

跨坐式单轨无人干预列车运行(GOA4)级 全自动运行系统安全风险管控研究

郑磊¹ 蓝亮文²

(1. 芜湖市运达轨道交通建设运营有限公司, 300071, 芜湖; 2. 上海申通轨道交通研究咨询有限公司, 200070, 上海//第一作者, 高级工程师)

摘要 在系统识别和分析跨坐式单轨 GOA4(无人干预列车运行)级 FAO(全自动运行)系统安全风险的基础上,建立该系统安全风险管理体系。运用 LC(风险矩阵)评价方法,研究跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险管控问题,开展跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险识别、安全风险分析与评价、安全风险控制及持续监控等实践活动,使跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的安全风险处于可控状态。

关键词 跨坐式单轨; 全自动运行系统; 无人干预列车运行级; 安全风险; 管控

中图分类号 U298.1:U232

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.02.018

Research on Safety Risk Management and Control of Straddle Monorail GOA4 Grade FAO System

ZHENG Lei, LAN Liangwen

Abstract Based on the systematic identification and analysis of straddle monorail GOA4 (grade of automation 4) grade FAO (fully automatic operation) system risk, its safety risk management system is established. Using the LC (risk matrix) assessment method, the safety risk management and control issue of straddle monorail GOA4 grade FAO system is studied, and the practices of safety risk identification, analysis and assessment, management and continuous monitoring are carried out to keep the safety risk of straddle monorail GOA4 grade FAO system under control.

Key words straddle monorail; FAO system; GOA4; safety risk; management and control

First-author's address Wuhu Yunda Rail Transit Construction & Operation Co., Ltd., 300071, Wuhu, China

近年来跨坐式单轨系统在国内逐步发展为先进的 GOA4(无人干预列车运行)级 FAO(全自动运行)系统并投入运营,这种独特的跨坐式单轨系统制式叠加高集成度的 FAO 系统,将为跨坐式单轨

GOA4 级 FAO 系统带来新生风险,且对安全风险管控的要求亦将更高。因此,有必要研究跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的安全风险管控问题,为该系统的的风险研究提供可推广的实践经验。

1 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险管控的总体思路

1.1 国内外标准规范要求

跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险管控的研究与实践主要基于 EN 50126:2004《铁路应用:可靠性、可用性、可维护性和安全性(RAMS)的技术规范和证明》的 LC(风险矩阵)评价方法,结合交运规[2019]7号《城市轨道交通运营安全风险分级管控和隐患排查治理管理办法》的风险隐患分级管控及双重预防要求,遵循 RAMS(可靠性、可用性、可维护性、安全性)的安全保证思路,对跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统进行风险识别、分析及评价,从而间接提升跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的安全管理水平。

1.2 跨坐式单轨系统安全风险管控的特点

基于上述标准规范,结合跨坐式单轨系统独特的胶轮走行装置、枢轴道岔、抱轨式耦合、供电受流方式等特性,开展三轨触电、靴轨冲突、列车脱轨等差异性风险分析,并针对跨坐式单轨系统的特征制定个性化管控对策。

1.3 GOA4 级 FAO 系统的安全运营要求

与有人驾驶线路相比,跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统及其运维模式在功能配置、管控范围、联动处置及实现方式上都存在明显区别。因此,有必要在符合跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全特点的前提下,从安全性、可用性、可靠性及可维护性方面对跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统进行风险分析

与管控。

2 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险管理体系的构建

2.1 安全风险管理体系的架构

在跨坐式单轨系统安全管理的框架下,成立 RAMS 保证团队,统筹规划跨坐式单轨风险管理系统,紧密结合 GOA4 级 FAO 系统的技术特点和运维特色建立风险管理架构。充分考虑可能影响跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的新生安全风险因素,建立全寿命周期危害日志,有效管控跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的风险因素并提出减缓措施,从源头使风险处于可控状态,并在 GOA4 级 FAO 系统全寿命周期内对其进行持续跟踪。

2.2 安全风险管理体系的流程

跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险管控关键在于建立规范的安全风险识别、安全风险分析及评价、安全风险预防及循环控制的流程体系,形成科学的贯穿系统全过程的安全风险管控方法,以验证安全风险管控措施的有效性。跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险管控流程见图 1。

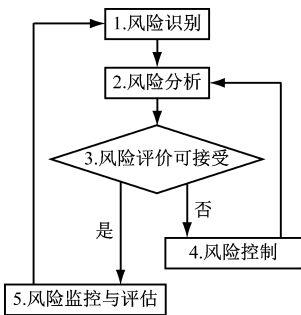


图 1 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险的管控流程
Fig. 1 Safety risk management and control workflow of straddle monorail GOA4 grade FAO system

3 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险管控研究

3.1 GOA4 级 FAO 系统安全风险识别

3.1.1 安全风险的识别流程

针对跨坐式单轨系统的特性以及 GOA4 级 FAO 系统的要求,参照交运规[2019]7 号文,分专业开展跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的安全风险识别,从设施监测养护、设备运行维修、行车组织、客运组织、运行环境等方面开展 200 多项安全风险识别,具体流程见图 2。

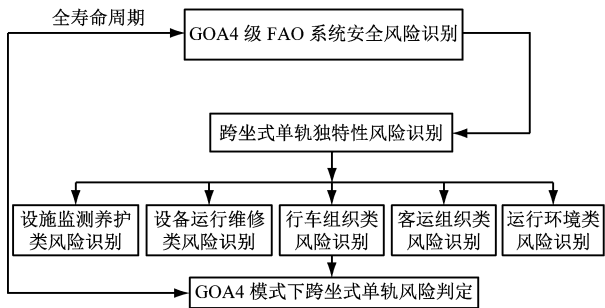


图 2 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险的识别流程
Fig. 2 Identification process of straddle monorail GOA4 grade FAO system safety risk

3.1.2 安全风险的识别依据

1) 基于芜湖跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统存在的全自动功能缺陷和建设遗留问题,结合 GB/T 32588.1—2016《轨道交通自动化的城市轨道交通(AUGT)安全要求》和全自动运营场景落地情况进行安全风险识别。发现芜湖跨坐式单轨 FAO 列车未按 GOA4 级要求配备障碍物探测装置,FAO 线路开通初期未按场景说明书需求实现远程休眠唤醒功能,以及列车车门外无移动授权信号显示等功能缺陷的安全风险。

2) 基于芜湖跨坐式单轨系统初期运营情况,梳理运营中发生的各类事故、设备故障(如列车多次退出正线运营、信号及站台门故障率较高、接地流程不规范等),同时对其进行安全风险识别。结合安全检查、故障树、事件树及成因分析等方法,识别站台门和列车门夹人夹物、第三轨触电、停车场人车冲突等安全风险。

3) 基于 GOA4 级 FAO 系统的运营需求(如将正线、车站以及停车场和车辆段无人区纳入控制中心统一管控等),结合资料查阅、现场踏勘、初步危害分析等方法,针对 FAO 系统识别出无人区车车碰撞、无人区人车冲突、SPKS(工作人员防护开关)防护疏漏等安全风险。

4) 基于跨坐式单轨系统特殊方式(如抱轨式走行方式、枢轴式道岔变道方式等),结合初期运营情况对安全风险进行辨识和预测,识别出车辆故障导致行车中断等安全风险,同时对跨坐式单轨系统列车抱轨式运营的脱轨风险展开研究。

3.2 安全风险分析及评价

3.2.1 安全风险分析

1) 安全风险发生可能性分析:针对已识别的每一项安全风险,参考表 1,采用头脑风暴、小组讨论、

安全风险预测等方法,逐一分析安全风险事件发生的概率。例如,分析认为障碍物探测功能缺失的发生频率为“每周发生数次”、而停车场列车与人员冲突的发生频率为“非常不可能出现”等。

2) 安全风险后果严重性分析:参考安全风险发生后造成的财产损失、人员伤亡、服务影响等标准(见表 2),采用专家评定、统计评分等方法,逐一分析安全风险的后果严重程度,如评定障碍物探测功能缺失的后果严重性为“重大”、评定列车与人员冲突的后果严重性为“严重”等。

3) 对上述安全风险发生的可能性和后果的严重性进行分析,并将分析结果(见表 3)作为后续采

用 LC 评价方法进行安全风险评价的信息输入。

表 1 跨坐式单轨 FAO 系统安全风险发生可能性参考标准

Tab. 1 Occurrence possibility reference standards of straddle monorail FAO system safety risk		
等级	等级描述	发生次数/(次/年)
A	每周发生数次以上	≥100
B	每月发生数次	10 ~ <100
C	每年发生数次	1 ~ <10
D	10 年内发生数次	0.1 ~ <1.0
E	不大可能出现	$1 \times 10^{-3} \sim <1 \times 10^{-1}$
F	非常不可能出现	$1 \times 10^{-5} \sim <1 \times 10^{-3}$
G	发生可能性极小	$<1 \times 10^{-5}$

表 2 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险后果严重性参考标准

Tab. 2 Consequence severity reference standards of straddle monorail GOA4 grade FAO system safety risk			
等级	人员伤亡	直接损失/万元	服务中断时间
特大	死亡 30 人及以上,重伤 100 人及以上	>10 000	系统或线路中断 >24.0 h 以上
重大	死亡 3 ~29 人,重伤 50 ~99 人	>5 000 ~ 10 000	系统或线路中断 >12.0 ~24.0 h
严重	死亡 1 ~2 人,重伤 3 ~49 人或轻伤 10 人及以上	>500 ~5 000	系统或线路中断 >3.0 ~12.0 h
轻微	重伤 1 ~2 人或轻伤少于等于 9 人	>30 ~500	正线中断 >0.5 ~3.0 h
可忽略	轻微受伤或无伤亡	≤30	正线中断 5.0 ~30.0 min

表 3 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险分析结果
Tab. 3 Safety risk analysis results of straddle monorail GOA4 grade FAO system

安全风险项目	后果	发生概率	安全风险类别
障碍探测功能缺失	重大	每周发生数次	设施监测
列车唤醒失败	轻微	不大可能出现	行车组织
GOA4 模式下移动授权指示功能缺失	可忽略	每周发生数次	设施监测
登乘平台人车冲撞	轻微	不大可能出现	行车组织
站台门间隙夹人、夹物	轻微	每年发生数次	行车组织
第三轨触电	严重	非常不可能出现	设备维修
停车场列车与人员冲突	严重	非常不可能出现	行车组织
SPKS 防护疏漏	轻微	每年发生数次	运行环境
车辆故障致中断行车	重大	10 年内发生数次	行车组织
跨坐式列车脱轨	重大	发生可能性极少	行车组织

3.2.2 安全风险评价

跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险评价主要基于运用概率论和数理统计方法,结合该系统的实际情况,针对安全风险事件发生的概率及后果的严重程度,采用 LC 评价方法确定安全风险等级。该方法将安全风险发生概率 L 划分为 7 个级别并赋

值,将安全风险后果严重程度(C)划分为 5 个级别并赋值,将安全风险等级 D 划分为 4 个等级(重大($R1$)、较大($R2$)、一般($R3$)和较小($R4$))并赋值。

某风险点安全风险等级 D 的计算公式如下:

$$D = LC \tag{1}$$

跨坐式单轨系统安全风险评价运用 LC 评价方法(见表 4)估算 L 及 C ,对 D 进行统筹计算并量化,分析评估安全风险的性质,量化评价安全风险的可接受程度。

通过 LC 评价方法及式(1)核算后,评价出跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统障碍物探测功能缺失为重大($R1$)风险,车辆故障致中断行车为较大($R2$)风险,站台门与列车门夹人夹物、移动授权指示功能缺失、SPKS 防护疏漏等为一般($R3$)风险,登乘平台人车冲撞、第三轨触电、停车场人车冲突、列车唤醒失败等为较小($R4$)风险。具体安全风险评价结果的样例见表 5。

3.3 安全风险控制

在安全风险分析评价的基础上,为有效降低安全风险发生可能性和后果严重性,结合跨坐式单轨系统及 GOA4 级 FAO 系统的特性,从工程消缺、更新改造、制度培训、应急管理等方面着手制定安全

风险管控措施。各项安全风险项目及其管控措施见表 6。

表 4 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的安全风险矩阵
Tab. 4 Safety risk matrix of straddle monorail GOA4 grade FAO system

危险事故发生的频率等级	等级内容描述	危险事故不同后果等级下的风险等级				
		5(可忽略)	4(轻微)	3(严重)	2(重大)	1(特大)
A	每周发生数次以上	R3	R2	R1	R1	R1
B	每月发生数次	R4	R3	R2	R1	R1
C	每年发生数次	R4	R3	R2	R2	R1
D	10 年内发生数次	R4	R3	R3	R2	R1
E	不大可能出现	R4	R4	R3	R2	R2
F	非常不可能出现	R4	R4	R4	R3	R3
G	发生可能性极少	R4	R4	R4	R3	R3

表 5 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险评价样例
Tab. 5 Evaluation sample cases of straddle monorail GOA4 grade FAO system safety risk

安全风险项目	后果	发生概率	等级
障碍探测功能缺失	重大	每周发生数次	R1
列车唤醒失败	轻微	不大可能出现	R4
GOA4 级 FAO 系统移动授权指示功能缺失	可忽略	每周发生数次	R3
登乘平台人车冲撞	轻微	不大可能出现	R4
站台门间隙夹人夹物	轻微	每年发生数次	R3
第三轨触电	严重	非常不可能出现	R4
停车场列车与人员冲突	严重	非常不可能出现	R4
SPKS 防护疏漏	轻微	每年发生数次	R3
车辆故障致中断行车	重大	10 年内发生数次	R2
跨坐式列车脱轨	重大	发生可能性极小	R4

在安全风险控制实践中需注重管控对策及措施的安全性、有效性及可行性,并不断进行反馈和调整,以便更好地达成安全风险控制目标。

3.4 安全风险持续监控

在初期运营阶段,制定跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统存在安全风险的持续监控计划,在系统全寿命周期内持续跟踪剩余风险,及时发现新生风险,同时监视风险措施实施情况和风险变化情况,评估前期风险的控制效果,实时动态掌握风险因素所处的状态,调整或持续改进风险控制方案,更新风险记录并对风险进行周而复始的分析,建立系统

表 6 跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险管控措施
Tab. 6 Safety risk management and control measures of straddle monorail GOA4 grade FAO system

安全风险项目	等级	安全风险减缓措施
障碍探测功能缺失	R1	配备主动或被动式障碍探测系统,对安全风险地段设置速度控制
车辆故障致中断行车	R2	优化列车维护流程,提升运营初期列车运行的可靠性和稳定性
站台门间夹人、夹物	R3	升级站台门与列车门间隙探测功能,加强登乘事件处置流程相关培训
GOA4 级 FAO 系统移动授权指示功能缺失	R3	在列车上设置移动授权指示灯
SPKS 防护疏漏	R3	优化 SPKS,考虑多支队伍防护
登乘平台人车冲撞	R4	配备 GOA4 模式下移动授权指示功能
第三轨触电	R4	设置 SPKS 并联动接地,加强无人区及轨行区管理
车场列车与人员冲突	R4	严格执行 SPKS 防护的相关规定
列车唤醒失败	R4	完善远程时刻表唤醒功能

的风险持续管控机制,积累风险项目、风险分类、风险性质、风险等级、管控措施及责任主体等大数据,并构建跨坐式单轨系统全寿命周期风险数据库,促进跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的安全管理水平。

4 结语

基于 EN 50126:2004 和 LC 评价方法开展的跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统安全风险的研究与实践,基本保障了 FAO 系统的安全风险处于可控状态,间接提高了 FAO 系统的安全可靠性。

后续将以跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的安全运营需求为导向对该系统进行研究,通过同步跟踪安全风险日志和全自动运营场景验证流程,建立全寿命周期风险管控理念并做好其与 RAMS 管理工作的衔接,同时进一步完善安全风险管控体系,从而促进跨坐式单轨 GOA4 级 FAO 系统的安全运营。

参考文献

[1] 陈桂香,黄宏伟,尤建新. 对地铁项目全寿命周期风险管理的研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(1): 47.
CHEN Guixiang, HUANG Hongwei, YOU Jianxin. Study on life cycle risk management of metro[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 47.

- [2] 陈文彬. 跨坐单轨制式线路 GOA4 运营安全风险防控研究[J]. 隧道与轨道交通, 2021(增刊1): 101.
CHEN Wenbin. Research on prevention and control of operational safety risk of GOA4 crossing single-track line[J]. Tunnel and Rail Transit, 2021(S1): 101.
- [3] 滕乐天, 李力, 韩天祥. 以 LCC 理念进行可靠性管理的探讨与实践[J]. 上海电力, 2005(1): 65.
TENG Letian, LI Li, HAN Tianxiang. Discussion and practice of reliability management based on LCC concept[J]. Shanghai Electric Power, 2005(1): 65.
- [4] 曾琦. N 公司 EPC 工程总承包项目的风险管理研究[D]. 上

海: 华东理工大学, 2017.

ZENG Qi. Research on risk management of EPC general contracting project of N company[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017.

- [5] 李兰鹏. 跨坐式单轨全自动线路安全风险防控与应急管理[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(增刊1): 69.
LI Lanpeng. Safety risk prevention and emergency management of straddle monorail fully automatic line[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(S1): 69.

(收稿日期:2022-09-16)

(上接第 75 页)

按照全过程安全生命周期实施安全保证工作提供参考。

参考文献

- [1] IEC. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems—part 2: requirements for electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems; IEC 61508-2:2010[S]. Geneva:IEC, 2010:17-19.
- [2] IEC. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems—part 5: examples of methods for the determination of safety integrity levels; IEC 61508-5:2010[S]. Geneva:IEC, 2010:21-25.
- [3] BSI. Railway applications—the specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) Part

2: systems approach to safety; BS EN 50126-2:2017[S]. Brussels: CENELEC, 2017:35-40.

- [4] 张冬梅, 刘伟. 基于风险矩阵的轨道交通车辆安全完整性等级分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 62.
ZHANG Dongmei, LIU Wei. Research on safety integrity level analysis of rail transit vehicle based on risk matrix[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(8): 62.
- [5] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通全自动运行系统规范第2部分: 核心设备产品: T/CAMET 04017.2—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019:28.
China Association of Metros. Urban rail transit—fully automatic operation system specification—part 2: core equipment product: T/CAMET 04017.2—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019:28.

(收稿日期:2022-09-15)

(上接第 80 页)

- ZHOU Yongli. Discussion on video monitoring application based on big data technology[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2019, 9(5): 63.
- [2] 李楠. 智慧监控在高速公路信息化中的应用[J]. 中国交通信息化, 2019(5): 32.
LI Nan. Application of intelligent monitoring in expressway informatization[J]. China ITS Journal, 2019(5): 32.
- [3] 杨辉. 大数据时代视频指挥调度系统新技术的融合应用[J]. 中国安防, 2019(5): 94.
YANG Hui. Fusion application of new technologies of video commanding and dispatching system in the era of big data[J]. China

Security & Protection, 2019(5): 94.

- [4] 吴敏萍, 陈波, 赵清. 公共安全视频大数据智能应用研究[C]//中国通信学会. 2019 年全国公共安全通信学术研讨会优秀论文集. 乌鲁木齐: 中国通信学会, 2019.
WU Minping, CHEN Bo, ZHAO Qing. Research on intelligent application of public security video big data[C]// China Institute of Communications (CIC). Collection of Outstanding Papers of 2019 National Public Security and Communications Academic Seminar. Urumqi: CIC, 2019.

(收稿日期:2022-10-31)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821