic cleaning

First-author's address Rail Transit Research Institute, Jinnan University, 519070, Zhuhai, China

0 引言

有轨电车的线路大多采用埋入式的槽型轨,轨道铺设于城市道路的中间或两旁,和沿线道路上的其他车辆共享路权^[1]。由于有轨电车轨道凹槽的特殊结构,树叶、砂石、泥土等异物容易堆积粘附在槽型轨内部,甚至会对槽型轨造成腐蚀。

在国外,德国 Zweiweg 公司设计的轨道清洁车使用高压水装置对槽型轨内的异物进行清洁,但该产品距今较久,已无法满足有轨电车轨道的清洁要求。英国的 JOHNSTON、美国的 ELGIN 等公司设计的清洁车能够对公路进行清洁作业,但并不是针对有轨电车的槽型轨道清洁而设计的,因此也无法满足有轨电车槽型轨的清洁要求。

在国内,目前针对有轨电车槽型轨内异物的处理目前仍以人工手动清洁为主,该方式耗时、耗力、效率低、扬尘污染较为严重,并不适合有轨电车可持续发展的要求。文献[2]设计了一种有轨电车槽型轨清洁装置,该装置可将槽型轨中污物松动,利用滚刷将污物扫起后经由吸尘器吸走。文献[3]设计了轨道专用的清理维护车,该清洁车可利用铲刀进行清污,但铲刀会对轨道面产生不可逆的机械性损伤。

利用高压水流对有轨电车槽型轨内粘附的垃圾进行冲洗,并利用负压装置吸走污水和异物,可达到较好的清洁效果,也可以避免与轨道槽直接接触,对其造成无法修复的磨损。文献[4-5]为了获得高压水射流对有轨电车槽型轨轨面的最佳清洗效果,利用计算流体动力学分析软件 FLUENT,对水

^{*} 广东省自然科学基金项目(2017A030310184);广东省科技创新战略专项资金重点项目(2020a0058)

射流的清洗过程进行了模拟仿真,得出在指定的条件下射流的最佳靶距为 10 ~ 15 cm、最佳入射角为 25°的结论。文献[6]设计的槽型钢轨清洁车装满水后只能清洗 6 km 长度的轨道。文献[7]研制的轨道清洁车由多个系统组成,利用水流冲洗或负压对污物进行抽吸。上述利用高压水或负压对槽型轨的清洁方式是粗放型的清洁方式,即使部分轨道槽内并没有垃圾等异物,清洁车在工作过程中均使用水流来冲洗轨道,这样既造成了水资源的大量浪费,又使得清洁车的工作里程较短,需要不断补充清洁水源。

此外,目前关于轨道异物清洁的研究(包括轨面提取、轨道异物识别等)大多与工字轨相关,针对槽型轨内异物识别的相关研究较少。为解决现阶段国内有轨电车轨道清洁装备技术落后的现状,本文研发了一套适用于有轨电车槽型轨的自动清洁系统。

1 自动清洁系统设计方案

1.1 自动清洁系统的工作流程设计

本文研发的有轨电车槽型轨自动清洁系统在工作时首先打开清洁车上轨道槽吸口,吸走轨面上普通的灰尘、沙子,接着通过清洁车上的车载高速摄像头获取槽型轨道的实时图像。该系统的工作流程如图 1 所示,当槽型轨异物快速检测算法检测到槽型轨中有异物存在时,上位机和 PLC(可编程逻辑控制器)将自动调用清洁车上的高压水流,配合吸口实现对异物的自动清理。

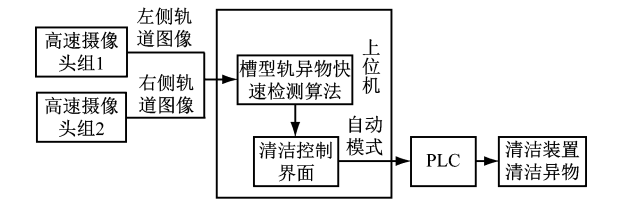


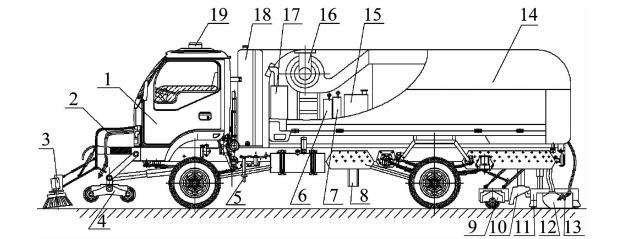
图 1 有轨电车槽型轨自动清洁系统工作流程图
Fig. 1 Operation flow chart of the automatic cleaning system for the grooved track of tram

1.2 公铁两用槽型轨清洁车的总体结构

将该自动清洁系统应用于公铁两用槽型轨清洁车^[8](以下简称“清洁车”),其总体结构如图 2 所示。

如图 3 所示,有轨电车大多采用埋入式槽型轨道^[1],其特殊的结构增加了清洁车在快速移动下对

异物的检测与清理的难度。为获得清洁车以 20 km/h 的速度行驶过程时槽型轨的图像,本文设计一款专用的高速摄像头夹具,以辅助固定高速摄像头。该夹具安装在清洁车底盘内(见图 2 的位置 5),共有 2 个移动自由度和 2 个旋转自由度,可方便高速摄像头调焦,适用于各类清洁环境。夹头部分的橡胶垫可增大夹具与摄像头间的摩擦力,也能起到一定的缓冲减震作用,并有效减轻清洁车在工作过程中产生的摄像机抖动。



注:1——主车体;2——前置低压降尘水路;3——前置刷盘;4——前变轨导向装置;5——高速摄像头夹具;6——低压隔膜水泵;7——高压柱塞水泵;8——洗车枪;9——后变轨导向装置;10——中间轨面负压吸口;11——轨道槽清洗装置;12——轨道槽吸口;13——轨道槽高压水路;14——污水箱;15——液压泵与油箱;16——风机;17——柴油副发动机;18——清水箱;19——警报器。

图 2 公铁两用槽型轨清洁车的总体结构
Fig. 2 Overall structure of road-rail dual-purpose grooved track cleaning vehicle



图 3 槽型轨道结构示意图
Fig. 3 Structure of the grooved track

1.3 槽型轨道异物快速检测算法

针对传统帧间差分法不能检测出完整目标、易产生空洞现象、对运动缓慢的物体不敏感等局限,为了匹配清洁车较快的行驶速度,本文提出了槽型轨异物的快速检测算法,其计算流程如图 4 所示。

1.3.1 步骤一:图像预处理

为降低车载左、右轨道摄像头采集得到的视频序列帧中背景光照、行车振动等因素的干扰,自动清洁系统用高斯滤波器和中值滤波器进行图像数据的平滑减噪,以减小高分辨率图像带来的图像噪声干扰。在此基础上进一步将视频帧数量减少至

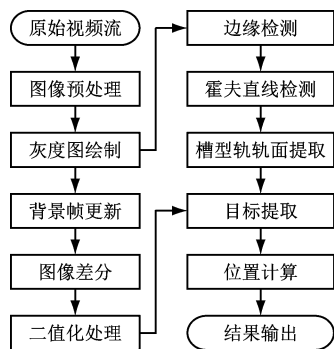


图4 槽型轨异物快速检测算法计算流程图

Fig. 4 Calculation flow chart of grooved track foreign object rapid detection algorithm

原始视频流的1/10,并转化为灰度图,以提高检测算法的处理速度。

1.3.2 步骤二:提取槽型轨轨面

首先,使用Canny算法对灰度图进行轨道边缘检测,包括采用Sobel算子计算图像的梯度幅度和方向,对梯度幅度应用非极大值抑制来细化边缘,用双阈值算法检测和连接边缘以得到图像轮廓。接着,通过概率霍夫变换算法检测出图中存在的直线线段并进行筛选,最终分割出槽型轨轨面。

1.3.3 步骤三:异物检测

采用背景自动更新的背景差分法对槽型轨中的异物进行检测。根据式(1)计算差分图像,背景帧的更新策略如式(2)所示。

$$A_t(u, v) = |I_t(u, v) - B_t(u, v)| \quad (1)$$

$$B_t(u, v) = \begin{cases} I_t(u, v) & t = 1 \\ \alpha I_t(u, v) + (1 - \alpha) B_{t-1}(u, v) & t > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$A_t(u, v)$ ——差分图像函数;

$I_t(u, v)$ ——当前帧图像函数;

$B_t(u, v)$ ——背景帧图像函数;

u, v ——分别表示图像帧中水平方向、竖直方向的像素点;

t ——图像帧序号;

α ——图像帧的更新率。

试验表明,当 α 取0.2时考虑了像素点时空之间的关联性,能够有效检测出槽型轨的图像序列中变化不够明显的异物目标,并且可以防止运动中的目标突然消失。

1.3.4 步骤四:目标提取

设定二值化处理的阈值 θ ($\theta = 40$),对差分图像

进行二值化处理,得到的二值化图 $T_t(u, v)$ 如式(3)所示,并与步骤二中提取出的槽型轨轨面进行相与运算,初步提取出槽型轨中异物的图像。为缓解空洞效应的影响,采用形态学滤波的方法对异物图像进行进一步的处理,以得到目标结果。

$$T_t(u, v) = \begin{cases} 1 & A_t(u, v) > \theta \\ 0 & A_t(u, v) \leq \theta \end{cases} \quad (3)$$

1.3.5 步骤五:计算异物位置

通过提取到的目标物体的中心距离计算出异物的质心在图像中的坐标,进一步结合清洁车的实际运行速度,计算出异物与轨道槽负压吸口及高压水喷嘴之间的实际距离。

通过上述5个步骤可实现槽型轨内异物实时位置的获取。当异物进入高压水喷嘴和轨道槽负压吸口清洁范围之内时,可对异物进行清洁。

1.4 清洁装置的自动控制

工控机对检测算法识别到的异物位置信息进行处理,向清洁车上的PLC发送控制信息,控制电磁离合器、电隔膜泵、电磁阀等工具调用清洁装置进行清洁作业。

清洁装置控制模块包括低压水降尘、高压水冲洗、负压吸污、扫盘洗刷等4个子系统,其中:低压水降尘子系统分为前置扫盘降尘水路、左右槽型轨间轨面降尘水路及污水箱内降尘水路,均由电隔膜水泵带动;高压水冲洗子系统由轨道槽冲洗水路、污水箱内清淤水路及高压水冲洗枪组成;负压吸污子系统中,风机负责抽吸左、右槽型轨之间的污水及轨道槽负压吸口处的污水;扫盘洗刷子系统中,液压马达负责控制扫盘装置,对左、右槽型轨之间的轨面进行清洁。

考虑高压水泵流量与轨道面清洗工况等因素,在保证最佳清污效果下最大化节约水资源,对高压水喷嘴、风机吸口进行设计^[7],喷嘴出口水流速度的理论计算式如下:

$$v = \lambda \sqrt{p} \quad (4)$$

式中:

p ——喷嘴的入口压力;

v ——水流速度;

λ ——喷嘴出口水流速度系数。

如图5所示,利用FLUENT软件对水射流的清洗过程进行了模拟仿真,得出结论如下:在工作压力为6 MPa、喷嘴出口直径为1.6 mm时,设置靶距

为 10 ~ 15 cm,入射角为 25°,高压水射流能达到最佳清污效果。

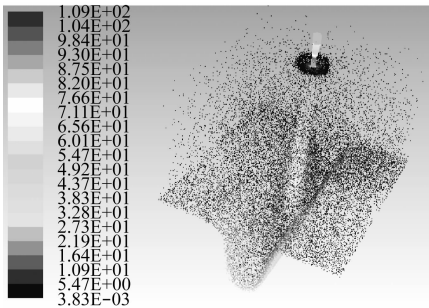


图 5 高压水射流清洗仿真模型界面截图
Fig. 5 Interface of high-pressure water jet cleaning simulation model

工作人员可通过清洁车上面的物理控制面板或上位机软件界面上的按钮手动控制相关清洁装置工作,也可设置清洁车采用自动清洁模式,即检测到有异物时清洁车自行进行清洁。

在自动清洁模式下,轨道槽负压吸口下降至工作高度并打开风机,启动轨道槽吸口吸污。高速摄像头实时获取左、右槽型轨道的图像后,通过检测算法程序快速识别出槽型轨内有无异物,并对异物位置进行准确定位。若检测到轨道槽内有异物,自动清洁系统将关闭回水回路,打开高压水回路冲射轨道槽,污物将经由轨道槽吸口吸走;若没有检测到有异物,自动清洁系统将关闭高压水回路,不做清洁。自动清洁模式的工作流程如图 6 所示。

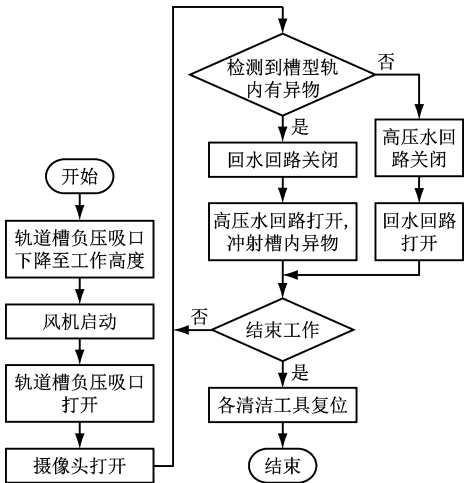
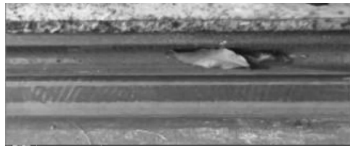


图 6 自动清洁模式的工作流程图
Fig. 6 Operation flow chart of automatic cleaning mode

2 试验结果分析

本文通过清洁车对存在异物的槽型轨进行清

洁试验,使用 WP-UF500 高速摄像头获取清洁车快速行驶过程中的轨面图像。从图 7 可以看出,本文提出的槽型轨异物快速检测算法能够检测出槽型轨道内的泥土、砂石、树叶等异物。经计算,本次试验目标检测的成功率超过 92%,处理每帧图像的平均耗时为 31.6 ms。由此可认为:本文提出的自动清洁系统具有较高的实时性和准确性,可满足清洁车 20 km/h 的清洁速度,远高于传统的人工清洁速度(4 ~ 5 km/h)。



a) 轨面上异物实景图



b) 异物的检测效果图

图 7 采用自动清洁系统进行试验的检测效果
Fig. 7 Detection effect of adopting automatic cleaning system for tests

根据水射流仿真的结果调整轨道槽的清洗射流喷嘴,将射流靶距设为 10 cm、入射角设为 25°,清洁车在运行过程中对槽型轨进行清洁,达到了良好的清洁效果,如图 8 所示。



图 8 槽型轨清洁后的实际效果
Fig. 8 Actual effect of grooved track after cleaning

3 结语

本文通过对有轨电车槽型轨自动清洁的关键技术进行研究,所提出的槽型轨异物快速检测算法能够准确地提取槽型轨的轨面图像,对槽内异物检测的成功率高、检测时间较短,能够满足清洁车以 20 km/h 速度行驶过程中获取异物位置并对其进行

清洁的需求。自动清洁系统在有轨电车槽型轨中得以应用,既可提高槽型轨道内异物的清洁效率,又有利于降低腐蚀性垃圾对槽型轨的污染,减少导电物对有轨电车正常运行的影响,有助于推动有轨电车行业的发展。

本文克服了传统人工手持工具清洁槽型轨道效率低下、成本较高的不足,解决了普通清洁车工作时全程喷水冲洗槽型轨浪费大量水资源、清洁车因耗水严重导致清洁里程较短等问题。

经过多次的试验测试,该自动清洁系统的硬件和软件均能够协同稳定地工作,但轨道槽清洗装置还无法实现对道岔的全方位清洁,因此,进一步提高槽型轨中异物检测成功率及槽型轨道的清洁效率,将是有轨电车槽型轨自动清洁系统优化的重点。

参考文献

- [1] 胥燕军,林红松,王健,等.现代有轨电车轨道结构综述[J].铁道标准设计,2014(7):58.
XU Yanjun, LIN Hongsong, WANG Jian, et al. Overview on track structure for modern tramway[J]. Railway Standard Design, 2014(7):58.
- [2] 王国志,刘红现,柯坚,等.一种槽型轨清洁装置:CN 205617303 U[P]. 2016-10-05.
WANG Guozhi, LIU Hongxian, KE Jian, et al. A groove track cleaning device: CN 205617303 U[P]. 2016-10-05.
- [3] 高慧莹.轨道专用清理维护车的设计与研究[D].长春:长春理工大学,2012.
GAO Huiying. Design and research of track special cleaning and

maintenance vehicle[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.

- [4] 李海建,龙芋宏,谢勇君,等.基于 FLUENT 的槽型轨道清洗射流的参数优化仿真分析[J].机床与液压,2019(19):125.
LI Haijian, LONG Yuhong, XIE Yongjun, et al. Simulation and analysis of parameter optimization of grooved track cleaning jet based on FLUENT[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019(19):125.
- [5] DONG H, MA W, HUANG J, et al. Development of rail precision cleaning vehicle for modern tramway[C]// ICTETS: International Conference on Traffic Engineering and Transportation System, September 20-22, 2019, He'nan Polytechnic University. He'nan: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Bristol: IOP Publishing, 2019:1.
- [6] 陈日发,袁江波,刘婷婷,等.槽型钢轨道清洗车:CN 203890943 U[P]. 2014-10-22.
CHEN Rifa, YUAN Jiangbo, LIU Tingting, et al. The cleaning vehicle of steel grooved track: CN 203890943 U[P]. 2014-10-22.
- [7] 李毅光,贾旭,吴友泉.一种自动化交通清洁车:CN 204875656 U[P]. 2015-12-16.
LI Yiguang, JIA Xu, WU Youquan. An automatic traffic cleaning vehicle: CN 204875656 U[P]. 2015-12-16.
- [8] 谢勇君,李海建,严冬松,等.公铁两用轨道精准清洁车和轨道精准清洁方法:CN 108316205 A[P]. 2018-07-24.
XIE Yongjun, LI Haijian, YAN Dongsong, et al. Precision cleaning vehicle and precision cleaning method of road-rail dual-purpose track: CN 108316205 A[P]. 2018-07-24.

(收稿日期:2020-04-15)

(上接第 60 页)

5 结语

城市轨道交通与干线铁路 2 个系统的衔接,对轨道交通的一体化开发具有积极的意义。本文通过分析城市轨道交通与干线铁路在接触网专业上的不同要求,确定了相关的数据和方案,提出了满足城市轨道交通与干线铁路 2 个系统衔接的接触网设计。目前在我国尚无轨道交通一体化开通的运营案例,虽然线路一体化的接触网设计方案已在试验线工程上得以成功运用,但是要付诸实施还需要行车组织、信号调度等专业开展相关研究。

参考文献

- [1] 李剑,刘孟恺,高宏.市域轨道交通牵引供电制式的选择与优化[J].城市轨道交通研究,2019(6):159.

LI Jian, LIU Mengkai, GAO Hong. Selection and optimization of urban regional rail transit traction power supply mode[J]. Urban Mass Transit, 2019(6):159.

- [2] 成吉安.城市轨道交通专用回流轨牵引供电技术方案研究[J].城市轨道交通研究,2019(9):143.
CHENG Ji'an. Traction power supply scheme for urban rail transit special return rail[J]. Urban Mass Transit, 2019(9):143.
- [3] 刘杰,杜艳霞,覃慧敏,等.地铁杂散电流对埋地管道的干扰规律[J].腐蚀与防护,2019(1):43.
LIU Jie, DU Yanxia, QIN Huimin, et al. Interference regularity of metro stray current on buried pipelines[J]. Corrosion & Protection, 2019(1):43.
- [4] 余韬.大铁路与地铁系统并行段接触轨轨枕配置研究[J].铁道建筑技术,2017(1):30.
YU Tao. Research on the sleeper arrangement of contact rail in the parallel section of subway system and railway system[J]. Railway Construction Technology, 2017(1):30.

(收稿日期:2020-03-13)