

地铁车辆电气系统故障应急处置中的风险识别与防控策略

米彩虹

重庆轨道交通运营有限公司, 重庆 400000

[摘要] 地铁具有快速、便捷、准时等优点, 可缓解城市交通拥堵问题, 因此受到越来越多城市的追捧。随着地铁行业的迅速发展, 地铁车辆故障发生率也有所提高, 地铁车辆电气系统是列车运行的核心动力, 一旦发生故障, 容易引起人员恐慌、列车中断等事故, 应急处置的科学性与实效性直接关系地铁运营的安全。但在应急处置中存在一定风险, 需要识别与防控, 提高应急处置的安全性。基于此, 文章阐述地铁车辆电气系统故障应急处置中的风险内容、风险识别方法和防控策略, 以为地铁运营单位提升应急处置能力提供参考。

[关键词] 地铁车辆; 电气系统; 应急处置; 风险识别; 防控措施

DOI: 10.33142/sca.v9i4.19572

中图分类号: TM769

文献标识码: A

Risk Identification and Prevention Strategies in Emergency Response to Electrical System Faults in Subway Vehicles

MI Caihong

Chongqing Rail Transit Operation Co., Ltd., Chongqing, 400000, China

Abstract: The subway has the advantages of speed, convenience, and punctuality, which can alleviate urban traffic congestion problems, and therefore is increasingly sought after by more and more cities. The rapid development of the subway industry has also led to an increase in the incidence of subway vehicle failures. The electrical system of subway vehicles is the core driving force for train operation. Once a failure occurs, it is easy to cause accidents such as personnel panic and train interruption. The scientificity and effectiveness of emergency response are directly related to the safety of subway operation. There are certain risks in emergency response, which need to be identified and prevented to improve the safety of emergency response. Based on this, the article elaborates on the risk content, risk identification methods, and prevention and control strategies in emergency response to electrical system faults in subway vehicles, in order to provide reference for subway operating units to enhance their emergency response capabilities.

Keywords: subway vehicles; electrical system; emergency response; risk identification; prevention and control measures

引言

地铁系统是由车辆、信号、轨道、供电等组成的复杂结构, 而电气系统是地铁车辆的重要组成部分, 是保障地铁车辆正常运营的动力系统^[1]。一旦电气系统发生故障, 会导致照明系统、控制系统、信号系统、牵引系统等失去动力, 地铁车辆会处于瘫痪状态, 无法正常运营。电气系统故障具有连锁性、隐蔽性特征, 应急处置过程中易出现风险识别不全面, 防控措施不到位的情况, 导致故障扩大, 产生不利影响。当前, 对电气系统故障的维修研究文献较多, 但针对应急处置环节的风险识别方法与防控策略研究仍需要完善。基于此, 文章分析地铁车辆电气系统故障应急处置中的风险识别与防控策略。

1 地铁车辆电气系统故障应急处置中的风险内容

地铁车辆电气系统故障应急处置工作风险较高, 其风险主要包含五点: (1) 触电风险。操作人员直接接触带电部件, 可能因绝缘导致失效, 安全距离不足而触电。触电发生与处于电压极高环境、电缆老化、未严格执行断电等因素相关。(2) 火灾与爆炸风险。电气故障引发的火灾或者爆炸可能迅速蔓延, 会引起严重的财产损失与伤亡。火灾发生与电气系统短路、引燃周围可燃物、电气设备长时间高负荷运行、车内使用易燃材料等因素相关。(3) 设备二次损坏风险。如果应急处置不当, 会增加停电范围或者设备连锁损坏。发生原因与盲目操作、错接线路等因素相关。(4) 环境风险与次生灾害。电气故障可能加剧其他类

型的事故，例如车厢内排烟系统失效会导致浓烟积聚，引起有毒气体扩散。上述风险是地铁电气系统应急处置中存在的风险，因此需要强化有效的风险管理，降低风险发生概率。

2 地铁车辆电气系统故障应急处置中的风险识别方法

2.1 故障树分析法

故障树分析法是以逻辑推理为基础的系统失效分析方法，该方法综合定性分析与定量分析。首先要选择系统中不希望发生的意外事故，作为顶上事件，顶上事件的意外事故严重程度较高。在故障树结构图中，上层因素为事故发生的结果，下层事故为发生的原因，上下层事件之间存在逻辑关系。故障树结构图分析过程需要有丰富的已知资料，同时借助经验、想象力与知识不断完善故障树结构后，使之能符合实际情况，从而寻找到事故发生因素。应急处置中可能出现的严重后果包含应急处置中触电事故、故障扩大导致列车起火等，根据电气系统原理和应急处置流程，分解中间事件，如绝缘失效等。排查直接引发风险的具体因素，包括设备因素、人为因素、环境因素等。在分析过程中，需要结构重要度、概率重要度、临界重要度。结构重要度是根据故障树的结构分析基本事件的重要程度，计算公式为：

$$\varphi(x) = \frac{\sum[\varphi(1_i, X) - \varphi(0_i, X)]}{2^{n-1}} \quad (1)$$

其中 i 表示基本事件的状态由 0 变为 1 时，是基本事件由不发生→发生，令 $\varphi(1_i, X) - \varphi(0_i, X) = 1$ ，且 n 表示基本事件的个数，结构重要度是指由 i 基本事件导致顶上事件发生的基本事件可能组合次数，与所有基本事件可能组合次数的比值。

临界重要度是衡量事件重要度的指标，计算公式为：

$$C_j = \frac{\varphi_{nP}(T)}{\varphi_{nP}(i)} = \sum \frac{P_r(S_{cX_i})}{P_r(T)} \quad (2)$$

$P_r(S_{cX_i})$ 表示在已经发生顶事件的情况下， X_i 发生故障的概率，顶事件发生的概率由 $P_r(T)$ 表示。

概率重要度是指基本事件发生概率的变化会对顶事件发生概率产生的影响，其计算公式为：

$$I_P(i) = \frac{\varphi_P(T)}{\varphi_P(i)} \quad (3)$$

公式中的 $I_P(i)$ 表示基本事件的概率重要度指标， $\varphi_P(T)$ 表示顶上事件发生几率， $\varphi_P(i)$ 表示基本事件发生几率。

2.2 专家判断法

专家判断法是评估地铁车辆电气系统故障应急处置

中潜在风险的常用方法，此方法的核心是充分利用丰富理论知识，以及专业人员的洞察力和直觉，辨别可能存在的风险因素。专家识别出的潜在风险通常会被记录，并根据专家的置信程度与主观经验进行初步识别。由于此方法需要依赖专家的认知与经验，所以结果可能存在不确定性与主观性。为提高风险识别的客观性与一致性，在专家判断基础上，可引入辅助工具，采用风险矩阵法，分析风险发生的可能性以及后果严重程度，最后得到风险等级。风险矩阵包含等级如表 1 所示：

表 1 风险矩阵等级

可能性 \ 后果严重程度	不严重	较严重	严重	特别严重
极高	一般	较大	重大	重大
高	一般	较大	较大	重大
中等	较小	一般	较大	重大
低	较小	一般	一般	较大
极低	较小	较小	一般	一般

通过专家群体对每个识别出的风险进行后果与可能性评级，可以在矩阵上寻找交叉点，确定风险等级。根据上表可以分析地铁电气系统故障应急处理的风险等级，如表 2 所示：

表 2 地铁电气系统故障应急处理风险等级

风险类型	风险等级	可能性	后果
触电风险	较大	中等	存在严重后果或特别严重后果。
火灾与爆炸风险	较大	低	存在特别严重后果
设备二次损坏风险	一般	中等	存在较严重后果
环境风险与次生灾害	一般	极低	存在特别严重后果

风险等级评估公式为：风险等级 (R) = 风险发生的可能性赋值 (L) × 风险发生后后果的严重性赋值 (C)。

虽然专家判断法存在主观性，但因其方法灵活、高效，能捕捉非量化、复杂的优势，在地铁车辆电气系统故障应急处置的初期阶段尤为适用。

2.3 概率论法分析

概率论法属于系统性风险辨识技术，需要借助统计学与数学理论进行分析，通过分析以往数据，了解地铁车辆电气系统故障应急事故的发生概率，此方法能够为风险评估提供客观依据^[2]。在应用概率论方法评估时，需要收集故障发生频率和历史记录，之后构建概率模型。二项分布、正态分布等均为常见的概率分布模型。此外条件概率与贝叶斯定理在风险传递分析中得到广泛应用，例如地铁车辆电气系统故障应急处置发生的事故可能受到多个因素的

影响,可采用贝叶斯公式验证风险发生概率,计算公式为:

$$[P(A/B)] = \frac{P(B/A)P(A)}{P(B)} \quad (4)$$

为直观展示计算结果,可采用表格格式汇总各类故障的概率。采用抽样法分析地铁车辆电气系统故障应急处置过程中的事故概率,结果发现触电风险概率为1.5%~2.1%,火灾与爆炸风险发生率极低,低于0.001%,设备二次损坏风险为2.5%~4.7%,环境风险与次生灾害的发生率极低,概率接近于0%。概率法的优势在于其具有可扩展性和严谨性,能分析大数据,但需注意数据质量,可采用随机抽样与多次迭代等方式,提高准确度。

3 地铁车辆电气系统故障应急处置中的风险控制策略

3.1 强化应急处置人员专业能力

人为因素是应急处置中风险失控的因素之一,处置人员的专业能力、操作规范度均对应急处置的效果产生影响,强化应急处置人员的专业能力,是避免人为操作风险的核心策略^[3]。首先,安全意识教育,安全意识是地铁车辆电气系统应急处置的重要环节,因此需要采用多种形式强化员工的安全意识教育。制定有针对性的教育计划,针对应急处置人员的工作特点、实际情况,可将安全意识内容划分不同等级,根据不同等级的岗位要求,以及风险等级组织培训。除课堂式传授外,也可采用现场组织模拟演练、在线学习课程等形式进行模拟演练,使知识更加直观、生动,让员工更容易学习知识。在知识传授过程中,鼓励应急处置人员积极参与,通过小组讨论等形式分享经验与心得。其次,人员招聘与培训。人员招聘与培训属于地铁车辆电气系统应急处置风险控制的重要环节。在招聘人员时,需考虑工作人员的经验、技能和综合素质,保证招聘的人员能胜任应急处置工作。需要对其进行安全操作、紧急处理程序等方面的培训,保证应急处置人员具有足够的知识和技能,避免其在作业中出现操作不当等问题,保证地铁车辆电气系统应急处置的顺利开展。最后,人员激励机制。为激励员工工作,保证地铁车辆电气系统应急处置的质量,需建立完善的考核制度与激励机制。可将应急处置人员的工作表现分解为详细指标,根据工作人员的工作内容进行分类,制定对应的考核标准。可制定考核周期,因地铁车辆电气系统故障的概率不高,因此可每年组织一次绩效考核。根据工作人员表现,设立多种激励方式,包含提供加班费、发放绩效奖金、提出表扬等形式。在实操管理方面,制定严格的操作规范,明确应急处置各环节的操作流程和

安全要求,如断电后必须进行验电、接地,带电作业必须佩戴绝缘手套、绝缘靴等防护装备。监督应急处置人员的操作行为,及时纠正违规操作,避免因操作失误引发触电等风险。

3.2 强化应急处置管理工作

地铁车辆电气系统应急处置管理要符合规范化、标准化原则,需要理论与实践相结合,符合应急处置的实际要求。规范化管理能有效地整合与利用资源,做到设备、人员和材料并重^[4]。第一,从材料处理方面,要考虑周围环境和温度,同时监测作业现场的环境参数,如温度、湿度、有害气体浓度等,实现设备状态和作业环境的实时感知,避免因地铁电气系统故障,导致气体扩散,造成严重影响。第二,从设备角度分析,对绝缘装备、应急电源等关键物资,定期开展性能检测,及时更换失效、损坏的物资,确保所有应急物资处于良好状态。及时分析电气系统故障的根本原因,为后续的维修与保养工作提供指导与参考。第三,对于应急处置员工而言,有标准化的操作要求,保证操作过程符合标准。应急处置作业期间,需要有专业负责人,负责应急处置过程中的安全问题。建立完善的监督机制,可采用巡查、检查等方式,保证地铁车辆电气系统应急处置的规范性。第四,应急处理措施的评估应具有系统性、全面性特点,包括处理效果与处理流程两个方面。评估指标与评估标准需根据不同类型的故障进行判定。应急处置措施的评估需立即进行,及时纠正与改进不足,提高应急处置的有效性与可靠性。

3.3 借助数据技术实施分析

采用物联网和大数据技术,在应急处置作业中实现实时监控与数据分析,可提高安全性^[5]。可以通过物联网技术对整个应急处置过程进行全面监测与管理,包含对设备的实时监控,对现场环境与安全等监测。物联网设备可通过传感器与控制器实时采集现场的各种数据,包含员工状态、车辆状态、环境温度与空气质量等。在应急处置作业中,可通过大数据深入分析,从而优化应急处置的计划与流程。借助大数据算法和模型,能深度挖掘应急处置过程中的各种数据信息,可预测存在的风险等,提高安全性。在故障预警方面,借助大数据分析技术,建立电气设备故障预警模型,通过对比设备运行参数与正常阈值,识别设备的异常状态,对潜在故障进行提前预警,如当牵引电机温度超过阈值时,平台自动发出预警信号,提醒运维人员及时排查。在实时监测方面,在地铁车辆的牵引系统、辅助供电系统、控制系统等核心电气设备上安装传感器,采

集设备的电压、电流、温度等运行参数^[6]。通过搭建智能化平台,可从被动处置向主动预警转化,帮助工作人员及时发现潜在风险,预防风险失控,提高应急处置的效率。

4 结语

综上所述,地铁车辆电气系统故障应急处置是城市轨道交通运营的关键环节,其风险识别与防控策略的完善直接关系到乘客安全、运营效率及社会信任。地铁车辆电气系统故障应急处置所面临的风险越来越复杂,这对地铁运营公司提出了更高的应急处置安全管理要求。在应急处置阶段,人员操作失误、设备老化、环境等均直接引发应急处置风险,因此如何识别和防控应急处置存在的潜在风险,成为急需解决的问题。在风险识别方面,通过采用故障树分析法、专家判断法、概率论分析法识别风险等级,保证风险点无遗漏。在防控策略方面,采用培养安全意识、强化管理工作等方式,形成闭环管理,最大限度地减少损失,提高应急处置的安全性。地铁车辆电气系统故障应急处置的风险识别与防控属于一项系统工程,需要持续创新、

不断完善。

[参考文献]

- [1]徐慧.城市轨道交通客运安全风险评估与应急管理策略研究[J].汽车周刊,2023(11):0192-0194.
- [2]孟亚东.复杂环境下地铁施工安全风险自动识别与预警研究[J].前卫,2024(17):0180-0182.
- [3]滕令晓.地铁施工安全风险巡视管理机制探索与实践[J].智能城市应用,2024,7(12):159-161.
- [4]张峥.基于BIM的地铁车辆电气系统智能运维技术研究[J].新城建科技,2025,34(1):1-3.
- [5]邓健,李然,陈卓,等.全自动驾驶模式下基于大数据架构的地铁车辆调度系统设计与应用[J].控制与信息技术,2022(6):104-108.
- [6]陈苏扬.地铁车辆故障信息化管理与智能化维修技术分析[J].数码设计(电子版),2024(3):0164-0166.

作者简介:米彩虹(1990—),女,重庆科技大学人力资源管理专业毕业,工程师,现就职于重庆轨道交通运营有限公司,车间技术管理。