

城市轨道交通车辆独立安全评估策略

曹成鹏 李晓琳 高秋芙

(北京城市轨道交通咨询有限公司, 100068, 北京)

摘要 [目的]我国城市轨道交通车辆 ISA(独立安全评估)仍处于初步发展阶段,尚未形成较为完善的理论和规范化的标准,在专业化、系统化等方面仍存在不足,因此需对城市轨道交通车辆 ISA 策略进行研究。[方法]结合国内已开通运营和在建的城市轨道交通 FAO(全自动运行)项目,以车辆系统隐患识别和风险管控为中心,对整车设计、制造与试验验证等各阶段的安全评估活动及安全证明体系要点进行了 ISA。重点对 FAO 项目车辆特殊风险进行了 ISA,评估内容主要包括安全文档评估、特殊风险安全评估及安全审计,且贯穿整个车辆建设工期。[结果及结论]国内部分已完成车辆 ISA 的城市轨道交通 FAO 项目表明,车辆系统相关的风险控制已达到可以接受的程度,在评估策略、评估方法及评估报告等方面都积累了一定的理论和实践经验,但在专业化和系统化等方面仍存在不足,需完善车辆 ISA 体系,形成我国车辆 ISA 的标准。

关键词 城市轨道交通;车辆;独立安全评估

中图分类号 U279.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.03.036

Independent Safety Assessment Strategy for Urban Rail Transit Vehicles

CAO Chengpeng, LI Xiaolin, GAO Qiufu

(Beijing Metro Consultancy Co., Ltd., 100068, Beijing, China)

Abstract [Objective] China's independent safety assessment (ISA) on urban rail transit vehicles is still in its initial development stage in that the relatively complete theories and standardization remain to be formed, and there are still deficiencies in specialization, systematization and other aspects. Therefore, it is necessary to study the strategy of ISA on urban rail transit vehicles. [Method] In view of the FAO (fully automatic operating system) urban rail transit projects opened for operation and under construction in China, and with focus on hidden hazard identifying and risk control in vehicle system, ISA is conducted on the safety assessment activities and the key points of the safety certification system at stages of vehicle design, vehicle manufacturing, and test verification. Focusing on the special risks of vehicles in the FAO projects, ISA mainly includes safety document evaluation, safety assessment on spe-

cial risk, and safety audit, and runs through the entire vehicle construction period. [Result & Conclusion] Some of the FAO urban rail transit projects in China that complete the vehicle ISA show that the risk control related to the vehicle system is acceptable. Theoretical and practical experience in evaluation strategies, methods, and reports is accumulated. However, deficiencies still exist in specialization and systematization. It is necessary to improve the vehicle ISA system and form corresponding ISA standards for China.

Key words urban rail transit; vehicle; independent safety assessment

ISA(独立安全评估)是独立于系统设计、开发或运营的团队,依据证据,对计划开发系统的安全需求是否恰当、充分,以及系统是否满足这些既定的安全需求进行评估和判断^[1]。

在标准体系相对完善的欧洲,ISA 是车辆准入或投入运营的普遍要求。我国城市轨道交通安全评估还处于初步发展阶段,尚未形成较为完善的理论和规范化的标准。随着城市轨道交通技术的不断发展和标准化进程的不断推进,建设单位及厂家的安全意识也不断提升,ISA 也不断得到推广^[2]。

按照 GB/T 30013—2013《城市轨道交通运营基本条件》的要求,信号系统必须进行 ISA^[3]。近年来,随着 FAO(全自动运行)技术日臻成熟,FAO 线路在国内迅猛发展。在 FAO 线路的建设过程中,ISA 的范畴从原有单纯的信号系统,拓展到车辆系统、专用通信系统、站台门系统、轨道系统、电梯及自动扶梯、门禁等核心设备系统。目前,我国城市轨道交通 FAO 线路的车辆均进行了 ISA。此外,一些异于常规项目的车辆,例如国内第一条真正意义上采用城市轨道交通模式运营的温州轨道交通 S1 线,因其技术上的独特性,也对车辆进行了 ISA。本文结合国内已开通运营和在建的城市轨道交通 FAO 项目,对车辆 ISA 策略进行了总结提炼。

1 车辆 ISA 策略

车辆 ISA 策略以隐患识别和风险管控为中心,

从而评估车辆系统是否存在无法接受的风险。

1.1 隐患识别

隐患识别指车辆系统所有合理可预见的隐患是否都已经识别出来。车辆系统隐患识别的输入示例,如表 1 所示。

1.2 风险管控

风险管控是指每条隐患所导致事故的风险等级是否可接受,通过证明其符合规范和相关标准,证明其与参考系统的安全性一致,以及证明剩余风

险可接受等策略来完成。证明风险管控符合规范或标准的示例,如表 2 所示。

证明剩余风险可接受的评估关注点为剩余风险等级分析和风险减轻措施落实,其中:剩余风险等级分析的评估范围为隐患登记册、SIL(安全完整性)认证、体系审计及故障数计算,风险减轻措施落实的评估范围为隐患登记册、安全需求管理报告及验证与确认报告。

表 1 车辆系统隐患识别输入示例

Tab.1 Input examples of hidden hazard identification in vehicle system

输入条件	安全评估范围	安全评估标准
运营场景、车辆顶层危害事件	运营场景、线路环境	输入正确且无遗漏
	车辆危害清单	输入正确且无遗漏
车辆各子系统功能清单	各子系统的合同技术规范	输入正确且无遗漏
	各子系统设计标准	输入正确且无遗漏
	各子系统设计文件	输入正确且无遗漏
车辆各子系统接口功能清单	各子系统合同技术规范	输入正确且无遗漏
	各子系统设计文件	输入正确且无遗漏
	各子系统接口文件	输入正确且无遗漏
操作与维护手册	整车和各子系统的操作与维护手册	输入正确且无遗漏

表 2 证明风险管控符合规范或标准示例

Tab.2 Examples demonstrating the compliance of risk control with the standard

隐患/风险	规范或标准名称	具体风险点
碰撞时车体强度不足	EN 12663;2010《铁路应用—铁道车辆车体结构要求》	车体静强度和疲劳强度
运行中车辆与限界干涉	CJJ/T 96—2018《地铁限界标准》	车辆限界
运行中构架强度不足	EN 13749;2011《铁路应用—轮对和转向架—转向架结构要求的规定方法》	转向架构架静强度和疲劳强度
空气簧故障时车辆脱轨	GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》	车辆动力学
由于电磁干扰导致安全功能失效	EN 50121-3-2;2019《铁路应用—电磁兼容性 第 3-2 部分:机车车辆设备》	电磁兼容

判断风险等级并进行风险分析时,以最新设计方案为基准,通过风险矩阵方法对风险进行排序^[4]。判定依据为:

- 1) 如果部分导致隐患发生的原因未得到有效管控,则原始风险等级为不可接受;
- 2) 如果所有导致隐患发生的原因都得到了有效控制,则原始风险等级为可接受;
- 3) 如果导致隐患演变成事故的原因也得到了有效管控,则原始风险等级为可忽略。

风险减轻措施的落实需要做到全面、准确、到位:全面是指风险减轻措施中涉及的所有子系统都

要考虑;准确是指风险减轻措施的关闭证据要与减轻措施的要求一致,不能偏离;到位是指在诸多相关的证据中要采用最有力的证据关闭。

1.3 整车各阶段评估策略

整车评估可分为设计、制造与试验验证等阶段。设计阶段的整车安全评估活动及安全证明体系要点,如表 3 所示。制造与试验验证阶段的整车安全评估活动及安全证明体系要点,如表 4 所示。

1.4 FAO 项目车辆特殊风险评估

FAO 项目需根据 IEC 62267:2009《轨道交通—都市自动化有轨运输—安全性要求》中第 7 章定义

表 3 设计阶段的整车安全评估活动及安全证明体系要点

Tab.3 Key points of vehicle safety assessment activities and safety certification system at the design stage

整车安全评估活动	安全证明体系要点
设计质量保证体系审计(接口管理、需求管理、变更管理、配置管理、设计评审等)	隐患原因管控
审核车体强度和转向架强度计算报告	证明符合规范或标准
审核车钩强度、列车曲线通过能力和碰撞吸能报告	证明符合规范或标准
审核防火报告、EMC(电磁兼容)报告	证明符合规范或标准
审核各子系统报告	隐患识别、风险管控
审核 SIL 分配和证明报告	隐患原因管控
审核安全需求的验证与确认报告	风险减轻措施的落实

表 4 制造与验证阶段的整车安全评估活动及安全证明体系要点

Tab.4 Key points of vehicle safety assessment activities and safety certification system at the manufacture and verification stage

整车安全评估活动	安全证明体系要点
质量管理体系审计(车体、转向架、装配等)	证明符合规范或标准
现场见证安全相关试验过程	风险减轻措施的落实
审核车体、转向架、车钩等系统或设备型式试验报告	证明符合规范或标准
审核制动、客室门等系统或设备型式试验报告	风险减轻措施的落实
审核安全需求的验证与确认报告	风险减轻措施的落实

的 GOA4(无人干预列车运行)运营的危害场景,以及被评估项目的场景说明书,识别运营场景中可能存在的风险。FAO 项目危害场景示例如表 5 所示。FAO 项目车辆各阶段评估活动与安全审计示例如表 6 所示。

2 车辆 ISA 各环节内容

车辆 ISA 内容主要包括:安全文档评估、测试报告审核、安全审计及现场见证测试等。上述安全评估需要贯穿整个车辆建设工期,并根据项目进展的情况,安排安全审计和现场见证。评估人员采用基于风险的评估方法,通过抽样技术进行检查和评估。

表 5 FAO 项目危害场景示例

Tab.5 Examples of hazardous scenarios in FAO projects

运营场景	场景步骤	可能危害场景
列车自动唤醒	低压上电	充电机没有启动,系统自检和静态测试大量消耗蓄电池电量
	各系统上电自检	严重故障未能成功上报,列车带故障出库上线运行,导致发生严重事故
	监控空压机与充电机状态	两台空压机同时启动,短时间内总风压力达到规定值,系统检测认为各项正常,但由于压缩空气泄漏,短时间内空压机再次启动
	信号系统满足车辆静态和动态测试条件	信号系统错误发出允许继续进行车辆静态和动态测试的指令
	列车动态测试	车辆执行动态测试时与邻近车辆发生碰撞,导致结构受损

2.1 安全文档评估

安全文档评估的目标是审查和评估车辆厂家以及分包商的安全管理体系。安全文档评估流程如图 1 所示。

2.1.1 安全管理程序文档评估

审查和评估车辆厂家的安全管理体系,以及车辆厂家及其供应商在设计、制造、安装、测试及调试等阶段开展的安全管理的稳定性。对其过程管理进行评估,并确保遵守相关的安全守则、标准、法规

及规范。识别车辆厂家及其供应商对危害的辨识是否充分,且是否已对重要危害采取措施。检查车辆厂家相关人员的资质,对车辆厂家是否配置足够称职的员工执行其合同进行评估。

2.1.2 针对具体项目的安全相关文档评估

1) 对 EN 50126-1:2017《铁路应用—可靠性、可用性、可维护性和安全性的技术规范 and 证明》、EN 50128:2011《铁路应用—通信、信号和处理系统—铁路控制和保护系统软件》及 EN 50129:2018《铁路

表 6 FAO 项目车辆各阶段评估活动与安全审计示例

Tab. 6 Examples of vehicle assessment activities and safety audit at all stages in FAO projects

阶段	评估活动	安全审计项目
设计阶段	运营场景危害分析、FMECA(故障模式、影响及危害性分析)、车辆与信号接口安全分析、EN 62267:2009《轨道交通—都市自动化有轨运输—安全性要求》的符合性	设计质量保证体系(含接口、需求管理)、车辆安全体系
生产制造阶段	车辆相关的安全需求是否落实到试验大纲	GOA4 相关系统设备的采购与质量控制流程
厂内试验与调试阶段	FAO 相关的试验报告	车辆相关的 FAO 相关功能的测试
现场试验阶段	FAO 场景现场联调大纲及报告	FAO 场景现场测试
安全确认阶段	安全案例报告	

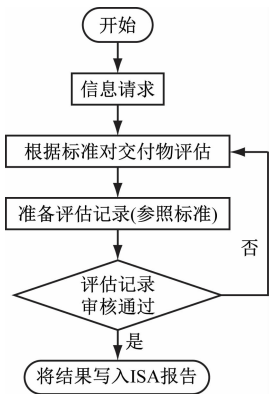


图 1 安全文档评估流程

Fig. 1 Safety document assessment process

应用—通信、信号和处理系统—信号的安全相关电子系统》中安全相关的要求,以及合同中明确的 SIL 等级的响应进行汇总,评估车辆厂是否已按照相关标准的安全系统设计程序执行。

2) 对设计变更(包括软件和硬件)和配置管理的验证和鉴证过程进行评估。

3) 对安全隐患识别、分级、解决方案、记录、监控、消除、追踪及关闭的过程进行评估,以验证风险是否已降低到最低合理可行的水平;审查车辆的设计、制造、安装、试验及测试的安全要求是否充分^[5]。

4) 评估各系统的接口安全管理,确保系统间的接口危害识别和危害分析包含了危害消除、控制或减轻等内容^[6]。

5) 对技术细节进行审查和评估,包括设计文档、原理图、分析报告、模拟结果、计算、试验记录,以及安全报告的见证与试验和测试的见证,以确保关键子系统和相关接口的安全。

2.2 特殊风险安全评估

2.2.1 FAO 系统评估

确保 UTO(无人值守的全自动运行)系统符合所定义的技术规范的要求,尽早识别、降低工程项

目的技术和进度风险,监督和评估车辆厂家的系统保障工作实施情况是否满足最终 UTO 系统功能、质量和安全等方面的要求,确保 UTO 系统运营准备工作(系统设备、组织架构及运营规程)满足运营和维护的要求。

2.2.2 车辆系统特有重大风险评估

1) 对列车结构安全、车辆与各系统的防火安全、车辆与各系统的电磁兼容需求、车门与站台门等系统的接口安全进行评估。

2) 对车辆厂验证与确认过程进行评估,对测试计划、测试案例、测试通过准则、测试过程、测试报告,以及应急措施等的验证与确认管理进行评估;对试验计划、试验方案、试验通过的标准和流程、后续的试验报告,以及试验工程师的能力进行评估,对选定设备和系统的试验进行见证。

3) 对于车辆厂质量管理体系的执行情况进行审查,并在相应的安全审查报告中对质量管理情况进行评价,并指出不足。

4) 对车辆厂故障原因、故障分析及纠正措施进行评估,对车辆厂采取的补救和改进措施的进展进行监控,并对其效果进行评估,将已确定的危害降低至用户可以接受的程度。

2.3 现场安全审计

针对安全评估需求,评估团队需根据车辆厂的设计、制造及调试计划进行现场安全审计。审计方法包括:和工作人员进行面谈,观察与生产和安装有关的工作条件,见证主要的试验和调试,确认审计过程中所发现问题关闭的证据,参与主要的安全会议。

现场安全审计可分为 4 个环节,其中安全相关议题的分析报告须全部审查。现场安全审计流程如图 2 所示。

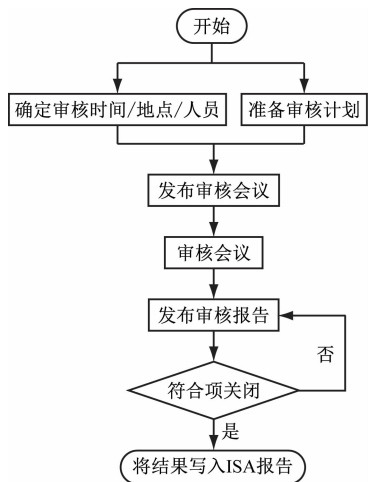


图2 现场安全审计流程

Fig.2 Onsite safety audit process

2.3.1 车辆方案设计完成阶段的安全审计

此阶段安全审计的目标是识别车辆方案设计与用户需求的差距,以及对设计阶段的安全管理流程进行审查。审查内容如下:

- 1) 对系统工程、质量管理(特别是设计质量管理)、设计变更处理、接口管理、配置管理、电磁兼容管理及防火管理等流程进行审查。
- 2) 确定是否有足够胜任的员工进行工作。
- 3) 如有必要,根据此阶段的审查结果,以及为用户需求的差距,对独立审查计划进行修订。

4) 对如下文件进行审查:车辆系统保证计划、验证与确认计划、车辆配置管理计划、质量计划、EMC 管理计划、防火管理计划、车辆初步危害分析、车辆量化风险分析、安全原则及规范要求的符合性分析、车辆防撞性设计、车辆质量管理计划、车辆制动等设备供应商业绩、车轴与车轮强度计算、转向架应力分析、车底设备支撑应力分析、车轴应力分析、车体结构分析、地板防火阻隔体性能验证测试程序、电线与电缆规格。

此阶段安全审查期间的重要关注点为:设计管理流程、系统保证及风险管理与质量保障等。

2.3.2 车辆最终设计完成阶段的安全审计

此阶段安全审查的目标是对车辆设计中是否按照安全相关标准和规定进行审计,对设计文件进行审查。审查内容如下:

- 1) 对配置管理、供应商管理及设计变更的管理流程进行审查。
- 2) 对如下文件进行审查:更新版的车辆系统保证计划、验证与确认计划、车辆配置管理计划、质量

计划、EMC 管理计划、防火管理计划、车辆初步危害分析、车辆风险分析报告、安全原则及规范要求的符合性分析;车辆设计安全证明文件、车辆系统危害分析、车辆接口危害分析、车辆操作与支持危害分析;车辆防撞设计、车体强度分析、防火等车辆系统详细设计文件;车辆与信号、通信、轨道、供电、站台门等专门的接口设计。

此阶段安全审查期间的重要关注点为:设计流程管理、系统保障(特别是安全危害管理)、质量保障管理及电磁兼容防火管理等。

2.3.3 车辆生产制造阶段的安全审计

在车辆生产制造阶段,需在车辆厂开展安全审计,重点查看生产安装及试验的要求。此阶段的安全审计内容如下:

- 1) 见证厂内试验。
- 2) 审查制造、调试、试验、验收需满足的安全条件。
- 3) 对调试计划、操作员及维护人员的培训进行审查。
- 4) 对车辆焊接设备、车辆焊工资格认证、车辆电阻点焊及缝焊、车辆电弧焊接等程序文件进行审查。

此阶段安全设计的重要关注点为:质量管理、试验管理、配置管理、生产工艺文件管理、生产变更管理、现场组装管理及试验活动管理等。

2.3.4 车辆试运行阶段的安全审计

在车辆试运行阶段,需在用户现场对车辆的调试及试验进行安全审计。主要审查内容如下:

- 1) 见证正线试验。
- 2) 对正线试验中的安全条件进行审查。
- 3) 对转向架疲劳负荷相关测试、转向架结构强度相关测试、车门系统性能测试、制动性能测试、牵引整体动态性能测试及车辆完整性检查的测试报告进行审查。

此阶段安全设计的重要关注点为:试验计划、操作员及维护人员的培训,安全管理,调试、试验、联调管理,综合认证管理。

3 结语

近年来,国内已开通运营和在建的城市轨道交通 FAO 项目正在开展或已完成车辆 ISA。通过上述文档评估、安全审计、试验见证等评估活动,证明车辆系统相关的风险控制达到了可以接受的程度,

同时在评估策略、评估方法、评估报告等方面都积累了一定的理论和实践经验;但在专业化、系统化等方面仍存在不足,主要表现为部分FAO项目存在安全评估方介入时间较晚、评估重流程轻技术等问题。因此,需结合FAO项目车辆ISA的实践,完善车辆ISA体系,形成我国车辆ISA的标准。

参考文献

[1] 梁君海. 基于独立安全评估的ZCSF动车组研发流程优化研究:以温州动车组研发项目为例[D]. 济南:山东大学, 2016: 10.
LIANG Junhai. Research on ZCSF EMU R&D flow optimization based on independent safety assessment[D]. Ji'nan: Shandong University, 2016: 10.

[2] 梁君海, 吴越, 孙超. 独立安全评估在轨道交通车辆上的应用研究与建议[J]. 中国铁路, 2018(11): 55.
LIANG Junhai, WU Yue, SUN Chao. Research and suggestion on application of independent safety evaluation in rail transit vehicle[J]. China Railway, 2018(11): 55.

[3] 王忠文, 方鸣, 刘澍清. 我国城市轨道交通安全评估体系的探讨[J]. 现代城市轨道交通, 2014(6): 1.
WANG Zhongwen, FANG Ming, LIU Weiqing. Discussion on urban rail transit safety assessment system in China[J]. Modern Ur-

ban Transit, 2014(6): 1.

[4] 杜薇. 全自动运行燕房线工程七大核心设备系统独立RAMS评估研究[J]. 铁路技术创新, 2015(4): 22.
DU Wei. Study on independent RAMS evaluation of seven core equipment systems for fully automatic operation of Yanfang Line Project[J]. Railway Technical Innovation, 2015(4): 22.

[5] 徐宏伟, 刘春永, 周伟. 轨道车辆独立安全评估综述[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2019, 19(5): 5.
XU Hongwei, LIU Chunyong, ZHOU Wei. Independent safety evaluation overview of rail transit vehicles[J]. Journal of Hunan Industry Polytechnic, 2019, 19(5): 5.

[6] 李勇. 轨道交通全自动驾驶核心设备系统独立第三方安全评估方案设计[J]. 隧道与轨道交通, 2019(1): 1.
LI Yong. Design of independent safety assessment scheme for core equipment system of automated driving of rail transit[J]. Tunnel and Rail Transit, 2019(1): 1.

· 收稿日期:2021-09-06 修回日期:2022-01-08 出版日期:2024-03-10
Received:2021-09-06 Revised:2022-01-08 Published:2024-03-10

· 通信作者:曹成鹏,高级工程师,18611102365@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第195页)

站为考量,在无人值守的情况下,运营中心调度能够完全通过遥控手段对整个变电站实行停、复役的操作,并能够对站内设备的重要数据实现远程遥测、遥调及采集。同时,为了满足应急处置响应效率与延长运行的需要,增加了对直流牵引系统的远程故障复位与程序控制的验证。

3 结语

本文研究了7号线主变电站信号集中控制系统的升级改造。选定了新平台,在选定的新平台上重建了控制代码。优化了信号传输方式,使设备信号传输更加稳定可靠。验证和调试了新硬件平台的功能。从试验结果可得知,新装置在完全具备旧有装置功能的同时,显著提高了主变电站信号集中控制系统的工作效率,解决了变电站由于信号干扰导致的频繁误报警现象。后续类似控制设备的升级

改造可借鉴此成果。

参考文献

[1] 郭志. 地铁牵引变电站直流开关柜控制装置的升级改造[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(1): 166.
GUO Zhi. Upgrading of control device in DC switchgear in metro traction substation[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(1): 166.

[2] 陈思维. 上海轨道交通3、4号线信号系统改造方案研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(7): 148.
CHEN Siwei. Research on signaling system transformation scheme of Shanghai urban rail transit line 3/4[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(7): 148.

· 收稿日期:2021-09-03 修回日期:2021-10-28 出版日期:2024-03-10
Received:2021-09-03 Revised:2021-10-28 Published:2024-03-10

· 作者:陈文昊,工程师,957381106@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取CC BY-NC-ND协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license