

基于信标的列车次级定位系统应用研究*

柴娟 吴敏

(上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海//高级工程师)

摘要 分析了传统 CBTC(基于通信的列车控制)系统下计轴及其子系统在使用过程中所出现的问题,提出了基于信标的列车次级定位系统应用技术。该技术采用既有 ATP(列车自动防护)系统的地面应答器,通过车地系统结合的方式,为 CBTC 系统提供了一种新的列车次级定位检测方案。该技术与计轴系统具有相同的安全等级。基于上海城市轨道交通超大网络的运营管理需求,进一步对基于信标的列车次级定位系统的架构及应用场景进行研究。应用效果表明,基于信标的列车次级定位系统能实现正线信号控制区域的无计轴化,具有简化系统结构、便于安装、抗干扰能力强,以及可减少设备维护工作量、降低维护综合运营成本等优点,是未来新线线路建设和既有线路改造的首选。

关键词 城市轨道交通;列车次级定位系统;计轴区段;信标;信号改造

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.11.026

Application of Beacon-based Train Secondary Positioning System

CHAI Juan, WU Min

Abstract The problems caused by axle counting and its sub-system of conventional CBTC (communication-based train control) system during operation are analyzed, and a beacon-based train secondary positioning system application technology is proposed. The technology adopts balise from existing ATP (automatic train protection) system, through vehicle-wayside system merge, a new train secondary positioning detection scheme is proposed for CBTC system. This technology has same safety level as axle counting system. With the operation and management requirement of Shanghai urban rail transit super-large-scale network, the beacon-based train secondary positioning system architecture and application scenario are further studied. Application results show that beacon-based train secondary positioning system can realize non-axle-counting in main line signal control area, having advantages of simplified system structure, easy installation, high anti-interference ability,

so that equipment maintenance workload is reduced, as well as maintenance cost of overall operation, becoming the primary choice for future new line construction and existing line reconstruction.

Key words urban rail transit; train secondary positioning system; axle counting section; beacon; signaling transformation

Author's address Telecom & Signaling Branch, Shanghai Metro Maintenance Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China

CBTC(基于通信的列车控制)系统主要通过列车主动发送定位报告获取列车位置信息,并借助计轴区段进行安全防护计算,以确保列车安全的运行。现有 CBTC 系统通过联锁子系统提供的计轴区段占用状态和车载系统提供的列车位置报告综合判定得到 ZC(区域控制器)的逻辑区段占用状态。计轴系统在实际应用过程中存在着发生故障后影响正常行车秩序、维护替换比较困难等问题。为解决计轴系统的上述问题,本文提出了一种采用既有 ATP(列车自动防护)系统的地面应答器,采用车地系统结合的方式,为 CBTC 系统提供了与计轴系统相同安全等级的列车次级位置通用检测方案。基于此方案,对未来 CBTC 列车次级定位系统的架构、应用场景进行分析和研究。

1 计轴设备使用现状

在 CBTC 系统运行日趋稳定的情况下,计轴设备故障影响运营的事件呈上升趋势,已成为目前上海城市轨道交通超大网络规模下高密度运营模式的痛点之一。因此,解决以计轴设备辅助定位的 CBTC 中计轴系统与 ZC 系统相互依赖性紧密、耦合度高的问题变得迫切。

1.1 现场环境关联性强

计轴辅助定位根据其交变磁场的变化频率和变化的时间顺序来判断通过的列车轴数,其工作原

*上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1205802)

理导致计轴设备易受干扰,如电磁干扰、工程车干扰和检修梯车夜间施工干扰等。若计轴受扰,需采用列车或人工模拟车辆进行清扫。计轴设备的感应设备安装在轨道上,与铁轨高度关联,更换铁轨时需要对其进行拆卸、再安装和调试等工作,从而增加了维护工作量。

1.2 计轴设备故障现状

计轴故障在运营中时有发生,导致计轴的虚假占用。计轴故障的原因主要包括^[1]:① 计轴设备停机;② 计轴设备板卡电源故障;③ 监测点磁头与计轴设备发生通信故障;④ 计轴区段空闲,且受到监测点的错误警告;⑤ 计轴区段的轮轴计数值为负值;⑥ 计轴设备监测点的 2 个 CPU(中央处理器)信息不一致;⑦ 检测到计轴区段内“剩余”轴数小于 1 个门限值,即被认定少于 1 个列车的轮轴数。

现有 CBTC 系统一般采取基于通信列车追踪的技术来规避对列车运行的影响。在此过程中,轨旁 ATP 还需向联锁同步计轴区段占用的判断信息,使得联锁也能够完成进路的正常排列和解锁。

日常运营过程中经常会出现 CBTC 主定位系统失效的列车(即非通信列车)经过 1 个故障占用区段的情况,此时 CBTC 系统无法对列车的长度进行判断。而根据信号系统故障安全导向的原则,CBTC 系统需假设故障占用区段有列车遗留而判定为实际占用,这将导致后续列车的移动授权或进路都无法通过该故障区段。若计轴设备故障发生在早晚高峰时段,或发生在道岔区段、折返站、出入段线等关键线路区域,都将造成较大的运营影响。

2 基于信标的次级定位系统

在现有 CBTC 系统中,列车的次级定位是指对非通信列车或未安装 CBTC 车载设备的列车进行定位的手段。在城市轨道交通正线区段,列车的次级定位技术一般以计轴系统为主,而在部分车辆段区段内,列车的次级定位则采用轨道电路系统。

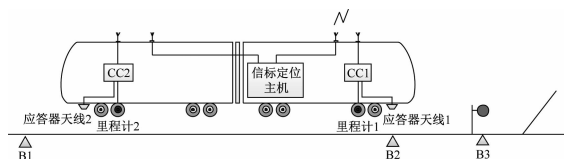
基于信标的次级定位系统是一套独立于车载系统的定位处理系统。信标次级定位设备安装在列车上,与信标天线连接,用于读取轨道上的信标位置信息(主要包括列车号、信标号及线路号等),并通过车地无线链路上传至地面。轨旁服务器负责接收、存储、转换车载发送列车定位信息,列车位置通过人机界面进行输出显示,无线传输可使用信号系统独立的以太网网络,也可在确保信息安全的前

提下使用公网。基于信标的列车次级定位系统的安全等级为 SIL4(安全完整性等级 4),可实现故障列车与正常列车的混跑。

基于信标的列车次级定位是通过无线网络进行信息传输,必须保证无线通道的高可靠性。目前上海城市轨道交通既有线路改造和新线建设中,信号系统的无线通信网络均采用双制式四网络的标准。在 CBTC 车载双系统的精确计算,以及在稳定可靠的 LTE-M(城市轨道交通用长期演进)和 Wi-Fi(无线保真)双制式网络车地无线通信技术保障下,唯一需要考虑的是 CBTC 系统故障列车以及工程车的定位问题。

2.1 系统架构

基于信标的列车次级定位系统架构如图 1 所示,在列车上安装 1 套内部冗余的次级信标定位主机。列车次级信标定位系统独立于车载控制器。当车载控制器发生故障时,次级信标定位仍能正常工作。根据无线通信可用性情况,列车次级信标定位的无线通信通道也可独立布置。在计轴的布置上,正线无岔线路按照相邻 2 个计轴点距离不大于 1.2 km 予以布置,以满足信号系统后备模式下列车追踪间隔性能要求。在信标的布置上,为了满足车站上下行方向精确停车的要求,正线上信标的布置数量较多。在车站外的非停车轨区段,信标按 300 m/个进行布置,完全能满足列车在正线的定位精度要求。



注:CC1——车载系统 1;CC2——车载系统 2。B1、B2、B3——轨旁信标的编号。

图 1 基于信标的列车次级定位系统架构图

Fig. 1 Architecture diagram of beacon-based train secondary positioning system

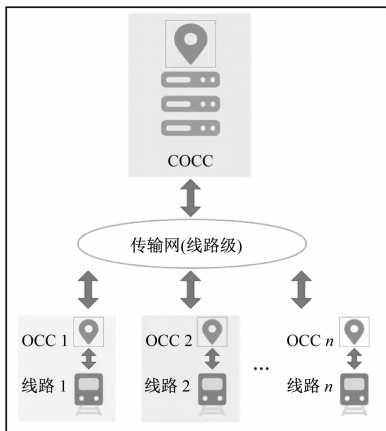
2.2 线路级信标次级定位系统

列车将位置信息主动上报到信号系统轨旁设备,列车次级定位信息可在 ATS(列车自动监控)系统予以显示。ATS 系统将对列车次级定位的信息和车载主定位信息进行区分,信号系统会对其信息优先级进行设置。基于信标的列车次级定位显示方式,也可独立设置显示终端,界面与 ATS 界面保持一致性。当 ATS 故障情况下,用以显示本线路列

车的当前位置。列车次级信标定位系统实时上传列车的车体号和信标的 ID(标识),本地服务器汇聚列车上传的信息,计算出列车所在的区域。

2.3 网络级基于信标的列车次级定位系统

对线路级列车位置进行信息汇聚和处理,可实现在线路级的终端显示全线网列车当前所在的区域,如图 2 所示。网络级基于信标的列车次级定位系统可为跨线路运行的列车提供更可靠、更灵活的运营管理方式。



注:OCC——运营控制中心;COCC——网络运营协调中心。

图 2 网络级基于信标的列车次级定位系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of network-level beacon-based train secondary positioning system

3 网络级基于信标的列车次级定位系统的规划

上海城市轨道交通部分线路的信号系统达到或者超过使用年限。基于这些线路的信号系统改造项目,逐步建立全网络的基于信标的列车次级定位系统,需从以下方面着手规划。

3.1 专用的无线通道

随着无线技术的飞速发展,结合上海城市轨道交通信号车地无线通信网络的建设现状,车地无线网络按照 LTE-M 和 Wi-Fi 的双制式网络进行建设。基于信标的列车次级定位系统的车地无线通信方式与信号系统车地通信方式保持一致,均采用 LTE 通信,轨旁分别设置 LTE 网的 AP(接入点)、Wi-Fi 的 AP、PRP(并行冗余协议)通信协议;车载分别设置 TAU(车载接入单元)、OBM(车载调制解调器)、PRP 通信协议。

3.2 各城市轨道交通线路可建立独立的传输网

各城市轨道交通线路可基于供应商提供的信号系统架构的特性,独立建设该线路的定位系统有

线环网,安全地将列车位置信息传输至列车控制系统,对列车进行实时追踪。

3.3 线网内统一信标 ID、通信地址规划

为了实现全线网信号车地通信无线网络的接入,需对全线网次级信标定位设备的 ID 和通信网络通信 IP(互联网协议)地址进行统一分配,以确保全网轨旁信标设备的编码唯一性。对于信标设备的 ID,应基于不同线路的信标数量进行统一规划;对于车载定位系统,应根据各线路划分为不同网段,统一对其 IP 进行规划。

3.4 统一接口通信协议

为了实现跨线运行电客列车的定位,需对进入上海城市轨道交通信号系统中的车地通信协议进行统一规划:在信标-信标天线方面,应明确所采用的信标报文及编码协议;在信标天线-车载定位系统方面,应明确所采用的通信协议;在车地传输方面,应统一协议和应用层的数据结构。

4 基于信标的列车次级定位系统应用场景分析

4.1 列车定位管理

基于信标的列车次级定位系统对正线上、车辆段/停车场内的列车运行进行定位追踪,通过独立的人机界面进行显示。遵守统一接口通信协议的跨线运行列车,其列车定位功能可实现无缝衔接,并在线路侧或网络中心侧的人机界面上显示。

4.2 列车转线作业

目前城市轨道交通线路间的联络线通过照查检查方式实现线路间的联锁功能。联络线边界区段有采用如轨道电路、计轴、虚拟站台等方式来实现互锁互防。而在联络线的人机界面上,其显示范围存在局限性,且易造成联络线上的设备故障,进而影响正线运营。例如,2017 年上海轨道交通 2 号线和 17 号线间联络线上的道岔 SW06F 失表(如图 3 所示),2 号线 X10L 信号机无法开放,导致 2 号线虹桥火车站下行列车无速度码,造成 10 min 的运营晚点。

在基于统一轨旁应答器编码规则和无线通信协议的基础上,基于信标的列车次级定位系统可实现线网内所有线路的列车定位。列车在转线作业中,调度人员可根据列车的精确位置,将联络线区域的设备锁闭在相应的位置上,并对司机进行动车授权。司机根据调度员指令,采用人工驾驶模式将列车运行到指定目的地。

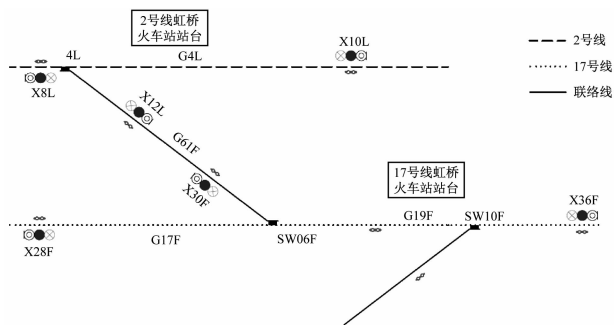


图 3 上海轨道交通 2 号线、17 号线间联络线示意图

Fig. 3 Sketch of link line between Shanghai rail transit line 2 and line 17

基于信标的列车次级定位系统可实现对列车位置的实时跟踪,以保证其他通信列车及故障列车的安全,同时向轨旁 ATP 系统提供降级列车位置信息。联络线基于信标的列车次级定位的处理方式,不再是照查电路的互锁互控,而是根据联锁线具体长度、站型等因素,通过在联络线上加装其他辅助检测设备,对进入线路的列车进行识别和资源管理,从而有效地解决了联络线上设备故障对正线运营造成影响的问题。

4.3 列车控制系统的降级管理模式

当 2 套 CC(车载控制器)均发生故障时,列车需要采用降级模式运行,信号轨旁 ATP 系统将故障列车最后 1 次向 VOBC(车载控制器)汇报的位置作为起点,进行列车跟踪,判断列车行驶过的地面信标的连续性,以安全的方式更新故障列车的位置信息。

基于信标的列车次级定位系统通过线路上的应答器来获取列车位置信息,并将列车位置信息发送轨旁 ATP。调度人员也可通过 ATS 向故障列车发送运行任务,信号系统会对该列车分配资源,司机按照车辆模式根据信号灯显示驾驶列车。CBTC 系统将根据故障列车的位置,建立该故障列车的包络线,以确保故障列车和正常列车的安全混跑运营,直至故障列车就近下线。

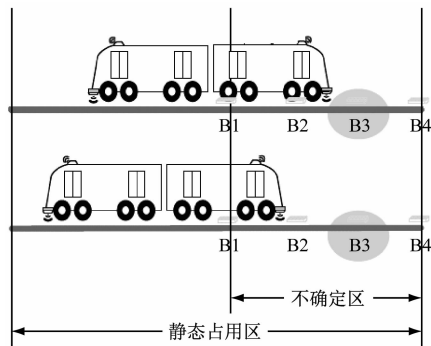
在极端情况下,列车的次级信标定位和车载信号均发生故障,此时信号系统会根据列车位置资源的管理,其地面系统生成的占用状态不再自动删除,且进路占用直接延伸至进路末端。地面系统依据多列车通过后汇报应答器报文的状态来对故障应答器进行登记,并通过增加占用延伸区域的方式进行强化防护。

4.4 次级定位故障处置

计轴设备存在故障后若没有及时恢复,将造成

列车位置无法检测。若故障位置发生在出入场线入口或者联络线交界处,会造成 CBTC 系统无法正常使用。而基于信标的列车次级定位系统独立于 CBTC 系统,采用无线冗余、电源独立、环网独立的方式,其故障不会影响到 CBTC 系统的正常使用。

次级定位故障影响的范围较小。若单个应答器发生故障,基于信标的列车次级定位系统将根据列车的位置包络具备连续性的特征,扩大列车的占用区段,等到列车行驶至下 1 个应答器后即可重新精确定位。信标天线经过 2 个应答器后,能够确定列车所在的位置区域,可容忍不连续的应答器故障,其原理如图 4 所示。图 4 中,假设单个信标 B3 故障,则不确定区指的是列车位置不确定的范围,即位置由 B1 延伸至 B4 信标处;静态占用区是指列车长度加上不确定区的长度。基于信标的列车次级定位系统采用静态占用区长度作为列车实际占用位置区段。



注: B1、B2、B3、B4 分别为轨旁信标的编号。

图 4 基于信标的列车次级定位系统列车包络线的计算原理示意图

Fig. 4 Diagram of calculation principle of beacon-based train secondary positioning system envelope line

4.5 应用效果分析

基于信标的列车次级定位系统目前在上海的轨道交通 3 号线、4 号线大修上予以应用,凸显出其在稳定性、维护性等方面的优势:① 基于信标的列车次级定位系统不受轨道环境的影响,采用了标准化的欧标应答器,有着成熟、可靠的技术和多年的应用经验;② 可实时监控信标的工作状态,通过增加性能分析等手段对设备的异常状态进行预判;③ 基于信标的列车次级定位系统采用无电子地图的系统,线路升级无需更新其软件;④ 采用了统一协议接口,可实现免维护的跨线互联互通的列车定位。

(下转第 119 页)