

# 城市轨道交通 CBTC 系统仿真实验室设计

崔亦博<sup>1</sup>, 焦怡博<sup>2</sup>, 孙 旺<sup>1</sup>, 王壮锋<sup>1</sup>

(1. 中国铁道科学研究院 通信信号研究所, 北京 100081;

2. 北京交通大学 计算机与信息技术学院, 北京 100044)



**摘 要:**设计了城市轨道交通 CBTC 系统仿真实验室的建设方案。CBTC 系统由诸多子系统构成,集成度高,硬件设备多。实验室按照先搭建各子系统,最后整体集成的思路进行设计。实验室各子系统可独立进行仿真实验,也可由各子系统配合完成整体实验。通过合理规划,在一间实验室内完成了完整 CBTC 系统的仿真环境搭建。该方案保证了整个 CBTC 系统功能的完整性,将设备集成于同一实验室也减少了占地面积,降低了实验室建设成本,为类似实验室的建设提供了参考。

**关键词:**城市轨道交通;基于通信的列车控制;仿真;子系统;集成

**中图分类号:**U 283;G 644

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7167(2017)05-0122-04

## Design of CBTC System Simulation Laboratory for Urban Rail Transit

CUI Yibo<sup>1</sup>, JIAO Yibo<sup>2</sup>, SUN Wang<sup>1</sup>, WANG Zhuangfeng<sup>1</sup>

(1. Signal & Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences,

Beijing 100081, China; 2. School of Computer and Information Technology,

Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A construction scheme for urban rail transit CBTC system simulation laboratory was designed. The CBTC system consists of various subsystems, so it is highly integrated and has much equipment. According to the construction scheme, we built subsystems firstly and then integrated the whole system. Each subsystem can run the simulation experiment independently, and some experiments can also be completed by the whole system. Through reasonable planning, a complete CBTC system simulation environment was built in one laboratory. The scheme ensures the integrity of the whole CBTC system, and the integration of the equipment in the same laboratory also reduces the occupied area and reduces the cost of laboratory construction. It also provides reference for the similar laboratory construction.

**Key words:** urban rail transit; Communication Based Train Control(CBTC); simulation; subsystems; integration

## 0 引 言

随着中国城市化进程的加快,越来越多的城市将轨道交通建设作为未来的重要发展方向。至 2016 年末,国内城市轨道交通运营城市总数已超过 29 个<sup>[1]</sup>。基于通信的列车控制 (Communication Based Train

Control, CBTC) 系统是当前城轨领域发展的热点,相较于传统的轨道交通信号系统, CBTC 系统具有信息传输实时性高、行车间隔短、无线通信能力强等优势。CBTC 系统是安全苛求系统,应遵循故障导向安全的设计理念<sup>[2]</sup>。因此需通过最高等级的 SIL-4 安全认证,它是欧洲铁路联盟以 IEC61508 为基础制定的执行标准<sup>[3]</sup>。EN50128:2011 不仅将安全完整性等级 SIL (Safety Integrity Level) 划分为 4 级,更规范了各等级下软件的需求、设计、开发、测试、确认各阶段的活动流程和具体要求<sup>[4]</sup>。要通过严苛的安全认证,便需要依靠完整的仿真环境对系统进行完备的测试。CBTC 系统

收稿日期:2016-12-15

基金项目:中国铁道科学研究院基金课题(1451TH7302)资助

作者简介:崔亦博(1992-),男,河北石家庄人,硕士,研究实习员,

主要研究方向:轨道交通信号系统测试验证。

Tel.: 18511548835; E-mail: cuiyibo@rails.cn

的硬件设备众多,功能复杂,许多系统级的测试需各子系统协同参加才能完成。若将不同子系统分开安置于各实验室,在协同测试时会产生诸多不便,因此有必要在同一实验室内搭建一套完整的系统仿真环境,以提高实验效率。

## 1 CBTC 系统介绍

以中国铁道科学研究院与广州市地下铁道总公司研制的 MTC-I 型 CBTC 系统为例,介绍系统的组成及功能。整个 CBTC 系统由以下子系统组成(系统总体结构见图 1)。

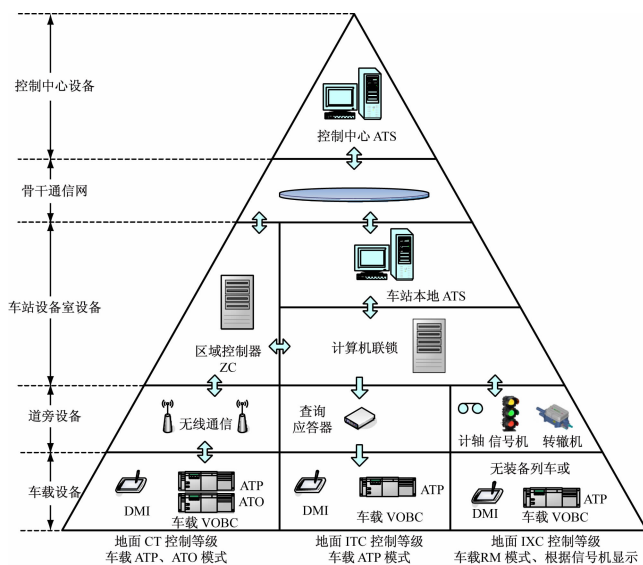


图 1 系统总体结构图

(1) 列车自动防护 (Automatic Train Protection, ATP) 子系统,此子系统包括车载 ATP 设备 (Vehicle On-Board Control Unit, VOB) 和轨旁区域控制器 (Zone Controller, ZC)。ATP 子系统负责监督列车的运行速度和列车状态 (包括列车车门、完整性、司机操作等信息)。它完成列车超速防护、控制前后列车间安全间隔、实现车门与站台屏蔽门联动等功能<sup>[5]</sup>。

(2) 列车自动监测 (Automatic Train Supervision, ATS) 子系统,由控制中心和车站本地控制设备组成。ATS 子系统完成列车运行图绘制、列车运行自动追踪、进路自动控制等功能<sup>[6]</sup>。

(3) 列车自动运行 (Automatic Train Operation, ATO) 子系统,由车载设备组成。ATO 子系统主要负责列车在有人辅助或无人状况下的列车自动驾驶,它需在 ATP 子系统的监督下使用。ATO 系统可自动完成列车的牵引、巡航、惰行、制动等功能,它减轻了司机的劳动强度,实现了列车运行过程中的电能的合理分配,在节能的同时保证了列车运行的平稳<sup>[7]</sup>。

(4) TYJL-III 型计算机联锁 (Computer Based Interlocking, CBI) 子系统。CBI 子系统以计算机为主

要技术手段实现现场设备的联锁控制,如道岔、信号机等设备。

(5) 数据传输子系统 (Data Communication System, DCS),DCS 子系统实现各设备之间的数据传输功能。

## 2 实验室布局

CBTC 系统仿真实验室坐落于中国铁道科学研究院通信信号创新基地二层,实验室搭建了一整套 CBTC 系统仿真环境,在实验室内即可对各子系统或整个系统进行仿真测试。实验室主要被划分为机柜区、工作站区、车载设备区、办公区 4 个区域。

### 2.1 机柜区

完整的 CBTC 系统硬件设备包含众多机柜,实际现场会将机柜设置于控制中心、车站设备室等地<sup>[8]</sup>。在实验室中为了便于操作和布线,将所有子系统机柜集中摆放于机柜区,如图 2 所示。机柜区后方墙壁设置安全电源,各机柜可就近获取供电。机柜集中放置也方便实验人员对机柜进行维护操作,例如有分属不同机柜的多块板卡需要更换时,若机柜放置于不同实验室,会给操作人员带来一定麻烦。此区域摆放 ATS、ZC、联锁子系统的机柜,用以模拟控制中心、车站设备室等地的环境。此区域机柜是整个 CBTC 仿真系统的核心,道旁联锁设备的控制、列车移动授权的计算和转发都由这些机柜完成。机柜自身含一套维护用 KVM 液晶套件,采用稳定的 Windows Server 操作系统,可在此对机柜软件进行升级、维护、用户登录等操作。机柜的运算结果主要由工作站进行显示输出,实际现场中工作站一般设置于控制中心或车站的调度室,而机柜设置于设备室,两者通过专用网络连接<sup>[9]</sup>。在实验室仿真中,将工作站区域设置于机柜区旁,便于运算信息的输出显示。



图 2 机柜区

### 2.2 工作站区

工作站区模拟控制中心或车站调度室的工作站,实现列车进路排列、列车运行状态监督、运行图绘制等功能,如图 3 所示。工作站区由电脑主机、显示屏、键

盘鼠标等输入设备组成,此区域设置于机柜区前,通过线缆与机柜连接,获取机柜运算结果并输出显示。工作站相当于实验人员与机柜等核心硬件系统的人机接口,它将输入指令传输给后方机柜,并将后方机柜的运算结果输出。在此区域,实验人员根据实验目的进行排列进路、异常情况下轨道占用、扣车、跳停等操作,并在显示屏上监督列车的运行位置、速度、移动授权延伸等状态。将工作站区设置于机柜区前,相较于跨实验室传输数据节省了线缆长度,也有助于实验及培训人员了解仿真软件与硬件机柜的数据流关系。



图3 工作站区

### 2.3 车载设备区

车载设备区由驾驶台及车载设备分机组成,模拟地铁列车上司机室的设备,如图4所示。地铁列车在车头、车尾两端各有一套驾驶台和车载设备分机,由于实验室需仿真列车自动折返、驾驶台换端等操作,故需配备两套驾驶台及分机设备。车载设备区设置于工作站区对面,这样设计可方便实验人员操作。实验人员在驾驶台对仿真车进行加速、减速、列车控制模式切换时,需同时观察工作站上列车状态的变化,因此将车载设备区与工作站区对向设置大大地方便了实验人员操作。实验人员在驾驶台完成操作后即可观察工作站显示器上的列车状态,为车载设备与ATS等子系统的协同仿真提供了便利。



图4 车载设备区

### 2.4 办公区

办公区设置于实验室尽头,由工作台、主机、显示器等设备构成,此区域不执行CBTC系统的实验操作,不含有任何与CBTC系统有关的硬件设备。研发人员在此处进行软件开发、实验结果汇总、分析讨论等工作。在实验室内设置办公区方便了实验人员工作,在实验出现问题、发现系统漏洞时也可直接与研发人员讨论沟通。在研发人员对系统软件做出修改后,也可直接将软件更新于实验室仿真设备,提高了工作效率。

## 3 仿真系统搭建策略

CBTC系统包含众多子系统,数据交换多,逻辑复杂。在搭建CBTC仿真系统时,采用先子系统,后整个系统的搭建方式,如图5所示。此种方式先实现各子系统内部的硬件连接及软件功能实现,最后再通过子系统间的接口将整个系统集成起来。采用模块化的搭建方式不仅避免了搭建过程中系统接口混乱的问题,还使得不同子系统的搭建工作得以并行实施。搭建策略借鉴了软件集成测试中自底向上的集成思想,显著提高了实验室仿真环境的搭建效率<sup>[10]</sup>。在实验室搭建之初,需根据实验室布局设计将各硬件设备安置于相应区域内,然后各子系统针对各自需要的硬件设备分开搭建仿真环境。当子系统内部仿真环境搭建完毕后,需对子系统进行功能性测试,子系统功能全部实现后才可进行整个系统的集成工作。通过由子系统至整个系统的一步步集成工作,排除了子系统内部错误对整个系统的影响,模块化的思路在日后的维护、检修工作中也便于错误快速定位。

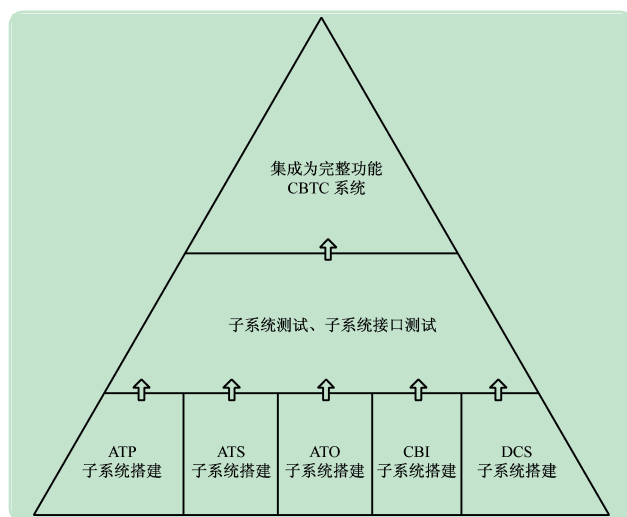


图5 仿真系统搭建策略图

## 4 人才培养

城市轨道交通产业的快速发展,对专业技术人才的培养提出了更高要求<sup>[11]</sup>。据预计,短期内轨道交通



专业人才供需比例为 1:4<sup>[12]</sup>。在人才培养上,实验室采取与搭建策略相反的“自顶向下”的路线,先让学员对整个 CBTC 系统有个宏观认识,在了解各子系统间工作原理及数据流交换后,再深入学习各子系统内部的软硬件功能。整个系统的所有设备都被集成于同一实验室中,也有利于学员对全系统有清晰认识。教学上采用先理论,后练习,最后参与实验的方式。在学员学习之初通过阅读系统需求及接口设计等文档,先对系统有个理论上的认识。然后学员在实验技术人员的指导下学习仿真软件的使用,仿真软件可在单独计算机上实现进路排列、列车状态追踪、运行图绘制等功能,且与实验室及实际线路中所用软件操作一致。通过在仿真软件上的反复练习,熟练学员的实验操作技术,也让学员对系统功能有了更加直观认识。学员对系统及仿真软件有了一定基础后,在实验室仿真环境下先复现以往的实验,熟悉实验室设备及操作流程后才可进入真正项目的实验。

城市轨道交通人才培养的传统方式是理论教学与实习分别进行,导致学生参加工作后发现实际项目与实习并不一致<sup>[13-14]</sup>。CBTC 系统仿真实验室依托实际项目,为学员提供了真实仿真环境和项目经历。实验室所做实验对实际线路的开通、维护都有重要意义,与传统理论教学相比具有更高的实用价值,也使得实验人员对实际线路中的设备、运营情况等有了真实认识,为轨道交通事业培养更多具有项目经历的人才。

## 5 实验室建设成效

CBTC 系统仿真实验室建成后,承担了多个重大项目的测试验证任务。实验室拥有一整套 CBTC 系统设备,可实现系统的全部功能,能够真实复现实际线路中出现的问题。在 SIL-4 等级的安全认证过程中,实验室进行了大量的系统测试和仿真实验。实验室落成 1 年多以来,已先后完成长沙中低速磁浮项目和广州七号线一期工程信号系统的仿真实验,上述两条线路在 2016 年均已开通运营,证明实验室的系统仿真效果经受住了实际线路运营的考验。

实验室搭建的 MTC-I 型 CBTC 系统,是我国首套拥有完全自主知识产权的 CBTC 系统<sup>[15]</sup>。此系统打破了国外垄断,填补了国产化 CBTC 系统实际线路应用空白。实验室在 MTC-I 型 CBTC 系统的研发过程中提供了许多实验支持,为系统研发做出了重要贡献。

## 6 结 语

CBTC 系统仿真实验室在合理规划下,在实验室内完成了完整 CBTC 系统的搭建工作,节约了占地面积,提高了实验的效率和协同性。实验室在新线安全认证、现有线路维护和人才培养上发挥了重要作用,落成 1 年多以来未发生任何安全事故,圆满完成了多项实验任务。事实证明,CBTC 系统仿真实验室方案设计安全可靠,将整个 CBTC 系统集成于一间实验室且功能齐全。与以往占有多间实验室乃至多个楼层相比,减少了硬件设备数量,也更有利于实验和教学的进行。该方案为空间紧张的大中院校、科研院所提供了解决问题的新思路,具有一定参考价值。

## 参考文献 (References):

- [1] 樊佳慧,张琛,卢恺,等. 2015 年中国城市轨道交通运营线路统计与分析[J]. 都市轨道交通, 2016, 29(1):1-3.
- [2] 韩云沛. 基于计算机虚拟化列车控制系统敏捷测试方法[J]. 工程技术(全文版), 2016(11):00279-00279.
- [3] 赵强,常振臣,李砾工,等. 国产化列车网络控制系统安全完整性等级评估与认证[J]. 机电传动, 2011(6):1-5.
- [4] 王瑞,徐宁,王财进,等. 安全软件验证确认在 BTM 开发中的应用[J]. 铁路技术创新, 2015(2):88-90.
- [5] 董恺霞. 城市轨道交通 CBTC 系统车载 ATP 的研究与仿真[D]. 兰州:兰州交通大学, 2011.
- [6] 陈志武. 基于 CBTC 的 ATS 数据结构分析与设计[D]. 成都:西南交通大学, 2010.
- [7] 张强,陈德旺,于振宇. 城市轨道交通 ATO 系统性能指标评价[J]. 都市轨道交通, 2011, 24(4):26-29.
- [8] 张德明. CBTC 制式下的 ATS 子系统研究[J]. 铁道通信信号, 2009, 45(12):1-4.
- [9] 李智,张琦. FZY 型 ATS 系统仿真平台结构分析与程序设计[J]. 铁路计算机应用, 2015(5):42-43.
- [10] 周永健,范明,张森,等. LDRA TestBed 在 CTC2-200C 扩展单元软件测试中的应用[J]. 机电传动, 2016(5):102-106.
- [11] 崔宏巍,胡松华. 城市轨道交通控制专业实践教学体系的构建[J]. 实验室研究与探索, 2015(1):185-188.
- [12] 张天彤,马松花,支斌,等. 城市轨道交通综合仿真实训基地建设的研究[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(8):244-248.
- [13] 张晓宁. 实验教学示范中心建设应该处理好的四个关系[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(12):86-88.
- [14] 褚正弟,吕恬生. 立足创新人才培养 创建一流的工程实践训练基地[J]. 实验室研究与探索, 2006, 25(1):105-107.
- [15] 肖宝弟,蔡昌俊,李晋. 城市轨道交通信号系统自主化整体技术方案——MTC-I 型基于通信的列车控制系统研发与应用[J]. 现代城市轨道交通, 2014(1):11-17.