

基于光栅阵列传感网络的列车定位系统研究

刘鲁鹏

通号城市轨道交通技术有限公司 北京 100070

摘要：列车智能感知系统是一种基于光栅阵列传感技术的轨旁列车占用检测设备。该系统具备定位精度高、抗电磁干扰能力强、基本免维护、故障影响局部化及恢复迅速等显著优势，可显著提升轨道交通系统运营的安全性与可靠性，降低维护成本与工作量，节约建设投资与长期运营支出，具有广阔的应用前景。

关键词：光栅阵列；列车定位；轨旁列车占用检测；安全性

1 引言

列车定位技术的性能（精度、实时性、可靠性、可用性等）是衡量城市轨道交通信号系统先进性和效能的关键指标，是城市轨道交通实现安全、高效、高密度运行不可或缺的技术支柱^[1]。

目前CBTC系统通常采用计轴或轨道电路等设备作为轨旁列车定位设备，定位精度较低。车载定位失效时，系统将只能以固定闭塞方式运行，区间运行时间增加，通行能力下降。车载定位故障恢复后，需要列车运行至计轴或轨道电路边界一定范围内，地面信号设备方可重新为列车完成筛选，系统恢复至移动闭塞，故障恢复耗时较长。信号系统列车降级后故障影响范围大，故障恢复时间长，已成为运营的重要痛点。

列车智能感知系统是基于光栅阵列传感技术研发的新型列车定位系统，该系统通过光栅阵列传感光缆（以下简称“光栅光缆”）实时采集轨道振动信息并进行调制解调处理，实现光栅测区占用检测，进而实现列车位置、运行速度、运行方向及完整性等信息检测。该系统可完全覆盖传统轨旁列车定位设备功能，并可大幅提升轨旁定位精度，在信号系统车载定位失效情况下，仍可提供实时、连续、精确的列车位置，以缩短故障后的恢复时间，降低影响范围，提升运营效率。

2 光栅阵列传感技术简介

光纤传感技术作为与光纤通信技术相伴而生的新兴传感领域，利用光导纤维作为核心传感元件和传输媒介。其基本原理在于：当光纤所处环境的物理量（如温度、压力、应变、振动、等）发生变化时，会导致在光纤中传输的光信号特性（如强度、相位、波长等）发生

相应改变。通过精密探测和分析这些光信号的变化，即可高精度地反演出被测物理量的信息。

该技术具有一系列显著优势，包括：本质安全，无电火花风险，适用于易燃易爆环境；抗电磁干扰能力强，不受雷电、高压、射频等干扰；灵敏度高、响应速度快；体积小、重量轻、可塑性强，便于安装；可实现长距离分布式传感以及易于组网构成大型传感系统等，拥有广泛的应用场景和巨大的市场前景^[2]。

光栅阵列传感技术是光纤传感技术的一个分支，在大型工程结构的状态监测方面展现出巨大的应用潜力，被广泛应用于能源、交通等领域的基础设施健康监测等方面。

3 光栅阵列定位原理

列车智能感知系统采用布拉格光栅阵列传感技术。

布拉格光栅是只有几毫米长度的微结构，通过将单模光纤纤芯横向暴露在具有周期性图案的强紫外光下制作而成。一根光纤可刻写数百个布拉格光栅，相隔几毫米至数公里，形成光栅阵列，通过适当的封装，可以对温度或应变等参数保持极高的灵敏性。

光栅阵列定位设备通常由光源、光栅阵列传感网络、调制解调仪等部分组成。

设备工作时，光源发出入射光，进入刻有光栅阵列的光纤发生反射，通过传感器接收反射光。当外部环境发生改变时，光纤产生应变，光栅处反射光发生波长漂移。经调制解调仪完成波长解调，计算波长漂移量，并通过对波长漂移量的进一步分析，得到应变处光栅的位置^[3]。

4 列车智能感知系统

4.1 系统结构

列车智能感知系统（以下简称“系统”）是基于光栅阵列传感技术的轨旁列车占用检测设备。系统结构如下图所示：

作者简介：刘鲁鹏（1982.06-），性别：男，民族：汉族，籍贯：山东莱州，学历：硕士，职称：高级工程师，研究方向：轨道交通信号系统

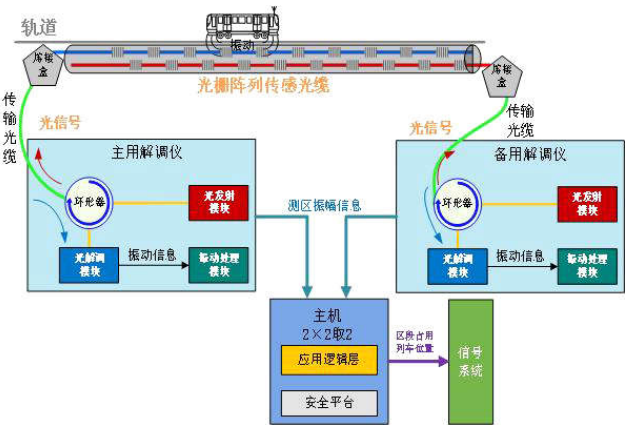


图1 列车智能感知系统结构图

如图所示，系统主要由光纤、解调仪、主机构成。

光纤上每隔一定距离刻有一个布拉格光栅，两个光栅之间定义为一个测区，测区长度决定了列车定位精度。在全线铺设传感光缆，实现对列车位置的实时感知。

解调仪设备提供光源，进行反射光采集，并对波长进行滤波、解调。列车行走时产生的振动导致光纤发生应变，解调仪设备根据前述光栅定位原理计算各测区应变大小，即测区振动强度信息，并向主机发送。

主机根据解调仪计算的各个测区的振动强度信息，结合线路数据，计算列车位置、速度等信息，并向信号系统发送，作为信号系统控制列车的依据。

系统采用二乘二取二架构，可靠性高，安全完整性等级达到SIL4级。

4.2 列车定位计算

4.2.1 列车识别及跟踪

由于光栅光缆铺设范围涵盖全线，故系统监测到的列车走行必为连续信号，即正常情况下，列车不可能在线路中间出现或消失，只能从线路入口驶入，出口驶出。在此前提下，系统实现对列车的识别及跟踪。

系统对所有测区的振动强度进行判断，若振动强度超过阈值，则认为该测区可能被列车占用。强度阈值通过前期试验及数据分析确定，可保证列车以不低于检测速度阈值的速度运行时，列车所在的测区必为“可能被列车占用”状态。

若线路入口处出现测区可能被列车占用，则系统判断可能有列车进入线路，并开始进行列车识别。若线路入口范围内出现连续的可能被列车占用的测区，总长度达到列车长度，且持续时间超过阈值，则系统完成该列车识别，判定列车进入线路，并开始对该列车位置进行跟踪。

系统周期计算已识别出的列车的占用范围，并与前

一周期计算的列车占用范围进行对比，根据相邻周期的占用范围情况变化，判定当前的列车实时位置。

4.2.2 系统启动

若系统启动时，线路范围内有列车，则不满足列车识别的前提条件：列车只能从线路入口驶入，出口驶出。故此时需采用其他方法进行列车识别。

系统提供两种方法进行启动后的列车识别：

（1）系统启动后，识别列车范围由线路入口变为全线。即全线范围内，出现连续的可能被列车占用的测区，总长度达到配置的列车长度，且持续时间超过阈值，则系统认为该范围内有列车占用，完成该列车识别。

（2）由调度人员通过系统人机界面，人工标定各列车所在的范围。此时系统识别的列车占压范围为人工标定范围，可能大于列车实际范围，当列车开始运行后，系统通过对列车的跟踪，采信计算结果，缩小列车占用范围。

系统启动后，需调度人员确认线路范围内所有列车均被系统重新识别后，通过人机界面向系统发送确认信息。系统判定当前所有在线列车均已识别，完成启动过程。

4.2.3 列车低速运行

当列车速度低于检测速度阈值时，系统无法准确判断测区可能被列车占用。因此，需对列车低速运行过程的位置跟踪进行特殊处理。

由于系统对振动检测的灵敏度很高，故检测速度阈值很低，列车无法以此速度持续运行，故低速运行状态均为列车停车、启动过程中的暂态，短时间后便会转为停止或非低速运行。

系统识别列车后，根据计算出的列车占用范围判断列车当前是否处于低速状态：若列车占用范围与列车真实长度差值小于阈值，则判断列车处于低速运行状态，否则，判断列车处于非低速运行状态。

当列车由非低速状态进入低速状态后，系统根据列车当前运行方向、检测速度阈值、列车动力学模型等信息，动态计算列车“停车-启动-非低速运行”过程的可能占压范围，并将该范围作为该列车当前的占用范围，直至列车从低速状态进入非低速状态，重新通过振动信号计算列车占压范围。

4.3 系统优势

列车智能感知系统相较于传统轨旁列车占用检测设备，具备一系列显著优势：

（1）极简轨旁部署：系统大幅减少了轨旁设备数量，无需安装磁头、线缆等传统部件，仅需沿线路铺设光缆，显著降低了项目建设和设备成本。

(2) 精准定位能力: 传统设备如计轴装置只能判断某一区段(介于两个磁头之间)是否有列车占用, 受安装间距和成本限制, 其定位精度通常为数十至数百米。而列车智能感知系统可实现精确的列车定位, 精度可达5-10米。

(3) 维护便捷性: 光缆作为主要轨旁设备, 基本无需维护, 避免了传统磁头和线缆的定期检修需求, 极大降低了日常维护工作量。尤其在单轨线路等高作业难度场景中, 可显著减少维护人员的作业风险。

(4) 强抗干扰性: 计轴等传统设备在复杂轨旁电磁环境中易受干扰, 可能错误报告占用状态。智能感知系统采用无源光纤作为传感手段, 从根本上免疫电磁干扰, 显著提升系统可靠性与稳定性。

4.4 系统应用效果示例: 故障恢复

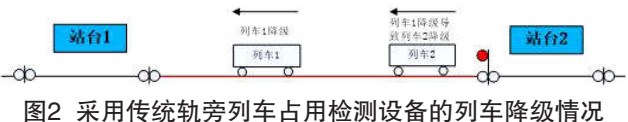


图2 采用传统轨旁列车占用检测设备的列车降级情况



图3 采用列车智能感知系统的列车降级情况

图2、图3为列车降级情况示意图, 其中红色线段表示轨旁列车占用检测设备检测的列车占用范围。

如图2所示, 采用传统轨旁列车占用检测设备(以计轴为例), 同一计轴内有两列车以连续式控制等级运行, 计轴处于占用状态。当前车车载信号设备发生故障, 丢失定位后, 与地面设备通信中断。此时, 计轴仍处于占用状态, 地面设备仅能判断前车在计轴范围内, 但无法确定其具体位置。虽然地面设备仍可获取后车实时发送的位置信息, 但由于前车位置丢失后, 可能发生移动, 从故障-安全角度考虑, 前车可能的范围为后车车头到前方计轴磁头, 因此, 地面设备将判断后车前方有隐藏列车, 无法为其计算移动授权, 导致后车制动停车, 只能降级运行^[4]。故障恢复时, 若前车以降级模式前行驶出计轴范围, 地面设备虽可通过下一计轴占用状态判断有列车驶出本计轴, 但考虑列车完整性丢失等故障情况, 仍无法判定后车到前方计轴磁头之间无隐藏列车, 故仍无法为后车计算移动授权, 需后车以降级模式

前行至前方计轴磁头处, 方可判断后车前方无隐藏列车, 为后车计算移动授权, 完成故障恢复^[5]。

图3为应用列车智能感知系统的情况。相同场景下, 前车车载设备与地面设备通信中断后, 列车智能感知系统仍可继续实时向地面设备发送前车的准确占用范围。地面设备可判定后车前方无隐藏列车, 继续为后车计算移动授权。因此后车不受影响, 可继续以连续式控制等级运行。故障恢复时, 列车智能感知系统实时计算列车占用范围, 地面设备可持续为后车计算有效移动授权, 不需后车以降级模式运行。

可见, 采用列车智能感知系统, 可大幅降低故障的影响范围, 缩短信号系统的故障恢复时间, 提升运营效率。

5 结论

既有轨旁列车占用检测设备存在定位精度不足、抗干扰能力弱、故障影响范围大及系统恢复时间长等固有缺陷, 一定程度上制约了轨道交通运营效率的提升。本文提出的基于光栅阵列传感网络的列车智能感知系统, 具有定位精度高、抗电磁干扰能力强、基本免维护、故障影响局部化以及恢复迅速等显著优势。该系统的应用可显著提升轨道交通系统运营的安全性与可靠性, 降低维护成本和工作量, 节约建设与长期运营支出, 具备良好的推广应用前景。

参考文献

[1]朱东飞,王永皎,杨焯,文伟,辛丽平,王洪海.基于光栅阵列的城市轨道列车定位与测速方法[J].《光子学报》,2019,48(11):1148014

[2]姜德生,何伟.光纤光栅传感器的应用概况[J].《光电子激光》,2002,4:420-430

[3]宋珂,刘佳欣,胡文字,周爱.基于光栅阵列振动传感的道面车辆监测研究[J].《应用科学学报》,2024,4:673-683

[4]中国城市轨道交通协会.T/CAMET 040010.1-2018城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通系统规范第1部分:系统总体要求[S].北京:中国铁道出版社,2018.

[5]陈红霞,孙强.基于层次分析法的CBTC系统安全风险研究[J].《交通标准化》2014,15:126-131