

列车火灾隐患分析研究和应用

冷映丽 薛淑胜 霍佳敏

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘要 [目的] 火灾事故是地铁运营中主要的安全事故, 为将火灾隐患降低至可接受水平, 确保列车的安全运行, 特进行本研究。[方法] 将 EN 50126-2:2017《铁路应用-可靠性、可用性、可维护性和安全性(RAMS)的规范和证明 第2部分 系统安全方法》的安全分析方法应用在城市轨道交通车辆火灾隐患分析中;通过对着火源和易燃物的识别,建立各系统火灾隐患清单;结合 HAZOP(危险与可操作性分析)法,对导致火灾发生的部件进行详细分析,并识别火灾发生原因;在车辆设计中对不同场景进行火灾隐患识别,提出减轻措施,并跟踪管理风险解决措施直至风险降低到可接受的水平。[结果及结论] 将地铁车辆火灾隐患分析中识别出的火灾区域,应用至火灾仿真分析场景方案中,通过仿真结果对地铁车辆火灾隐患区域进行了再次修正,并将研究结果应用至火灾报警系统设计中,能够更加合理布置火灾报警探测。

关键词 地铁运营; 火灾隐患; 风险评估; 着火源; 易燃物
中图分类号 U298.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.017

Fire Hazard Analysis and Application in Trains

LENG Yingli, XUE Shusheng, HUO Jiamin

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] Fire accidents are major safety hazards in metro operation. To reduce fire hazards to an acceptable level and ensure the safe operation of trains, the research is specifically carried out. [Method] The safety analysis method outlined in EN 50126-2:2017 (Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability, and Safety (RAMS) - Part 2: Systems Approach to Safety) is applied to analyze fire hazards in urban rail transit vehicle. Fire hazard lists for each system are established by identifying ignition sources and combustible materials. Using the HAZOP (hazard and operability analysis) method, components contributing to fire incidents are analyzed in detail to identify the causes of fires. Fire hazard identification is carried out in different scenarios during vehicle design, proposing mitigation measures, and tracking risk management measures until the risks are reduced to an acceptable level. [Result &

Conclusion] The identified fire areas from the analysis of fire hazards in metro vehicles are applied to the scenario schemes of fire simulation analysis. The simulation results are used to further refine the fire hazard areas in metro vehicles, and the research results are applied to the design of fire alarm systems, enabling a more reasonable arrangement of fire alarm detection.

Key words metro operations; fire hazard; risk assessment; ignition source; flammable material

火灾事故是地铁运营中主要的安全事故^[1]。由于地铁运行环境封闭,载客量大等特点,其运营安全十分重要。随着全自动驾驶技术的推广,原本由司机承担的职责,均由全自动驾驶条件下的系统或控制中心取代,其火灾安全隐患也不容忽视。地铁安全管理通常采用自上而下的分析方法:识别火灾隐患发生场景,并在车辆设计中对不同场景进行火灾隐患识别;提出减轻火灾隐患的措施,将全自动运行车辆火灾隐患降低至可接受水平,以确保全自动运行系统的安全运行。

1 火灾危害识别流程

将 EN 50126-2:2017《铁路应用-可靠性、可用性、可维护性和安全性(RAMS)的规范和证明 第2部分 系统安全方法》^[2]中,通过“沙漏模型”定义了安全分析方法的2个主要方面:风险评估和危害控制。风险评估包括了系统定义,风险分析(危害识别、后果分析等)和 risk 评价。危害控制包括原因分析、危害识别和共因分析^[2]。通过风险识别和各阶段不断的迭代,建立隐患清单,并跟踪管理风险解决措施直至风险降低到可接受的水平。

基于 EN 50126-2:2017 中的沙漏模型的隐患分析,通过建立火灾场景,识别各系统是否存在着火条件,并开展火灾隐患识别,流程如图1所示。根据火灾隐患清单,进行风险评估和减轻措施制定,对火灾风险的管控措施进行分解。根据整车各子系

统特点进行需求分配,包括性能需求、功能需求及接口需求,最终建立整车子系统防火安全需求表,

为车辆各子系统的防火设计提供指导。

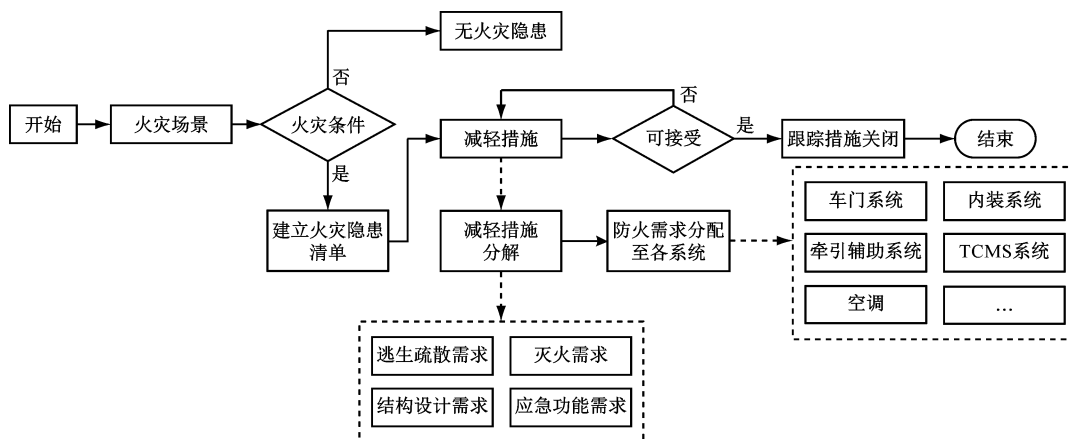


图1 火灾隐患识别流程图

Fig. 1 Flow chart of fire hazard identification process

1.1 火灾场景列表

初步危害分析通常采用自上而下的方法,基于Molsafe(模块化城市交通安全保障分析)中根据发生位置将危害分为9类:车辆运行、车辆内部、车辆与车站间的接口(车辆在站台)、车辆与车站间的接口(车辆不在站台)、车辆段、控制中心、维修、紧急情况和环境(不可抗力)^[3]。结合Molsafe分类,车辆火灾的场景为:车辆火灾、非车辆火灾两部分。

图2为火灾发生场景清单。由图2可知:车辆运行分为车辆自身发生火灾和外界火灾发生带来的隐患。车辆自身发生火灾,可分为车顶、车内和车下着火。对于非车辆原因导致的火灾,需考虑车辆在站台、在线路运行或在车辆段时外部火灾时,车辆消防救援需求。如:当车辆运行至发生火灾的车站,各系统需采取哪些措施将车内乘客的影响降低至风险可接受水平。

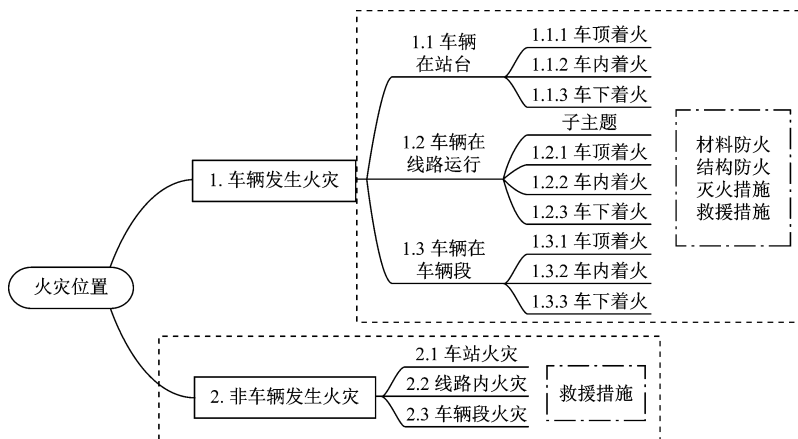


图2 火灾发生场景清单

Fig. 2 List of fire scenarios

1.2 火灾条件

任何燃烧过程都必须具备3个条件,即可燃物、助燃剂和着火源^[4]。在城市轨道交通车辆上,由于轻量化设计和新材料的应用,车辆的非金属较多,常见的可燃物为固体可燃物和液体可燃物。

地铁车辆上的固体可燃物主要有:

1) 内装材料:内饰板,防寒材、地板布,灯罩,座椅、车门胶条、油漆等。

2) 空调系统:保温材、密封条、风道、电线电缆。

可燃物主要是指油脂或酒精、乙醚等有机溶剂。在地铁车辆上,其主要以油脂为主,如转向架系统的润滑油,牵引系统的冷却油等。

近几年,地铁车辆上使用的非金属材料均需要满足 EN 50126-2:2017 中要求的防火阻燃和烟毒性要求。

助燃剂是指与可燃物相结合导致燃烧的物质。大气中含有 21% 的氧气,它是最常见的氧化剂。在火灾发生时,氧气是最常见的助燃剂。

着火源是指能够使可燃物与助燃剂发生燃烧反应的能量来源。整车中存在的火源主要是:

- 1) 机械火源,包括摩擦火源、绝热压缩火源等;
- 2) 热火源,包括高温表面火源、热射线火源或热汽等;
- 3) 电火源,包括电热型火源、电弧型火源;
- 4) 化学火源,包括明火火源、化学反应热火源。

1.3 风险评价方法

火灾隐患危害分析需要对初始火灾风险和采取措施后最终火灾风险分析进行系统性安全评价^[5]。采用 ALARP(最低合理可行原则)风险接收准则,依照根据 EN 50126-1:2017《铁路应用-可靠性、可用性、可维护性和安全性(RAMS)的规范和证明 第 1 部分 RAMS 通用流程》中定义的风险矩阵^[6](见图 3)结合火灾产生规模进行风险分析。

根据风险矩阵确定风险等级,基于危害可接受的程度,定义如下 4 种风险评估等级,及其处理原则,如表 1 所示。

表 2 火灾危害清单(部分)

Tab.2 List of fire hazards (partial)

隐患编号	系统	部件	可燃物	着火源	火灾场景	火灾原因	火灾影响
FHL-01	牵引系统	高压箱	电线电缆、密封胶	电火源	乘客在站台乘降时,列车某一节车厢车下起火	牵引系统高功率电缆运行过程中出现短路、过载、接触电阻过大或漏电等故障,导致电弧、电火花或电线电缆过热,引燃电线、电缆及周围的可燃物。	牵引系统局部火灾导致车下火势蔓延,热和烟气扩散至车内和站台,造成人员伤亡
FHL-02	内装系统	内装件	玻璃钢件、防寒材、密封条等	化学火源	列车区间运行,某一节车厢车内起火	车内乘客所携带的火源,引燃周围可燃物	车体及内装设备局部火灾导致车内火势蔓延,热和烟气扩散至车内,造成人员伤亡
FHL-03	转向架	转向架	橡胶件	机械火源	乘客在站台乘降时,列车某一节车厢车下起火	车下转向架机械设备因剧烈摩擦导致温升异常,进而引燃周围可燃物	转向架局部火灾导致车下火势蔓延,热和烟气扩散至车内和站台,造成人员伤亡

基于火灾隐患清单,各系统可能存在的部分火源类别如表 3 所示。

2.2 火灾隐患危害分析

根据 EN 50126-2:2017 中定义的“沙漏模型”,

			S1	S2	S3	S4	
			轻微	临界	危急	灾难性	
			对人或环境的安全影响	存在的较小伤害	较小的损伤和/或对环境的明显影响	1人死亡,和/或多个严重伤害,和/或对环境产生重大损害	
			火灾规模	局部受限火灾	受限火灾蔓延	火灾蔓延	
概率	F1	频繁	$\geq 10^{-1}/h$	R1	R4	R4	R4
	F2	经常	$10^{-2}/h-10^{-3}/h$	R2	R3	R4	R4
	F3	有时	$10^{-3}/h-10^{-4}/h$	R2	R3	R3	R4
	F4	很少	$10^{-4}/h-10^{-5}/h$	R1	R2	R3	R3
	F5	极少	$10^{-5}/h-10^{-6}/h$	R1	R1	R2	R2
	F6	不太可能	$<10^{-6}/h$	R1	R1	R1	R1

图 3 风险矩阵

Fig.3 Risk matrix

表 1 风险评估等级

Tab.1 Risk assessment grades

风险等级	风险处理原则
R4(不允许的)	应消除的
R3(不希望的)	若不能降低风险,须由顾客认可
R2(容许的)	采取了足够的控制,并经由项目经理认可
R1(可忽略的)	可以接受的

2 火灾危害风险分析

2.1 火灾危害清单

根据图 1 中定义的危害识别流程,采取自上而下的方法,识别各系统存在的可燃物和着火源,结合火灾发生场景逐一进行分析后建立火灾危害清单,表 2 中节选了火灾隐患危害的部分清单。

基于表 2 识别的各系统火灾隐患清单进行危害控制。结合系统设计方案,对各子系统火灾隐患进行分析,可结合 HAZOP 方法,对导致火灾发生的部件进行详细分析,识别火灾发生原因,并根据图 3 定义

表 3 各系统着火源类别(部分)

Tab.3 Classification of ignition sources of each system (partial)

系统	火源类别
内装系统	化学火源
牵引系统	电火源
制动系统	机械火源、电火源
辅助系统	电火源、化学火源
空调系统	电火源、化学火源、热火源
转向架系统	机械火源
车门系统	电火源、化学火源

的风险矩阵进行风险评估,并制定合理有效的减轻措施。部分火灾隐患危害分析如表 4 所示。

2.3 火灾隐患危害分析输出与应用

基于火灾隐患危害分析结果能够输出车辆防火需求和整车火灾隐患区域,其分析结果应用如图 4 所示。

通过火灾隐患危害分析,识别整车火灾隐患区域,用于火灾报警系统中感温和感烟探头布置方案的设计输入;在整车热释放仿真中,根据火灾隐患区域的识别,用于确定火源规模与位置,并建立合理有效的火灾仿真方案。

表 4 火灾隐患危害分析(部分)

Tab.4 Fire hazard danger analysis (partial)

隐患编号	系统	部件	着火源	火灾原因	采取的减轻措施
Fire-01	受电弓	弓头	电火源	弓网接触不良拉弧;绝缘子爬电产生电火花;瞬间接地故障	①受电弓的性能满足 IEC 60494-2 标准要求;②受电弓冲击振动满足 IEC 61373 标准规定的 1 类 A 级要求;③受电弓的电气间隙和爬电距离满足 IEC 60077-1 标准的要求;④受电弓周边材料主要为金属件,可燃材料和车体喷漆满足 EN 45545-2 标准,车顶采用铝合金型材;⑤定期维护更换碳滑板
Fire-02	避雷器	避雷器	电火源	避雷器长期使用老化,泄漏电流增大,温度升高,产生热量大于散发热量;避雷器表面污垢层引起局部过热	①隧道内运行、耐受冲击电流 100 kA;②避雷器周边主要是金属材料,可燃材料满足 EN 45545-2 标准,车顶采用铝合金型材;③定期检查、维护,并对避雷器进行清洁
Fire-03	空调机组	压缩机	机械火源	风扇因机械故障卡住,导致压缩机单元温度上升;接线端子松脱或绝缘损坏导致局部高温;空调压缩机断电后瞬间通电,启动困难导致大电流	①压缩机通过橡胶减振器安装在空调机组箱体内部,可以降低列车运行过程中产生的振动;②空调系统材料满足 EN 45545,箱体为金属材质;压缩机为全封闭式 IP56;③压缩机有软启动和相关的保护装置,控制压缩机适时运转和停机;④压缩机具有过载、接地、缺相、欠压、过压等保护,并设有高、低压压力保护;⑤维护定期检查端子紧固

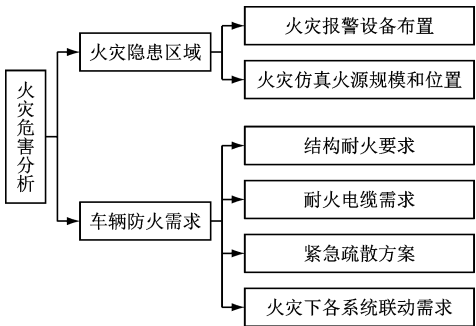


图 4 火灾危险分析结果应用

Fig. 4 Application of fire hazard analysis results

通过车辆的结构耐火需求,结合 EN 45545-3 标准的耐火结构要求,导出项目结构耐火要求和试验样件的要求。对于防火需求中,在火灾中需要维持的紧急功能需求,结合电缆布线环境进行分析,能够识别整车耐火电缆需求。火灾情况下列车应急功能(部分)如表 5 所示。

表 5 火灾情况下列车应急功能(部分)

Tab.5 Train emergency functions in fire scenario (partial)

项目	应急功能
牵引控制	列车激活、备用模式激活、方向指令、紧急制动命令列车线、牵引指令列车线、制动命令列车线、50% 牵引/制动列车线、备用模式升弓命令列车线、蘑菇紧急停车回路、列车级牵引控制功能
制动控制	快速制动列车线、紧急制动列车线,紧急制动安全环路不会因为失电导致列车紧急停车
应急照明	列车保证照明驱动模块火灾情况下不会同时 2 个灯受到影响,从而保证照明功能继续维持
车门控制	车门控制中的门零速列车线、左右门允许列车线、左右门开/关列车线,保证单侧车门供电线路不会同时断电

通过不同场景的火灾隐患危害分析,结合已有紧急疏散方案,对各系统火灾情况下需采用的措施进行梳理,建立各系统紧急疏散功能和系统联动需求。

3 结语

结合 EN 50126-2:2017 标准的安全分析方法对地铁开展火灾隐患危害分析,系统地识别各系统可能存在的火灾隐患。通过对火灾隐患进行分析,针对可能存在火灾隐患的区域或设备,制定相关措施。

仿真结果表明,该方法可修正火灾隐患区域,能使地铁更合理地布置火灾报警探测;同时,可用于指导地铁防火系统设计,能够有效确保车辆从防火到救援的消防能力的整体提升。

参考文献

- [1] 王康,李廷.城市轨道交通火灾研究综述[J].消防界(电子版),2022,8(24):31.
WANG Kang, LI Ting. A summary of urban rail transit fire research[J]. Fire Protection Industry (Electronic Version), 2022, 8(24): 31.
- [2] British Standards Institution. 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: British Standards Institution,

2017: 1.

- [3] Modsafe. Modular urban transport safety and security analysis [Z]. Köln: Modsafe, European Commission Seventh Framework Programme, 2012.
- [4] 谢中朋. 消防工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
XIE Zhongpeng. Fire engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [5] 王冰洁,冷映丽,薛淑胜.无人驾驶城轨车辆与信号系统接口的安全风险[J].技术与市场,2022,29(12):136.
WANG Bingjie, LENG Yingli, XUE Shusheng. Management of interface safety risk between driverless urban rail vehicle and signal system[J]. Technology and Market, 2022, 29(12): 136.
- [6] British Standards Institution. Maintainability and safety (RAMS) Part 1: Generic RAMS Process; BS EN 50126-1: 2017[S]. London: British Standards Institution, 2017: 1.

· 收稿日期:2023-11-12 修回日期:2023-12-19 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-12 Revised:2023-12-19 Published:2024-05-10
· 通信作者:冷映丽,正高级工程师,13905170394@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 81 页)

- LIU Jie. High-speed train-ground communication test in the context of metro digital transformation toward cloud[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2020, 33(5): 28.
- [2] 陈微,管国光.城市轨道交通车-地无线通信稳定性分析[J].铁道通信信号,2019,55(10):91.
CHEN Wei, GUAN Guoguang. Stability analysis of vehicle-ground radio communication in urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2019, 55(10): 91.
- [3] 宁贝贝. LTE 与 WLAN 技术在轨道交通 PIS 系统应用对比[J]. 数字通信世界,2020(9):175.
NING Beibei. Comparison of LTE and WLAN technology in PIS system of rail transit[J]. Digital Communication World, 2020 (9): 175.
- [4] 刘洋.城市轨道交通全自动运行模式下的车地无线综合通信网络方案分析[J].城市轨道交通研究,2019,22(12):22.
LIU Yang. Analysis of train/ground wireless communication under full automatic operation mode of urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(12): 22.
- [5] 王锐,王大成.城市轨道交通车地无线通信的应用[J].电子技术与软件工程,2019(21):26.

WANG Rui, WANG Dacheng. Application of wireless communication between train and ground in urban rail transit[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(21): 26.

- [6] 谢红霞,孙林祥.轨道交通车-地通信无线局域网技术应用[J].铁道通信信号,2020,56(2):63.
XIE Hongxia, SUN Linxiang. Application of wireless local area network technology for vehicle-trackside communication in rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2020, 56 (2): 63.
- [7] 李天然.城市轨道交通车地无线通信安全性分析[J].信息通信,2018,31(8):162.
LI Tianran. Security analysis of wireless communication between urban rail transit vehicles and ground[J]. Information & Communications, 2018, 31(8): 162.

· 收稿日期:2023-10-16 修回日期:2023-11-28 出版日期:2024-05-10
Received:2023-10-16 Revised:2023-11-28 Published:2024-05-10
· 通信作者:陈美霞,正高级工程师,cmx313@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