

CBTC 系统中计轴失效处理的研究*

吴炳昊¹ 董俊超² 邱兆阳¹ 陈仰熹¹

(1. 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司, 100070, 北京; 2. 通号城市轨道交通技术有限公司, 100070, 北京)

摘 要 [目的] CBTC 系统多采用计轴来提供列车辅助定位功能。然而, 在计轴出现故障时, 如果一律按“占用”处理, 将会显著影响系统运营效率; 而如果选择在实际无车时按“空闲”处理, 则该处理方式不应降低系统安全性。因此, 有必要研究 CBTC 系统在计轴失效时应如何处理。[方法] 基于 IEEE 1474 系列国际标准和 CZJS/T 0033—2015《城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统 (CBTC) 接口规范-互联互通接口规范 互联互通系统总体要求》, 分析了 CBTC 系统内部计轴区段的状态处理, 提出了 CBTC 系统内部计轴区段的状态机模型, 并给出了 CBTC 系统内部处理计轴故障报告占用的方法。同时, 还探讨了 CBTC 系统直接对实际空闲的计轴故障占用区段进行复位的可行性, 并对两种提高计轴系统可用性的方法进行了比较。[结果及结论] IEEE 1474 系列标准并不强制在 CBTC 系统中装备计轴。然而, 考虑到 CBTC 系统的降级模式, 通常在 CBTC 系统中装备计轴。在计轴出现故障并永久报告占用时, 可采取的处理方法包括: 人工复位以清除计轴故障、通过 CBTC 处理使 CBTC 列车正常运行, 以及配置计轴监督区段以避免单一计轴区段失效对系统功能的影响。

关键词 城市轨道交通; CBTC; 计轴; 永久报告占用; 监督轨道区段

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.10.038

Research on Failure Processing of Axle Counter in CBTC System

WU Binghao¹, DONG Junchao², QIU Zhaoyang¹, CHEN Yangxi¹

(1. CRSC Research & Design Institute Group Co., Ltd., 100070, Beijing, China; 2. CRSC Urban Rail Transit Technology Co., Ltd., 100070, Beijing, China)

Abstract [Objective] The communication-based train control (CBTC) system usually uses the axle counter to provide train auxiliary positioning functions. However, in the case of axle counter failure, if it is always processed as "occupied", the system operating efficiency will be significantly affected; while if it is chosen to be processed as "idle" when there is no

vehicle in reality, this processing method should not reduce the system safety. So it is necessary to research how to process axle counter faults in CBTC system. [Method] Based on the requirements of IEEE 1474 series international standards and CZJS/T 0033—2015 Interface Specification of Communication Based Train Control System for Urban Rail Transit-Interface Specification for Interoperability-General System Requirements for Interoperability, the state processing of the axle counter section inside the CBTC system is analyzed, and the state machine model of the axle counter section inside the CBTC system is proposed, and the method of processing the axle counter fault report occupancy inside the CBTC system is given. At the same time, the feasibility of CBTC system directly resetting a fault occupied axle counter section which is actually idle is discussed, and two methods for improving the availability of the axle counter system are compared. [Result & Conclusion] The IEEE 1474 series standards do not require axle counter system configured in CBTC system as mandatory. However, considering the degradation mode of CBTC systems, axle counters are usually equipped in CBTC systems. When the axle counter system is in fault and permanently reports occupancy, such processing methods can be used: manual reset to clear the axle counter fault, CBTC processing to enable the CBTC trains to operate normally, and configuring an axle counter supervisory section to avoid single axle counter section failure impact.

Key words urban rail transit; CBTC; axle counter; permanently reports occupancy; supervisory track section

我国城市轨道交通曾使用数字轨道电路进行列车占用空闲检测与列车控制系统的车地数据传输, 但该方案的车地通信容量和速率有限, 且仅能实现准移动闭塞, 可支撑的列车运行间隔能力亦较移动闭塞系统弱。

CBTC(基于通信的列车控制)系统在车地通信和列车闭塞方式上均优于基于数字轨道电路的列车控制系统。CBTC 系统可支撑实时双向大容量通

* 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司高效数字化测试平台项目(2300-K1240013.01)

信和移动闭塞,使列车运行间隔更小。近十多年来,随着城市轨道交通的大规模建设,我国 CBTC 系统也不断发展并逐步成熟,现已成为我国城市轨道交通的主流系统。我国还在 CBTC 系统的基础上,研制并应用了 CBTC 互联互通系统、FAO(全自动运行)系统。因此,基于 CBTC 系统进行我国城市轨道交通的研究和探讨,符合我国实际情况、具备现实意义。

列车定位是 CBTC 系统的基础安全功能,CBTC 车载设备根据地面定位信标(通常是应答器)来建立列车的基准定位,再基于线路数据,结合列车运行方向、走行距离和误差得到列车安全包络。根据 IEEE 1474.1^[1]的要求,CBTC 系统自身应具备列车定位功能,此外还可通过计轴或轨道电路等设备提供辅助列车定位功能,但并不要求 CBTC 系统必须装备提供辅助列车定位功能的设备,这为未来减少计轴等轨旁设备预留了空间。

我国 CBTC 系统因考虑降级模式、非 CBTC 列车(包含未装备 CBTC 的车辆、CBTC 降级列车、未完成头筛/尾筛列车、前方/后方可能存在的隐藏车辆)混运等场景,通常装备计轴作为辅助列车定位设备:计轴通过联锁将轨道区段的占用/空闲信息报告给 CBTC 系统,使其在不影响 CBTC 列车运行的同时支持非 CBTC 列车运行,以实现移动闭塞与固定闭塞的兼容。

轨道电路根据其分路状态来判断轨道的占用/空闲,而计轴则通过对驶入和驶出轨道区段的轮对计数来判断该轨道区段的占用/空闲。两者不同的检测方法导致了故障模式的差异:轨道电路在分路不良时会导致故障出清,而计轴在发生故障时可能会出现 ARB(永久报告占用)状态。

文献[2]只对 CBTC 系统如何判断计轴区段为 ARB 状态进行了详细描述。本文仍需对其进行研究和总结。

1 计轴原理与计轴故障的处理

计轴通过其安装在轨旁的磁头传感器对驶入和驶出某轨道区段的轮对进行计数,分别对驶入及驶出轮对数量进行“加”“减”运算,以得到该轨道区段内的轮对数。若区段内轮对数为零则该区段空闲;否则,该区段占用。因此,当计轴对轨道区段内的轮对数量计数错误时,会导致该区段占用/空闲状态报告的计轴失效,导致该失效的原因通常是磁

头传感器受到干扰。

计轴中列车占用检测功能的危险侧失效是误将有车占用的轨道区段报告为空闲。计轴的该功能为 SIL4(安全完整性等级 4),在实践中仅需考虑的计轴失效是:将实际无车占用的轨道区段误报为有车占用。计轴因其错误计数的故障导致该类失效,需采用预复位或直接复位操作对相应的轨道区段进行复零,清除故障。这两个操作具体为^[3]:①预复位。某轨道区段执行预复位命令后,需要有列车通过该区段,且计轴判断进入该区段的轮对数和离开该区段的轮对数相等,该轨道区段才设置为空闲状态;②直接复位。某轨道区段执行直接复位命令后,该轨道区段立即设置为空闲状态。

因此,预复位操作需有真车驶入再驶出复位的轨道区段,且计轴通过其正常逻辑判断该车进入该区段的轮对均已驶出,才清除计数故障,并报告该区段为空闲状态;而直接复位操作则不经过计轴正常计数逻辑的检查,立即清除计轴故障,并设置复位区段为空闲状态。因此,直接复位的安全职责由操作人员承担,而预复位需真车通过、计轴检查,这大幅减轻了复位操作人员的安全职责。相应地,可直接复位的计轴区段应在操作人员可视范围内,而预复位的计轴区段则可处于操作人员可视范围之外。以与匈塞铁路塞尔维亚段 ETCS-2(欧洲列车控制系统 2 级)配套使用的计轴系统为例:站内轨道区段采用直接复位的方式,区间轨道区段则采用预复位的方式。

计轴发生故障时,除计轴复位操作外,还有一种操作叫计轴旁路。计轴旁路操作后,会使联锁系统认为被旁路的轨道区段为空闲状态,进而使联锁系统可进行搬动道岔等操作。但计轴旁路操作并未清除计轴故障,只是“欺骗”了联锁系统,使其可能误认为旁路区段为空闲状态。计轴旁路操作可用于调试,但不可用于计轴故障场景的运营恢复。

因此,计轴发生故障时应使用预复位或直接复位操作来清除计轴故障,不可使用计轴旁路操作来忽略故障。

2 CBTC 系统中计轴的相关要求

2.1 IEEE 1474 系列标准的要求

IEEE 1474.1—2004 标准中,对辅助列车定位功能的描述是:可检测未装备 CBTC 车载设备的车辆及 CBTC 车载设备未正常工作的车辆的位置,该

位置的单位是轨道区段,且无须区分轨道区段上有一列车还是多列车,仅需要判定轨道区段是否有车占用。

IEEE 1474.2—2003 和 IEEE 1474.3—2008 标准^[4-5]也有相关说明:在不具备轨旁辅助列车定位功能时,需通过严格的运营流程对未装备 CBTC 的列车及 CBTC 故障的列车进行防护。典型的轨旁辅助列车定位功能通过轨道电路或计轴实现。

综上,IEEE 1474 系列标准中,并不强制要求 CBTC 系统装备计轴或轨道电路。其是否需装备轨旁辅助列车定位设备,可在国家标准或规范中予以明确。

2.2 我国相关标准的要求

根据中国交通运输协会城市轨道交通专业委员会中交协[2013]10 号文《城市轨道交通 CBTC 信号系统行业技术规范-需求规范(暂行版)》(以下简称“中交协 10 号文”)的要求:系统的列车运行等级宜分为 CBTC 级别、点式列车控制级别和联锁控制级别。CBTC 级别为正常控制方式,宜基于移动闭塞原理实时监督列车运行;点式列车控制级别为降级控制方式,应基于固定闭塞原理实时监督列车运行;联锁控制级别也为系统的降级控制方式,宜基于站间闭塞原理,司机根据地面信号机的显示行车。由此可知,我国的 CBTC 系统建议设置轨旁辅助列车定位设备,在实践中通常在 CBTC 系统中配套装备计轴。

中交协[2013]10 号文中对计轴故障的处理有明确描述:“当计轴设备故障或计轴数据传输发生错误时,应有安全和切实可行的故障恢复措施,或通过安全操作予以恢复,系统能确定的计轴设备故障不应影响轨道交通的正常运营。计轴系统故障复位方式应具有预复位和直接复位两种方式,直接复位时行车安全应要求人工保证。”

由此可知:①当 CBTC 系统判定某轨道区段处于故障占用时,不应影响 CBTC 列车正常运营;②计轴旁路不可作为计轴系统故障的恢复方式。

CZJS/T 0033—2015《城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)接口规范-互联互通接口规范 互联互通系统总体要求》^[6]在延续上述要求的同时,还提出了 ATP(列车自动防护)子系统应具备判断计轴设备故障的功能,其能确定的计轴设备故障不应影响连续式列车控制级别下列车的正常运营的要求。

综上,我国城市轨道交通 CBTC 系统宜设置计轴检测轨道区段的占用/空闲状态,并应具备判断计轴区段故障占用的功能,且计轴区段的故障占用不应影响 CBTC 列车的正常运营。

3 CBTC 系统中计轴失效的处理

3.1 计轴失效处理简述

计轴的预复位与直接复位操作是计轴本身对故障清除的要求,计轴在 CBTC 系统中应用时也应遵循该要求,以避免故障积累,保证 CBTC 系统和联锁系统的安全性与可用性。

此外,CBTC 系统还需判断计轴区段是否存在故障占用,以确保 CBTC 列车的正常运营。计轴区段的故障占用通常被称为 ARB,但两者存在不同:ARB 的含义为计轴区段无论是否有车占用,永久报告占用;故障占用则为实际无车的计轴区段报告为占用。故障占用属于 ARB,但 ARB 不一定是故障占用,CBTC 系统仅可对 ARB 中的故障占用进行判定。

3.2 CBTC 系统中计轴轨道区段的状态

我国要求 CBTC 系统对计轴区段故障占用状态进行判定,CBTC 系统中计轴区段的状态定义如下:

- 1) 未知:ZC(区域控制器)启动后,未收到计轴报告的轨道区段状态。
- 2) 空闲:ZC 未判定某计轴区段为 ARB,且收到计轴报告的该区段为空闲。
- 3) 占用:ZC 未判定某计轴区段为 ARB,且收到计轴报告的该区段为占用。
- 4) ARB 空闲:ZC 判定某计轴区段为 ARB,且判定该计轴区段实际无车占用。
- 5) ARB 占用:ZC 判定某计轴区段为 ARB,且判定该区段可能有车占用;该状态又细分为:① ARB + AT(自动列车)占用。ZC 判定某计轴区段为 ARB,且判定该轨道区段仅有 CBTC 通信列车占用;② ARB + UT(未装备列车)占用。ZC 判定某计轴区段为 ARB,且判定该轨道区段可能有非 CBTC 通信列车占用。CBTC 系统中计轴轨道区段的状态机如图 1 所示。

对 CBTC 系统计轴区段状态机迁移的几点说明如下:

- 1) ZC 判定某计轴区段为 ARB 的条件为:计轴报告该区段为占用,且 ZC 判定该区段实际无车占

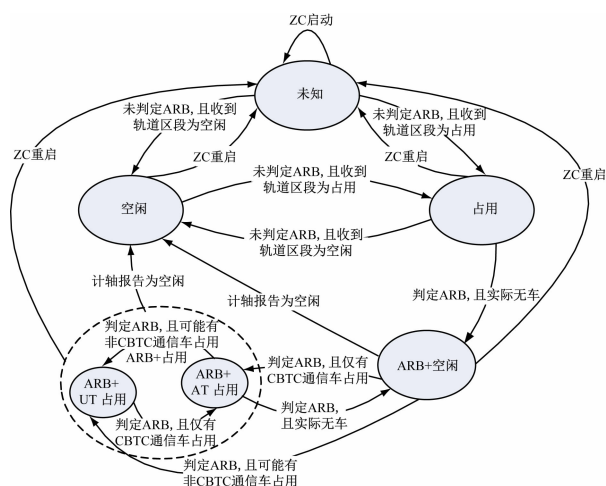


图1 CBTC系统中计轴轨道区段的状态机

Fig. 1 Status machine of axle counter track sections in CBTC system

用,因此不存在从“占用”到“ARB+占用”的直接状态迁移。

2) ZC判定某计轴区段故障清除(退出ARB状态)的条件为:计轴报告该区段为“空闲”,因此不存在从“ARB+占用”或“ARB+空闲”到“占用”的直接状态迁移。

3) 对于ZC判定为ARB状态的计轴区段,若ZC收到计轴报告该区段“空闲”,则认为计轴故障清除(见图1中“ARB+空闲”或“ARB+占用”(含“ARB+UT占用”和“ARB+AT占用”)到“空闲”的迁移)。

4) 任何可能的非CBTC通信列车驶入某ARB计轴区段或其相邻区段时,该ARB计轴区段则可能有非CBTC通信列车占用。该轨道区段状态迁移至“ARB+UT占用”(见图1中“ARB+空闲”或“ARB+AT占用”到“ARB+UT占用”的迁移)。

5) 具备尾筛的CBTC通信列车的尾部驶入某“ARB+UT占用”计轴区段后,可完成对该轨道区段的清扫,排除了该区段存在非CBTC通信列车的可能,该区段状态迁移至“ARB+AT占用”(见图1中“ARB+UT占用”到“ARB+AT占用”的迁移)。

CBTC系统通过对计轴区段的状态管理,使得计轴区段的“ARB+空闲”或“ARB+AT”状态不影响有头筛CBTC列车的正常运营。

3.3 “ARB+空闲”直接复位的可行性

CBTC系统既然可判定出计轴区段的故障占用状态为实际空闲,如考虑由CBTC系统对该区段进行直接复位,即由ZC生成计轴区段直接复位命令,

并通过联锁发给计轴,以完成对计轴区段的故障清除,则需要考虑以下2点:

1) 该直接复位操作并非瞬间完成,其需考虑ZC处理延时、ZC与联锁通信延时、联锁处理延时、联锁与计轴通信延时和计轴处理延时等。其总延时可能达数秒甚至更多。

2) 直接复位期间,应保证被复位计轴区段始终处于无车状态。

综上,仅通过CBTC系统的技术手段难以保证直接复位期间被复位区段始终处于无车状态,还需运营管理方配合。因而,相比传统人工直接复位操作,CBTC系统进行直接复位操作并非更优方案。

3.4 计轴故障的可用性考虑

文献[7]给出了一种在折返道岔区进行冗余计轴主机配置的方案,即每台计轴主机对折返道岔区上、下行所有计轴磁头传感器进行采集,以双计轴主机冗余报告上、下行计轴区段的占用/空闲状态,双计轴主机的输出通过接口电路组合后形成联锁的输入。该方案规避了单套计轴主机的随机故障,但需注意以下几点:

1) 需增加组合接口电路,即需有构成可用性冗余的双计轴主机与联锁间的组合接口电路,且该电路需为安全电路(应规避“双计轴主机均输出占用,但组合电路输出给联锁空闲”的故障模式)。

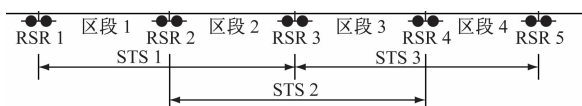
2) 磁头传感器的共模故障无法消除,即双计轴主机均对相同的轨旁计轴磁头传感器进行采集;当计轴磁头因干扰而故障时(常见故障),其将成为共模故障,导致双计轴主机均失效。

3) 需对双计轴主机进行复位,即对于双计轴主机相关的轨道区段复位,需保证2台主机均正确完成复位操作,才能完全清除计轴故障。

4) 上述内容需进行安全认证,而安全证明相关的认证成本增加。

Frauscher提出了STS(监督轨道区段)的概念^[8-9]。STS是与连续物理轨道区段重叠的冗余虚拟区段(STS的设置见图2),若某STS内无车,则该STS内的每一段物理轨道区段均无车。由此,STS可识别因计轴磁头传感器受到干扰而导致故障占用的轨道区段,进而由计轴系统直接复位该故障轨道区段,清除故障。

对计轴系统的轨道区段占用/空闲判定功能,仅考虑其故障导致错误报告占用的失效,不考虑其故障导致错误报告空闲的失效。因此,在STS空闲



注:RSR1—RSR5 为 5 套轨旁计轴磁头;STS1—STS3 为 3 个监督轨道区段。

图 2 STS 设置示意图

Fig. 2 STS setting schematic diagram

时,认为该 STS 内所有物理区段无车,无安全风险。STS 还具备以下优势:① 不需额外增加轨旁计轴磁头传感器;② 计轴系统进行直接复位避免了前述 CBTC 系统进行直接复位的延时过长问题;③ STS 由计轴内部实现,不影响既有的计轴与联锁接口,不会增加工程应用时安全证明的难度;④ 有效缓解了常见的、因计轴磁头受外部干扰导致的故障占用。

综上,STS 在保障了计轴安全性的同时,还提升了计轴、联锁和 CBTC 系统的可用性。

4 结语

IEEE 1474 系列标准中,未提出在 CBTC 系统中装备计轴或轨道电路的强制要求,而我国考虑了 CBTC 系统降级模式,通常在 CBTC 系统中装备计轴。计轴故障会误报区段占用状态,相关处理方法可总结为:

1) 传统人工复位:由操作人员对失效计轴区段进行预复位或直接复位操作,清除计轴故障。

2) CBTC 处理:CBTC 系统对计轴区段的故障占用进行判定,可支撑 CBTC 列车正常运营,但不能清除计轴故障。

3) 计轴监督区段:通过设置监督区段,在保障安全性的前提下,实现计轴区段的可用性冗余,直接清除计轴故障,降低人工复位需求,提高了整体系统可用性。

参考文献

- [1] IEEE. IEEE standard for communications-based train control (CBTC) performance and functional requirements; IEEE 1474. 1—2004[S]. [S. 1.] IEEE, 2004.
- [2] 吴炳昊,董俊超,高国梁. CBTC 系统中计轴区段 ARB 状态判定方法[J]. 铁道通信信号, 2014, 50(5): 10.
WU Binghao, DONG Junchao, GAO Guoliang. ARB status determination methods of CBTC system in axle counting section[J]. Railway Signalling & Communication, 2014, 50(5): 10.
- [3] 张志倜. 城市轨道交通中计轴区段复位方式的分析[J]. 城市轨道交通, 2010(12): 46.

ZHANG Zhit. Axle counter block reset method analysis in urban rail transit[J]. Urban Public Transport, 2010(12): 46.

- [4] IEEE. IEEE standard for user interface requirements in communications-based train control (CBTC) Systems; IEEE 1474. 2—2003[S]. [S. 1.] IEEE, 2003.
- [5] IEEE. IEEE recommended practice for communications-based train control (CBTC) system design and functional allocations; IEEE 1474. 3—2008[S]. [S. 1.] IEEE, 2008.
- [6] 中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会. 城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)接口规范 互联互通接口规范-互联互通系统总体要求; CZJS/T 0033—2015 [S]. 北京:中国城市轨道交通协会技术装备专业委员会, 2015.
Technical Equipment Professional Committee of China Urban Rail Transit Association. Interface specification of communication based train control system for urban rail transit-interface specification for interoperability general system requirements for interoperability; CZJS/T 0033—2015 [S]. Beijing: Technical Equipment Professional Committee of China Urban Rail Transit Association, 2015.
- [7] 王向阳. CBTC 系统计轴设备故障处理和关键区段冗余配置方案[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(6): 40.
WANG Xiangyang. CBTC system axle counter failure process and the redundancy configuration scheme for crucial blocks[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(6): 40.
- [8] MANFRED S. Axle counting: a well-established technology[EB/OL]. (2020-11-27) [2022-05-30]. https://www.frauscher.com/en/newsroom/Axle-Counting-A-well-established-technology_bba_1047#:~:text=Supervisor%20Track%20Section%20STS%3A%20Virtual%20supervisor%20sections%20overlay,diagnostic%20information%20via%20the%20Frauscher%20Diagnostic%20System%20FDS.
- [9] MELANIE K. Stable concept, flexible system[EB/OL]. (2020-09-03) [2022-05-30]. https://www.frauscher.com/en/newsroom/Stable-Concept-flexible-System_bba_976.
- [10] 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, 26(8): 55.
DING Shukui, WANG Ying, WANG Wei, et al. ARB judgment solution in interconnection CBTC system[J]. Railway Computer Application, 2017, 26(8): 55.
- [11] 李超,贾学祥,李亮,等. CBTC 系统计轴故障占用判定逻辑及应用分析[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(6): 67.
LI Chao, JIA Xuexiang, LI Liang, et al. Judgments and application analysis of ARB in CBTC system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 67.

· 收稿日期:2022-06-13 修回日期:2022-07-29 出版日期:2024-10-10

Received:2022-06-13 Revised:2022-07-29 Published:2024-10-10

· 通信作者:吴炳昊,高级工程师,binghao. wu@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