

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2020.03.001

北京轨道交通燕房线工程 核心设备系统独立安全评估

孙华平¹, 张艳兵^{2,3}, 杜 薇^{2,3}

(1. 丹阳靖惟交通技术有限公司, 北京 100062; 2. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100068;
3. 城市轨道交通全自动运行系统与安全监控北京市重点实验室, 北京 100068)

摘要: 北京轨道交通燕房线为“综合科技示范线”, 示范国产化全自动运行(fully automatic operation, FAO)技术的应用。全自动运行系统是基于现代计算机、通信、控制和系统集成等技术实现列车运行全过程自动化的新一代城市轨道交通系统。燕房线全自动运行系统是国际公共交通联合会(UITP)定义的自动化等级为4级(GOA4)的系统。由于采用了很多新技术, 燕房线在工程建设期间探索出一套适用于全自动运行系统的风险管理方式。从工程安全评估角度介绍全自动运行系统工程核心设备系统的安全以及风险管理, 从而确保工程建设满足可靠性(reliability)、可用性(availability)、可维护性(maintainability)和安全性(safety)(RAMS)要求。国内其他全自动运行系统线路建设期间的风险管理也可借鉴燕房线核心设备系统独立安全评估的经验。

关键词: 轨道交通; 燕房线; 全自动运行系统; GOA4; 工程安全评估; RAMS 评估

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2020)03-0001-07

Independent Safety Assessment of Core Systems of Yanfang Line

SUN Huaping¹, ZHANG Yanbing^{2,3}, DU Wei^{2,3}

(1. Danyang Jingwei Transportation Technical Service Co., Ltd., Beijing 100062; 2. Beijing MTR Construction Administration Corp., Beijing 100068; 3. Beijing Key Lab for Urban Rail Transit FAO System and Safety Monitoring, Beijing 100068)

Abstract: The Beijing Yanfang Line was proposed as a “comprehensive technical demonstration line” to pilot fully automatically operation (FAO) technology. FAO is a new generation of modern urban guided transportation system that is based on the technology of computer, communications, and control and system integration. The FAO of the Yanfang Line was designed as per requirements of the level-4 of grade of automation (GOA4), which is defined by the International Association of Public Transport (UITP). Because many new technologies and applications have been used, new risk management approaches were explored to be established during the Yanfang Line project. This paper introduced independent safety assessment and risk management core equipment system of the FAO system from an independent safety assessor's viewpoint. This is the first time that the Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) requirements of the project was assessed. The experience of risk management and the independent safety assessment gained from the Yanfang Line can be referenced or used by other FAO projects.

Keywords: rail transit; Yanfang Line; FAO; GOA4; independent safety assessment; RAMS assessment

全自动运行系统是一项系统工程, 涉及车辆、信

号、综合监控、通信、站台门、车辆基地等多个专业, 各专业联系密切。全自动运行系统中传统司机的工作职能一部分由列车自动控制系统负责, 另一部分则将移交到控制中心去完成。传统的司机、控制中心调度员和车站值班员共同参与控制的运营控制模式, 转变为以控制中心调度员直接面向运行的运营

收稿日期: 2018-10-08 修回日期: 2018-12-13

第一作者: 孙华平, 男, 硕士, 高级工程师, 从事信号咨询、轨道交通和铁路风险管理、工程独立安全评估工作,
Justin@ramsisp.com.cn

控制模式。运营控制系统需要具有更加完善的自动控制功能,以行车为核心,信号与车辆、综合监控、通信等多系统配合,提升轨道交通运行系统的整体自动化水平。

随着全自动运行系统的智能化、自动化以及复杂程度的增加,建设方和运营方对设备系统的安全性、可靠性、可用性及可维修性要求也就更高。此外,全自动运行系统按照预先设定的规则和计划自主运行,高安全性、高可靠性、高可用性和高可维修性是全自动运行系统正常运行的必要条件。再者,中国当时尚无成熟的具备全自动运行功能的关键设备系统,厂商需要重新研发和生产,而这有可能导致设备系统风险上升。燕房线项目的决策者在项目的招投标阶段就意识到这些问题,决定引入独立的第三方安全评估机构对核心设备系统进行安全评估(评估内容包括可靠性、可用性和可维修性)。通过安全评估,将核心设备系统的安全风险降低到安全程度,使可靠性、可用性和可维修性满足要求或者上级主管单位的要求。

全自动运行系统功能的实现需要各个专业紧密配合才能实现,因此燕房线七大核心设备系统独立第三方工程安全评估不能再沿用之前信号专业单个的评估方式,需要探讨一套适用于全自动运行系统的风险管理方式和评估管理模式。

1 评估范围确定

国内轨道交通新建普通线路只要求对信号系统做工程安全评估,而且评估范围也仅限于安全性。由于全自动运行系统是个系统工程,如果仍只关注信号系统的安全性,可能有下列弊端:

1) 全自动运行无法满足燕房线运营的要求,例如系统、设备或者功能的可靠性、稳定性无法满足正常运营的要求。

2) 燕房线系统级的安全性无法满足正常运营的要求(系统级是指评估范围之内的核心设备系统层次或者级别,包括车辆、信号(含综合监控)、通信(含PIS)、站台门、轨道、电梯/扶梯、门禁系统在内的统称)。全自动运行依据信号、车辆、站台门、综合监控、通信等系统预先设计的程序和指令(软件),组成全自动运行的系统对实际线路、设备工作状况等实时信息采集,然后系统自主地做出决策来控制列车的运行,运营人员对系统的干预大大降低。因此,如果只关注信号系统的安全性,那么燕房线系统级的安全性不能满足运营的要求。

考虑下列因素之后,燕房线将全自动运行系统评估范围确定为车辆、信号(含综合监控)、通信、站台门、轨道、电梯/扶梯、门禁系统(合称为“核心设备系统”);且评估的内容包括以安全性为主,涵盖核心设备系统的可靠性、可用性和可维修性。

如某一系统是否对全自动运行系统的行车有直接安全影响;某一系统虽然对全自动运行系统的行车无直接安全影响,但是该系统的可靠性或可用性对全自动运行系统的行车有直接影响;建设方认为需要评估的系统。

2 评估团体能力要求

考虑到全自动运行系统在国内是个新生事物,工程建设和安全评估都缺少成熟的经验。因此,经验丰富且具有全自动运行系统项目经验的评估团队是燕房线全自动运行系统安全评估项目成功的重要因素。合格的评估团队应具备下列能力要求:①了解全自动运行核心设备系统的技术、功能、需求、特点等;②具有丰富的地铁安全关键系统(如信号或车辆)的评估经验;③有可靠性、可用性、可维修性项目经验或评估经验;④关键的评估人员应该本地化,这样可以更好地、更及时地响应业主要求,对核心设备系统及时地开展评估工作。

燕房线核心设备系统安全评估团队的能力涵盖了安全评估所需要的全部能力要求,并且还组织了专门的人员负责可靠性、可用性、可维修性(RAM)的评估。另外考虑到国内工程建设的管理特点,评估团队专门安排了一个评估小组负责各核心设备系统安全接口的评估。燕房线评估团队架构如图1所示。

1) 全自动运行系统工程经验:安排了具有丰富的全自动运行系统工程经验的人员,尤其是丰富的全自动运行系统用户需求的经验,为整个燕房线核心设备系统安全评估提供了技术支持。

2) 全自动运行系统运营经验:全自动运行线路尤其要求设备系统适应运营需求,也就是设备系统的需求和功能设计都需要按照运营的需求来确定;自动化等级为1级或者2级线路可以要求运营去适应系统。这也是全自动运行系统线路与自动化等级为1级或者2级(GOA1/2)显著的区别。

3) 全自动运行系统工程安全评估经验:包括车辆、信号和站台门在内的关键系统都安排了具有全自动运行系统工程安全评估经验的人员参与,这样可以更好地

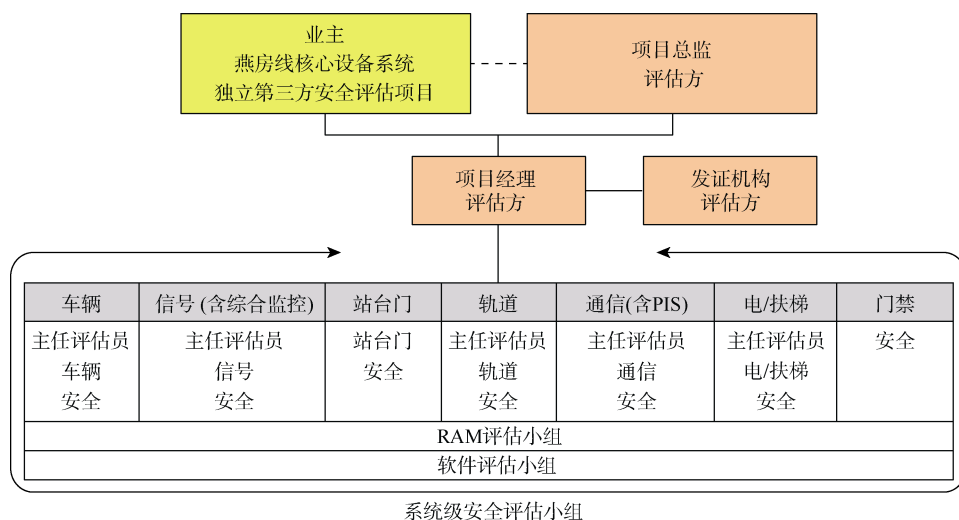


图1 安全评估团队架构

Fig. 1 Independent Safety Assessment (ISA) team

判断风险尤其是全自动运行相关部分的风险是否已经降低到可以接受的程度。

4) 具备各设备系统的专业技术能力: 车辆和信号(含综合监控)两大系统承担全自动运行系统的绝大多数需求和功能; 与传统 GOA1/2 自动化等级的线路相比, 站台门和通信设备系统为了实现全自动运行也需要做相应的改变。其他设备系统与线路的自动化等级关系不大。燕房线安全评估团队配置经验丰富的车辆、信号、站台门、轨道、通信、电/扶梯等专业技术背景的评估人员。

5) 软件开发及软件工程: 安排了资深的软件评估

员, 专门负责软件的安全评估, 尤其是涉及安全的软件及软件变更的评估。

6) 可靠性、可用性、可维修性(RAM)专业能力: 燕房线安全评估团队配置 RAM 经验丰富的人员专门承担各系统 RAM 的评估工作。

评估方在项目初期确定了本项目安全评估团队的能力需求, 并且按照确定的能力需求对各个评估人员的能力进行符合性检验, 确保评估团队的人员能力能够覆盖本项目安全评估工作所需要的能力。表1所示为安全评估团队能力需求及评估员能力检查表。

表1 评估员能力检查

Tab. 1 Competence matrix of assessors

姓名	危害识别	安全评估	RAM	全自动驾驶	信号	车辆	站台门	轨道	通信	电扶梯	防火工程	EMC	软件	运营、维护
评估员 1	√	√	√	√	√	√	√	√		√				
评估员 2	√								√					
...														
评估员 n														√

3 燕房线系统级危害分析

安全评估团队的项目经理、主任评估员以及各设备系统的主要评估员, 在项目早期研究了燕房线核心设备系统安全评估项目的要求, 分析了各核心设备系统合同的用户需求(尤其是安全需求), 研究了国际上有关全自动运行的标准和指南, 结合评估团队自身在全自动驾驶项目的工程和评估经验, 通过“头脑风暴”

确定了燕房线系统级初步危害。评估方研究的全自动驾驶相关的国际标准和指南包括《IEC 62267: 2009 铁路应用-自动化城市轨道交通-安全需求》《IEC/TR 62267-2: 2011 铁路应用-自动化城市轨道交通-安全需求 第2部分: 系统顶层危害分析》《IEC 62290-1: 2014 铁路应用-城市轨道交通运输管理和指令/控制系统 第1部分: 系统原理和基本概念》以及《IEC 62290-2: 2014 铁路应用-城市轨道交通运输管理和指令/控制系统 第2部

分：功能需求规范》。

评估团队选择具有全自动驾驶地铁工程和评估经验的评估人员，这些评估人员参与了英国、韩国、阿联酋和中国香港的全自动运行地铁的项目。

燕房线建设方组织了车辆、信号、综合监控、站台门、轨道、通信等专业的设计单位、集成商/供货商、运营和维护、评估方集中开展“头脑风暴”，完善并补充了评估方确定的系统级危害列表，最终确定了燕房线系统级初步危害，并形成了《燕房线系统级危害记录》，记录了本项目所有可能存在的危害、危害控制措施、与之相关的系统和运营场景。《燕房线系统级危害记录》是各设备系统开展各自系统危害识别及危害管理的重要输入，在项目执行过程中不断更新并加以完善。燕房线系统级危害识别流程如图2所示。

经过参建各方分析研究，确定了10多个燕房线系统级危害，200多条控制措施，并且建立了核心设备系统与危害、控制措施之间的关系。控制措施通过

“领结”模型的方式确定，确保从危害产生的原因、后果两大方面控制风险。图3说明燕房线“系统级”风险控制模型，包括危害识别、危害控制的原则。

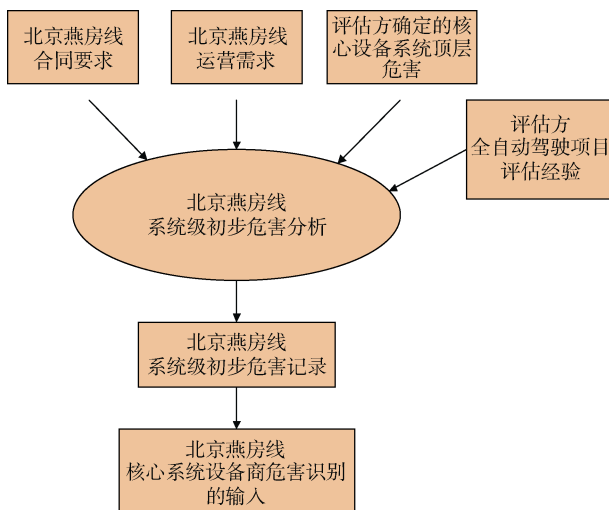


图2 “系统级”初步危害识别流程

Fig. 2 Overall process of system-level PHA identification

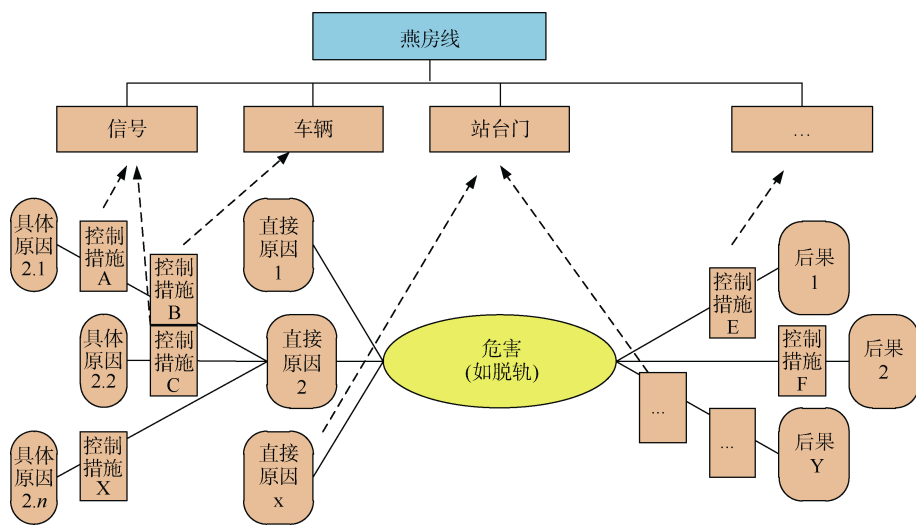


图3 “领结”风险控制模型

Fig. 3 “Bow-tie” risk control model

4 燕房线专题危害分析

为了提高自动化程度同时也是为了提高安全性，燕房线有两个新的需求：①在列车一个或多个车门发生故障并且被隔离的情况下，该列车在站台停车开门时，这些被隔离的车门所对应的站台门应该保持关闭，不能打开；②在站台门一扇或多扇门发生故障并且被隔离的情况下，列车在该站台停车开门时，这些被隔离的站台门所对应的车门应该保持关闭，不能打开。这个功

能也叫“对位隔离”，是全自动驾驶系统特有的功能。

为了更好地了解“对位隔离”功能所带来的危害以及对应的安全风险，建设方召集了车辆、信号、站台门、车门等专业的设计单位、集成商/供货商、运营和维护单位以及安全评估方，开展了“对位隔离”专题危害分析。经过专题安全分析，确定了20多条危害、100余项的安全控制措施，把“对位隔离”功能所带来的风险降低到可以接受程度。通过专题危害分析把确定的控制措施反馈给相关的系统设计团队，与设计

相关的控制措施需要整合到系统的设计之中。

5 燕房线核心设备系统级安全评估

目前国内地铁建设项目由地铁公司作为建设方来管理整个项目，负责项目建设的进度、质量、安全和投资等。在安全管理尤其是技术安全管理方面，通常是召集相关单位参加接口会议或者以专题会议的形式进行管理。这种管理方式存在一定的不足，有可能会安全信息没有闭环，因此，存在一定的风险。另一方面，虽然燕房线系统级危害分析和专题危害分析的结果已经发布给核心设备系统相关单位，但是，分析结果是否在各核心设备产品开发、工程实施中得到落实，或者各核心设备有无补充的安全信息，这也是一个问题。因此，评估方除了需要评估各核心设备系统的危害、安全控制措施、风险，还需要评估不同核心设备系统提出的控制接口相关危害的安全措施是否不一致甚至是矛盾的。评估方定期组织安全评估的内部评审，内部评审由评估方项目经理、主任评估员、各核心设备系统的主要评估员以及其他相关人员参与。图4说明了系统级安全评估与子系统安全评估的关系，子系统指组成核心设备系统的各个子系统，即车辆、信号(含综合监控)、通信(含PIS)、站台门、轨道、电梯/扶梯、门禁系统。

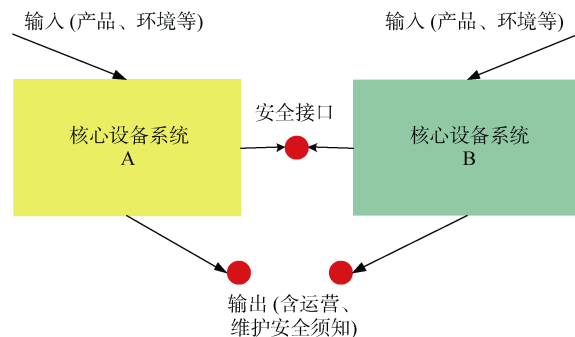


图4 系统级与子系统评估的关系

Fig. 4 Relationship between system-level assessment and individual subsystem assessment

评估方重视全自动运行系统的联调联试评估，多次见证了全自动运行系统的联调联试并且向项目组建议了全自动运行系统信心测试的场景。项目组按照评估方提出的信心测试场景准备了现场调试的测试大纲/测试案例，建设方组织了相关单位协同评估方一起参与了现场测试见证。

总之，评估方对燕房线全自动运行核心设备系统的评估涵盖需求、设计、制造、安装和调试阶段，对本工程项目的生命周期各阶段进行持续的评估、安全审计、现场测试旁站等。图5所示是燕房线核心设备系统安全评估的整个流程。

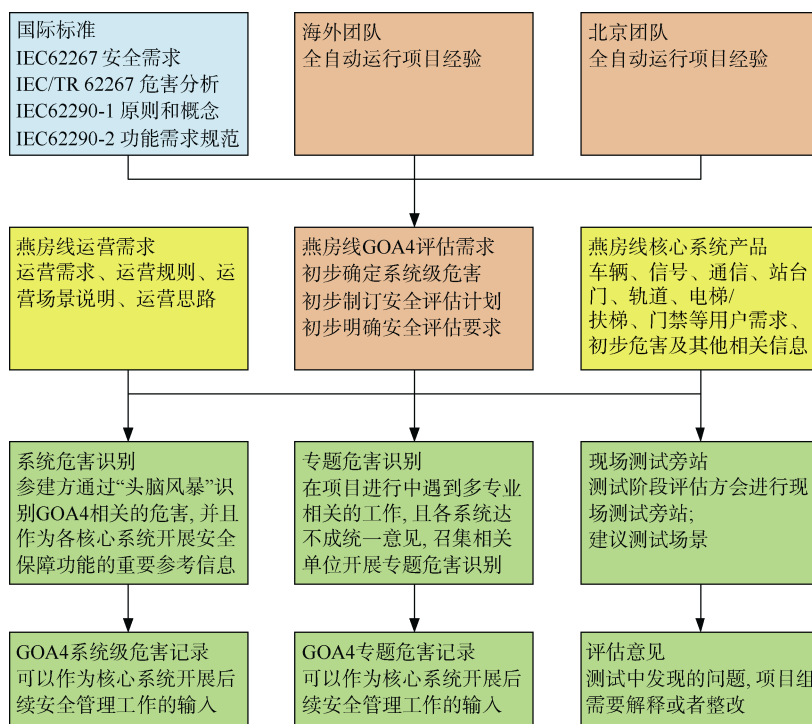


图5 燕房线核心设备系统安全评估流程

Fig. 5 Overall ISA process of core systems

6 全自动运行系统性能的评估

评估方从燕房线试运行开始就对全自动运行系统性能进行持续评估,评估结果是建设方用来研判燕房线全自动运行系统是否足够稳定可以满足载客试运营要求。考核项可以分为与运营服务相关和与全自动运行功能相关两大类,这些考核项及实际取得的性能表现见表2(其中实际性能表现的数据由项目组提供)。

表2 性能考核
Tab. 2 Performance

序号	与运营服务相关	实际数据 #1	与全自动运行功能相关	实际数据 #2
1	运行图兑现率	100%	休眠、唤醒	99.62%
2	列车正点率	99.99%	车库门开关	99.53%
3	掉线率(次/万车 km)	3.4%	站台门开关	100%
4			站台门隔离车门	100%
5			全自动模式停车精度	100%
6			车门隔离站台门	100%
7			紧急呼叫	98%
8			洗车机	100%
9			紧急拉手	100%
10			折返成功率	100%

注: #1 采用截至2018年3月11日当天的统计记录; #2 采用截至2017年11月10日的统计记录。

通过现场提供的数据并加以分析,体现了燕房线全自动系统的缺陷不断地减少、各项性能持续改善和提高,并且在试运行后期系统就已经达到运营阶段的各项指标。与全自动运行相关的全部功能在试运行期间就已经全部实现并且可靠性达到了正常运营所需要的水平。

7 安全评估节点

燕房线的建设主要可以分为停车场、正线样板段、全线3部分。评估方根据燕房线工程建设的实际情况和需要发布了下列类型的安全证书和评估报告。

1) 停车场开始动车调试。该阶段评估方完成了车辆、信号、轨道、通信系统相关部分的评估,且与停车场动车调试相关的安全风险都降低到可以接受的程度,也即是安全程度。

2) 正线样板段开始单车动车调试。该阶段评估方完成了车辆、信号、轨道、通信系统相关部分的评估,且与正线样板段单车动车调试相关的安全风险都降低到可以接受的程度。信号系统完成了联锁控制等级(IXL)的评估。

3) 正线样板段开始多车动车调试。该阶段评估方完成车辆、信号、轨道、通信系统的相关部分的评估,且与正线样板段开始多车动车调试相关的安全风险都降低到可以接受的程度。信号系统完成了ATP部分的评估。

4) 正线样板段开始试运行。该阶段评估方完成了车辆、信号、站台门、轨道、通信系统的相关部分的评估,且与正线样板段开始试运行相关的安全风险都降低到可以接受的程度。信号系统完成了ATO部分的评估。

5) 全线开始单车动车调试。该阶段评估方完成了车辆、信号、轨道、通信系统的相关部分的评估,且与全线单车动车调试相关的安全风险都降低到可以接受的程度。信号系统完成了联锁控制等级(IXL)的评估。

6) 全线开始多车动车调试。该阶段评估方完成车辆、信号、轨道、通信系统相关部分的评估,且与全线开始多车动车调试相关的安全风险都降低到可以接受的程度。信号系统完成了ATP部分的评估。

7) 全线开始试运行。该阶段评估方完成了车辆、信号、站台门、轨道、通信系统相关部分的评估,且与全线开始试运行相关的安全风险都降低到可以接受的程度。信号系统完成了ATO部分的评估。

8) 开始载客试运营。该阶段评估方完成了车辆、信号、站台门、轨道、通信、电/扶梯、门禁系统的相关部分的评估,且与全线开始载客试运营相关的安全风险都降低到可以接受的程度。

8 结论

通过燕房线工程核心设备系统的独立安全评估,结合运用国际铁路通行的风险管理方法,探索建立了一套适用于全自动运行系统工程建设的风险管理和工程安全评估方法,确保了燕房线高质量、高水平的开通,并且设备状态在试运营期间达到了优秀水平。

参考文献

- [1] Railway applications – The Specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Basic requirements and generic process: EN 50126-1: 1999[S]. London: British Standards Institution, 2010.
- [2] Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 2: Guide to the application of EN 50126-1 for safety: PD CLC/TR 50126-2: 2007[S]. London:

- British Standards Institution, 2007.
- [3] Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 3: Guide to the application of EN 50126-1 for rolling stock RAM: PD CLC/TR 50126-3: 2008[S]. London: British Standards Institution, 2008.
- [4] Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems: EN 50128: 2011[S]. London: British Standards Institution, 2014.
- [5] Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signaling: EN 50129: 2003[S]. London: British Standards Institution, 2003.
- [6] Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms: EN 61703: 2016[S]. London: British Standards Institution, 2016.
- [7] Hazard and operability studies (HAZOP studies) – Application guide: EN 61882: 2016[S]. London: British Standards Institution, 2016.
- [8] Railway applications – Automated urban guided transport (AUGT) – Safety requirements: EN 62267: 2009[S]. London: British Standards Institution, 2010.
- [9] Railway applications – Automated urban guided transport (AUGT) – Safety requirements – Part 2: Hazard analysis at top system level: PD IEC/TR 62267-2: 2011[S]. London: British Standards Institution, 2011.
- [10] Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 1: System principles and fundamental concepts: EN 62290-1: 2014[S]. London: British Standards Institution, 2014.
- [11] Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems – Part 2: Functional requirements specification: EN 62290-2: 2014[S]. London: British Standards Institution, 2014.
- [12] Military standard – Definitions of terms for reliability and maintainability: MIL-STD-721C[S]. Washington DC: Department of Defense, United States of America, 1981.
- [13] Military standard – Reliability modeling and prediction: MIL-STD-756B[S]. Washington DC: Department of Defense, United States of America, 1981.
- [14] 轨道交通 可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例: GB/T 21562—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [15] 轨道交通 通信、信号和处理系统 控制和防护系统软件: GB/T 28808—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [16] 轨道交通 通信、信号和处理系统 信号用安全相关电子系统: GB/T 28809—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [17] 轨道交通 城市轨道交通运营管理和指令/控制系统 – 第1部分: 系统原理和基本概念: GB/T 32590.1—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [18] 城市轨道交通全自动运行系统建设指南: WP-2017001[R]. 北京: 国家工程实验室北京市重点实验室, 2017.
- [19] 孙华平, 张艳兵. 北京地铁亦庄线信号系统工程独立安全评估[J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(1): 1-5.
- SUN Huaping, ZHANG Yanbing. Independent safety assessment of Yizhuang line signal system in Beijing metro[J]. Urban mass transit, 2013, 16(1): 1-5.

(编辑: 郝京红)

西安地铁全线网列车实现“同车不同温”功能

近日, 西安地铁1、2、3号线所有车站屏蔽门上分区域张贴了“弱冷”及“强冷”标识。这是继2019年4号线实行“同车不同温”后, 西安地铁运营线路全面实现该功能, 是西安地铁持续提升服务品质的新举措。其中, 1、2、3号线列车1、6号车厢为弱冷车厢, 2-5号车厢为强冷车厢; 4号线列车1-3号车厢为强冷车厢, 4-6号车厢为弱冷车厢。“强冷”车厢温度标准为22℃-25℃, “弱冷”车厢为25℃-28℃, 广大乘客可以根据自身身体状况, 选择适合的车厢乘坐。

为满足不同市民乘客的出行需求, 2019年8月, 西安地铁在4号线试点推行“同车不同温”特色服务。此举措一经推出, 便赢得社会广泛好评。为进一步提升服务标准, 西安地铁不断加快其余线路设备调试测试, 逐步对列车空调控制系统进行软件升级、改造, 在列车全列集控的基础上, 实现了空调分车控制功能(即: 列车驾驶员可以在司机室通过屏幕进行分车控制, 将6个车厢的模式、温度设置为不同数值)。

除进行“同车不同温”的空调系统控制软件升级改造外, 今年以来, 西安地铁还结合疫情防范工作, 对全线网列车空调系统开展“大整修”作业, 冲洗、清洁列车空调内部积尘, 检查空调系统接线、部件状态; 在列车日常检修中, 及时更换空调新风、回风滤网; 每日对空调滤网、出风口进行消杀, 开展空调功能检查, 全力确保空调系统设备稳定、运行状态良好, 持续为广大乘客提供优质服务。

摘编自 <http://www.camet.org.cn/2020-05-27>