

城市轨道交通信号系统次级列车定位 技术发展研究^{*}

吴 杰

(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 目前的城市轨道交通信号系统广泛采用基于计轴的次级列车定位子系统。在实际的运营应用中,计轴系统一旦发生故障,在有些情况下将对正常运营产生较大的影响。同时,计轴系统维护工作量大,易受电磁环境干扰,更换工艺繁琐。尤其是随着系统投用时间的增加,计轴故障的问题越发凸显,在既有线路的信号改造项目中亟待解决。为解决计轴系统带来的问题,提出了新的列车主动定位技术。该技术基于地面应答器,采用车地系统结合的办法,为无计轴 CBTC(基于通信的列车控制)系统提供了与计轴系统相同安全等级的列车次级定位通用检测方案。将该新技术与计轴系统进行了性能比较,认为该技术在新线线路建设和既有线路改造项目中具有良好的应用前景。

关键词 城市轨道交通; 信号系统; 次级列车定位; 计轴区段; 信号改造

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.11.009

Research on Urban Rail Transit Signaling System Secondary Train Positioning Technology Development

WU Jie

Abstract Current rail transit signaling system widely adopts secondary train positioning subsystem based on axle counting. In practical operation application, once axle counter system faults occur, major impacts might be caused to normal operation under certain circumstances. Meanwhile, axle counter system maintenance demands large workload, being easily interfered by electromagnetic environment, and has complicated replacement process. Especially with the increasing service time after system launch, axle counter system faults grow more evident, seeking for urgent treatment in existing line signaling reconstruction projects. In order to solve this problem, a new train active positioning technology is proposed. The technology is based on the ground balise, together with on-board and way-

side systems, a train secondary positioning general detection scheme which is at the same safety level as the axle counter system is provided for no-axle-counter CBTC system. By comparing performance of new technology and that of axle counter system, it is believed that the technology has promising future in application in new line construction and existing line reformation.

Key words urban rail transit; signaling system; secondary train positioning; axle counter block; signaling reconstruction

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

计轴子系统是城市轨道交通 CBTC(基于通信的列车控制)系统的标准组成子系统之一,是列车次级定位的核心功能系统。计轴子系统对于传统 CBTC 系统中的道岔区域防护功能有重要影响,同时与计算机联锁功能有直接关联,是联锁进路定义、排列、授权及解锁的关键要素。

由于计轴子系统的安装、维护工作量大,无计轴的 CBTC 系统对于城市轨道交通既有线路的信号系统改造具有很大的吸引力。基于列车头尾位置的精确计算以及稳定可靠的车地无线通信技术保障,加上高冗余性的信号系统配置,无计轴 CBTC 系统的进路联锁功能、道岔区域防护功能不再依赖于计轴区段,唯一需要考虑的是 CBTC 系统故障列车及工程列车的次级定位问题。本文从分析计轴在传统 CBTC 系统中的作用以及计轴子系统在使用过程中出现的问题出发,回归到列车次级定位的初始场景,提出一种新型的支持城市轨道交通线网内跨线运行的通用型列车主动定位技术。

1 计轴在 CBTC 系统中的作用

计轴的原理是采用车轮传感器(即计轴磁头)

^{*} 上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1205802)

对经过磁头的列车车轮运行方向进行判读并计数。一般由 1 对传感器组成 1 套磁头,传感器沿钢轨方向安装。磁头通过采集到的电磁感应的变化情况,对运行经过其中的一定大小的金属轮进行探测。

1.1 传统 CBTC 中计轴的安装规则

在传统 CBTC 系统中,计轴按照一定的规则在线路上安装,这些规则至少包括:

1) 道岔区域应布置计轴。在单动道岔、双动道岔和交叉渡线区道岔设置计轴,区分岔前、定位、反位位置,并考虑与警冲标的相对位置,构成道岔区段。

2) 站台两端应布置计轴,构成站台区段。在站台正常列车运行出站方向应按需要布置防护区段计轴。

3) 折返停车线应布置计轴,考虑列车长度和过冲防护距离。

4) 线路边界处应布置计轴,对正线与场段、不同线路间的联络线进行分隔。

5) 正线区间布置计轴应满足信号系统后备模式的性能需求。

6) 在联锁区边界应布置计轴。

1.2 传统 CBTC 中计轴的功能

传统 CBTC 中,计轴子系统为列车运行提供以下功能。

1.2.1 非通信列车的定位和跟踪

非通信列车包括因车载 CBTC 系统故障而导致通信丢失的列车、因失去定位或失去列车完整性而导致通信丢失的列车、从其他线路或场段边界准备进入当前线路的列车及非装备工程车等。CBTC 的地面 ATP(列车自动防护)子系统需要对这些非通信列车进行定位和跟踪。

对于刚失去通信的 CBTC 列车或者无通信列车,地面 ATP 按照其丢失通信前报告的实时位置和所占用的区段来确定列车的所在区段位置,并在列车所占用区段边界外延一定距离构成其包络,以达到阻止其它列车进入该区域的目的。一旦相邻的计轴区段状态发生变化,结合计轴区段内的道岔位置状态,则可判断列车发生了移动,从而需要重新计算列车包络位置,以实现列车的跟踪。

1.2.2 通信列车的头尾筛选

当 1 列 CBTC 列车从非通信列车转变为通信列车时,不论该列车是从线路边界进入当前线路还是故障恢复后再次建立通信,地面 ATP 子系统都需要对该列车进行长度筛选,以防止该车的头部或尾部

有非预期出现的小车而导致头尾位置发生计算错误。地面 ATP 对该列车进行筛选时,需要借助计轴的边界位置信息及相邻计轴的占用状态信息。通过该列车报告的实时位置,以及与相邻空闲计轴区段边界的相对距离,可筛选出可能隐藏的小车。

1.2.3 联锁进路防护

列车的移动授权基于进路进行计算,已被授权的进路方可作为移动授权延伸的条件。在排列进路和开放信号机前,需要检查进路中各区段的占用空闲状态。进路解锁的依据是进路中各区段按照占用、出清的顺序。此外,计轴区段还为进路提供接近锁闭和过冲防护的条件。计轴的作用贯穿进路的占用、出清等过程。

1.2.4 道岔区域防护

基于线路区段状态的道岔区域防护包括占用防护、侵限防护及特殊条件防护等。其中:占用防护用于确保已占用的道岔区段所关联的道岔禁止移动;侵限防护用于在列车经过道岔时检查进路外的侵限区段是否存在其它列车;特殊条件防护用于在通常联锁逻辑下因线路配置导致所需要额外检查的条件。

2 计轴在使用过程中出现的问题

计轴故障情况在运营中时有发生,导致计轴的虚假占用。其原因包括: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通信故障;④ 区段空闲,且受到监测点的错误警告;⑤ 计轴设备监测点的 2 个 CPU(中央处理单元)计算数值不一致;⑥ 检测到计轴区段内的“剩余”轴数小于 1 个门限值,被认定为少于 1 个列车的轮轴数。

传统 CBTC 系统无法解决非通信列车经过 1 个故障占用区段后占用遗留的问题。这种情况下,由于轨旁 ATP 无法对非通信列车进行长度判断和列车完整性判断,因此 CBTC 系统需要假设故障占用区段有列车遗留而判定区段被占用。这将导致后续所有列车的授权和进路都无法通过该故障区段。该故障对道岔区段的影响更大,将导致道岔无法移动、列车无法折返。

瞬态的计轴故障可以通过复位的方式予以恢复。CBTC 正线一般均采用计轴预复位技术,在实施了预复位指令后,需要采用开放引导信号的方式引导 1 列通信列车慢速经过故障区段并完成对区段的清扫后,该区段才能恢复正常。整个恢复过程流程复杂、时间较长,且有一定的安全风险。折返区

故障还会影响后续列车的折返作业,对运营的影响较大。而对于那些难以复位的计轴故障,还需要进行抢修,对正常运营的影响更大。

3 无计轴 CBTC 系统中应用次级列车定位的场景

在传统 CBTC 系统中,列车的次级定位是指对主定位系统失效的列车(即非通信列车)或未安装 CBTC 车载设备的列车进行系统定位的手段。城市轨道交通线路中,列车的次级定位技术一般采用计轴系统,但仍有部分车辆基地采用更为传统的轨道电路系统。

在无计轴 CBTC 系统中,列车进路不再依赖于联锁逻辑,而是基于资源管理的技术。无论是进路防护还是道岔防护都不再依赖于计轴区段,因此可从根本上避免计轴故障导致的授权阻塞、道岔无法移动、进路无法排列等问题,也减轻了维护、抢修工作的风险和负担。这一场景下,只需要解决列车的次级定位问题,即:如何在没有计轴和轨道电路的条件下对非通信列车和非装备列车进行定位和跟踪。需要解决的问题主要包括:

1) 发生车地通信设备故障。

2) 地面 ATP 设备故障。

3) 正常装备列车进入线路后,由于车载 CBTC 设备故障、空转打滑故障或列车完整性故障导致车地通信中断。

4) 本线路所属非装备列车进入线路时,非装备列车的长度不固定,且与地面 ATP 间没有建立通信。

5) 非专属本线路的列车跨线进入线路,难以固定这些列车的长度,以及如何与轨旁 ATP 通信。

在无计轴 CBTC 系统中,若发生车地通信设备故障,可通过 Wi-Fi(无线保真)、LTE(长期演进)、LTE + 5G(第 5 代移动通信技术)等方式,增强车地通信系统的可靠性和可用性;若发生地面 ATP 设备故障,则可通过增强的二乘二取三或车车通信系统架构实现 ATP 的冗余,提高地面 ATP 系统的可靠性和可用性。本文着重对上述后 3 个问题的解决措施进行论述。

4 通用型列车主动定位技术架构和原理

本文提出采用既有 ATP 信标来实现次级定位功能,即信标自主定位。在 CBTC 列车或工程车上增加一套专门设备——自主定位处理器。为实现

信标自主定位功能,可以新增 1 套 BTM(应答器传输单元)及天线,也可以与本端 VOBC(车载控制器)共享一套原 CBTC 系统中的 BTM 及其天线。自主定位设备能够通过车地无线与地面 ATP 系统进行通信,实现系统对车载故障列车或工程车的定位和跟踪。信标定位设备单独工作时的主动定位技术原理如图 1 所示。

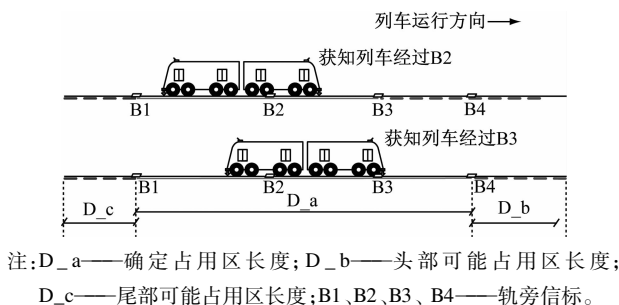


图 1 列车主动定位技术原理示意图

Fig. 1 Diagram of train active positioning technology principle

如图 1 所示,建立并跟踪列车位置的过程包含 2 个步骤:

1) 步骤一。列车在线路上运行时,列车信标自主定位持续读取地面应答器上传的报文数据。地面应答器报文中包含所管辖的地面系统通信参数信息,列车自主定位向轨旁系统持续报告列车 ID(标识)信息。

2) 步骤二。地面系统根据信标自主定位报告的信息计算以下区段的具体长度:① D_a 等于列车长度加上读取应答器方向延伸至下 1 个应答器位置区域;② D_b 等于向前延伸至下 1 个应答器位置区间长度加上读取应答器延迟反向时间内估计的运行距离;③ D_c 等于向后延伸 1 列车的长度加上读取应答器延迟反向时间内估计的运行距离;④ 列车包络长度等于 D_a 、 D_b 、 D_c 之和。

在步骤二中,若读取到的应答器为最接近道岔尖端的应答器,地面系统依据道岔位置信息创建列车位置包络。定义列车头部、尾部位位置的置信区间,该置信区间主要考虑信标自主定位对应答器的检测并向地面报告、地面系统进行包络计算等的延迟反应,以及在此延迟时间内列车安全运行所需的最小距离。

此外,为使已装备了信标自主定位设备的列车或工程车能够在不同的线路间跨线运行,线网应对地面系统应答器的 IP(互联网协议)和轨旁应答器 ID 进行统一规划,应答器的设置也应符合互联互通

规范的要求。同时,车地通信协议应采用城市轨道交通信号系统互联互通通用协议,以解决在无计轴 CBTC 线网中装备了无车载地图信标自主定位系统的列车在跨线运行时的定位问题。

5 列车主动定位子系统与计轴子系统的性能对比

相对于计轴子系统,本文提出的通用型列车主动

定位技术简化了 CBTC 系统的整体架构,与无计轴 CBTC 系统协同运行,解决了计轴设备故障对运营影响较大、维护困难的关键问题。其车地通信通道、地面系统和列车自主定位设备都建立在已有的 CBTC 系统上,采用通用型列车主动定位技术,仅需增强其软件功能,不需要额外增加硬件。因此,如表 1 所示,与计轴子系统相比,列车主动定位技术在经济性、可用性和可维护性等各方面的性能均得以提升。

表 1 列车主动定位系统与计轴系统的性能对比

Fig.2 Performance comparison between train active positioning system and axle counting system

项目	计轴子系统	列车主动定位子系统
设备安装	包含室内和室外设备。室内外设备通过电缆获取电源和进行通信,室外磁头需钢轨钻孔	仅需要进行车载安装。采用欧标应答器,标准化程度较高
设备维护	需对室内外设备进行维护。室外设备故障时,需进入轨道实施抢修	仅需增加对车载设备进行维护。地面应答器和设备维护包含在原 CBTC 系统中
运维成本	维护成本与磁头和区段的数量相关	维护成本与列车的数量相关。由于对维护、使用进行了简化,全生命周期成本更有优势
跨线互通	采用标准化设备。计轴设备检通过检测列车车轮对数来确定列车位置,互通性强	在文献 4 基础上,规划好全网轨旁信标唯一性,规范通信协议,确保跨线列车可无缝隙的运行
安全性	SIL4(安全完整性等级 4),实现故障导向安全	SIL4。需要增加一些操作限制,以实现故障导向安全
可用性	发生故障(尤其是道岔折返区域故障)对运营的影响较大,影响多列车的运行,故障恢复过程较长	故障后仅影响当前列车。设备架构简单,接口少,可对设备进行在线重启,快速恢复运营
定位精度	以计轴区段为单位定位列车。最长的计轴区段约为 1 km,在道岔区域区段的计轴长度较小	应答器安装间隔一般小于 200 m。将 2 个应答器间的线路作为 1 个区间格,6 节编组列车(长度约 140 m)的综合定位精度与计轴系统相当

6 结语

在无计轴 CBTC 系统的应用中,本文提出的新型列车主动定位技术解决了对 CBTC 车载设备故障列车和工程车的定位及跟踪问题。该技术的最大特点是轻量化,以及充分发挥 CBTC 系统的基础设备能力,在不需要太多投入的情况下对系统的功能进行正向增强。该技术在新线建设和既有线路改造项目中均具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 丁树奎,王颖,王伟,等. 互联互通 CBTC 系统中计轴故障占用判断方案研究[J]. 铁路计算机应用,2017(8):56.
DING Shukui,WANG Ying,WANG Wei, et al. ARB judgment solution in interconnection CBTC system[J]. Railway Computer Application,2017(8):56.

[2] 林锋,傅锦. CBTC 系统中计轴区段 NRB 状态故障原因分析[J]. 铁道通信信号,2019(9):94.
LIN Feng,FU Jin. Cause analysis of NRB status fault in axle count-

ing section of CBTC System[J]. Railway Signalling & Communication,2019(9):94.

[3] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通接口规范 第 1 部分 应答器报文: T/CAMET 040011. 1—2018[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018:1.
China Association of Metros. Urban rail transit—Interface specification for interoperability of communication based train control system Part 1: Balise protocol: T/CAMET 040011. 1—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018:1.

[4] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通接口规范 第 2 部分 CBTC 系统车地通信协议:T/CAMET 040011. 2—2018[S]北京:中国铁道出版社,2018:1.
China Association of Metros. Urban rail transit—Interface specification for interoperability of communication based train control system Part 2: Train-wayside communication protocol for CBTC system: T/CAMET 040011. 2—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing house, 2018:1.

(收稿日期:2020-04-27)