

西安机场城际线列车因移动授权超时而引发 紧急制动故障的分析

房 瑛

(陕西城际铁路有限公司, 710038, 西安//高级工程师)

摘 要 西安机场城际线路信号系统采用基于通信的列车控制(CBTC)系统。列车在单 A 网、单 B 网模式测试期间,曾多次出现由移动授权超时导致的紧急制动故障。经分析列车运行数据,提出测试方案,并对测试结果进行综合分析,采取了优化 LTE(长期演进)区间网络、调整车载信号设备参数、升级相应软件等措施顺利地解决了因移动授权超时而引发的故障。

关键词 西安机场城际轨道交通线; 列车紧急制动故障; 基于通信的列车控制系统; 移动授权; 故障处理

中图分类号 U239.57

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.01.033

Analysis of Emergency Braking Failure of Xi'an Airport Intercity Rail Transit Line Train Due to Overtime Movement Authorization

FANG Ying

Abstract The Xi'an Airport intercity rail transit line signaling of which adopts communication-based train control (CBTC) system. During the operation test of the train in the single network A and single network B mode, emergency braking failures caused by overtime movement authorization occurred many times. After analyzing the train operation data, a test plan is proposed, and the test results are comprehensively analyzed. Measures such as optimizing the LTE interval network, adjusting the parameters of the on-board signal equipment, and upgrading the related software successfully solve the emergency braking failure caused by overtime movement authorization.

Key words Xi'an airport intercity rail transit line; train emergency braking failure; communication-based train control (CBTC) system; movement authorization; troubleshooting

Author's address Shaanxi Intercity Railway Co., Ltd., 710038, Xi'an, China

西安机场城际轨道交通线(简称“城际线”)采用基于通信的列车控制(CBTC)系统,数据信号子系统(DCS)采用基于开放的业界标准,其有线通信部

分采用 IEEE 802.3 以太网标准,无线通信部分采用 LTE(长期演进)技术。LTE 车地无线通信采用综合承载方式设置, A、B 网冗余双网设计, 两张网络完全独立, 并行工作。A 网承载 CBTC 业务、PIS(乘客信息系统)业务、车载 CCTV(闭路电视)业务、列车运行状态信息以及紧急信息文本下发等业务; B 网单独承载 CBTC 业务, 确保可靠传输 CBTC 业务。列车在线路开通运营前的单 A 网、单 B 网模式运行测试期间, 曾多次出现由移动授权超时导致的紧急制动故障。

1 移动授权简介

在 CBTC 系统中, 通过为每列车生成一个合理安全的移动授权(MA), 来确保列车在系统控制的线路内高密度地安全运行。MA 的距离是指从列车的车尾起到前方终点障碍物的这部分线路^[3]。区域控制器(ZC)根据列车当前位置、行驶方向、进路开放及锁闭状态、前方列车属性、前方列车位置等信息, 为车载 ATP(列车自动防护)实时计算并确定每列列车的 MA, MA 经安全通信协议封装后, 通过无线设备连续发送给车载 ATP 执行。

在生成 MA 过程中, ZC 将处理多种类型障碍物, 按照一定规则从中选取能作为列车当前周期运行终点的终点障碍物^[4]。终点障碍物既有可能是静态障碍物, 例如道岔、进路终点等, 又有可能是动态障碍物, 例如前方列车 MA。

当列车在受控线路区域内按照正常时刻表移动时, VOBC(车载控制器)将列车的位置与方向发送给 ZC, 并且列车的 MA 将由 ZC 发送给 VOBC。ZC 也向 VOBC 发送列车所在 MA 内的道岔和信号机状态, 从而使 VOBC 能够根据这些状态监控列车。MA 原理如图 1 所示。

如图 2 所示, 联锁子系统将进路、道岔、信号的

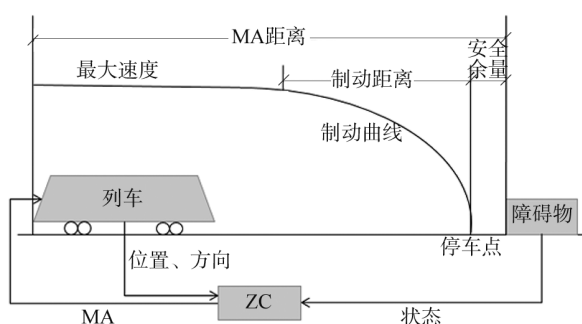
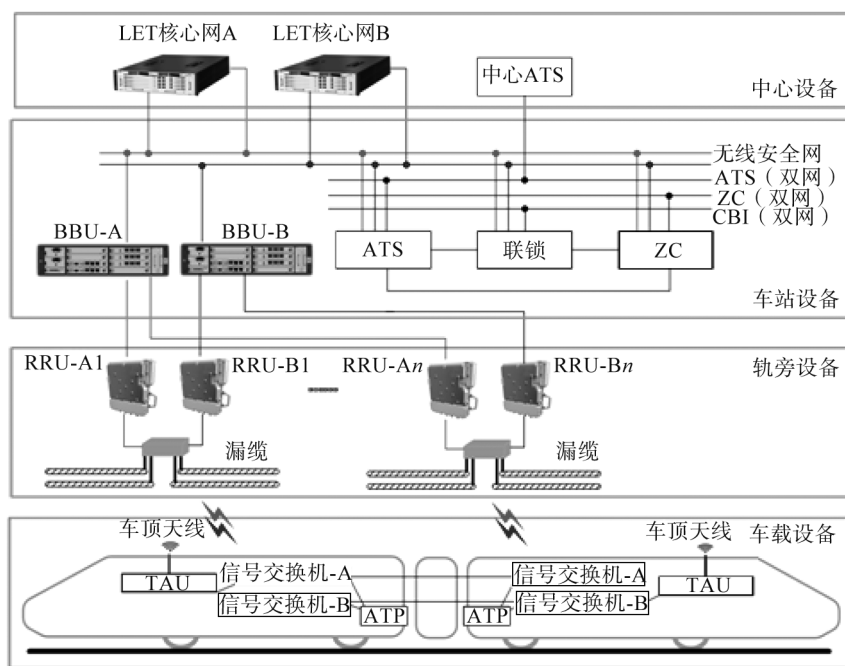


图1 MA原理示意图

状态发送给ZC;ZC结合联锁子系统信息计算列车MA,并将MA经过有线网发送至控制中心LTE核心网交换机;再经过车站BBU(基带处理单元)、轨旁RRU(射频拉远单元)上传至漏缆,通过无线传输至车载天线;车载天线将MA发送至TAU(车载接入单元),再经TAU发送给车载ATP,列车按照MA实现安全运行。



注:ATS为列车自动监控;CBI为计算机联锁。

图2 MA数据传输示意图

2 MA超时故障原因分析

在2019年6月期间,收集分析全线信号车载日志数据发现,造成列车紧急制动原因为“MA超时”,主要集中在1车、6车、7车、9车、10车、14车共6列车上。原因分为LTE系统网络问题和信号设备板件故障两大类,现从硬件、软件入手对此两大类故障进行分析。

2.1 LTE系统网络的问题分析及调整

2.1.1 区间网络优化

西安机场城际线列车运行最高设计速度为100 km/h,在应对多普勒效应、小区切换等技术上要求更高。西安机场城际线区间采用漏缆敷设,区间线路长度均大于1000 m,考虑到RRU覆盖范围有限,根据轨道交通工程应用实践,区间1.2 km布设1个

RRU,每个RRU向大小里程方向各覆盖600 m,因此存在2个RRU之间的切换问题。

根据信号传输特性,综合考虑漏缆损耗、接头损耗、耦合损耗,距离、容差等因素,结合西安机场城际线RRU布置情况,根据有关工程规范RRU至600 m处最小场强值参考值约为-90 dB。工程实施中通过网管调节RRU场强,使其场强值达到参考值范围,目的是保证列车通过2个RRU平滑切换来提高业务性能。

测试期间,列车在艺术中心站—空港新城站区间出现多次紧急制动故障。经实地检测,该区间的RRU布置距离空港新城站约500 m,空港新城站内也布置了RRU。这2个RRU都属于空港新城站BBU管理。因此,实际上艺术中心站—空港新城站区间的RRU只覆盖250 m,所以把RRU功率降到

最低,根据 250 m 的漏缆距离计算得到艺术中心站—空港新城站区间 RRU 覆盖终点场强约为 -76.25 dB 。此数值远大于小区切换数值 -90 dB ,结果造成 RRU 过覆盖,最终导致 2 个 RRU 切换时不平顺而产生丢包,造成列车紧急制动故障。

针对此现象,综合考虑区间长度,将空港新城站的 RRU 与艺术中心站—空港新城站区间的 RRU 合并为超级小区,调整后进行验证,测试数据已满足要求,规避了近距离 2 个 RRU 之间切换造成的列车紧急制动故障。

2.1.2 区间漏缆接头驻波比超标引起“MA 超时”而产生紧急制动问题

天线驻波比检测是通过检测天线口实际发射功率和天线口实际反射功率,然后由驻波比公式计算出天线口实时驻波比。在实际工程施工中,由于接头工艺质量问题导致反射功率过大,最终造成了发射功率与反射功率的干扰,使得 RRU 场强和信噪比过低而导致无线性能下降。当一个 RRU 产生驻波,使场强和信噪比下降后,与相邻 RRU 的切换带就发生变化。如 A、B 处 2 个 RRU 之间各覆盖 600 m,切换带就在 600 m 处,如 A 点 RRU 产生驻波后场强降低,B 点的 RRU 就需要补充 A 点 RRU 降低的那部分场强,在保持 B 点 RRU 功率不变的情况下,B 点 RRU 无法过覆盖去补充故障 RRU 的场强,则会造成切换时性能下降,最终产生丢包而导致列车紧急制动故障的发生。

驻波比理想值为 1,按照工程标准漏缆驻波比应小于 2.0。在 LTE 无线系统网络优化阶段,经测试发现部分漏缆接头驻波比值超过了标准值。经过处理漏缆接头,将驻波比降到标准值范围内后,消除了因为驻波比超标引起“MA 超时”所导致的列车紧急制动的故障问题。

2.1.3 室外邻线干扰

西安机场城际线北客站站—渭河南站区间为地面区间,且紧邻西安地铁 4 号线草滩停车场,西安地铁 4 号线草滩停车场也采用 TD-LTE (时分-长期演进)技术承载 CBTC 业务。西安机场城际线与地铁 4 号线同时在使用国家无线电委员会批复的专用频段 $1785\text{ Hz} \sim 1805\text{ Hz}$:西安机场城际线 A 网频段为 $1785 \sim 1795\text{ MHz}$,B 网频段为 $1795 \sim 1800\text{ MHz}$;地铁 4 号线 A 网频段为 $1785 \sim 1800\text{ MHz}$,B 网频段为 $1800 \sim 1805\text{ MHz}$,4 号线 A 网与西安机场城际线 A 网使用的无线频谱重叠。

两条线路的网络在无线制式上相同,双方基站时钟同步,配比相同的子帧,上下行时隙亦同步。在西安机场城际线和地铁 4 号线 A 网频段的重叠区域,如果两家天线在相隔较近距离时则会产生同频干扰。

在西安机场城际线调试期间,列车行驶至北客站站—渭河南站区间时,单网情况下会频繁出现 MA 超时而引起的紧急制动故障。现场实际测量发现:西安机场城际线北客站站—渭河南站区间与 4 号线草滩停车场在物理空间上无隔离,两线之间最小距离为 80 m,西安地铁 4 号线采用天线覆盖,西安机场城际线采用漏缆覆盖。实地测试发现,4 号线定向天线方位角有一部分打入西安机场城际线,经协商后,4 号线调整了定向天线方位角并降低该基站功率。为了确保 2 个网络无同频干扰,西安机场城际线再次进行测试并进行详细分析,具体结果如下。

地铁 4 号线和西安机场城际线在北客站站—渭河南站区间的基站使用 GPS(全球定位系统)时钟源授时,实现时钟同步,并配比相同子帧、相同时隙且冻结无线性能配置数据等相关参数。在此工况下,测试西安地铁 4 号线和西安机场城际线的 LTE 基站按分别单独开启和同时开启共分三步进行。根据测试结果,依据《LTE-M 系统需求规范》进行推算分析可得:

- 1) 西安机场城际线和地铁 4 号线最小场强值为 -81 dBm ,大于容许的最小场强 -95 dBm 。
- 2) 信噪比 17 dB ,大于容许的最小信噪比 3 dB 。
- 3) 最大时延 42 ms ,小于容许值 150 ms 。
- 4) 丢包率为 0.01% ,小于容许值 1% 。
- 5) 干扰裕量根据《城市轨道交通车地综合通信系统(LTE-M)规范》的要求,LTE-M 信噪比指标全线在 3 以上,结合工程经验可要求信噪比指标大于 6。由此,根据西安机场城际线与地铁 4 号线现场实际,为避免产生同频干扰,两个网络必须保证隔离度为 12.02 dB ,即干扰裕量需大于 12.02 dB 。干扰裕量=有用信号强度-干扰信号强度+ 8 dB (障碍物阻挡的损耗)- 8 dB (屏蔽门阻挡损耗)。地铁 4 号线关闭、西安机场城际线开启时,在草滩停车场的 4 号线干扰裕量为 24 dB ;西安机场城际线关闭、4 号线开启时在草滩停车场的机场线干扰裕量为 20 dB 。

干扰裕量 24 dB 和 20 dB 都大于 12 dB ,均满足规范要求。

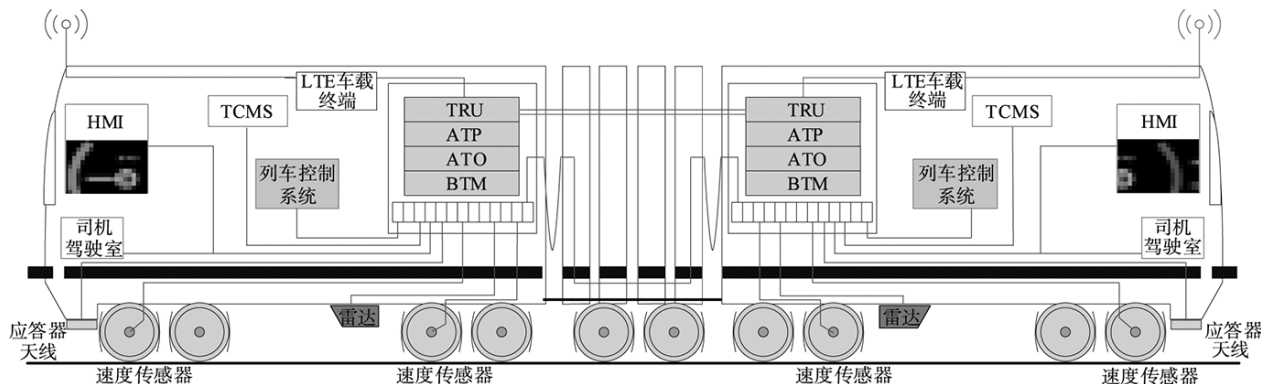
通过现场调整、测试及验证,两家 LTE 无线通

信各项技术指标在北客站站—渭河南站区间的草滩停车场均满足《LTE-M 系统需求规范》的设计需求和实际需求,解决了西安机场城际线 MA 超时而引发的紧急制动故障。

2.2 信号设备故障排除及调整

车载 ATP 设备在车头、车尾各设置一套,头尾

两端通过通信线缆相连,以实现头尾两端设备间的通信及车地无线通信的双路冗余。车头、车尾的车载 ATP 设备自成系统,一端的车载系统控制不依赖于另一端的终端设备。车载 ATP 单端设备采用“二乘二取二”的安全冗余技术,以确保车载设备的安全性、可靠性及可用性。车载 ATP 设备如图 3 所示。



注:HMI为人机接口;TCMS为列车监控管理系统;TRU为车载无线单元;ATO为列车自动运行;BTM为应答器传输单元。

图3 车载ATP设备示意图

列车车头、车尾各安装1套TRU,两端互为冗余。TRU与TAU接口通过车地无线通信网络发送和接收CBTC车地无线通信数据。TRU通过以太网连接与车载ATP/ATO设备进行数据传输,TRU通过车地无线通信传输列车编号、位置信息、MA等。

2.2.1 地址解析协议报文无应答导致TAU地址解析失败

按照地址解析协议(ARP),VOBC需要在接收TAU的广播请求后进行回复。VOBC不回复TAU定时、定向的单播ARP请求,连续忽略3次后TAU判断ARP老化,开始重新广播ARP请求。

查看车载监控板日志ARP报文发现,TAU定期向VOBC发起的单播ARP请求没有收到回复,连续3次后TAU发起广播请求1次或者多次后才得到VOBC回复。ARP报文无应答会导致TAU地址解析失败,造成列车紧急制动降级。此故障曾多次发生,回顾多次紧急制动前后日志,发现VOBC多次出现不回复广播ARP请求的情况。

查看发生该故障时段的完整日志发现,此时由于ARP老化,使地址为20.50.5.102的VOBC处于单通状态,TAU无法找到地址为20.50.5.102的VOBC,并无法转发报文,造成网络中断2s,导致列车降级(此时处在单网行车)。

针对此故障,通过采取优化通信协议措施后,收发数据正常,解决了此类故障。

2.2.2 LRE(远程以太网)功率因数过小导致通信延时

分析单网运行数据结果,在排除由LTE网络通信质量问题引起的MA超时时,从信号板卡设备所处车载电磁环境、高温耐受情况及抗干扰等方面入手,对不同功率参数进行实验室测试并验证效果。

列车头尾两端通过通信线缆相连,并分别设置LRE转换器进行数模/模数转换,以实现头尾两端长距离设备通信,以及车地无线通信的双路冗余。通过分析故障数据,确认1车及14车信号头尾通信不稳定,有数据丢包现象。更换1车及14车LRE板卡后,未复现丢包现象,故确定为LRE单板故障。

1) 车载网络链路整体排查。为验证信号车载通信质量是否受车辆外部干扰影响,对车辆VVVF(变压—变频)等设备在不同负载下的通信质量进行试验。收集A网车辆在不同负载情况下的车载通信网络的通信质量波形并进行对比。通过对比发现,在A网下,不同功率参数的测试结果相同,信号波形无明显变化。这就证明车载通信网络对车辆运行中产生辐射的抗性较强,通信质量未受明显影响。

2) 高温环境测试情况。将发生故障的LRE板卡返厂后,分别在55℃~85℃环境下进行测试,并使用通信软件监控通信结果。测试数据显示,LRE板卡通信正常,通信0丢包。为验证高温是否对LRE板卡有影响,继续提高温度进行测试,当测试温度

达到 93℃时,板卡死机,无法进行通信。当降至室温后,板卡仍无法自愈,必须手动重启才能恢复。对现场 LRE 板卡进行内部温度测量时,未见有 50℃高温以上的,因此排除高温原因对板卡的影响。

3) 抗干扰测试及调整。对故障的 LRE 板卡在改变功率参数、内部添加抗干扰元件、更换接地方式等的不同情况下进行板卡抗干扰性能测试,同时在板卡旁用电机不断启停模拟干扰。测试结果显示,LRE 板卡受外界环境影响出现丢包情况,原因是 LRE 功率因数过小导致通信延时,从而影响列车运行。为提高抗干扰性能,综合考虑通信效果,并结合工程实践经验,对 LRE 板卡采用调大功率参数、添加内部抗干扰磁环、优化接地方式等措施。

2.2.3 ZC 设备故障

ZC 设备是 CBTC 系统地面核心控制设备,是地—车信息交互的枢纽。ZC 与 CBI、ATS、车载 ATP、相邻 ZC、维护设备接口等设备,可根据通信列车所发来的位置信息、联锁进路信息和轨旁设备提供的轨道占用/空闲信息,为控制范围内的通信列车计算生成 MA,并通过无线通信系统传输给 ATP 车载子系统,保证其控制区域内通信列车的安全运行。ZC 是计算列车 MA 的主要设备,相邻 ZC 通信超时或 ZC 板卡故障,都将导致 MA 发送失败。

西安机场城际线的 ZC 在集中站设置,调试中发生过两类偶发故障:一类是空港新城站下行、摆旗寨站上行(ZC 交接区)站台作业完成后,与接管的 ZC 建立连接较慢,故障现象为无推荐速度或推荐速度起来较慢;另一类是秦宫站 ZC 出现备系离线情况。针对列车在 ZC 管辖区移交边界处发生延迟与接管的 ZC 建立链接的问题,根据日志数据分析如下:

1) 建立链路滞后的原因:列车在站台完成作业后,ZC 发送给列车的 MA 只到移交边界处,列车没有及时和接管的 ZC 建立连接,导致 MA 无法延伸进入接管的 ZC,交互信息中 ZC 未收到信息包,造成列车主动断开链接。

2) 备系离线原因:主系向备系发送同步数据时出错,备系 3 个周期同步失败导致宕机。

对以上两类故障,可通过优化 ZC 软件来解决。新版软件在西安机场城际线培训中心拷机试验 60 d,未出现异常情况对原软件进行升级,更新后新

版软件各项功能正常,测试结果良好,解决了上述问题。

2.2.4 车载 ATP 板卡故障

MA 信息经过交换机板、无线板发送至 ATP 主控板进行计算,交换机板、无线板故障后,信息无法传递到 ATP 主控板,导致列车 MA 超时。其解决办法为更换车载 ATP 板卡。

3 结语

通过上述故障原因分析可知,因 MA 超时导致列车的紧急制动故障是由于 LTE 网络及信号设备故障综合形成的结果。故对全线线路和设备采取了如下具体措施:① 针对 LTE 故障,全线排查馈线、电桥接头等硬件并进行相应测试,场强满足设计要求后动车试验,结果均符合要求。② 将全部列车的车载信号 LRE 板卡进行功率参数调整并进行静态测试,使其达到有效抗外部干扰信号的要求。③ 更换故障板卡,并对有关车载软件、ZC 软件进行升级。采取以上措施后,截至目前,通过收集大量数据验证,因 MA 超时导致紧急制动的故障未再出现。

无线网络优化是无线网络工程交付和运营维护的一个重要过程,可划分为工程优化和运维优化两个阶段。在工程建设期间,需要综合采取优化网络设置、提高施工质量、提升设备性能等手段,并按实际建设工程数据,对存在的业务指标和业务性能相关问题,通过项目工程参数调整及优化网络相关参数,以达到解决问题、提升或改善网络质量、确保无线网络安全的目的;运营开始后,仍要结合存在问题和设备故障,定期进行无线网络性能测试,及时地处理故障、排除外界干扰、改善网络质量,以确保行车安全。

参考文献

- [1] 潘亮.轨道交通 CBTC 信号系统可靠性模型分析[J].电子世界,2019(17):5.
- [2] 张妍莹,祝陶美,王涛.CBTC 系统列车运行间隔控制仿真研究[J].铁道通信信号,2018(10):57.
- [3] 王炳者.列车车地通信故障对列车追踪与移动授权的影响分析[J].数字通信世界,2018(12):54.
- [4] 蔚璠,汤旻安.基于层次时间自动机的移动授权的建模与验证[J].科学技术与工程,2020(11):4540.

(收稿日期:2019-02-28)