

基于互联互通 CBTC 系统差异性的故障分析^{*}

白广争¹ 郜洪民¹ 李 亮¹ 白广良² 高 磊³

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司通信信号研究所, 100081, 北京; 2. 中国石油辽河油田兴隆台采油厂, 124011, 盘锦;
3. 北京华铁信息技术有限公司, 100081, 北京//第一作者, 助理研究员)

摘 要 描述了基于通信的列车控制(CBTC)系统的互联互通方案,介绍了不同列车运行等级下,CBTC 系统列车互联互通的跨线和共线运营场景,以及主要功能测试分类。在此基础上,重点分析了由 CBTC 信号系统互联互通所产生的典型故障案例:列车过信号机时的二次闯灯问题。通过建立数学模型,研究了二次闯灯现象产生的条件,利用状态转移图和时序图解释了二次闯灯后引起不同故障现象的原理,并给出通过工程设置和软件处理两种途径来解决二次闯灯问题的方案。

关键词 城市轨道交通; 基于通信的列车控制; 互联互通; 故障分析模型; 时序图; 二次闯灯

中图分类号 U231.6

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2019.06.010

Fault Analysis Based on System Differences of CBTC Interconnection/Intercommunication

BAI Guangzheng, GAO Hongmin, LI Liang, BAI Guangliang, GAO Lei

Abstract The scheme of communication based train control system (CBTC) interconnection/inter communication is described. Scenes of train cross line operation and collinear operation based on CBTC interconnection/intercommunication, the main function test classification under different train running levels are introduced. On this basis, a typical fault of train secondary lamp running produced by CBTC signal interoperability is analyzed. Through establishing a mathematical model, the conditions for CBTC level train secondary lamp running problem are explored in depth. Then, the state transition and sequence diagrams are used to explain the principle of train secondary lamp running problem, two ways of the engineering setting and software processing are proposed for the solution.

Key words urban rail transit; CBTC; interconnection/intercommunication; fault analysis model; sequence diagram; trains secondary lamp running

First author's address Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences, 100081, Beijing, China

jing, China

随着城市轨道交通网络化建设不断推进,不同线路间的互联互通已成为目前城市轨道交通领域发展的重要方向。信号系统的互联互通能够有效提高信号设备的利用效率,有助于资源统一调配,并可为城市轨道交通的网络化运营打下坚实的基础^[1]。目前,我国基于通信的列车控制(CBTC)系统尚未形成统一的技术标准,市场上不同厂家 CBTC 系统的技术也各具特色,要互联互通必须对现有不同厂家的子系统进行全面完善的评估,以此组建新的确保运营安全的 CBTC 系统。文献[2]指出,信号系统互联互通中所面对的问题主要为列车自动调整、电子地图及物理对象编码、通信协议和安全认证等。为反映互联互通 CBTC 系统所存在的差异性,结合具体案例对所产生的相关问题进行分析,以期决策者提供理论参考。

1 CBTC 系统的互联互通方案

通常情况下,CBTC 系统可以分为车载系统、地面系统和无线通信系统,如图 1 所示。其中地面系统包括联锁(CI)系统、列车自动监督(ATS)系统和区域控制器(ZC)系统。

通过统一车地通信协议和电子地图的方式实现信息的交互,并实现不同信号厂商的车载设备与地

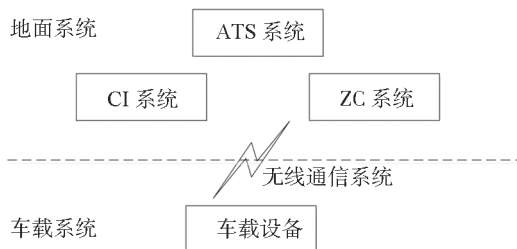


图1 CBTC系统构成示意图

^{*} 中国铁道科学研究院集团有限公司通号所基金项目(2018HT04, 2018HT10)

面设备的跨线和共线互联互通运营^[3]。其运营示意

图如图 2 所示。

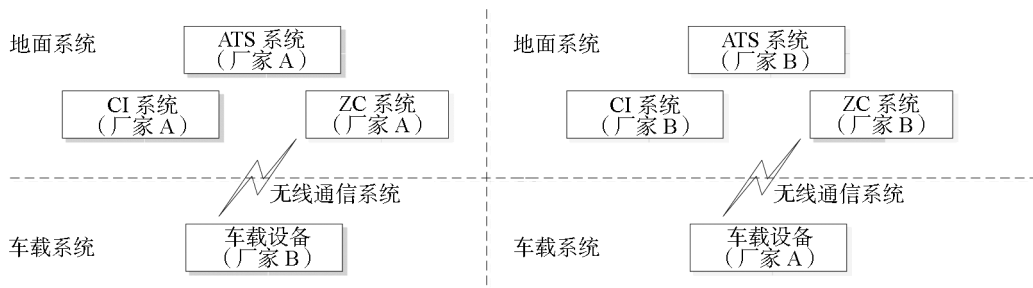


图 2 CBTC 系统互联互通运营示意图

同时,对于两条线路相交的换乘站,地面系统还需满足接口耦合,实现地面信息的共享传输,如图 3 所示。文献[3]对互联互通条件下 ATS 接口的耦合机制进行了研究。

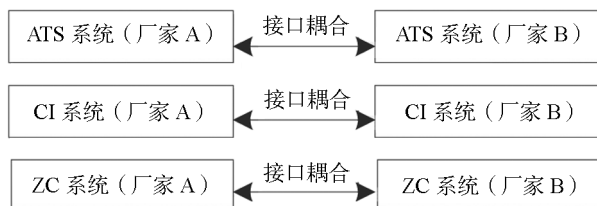


图 3 互联互通换乘站地面系统的接口耦合

互联互通不仅要求信号制式、设备接口等的统一,更需要从交互接口、交互功能、多车追踪、故障恢复、运行指标等其他多个方面进行综合评估,以检验由不同厂家子系统重新组建的新 CBTC 系统的整体安全性。

根据车地通信交互方式的不同,CBTC 系统列车的运行等级通常分为 3 种,其中:CBTC 连续式运行等级是指车载与地面系统采用无线通信的方式进行实时数据交互的运行模式;点式运行等级是指列车通过运行至地面安装的应答器时获取应答器的定位信息和信号灯相关信息,与此同时,地面通过计轴区段的占用或出清来获得列车的位置信息,由此实现车与地信息交互的运行模式;联锁级运行等级是指列车仅获取应答器信息进行定位,不处理信号灯相关信息,而地面通过计轴占用或出清来获得列车的位置信息,由此实现车地信息交互的运行模式。城市轨道交通的互联互通方案要求在这 3 种列车运行等级下,均能够实现 CBTC 互联互通运营。

2 互联互通测试场景

互联互通测试包括接口测试、功能测试和工程数据测试等 3 个方面,用以验证各厂家车载系统功

能在其他厂家地面系统的共线以及跨线运营上是否可以满足^[4]。结合列车的 3 种运行等级,CBTC 互联互通的测试验证场景主要可分为:连续式运行等级下的跨线运行、共线运行;点式运行等级下的跨线运行、共线运行;连续式与点式运行等级的共线运行,以及其他杂散场景测试。

在连续式运行等级下,互联互通方案主要验证功能包括列车的追踪运行、跨边界移交、移动授权有效性、停车保证、保护区段解锁等;点式运行等级下,互联互通方案主要验证功能包括点式开口功能、保护区段解锁功能、红灯误出发、点式运行曲线、列车升级等;联锁式运行等级下,测试列车的点式升级、连续式升级、列车定位等功能。

在进行测试的过程中,不同厂家 CBTC 系统功能划分的差异性使得通过互联互通重新组成的 CBTC 系统不可避免地出现一些防护漏洞,而这些漏洞的根源主要在于设计方案的不统一。以下通过分析“二次闯灯”这一典型的互联互通故障案例,来反映其中存在的问题。

3 二次闯灯问题分析

3.1 问题描述

列车在线路上运行时,根据地面应答器信息及测速装置共同确定自身位置。由于列车的测速装置存在测速误差,应答器存在安装误差,这就造成了列车定位具有不确定性^[5]。列车的实际位置加上此不确定性,形成了列车的位置安全包络。ZC 系统以列车安全包络^[6]作为列车的具体位置进行追踪。当列车刚经过应答器时,列车的不确定性主要由应答器的安装误差构成。随着列车的继续运行,其不确定性在应答器安装误差的基础上,不断累计测速误差,从而导致总位置不确定性持续增大。直至列车经过下一个应答器,方可消除测速误差。

由于不同线路上应答器的安装距离及精度不尽相同,则同一列车在跨线互联互通运营时,列车位置不确定性增长情况也各不相同:若线路上应答器安装较密集,则线路上所运行列车的累计误差较小,总位置不确定性也小;反之,若线路上应答器安装较稀疏,则列车运行过程中的累计误差较大,总位置不确定性也较大。

在进行城市轨道交通室外信号设备布置设计时,信号机的位置均会被安装在计轴的分界点处,同时布设相应的应答器,用于支持后备点式等级列车的运行,如图4所示。而这种为后备模式所作的设计方案,易引起二次闯灯现象。

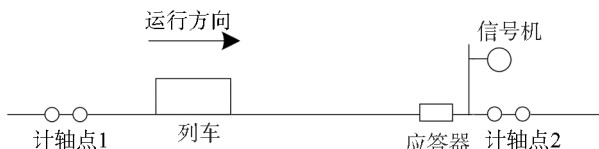


图4 应答器与计轴点相对位置示意图

二次闯灯是指CBTC连续式运行等级列车在通过信号机时,由于不确定性较大,列车包络已经越过了前方计轴点,引起信号机关灯,但列车实体还在本计轴区段内;在车载无线扫过信号机对应计轴前的应答器时,列车又被重新矫正位置,使列车的不确定性减小,车头重新回退到本计轴区段内;而此时列车由于惯性,再次闯入前方已关灯进路,最终导致闯红灯。

二次闯灯问题只发生在CBTC连续式运行等级模式下。在非CBTC连续式运行等级下,联锁系统通过计轴设备获得列车的位置占用信息,而不采用由ZC系统通过列车位置报告所获得的列车包络所发来的占用信息,这就不会出现列车重定位后回缩的现象,也就不会出现二次闯灯问题。

由于二次闯灯问题在不同的场景下,表现出不同的结果,因此极易混淆其问题的根源。以下对车头是否会出现回缩,以及车头回缩后引起的故障现象展开分析。

3.2 二次闯灯数学建模

设列车与ZC的通信周期为 T_1 ,列车收到计轴外方应答器定位信息的时刻为 t_0 。列车在一个通信周期 T_1 内平均运行速度为 \bar{v} ,应答器的绝对位置为 S_0 ,应答器安装位置不确定性为 ε ,车载无线至车钩的长度为 $l_{\text{外悬}}$ 。列车在收到应答器信息后,待将信息打包发送给ZC的时刻为 t ,忽略 $t - t_0$ 时间段内列车

走行不确定性,列车的包络最大前端 S_t 计算公式为:

$$S_t = S_0 + \varepsilon + \bar{v}(t - t_0) + l_{\text{外悬}} \quad (1)$$

设发生重定位的计轴点外方应答器与该计轴点间的设计安装距离为 l_0 ,则该计轴点的绝对位置为:

$$S_x = S_0 + l_0 \quad (2)$$

若 t 时刻的前一时刻列车已经越过计轴点,而在 t 时刻,列车在重定位后,发给ZC的包络最大前端位置在计轴外方,即满足式(3),则车头会出现回缩至计轴点外方的情况。

$$S_t \leq S_x \quad (3)$$

将式(1)、(2)代入式(3)并约减,得:

$$\bar{v} \cdot (t - t_0) \leq l_0 - l_{\text{外悬}} - \varepsilon \quad (4)$$

否则,若式(4)不成立,则列车不会出现车头再次回缩至计轴点外方的情况。由于在运营过程中,列车经过信号机处应答器的速度 \bar{v} 及时间段 $(t - t_0)$ 均不是确定值,因此是否出现车头回缩现象仍然是随机的。若适当增大该应答器安装位置不确定性,即 ε 越大,则式(4)不发生的概率越大,即列车车头越不易发生回缩。但这一调整方式在不同厂家的工程实施方案中并没有得到统一。

若出现列车车头回缩至计轴点外方的现象,则有两种故障表现形式:其一为在列车回缩后,ZC判定列车前方信号机为禁止信号,为列车分配的移动授权(MA)回缩至信号机处,列车由于惯性闯过安全点而降级,同时列车闯红灯进入前方进路;其二为ZC未判定出前方信号机为禁止信号,列车能够保持CBTC连续式运行等级进入前方进路,但联锁判定为闯红灯,列车通过前方进路后,不自动对进路解锁。以下详细分析这两种不同现象的产生原理。

3.3 故障分析与解决方案

对于CBTC连续式运行等级列车闯过信号机的过程,不考虑进路锁闭、道岔、保护区段等其他因素的影响,只考虑存在变化的数据因素,其信息流如图5所示。列车将不断变化的位置信息发送给ZC;ZC根据列车的位置,将占用信息发给CI;CI根据占用信息设置信号机状态,并将信号灯状态发送给ZC;ZC根据信号灯状态和列车的位置信息,最终确定列车的MA,并发送至列车。

根据ZC收到列车的位置及信号机的不同情况组合可分为4种状态。ZC分别对这4种状态进行判断,并计算出对应的MA,如表1所示。

表1中,状态3表示信号机处于延时关灯阶段。对于状态4的MA计算,若状态4由状态2转移而

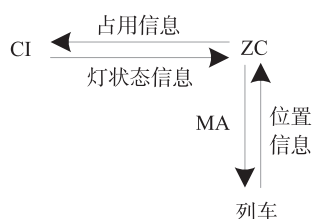


图5 CBTC连续式运行等级列车行车控制数据流

来,则计算的MA无效,列车因闯过安全点而降级;若由状态1或状态3转移至状态4,则MA正常延伸。在列车出现车头回缩至计轴点外方现象的情况

表1 列车过灯过程状态定义及MA计算

状态	ZC收到列车的位置	ZC收到的信号灯状态	MA计算
状态1	车头未进入前方计轴	允许信号	正常延伸
状态2	车头未进入前方计轴	禁止信号	回缩至计轴外方
状态3	车头进入前方计轴	允许信号	正常延伸
状态4	车头进入前方计轴	禁止信号	由转移至该状态的前一状态确定

下,整个过灯过程状态转移如图6所示。两种状态转移过程的区别关键在于ZC收到CI所发送信号关灯的时刻。

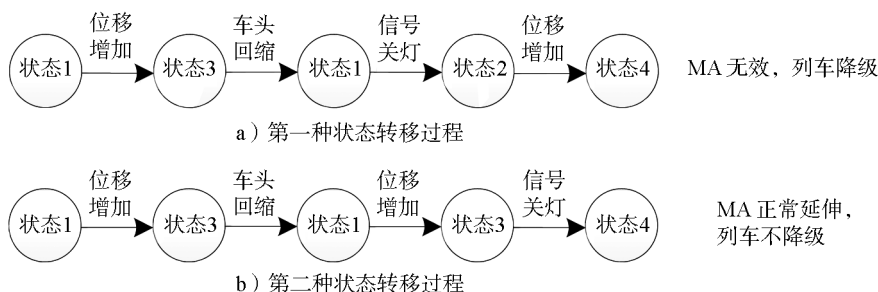


图6 列车过灯车头回缩情况下的两种状态转移图

现进一步考虑图6b)中第二种状态转移过程。在第一次状态转移后,由状态1到达状态3,同时ZC将占用信息发送给CI;CI根据信号机内方第一区段的占用信息,开始信号机延时关灯。若在CI延时关灯期间,发生车头回缩的情况,则信号不再延时关灯,待列车位移增加,再次进入前方计轴,则CI判定属于正常越过允许信号,不构成闯红灯情况;若在CI延时关灯结束后,CI收到车头回缩,在第3次状态转移期间即由状态1转移到状态3之前,CI逻辑关灯,并在下一个CI-ZC通信周期,CI将关灯信息发送给ZC;ZC在第4次状态转移期间收到信号机为禁止状态,则会出现CI判定闯红灯,ZC未判定闯红灯的现象。此现象下CBTC连续式运行等级列车正常越过信号机,但进路不能自动解锁。对应的事件发生时序如图7所示。

综合以上分析,对于CBTC连续式运行等级列车过信号机的过程,若列车经过应答器重新定位,不发生位置由计轴内方回缩至计轴外方,则列车能够正常通过信号机,且不会引起其他故障。而若列车车头发生位置回缩,则会引起多种随机的故障现象。这些故障现象在互联互通的测试中均出现过多次。

解决二次闯灯故障,应从根本上避免发生列车车头回缩现象。具体解决措施包括增加应答器的安

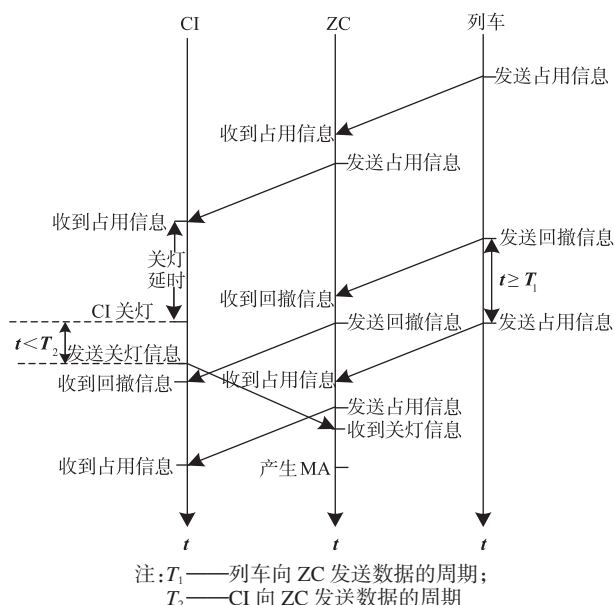


图7 列车过灯车头回缩后不降级对应事件时序图

装密度、适当降低信号机前应答器的安装精度,以及ZC/车载系统通过配合使逻辑占用不回缩等。无论是从应答器的布设方案着手,或从软件系统功能防护的角度出发,均有必要采取统一的方案来规避故障现象发生。

(下转第51页)

值均小于控制值 20.00 mm。在施工过程中,未发现建筑物出现明显裂缝或不满足建筑结构使用要求的现象发生,这说明本文提出的保护措施合理可行。

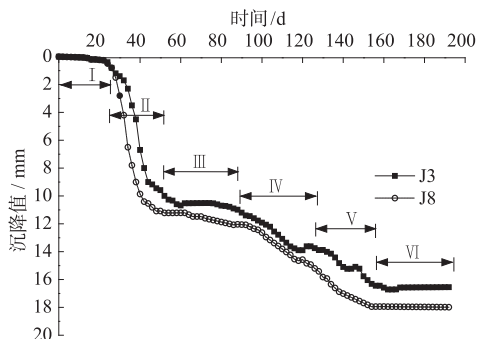


图 12 建筑物沉降变形曲线

4 结论

(1) 暗挖地铁隧道下穿既有建筑物时,CRD 工法在控制地表及建筑物变形方面效果最佳,CD 工法次之,上下台阶预留核心土法产生的变形最大。

(2) 数值模拟表明,隧道正穿既有建筑物施工对建筑物竖向沉降影响较大,对差异沉降影响较小,而

旁穿时引起的差异沉降较大。

(3) 现场监测表明,暗挖隧道地层采取保护措施后,利用 CRD 工法进行施工,引起的地表及建筑物沉降均在可控范围内,可保证建筑物的安全。

参考文献

- [1] 吴波. 城市地下工程技术研究与实践[M].北京:中国铁道出版社,2008.
- [2] 周锋. 大断面浅埋暗挖隧道施工方法及其稳定性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2013.
- [3] 李金奎,王飞飞,白会人. 浅埋暗挖地铁隧道施工地表沉降规律分析[J].武汉工程大学学报,2012,34(10):58.
- [4] 朱才辉,李宁. 地铁施工诱发地表最大沉降量估算及规律分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(增刊1):3543.
- [5] 陈智慧. 大跨隧道下穿建筑物施工方案对比分析及施工技术[J].石家庄铁道大学学报,2015,28(2):50.
- [6] 覃卫民,赵荣生,王浩,等. 浅埋大跨隧道下穿建筑物的安全影响研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):3762.
- [7] 姚海波. 大断面隧道浅埋暗挖法下穿既有地铁构筑物施工技术研究[D].北京,北京交通大学,2005.
- [8] 刘天宇. 超前小导管在隧道工程中的应用及数值模拟[J].土工基础,2013,27(2):67.

(收稿日期:2017-10-09)

(上接第 46 页)

4 结语

总体而言,自主化互联互通 CBTC 系统已取得了一定的成就,但互联互通相关技术的成熟度还有待进一步加强,需要依据互联互通现场及实验室的测试情况,来进一步明确功能划分、完善规范标准(这是在互联互通开展过程中产生相关问题的根源)。

结合文中所列举的案例,为了更好地实现城市轨道交通线路的互联互通,需要从顶层设计上着手,制定 CBTC 系统的通用技术标准,包括安全协议标准、网络通信协议标准、应用功能技术标准,甚至包括一些重要的通信参数标准,如通信周期、基础数据包格式等。在此基础上,进一步确定 CBTC 系统互联互通框架。这样既可有效避免安全漏洞,也可降低

走错路、弯路的风险。

参考文献

- [1] 白广争. 城市轨道交通网络化行车组织优化相关问题研究[D].成都:西南交通大学,2015.
- [2] 安彬. 城市轨道交通基于通信的列车控制系统实现互联互通存在的主要问题分析[J].城市轨道交通研究,2017(增刊1):18.
- [3] 张国茹. 互联互通条件下基于 CBTC 的 ATS 系统接口研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [4] 李中浩. 城市轨道交通 CBTC 互联互通发展趋势及建议[J].城市轨道交通研究,2018(5):12.
- [5] 边伟众,郜洪民,尹逊政. 移动闭塞系统列车位置不确定性算法研究[J].中国铁路,2014(7):68.
- [6] 赵晓峰. 无线 CBTC 信号系统移动授权功能分析[J].城市轨道交通研究,2013(5):80.

(收稿日期:2018-10-10)

欢迎使用《城市轨道交通研究》网上投稿管理系统

tougao.umat1998.com