

# 基于信标的降级运行列车定位及防护方案

顾家泉

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

**摘要** [目的] 当车载信号设备发生故障时, 若通过轨旁次级定位设备来完成降级运行列车的定位及防护, 需要增设轨旁信号设备数量, 成本较高。对此, 有必要在不增设轨旁设备的前提下, 研究基于信标的降级运行列车定位及防护方案。[方法] 介绍了方案的基本原理及设备组成, 详细阐述了列车定位原则和防护原则。列车降级运行时, 车载基于信标的次级定位设备能读取信标信息, 并通过车-地无线通信网络发送至轨旁 ATP (列车自动防护) 设备; 轨旁 ATP 设备基于故障列车报告的位置信息完成对降级运行列车的位置检测, 并结合线路情况控制降级运行列车前方防护信号开放, 安全引导降级运行列车快速地下线退出运营, 同时为后续正常列车发送计算移动授权, 以保证相邻列车间的安全运行间隔。[结果及结论] 基于信标的降级运行列车定位方案, 不需增设轨旁设备, 能使降级运行列车与正常列车防护间隔较近, 对后续列车正常运行的影响小, 故障情况下的运营组织效率高。相关工程应用及现场测试验证了该方案的可行性。

**关键词** 城市轨道交通; 列车定位; 列车自动防护; 信标定位设备

**中图分类号** U284.48

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.11.011

## Degraded Operation Train Positioning and Protection Scheme Based on Beacons

GU Jiaquan

(Telecom & Signal Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] When the on-board signaling equipment fails, relying on trackside secondary positioning equipment for degraded operational train positioning and protection requires additional trackside signaling equipment, incurring high costs. Therefore, it is necessary to develop a beacon-based degraded operation train positioning and protection scheme without adding trackside equipment. [Method] The basic principle and equipment composition of the scheme are introduced, detailing the principles of train positioning and protection. During degraded operation, the on-board beacon-based secondary positioning equipment can read beacon information and transmit it to the trackside ATP (automatic train protec-

tion) equipment via a vehicle-wayside wireless communication network. The trackside ATP equipment detects the position of the degraded operational train based on the reported location information from faulty train and controls the opening of protection signal ahead of the degraded train according to line conditions. This safely guides the degraded train to quickly exit operation while ensuring that normal trains receive movement authorization to maintain safe operation intervals between adjacent trains. [Result & Conclusion] The beacon-based degraded operation train positioning scheme does not require additional trackside equipment, allowing the degraded train to maintain a close protective interval with normal trains, minimizing the impact on the normal operation of subsequent trains, and ensuring high operation organizational efficiency during faults. The feasibility of this scheme is verified by relevant engineering applications and field tests.

**Key words** urban rail transit; train positioning equipment; automatic train protection; beacon positioning equipment

目前, CBTC (基于通信的列车控制) 系统已具有较高水平的稳定性与可靠性, 故部分采用 CBTC 制式的新建线路已不再保留点式后备模式, 也不再设置有源信标及轨旁电子单元等点式设备, 仅保留计轴器及轨道电路等轨旁次级定位设备 (以下简称“轨旁定位设备”), 由于轨旁定位设备不仅数量多、设置分散, 还与钢轨等非信号专业设备深度耦合, 信号系统的现场维护工作量仍然较大, 与其他专业的施工配合任务也较为繁重。

轨旁定位设备通过测量轨道区段受电位置电压或计算轨道区段车轴数量来判断轨道区段占用出清状态, 进而检测降级运行列车位置。在某些场景下, 轨旁定位设备一旦发生故障, 就会根据故障-安全原则将实际空闲的轨道区段判断为占用状态, 进而导致列车无法在 CBTC 模式下正常运行, 影响正常行车秩序<sup>[1]</sup>。

对此, 本文提出一种基于信标的降级运行列车定位及防护方案 (以下简称“信标定位方案”), 在电

客列车或未装备车载信号设备的工程车辆上安装基于信标的次级定位设备(以下简称“信标定位设备”),不再设置轨旁定位设备,也不再新增其他轨旁设备,仅充分利用 CBTC 系统中已安装的轨旁信标来完成降级运行列车的定位,以期在确保安全的前提下,使降级运行列车快速下线、退出运营,并有效精简计轴设备或轨道电路等轨旁列车位置检测设备,顺应轨旁设备减量化发展的趋势<sup>[2]</sup>。

## 1 信标定位方案的工作原理和设备组成

信标定位方案的工作流程为:首先,由车载的信标定位设备读取轨旁信标的 ID(身份识别号),并发送至轨旁 ATP(列车自动防护)设备<sup>[3]</sup>;然后,由轨旁 ATP 设备完成对降级运行列车的位置检测,并以降级运行列车位置信息为基础实现对降级运行列车的基本防护。

电客列车信标定位方案的设备结构示意图如图 1 所示。其中信标定位设备主要由信标天线及信标译码器组成。

对于头尾两端分别设有车载信号设备的电客列车,信标定位设备可安装在列车中部,由交换机接入车载通信网络,并通过车载电台与轨旁 ATP 设备进行通信。为简化设计、降低使用成本,不再设置速度传感器或控制处理单元等设备。

信标定位设备的工作状态不受车载信号设备影响。只要信标定位设备正常工作,列车经过信标时,就会将信标 ID 信息发送至轨旁 ATP 设备。信标定位设备也不会进一步处理所读取的信标 ID 信息。轨旁 ATP 设备综合处理信标定位设备发送的信标 ID 信息及车载信号设备发送的列车位置信息后,完成列车定位<sup>[4]</sup>。由信标定位设备传送的信息属于安全信息,其应用的信息系统安全保护等级与主用车载信号设备的安全保护等级应保持一致。

如果列车车载设备完好,则即使信标定位设备发生故障也不会对列车运行造成任何影响。如果车-地通信完全失效,或车载信号设备和信标定位设备同时发生叠加故障,则轨旁 ATP 设备将无法获得任何降级运行列车的定位信息。此时,需要运营人员确认故障列车位置后,人工进行列车定位,再遵循故障后的运营规则组织行车。

对于未装备车载信号设备的工程车辆,需要增设车载电台,以实现信标定位设备与轨旁 ATP 设备的通信,信标定位设备可根据工程车实际空间布局

确定安装位置。

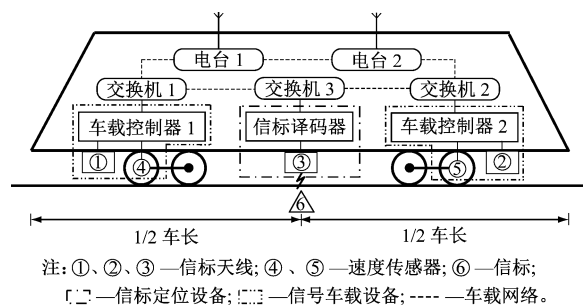


图 1 电客列车信标定位方案的设备结构示意图

Fig. 1 Equipment system structure diagram of beacon positioning scheme for electric passenger train

## 2 基于信标的降级运行列车定位原则

对车载信号设备工作正常的列车(以下简称“正常列车”),轨旁 ATP 设备将同时收到车载信号设备发送的列车位置信息(位置信息)及信标定位设备发送的信标 ID 信息(以下简称“ID 信息”)。由于只有高精度的位置信息才能满足 CBTC 模式的列车定位要求,故轨旁 ATP 设备只要能收到有效的位置信息,就以此为依据计算列车位置包络(以下简称“包络”),并不对 ID 信息做逻辑处理<sup>[5]</sup>。正常列车的包络如图 2 所示。列车根据行车计划向 X2 信号灯运行,其车载信号设备和信标定位设备均正常工作;轨旁 ATP 设备根据收到的列车位置信息计算包络,并根据前方线路资源分配情况向列车发送移动授权;列车根据收到的移动授权向 X2 运行。

当 2 部车载信号设备均发生故障后,列车根据故障-安全原则紧急制动停车,轨旁 ATP 设备无法再收到车载信号设备报告的列车位置信息,此时的包络示意图如图 3 所示。轨旁 ATP 设备一旦判断车载设备发生故障,就会立即根据列车故障前最后报告的位置信息来判断包络。此后,降级运行列车根据行车调度指示及信号机显示向前移动。列车位置发生变化后,轨旁 ATP 设备通过降级运行列车信标定位设备发来的 ID 信息进行列车定位。

列车运行时,每读到一个信标就会向轨旁 ATP 设备发送 ID 信息。当轨旁 ATP 设备收到列车信标定位设备发送的 ID 信息时,需要重新计算包络。列车经过信标后重新计算包络示意图如图 4 所示。重新计算包络时,列车车头及车尾的理论位置为信标安装位置相应向前或向后移动半个车长的距离;考虑通信延迟因素,轨旁 ATP 设备计算的包络还须

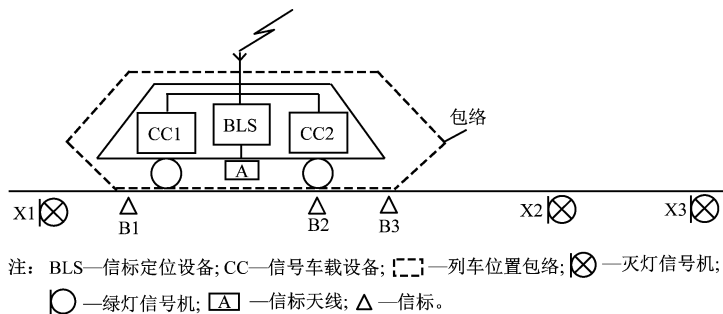


图2 正常列车的包络示意图

Fig. 2 Envelope diagram of normal train

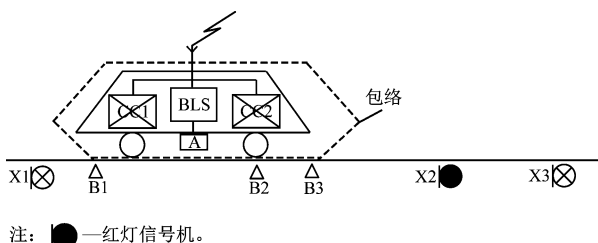


图3 车载信号设备均发生故障时的包络示意图

Fig. 3 Envelope diagram of during on-board signaling equipment complete failure

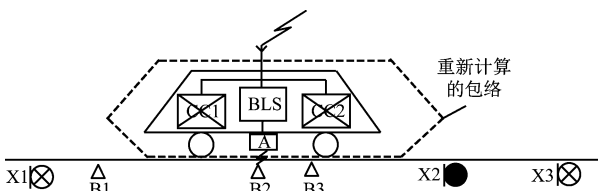


图4 列车经过信标后重新计算包络示意图

Fig. 4 Diagram of recalculated train envelope after passing through beacon

有一定的安全裕量。

列车在两信标间运行时的包络示意图如图5所示。当列车在信标B2与B3之间运行时,列车未收到新的ID信息,则轨旁ATP设备判断包络维持不变。

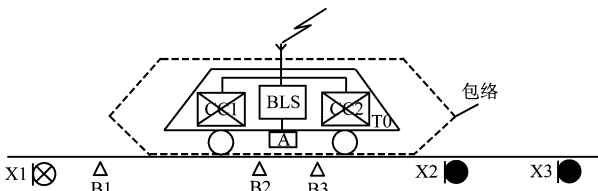


图5 列车在两信标间运行时的包络示意图

Fig. 5 Envelope diagram of during train operating between two beacons

列车漏读信标时的包络示意图如图6所示。如果列车在运行过程中发生漏读信标或信标译码失

败等情况,则轨旁ATP设备无法收到新的ID信息,列车包络尾部位置也无法及时向前收缩,只能仍维持不变。此时,先前已被锁闭的线路资源无法自动释放,未被前车释放的资源无法分配给后车,相关防护信号不会开放,由此可见列车漏读信标不会产生安全风险。

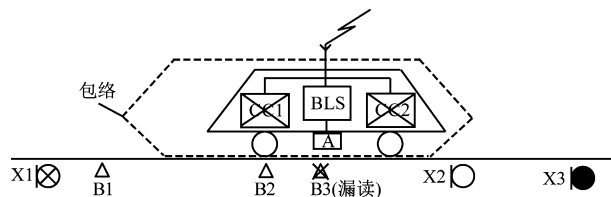


图6 列车漏读信标时的包络示意图

Fig. 6 Diagram of train envelope when beacon is missed

车载信号设备恢复正常并初始化定位后,若轨旁ATP设备能重新收到有效的ID信息,则轨旁ATP设备会重新使用位置信息来计算包络。

### 3 列车防护原则

由于不再设置轨旁定位设备,轨旁ATP设备无法再依靠采集轨道区段的占用/空闲状态,通过进路控制的方式来实现对降级运行列车的防护。在本方案中,通过正常列车的位置信息和降级运行列车的ID信息,轨旁ATP设备定位其管辖范围内的所有列车,计算各车的包络,根据规则来分配线路资源,结合道岔、紧急停车按钮及站台门等状态为正常列车计算移动授权,通过控制轨旁信号显示来指示降级运行列车运行,从而实现对降级运行列车和正常列车的信号防护<sup>[6]</sup>。基于信标定位的列车防护功能控制逻辑与功能分配如图7所示。

对于正常列车,其前方的轨旁信号机保持灭灯状态,由车载信号设备根据收到的移动授权控制列车运行。对于降级运行列车,轨旁ATP设备会点亮其前方的轨旁信号机,并根据运行计划、安全限制



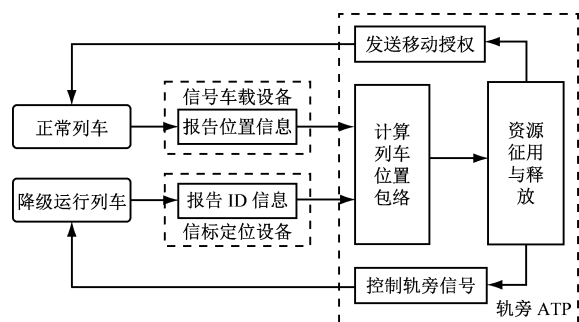


图 7 基于信标定位的列车防护控制逻辑及功能分配

Fig. 7 Train protection control logic and function allocation based on beacon positioning

条件及资源分配情况控制前方信号机显示。与车载信号设备不同,信标定位设备不具备控车能力。故降级运行列车须由司机根据信号机指示人工驾驶列车运行,其后续正常列车仍由车载信号设备控制运行。

不满足防护信号机开放条件时的信号机红灯状态如图 8 所示。T1 车为正常列车,接收到的移动授权 LMA1 运行,其前方信号机 X5 为灭灯状态;T2 车为降级运行列车,其前方的信号机 X4 为红灯状态;当 ATS(列车自动监控)子系统向轨旁 ATP 设备下发 T2 车从 X4 至 X5 的运行计划后,由于 X4 防护内方存在 T1 车,故 X4 仍为红灯状态。

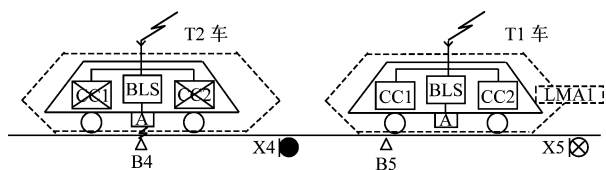


图 8 不满足防护信号机开放条件时的信号机红灯状态

Fig. 8 Signal machine red light state before meeting protective signal machine opening conditions

当 T2 车出清 X4 至 X5 区域后,防护信号机开放条件均得以满足,信号灯显示为绿灯状态。此时的信号灯状态如图 9 所示。因 X5 前方接近 T2 车,故原本灭灯的 X5 点亮红灯,轨旁 ATP 设备根据 T2 车定位及其行车计划,检查 X4 至 X5 区域的线路资源是否可以分配,是否存在其他列车包络,以及是否存在紧急关闭激活或站台门打开等其他限制条件。当满足所有防护信号机开放的条件后,轨旁 ATP 设备会把 X4 至 X5 区域的线路资源分配给 T2 车,使 X4 显示绿灯状态,允许 T2 车通过。

信号系统通过信号灯的不同显示来保证降级运行列车以安全间隔进入存车线或回库,降低了人

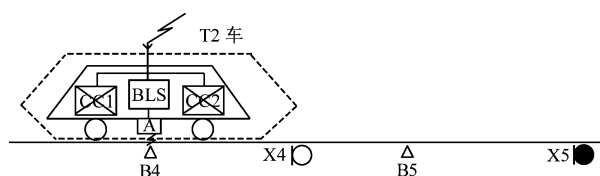


图 9 满足防护信号机开放条件后的信号灯绿灯状态

Fig. 9 Signal machine green light state after meeting protective signal machine opening conditions

工组织行车产生的安全风险,减小了故障对运营秩序的影响。这与设置轨旁定位设备方案下降级运行列车的防护原理基本一致。

基于信标定位方案的后续正常列车防护原理如图 10 所示。当 T2 车经过 B5 时,轨旁 ATP 设备计算得到 T2 车包络尾部位置已出清 X4,故 X4 重新转为灭灯状态,并同步释放 B4 至 B5 区域的轨道资源供其他列车使用,此时的 T3 车(正常列车)移动授权范围 LMA3 最远可至 T2 车包络尾部位置。而当采用轨旁定位设备方案时,T3 车的移动授权范围最远仅能达到 T2 车占用的轨道区段边界处(为保证安全,可能还会间隔一个空闲的轨道区段)。由此可见,采用基于信标的降级运行列车定位方案时,降级运行列车与正常列车防护间隔相对更近,对后续列车正常运行的影响更小,故障情况下的运营组织效率更高。

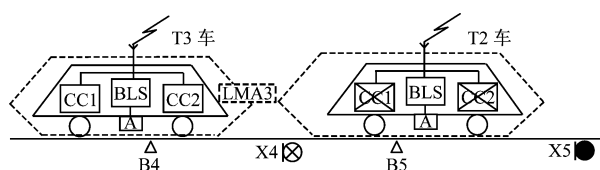


图 10 基于信标定位方案的后续正常列车防护原理

Fig. 10 Principle of subsequent normal train protection based on beacon positioning scheme

## 4 结语

目前,信标定位方案已应用在上海轨道交通 3、4 号线信号系统更新改造工程现场,并在先期实施改造的样板段完成了基础功能验证,初步证明了方案的工程可行性。

通过总结前期系统设计和现场实施验证的相关经验,信标定位设备在实际应用时还需注意以下两点问题:

1) 由于信标定位设备须通过车-地无线通信网络向轨旁 ATP 设备传送 ID 信息,一旦车-地通信完全丧失,则车载信号设备与信标定位设备将同时无

法工作。在这种情况下,故障列车原先锁闭的资源也无法通过信号系统自动释放,所有资源的锁闭和释放只能依靠人工确认,行车组织也将直接降级为人工调度模式,进而对日常运营造成巨大影响。故在信号系统需要通过 WLAN(无线局域网)+LTE(长期演进)双制式通信及双网冗余设计等有效技术手段,来确保车-地无线通信可靠与稳定<sup>[7]</sup>。

2) 轨旁 ATP 设备根据所收 ID 信息来计算降级运行列车包络的尾部位置,进而释放线路资源。因此,折返线、存车线及站台等处的信标应合理布置,不仅要满足 CBTC 模式下列车的定位需求,还要确保列车停稳前最后报告的 ID 信息足以让轨旁 ATP 设备判断列车尾部已出清岔区,并及时释放道岔资源。若信标布置不合理,则列车可能实际已出清岔区,但轨旁 ATP 设备却根据收到的 ID 信息判断列车包络尾部位置仍位于岔区,从而造成道岔被长时间锁死,影响运营效率。

## 参考文献

- [1] 马伟杰, 邢艳阳. 城市轨道交通信号系统次级列车检测方法优化方案[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 177.  
MA Weijie, XING Yanyang. Optimization solution of secondary train detection method in urban rail transit signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 177.
- [2] 李永康. 简化 CBTC 系统次级列车检测设备和信号机的可行性[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(增刊1): 52.  
LI Yongkang. Feasibility of simplifying auxiliary train detection equipment and signals for CBTC system[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(S1): 52.
- [3] 严冬, 田卫刚. 列车定位后备系统模型研究[J]. 铁路技术创新, 2017(5): 61.  
YAN Dong, TIAN Weigang. Research on the model of train positioning reserve system[J]. Railway Technical Innovation, 2017(5): 61.
- [4] 李宇辉, 邓建芳, 钱世嘉. 地铁应急处置后备定位系统的研究及开发[J]. 现代城市轨道交通, 2022(6): 26.  
LI Yuhui, DENG Jianfang, QIAN Shijia. Research and development of backup location system for emergency response to metro interlocking failure[J]. Modern Urban Transit, 2022(6): 26.
- [5] 王磊. 不同次级列车定位方案在 TACS 系统中的适用分析[J]. 中国高新科技, 2023(8): 28.  
WANG Lei. Analysis for applicability of different secondary train positioning solution in TACS system[J]. China High-Tech, 2023(8): 28.
- [6] 吴杰. 城市轨道交通信号系统次级列车定位技术发展研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 37.  
WU Jie. Research on urban rail transit signaling system secondary train positioning technology development[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): 37.
- [7] 柴娟, 吴敏. 基于信标的列车次级定位系统应用研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 112.  
CHAI Juan, WU Min. Application of beacon-based train secondary positioning system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(11): 112.
- 收稿日期:2024-03-18 修回日期:2024-05-31 出版日期:2024-11-10  
Received:2024-03-18 Revised:2024-05-31 Published:2024-11-10  
· 通信作者:顾家泉,工程师,1580324015@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
- ~~~~~
- (上接第 47 页)
- [3] 李传建. 城市轨道交通信号智能运维系统的设计与应用[J]. 设备管理与维修, 2023(8): 10.  
LI Chuanjian. Design and application of intelligent operation and maintenance of urban rail transit signal system[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(8): 10.
- [4] 雷晶晶, 李秋红, 陈立宝, 等. 动力锂离子电池管理系统的研究进展[J]. 电源技术, 2010, 34(11): 1192.  
LEI Jingjing, LI QiuHong, CHEN Libao, et al. Review on power Li-ion battery management system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2010, 34(11): 1192.
- [5] 周伟光. 基于 STM32 的工业锂电池前端集中监控管理系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
ZHOU Weiguang. A STM32-based centralized front-end industrial lithium-ion battery monitoring and management system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [6] 马龙. 城市轨道交通信号系统智能维护监测平台研究与应用[J]. 铁道通信信号, 2021, 57(11): 73.  
MA Long. Study and application of intelligent maintenance support platform for signal system in urban rail transit[J]. Railway Signaling & Communication, 2021, 57(11): 73.
- [7] 邓志翔. 城市轨道交通信号电源系统配置方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(6): 66.  
DENG Zhixiang. Signal power configuration proposal on urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(6): 66.
- 收稿日期:2024-04-24 修回日期:2024-07-05 出版日期:2024-11-10  
Received:2024-04-24 Revised:2024-07-05 Published:2024-11-10  
· 通信作者:顾臻浩,工程师,284212209@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license