

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.03.019

基于情景融合的全自动运行系统 危害分析技术

薛维清, 丁奕, 李雁, 丁亚飞, 胡妃俨

(交控科技股份有限公司, 北京 100070)

摘要: 为提高城市轨道交通全自动运行(fully automatic operation, FAO)系统的安全性, 本文从FAO系统运维的角度, 提出一种基于情景融合的FAO系统危害分析技术。该技术通过场景要素识别, 融合生成FAO应用场景后, 综合选取等比例分配法、先验信息分配法或组合逻辑分配法, 采用半定量安全完整性等级(safety integrity level, SIL)分配技术完成核心子系统功能安全指标分配, 解决传统功能故障模式影响及危害性分析(failure mode, effect and criticality analysis, FMECA)对多系统功能SIL分配存在局限性的问题, 为后续FAO系统线路的危害分析及SIL分配工作提供参考。

关键词: 城市轨道交通; 全自动运行; 危害分析; 安全需求; 情景融合

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)03-0141-08

Hazard Analysis Technology Based on Scenario Fusion for Fully Automatic Operation System

XUE Weiqing, DING Yi, LI Yan, DING Yafei, HU Feiyan

(Traffic Control Technology Co., Ltd., Beijing 100070)

Abstract: In order to enhance the safety of Fully Automatic Operation (FAO) systems in urban rail transit, a hazard analysis method for FAO systems is proposed, which is based on scenario fusion from the perspective of FAO system operation and maintenance. The method initiates by identifying scenario elements and integrating them, to generate FAO application scenarios. It then comprehensively selects an allocation method of semi-quantitative SIL (Safety Integrity Level) among proportional allocation, prior information allocation, and combined logical allocation, to complete the allocation of safety targets of functions of the core subsystems. Finally, the analysis method is applied in an actual engineering project case, providing a reference for subsequent hazard analysis and SIL allocation for metro lines with FAO system. This approach also addresses the limitations of traditional FMECA (Failure Mode, Effect and Criticality Analysis) in performing SIL allocation for multi-system functions.

Keywords: urban rail transit; fully automatic operation (FAO); hazard analysis; safety requirement; scenario fusion

全自动运行(fully automatic operation, FAO)系统是以自动化技术提升运营服务水平的新一代城市轨道交通控制系统。相较于传统的基于通信的列车控制(communication based train control, CBTC)系统, FAO

系统将多个分散子系统联结为一个有机的整体, 实现各专业系统之间的信息互通、资源共享, 提高整体协调运行效率, 降低人为因素对运营可用性和安全性的影响, 但FAO系统也因为更加复杂的控制关系导致复

收稿日期: 2023-10-26 修回日期: 2024-02-15

第一作者: 薛维清, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通控制系统功能安全设计与分析技术研究, weiqing.xue@bj-tct.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1600702)

引用格式: 薛维清, 丁奕, 李雁, 等. 基于情景融合的全自动运行系统危害分析技术[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(3): 141-148.

XUE Weiqing, DING Yi, LI Yan, et al. Hazard analysis technology based on scenario fusion for fully automatic operation system[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(3): 141-148.

杂系统运行场景增多。

复杂的场景要求在系统设计阶段采用更有效和完整的安全分析技术以便更好地进行系统安全功能和架构划分。而在分析过程中，单纯传统方法如故障模式影响及危害性分析(failure mode, effect and criticality analysis, FMECA)、危害与可操作性研究(hazard and operability study, HAZOP)等，均难以确保 FAO 系统复杂功能场景构建的全面性、安全功能需求的定量指标分配的合理性。因此，研究 FAO 系统层危害分析技术，对于充分识别 FAO 系统层危险源及其致因因素，并进行合理的 FAO 核心子系统功能安全完整性等级(safety integrity level, SIL)分配具有重要意义。

在轨道交通复杂系统危害分析方面，许多学者进行了深入研究。刘敬辉^[1]将故障树分析(fault tree analysis, FTA)方法与层次分析(analytic hierarchy process, AHP)方法相结合，研究设计基于 FTA-AHP 的铁路安全风险综合评估方法；莫志刚等^[2]提出在设计阶段采用基于 HAZOP 及最低合理可行原则(as low as reasonably practicable, ALARP)的方法，评估信号系统影响行车安全的潜在风险，并利用经验打分法对风险进行定量分析和确定风险等级；余敬芝等^[3]提出一种基于 Petri 网模型的形式化安全分析方法，结合动态逻辑、模糊逻辑的表达，考虑组件除正常态、物理故障态之外的功能失效态及多状态间的转换关系，建立可用于系统全生命周期的形式化安全分析模型，对于子系统设备层分析具有一定借鉴意义；付世亮^[4]提出了一种基于风险图对轨道交通车辆系统进行 SIL 分析的模型及定性分析方法；杨娟等^[5]阐述了一种基于暴露率、降低事故发生可能性及降低事故后果可能性(exposure, probability, consequence, EPC)因子的现代有轨电车信号系统的 SIL 评估方法；白春光^[6]提出通过初步危害分析(preliminary hazard analysis, PHA)和基于 FMECA 技术的子系统危害分析(subsystem hazard analysis, SSHA)方法识别车辆的危险源，

采用类似 EPC 的半定量方法对功能分配 SIL。这些研究在单系统危害分析或功能 SIL 分配上具有一定参考意义，但是对整个 FAO 系统层的危险源识别以及 FAO 系统核心设备功能的 SIL 分配、技术安全要求和运营安全需求的定义缺少指导信息。而傅贵等^[7]通过研究国内外标准文献，提出危险源广泛认可的含意并归纳总结危险源的实质内容，对于 FAO 系统层危险源的识别奠定了理论基础；俞杭华等^[8]研究了定性、半定量、定量 3 类 SIL 确定方法，为 FAO 系统核心设备的功能安全完整性等级的确定提供了参考依据。

本文综合考虑现有研究现状并结合 FAO 系统特点，从系统运行维护角度出发，采用情景融合方法对典型 FAO 系统的危险源进行识别以及致因因素分析，然后采用半定量 SIL 分配技术为 FAO 系统各个核心子系统功能分配顶层安全需求及制定量化的安全指标，同时提出相应的技术及运营安全需求，为后续的 FAO 系统设计开发及建设实施提供参考。

1 方法介绍

FAO 系统一般较为庞大，运行场景复杂多样。例如图 1 中所示 FAO 系统由 7 大专业、31 个子系统组成，以及存在 59 个大场景、257 个小场景和 700 多个细小场景^[9-10]。图 1 中，TCMS 指列车控制和管理系统(train control and management system)，FAS 指火灾自动报警系统(automatic fire alarm system)。

对于类似这样复杂的系统，从运维的视角将既有已识别的 FAO 系统事故清单结合系统运行线路地点、

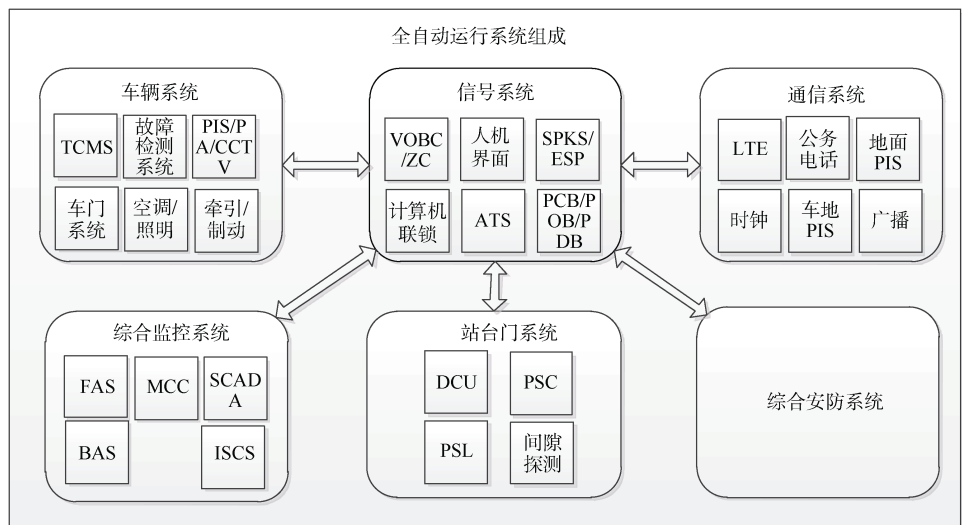


图 1 典型 FAO 系统架构

Figure 1 Typical architecture of FAO system

系统兼容的运行等级、系统的活动事件，组合成合成情景，并将其中存在安全隐患的情景作为分析对象，然后结合风险矩阵，采用类 HAZOP 技术对这些情景进行系统性的危害分析，并在 FAO 系统层给出各子系统/设备分配安全需求及定量的安全指标，确保在系统交付时达到风险可接受的水平，保障 FAO 系统的运行安全。基于情景融合的 FAO 系统危害分析流程如图 2 所示。

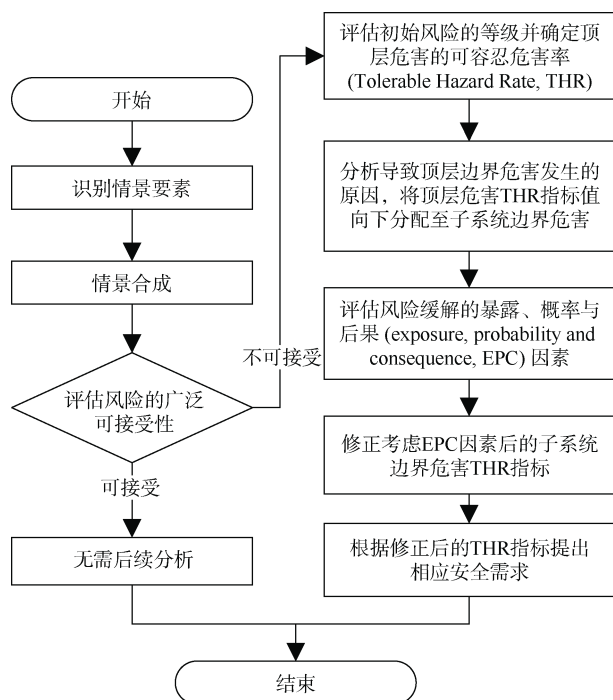


图 2 基于情景融合的 FAO 系统风险分析流程
Figure 2 Flowchart of risk analysis based on scenario fusion for FAO system

2 情景融合分析

情景融合分析用于融合线路的可能场景，通过情景要素识别线路的物理环境、运营活动、运营等级和顶层事故清单，并将上述要素合成风险场景，为后续风险分析奠定基础。

2.1 情景要素识别

1) 识别线路地点。通过参考合同文件分析线路特点，从运维组织、FAO 覆盖区域和特殊功能的不同角度对线路的物理区域进行单元划分，最终形成如表 1 所示的线路地点清单。

2) 识别运营活动。从运营服务、维护保障和故障处理的不同角度将场景文件中的运营场景进行一定的归纳梳理，根据运营过程中活动对象的不同分成设

备的活动和人的活动两类，形成如表 2 所示的运营活动事件清单。

表 1 线路地点清单

Table 1 List of route locations

地点	区域	位置	
车辆段	全自动运行区	停车列检库	
		全自动运行库外轨行区	
		洗车线	
		出入段线	
		U 型槽	
		
	非全自动运行区	非全自动运行区库内	
		试车线	
		非全自动运行区库外轨行区	
		
转换轨	全自动和非全自动区域间转换轨		
.....			
区间	隧道	风井	
		人防门	
		联络通道	
		地下区间疏散平台和通道	
		隧道内的行车区	
		泵房	
		
		高架	声屏障
			疏散平台
		
车站	乘降区	地下岛式站台	
		地下侧式站台	
		站台行车区	
	非乘降区	岔区	
		存车线	
.....			
其他	非线路区域	运行控制中心(OCC)/临时控制中心(备用控制中心、车辆段控制中心(DCC)), 设备房及控制室	
		车站公共区 (仅考虑疏散)	
		

3) 识别顶层事故。参考文献[11]和文献[12]中危害清单以及铁路行业事故经验总结，结合全自动运行系统自身特点，形成城轨全自动运行系统的顶层危害清单，如表 3 所示。

表 2 活动清单
Table 2 List of activities

来源类别	场景分类	活动
设备层活动	正常运营场景	唤醒
		列车运行
		进站停车
		站台发车
		洗车
	
	异常运营场景	列车退行
		非正常情况停车
	
	维护场景	工程车正线运行
	
	人的活动层	正常运营场景
上下客		
.....		
异常运营场景		人工紧急开关门
		乘客疏散
		救援乘客
	
维护场景		设备维修
		燃料加注
	

表 3 顶层事故清单
Table 3 Top level accident list

来源类别	事故
设备层危害	车车相撞
	车和物体相撞
	人车相撞
	列车出轨

人员活动危害	人高处跌落
	人摔倒
	人陷入夹缝
	中暑/冻伤
	恐慌
	机械伤害
	触电
	缺氧

	环境危害
火灾	
爆炸	
水淹	
.....	

4) 确定自动化等级。GoA 等级划分如图 3 所示, 国际公共交通协会(UITP)将列车运行的自动化等级(grade of automation, GoA)划分为 4 级^[13]。GoA3 级和 GoA4 级统称为 FAO, 正常情况下, GoA3 与 GoA4 由设备自动完成各项操作; 故障情况下, GoA3 由车上的乘务员处置故障, 而 GoA4 等级则需由地面人员上车进行处置。

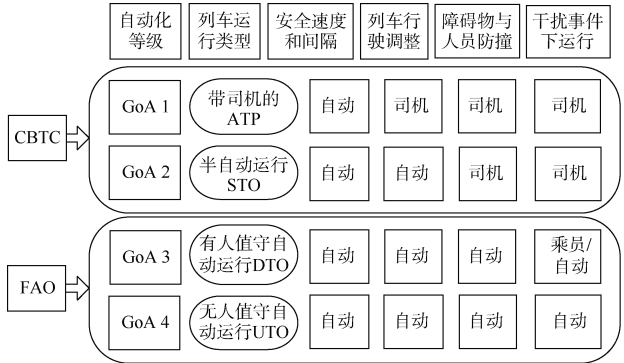


图 3 GoA 等级划分
Figure 3 GoA classification

2.2 风险情景合成

将 2.1 节中识别的各项情景要素进行融合, 如图 4 所示。按照如“一定运行自动化等级下, 在特定线路地点, 设备或人员进行运营活动时, 导致了安全事故”的模式进行一一组合列举, 得到融合风险情景列表如表 4 所示。

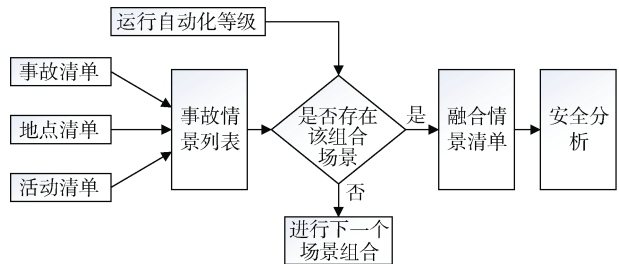


图 4 情景融合
Figure 4 Scenario fusion

表 4 融合场景列表
Table 4 List of fused scenarios

运营活动	线路地点	事故清单	自动化等级	融合场景
上下客	车站	人员被列车碰撞	GoA3/4	在侧式站台/岛式站台车站上下客, 乘客跌入轨行区与列车碰撞
上下客	车站	人员跌落受伤害	GoA3/4	在侧式站台/岛式站台车站上下客, 乘客跌入轨行区受伤
.....

考虑事故严重度等级、受影响群体、事故发生区域等因素,融合得到不同的风险情景,将其中部分情景归纳总结,得到代表某一类融合风险情景的危害。例如:在场段或正线,工程车、轨道车在列车运行或退行过程中,与其他列车发生追尾。

3 FAO 系统融合情景风险分析

将情景融合方法具体应用到国内某实际地铁线路(线路长约 40 km,最高运营速度为 80 km/h)的 FAO 系统工程项目中,共识别出 31 种线路地点类型、47 种运营活动、17 种顶层事故,将它们与不同自动化等级组合形成融合场景共计 335 条。

融合情景风险分析是将融合事故情景作为分析对象,评价其初始风险及施加安全措施后的残余风险,分析导致事故发生的次级危害并提出相应的安全需求,以便将全自动运行系统风险降到合理可接受的水平。

3.1 风险评价与 THR 分配

在完成对全自动运行系统的危害识别后,采用风险矩阵分析法,通过建立一个二维的分析矩阵,以风险接受程度和事故发生频率作为矩阵二维的维度,利用经验打分法对全自动运行系统的融合事故场景的风险进行评价^[5],从列车运行速度、列车满载率情况、对历史事故库的检索以及二次防护等多个维度来确定风险发生的概率和后果严重度。对于不可接受的风险,评价施加安全需求后的风险等级。

根据初始风险评价的事故后果严重度等级,结合风险矩阵中定义的风险接受标准,确定某一严重度等级下事故发生的可容忍概率(此处简化假设危害发生

等同于事故发生);通过类 HAZOP 的形式分析导致融合事故场景的子系统层危害、环境和人的原因。融合场景中已明确场景的范围、物理边界、外部环境和涉及的子系统,结合这些内容,可以优选出 HAZOP 引导词,并根据引导词,分析出可能导致融合事故场景发生的所有致因因素。

结合风险接受矩阵对融合事故场景的危害进行分析,如果在未采取任何风险降低的措施和手段的情况下,该危害的风险处在无法容忍的区间范围,根据风险矩阵的接受原则^[14],对于无法容忍的风险不予接受,必须要采取一定的措施使得该风险降低到可接受的区间范围内。

根据致因分析结果,将初步的 THR 指标值可按照等比例分配法、先验信息分配法或组合逻辑分配法自顶向下分配,确定各功能需要达到的定量指标要求。初步可容忍危害发生率指标依据文献^[14]所述的 GAME 原则制定,该原则要求新设计的系统的安全性至少需与现有同类系统的安全性相当,采用该原则选择传统 CBTC 系统的总体安全性能作为门限标准对 FAO 系统进行判别,以确保设计出的 FAO 系统安全性优于或等同于 CBTC 系统。例如:“在站台乘客换乘过程中,乘客或工作人员陷入车门和站台门之间的间隙内,列车移动导致 1 至 2 人死亡”这种“严重事故”,参考 CBTC 系统安全功能,初步确定 THR 指标为 1×10^{-8} 次/h,如表 5 所示。然后根据致因分析结果,将该指标项分析得到的 6 项致因(例如“信号系统移动授权防护失效”、“车门与站台门关闭后,站台门系统异物检测功能失效”等核心设备功能失效)进行分配。

表 5 THR 初步分配示例

Table 5 Example of initial THR allocation

潜在危害	危害情景	严重程度	是否广泛可接受	施加安全需求前的风险等级	初步 THR	施加安全需求后的风险等级
人员陷入车门和站台门间的间隙	在站台乘客换乘过程中,乘客或工作人员陷入车门和站台门之间的间隙内,列车移动	1~2 人死亡	否	R2	1×10^{-8}	R4
人员从站台跌落至轨行区	在站台乘客候车过程中,站台门非预期打开,乘客跌落至轨行区内	3~9 人重伤	否	R2	1×10^{-8}	R4
.....

假设需要将系统整体 THR 指标(1×10^{-8})分配至 6 项核心设备安全功能上,可采用如下方法:

1) 采用等比例分配时,每个功能得到的指标值为 1.67×10^{-9} ,这个指标值为“分解后可容忍的次级危害发生率 THR”。该方法主要用于对不同致因的概率进

行详细推算存在较大困难的情形;

2) 采用先验信息分配时,需根据这 6 项功能当前所能达到的定量指标要求按照逻辑“或”进行求和,如果结果满足整体 THR 指标(1×10^{-8})时即可采用此方法,否则,需要采用别的方法;该方法主

要用于此前对不同致因的概率已有一定借鉴值的情形；

3) 采用组合逻辑分配法时, 需要将这 6 项功能与危害间构建故障树, 根据构建故障树的组合逻辑关系来分配 THR 指标值; 该方法主要用于不同致因及危害

之间存在比较明显逻辑关系的情形。

3.2 风险控制

根据文献[14]提出的风险模型, 危害的发生不同于事故的发生, 危害发生后, 如若要发展成事故, 还需要同时具备其他触发条件, 如图 5 所示。

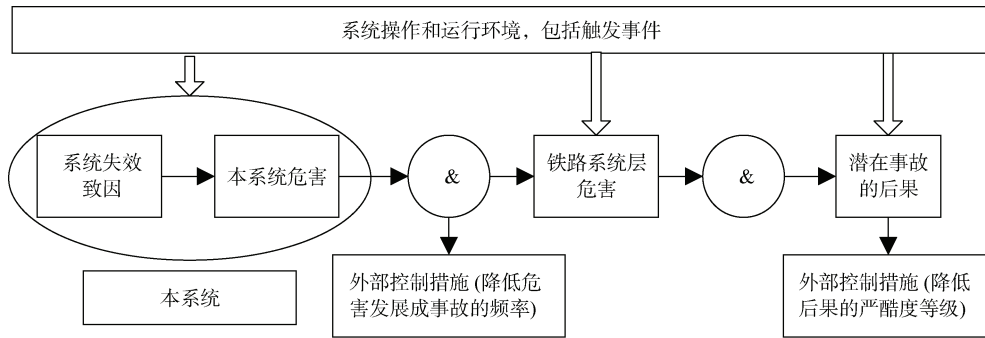


图 5 风险模型示例

Figure 5 Example of risk model

事故的发生包含的因素^[14]如下。

1) 暴露在危险环境的人(F): 暴露在危险环境中的人能够意识到危险的发生并及时采取措施, 从而防止事故发生;

2) 触发事件或条件发生的概率(P): 导致危险事故发生的触发条件或事件发生的概率;

3) 危害发生的窗口期(W): 危险持续的时间窗口内人员暴露于危险中的可能性。这些触发条件采用 EPC 因子(即暴露于危害的可能性、事故发生可能性降低的概率、事故后果减轻的可能性)描述“分解后可容忍的次级危害发生率 THR”。考虑 EPC 因子后, 会得到“考虑 EPC 修正后的可容忍的次级危害 THR”指标值, 这一指标值表示危害发生后, 导致危险事故发生的可容忍事故率(Tolerable Accident Rate, TAR), 计算式^[15]为

$$TAR = (E \times P \times C) \times THR \quad (1)$$

式中, THR 为 FAO 核心设备边界危害的可容忍危害率; TAR 为分配给 FAO 核心设备(或对应功能)的可容忍事故率; E 表示风险群体暴露率, 用于表示风险群体暴露在风险窗口中的概率; P 表示事故发生可能性降低的概率, 用于降低危害发展成为事故概率的因素; C 表示事故后果减轻可能性, 用于表示降低事故发展产生更加严重后果的概率。

延续 3.1 节的示例, 采用等比例分配的方法分解事故的 THR(仅涉及人为措施的不纳入分配), 然后结合半定量 EPC 因子获得对应的 TAR, 如表 6 所示。根据 TAR 的取值, 提取融合事故情景风险分析得到的所

有功能安全需求中最严苛的定量及 SIL 要求, 作为某项功能的最终安全完整性要求, 确保将残余风险降低到可容忍的水平, 并将所有识别的安全需求(包括功能安全需求、技术安全需求及运营安全需求), 分配给各子系统/设备进行实现, 进而确保系统的整体风险被控制在运营可接受的水平。

4 结论

基于识别出的实际地铁线路中 FAO 系统融合场景, 结合第 3 章所述分析处理方法, 本文作者进一步为该 FAO 系统的各核心设备功能提出了相应的功能安全需求、技术安全需求和运营安全需求, 充分说明了此方法的有效性^[16]。

1) 在 FAO 系统危害分析中, 从运维角度提出了具体可行的场景融合方法, 可对 FAO 系统的危险源进行识别并完成致因因素分析, 通过采用半定量 SIL 分配技术完成核心子系统功能 SIL 分配, 确保 FAO 系统危险源识别的全面性及功能安全性能分配的合理性。

2) 本文方法主要根据不同的事故融合情景及致因分析结果, 结合 EN 50126-2 标准^[14]的要求, 综合选取等比例分配法、先验信息分配法或组合逻辑分配法, 提升 THR 分配的准确性。

3) 本文方法在国内地铁线路 FAO 系统工程项目中得到实际应用, 从技术安全和运营安全的角度, 对不同核心设备提出了多条安全需求, 具有实际应用效果。

表 6 EPC 分配示例
Table 6 Example of EPC allocation

次级危害	分解后的 THR	暴露于危害的可能性 E		事故发生可能性降低的概率 P		事故后果减轻可能性 C		考虑 EPC 修正后的 THR	安全需求		
		取值	说明	取值	说明	取值	说明		功能安全需求	技术安全需求	运营安全需求
信号系统移动授权防护失效	3.33×10^{-9}	1	—	0.01	屏蔽门设有声光报警信息, 关门时会提醒乘客; 屏蔽门设有挡板, 如果有乘客处于车门与屏蔽门之间时, 使屏蔽门无法关闭; 站务人员能够组织乘客有序换乘	0.1	车站设有站务人员, 如果乘客陷入车门与屏蔽门之间时被站务发现, 站务会阻止列车发车	3.33×10^{-6}	信号系统计算移动授权功能应达到 SIL1	站台门系统应具有开/关门声光报警信息	运营制定乘客换乘相关管理规程, 组织乘客在站台有序换乘
信号系统进路防护失效	3.33×10^{-9}	1	—	0.01	屏蔽门设有声光报警信息, 关门时会提醒乘客; 屏蔽门设有挡板, 如果有乘客处于车门与屏蔽门之间时, 使屏蔽门无法关闭; 站务人员能够组织乘客有序换乘	0.1	车站设有站务人员, 如果乘客陷入车门与屏蔽门之间时被站务发现, 站务会阻止列车发车	3.33×10^{-6}	信号系统计进路防护功能应达到 SIL1	站台门系统应具有开/关门声光报警信息	运营制定乘客换乘相关管理规程, 组织乘客在站台有序换乘
车门与站台门关闭后, 站台门系统异物检测功能失效	3.33×10^{-9}	1	—	0.01	屏蔽门设有声光报警信息, 关门时会提醒乘客; 屏蔽门设有挡板, 如果有乘客处于车门与屏蔽门之间时, 使屏蔽门无法关闭; 站务人员能够组织乘客有序换乘	0.1	车站设有站务人员, 如果乘客陷入车门与屏蔽门之间时被站务发现, 站务会阻止列车发车	3.33×10^{-6}	站台门与车门间异物检测功能应达到 SIL1	站台门系统应具有开/关门声光报警信息	运营制定乘客换乘相关管理规程, 组织乘客在站台有序换乘
站台门与车门之间间隙过大	—	—	—	—	—	—	—	—	—	站台门与车辆包络线间间距应满足地铁设计规范 GB 50157-2013 要求 ^[17] ;	—
乘客换乘过程人员过多拥挤	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	运营制定乘客换乘相关管理规程, 组织乘客在站台有序换乘
司机错误授权发车	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	运营制定行车岗位作业禁令, 当人工介入驾驶列车时, 严禁夹人夹物动车

参考文献

[1] 刘敬辉. 基于 FTA-AHP 的铁路安全风险综合评估方法[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(2): 138-144.
LIU Jinghui. Synthesized risk assessment method for railway safety based on FTA-AHP analysis[J]. China railway science, 2017, 38(2): 138-144.

[2] 莫志刚, 骆汉宾. 基于 HAZOP 及 ALARP 的地铁信号系统安全评估[J]. 机车电传动, 2018(3): 85-89.

MO Zhigang, LUO Hanbin. Safety evaluation of urban rail transit signal system based on HAZOP and ALARP principles[J]. Electric drive for locomotives, 2018(3): 85-89.

[3] 余敬芝, 燕飞, 牛儒. 基于 Petri 网的形式化安全分析方法[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(增刊 2): 138-143.
YU Jingzhi, YAN Fei, NIU Ru. Formal security analysis method based on Petri net[J]. China safety science journal, 2019, 29(S2): 138-143.

- [4] 付世亮. 城市轨道交通车辆系统安全完整性等级分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(10): 70-74.
FU Shiliang. Safety integrity level analysis of urban guided transport vehicle system[J]. Urban mass transit, 2019, 22(10): 70-74.
- [5] 杨娟, 张小林. 基于EPC因子的有轨电车信号系统安全完善度等级(SIL)评估[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 57-60.
YANG Juan, ZHANG Xiaolin. Evaluation of tram signal system SIL based on exposure-probability-consequence factors[J]. Urban mass transit, 2018, 21(4): 57-60.
- [6] 白春光. 基于安全完整性级别分析的全自动驾驶地铁列车安全功能设计[J]. 铁道技术监督, 2021, 49(4): 53-57.
BAI Chunguang. Safety Function Design of Full Automatic Metro Train based on Safety Integrity Level Analysis[J]. Railway quality control, 2021, 49(4): 53-57.
- [7] 傅贵, 吴亚丽, 章仕杰, 等. 危险源的实质内容分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(11): 1-5.
FU Gui, WU Yali, ZHANG Shijie, et al. Analysis on essential content of hazard[J]. China safety science journal, 2020, 30(11): 1-5.
- [8] 俞杭华, 胡宗福, 薛小平. 城市轨道交通信号系统安全完整性研究[J]. 大连交通大学学报, 2008, 29(6): 34-39.
YU Hanghua, HU Zongfu, XUE Xiaoping. Research on safety integrity of the signal system in urban rail transit[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2008, 29(6): 34-39.
- [9] 郜春海, 王伟, 李凯, 等. 全自动运行系统发展趋势及建议[J]. 都市轨道交通, 2018, 31(1): 51-57.
GAO Chunhai, WANG Wei, LI Kai, et al. Development trend and suggestion of fully automatic operation system[J]. Urban rapid rail transit, 2018, 31(1): 51-57.
- [10] 郜春海. 城市轨道交通自主化全自动运行系统技术研究[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(S1): 125-129.
GAO Chunhai. Research on the technology of autonomous automatic operation system of urban rail transit[J]. Railway signalling & communication, 2019, 55(S1): 125-129.
- [11] International Electrotechnical Commission. Railway applications-Automated urban guided transport (AUGT)-Safety requirements: IEC 62267[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2009.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 轨道交通自动化的城市轨道交通(AUGT)安全要求 第1部分: 总则: GB/T 32588.1—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Railway applications—Automated urban guided transport(AUGT)—Safety requirements—Part 1: General: GB/T 32588.1—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [13] International Electrotechnical Commission. Railway applications-Urban guided transport management and command/control systems-Part 1: System principles and fundamental concepts: 62290-1[S]. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2007.
- [14] European Committee for Electrotechnical Standardization. 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]. London: BSI Standards Limited, 2017.
- [15] 仲伟强, 刘超, 黄抗强, 等. FAO核心子系统安全完整性等级评价方法研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(4): 70-74.
ZHONG Weiqiang, LIU Chao, HUANG Kangqiang, et al. Evaluation method for core subsystem safety integrity level of the FAO system[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(4): 70-74.
- [16] 薛维清, 胡妃伊, 李雁, 等. 全自动运行系统风险分析技术研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(6): 108-115.
XUE Weiqing, HU Feiyan, LI Yan, et al. Risk analysis technology of fully automatic operation system[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(6): 108-115.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

(编辑: 王艳菊)