

轨道交通多模车载信号系统设计*

汪小勇^{1,2,3} 董德存¹ 欧冬秀¹

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 2. 卡斯柯信号有限公司, 200071, 上海;
3. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 博士研究生)

摘要 对轨道交通领域多模车载信号系统及其应用进行分析。研究多模车载信号系统的用户需求, 对现有的多模车载信号系统的功能和架构进行分类归纳。建立功能模块组合的结构模型并进行分析, 给出多模车载信号系统的设计建议。

关键词 轨道交通; 多模车载信号系统; 系统设计

中图分类号 U283.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.016

Research on the Design of Multimode On-board Signal System

WANG Xiaoyong, DONG Decun, OU Dongxiu

Abstract With an analysis of multimode onboard train signal system and its application, the user's requirements for the system are studied, the functions and architecture of the system are classified and summarized. On this basis, a structural model of function module combination is established and analyzed, design suggestions for the multimode onboard train signal system are proposed.

Key words rail transit; multimode onboard signal system; system design

First-author's address State Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China

目前应用于轨道交通的信号系统, 其轨旁和车载设备基本是按同一控制模式进行功能分配和接口定义, 两者一一对应, 紧密耦合。不同车载信号系统的轨旁和车载不能互通运行。通常将这种仅能在单一控制模式下运行的系统定义为单模车载信号系统。与此相对, 多模车载信号系统则是同一车载或轨旁可在不同控制模式下运行的系统, 能兼容其它模式信号系统的功能需求和接口。

相对于多模车载信号系统, 单模车载信号系统

在开发、验证和安全评估方面更易于实现, 但同时也给互通运行带来了限制。即使是具备互联互通功能的 ETCS(欧洲列车控制系统)、CTCS(中国列车控制系统) 和 CBTC(基于通信的列车控制) 系统, 也不能实现不同制式线路间的列车互通运行。单模车载信号系统为不等寿命周期建设的线路升级改造和国铁与城市轨道交通间的互通运行带来了很大障碍。

1 多模车载信号系统需求

多模车载信号系统可根据轨旁的信号设备制式进行灵活适配, 实现在不同轨旁系统间的互通运行; 同时, 多模车载信号系统还可在某套系统故障时启用另一套系统, 避免城市轨道交通因为控制系统故障而受到影响。

1.1 实现互通运行

目前我国铁路干线采用 CTCS, 而城市轨道交通基本采用 CBTC 系统。由于信号系统制式不同, 配置单模车载信号系统的铁路列车不能直接进入城市轨道交通区域, 导致通勤客流需要换乘, 影响了效率。为解决城市规模扩张情况下人们的便捷通勤问题, 越来越多的城市开始进行市域线路的建设, 以解决市郊通勤问题以及从高铁站到市区的快速交通问题。该类线路一方面会尽可能利用干线铁路资源, 另一方面也会穿越市区。但若仅配置 CTCS 或 CBTC 系统, 都不能将这两种类型的轨道交通衔接起来, 为此需要一种能兼容 CTCS 和 CBTC 系统的多模自适应轨道交通信号系统。

相同的情况在既有线改造中也同样存在。既有线基本上都是基于轨道电路的固定闭塞或准移动闭塞的信号系统, 而目前的主流信号系统均为基于通信的移动闭塞模式的信号系统。在旧线改造

* 国家重点研发计划资助(2018YFB1201403)

过程中又很难将旧制式的信号系统一次性翻新成新制式信号系统,而轨旁设备和车载设备均存在混合运行的情况,因此目前单模控制系统无法解决该问题,很难实现线路分段平滑升级,而一次性更新改造和倒接升级无论对于项目计划、项目运营以及风险控制都不是很有利。由此,很多用户提出了采用兼容性多模车载信号系统来进行既有有线平滑升级的要求。

1.2 增强系统可用性

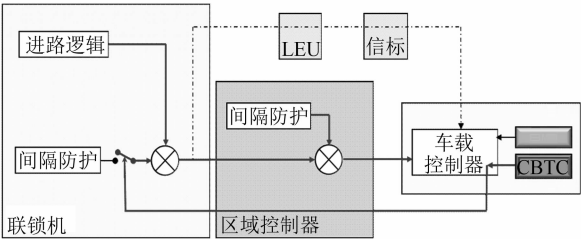
城市轨道交通的正常运行与否将直接影响着城市的正常运转。信号系统故障会直接对城市轨道交通运营产生影响,轻则延误,重则中断运营,对城市交通秩序造成影响。对于大城市和超大城市而言,保证信号系统的可用度是一个非常关键的问题。单模信号系统受各种因素的影响,不可避免地会出现一些故障,需增加异构冗余或降级后备系统来维持整个线路的正常运行。增强信号系统可用性的需求和互通运行的需求相比,在对车载信号系统提出较多需求之外,也对轨旁信号系统提出了相应的配套需求。

2 多模车载信号系统结构

如果将车载信号系统的运算单元看作是车载信号系统的“核”,则多模车载信号系统可以根据其功能模块复用的程度和运算单元的配置分为两类。一类是主控功能模块复用一个运算单元,可称之为单核多模车载信号系统;另一类是主控功能模块采用不同的独立运算单元,称之为多核多模车载信号系统。

2.1 单核多模车载信号系统

单核多模车载信号系统的典型例子是国内广泛应用的带有点式 ATP(列车自动防护)作为降级后备的 CBTC 系统,如图 1 所示。



注：LEU 代表线路编码单元

图 1 带有点式 ATP 降级后备的 CBTC 系统

该车载信号系统可自动适应不同的轨旁控制

模式。如:轨旁信号系统可提供移动闭塞和进路闭塞时,轨旁设备可根据车站值班员的操作或司机的模式选择自动适配对应的控制模式。其中,移动闭塞的移动授权信息经区域控制器计算后由车地自由无线系统传递至车载控制器,固定闭塞的点式变量信息由 LEU(线路编码单元)和轨道上的应答器传递至车载控制器。

单核多模车载信号系统可解决轨旁的区域控制器故障或车地无线通信无法使用导致列车控制系统无法工作的问题,也可解决同一列车在固定闭塞和移动闭塞两种不同的轨旁控制区域混合运行的问题。从车载控制器的角度而言,如图 2 所示,大部分的功能模块均是共用的,仅在来自轨旁的授权信息方面存在不同信息通道。

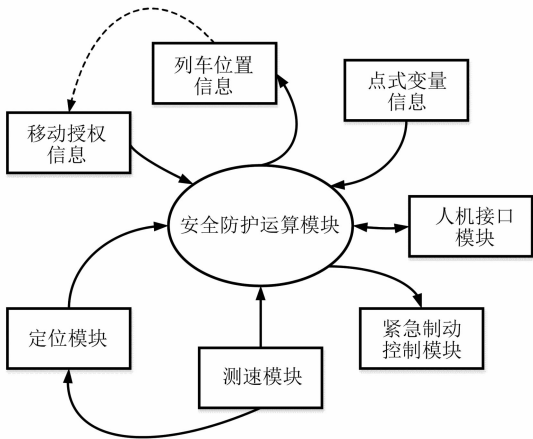


图 2 单核多模车载信号系统组成

在单核多模车载信号系统中,安全防护运算模块作为核心模块监控列车的运动状态信息和司机的控制命令,并根据轨旁授权使用的轨道资源信息来保护列车的运行安全。当列车运行安全无法得到保证时,安全防护运算模块将输出紧急制动命令。图 2 中,定位模块和测速模块用于监控列车运行状态,人机接口模块用于获取司机的控制命令,紧急制动控制模块用于输出列车紧急制动命令。它们和安全防护运算模块一起均为两种控制模式(固定闭塞和移动闭塞)下共用的系统。移动授权信息模块和点式变量信息模块用于提供轨旁授权使用的轨道资源信息,这两种模块实现了异构冗余,可在一个模块不可用的情况下维持列车以 ATP 方式运行。

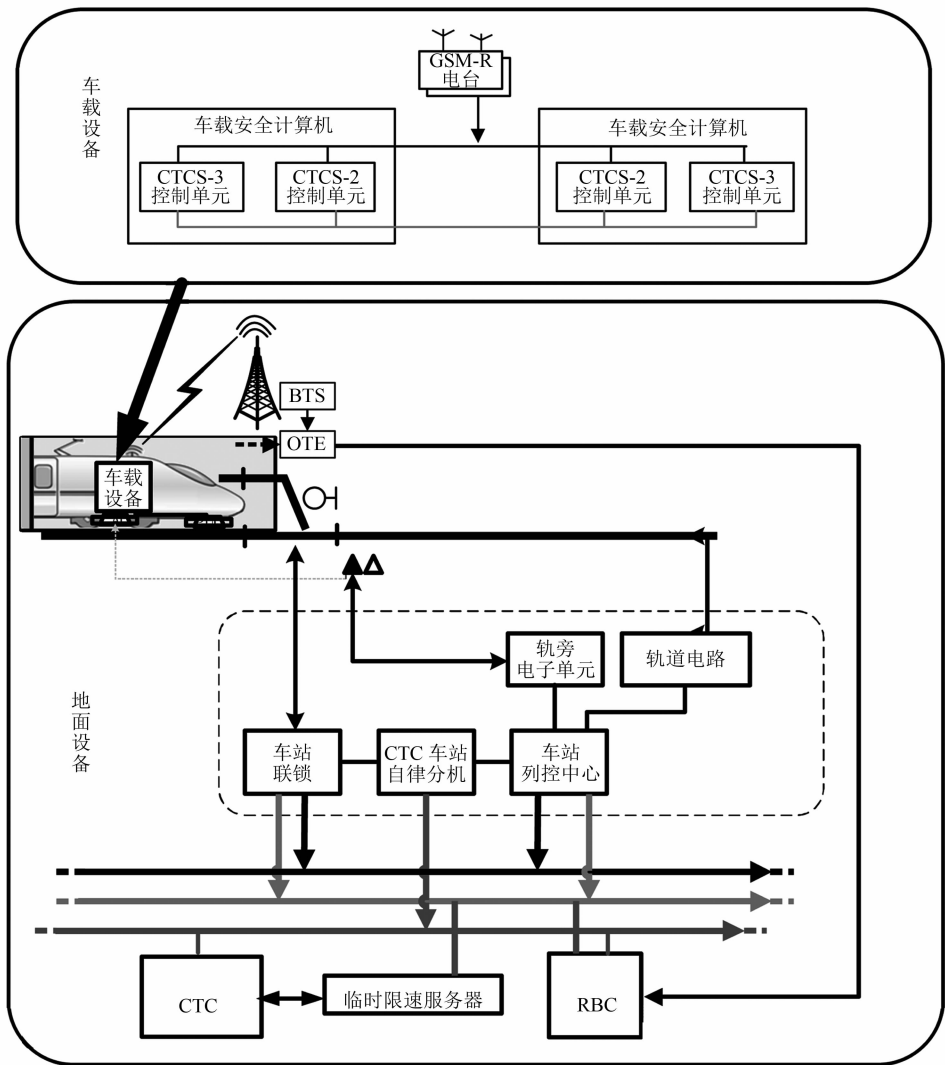
由于单核多模车载信号系统异构冗余的部分仅为轨旁授权使用轨道资源信息模块部分,对于车

载其余功能模块的可靠性并不能实现有效提升。因此其解决的主要问题是混合运行和轨旁及单制式车地信息交互故障问题。由于采用了不同的控制模式,增强了系统的异构性,减小了共模系数,但两种模式间的切换不可避免地会对车载信号系统

的控制带来扰动,不能真正做到无缝切换。

2.2 多核多模车载信号系统

多核多模车载信号系统的典型例子如图 3 所示。这是一种配置了 CTCS-2 的 CTCS-3 系统,广泛地应用于我国高速铁路的信号系统中。



注：GSM-R 代表铁路综合数字移动通信系统；CTC 代表中央调度集中；RBC 代表无线闭塞中心；BTS 代表基站；OTE 代表光传输设备

图 3 具备 CTCS-2 和 CTCS-3 级别的车载信号系统

多核多模车载信号系统分为 CTCS-3 和 CTCS-2 两个部分。其中 CTCS-3 车载系统通过 GSM-R 网络与轨旁的 RBC 进行通信,由 RBC 基于固定自动闭塞的原则生成移动授权的命令,并传递给 CTCS-3 车载信号系统。CTCS-2 车载通过轨旁应答器和 ZPW2000 轨道电路获取轨旁由联锁和 TCC(CTCS-2 中的列控中心)计算的速度信息。CTCS-3 与 CTCS-2 的级间转换正常情况下在转换区通过级间转换应答器时自动进行,也可以由司机在列车速度降至 CTCS-

2 允许速度以下时由人工进行切换。

多核多模车载信号系统可实现列车在 CTCS-3 和 CTCS-2 不同配置的线路区域混合运行。同时对于 CTCS-3 的线路而言,还可以实现在 CTCS-3 故障时利用 CTCS-2 作为后备降级系统,维持列车以 ATP 进行安全防护的模式继续运行。如图 4 所示,该系统的主控制功能由不同的安全运算功能来完成,轨旁提供的列车运行信息也是由不同的通道来提供的,仅在测速定位、紧急制动控制和人机单元 3

个部分采用共同的模块,实现了最大的异构冗余。

相对于单核多模车载信号系统,多核多模车载信号系统除轨旁控制信息需异构冗余外,安全防护运算模块也是异构冗余的。无论是轨旁信息或通道故障,还是安全防护运算模块故障均可保证列车的正常运行得以继续。

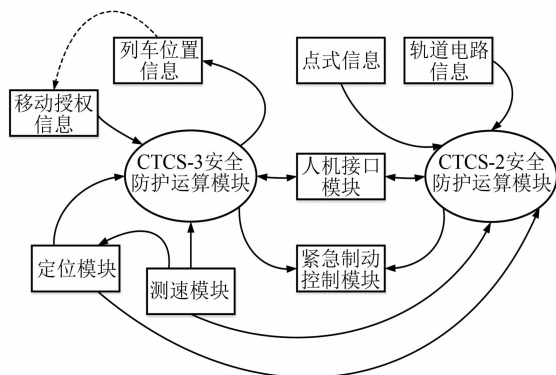


图4 多核多模车载信号控制系统

多核多模车载信号系统由于安全防护运算分别由不同的运算单元来计算,其同步和切换机制尤为重要,错误的切换会引起严重的安全问题,在可用性方面也会带来列车非预期制动。

3 多模车载信号系统设计建议

无论是单核多模车载信号系统,还是多核多模车载信号系统,均在一定程度上实现了不同制式间的异构冗余,最大程度地提高列车运行控制系统的可靠性,有效缩减因设备故障而对运营造成的影响。对于既有线路的改造还可以最大程度发挥既有投资效益,且在不影响既有线运营的情况下,实现车载信号系统的无扰升级,升级后的系统可靠性亦远远高于既有系统。

多模车载信号系统实现了不同制式系统间异构冗余,但相对于以前采用设备冗余的车载信号系统,其控制的平滑性和一致性问题变得异常突出,这主要体现在多核多模车载控制系统中。鉴于不同制式的。控制系统在闭塞原理和控车方式上有很大的不同,要实现不同模式间的无扰切换,需研究不同制式间的同步机制、冗余和切换原理,且在不影响效率的约束条件下对功能和架构进行重构。

3.1 统一的对象定义

由于不同模式的设计局限性,对车辆的输入不完全相同,同时针对不同类型的列车,其车辆参数和特性亦不完全相同。因此,需要从两个角度对列

车进行统一定义描述,一是梳理不同模式与车辆之间的输入-响应-输出关系,统一输入输出,实现控制方式的统一;二是针对各种不同的列车建立统一的列车定义。这样无论在何种模式下及何种车辆配置中,都可以有针对性地实现控制器对列车的精确控制。

3.2 不同模式下系统功能抽象建模

根据“输入-处理-输出”的模型处理方法,分别抽象各自系统的列车定位、速度测量、列车控制、安全输出等核心功能,并进行统一描述。采用固定格式的抽象逻辑语义和布尔表达式相结合的方式,抽象出“与”“或”“非”等逻辑运算,以及“条件”“判断”“延时”“滤波”等算术运算,将核心功能运算与配置条件进行隔离,保证核心功能的平台化。

在功能模型抽象统一的基础上,采用硬件模块化技术和软件分层技术,即安全功能和非安全功能隔离、核心运算和功能配置输入输出分离、接口通信和功能计算分开,最终实现不同模式的系统级异构的平台。

3.3 多模车载信号系统的运营可用性分配

多模车载信号系统的运营可用性依赖于其RAM(Reliability, Availability and Maintainability,可靠性、可用性和可维修性)指标的分解、分配和实现,但又有别于传统设备级冗余系统的管理方式。除需要从功能可用性的角度进行RAM的分析外,还需要从运营的可持续性进行分析。考虑不同系统间的耦合关系和切换影响的同时,对可能参与的人工切换时由人为因素的引入所造成的变化亦需关注。对于多模车载信号系统而言,应尽可能对其应用的场景、故障模式及相应的操作进行分析。在此基础上,借助RAM管理方法和管理工具建立起运营可用性的系统RAM模型,进行RAM的指标分解与分配,并贯彻到设计实现中,最终RAM指标的落实与否仍然还需通过实际的运营数据进行检验并修正。

以单核多模车载的典型控制系统——带有点式ATP降级后备的CBTC系统为例,在传统的RAM计算中,均基于主用CBTC故障时立即可切换至点式ATP降级后备模式投入运营来考虑。但实际上对于目前的车载信号系统设计,当CBTC模式不可用时,点式ATP模式并不能立即可用,这受限于列车与点式应答器之间的位置关系。当列车发生故障,离点式应答器较远时,列车需要以RM

(限速模式)或 ATP 切除模式运行至点式应答器才能获取到变量信息进入点式 ATP 模式运行。这段以 RM 或 ATP 切除模式运行的距离所需要的时间对于运营可用性计算而言是一个应该加以考虑的因素,这也是传统的 RAM 计算中指标与实际运营相比有较大差别的原因。针对这一问题的关键,是将单核多模典型车载信号系统中的点式 ATP 降级系统替换为连续式 ATP 降级系统,可大大提升运营的可用性指标,并得到了实际工程项目的验证。

3.4 多模车载信号系统的设计约束

运营可用性只是多模车载信号系统设计约束中的一个因素,不同的运营场景会对该系统提出不同的约束条件。多模车载信号系统应根据实际项目的需求来定义约束和边界条件。例如,对于目前方兴未艾的市域线路而言,其目的是为解决铁路网和城市轨道交通网络中力所不能及的问题。市域线路目前已成为铁路网和城市轨道交通网之间的桥梁和纽带,解决了通勤客流去市区上班的问题。这就要求多模车载信号系统至少应能在 CBTC 和 CTCS-2/CTCS-3 制式的系统中混合运行,进而要求多模车载信号系统能实现制式间平滑无扰的切换。在进行这一系统架构设计时,多核多模车载就更贴切要求。在此基础上进行运营可用性指标的反演,确认 CBTC 信息和 CTCS 信息的处理机制的安全,即可开始进行正式的设计工作。

CTCS+CBTC 系统中,多核多模车载信号系统能解决跨区运营所带来的兼容性问题。同时为保证做到平滑无扰切换,A 制式系统在控车过程中,B 制式系统应随时监督是否已接近切换至 B 制式系统的区域,并根据监督结果确定是否要完成 B 制式系统的初始化,同 A 制式系统进行相关的同步和自检,保证 B 制式系统投用后即可运营,保证运营效率。与单核车载信号系统相比,采用多核多模车载信号可进行有效的信息隔离,防止不同空间的变量

被错误地引用,不足之处是信息在不同系统间同步时增加了传输通道的负担,并降低了系统的实时性。

4 结语

随着公众对轨道交通的可用性和灵活性的要求越来越高,以提高可用性和实现不同制式混合运营为目标的多模车载信号系统将成为必然的发展趋势。在统一的对象定义的基础上,通过对不同模式下车载信号系统功能的抽象建模,全面分析各种运营可用性指标受到影响的关键因素,可更加真实地反映车载信号系统的运营可用性指标,防止车载信号系统与运营期望不一致的情况发生。

参考文献

- [1] IEC. International Electrotechnical Vocabulary-Chapter 191: Dependability and quality of service; IEC 60050-191[S]. Geneva: IEC, 1990.
- [2] CTCS-3 级列控系统总体技术规范;Q/CR 661-2018[S]. 北京:中国铁路总公司,2018: 1.
- [3] 汪小勇. 基于通信的列车控制系统轨旁信号显示方案[J]. 城市轨道交通研究,2011(9): 69.
- [4] 穆进超,程剑锋,冯凯. 自主化 CTCS-3 级车载设备双系热备技术研究[J]. 中国铁路,2018(9): 5.
- [5] 汪小勇. 浅谈点式信号系统[J]. 铁道通信信号, 2011(6): 15.
- [6] 汪小勇. 城市轨道交通可靠性研究[J]. 铁道通信信号, 2016(11): 68.
- [7] 卡斯柯信号有限公司. 一种基于车载控制器的闭塞模式自适应控制系统;ZL201610580518. 6[P]. 2018-11-20.
- [8] 卡斯柯信号有限公司. 一种点连式 ATP 系统;ZL201610580675. 5[P]. 2019-02-01.
- [9] 卡斯柯信号有限公司. 一种系统级异构的热备冗余信号系统;ZL201610580703. 5[P]. 2019-01-08.
- [10] 卡斯柯信号有限公司. 双制式融合的轨道交通车载控制系统;ZL201720303249. 9[P]. 2018-02-16.

(收稿日期:2019-04-16)

(上接第 61 页)

- [2] 程多多. 城市地下结构抗震延性分析及地下空间安全管理[D]. 南京:东南大学,2010.
- [3] 曲哲. PQ-Fiber_Manual_v1. 6. [CP]. 北京:清华大学,2012.
- [4] 王巍. 基于 FLAC 的地震分析方法研究及其在地下隧洞中的应用[D]. 南京:河海大学,2008.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质

量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范;GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

- [6] 李丽. 基于 ABAQUS 的高速公路隧道地震动力响应研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.

(收稿日期:2018-12-07)