

城市轨道交通 CBTC 系统互联互通测试平台的设计与实现^{*}

万勇兵 王大庆

(上海申通地铁集团有限公司技术中心, 201103, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘 要 针对不同厂商研制的 CBTC(基于通信的列车控制)系统, 如何验证其是否符合互联互通规范要求, 已成为产品在工程上应用推广的瓶颈。定义了互联互通型 CBTC 系统架构, 分析了 CBTC 系统互联互通的测试需求, 提出了 CBTC 系统互联互通测试验证平台的技术要求。在此基础上, 设计并实现了互联互通型 CBTC 系统测试验证平台。实际应用表明, 该平台可对互联互通型 CBTC 系统及所包含的子系统进行全面的功能、性能和接口测试, 解决了 CBTC 系统互联互通验证的技术难点。

关键词 城市轨道交通; 互联互通; 基于通信的列车控制系统; 测试平台

中图分类号 U231.7

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.01.031

Design and Realization of Test Platform for Interoperable CBTC system of Urban Rail Transit

WAN Yongbing, WANG Daqing

Abstract How to verify whether the CBTC system designed and produced by different manufacturers conforms to the standard requirements of interoperation has become the bottleneck of engineering application and promotion. The architecture of interoperable CBTC system is defined, then the test requirements of CBTC system interoperation are analyzed, and the technical requirements of the test and verification platform for CBTC system interoperation are put forward. On this basis, the test and verification platform for interoperable CBTC system is designed and realized. Actual application shows that the platform can conduct comprehensive functionality, performance and interface tests on the interoperable CBTC system and its subsystems, solving technical difficulties in the verification of interoperation of CBTC system.

Key words urban rail transit; interoperation; CBTC system; test platform

Author's address Technique Center of Shanghai Shentong

Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China

随着中国城市轨道交通协会(以下简称“协会”)组织编写的有关 CBTC(基于通信的列车控制)系统互联互通系列标准的发布和实施, 国内互联互通型 CBTC 系统建设如火如荼地开展^[1]。作为国家示范工程项目, 重庆首次在轨道交通 4、5、10 号线和环线上实现了互联互通。这意味着, 在今后的城市轨道交通建设中, 必然要求在规划城市轨道交通网络时, 满足互联互通要求。然而 CBTC 系统属于复杂巨系统, 即使各厂商依据相同的标准, 但因各自理解和自身设计的不同, 导致在产品具体实现上存在一定差异。因此, 如何验证不同厂商的系统是否符合互联互通规范要求, 成为产品研制和应用推广的工程技术难题^[2]。

本文依据协会发布的系列标准, 设计开发了一套 CBTC 系统互联互通测试平台, 在实现与被测系统闭环的半实物仿真条件下, 可为跨厂商的互联互通型 CBTC 系统及其所包含的子系统提供功能、性能和接口的交叉测试验证。

1 互联互通定义和架构

1.1 互联互通定义

城市轨道交通的互联互通是指装备不同信号厂家车载设备的列车可以在装备不同信号厂家轨旁设备的一条轨道交通线路内或多条轨道交通线路上无缝互通安全可靠运营^[3]。

从国内外城市轨道交通互联互通研究现状来看, 目前实现互联互通主要有 4 种处理方式: ① A 家车载设备在 B 家 CBTC 线路上运行; ② A 家轨旁设备作为 B 家线路的延伸段设备组成完整的工程

^{*} 上海市工业强基专项项目(GYQJ-18-2-03)

线路;③ A 家的 ATS(列车自动监控)可以控制 B 家线路并指挥 B 家车载设备运行;④ 线路间 ATS 的互联互通。

1.2 系统功能

根据文献[3]给出的定义,互联互通型 CBTC 系统主要由 ATS 子系统、CBTC 轨旁设备(含 ZC(区域控制器)等)、CBTC 车载设备(含 ATP(列车自

动防护)、ATO(列车自动运行)等子系统)、CI(计算机联锁)和 DCS(数据传输子系统)等组成。

如下图 1 所示,与传统 CBTC 相比,互联互通型 CBTC 系统物理接口和功能接口中增加了列车与邻线地面设备间的接口,以及各线间地面设备间的接口。

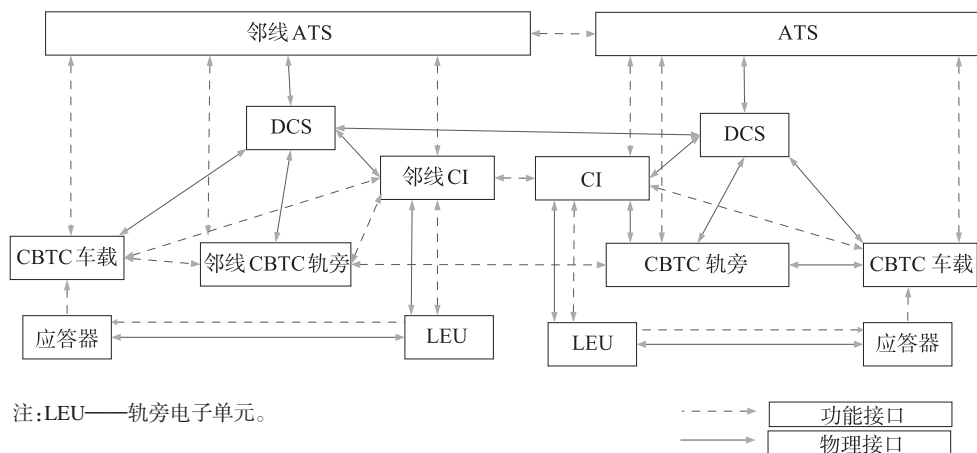


图 1 互联互通型 CBTC 系统架构图

2 互联互通测试平台需求分析

2.1 CBTC 互联互通测试需求

系统测试是确保不同厂商产品及系统符合标准规范,验证其实现互联互通的重要环节。根据 CBTC 系统互联互通测试生命周期划分,将测试验证活动分为产品供应商测试、第三方实验室室内测试和试验线测试三个阶段[4-5]。

对 CBTC 系统互联互通进行验证应根据功能分配进行测试需求的划分,即可测需求和不可测需求。其中,对可测需求,应借助互联互通系统集成实验室验证平台,采用黑盒测试的方法对系统及其各子系统进行测试验证。验证的内容包括系统功能需求、接口内容、车载电子地图和车-地通信协议等。本文重点关注第二阶段室内测试验证。

2.2 互联互通测试平台需求

对于室内测试验证,由不同厂商的轨旁设备、不同厂商的车载设备与测试平台构成闭环运行环境。通过仿真列车进行本线、跨线、其他互联互通线路运行,来验证 CBTC 系统互联互通功能。

因此,搭建 CBTC 系统互联互通测试平台,应能模拟线路上各基础设备(如信号机、道岔、区段、应答器、站台门、紧急停车按钮等)、仿真列车(包括车

辆仿真器、车载 VOBC(车载控制器)仿真软件、虚拟驾驶台等),以及与被测系统相关联的其它外部子系统,构建与 CBTC 系统实际运营场景一致的半实物仿真环境,提供系统互联互通功能、性能和接口测试条件[6]。

3 测试平台设计

3.1 互联互通测试平台功能设计

针对互联互通测试平台需求,本文设计的 CBTC 系统互联互通测试平台(结构框图见 2)主要由被测 CBTC 系统、CBTC 组件仿真器、接口仿真器、线路设备仿真器和车辆(群)仿真器 5 大模块组成,各模块的功能如表 1 所示。

3.2 互联互通测试平台接口设计

为实现测试平台各仿真器与被测系统无缝对接,各系统设备之间的接口设计是测试平台实现的关键技术难点[7]。通过分析信号与车辆、站台门等外部系统的接口需求,结合不同厂商 CBTC 系统的特点,对 CBTC 互联互通测试平台接口进行设计[8]。从图 2 可见,测试平台主要接口包括:

1) 车辆仿真器(TrainSim)与 VOBC 接口。二者间存在 3 种接口:① 采用继电器构成的驱动采集电路;② 通过以太网接口传输电平信号对应的表示

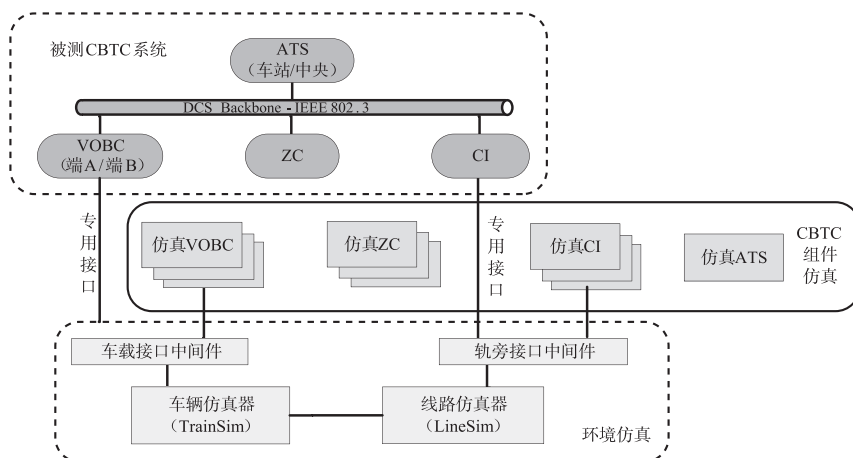


图2 互联互通测试平台系统结构框图

表1 测试平台各模块功能表

名称	主要功能	子模块
线路仿真器	模拟线路上不同类型的信号设备,显示线路平面图,模拟注入不同设备故障等	包括信号机、道岔、区段、站台门、紧急停车按钮、计轴、应答器等
车辆仿真器	模拟司机驾驶台各项操作,列车运行仿真和列车状态显示等	包括驾驶台仿真和车辆动力学仿真
接口仿真器	实现被测 CBTC 系统与线路仿真器、列车仿真器等之间的接口协议转换	轨旁接口中间件和车载接口中间件
被测 CBTC 系统	真实设备,可由不同厂商分别提供	包括 ATS、CI、ZC 和 VOBC 等
CBTC 组件仿真器	实现相邻线路的 CBTC 控制	包括 VOBC、ZC、CI 等

值;③通过RS-485传输TIMS(列车综合管理系统)信息(若有)。TrainSim通过车载接口中间件接收VOBC发送的列车控制命令(见表2),并向VOBC

发送驾驶台控制、列车状态等信息,经过信号转换后,实现VOBC控制。

表2 列车控制命令信息报文

编号	变量	字段	长度/byte	定义描述
1	VOBC_EB	紧急制动	1	0x55:有命令;0xAA:无命令;其它非法
2	VOBC_TracEnable	牵引使能	1	0x55:允许牵引;0xAA:禁止牵引;其它非法
3	VOBC_Zero	零速	1	0x55:列车零速;0xAA:列车移动;其它非法
4	VOBC_LtDrEnable	左门使能	1	0x55:允许开左门;0xAA:禁止开左门;其它非法
5	VOBC_RtDrEnable	右门使能	1	0x55:允许开右门;0xAA:禁止开右门;其它非法
6	VOBC_ATOTrac	ATO牵引/制动	1	0x01:制动;0x02:惰行;0x03:牵引;其它非法
7	VOBC_ATOValue	牵引/制动	2	用0~1023表示牵引/制动电平范围为0~20mA。
8	VOBC_OpenLeftDr	开/关左门	1	0x01:开左门;0x02:关左门;0x00:不动作;其它非法
9	VOBC_OpenRightDr	开/关右门	1	0x01:开右门;0x02:关右门;0x00:不动作;其它非法
10	VOBC_CabSwitch	驾驶室选择	1	0x55:激活A端;0xAA:激活B端;0xFF:默认
11	VOBC_RMEnable	RM使能	1	0x55:允许切换RM模式;0xAA:禁切换RM模式;其它非法
12	VOBC_CMEnable	CM使能	1	0x55:允许切换CM模式;0xAA:禁切换CM模式;其它非法
13	VOBC_AMEnable	AM使能	1	0x55:允许切换AM模式;0xAA:禁切换AM模式;其它非法

注:AM——列车自动运行模式;RM——受限制的人工驾驶模式;CM——编码人工驾驶模式

2) 线路仿真器(LineSim)与CI接口。二者间存在2种接口:①采用继电器构成的驱动采集电路;②通过以太网接口传输线路中各设备的实际状态。LineSim通过轨旁接口中间件接收CI发送的线路设备控制命令信息,并向CI发送线路设备状态信息(见表3),经过信号转换后,实现CI控制。

3) 车辆仿真器与线路仿真器接口。二者间采用RJ-45以太网接口连接,两者之间的数据传输采用UDP/IP方式通信。TrainSim向LineSim发送列车的位置信息(见表4),LineSim向TrainSim发送应答器报文信息,实现列车位置的校正,以及列车的运行轨迹的实时显示。

表3 线路设备状态报文

编号	字段	长度/byte	说明
1	信号机包类型	1	0x01
	信号机总数量	2	n_1
	信号机状态包	$8n_1$	略
2	计轴轨道区段包类型	1	0x02
	计轴轨道区段总数量	2	n_2
	计轴轨道区段状态包	$5n_2$	略
3	道岔包类型	1	0x03
	道岔总数量	2	n_3
	道岔状态包	$6n_3$	略
4	信标包类型	1	0x04
	信标总数量	2	n_4
	信标状态包	$5n_4$	略
5	PSD包类型	1	0x05
	PSD总数量	2	n_5
	PSD状态包	$5n_5$	略
6	PESB包类型	1	0x06
	PESB总数量	2	n_6
	PESB状态包	$5n_6$	略
7	站台折返按钮包类型	1	0x07
	站台折返按钮总数量	2	n_7
	站台折返按钮状态包	$5n_7$	略
8	扣车按钮包类型	1	0x08
	扣车按钮总数量	2	n_8
	扣车按钮状态包	$5n_8$	略

表4 列车位置信息报文

编号	字段	长度/byte	说明
1	信息类型	2	0x0101:列车位置信息
2	列车ID	4	
3	列车运行方向	1	
4	左车头位置	8	Double 型
5	右车头位置	8	Double 型

注:ID 为标识。

4 互联互通测试平台实现及应用

4.1 互联互通测试平台-车辆仿真器

车辆仿真器由车辆动力学仿真和驾驶台仿真两部分构成。

1) 车辆动力学仿真。如图3所示,实时显示列车速度、加速度、门状态、EB(紧急制动)状态、列车完整性等信息;实时更新列车位置信息,由轨道区段ID和偏移量组成;通过接口板信息可查看 TrainSim 和 VOBC 之间的信息交互。

2) 驾驶台仿真。如图4所示,用于模拟司机驾驶台各项操作,主要通过驾驶模式、车门模式、车门控制、运行等级、方式方向手柄等选项,以及ATO发车、紧急停车、驾驶端激活等开关按钮来实现。端A/B分别代表列车的两端驾驶室,指示灯亮(红色)表示该端头被激活。



图3 车辆动力学仿真(部分)显示图

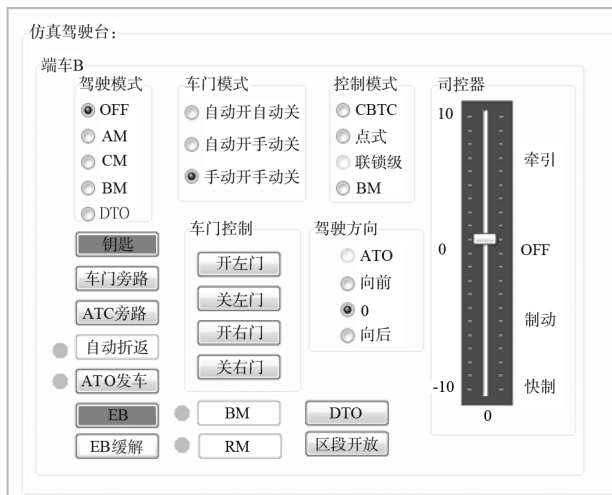


图4 驾驶台仿真(单端)显示图

4.2 互联互通测试平台-线路仿真器

线路仿真器用于模拟信号机、道岔、计轴、站台门、轨道区段等线路设备的动作和状态,实现对CBTC系统线路设备的功能逻辑仿真,以及设备状态和列车运行位置的实时性显示(见图5)、线路设备故障注入等,提供测试所需的各种列车运行工况。

在图5中,通过“故障注入”操作,可实现不同故障场景的测试。若在X10-X12进路正常办理,X10信号开放后,向G06区段注入“占用”故障,LineSim上显示该区段为被占用(显示红光带),同时将区段占用信息发送给CI设备,由CI控制进路始端信号机X10的显示,LineSim回采信号机的状态后更新显示。

4.3 平台应用

在实验室环境下,测试平台利用上海轨道交通张江试验线三站两区间工程线路数据,对卡斯柯(A家)提供的iTRANVI型CBTC系统和电气泰雷兹(B家)提供的TST_CBTC-IOP型CBTC系统进行了室内互联互通交叉测试,即分别验证了:

1) A家的车载CBTC设备在B家的轨旁CBTC设备(含ATS)上无缝互通正常运行;



图5 线路仿真器显示图

2) B 家的车载 CBTC 设备在 A 家的轨旁 CBTC 设备(含 ATS)上无缝互通正常运行。

依据文献[6]和文献[7]的要求,系统应测试项点 60 项,其中点式部分 18 项、CBTC 部分 34 项、其它 8 项(不在标准要求范围内,如点式红灯误出发功能、停车保证功能等),除列车站后自动折返、多车追踪等 5 项因线路条件不支持外,其余互联互通功能均测试通过。

可见,本文设计并实现的测试平台具备 CBTC 系统互联互通功能、接口和性能的测试验证能力,可应用于轨道交通互联互通型 CBTC 系统产品测试和工程验证。

5 结论

城市轨道交通互联互通网络化运营是大势所趋,互联互通 CBTC 系统可提高线路和设备利用率,实现车辆、车辆基地等资源共享及分段建设和定制运行线路等目标。通过对系统架构、系统测试需求和测试验证平台功能要求的分析,在满足互联互通上位标准基础上,结合地方 CBTC 建设特点,设计并实现了 CBTC 系统互联互通测试平台。该测试平台可以切实解决城市轨道交通 CBTC 系统互联互通测试验证的技术难题,并提供全场景、多工况的仿真方案。该测试平台的建成应用,将对提高产品质

量、缩短系统研发周期、降低项目建设成本等具有重大意义。

参考文献

- [1] 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(1):12.
- [2] 郭晓明.城市轨道交通互联互通信号系统产品工程化的研究[J].都市快轨交通,2019(6):26.
- [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)互联互通系统规范第 2 部分—系统架构和功能分配:T/CAMET 04002—2018[S].北京:中国铁道出版社,2018.
- [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)互联互通测试规范第 1 部分—CBTC 部分测试及验证:T/CAMET 04012.1—2018[S].北京:中国铁道出版社,2018.
- [5] 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)互联互通测试规范第 2 部分—点部分测试及验证:T/CAMET 04012.2—2018[S].北京:中国铁道出版社,2018.
- [6] 王大庆.城市轨道交通 CBTC 系统验收测试方法[J].城市轨道交通研究,2016(3):21.
- [7] LIU B, GAO CH. Key technologies of the independent and innovative communication-based train control system in China[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 2(1):28.
- [8] 张凯,万勇兵.CBTC 系统与车辆系统电气接口分析和设计[J].铁道通信信号,2018(3):79.

(收稿日期:2020-06-01)