

城市轨道交通车站人员防护开关设置的 可用性与安全性分析

黄懿 肖玉梅 李葛亮

(南宁轨道交通集团有限责任公司, 530029, 南宁//第一作者, 高级工程师)

摘要 为减少设备抢修对临近区域列车运行的影响,保证运营工作人员的安全,在城市轨道交通车站中合理设置 SPKS(人员防护开关)对于 FAO(全自动运行)系统是非常必要的。以南宁轨道交通 5 号线某标准车站为例,采用可用性与安全性结合的分析方法,对提出的 3 种 SPKS 防护区域的设置方案进行了比较,最终采用了整体可用度最高的方案 3,该方案可将风险等级降低为 R4。

关键词 城市轨道交通;车站;人员防护开关;可用性;安全性

中图分类号 U298:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.02.013

Availability and Safety Analysis of Staff Protection Key Switch Setting in Urban Rail Transit Station

HUANG Yi, XIAO Yumei, LI Gelang

Abstract To reduce impact of equipment rush repair on adjacent region train operation and to ensure personnel safety, it is necessary to reasonably set up SPKS (staff protection key switch) for FAO (fully automatic operation) system in urban rail transit station. Taking a standard station of Nanning Rail Transit Line 5 as an example, by adopting analysis method combining availability and safety, the three setting schemes proposed for SPKS protection area are compared, and scheme 3 with highest overall availability is adopted, which can lower the risk grade to R4.

Key words urban rail transit; station; SPKS; availability; safety

Author's address Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., 530029, Nanning, China

与常规城市轨道交通线路不同,城市轨道交通 FAO(全自动运行)线路取消了列车司机,减少了车站人员数量,通过系统自身的高可靠性满足了日常载客运营的需求。此外,设置 SPKS(人员防护开关),将轨行区划分为若干区域,加强人员进出的安

全防护。如何合理划分 SPKS 的防护区域,是一个需要兼顾效率与安全的命题。

当前 SPKS 的设置方案大多依据定性分析、经验判断及运营部门的直观需求而制定,主要关注继电电路自身在联锁层面的安全性^[1-2],以及 SPKS 的安装位置、操作方式、应用场景等^[3]。基于 FAO 线路设备的复杂性,为了持续监测设备运行状况,确保系统在全寿命周期内满足设计特性及使用要求,逐渐开始引入 RAMS(可靠性、可用性、可维护性、安全性)管理体系,将概率与置信度作为工具研究城市轨道交通系统运行。这套已经广泛在航天航空、信息存储、石化工业领域应用的过程管理体系,可为城市轨道交通带来更合理的系统设置、安全控制及维护成本。

本文以南宁轨道交通 5 号线某标准车站为背景,研究若干不同的 SPKS 设置方案,通过 RAMS 理论建立研究模型,并根据数值计算结果找到最优的防护方案。

1 车站 SPKS 的设置方案

目前,大多数车站在设置 SPKS 方案时,防护区域为本站台及其相应侧区间,不影响邻站折返和接车,减少了对临近车站、区间行车的影响,并为运营工作人员提供明确的防护标志。

本文将分析不同 SPKS 防护方案的设置差异。FAO 线路在设计车站 SPKS 防护区域时,一般划分为 4 个部分:每个车站接车与发车进路的防护分为前、后两个区域,列车上、下行线路方向亦分开设置。由于隧道区间是以车站为中心线对称的,故可仅考虑 1 个行车方向的 SPKS 设置。以 FAO 线路的下行方向为例,大致可划分为 3 种设置方案。以车站 B、发车进路 SPKS1、接车进路 SPKS2 为研究对象,具体设置方案如下。

方案1:无论是防护接车进路的 SPKS2 还是发车进路的 SPKS1,其覆盖范围均包括站台 B 和进路途经的区间。即:SPKS1 防护区域自站台 B 的末端计轴至站台 A 的始端计轴;SPKS2 的防护区域自车站 C 发车信号机对应的计轴至车站 B 发车信号机对应的计轴。防护方案 1 如图 1 所示。

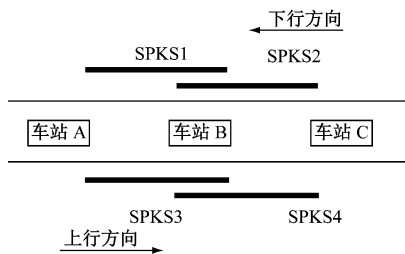


图 1 车站 SPKS 防护方案 1

Fig. 1 Station SPKS protection scheme 1

方案2:与方案1的区别在于,防护接车进路的 SPKS2 防护区域包括本站站台轨,而防护发车进路的 SPKS1 防护区域不包括站台轨(见图2)。

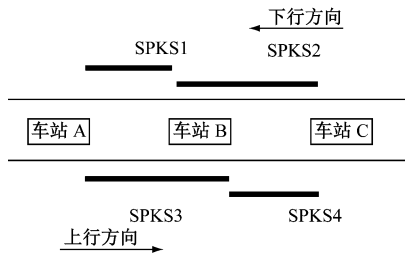


图 2 车站 SPKS 防护方案 2

Fig. 2 Station SPKS protection scheme 2

方案3:无论是防护接车进路的 SPKS2 还是发车进路的 SPKS1,其覆盖范围均包括站台 B 和进路途经的区间,并为站台正、反向接车预留安全距离^[1-2](见图3)。即:对于车站 C 至车站 B 运行方向的列车而言,车站 B 接车方向 SPKS2 对区间 BC 的防护区域自车站 C 出站信号机内侧 50 m 起算。该方案与上述两个方案最大的区别在于:因预留了安全距离,车站 C 接车进路有足够长的保护区段,

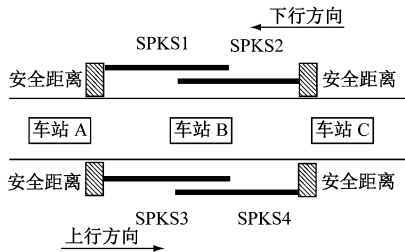


图 3 车站 SPKS 防护方案 3

Fig. 3 Station SPKS protection scheme 3

后续列车可以正常进站停车。

2 车站 SPKS 设置的可用性与安全性分析

可用性与安全性均为影响设备、系统整体性能的直接因素。本文重点研究两者对 SPKS 设置的影响。

2.1 可用性

可用性是指“可以维修的产品在某时刻具有或维持规定功能的能力”^[4]。可用性采用概率的方式表示,称为可用度。结合时间参数,可用度可以表示为任意时刻某个设备能够处于使用状态的概率^[5]。如设备的故障率与维修率分别为 λ 与 μ ,则可用度 $A(t)$ 在时刻 t 可表达为:

$$A(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} \quad (1)$$

由于 SPKS 防护区域的设置只针对正常运营时段,不考虑行政管理与后勤供应时间 t_{ALD} ,而防护区域内无论是否有车通过,该区域内的设备均看作在使用时间 t_0 内,不考虑待命时间 t_s ,因此,本文只论述达到可用度 A_a 。式(1)可以变换为^[4,6-8]:

$$A_a = \frac{t_0}{t_0 + t_{FM} + t_{AM}} \quad (2)$$

式中:

t_{AM} ——事前维护需要的时间;

t_{FM} ——故障出现后的维修时间。

通常运营人员会执行若干事前维护策略,则当 $t \in (t_s, t_e)$ (t_e 为结束时间), A_a 的表达式^[9]可以转化为:

$$A_a = 1 - \frac{t_{FM} + t_{AM}}{t_e - t_s} \quad (3)$$

假设事前维护策略得当, t_{FM} 会极大地降低甚至为 0,则 $t_{FM} + t_{AM}$ ($t \in (t_s, t_e)$) 将会比不进行事前维护或采用不合适的事前维护所得到的总时间短,结果增大了 A_a 的数值。

针对每个 SPKS 防护区域的可用度,可将其看作是区域内所有影响行车设备可用度的串联集合;只要出现一个影响行车的重大设备故障,则需通过激活 SPKS 进入设备现场紧急维修阶段。防护区域的可用度 $A_{as,n}$ ^[7] 可以表示为:

$$A_{as,n} = \prod_{i=1}^n A_{a,i} \quad (4)$$

由此可知,防护区域内影响行车的设备越多, A_a 则越低。

2.2 安全性

安全性是指“在设计时为使产品失效不致引起人身、物质等重大损失而采取的预防措施”^[8]。本文将采用 HAZOP(危害与可操作性)的分析方法,并基于 ALARP(最低合理可行原则),研究 SPKS 防护区域被激活后存在的危害风险。HAZOP 方法包含了风险分析阶段与风险评估阶段。通过采取合理措施,满足 ALARP 的验收标准^[3,8](见图 4)。

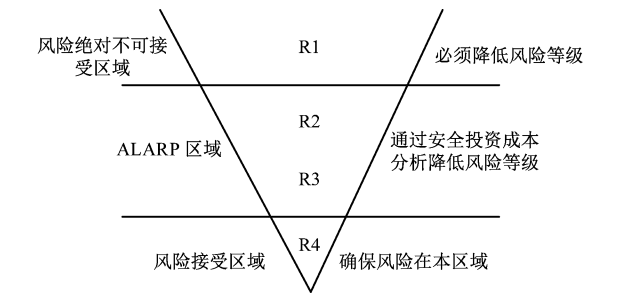


图 4 ALARP 验收准则
Fig. 4 ALARP acceptance criteria

图 4 中,R1—R4 代表设备的风险等级,R1 最高,R4 最低;R4 是普遍可以接受的风险区域。风险等级由危险事件发生的概率与危险事件造成的危害程度共同决定^[8]。危险事件不同频率等级、不同危害程度等级下的风险等级如表 1—表 3 所示。

表 1 危险事件造成的危害程度等级

Tab. 1 Levels of the hazard caused by hazardous events	
危害程度等级	内容描述
A(轻微的)	可能出现少量人员受伤
B(次要的)	较少人员受伤,对环境有明显威胁
C(危急的)	出现人员死亡,重大人员伤亡,对环境有严重的危害
D(灾难性的)	多人死亡,大量的重伤人员,对环境有特别重大的危害

表 2 危险事件每年发生的频率等级

Tab. 2 Frequency level of hazardous events every year		
频率等级	内容描述	发生频率/(次/年)
6	危险事件频繁出现	≥ 100
5	危险事件经常出现	$1 \sim < 100$
4	危险事件有时出现	$10^{-2} \sim < 1$
3	危险事件可能会存在	$10^{-4} \sim < 10^{-2}$
2	危险事件几乎不可能出现	$10^{-6} \sim < 10^{-4}$
1	危险事件绝对不可能出现	$< 10^{-6}$

SPKS 设置的设计方案是否可以通过,取决于危险事件的风险等级能否接受。

表 3 危险事件不同频率等级、不同危害程度等级下的风险等级

Tab. 3 Risk level of hazardous events at different frequency levels and hazard levels

频率等级	危险事件不同危害程度等级下的风险等级			
	A	B	C	D
6	R2	R1	R1	R1
5	R3	R2	R1	R1
4	R3	R2	R2	R1
3	R4	R3	R2	R2
2	R4	R4	R3	R3
1	R4	R4	R4	R4

2.3 可用性与安全性的关系

设备的设计方案是否合理,是由其长期工作所体现的特征来表达的,主要取决于可用性与安全性间技术细节的处理。这两个特性目标通常是由设备的可靠性与维修策略来实现的^[5]。同样,对于符合串联模型的 n 个设备配置方案而言,整体故障率 λ_n 可以表示为^[5]:

$$\lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_i \tag{5}$$

式中:

λ_i ——单个设备的故障率。

平均故障间隔时间 t_{MTBF} 为^[5]:

$$t_{MTBF} = 1/\lambda_n \tag{6}$$

因此,应尽可能地减少 SPKS 防护区域内的设备数量,以降低整体故障率、提高平均故障间隔时间,并有效降低危险事件发生的概率,降低风险等级。

3 南宁轨道交通 5 号线某车站 SPKS 设置方案对比分析

FAO 线路是一个复杂的大系统,因此需要数量众多的设备确保其正常载客运营。为了提升基础可靠性,一些关键设备会采用较为健壮的冗余结构。由于关键设备的冗余程度较高,且同时发生故障时导致整个设备失效的概率极低,故在进行 SPKS 设置方案分析时,不需要考虑此类设备的可用性及安全性,如接触网(具备双母线、双边供电)和车地无线通信(具备双漏缆、双网络)。而部分设备在列车处于 FAO 模式时,即使发生故障也不影响列车运行,故不需考虑此类设备,如计轴(属于次级

列车检测设备,CBTC 模式运行的列车可通过切除故障计轴解决)、信号机(处于灭灯状态)。以南宁轨道交通 5 号线(以下简为“5 号线”)某标准车站为例,在进行 SPKS 设置时需考虑各设备的 A_a ,如表 4 所示。故障事件出现时,相应的安全风险等级如表 5 所示。

由表 5 可知,3 种 SPKS 设置方案都可以通过减轻风险的措施,将安全风险降至合理等级。

表 5 5 号线某车站 SPKS 防护区域安全风险等级

Tab.5 Safety risk grade of SPKS protection area of a station on Line 5		
故障事件	减轻安全风险的措施	剩余风险等级
转辙机故障导致列车无法通过	增强维保人员作业水平;通过软件实时监测转辙机状态;合理采用维修策略	R4
信标故障导致列车紧急制动	采用可靠性高的产品;加强巡视	R4
区间水泵故障后存在道床受淹风险	采用可靠性高的产品;合理采用维修策略	R4
列车故障后需要人工登车处理	增强维保人员作业水平;通过软件实时监测转辙机状态;合理采用维修策略	R4
列车乘客疏散	合理设置 SPKS 防护区域;确保信号系统的高可靠性,其余列车不会侵入防护区域;需要有工作人员引导乘客往正确方向撤离	R4

由于上行线与下行线的设备呈对称设置,故可仅计算每个方案中 SPKS1 与 SPKS2 防护区域的可用度。为简化计算,假设区间均包含转辙机、水泵房,转辙机设置在出站信号机内侧;站台信标数量设为 6 个,区间长 1 km,每 180 m 布置 1 个信标。方案 1、2 在 SPKS2 激活时,后续列车由于信号系统自身设置保护区段的原因不能进入车站 C,因此在计算可用度时,应将站台 C 的信标/应答器包含在串联集合内。对于方案 3,在 SPKS2 激活时,不影响后续列车进入站台 C。在 SPKS2 防护区域内进行抢修作业时,工作人员应注意安全,可以在隧道壁上增加反光条等措施提醒其防护区域的终点,避免进入站台 C 的接车区域。

每个方案中包含的设备数量如表 6 所示。
整体可用度 $A_{ap,n}$ 是 SPKS1 与 SPKS2 可用度的并联集合,其计算方式可以表示为:

$$A_{ap,n} = 1 - \left(\prod_{i=1}^n (1 - A_{a,i}) \right)$$

(7)

不同方案下 SPKS 防护区域的整体可用度见表 7。

由表 7 可知,方案 2 与方案 3 的整体可用度要比方案 1 高。对于方案 3,SPKS1 左侧的安全距离用于反向运行的列车进站,故需增加计轴区段的设置。方案 3 还可以进一步优化:SPKS1 的防护区域不包含站台,需在站台发车方向增加安全距离,使得站台 B 的接车进路不受影响,其整体可用度提升

表 4 5 号线某车站 SPKS 防护区域各设备的 A_a
Tab.4 A_a of each equipment inside the SPKS protection area of a station on Line 5

设备	平均故障率/h ⁻¹	t_M /h	A_a
转辙机	2.76×10^{-6}	18	0.996 8
信标/应答器	1.04×10^{-6}	2	0.999 7
列车	6.42×10^{-6}	400	0.939 1
区间水泵	1.00×10^{-4}	100	0.984 8

注: $t_M = t_{FM} + t_{AM}$;年使用时间为 6 570 h。

表 6 5 号线某车站不同方案下不同 SPKS 防护区域设备数量

Tab.6 Equipment amount of different SPKS protection areas in different schemes of a station on Line 5						
方案	SPKS1 防护区域各设备的数量			SPKS2 防护区域各设备的数量		
	转辙机	信标/应答器	区间水泵	转辙机	信标/应答器	区间水泵
方案 1	1	12	1	1	18	1
方案 2	1	6	1	1	18	1
方案 3	1	11	1	1	11	1

表 7 5 号线某车站各方案下 SPKS 防护区域的整体可用度

Tab.7 Overall availability of SPKS protection area in each scheme of a station on Line 5			
方案	A_a		$A_{ap,n}$
	SPKS1	SPKS2	
方案 1	0.918 505 204	0.916 828 845	0.835 334 048
方案 2	0.920 184 628	0.916 828 845	0.837 013 472
方案 3	0.918 784 895	0.918 784 895	0.837 569 789

为 0.839 2。5 号线车站 SPKS 防护区域的设置最终采用了方案 3。

另外,对于长度超过 2 km 的区间,由于信标数量的增加,整体可用度会出现一定程度的下降。而列车的故障率与区间的疏散时间关联,通过维修策略可提升列车的可用度,减少区间疏散出现的概率。

4 结语

目前,城市轨道交通设计方、运营方往往仅重视设备的安全性,过分夸大了风险等级极低,甚至是在设备全生命周期内都极难出现一次的故障事件造成的影响,无休止地通过提高设备可靠性来堆砌安全等级,曲解了 RAMS 管理体系的意义,因此,亟待对国内城市轨道交通设备可用性进行深入研究。本文阐述的可用性与安全性结合的分析方法,可以有效分析 SPKS 设置方案的优劣,并为其他 FAO 线路设备系统设置的研究提供参考。

参考文献

[1] 蔡宗加. 全自动无人驾驶系统作业人员防护开关设计分析[J]. 铁道通信信号, 2022, 58(2): 77.
CAI Zongjia. Design and analysis of SPKS in FAO system[J]. Railway Signalling & Communication, 2022, 58(2): 77.

[2] 陈华银, 杜时勇. 无人驾驶地铁人员防护开关方案研究[J]. 铁道通信信号, 2018, 54(2): 84.
CHEN Huayin, DU Shiyong. Scheme of staff protection key switch of fully automatic operation in metro[J]. Railway Signalling & Communication, 2018, 54(2): 84.

[3] 李葛亮, 莫志刚, 刘亚妮, 等. 轨道交通车辆系统的危害分析与风险评估[J]. 机车电传动, 2020(4): 152.
LI Geliang, MO Zhigang, LIU Yani, et al. Hazard analysis and risk assessment of rail transit rolling stock system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(4): 152.

[4] 孔德良, 王少萍. 可修系统的可用度分析方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(2): 129.
KONG Deliang, WANG Shaoping. Study on availability analysis for repairable system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(2): 129.

[5] 董锡明. 轨道列车可靠性、可用性、维修性和安全性(RAMS)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2009.

DONG Ximing. Railway train reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2009.

[6] 莫志刚. 基于 RAMS 的地铁信号系统运营维护管理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
MO Zhigang. Research on maintenance management of signaling engineering in metro revenue service by RAMS[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.

[7] 胡林敏. 串并混联可修系统的可用度分析及应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
HU Linmin. Research on availability analysis and application for repairable series-parallel compound systems[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.

[8] 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.
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.

[9] 焦健, 王自力. 军用飞机使用可用度仿真论证[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(1): 112.
JIAO Jian, WANG Zili. Operational availability demonstration of military airplane based on simulation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(1): 112.

[10] 陈绍文. 全自动运行系统 SPKS 设置方案研究[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(11): 56.
CHEN Shaowen. SPKS implementation of full automation operation system[J]. Railway Computer Application, 2018, 27(11): 56.

[11] 田敬. 对等存储系统中的数据可用性与安全性研究[D]. 北京: 北京大学, 2007.
TIAN Jing. Research on data availability and security in peer-to-peer storage system[D]. Beijing: Peking University, 2007.

[12] WANG M, CHEN G, FU J, et al. Safety analysis approach of MFM-HAZOP and its application in the dehydration system of oil-field united station[J]. Procedia Engineering, 2012, 43: 437.

(收稿日期:2022-09-22)

(上接第 59 页)

参考文献

[1] 李猛, 张艳兵, 徐成永, 等. 全自动运行系统地铁车辆关键技术[J]. 都市快轨交通, 2018, 31(1): 123.
LI Meng, ZHANG Yanbing, XU Chengyong, et al. Key technology of vehicle in fully automatic operation system[J]. Urban Rapid

Rail Transit, 2018, 31(1): 123.

[2] 朱翔, 陈丽君. 地铁全自动运行系统运营场景的几点探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(10): 228.
ZHU Xiang, CHEN Lijun. Research of operation scenarios for metro fully automatic operation system[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(10): 228.

(收稿日期:2022-09-15)