

重庆与纽约两种轨道交通互联互通 CBTC 系统安全评估的对比研究*

冯浩楠^{1,2} 黄苏苏^{1,2**} 莫小凡³ 宋明^{3,4} 王逸³ 孙建国⁴

(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. 国家铁路智能运输系统工程技术研究中心, 100081, 北京;

3. 中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所, 100081, 北京;

4. 中铁检验认证中心有限公司, 100081, 北京//第一作者, 副研究员)

摘要 针对由城市轨道交通互联互通 CBTC(基于通信的列车控制)系统推广带来的风险,安全评估作为重要的监督环节显得尤为重要。在对重庆与纽约 2 个典型城市的互联互通 CBTC 系统架构分析的基础上,从安全评估标准、风险评估方法、安全认证过程及活动等 3 个方面对二者的安全评估进行详细对比。结合二者自身互联互通 CBTC 系统的特点和应用场景,制定了相适应的安全评估规则,并通过不同方法和途径实现了系统既定的安全目标。

关键词 城市轨道交通;基于通信的列车控制系统;互联互通;安全评估

中图分类号 U231.7; U231.6

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.10.003

Comparative Study on Safety Assessment for Rail Transit Interoperation CBTC Systems: Chongqing and New York

FENG Haonan, HUANG Susu, MO Xiaofan, SONG Ming, WANG Yi, SUN Jianguo

Abstract Aiming at the risks brought by the promotion of interoperable CBTC (communication based train control) system in urban rail transit, the safety assessment appears vital in particular as an important supervision process. Based on an analysis of the represented interoperation CBTC system architectures in Chongqing and New York, the assessment systems of both are compared from aspects of safety assessment standards, hazard assessment methods, safety certification process and activities. Combined with their interoperation CBTC characteristics and application scenarios, appropriate safety assessment rules are developed, and the established system safety goals are achieved through different methods and approaches.

Key words urban rail transit; CBTC system; interoperation; safety assessment

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

互联互通信号系统的安全性是城市轨道交通领域信号系统研究首要考虑的问题之一^[1-2]。结合城市轨道交通互联互通 CBTC(基于通信的列车控制)系统新的应用场景,如何快速准确地识别风险并对其进行评估,是地铁运营者和信号系统供应商应重点关注和研究的问题^[2]。本文在对重庆与纽约 2 个典型城市的轨道交通互联互通 CBTC 系统的架构和特点进行综述的基础上,重点从安全评估标准、风险评估方法、安全评估过程及活动等 3 个关键方面对 2 个城市的轨道交通互联互通 CBTC 系统进行了对比分析,对其安全评估的特点和差异进行了总结。

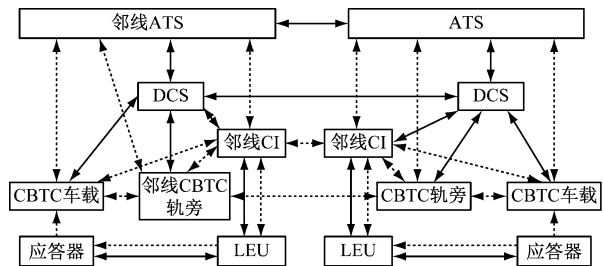
1 典型城市轨道交通互联互通 CBTC 系统

1.1 重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统

重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统功能分解为 74 个功能点,通过对接口的设计,完成系统互联互通功能的全覆盖。重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的架构^[3-4]如图 1 所示。图 1 中,实线为物理接口,虚线为功能接口,通过对功能接口和物理接口制定规范,实现车辆跨区运行的互联互通功能。

* 中国铁道科学研究院重点项目(2020YJ045)

** 通信作者

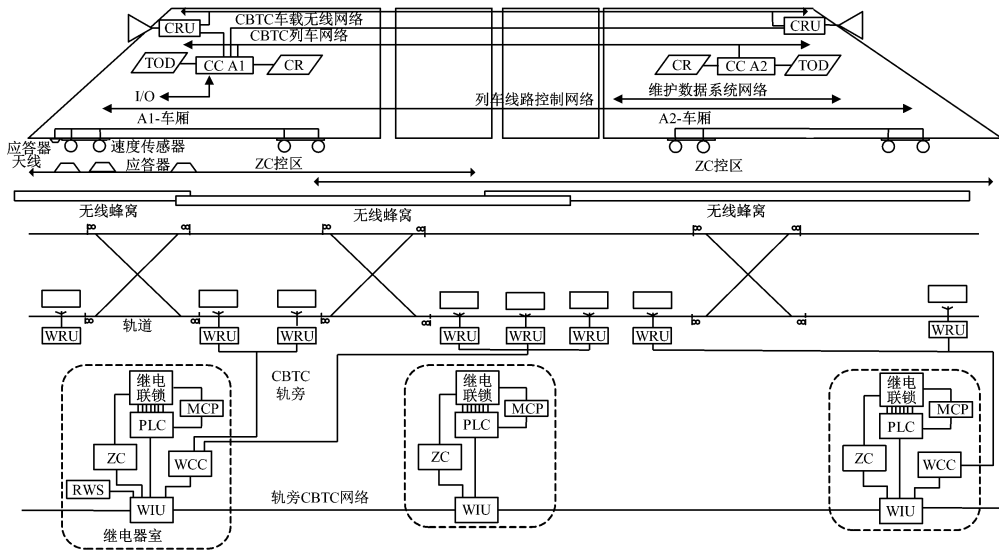


注:ATS 为列车自动监控;DCS 为数据通信系统;CI 为计算机联锁;
LEU 为轨旁电子单元。

图1 重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的架构
Fig.1 Interoperation CBTC system structure in
Chongqing rail transit

1.2 纽约轨道交通互联互通 CBTC 系统

纽约轨道交通(NYCT)是世界第5大地铁系统。NYCT互联互通CBTC系统是在既有线路上升级,除了车地之间能够互联互通外,还需考虑未改造的信号系统,保障二者兼容正常运行。NYCT系统制定了I2S(互联互通接口规范),建立了试验线路用作对轨道交通互联互通信号系统的测试。NYCT互联互通CBTC系统的架构^[5]如图2所示。



注: TOD 为列车值班员显示屏; CC 为车载控制器; CR 为车载天线; CRU 为车载天线单元; WRU 为轨旁无线单元; MCP 为维护控制面板; WCC 为轨旁蜂窝控制器; RWS 为远程工作站; PLC 为可编程逻辑控制器; WIU 为轨旁接口单元。

图2 NYCT 互联互通 CBTC 系统的架构
Fig.2 Interoperation CBTC system in NYCT

上述标准均是基于 EN 50126 和 EN 50219 的理念,从城市轨道交通信号系统全生命周期出发,对该系统的可靠性、可用性、可维护性和安全性(RAMS)进行规范和验证。城市轨道交通信号系统的安全架构和处理流程,通过 SIL(安全完整等级)实现定量的安全评估。

2 系统安全评估标准

2.1 重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统安全评估标准

为了确保互联互通 CBTC 系统安全运行,中国城市轨道交通协会制定了 T/CAMET 04013.2—2018《城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通工程规范 第2部分:安全评估规范》^[6]。重庆轨道交通既有线和延伸线互联互通通用产品遵照 T/CAMET 04013《城市轨道交通基于通信的列车运行控制系统(CBTC)互联互通工程规范系列技术》的要求进行评估;延伸线特定应用的安全评估基于 GB/T 21562.2—2015《轨道交通 可靠性、可用性、可维护性和安全性规范及示例 第2部分:安全性的应用指南》、GB/T 28808—2012《轨道交通 通信、信号和处理系统 控制和防护系统软件》及 GB/T 28809—2012《轨道交通 通信、信号和处理系统 信号用安全相关电子系统》进行评估^[7]。

2.2 NYCT 互联互通 CBTC 系统安全评估标准

NYCT 安全评估标准是基于 FRA(联邦铁路管理局)发布的 CFR(美国联邦法规)第 49 部分中的 209、234、236 节内容制定的。该标准是针对基于处理器的信号和列车控制系统的应用。

CFR 第 49 部分中的 236 节要求建立 RSPP(铁

路安全计划流程)和 PSP(产品安全计划)。其中, PSP 要求进行风险评估,用于证明待评估的系统不会出现超过预设先决条件的风险;与待替换的旧系统相比,新系统的 MTTHE(平均危险事件时间)更长。该标准中的风险评估方法推荐采用 ASCAP(公理化安全苛求评估流程)方法。

在安全评估过程方面,PSP 需包括:产品描述,操作环境,操作理念,安全需求,安全架构,风险日志,风险评估,风险减低措施评估,安全 V&V(验证和确认),安全保证原则,人因分析,培训,测试步骤和设备安装计划,安全警告,施工测试步骤,后期运行测试步骤,可用性和备份,增加和预定义变化等内容。

2.3 重庆与纽约的互联互通 CBTC 系统安全评估标准对比

重庆与纽约的轨道交通互联互通安全评估标准的相同之处为:①基于风险的安全管理;②采用系统方法进行风险识别、评估和管控;③多场景下的验证和确认;④第三方评估和最终批准。两者的差异如表 1 所示。

表 1 重庆与纽约的轨道交通互联互通 CBTC 系统性能指标对比				
Tab.1 Comparison of performance indicators of Chongqing-New York interoperation CBTC systems				
城市	安全标准	评估指标	风险因素	可读性
重庆	互联互通安全评估系列规范	SIL	基于随机故障的风险模型	具有描述性数字和表格
纽约	CFR 第 49 部分中的 209、234、236 节	MTTHE	人为因素	PSP 采用文字描述

3 风险评估方法

风险评估的重要作用是为了评估系统的脆弱部分,以及风险对系统造成的损害。风险评估可分为定量和定性两种。前者依赖于专家经验;后者通过设定定量的参数,如将危害或 THR(可容忍危险概率)作为定量评估风险的指标。风险评估方法有很多类型,其具体应用由工程性质、承包商偏好等因素决定^[8]。重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的风险评估方法推荐风险图方法。NYCT 互联互通 CBTC 系统的风险评估方法推荐 ASCAP 方法。

3.1 风险图

风险图是一种基于危险源的风险因素,通过概率形式描述系统组件故障模式之间的逻辑关系,常

用的描述风险程度指标为 SIL,具有后果严重程度、暴露在危险中的时间、避免危险的概率和危险发生概率等 4 个维度^[9]。风险图是一个定性和定量结合的影响分析手段,在 IEC 61508 中将其作为示例方法推荐。

3.2 ASCAP 方法

ASCAP 方法由弗吉尼亚大学铁路安全中心开发。该方法是基于蒙特卡罗模拟的一种风险评估算法,针对复杂系统建模并能够评估系统部件变化产生的影响^[10]。ASCAP 方法的原理是以列车为中心,评估列车与其他系统交互过程中的小概率风险事件。ASCAP 方法支持 CFR 中第 49 部分的 209、234、236 节规范,被 NYCT 在安全认证中推荐使用。

3.3 风险评估方法对比

两种风险评估方法对比如表 2 所示。由表 2 可知,风险图在适应性、复杂性、重复性和风险参数方面有优势,而 ASCAP 方法在适应性、成本效益、工具支持及视觉表达方面具有优势。

表 2 两种风险评估方法对比表		
Tab.2 Comparison of two risk assessment methods		
评估参数	风险图	ASACP 方法
透明度	0	0
适应性	+	+
可扩展性	-	-
复杂性	+	0
成本效益	-	+
可访问性	-	0
工具支持	-	+
重复性	+	-
视觉表达	0	+
风险参数	+	0

注: + 表示积极方面大于消极方面;0 表示作用平衡; - 表示消极方面大于积极方面。

4 互联互通 CBTC 系统的安全认证

NYCT 和重庆轨道交通都将互联互通的 CBTC 系统定义为子系统级别的互联互通,即来自一个承包商的 VOBC(车载控制器)能够在其他承包商的 VOBC 和 ZC(区域控制器)的系统内安全运行。同样,每个供应商的 ZC 能够在其他供应商提供的 CI 系统下安全运行。在这些情况下,CBTC 系统可能由不同供应商的互联互通子系统组成,因此需要确保系统级别的安全。

NYCT 和重庆轨道交通均定义互联互通的安全认证为系统级。为了实现互联互通 CBTC 系统的安全保障,二者在安全要素、危害日志、测试环境、安全认证步骤和电子地图等 5 个方面进行安全认证制度的制定。

4.1 安全要素

4.1.1 重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的安全要素

根据重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的架构,对该系统进行分解。其中,承载安全功能的系统安全元素包括车载 ATP(列车自动防护)系统、ZC 系统、CI 系统、互联互通公用电子地图、应答器系统、互联互通接口规范等。

4.1.2 NYCT 互联互通 CBTC 系统的安全要素

为了对不同设备供应商的子系统组成的互联互通 CBTC 系统进行安全认证,NYCT 将 CBTC 系统划分成 9 个安全要素,为模块化安全认证方法做基础。9 个安全要素包括:互联互通规范(要素 1)、车载 ATP 系统(要素 2)、ZC 系统(要素 3)、ZC 电子地图(要素 4)、车载 ATP 系统电子地图和 ATS 电子地图(要素 5)、应答器系统(要素 6)、预留 CBTC 接口的 CI 系统(要素 7)、接入 CBTC 系统的 CI 系统(要素 8)、互联互通 CBTC 系统(要素 9)。

与重庆轨道交通相比,NYCT 互联互通 CBTC 系统的安全要素涉及范围更广,细化程度更深,包含互联互通规范和各种类型的子系统;特别是,NYCT 在电子地图等方面分解得更细致。这是由于 NYCT 建立的互联互通 CBTC 系统是在既有线路上升级的,因此安全因素中须兼顾原有控制系统功能。

4.2 互联互通 CBTC 系统危害日志

4.2.1 重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的危害日志

依据 GB/T 21562—2008 中的生命周期模型,确定重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的安全需求。在识别系统边界的基础上,参考 GB 21562.2—2015 中的危害清单和轨道交通行业的经验,将互联互通 CBTC 系统可能产生的事故分为撞击、脱轨、人员跌落、触电、火灾、有毒物质或气体、爆炸、辐射、干扰、环境、恶意破坏、意外和灾难等若干类。重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的基本危害包括:71 种系统危害,31 种接口危害,55 种运营危害。将安全需求分解到各个 CBTC 子系统,其中,车载 ATP 系统有 36 条安全需求,ZC 系统有 14 条安全

需求,CI 系统有 26 条安全需求,数据准备有 17 条安全需求,应答器有 10 条安全需求,互联互通协议有 44 条安全需求^[11]。

4.2.2 NYCT 互联互通 CBTC 系统的危害日志

NYCT 根据 I2S 编制系统级危害日志,即 I2S 危害日志(包含识别的系统级别危害),然后再将危害分配给相关子系统,从而制定控制措施。设备供应商将安全需求纳入各个子系统危害日志,并提供相应的安全证据,以此证明提供的子系统具有保护措施,且能够缓解在 I2S 危害日志中列举的危害。I2S 危害日志的管理和设备供应商安全文件的审查由 NYCT 的 SSWG(系统安全工作组)在 ISA(独立安全审核员)的协助下完成。

I2S 的危害日志类型按照由工程阶段划分的 CBTC 系统的系统级别进行分组,如表 3 所示。

表 3 I2S 危害日志类型汇总		
Tab.3 Summary of I2S hazard log types		
工程阶段	系统	危害日志提供者
设计	CBTC	CBTC 供应商
设计	CI	CI 供应商
设计	ATS	ATS 供应商
设计	ISIM	ISIM 供应商
设计	车辆	供应商,地铁部门,机车装备部
设计	轨旁设备	轨旁设备提供商、信号集成商
设计	电子地图	CBTC 供应商
研发和实施		CBTC 供应商、CI 供应商、NYCT
运营		CBTC 供应商、CI 供应商、NYCT
维护		CBTC 供应商、CI 供应商、NYCT
培训		CBTC 供应商、CI 供应商、NYCT

注:CBTC 包括 VOBC、ZC;电子地图包括 ZC、VOBC、ATS、ISIM(集成服务和信息管理系统)。

重庆轨道交通在 T/CAMET 04010.4—2018《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 4 部分:互联互通危害分析》中对危害日志的危害项划分较为细致,并将危害因素和系统的安全要素逐一对应。NYCT 的危害日志仅确定危害类别,而后由各个承包商按照分类编制并汇总。

4.3 互联互通 CBTC 系统的测试环境

4.3.1 重庆互联互通 CBTC 系统的测试环境

重庆轨道交通搭建了互联互通 CBTC 系统集成测试实验室,用于设备供应商进行系统自测、互

联互通接口测试和模拟跨线测试。测试平台须至少包含互联互通连接的 2 条试验线路^[12-13]。实验室测试完成后,列车还需在试验线路中进一步补充未覆盖的测试项目。在单车测试和混合追踪验证完成后,系统即可具备互联互通单线和跨线运行的能力。

4.3.2 NYCT 互联互通 CBTC 系统的测试环境

NYCT 的互联互通测试环境包括系统的 ITF (集成测试实验室)和测试轨道 Culver 线两部分,用以测试互联互通 CBTC 系统的功能。ITF 除了进行系统互联互通功能测试外,还关注故障对整个互联互通 CBTC 系统的影响分析和评估。测试轨道 Culver 线用于对车地信息的交互测试^[5]。

经对比可知,重庆轨道交通和 NYCT 互联互通

CBTC 系统都须通过实验室的集成测试和现场测试环节后才能正式运营,测试环境是互联互通 CBTC 系统功能安全有效的重要保障。

4.4 互联互通 CBTC 系统的安全认证

4.4.1 重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的安全认证

根据工程实施的不同阶段,重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的安全认证流程可分为 3 个阶段:生命周期阶段的文档审核,测试见证,质量安全审核^[6]。

4.4.2 NYCT 互联互通 CBTC 系统的安全认证

NYCT 互联互通 CBTC 系统的安全认证流程如图 3 所示。

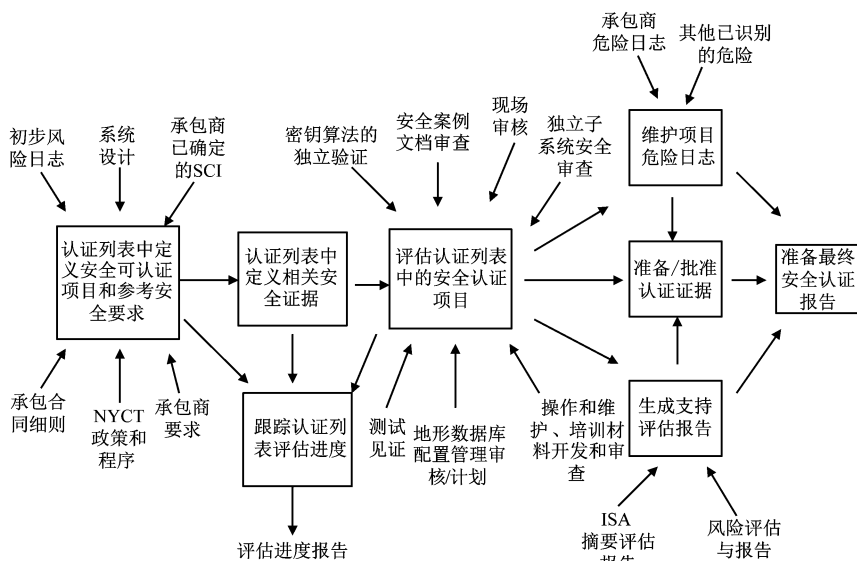


图 3 NYCT 互联互通 CBTC 系统的安全认证流程图

Fig. 3 Safety certification flow chart in NYCT

为了实现安全认证, NYCT 制定了详细的安全评估过程, 评估步骤如下:

步骤 1: 批准承包商的最终安全报告;

步骤 2: 批准 ISA 最终安全评估报告和建议书;

步骤 3: 批准 MTTHE 分析;

步骤 4: 批准和关闭所有相关危险;

步骤 5: 批准成功完成系统测试(包括现场测试、集成测试和功能测试, 以及工厂和分包商/供应商测试);

步骤 6: 核准规则和程序, 包括新的和经修订的规程和公告, 确保引进安全程序和实施系统所需的其他程序;

步骤 7: 批准所需的维护程序;

步骤 8: 批准培训材料和课程能够达到培训目标;

步骤 9: 核准工作组摘要报告;

步骤 10: SSCB(系统安全认证委员会)的安全认证, 签署最终安全证书报告。

将 NYCT 安全认证流程与安全要素关联形成模块化安全认证方法, 如表 4 所示。

综上所述, 重庆轨道交通按照工程生命周期进行安全活动布局; NYCT 则建立了安全要素与安全认证步骤对应的模块认证方法, 明确了安全认证的应用条件。二者安全认证划分的过程虽不同, 但都

表 4 NYCT 互联互通 CBTC 系统模块安全认证方法

Tab.4 Safety authentication method of interoperation CBTC module in NYCT									
评估步骤	安全要素 1	安全要素 2	安全要素 3	安全要素 4	安全要素 5	安全要素 6	安全要素 7	安全要素 8	安全要素 9
1	通用产品认证	通用产品认证	通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证	特定应用认证	通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证
2	通用产品认证	通用产品认证	通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证	特定应用认证	通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证
3		通用产品认证	通用产品认证			特定应用认证	通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证
4	通用产品认证	通用产品认证	通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证	特定应用认证	通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证
5		通用产品认证	通用产品认证				通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证
6							通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证
7		通用产品认证	通用产品认证				通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证
8		通用产品认证	通用产品认证				通用产品认证	特定应用认证	特定应用认证
9	安全工作组 系统工作组	安全工作组 系统工作组 车载工作组	安全工作组 系统工作组 ZC 工作组	安全工作组 系统工作组 ZC 工作组	安全工作组 系统工作组 车载工作组	安全工作组 系统工作组 轨旁工作组	安全工作组 系统工作组 维护工作组 培训工作组	安全工作组 系统工作组 维护工作组 培训工作组	安全工作组 系统工作组 维护工作组 培训工作组
10									

注:安全要素 1—7 的安全认证应用条件包括:①由 NYCT 首次进行 CBTC 系统的元素安全认证;②修改 CBTC 系统的安全元素。安全要素 8—9 的安全认证的应用条件为 CI 或 CBTC 系统进行调试时。

形成了一套完整的安全认证流程,保障了互联互通 CBTC 系统的安全。

4.5 电子地图的研制策略

4.5.1 重庆轨道交通互联互通 CBTC 系统的电子地图

重庆轨道交通制定了互联互通车载电子地图规范,将电子地图数据划分为线路数据、轨道区段数据、轨旁设备数据和安全通信协议数据 4 类^[14]。对轨道区段及其划分原则、电子地图方向、坐标位置、CRC(循环冗余校验)、道岔区域、道岔方向进行了约定,同时对电子地图元素数据结构进行了约定。各设备供应商遵照此规范进行了电子地图的制作。

4.5.2 NYCT 互联互通 CBTC 系统的电子地图

在 CBTC 系统部署中,NYCT 制定了电子地图的开发流程,实现了互联互通子系统各种电子地图内容的一致。规则如下:

- 1) CBTC 供应商的轨道勘察应根据 I2S 协议的精确度要求进行,勘察数据的准确性由执行勘察的设备供应商进行保证;
- 2) 由 1 个 CBTC 供应商开发车载 ATP 电子地图,供所有供应商的 VOBC 使用;
- 3) 每个 CBTC 供应商的 ZC 电子地图须基于同一家设备供应商提供的轨道勘察数据进行开发;
- 4) 在每个 CBTC 区域中,ATS 电子地图与 ZC

电子地图的一致性必须进行验证;

5) ISIM 的电子地图与 ATS 电子地图中的 CBTC 部分的一致性必须进行验证;

6) 每个 CBTC 供应商电子地图的生成、验证和确认流程相互补充,确保电子地图的一致性和准确性。

经对比可知,重庆轨道交通通过制定规范,硬性约束各个设备供应商电子地图的内容;NYCT 则是通过数据共享、验证和确认流程确保各个设备供应商电子地图数据的一致性。

5 结论

1) 在安全评估标准方面,重庆轨道交通和 NYCT 互联互通 CBTC 系统的安全评估标准不同,但二者都对风险进行了定量评估。

2) 在风险评估方法方面,重庆轨道交通采用的风险图专注于 SIL 设定,以实现整体系统的安全目标;NYCT 的 ASCAP 方法为一种仿真方法,该方法从以车辆为中心的角度出发,通过模拟 CBTC 系统的实际行为来衡量其安全性。两种方法各有优劣,可考虑将二者的优势融合,开发新的风险评估方法。

3) 在安全评估过程和评估活动方面,二者在安全要素、互联互通危害、测试环境、安全认证流程和电子地图等 5 个环节进行规定,实现各自互联互通 CBTC 系统的安全认证。

参考文献

- [1] 吴涛. 安全评估方法在轨道交通中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2002(3):52.
WU Tao. The application of safety assessment method to urban mass transit[J]. Urban Mass Transit, 2002(3):52.
- [2] 宁滨, 刘朝英. 中国轨道交通列车运行控制技术的应用[J]. 铁道学报, 2017(2):1.
NING Bing, LIU Chaoying. Technology and application of train operation control system for China rail transit system[J]. Journal of the China Railway Society, 2017(2):1.
- [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技术要求:T/CAMET 04010.2—2018[S]. 北京:中国铁道出版社, 2019:1.
China Association of Metros. System specification for interoperability of communication based train control system for urban rail transit, Part 2: Specification of system architecture and functional allocations; T/CAMET 04010.2—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019:1.
- [4] 冯浩楠, 范楷, 段宏伟, 等. 城市轨道交通信号系统互联互通协议框架研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018(11):63.
FENG Haonan, FAN Kai, DUAN Hongwei, et al. Study of interoperability of urban transit signal system protocol[J]. Urban Mass Transit, 2018(11):63.
- [5] 冯浩楠, 臧永立, 王俊高, 等. 重庆与纽约的城市轨道交通互联互通 CBTC 系统标准对比研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020(11):38.
FENG Haonan, ZANG Yongli, WANG Jungao, et al. Comparison research on interoperable CBTC system in urban transit of Chongqing and New York[J]. Urban Mass Transit, 2020(11):38.
- [6] 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)互联互通工程规范第2部分:安全评估规范:T/CAMET 04013.2—2018[S]. 北京:中国铁道出版社, 2019:1.
China Association of Metros. The engineering specification for interoperability of communication based train control system for urban rail transit, Part 2: Safety assessment specification; T/CAMET 04013.2—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019:1.
- [7] 乐梅, 张晋恺, 胡妃俨. 面向延伸线信号系统多厂商的互联互通认证[J]. 城市轨道交通研究, 2020(9):180.
LE Mei, ZHANG Jinkai, HU Feiyan. Multivendor interconnection certificate for the extension line signaling system[J]. Urban Mass Transit, 2020(9):180.
- [8] 彭北华, 永秀. 基于量化风险分析的城市轨道交通安全评估[J]. 城市轨道交通研究, 2019(8):148.
PENG Beihua, YONG Xiu. Urban rail transit safety assessment based on quantitative risk analysis[J]. Urban Mass Transit, 2019(8):148.
- [9] 刘晴. 基于风险图的轨道交通信号系统 SIL 分配方法[J]. 铁路通信信号工程技术, 2018(2):43.
LIU Qing. SIL allocation approach based on risk graph for urban rail transit signal systems[J]. Railway Signaling & Communication Engineering, 2018(2):43.
- [10] 陈耿钦. 基于 MAS 的列控系统安全分析平台架构和关键算法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
CHEN Gengqin. Research on architecture of MAS-based train control system's security analysis platform and key algorithms[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [11] 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4部分:互联互通危害分析:T/CAMET 04010.4—2018[S]. 北京:中国铁道出版社, 2019:1.
China Association of Metros. System specification for interoperability of communication based train control system for urban rail transit, Part 4: Hazard analysis of interoperability; T/CAMET 04010.4—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019:1.
- [12] 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 部分测试及验证技术规范:T/CAMET 04012.1—2018[S]. 北京:中国铁道出版社, 2019:1.
China Association of Metros. Test and verification specification for interoperability of communication based train control system for urban rail transit, Part 1: CBTC train control; T/CAMET 04012.1—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019:1.
- [13] 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:点式部分测试及验证技术规范:T/CAMET 04012.2—2018[S]. 北京:中国铁道出版社, 2019:1.
China Association of Metros. Test and verification specification for interoperability of communication based train control system for urban rail transit, Part 1: Intermittent train control; T/CAMET 04012.2—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019:1.
- [14] 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3部分:车载电子地图技术规范:T/CAMET 04010.3—2018[S]. 北京:中国铁道出版社, 2019:1.
China Association of Metros. The system specification for interoperability of communication based train control system for urban rail transit, Part 3: Specification of onboard electronic map data list; T/CAMET 04010.3—2018[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019:1.

(收稿日期:2021-01-17)