文章编号：2097-5899(2026)02-0051-06　　**中图分类号**：U298.1；U260.4+2　　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202411140001
引用格式：杜海宾，田长安，王瑞，等. 铁路机车智能避障技术及系统研究[J]. 铁路物流，2026，44(2)：51-56.
DU Haibin，TIAN Chang'an，WANG Rui，et al. Research on Intelligent Obstacle Avoidance Technology and Systems for Railway Locomotives [J]. Railway Logistics，2026，44(2)：51-56.

铁路机车智能避障技术及系统研究

杜海宾，田长安，王　瑞，姜　正，陈　雪

(中车大连机车研究所有限公司 产品研发部，辽宁 大连　116023)

摘　要：机车避障作为提升铁路行车安全的重要环节，逐渐成为技术攻关与风险防控的焦点。基于铁路机车运行主动安全识别与预警系统展开分析，采用机车运行实时在线障碍物定位识别、标定分析和测速运算等技术，搭建机车主动障碍物识别与预警防护系统，针对机务段内、中转货场等区域场景及铁路正线场景，实现列车运行前方500 m范围的障碍物精准识别和距离感知，通过及时、适时地发出安全预警和警告提示，可提升最高速度120 km/h的铁路机车运行主动安全防护能力。

关键词：主动安全；障碍物识别；安全预警；风险识别；激光雷达

0　引言

我国铁路运营环境复杂，运营线路跨越多个气候带且长大交路多，铁路基础设施性能日渐劣化，同时伴随周围环境突发风险及异物侵限干扰，导致铁路运营安全风险不断增加，如何更好地加强和提升铁路运营安全保障与风险防控是一直以来关注的问题。

多年来，国内外研究机构及学者围绕铁路运营安全保障、铁路运用风险防控等问题开展了广泛的研究[1-3]，也推出了一系列针对铁路安全保障与风险防控的技术[4-6]和产品。但是，列车运行安全识别与预警的基础设施和车载设备仍相对落后，列车运行过程中的环境异常状态识别、分析、判断、预警仍采用人工为主的方式进行，难以满足我国铁路系统成网运行条件下对运行过程中系统风险分析、预测预警的安全保障需求，更是无法满足现代技术、装备、系统体系日益复杂和运营环境日益多变的现代铁路运营安全管理要求。此外，我国西部路网稀疏、地质复杂、气候条件恶劣、自然灾害频发、现场作业条件恶劣等特点，现有的人工巡线和小范围监测分析的方式更是难以为继。

因此，围绕铁路机车运行智能障碍物识别与预警技术进行系统研究，运用障碍物智能定位识别、标定分析和测速运算等方法，搭建了机车障碍物主动安全识别与预警防护系统[7]（以下简称“机车智能避障系统”），可实现机务段内、中转货场及铁路干线等场景下机车运行前方500 m范围的障碍物精准识别、距离感知和预警提升等功能，满足最高速度70 km/h的列车运行安全避障要求，有效提升最高速度120 km/h的列车主动安全防护能力。

1　总体结构组成

机车智能避障系统借助多焦距相机[8]模组、毫米波和激光雷达模组[9-10]，采用列车运行多场景识别和障碍物融合[11]算法，实时监测列车运行前方外部环境信息，结合铁路相关场景的运行限定与运用规则，通过主动实施铁路直道、弯道、道岔区域和相邻轨道、轨旁障碍物(围墙、信号机等)的实时在线定位识别、标定分析和测速运算，实现列车运行前方障碍物的精准识别、距离感知和预警提示。

机车智能避障系统主要由智能运算主机、数据采集单元(多焦距相机模组、毫米波和激光雷达模组)、定位模块、人机交互单元、列车运行监控记录装置(LKJ)

收稿日期：2024-11-14

安全信息平台、列车控制管理系统(Train Control and Management System，TCMS)网络接口模块、制动控制单元(Brake Control Unit，BCU)接口模块、数据防护转储装置构成，机车智能避障系统拓扑图如图1所示。

（1）智能运算主机：机车智能避障系统的核心组成部分，是优化与控制运算、多场景识别和障碍物融合运算的实现载体，具有优化计算、自适应检测与识别、场景识别数据接收与存储，以及行车日志记录等功能；搭载NVIDIA Ampere架构GPU，采用双机热备冗余安全计算结构，数据信息、控制指令通过以太网接口与外部设备进行信息交互。智能运算主机主要技术参数如表1所示。

（2）数据采集单元：包括4组不同焦距相机模组、毫米波和激光雷达模组；主要负责车辆运行前方信息的数据采集工作，并将采集到的不同数据格式的路况和环境障碍物信息发送给智能运算主机进行分析和处理，数据采集单元主要技术参数如表2所示。

（3）列车接口模块：包括TCMS网络接口模块和BCU接口模块，搭建与列车网络控制系统和制动系统交互的通道，主要实现列车网络控制系统数据和空气制动系统数据的实时获取，并完成安全防护控制器控制命令的下达转发工作。

（4）人机交互单元：用于系统必要信息输入确认、列车运行基本参数和行程信息显示、预警/报警信息提示和语音播放、数据转储操作等，是人机交互的主要载体。其配合智能运算主机以共同实现对列车的安全预警提示和列车紧急控制。

（5）LKJ安全信息平台：起到与LKJ安全隔离作用，通过CAN接口间接获取LKJ运行基础线路数据、站名表、运行揭示、机车信号、限速等信息，并为机车智能避障系统与LKJ的双向交互提供通道。

表1　智能运算主机主要技术参数

Tab.1　Key technical parameters of intelligent computing host

项点	参数
GPU	NVIDIA Ampere架构；搭载64个张量计算核心(Tensor Core)，2 048个统一计算设备架构核心(Compute Unified Device Architecture Core，CUDA Core)
CPU	12核Arm® Cortex® A78AE
主频	2.20 GHz
视频采集接口	8路GMSLⅡ
通信接口	8路千兆以太网

（6）其他设备：北斗定位模块实时获取列车的运行位置信息，并预留北斗统一授时接口；数据防护转储器用于记录主动安全防护系统运行的日志信息、识别和预警信息以及维护数据，通过无线传输方式实时下载运行状态数据并上传系统各部件的应用软件达到在线更新效果。

2　系统功能特点

机车智能避障系统综合获取列车状态数据信息、列车前方环境信息，运用实时感知信号变化的在线优化运算技术、多场景识别和障碍物融合算法技术、速度追踪控制技术等，实现列车运行过程中的实时在线安全感知与防护预警[12]功能。机车智能避障系统功能流程如图2所示。

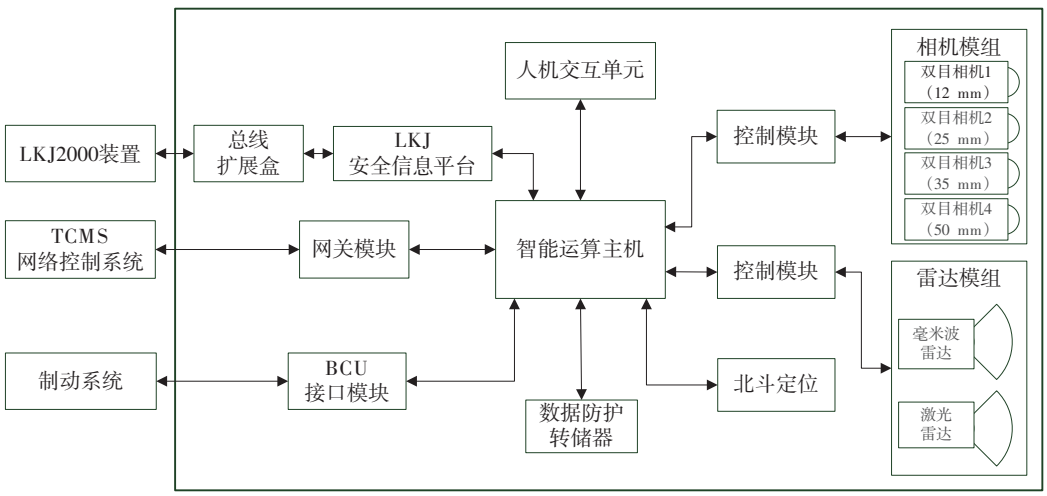


图1　机车智能避障系统拓扑图

Fig.1　Topology diagram of intelligent obstacle avoidance system of locomotive

表2　数据采集单元主要技术参数

Tab.2　Key technical parameters of data acquisition unit

模组	项点	参数
多焦距相机	像素	500万
	焦距/mm	12，25，35，50
激光雷达	最远探测距离/m	500
	探测距离(10%反射率)/m	250
	探测距离(盲区)/m	≤2
	视场角(H × V)/°	120 × 25
	角分辨率(H × V)/°	0.18 × 0.24
	测距精度/cm	2
	垂直线束/(线/s)	1 500
	帧率/FPS	10
毫米波雷达	探测距离/m	0.20~170
	FOV(水平)/°	远距–9.0~9.0 近距–45~45
	FOV(垂直)/°	近距和远距波束都为18(6 dB)
	波束水平宽度/°	远距波束：4.6@0 近距波束：9.2@0~13.0@ ± 45
	波束垂直宽度/°	18(6 dB)
	工作循环时间/ms	大约60

2.1　障碍物检测与识别

识别列车运行前方障碍物(侵入轨道的异物、人、其他列车车辆等)的目的在于感知车身前方一定范围内存在的障碍物距离、大小、类别、动静状态等信息，以此计算预测出需要做出的最优应对，从而避免发生安全事故。其关键技术包括实时雷达检测和点云处理、图像采集和叠加、深度识别和学习、动态跟踪和预测。昼夜障碍物检测与识别效果如图3所示。

为达到列车运行前方外部环境信息的精确检测与目标识别，机车智能避障系统采用多焦距相机模组、毫米波和激光雷达模组相组合的方式，相机、雷达等设备特点如表3所示。

列车运行前方障碍物的识别过程主要包括5个步骤。①通过毫米波雷达实时监测列车运行前方较远距离的环境信息；通过激光雷达扫描前方一定距离内的三维环境信息；通过多焦距相机采集列车前方运行环境高精度图像信息。②根据采集获取的点云和图像信息，采用障碍物融合算法初步定位出前方障碍物(车辆、行人等)的位置、大小并提供其大致的轮廓。③基于物体的位置、大小和轮廓，采用在线优化算法对目标进行精确的分类预测与识别，同时通过递归运算算法对其进行特征点标定，得到障碍物精准的轮廓信息，实现精准数据标注。④利用连续图像帧信息，排除交

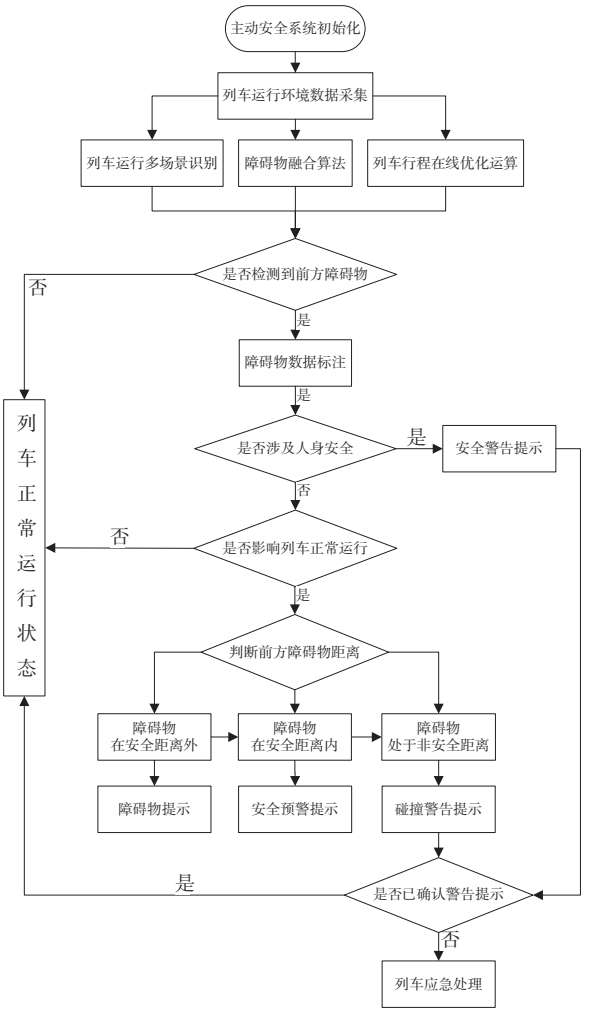
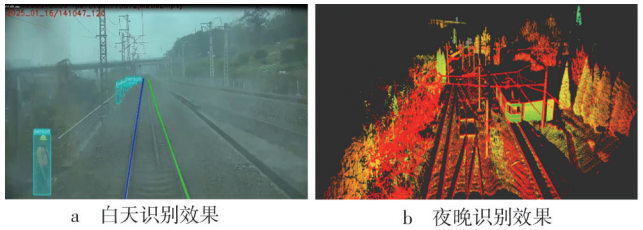


图2　机车智能避障系统功能流程

Fig.2　Functional block diagram of intelligent obstacle avoidance system of locomotive



a　白天识别效果　　b　夜晚识别效果

a　Daytime recognition performance　　b　Nighttime recognition performance

图3　昼夜障碍物检测与识别效果

Fig.3　Day and night obstacle detection and recognition performance

表3　相机、雷达等设备特点

Tab.3　Characteristics of camera, radar, and other equipmen

信息采集方式	优点	不足
相机	分辨率很高，可以获取丰富的二维信息，从而满足对于物体(车辆、行人、井盖等)分类的要求	无法获取物体可靠的距离和位置信息，且对于光线的依赖性较强
毫米波雷达	较强的穿透能力，不容易受到天气环境的影响；较大的识别距离(≤1 000 m)；相对其他雷达系列成本较低	目标识别能力一般；测量高度能力差
激光雷达	测距精度高；方向性强；响应时间快；不易受地面杂波干扰	穿透力较差，容易受到浓雾、雨雪天气影响；识别距离一般(≤300 m)；成本较高

又关系和周边环境的干扰，得到障碍物关键的视觉信息；期间采用多次回波技术减小逆光、强光、雨天、雾天、隧道、夜晚等特殊影响。⑤实时监测前方障碍物与运行列车的距离、相对速度等信息，依据其数据变化情况在线优化计算预测出必要的安全距离和可能的碰撞事件，并作出必要提示和预警，必要情况下接管列车控制权做出紧急应急处理。

2.2　测速测距

测速测距是机车智能避障系统中障碍物识别的重要环节，涉及的关键数据包括列车实时运行速度、动态障碍物相对列车移动速度、列车与障碍物距离、障碍物相对坐标、障碍物与轨道相对位置等。

通常状态下列车运行速度从LKJ和TCMS系统获取。当LKJ和TCMS系统反馈的列车速度存在较小差异(≤3 km/h)时列车速度以较大值为准；如果LKJ和TCMS速度存在较大差异或无法从LKJ和TCMS获取列车速度时，将通过北斗并借助毫米波和激光雷达模组进行列车速度测量计算。障碍物测速测距指标数据如表4所示。

表4　障碍物测速测距指标数据

Tab.4　Data for obstacle ranging and speed measurement

障碍物类型	障碍物大小(宽×高)/mm	有效检测距离/m
列车、工程车等	2 800×3 800	约500
行人	400×1 700	约300
小障碍物(如石头、行李箱、安全帽等)	300×300	约200

注：障碍物检测测距误差≤1 m，系统测速误差≤1 km/h；准确率≥99%，漏报率<1%，误报率<1%。

机车智能避障系统通过对列车运行前方线路环境进行网络分割的方式，建立较强的线路区域相对坐标系，借助毫米波和激光雷达模组实时监测到的障碍物数据信息，精确地计算障碍物相对列车的实时距离、位置等信息，列车前方障碍物测距测速示意图如图4所示，进而实现动态障碍物运行轨迹的提前预判。

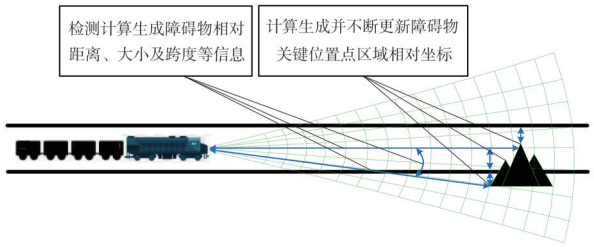


图4　列车前方障碍物测距测速示意图

Fig.4　Obstacle ranging and speed measurement ahead of the train

2.3　多级预警保护

多级预警保护旨在提升列车运行过程中的安全防范能力和应急处理水平，降低静态或动态障碍物闯入因素带来的安全风险与安全隐患。依据列车主动安全识别系统的技术特点及列车运用要求，在保障列车安全、稳定、平稳运行的前提下，预警保护分为4个保护层级，多级预警保护分类描述如表5所示。

2.4　紧急控制

当安全警告或碰撞警告提示未得到机车司机确认时，机车智能避障系统将进入紧急状态。该状态下将综合列车实时速度、列车与障碍物距离、障碍物类别、线路坡度曲率、信号机状态等线路信息，自动在线优化计算出有效的列车运行速度限制曲线和运行曲线，并依照这些曲线自动控制列车运行，列车自动紧急控制示意图如图5所示。

2.5　系统维护

系统维护功能主要包括视频数据、点云数据、列车运行数据及定位信息数据的压缩存储功能，报警数据点播功能，授时功能，日志记录功能，在线软件版本管理功能等。

表5　多级预警保护分类描述

Tab.5　Classification of multi-level warning protection

紧急程度	原因	现象描述	处置响应
特别紧急	直接人身安全隐患	行人	安全警告提示，且需要对警告提示做出响应；如在指定时间(依据列车实时速度标定)内未做出响应，将触发列车自动制动以减速或停车
	间接人身安全隐患	车辆(汽车、卡车等)驶入	
紧急	列车运行安全事故	危险障碍物(较大石块、土堆、其他铁路车辆、动物等)存在，且在非安全距离范围	碰撞警告提示，且需要对警告提示做出响应；如在指定时间(依据列车实时速度标定)内未做出响应，将触发列车自动制动以减速或停车
次紧急	列车运行安全隐患	危险障碍物(较大石块、土堆、其他铁路车辆、动物等)存在，且在安全距离范围	安全预警提示
一般	列车运行前方异常	较小障碍物(较小石块、塑料袋等)存在	障碍物提示

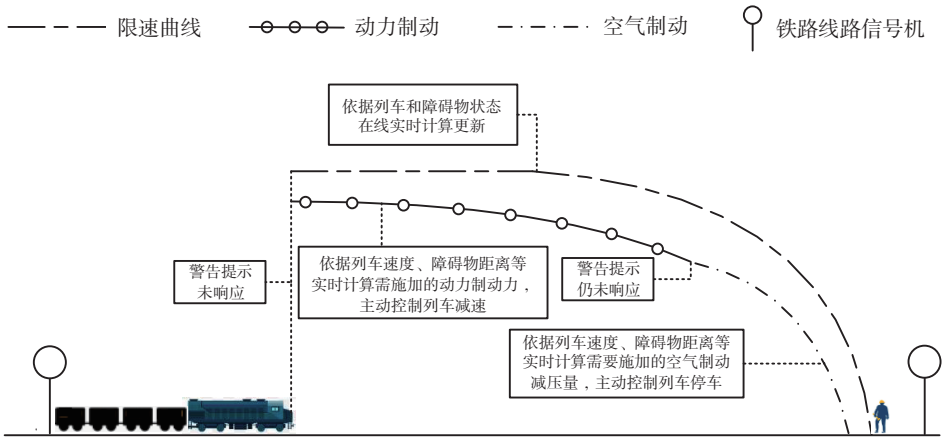


图5　列车自动紧急控制示意图

Fig.5　Schematic diagram of automatic emergency control of train

视频、点云、列车运行及定位信息数据的存储时间不低于7 d，点播功能至少满足10次报警前后不低于2 min的视频、报警及相应列车运行数据信息的下载。

系统通过卫星天线获取列车北斗定位信息，一并获取的北斗标准时间信息可用于列车授时并可作为日志记录的位置基准和时间基准。

3　结束语

在物联网、人工智能、遥感遥测、多维传感等先进技术的赋能下，以智能化、立体化、一体化、预测性为主要特征的铁路安全状态获取、风险辨识、预测预警等技术已成为新的技术方向。通过对铁路机车智能避障技术及系统的研究，验证了基于多传感器融合的列车运行主动安全识别与预警技术能够满足障碍物精准识别和距离感知功能要求，并具有实际可行性和应用价值，为后续铁路智能安全系统的建设提供了重要的技术储备和工程基础。

参考文献：

[1] 周晶杰，赵　冬.轨道车辆主动式障碍物检测功能的验证方法探讨[J].电力机车与城轨车辆，2023，46(2)：105-107.
ZHOU Jingjie，ZHAO Dong.Discussion on Verification Method of Active Obstacle Detection Function for Rail Vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles，2023，46(2)：105-107.

[2] 朱　彦，赵海波.轨道车辆的主动安全保护技术应用[J].铁道车辆，2018，56(11)：25-28，6.
ZHU Yan，ZHAO Haibo. Application of the Active Safety

Protection Technique on Rail Vehicles[J]. Rolling Stock, 2018, 56(11): 25-28, 6.

[3] 张　辉，马玉坤.铁路危险货物罐式集装箱运输发展研究[J].铁道货运，2024，42(11)：18-24.
ZHANG Hui, MA Yukun. Development of Tank Containers of Dangerous Goods in Railway Transportation[J]. Railway Freight Transport, 2024, 42(11): 18-24.

[4] 肖添文，徐永能，徐欣怡.城市轨道交通隧道异物侵入检测与控制方法[J].电气技术，2019，20(S1)：48-52，56.

[5] 沈　拓，钱沿佐，谢兰欣，等.考虑反射强度的全自动运行列车障碍物检测算法研究[J].同济大学学报(自然科学版)，2022，50(1)：6-12.
SHEN Tuo, QIAN Yanzuo, XIE Lanxin, et al.Obstacle Detection Algorithm of Fully Automatic Train Considering Reflection Intensity[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(1): 6-12.

[6] 严　晗，程晓卿，马小平，等.基于数字孪生的城市轨道交通主动安全保障系统架构与关键技术[J].铁道运输与经济，2025，47(6)：170-179.
YAN Han, CHENG Xiaoqing, MA Xiaoping, et al. Architecture of Digital Twin-Based Active Safety Assurance System for Urban Rail Transit and Key Technologies Involved[J]. Railway Transport and Economy, 2025, 47(6): 170-179.

[7] 张　帆，张从旺.基于无人驾驶平台的主被动障碍物检测分析对比[J].铁道车辆，2021，59(4)：1-8.
ZHANG Fan, ZHANG Congwang.Analysis and Comparison of Active and Passive Obstacle Detection Based on Driverless Platform[J]. Rolling Stock, 2021, 59(4): 1-8.

[8] 白丽娟，黄劲松.障碍物检测与车辆视觉定位一体化的方法研究[J].导航定位学报，2022，10(5)：105-112.
BAI Lijuan, HUANG Jinsong. Research on the Method of Integrating Obstacle Detection and Vehicle Visual Positioning[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2022, 10(5): 105-112.

[9] 郑云水，郭双全，董　昱.基于雷达测量数据的列车运行前方障碍物检测方法研究[J].铁道学报，2021，43(3)：101-110.
ZHENG Yunshui, GUO Shuangquan, DONG Yu. Research on Detection Method of Obstacles in Front of Operating Train Based on Radar Measurement Data[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(3): 101-110.

[10] 曾　祥，蒋国涛，鲍纪宇，等.基于车载激光雷达的隧道内障碍物检测[J].控制与信息技术，2021(1)：1-8.
ZENG Xiang, JIANG Guotao, BAO Jiyu, et al. Detection of Obstacles in Tunnel Based on Vehicle-Borne LiDAR[J].Control and Information Technology, 2021(1): 1-8.

[11] 常　飞，刘小溟.基于传感器融合技术的障碍物检测系统设计[J].智慧轨道交通，2023，60(2)：45-50.
CHANG Fei, LIU Xiaoming.Design of Obstacle Detection System Based on Sensor Fusion Technology[J]. Smart Rail Transit, 2023, 60(2): 45-50.

[12] 宋　丹，刘　登.基于二次雷达技术的地铁防撞预警系统研究[J].铁路通信信号工程技术，2019，16(4)：53-57.
SONG Dan, LIU Deng.Collision Warning System for Urban Rail Transit Based on Secondary Surveillance Radar[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(4): 53-57.

（责任编辑：刘宁馨）

Research on Intelligent Obstacle Avoidance Technology and Systems for Railway Locomotives

DU Haibin, TIAN Chang'an, WANG Rui, JIANG Zheng, CHEN Xue

(R&D Department, CRRC Dalian Institute Co., Ltd., Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: The obstacle avoidance of locomotives, being a vital component in the promotion of railway traffic safety, has progressively evolved into the central challenge for technology development and risk management. This paper analyzed an active safety recognition and early warning system for railway locomotives. The system utilized technologies such as real-time online obstacle localization, recognition, calibration, and speed measurement to build an active obstacle detection and warning protection system of locomotives. Aiming at operational scenarios such as depot areas and transit freight yards, as well as mainline railway scenarios, the system achieved precise obstacle recognition and distance perception within a 500-meter range ahead of train movement. By providing timely and appropriate safety warnings and alerts, it enhanced the active safety protection capability for railway locomotives operating at speeds of up to 120 km/h.

Keywords: Active Safety; Obstacle Recognition; Safety Early Warning; Risk Recognition; Laser Radar