

# 基于健康指数的直流断路器状态评估模型

郭德龙<sup>1</sup> 段宏伟<sup>2</sup> 徐维甲<sup>1</sup> 徐杰<sup>1</sup> 张明锐<sup>2</sup>

(1. 上海地铁维护保障有限公司供电分公司, 201016, 上海; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海)

**摘要** [目的] 直流断路器是地铁牵引供电系统的关键设备。为了通过采取合理的维保策略提高牵引供电系统可靠性, 需准确评估直流断路器健康状态。[方法] 采用健康指数表征设备整体健康状态, 构建设备健康状态的综合评估模型。基于设备特征参数变化反映设备健康状态, 合理选择评估指标建立设备运行状态多指标评估体系; 结合层次法和熵权法改进各分项指标权重的计算方式, 使得设备健康状态评估模型的建立更加合理; 依据该评估模型计算设备健康指数, 并建立基于历史健康数据的使用寿命模型来拟合设备健康指数的变化趋势, 评估设备未来健康状态与预测设备剩余使用寿命; 以某牵引变电站实际数据为例, 对所提评估模型进行验证。[结果及结论] 实例分析结果表明: 该直流断路器状态评估模型具有一定的有效性与合理性, 能够科学地对直流断路器健康状态与剩余使用寿命进行判断与预测。

**关键词** 城市轨道交通; 牵引供电系统; 直流断路器; 状态评估; 健康指数; 寿命模型

**中图分类号** U224.2<sup>+</sup>3

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.03.031

## A DC Circuit Breaker Condition Evaluation Model Based on Health Indexes

GUO Delong<sup>1</sup>, DUAN Hongwei<sup>2</sup>, XU Weijia<sup>1</sup>, XU Jie<sup>1</sup>, ZHANG Mingrui<sup>2</sup>

(1. Shanghai Metro Maintenance & Security Co., Ltd., Power Supply Branch, 201016, Shanghai, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] DC circuit breaker is a key equipment in metro traction power supply system. To improve the reliability of the traction and power supply system through reasonable maintenance strategy, it is necessary to evaluate the health condition of DC circuit breaker accurately. [Method] Health indexes are used to characterize the overall health condition of the equipment and establish a comprehensive evaluation model of the equipment health condition. On the basis that the changes of the equipment characteristic parameters reflect the equipment health condition, evaluation indexes are reasonably selected and a multi-index evaluation system of equipment operating condition is established. With the method of hierarchy

and entropy weight, the calculation method of the weight of each sub-index is improved, making the equipment health condition evaluation model more reasonable. The equipment health index is calculated based on the evaluation model, and the service life model based on historical health data is established to fit the trend of the equipment health index, evaluate the future health condition and predict the remaining service life. The proposed evaluation model is validated by the actual data of a traction substation. [Result & Conclusion] The example analysis results show that the proposed evaluation model of DC circuit breaker is effective and rational to some extent in that it can scientifically judge and predict the healthy condition and remaining service life of the DC circuit breaker.

**Key words** urban rail transit; traction power supply system; DC circuit breaker; condition evaluation; health index; lifespan model

在城市轨道交通牵引供电系统中, 直流断路器是保障列车供电安全的最后一道防线。对直流断路器运行情况进行可靠性综合评价分析, 进而提出合理的维保策略是提升运维能力的重要发展方向。

当前国内外学者提出了大量的牵引供电系统中直流断路器可靠性评价和状态评估方法。文献[1]采用突变级数, 从设备状态突变的角度全面考虑影响高压断路器状态的因素。文献[2]检测断路器机械振动信号, 用小波分解和神经网络实现了机械状态监测和诊断。文献[3]以熵-突变级数法为基础, 依据云模型进行断路器健康指标模糊化, 充分考虑了指标量的随机性和模糊性。此外还有学者采用竞争失效<sup>[4]</sup>、马尔科夫模型<sup>[5]</sup>及雷达图法<sup>[6]</sup>等来评估直流断路器健康状态。

为全面、直观地对直流断路器的健康状态进行评估, 本文综合考虑直流断路器健康状态, 提出了一种基于健康指数的健康评估模型。通过评估设备多特征参数对运行性能的影响, 综合考虑特征参数间的均衡性, 计算得到设备综合健康指数; 在此基础上进一步拟合健康指数随运行时间的变化趋

势,评估设备未来健康状态并预测其退役时间节点,从而提高设备在运行过程中的稳定性和可靠性。

1 直流断路器健康指标

直流断路器的健康评估受多种状态量的影响,不仅有容易测量的定量信息(如绝缘电阻、合分闸时间等),还有难以量化的定性信息(如外观、磨损情况等)。这些状态量从不同方面及程度上反映了断路器的实时健康状态。此外,直流断路器运行环境及维保情况都在一定程度上反映并影响着断路器健康状态。因此,有必要对这些状态量进行全面、准确的描述、分类和汇总,并建立完善的状态评估指标体系。通过该指标体系的应用,可以对断路器的健康状况进行定量评估和监测,以便及时采取必要的维修或替换措施,确保断路器的正常运行。

指标不足会导致状态评估结果失真,指标冗余又会增加评估复杂程度。因此,本文从基本参数、运行环境、运行试验指标、部件可靠性及不良工况等五个方面,综合考虑直流断路器日常运行与维护过程,对直流断路器进行健康状态评价。

基本参数状态为设备静态履历,通过设备的工作时间、设计寿命等关键参数记录设备的历史信息,从而推断一段时间后设备的功能状况和可靠性水平。设备动态履历基于设备在实际运行中所处的工况条件,对静态履历进行修正和调整。依据设备运行记录、故障记录及维修记录分析对设备性能的影响,通过动态履历的记录和分析,可以修正设备静态履历,从而得到基本健康状态参数。

运行环境信息包括温度、湿度及污染度(如粉尘、污秽等),这些环境因素对断路器的可靠性和稳定性都具有潜在的影响。温度影响着绝缘材料及塑料材料的寿命;湿度过高会造成凝露,容易引起端子排短路现象,进而导致信号误报、断路器误动作;过高的污染度会导致断路器绝缘发生击穿,使得设备的可靠性受到影响。

运行试验参数分为主回路绝缘电阻、分/合闸时间、主回路直流电阻及触头温升。通过对这些运行试验参数的检测和评估,可以有效地了解断路器的绝缘状态、机械特性和触头接触情况。根据评估结果,可以及时采取措施,如维修、调整或更换断路器等,以确保其正常运行和地铁设备安全。

部件可靠性考虑二次回路元件、继电保护装置、端子排二次电缆及变送器等部件状态。这些部

件的状态和性能对直流断路器的可靠运行起着重要作用。在部件可靠性评估中,主要检查部件是否存在物理损伤、接触不良、精度下降等问题,从而保证部件的准确性和可靠性。

直流断路器的不良工况主要是由开断电流所引起,较高的短路电流会引发电流冲击,可能导致设备过热、电弧爆炸等问题。因此根据造成的危害程度和发生频率,对存在的开短路电流和过量操作进行评估。

综上所述,建立直流断路器健康状态评估体系,如表 1 所示。

表 1 直流断路器健康状态评估体系  
Tab. 1 Health condition evaluation system of DC circuit breaker

目标层	特性层	指标层
直流断路器健康状态	基本参数	静态履历
		动态履历
	运行环境	温度
		湿度
		污染度
		主回路绝缘电阻
	运行试验参数	合闸时间
		分闸时间
		主回路直流电阻
		触头温升
	部件可靠性	二次回路元件
		端子排二次电缆
		继电保护装置
		变送器
	不良工况	开短路电流
		过量操作

对于不同类型的数据指标采用梯形分布策略进行指标初始化。其中,对于某些难以具体量化的指标如环境污染度、部件可靠性等,由于相关指标难以通过测量或试验得到具体数值,并且缺乏具体的评分标准,可通过采用借鉴实际运行人员的经验或多位专家用区间打分法等多种打分评价法确定。

2 基于健康指数的健康评估模型

2.1 健康指数与设备状态的关系

设备健康指数是衡量和表征设备健康状态的量化数值,其含义为:在一定条件下,描述待评估设

备在预定的条件、时刻或者时间区间里,处于可执行规定功能状态的能力。对直流断路器而言,是在规定的条件和时间内,能够保持一定可靠性和维修性水平并稳定、持续完成预定功能的能力。健康指数理论将现场设备的实时状态数据按照一定数学规则进行组合,得到评价设备状况的实时健康指数。利用健康指数对断路器健康水平进行评估,不仅将断路器的状态从简单的“很好”“一般”和“差”等较为模糊的评估概念中脱离,而且可以灵活、可靠、全面地从多种角度进行量化数值的综合性分析计算,能为设备检修计划的制定提供坚实有效的数据支撑与理论依据,为综合衡量设备运行状况、健康等级和使用寿命等提供一个新视角和新维度。

通过综合分析及设备运行状态相关的诸多影响指标参数,得到体现健康状态的量化数值即为设备的健康指数。设备健康指数的取值范围在0到1之间,其越接近1表明设备的健康状态越好,反之,越接近0表明设备的健康状态越差。

## 2.2 直流断路器综合健康指数

直流断路器的健康状况通过基本参数、运行环境、运行试验指标、部件可靠性及不良工况等五个方面进行综合评价,因此直流断路器的综合健康指数也是由上述评估参量共同作用的结果。为了求取断路器的综合健康指数,在分项健康指数的基础上采取加权方法得到最终指标。综合健康指数获取的基本流程为:先利用三级指标求取对应二级指标评估值,再利用二级指标求取对应一级指标评估值,最后利用一级指标求取直流断路器综合健康状态评估值,并根据不良工况进行修正。计算公式为:

$$H_1 = k \sum_{i=1}^n w_i H_{1i} \quad (1)$$

式中:

- $H_1$ ——断路器健康指数;
- $k$ ——不良工况修正系数;
- $n$ ——断路器分项指标个数;
- $H_{1i}$ ——断路器分项指标健康指数;
- $w_i$ ——断路器分项指标权重。

## 2.3 分项指标组合权重

权重的确定对于计算断路器设备健康指数至关重要。权重值反映了每个特征参数影响设备运行状态的重要程度,合理的权重分配是准确评估设备运行状态的基础。层次分析法是一种将定性分析和定量分析相结合的分析方法,常用于分析确定

权重系数的问题。层次分析法权重的相关计算公式参见文献[7]。

由于层次分析法分配权重受主观任意性的影响,其结果过于依赖专家经验知识。为尽量排除主观因素的影响,利用依据客观数据的熵权法重新组合权重。熵权法是基于特征参数的变异程度,通过信息熵得到各特征参数的熵权,进而获取各特征参数权重的方法。某项指标的差异越大,熵权越小,表明该指标提供的信息量越大,在评价中所起作用越大,权值就越大。熵权法的具体计算公式参见文献[3]。

为使主观权重与客观权重尽可能接近以达到主观和客观的统一,需对断路器分项指标权重进行改善,从而得到对应的各分项指标组合权重  $w_{izh}$ ,其计算公式为:

$$w_{izh} = \frac{\sqrt{w_{ia} w_{ib}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{w_{ia} w_{ib}}} \quad (2)$$

式中:

- $w_{ia}$ ——分项指标主观权重;
- $w_{ib}$ ——分项指标客观权重;
- $w_{izh}$ ——分项指标组合权重。

根据式(2)对断路器各分项指标权重进行优化后,实现各分项指标权重计算过程的公正及主客观内在统一,从而保证设备健康状态评价结果真实、科学、可信。

## 2.4 拟合寿命模型

随着设备运行时间的增加,设备健康状态一般遵循指数形式的退化,故基于设备投运以来的历史健康数据,拟合设备寿命模型为:

$$H_1 = a - be^{cT} \quad (3)$$

式中:

- $a, b, c$ ——模型拟合参数;
- $T$ ——设备运行时间。

现实中,大多数设备随着运行时间的增加,设备的性能会逐渐变差,从而导致设备健康状态降低。因此断路器健康指数从初始值1逐渐减小,表明其健康状态正在逐步退化;直到某一时间健康指数将达到临界值,表明该设备需要维护或退役。依据设备每年健康状态值和运行年限的健康状态集合,可以拟合并建立设备寿命模型。对于设备的剩余使用寿命,在相同的设备使用环境与维保情况下,可以通过寿命模型进行求解,从而制定更为科



学合理的维修保养策略,进一步保障直流断路器设备健康稳定运行。

3 实例分析

为了验证基于健康指数的直流断路器状态评估模型的科学与可行性,本文基于某牵引变电站运行数据进行实例分析。

基于层次分析法对断路器特性层建立评估矩阵  $P_1$  如下:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1.00 & 2.0 & 3 & 4 \\ 0.50 & 1.0 & 2 & 2 \\ 0.33 & 0.5 & 1 & 1 \\ 0.25 & 0.5 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

在此基础上,依据层次分析法求解特性层间权重  $w_1 = [0.48 \quad 0.26 \quad 0.14 \quad 0.12]$ ,符合一致性检验。

3.1 基本参数健康评估

设备静态履历依据电力设备的健康状态经验,计算设备使用时间与健康状态之间的联系。计算公式为:

$$1 - H_{jt} = (1 - H_0) e^{B(T_2 - T_1)} \quad (5)$$

式中:

- $T_2$ ——断路器设计寿命;
- $H_0$ ——初始健康状态;
- $T_1$ ——现运行时间;
- $H_{jt}$ ——静态履历健康状态值;
- $B$ ——老化系数。

依据设备设计寿命及退役健康状态计算可得  $H_{jt}$  为 0.800。

设备动态履历是参照断路器运行记录、故障记录和维修记录对静态履历健康状态值  $H_{jt}$  进行修正而得到的。相关修正系数取值如表 2 所示,修正系数计算公式为:

$$k_a = k_{11} k_{12} k_{13} \quad (6)$$

表 2 直流断路器动态履历

Tab.2 Dynamic history of DC circuit breaker		
评估指标	实际情况	修正系数
运行记录	长期运行状态良好	$k_{11} = 1.05$
故障记录	存在 5 次故障情况	$k_{12} = 0.98$
维修记录	只发生故障时进行维修	$k_{13} = 0.98$

式中:

$k_a, k_{11}, k_{12}, k_{13}$ ——动态履历、运行记录、故障记

录、维修记录修正系数。

计算得到断路器基本参数的健康指数  $H_{11}$  为 0.807。

3.2 运行试验参数健康评估

同样建立运行试验参数的评估矩阵  $P_2$ 。

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1.00 & 3.00 & 3 & 3.0 & 2.00 \\ 0.33 & 1.00 & 3 & 0.5 & 0.33 \\ 0.33 & 0.33 & 1 & 0.5 & 0.33 \\ 0.33 & 2.00 & 2 & 1.0 & 0.50 \\ 0.50 & 3.00 & 3 & 2.0 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (7)$$

求取其主观权重为  $[0.38 \quad 0.12 \quad 0.08 \quad 0.16 \quad 0.26]$ ,其结果满足一致性检验。断路器运行试验数据如表 3 所示,参照熵权法求取其客观权重为  $[0.10 \quad 0.42 \quad 0.34 \quad 0.06 \quad 0.08]$ 。

表 3 直流断路器运行试验数据

Tab.3 Operation test data of DC circuit breaker				
主回路绝缘电阻/MΩ	分闸时间/ms	合闸时间/ms	主回路直流电阻/μΩ	触头温升/K
29.4	12	129	63	13
29.6	16	115	65	15
29.5	21	122	66	18

将客观权重与主观权重依据式(2)进行结合,可以求得组合权重  $w_{2zh} = [0.26 \quad 0.34 \quad 0.19 \quad 0.07 \quad 0.14]$ 。五项指标得分分别为 97 分、90 分、95 分、89 分和 87 分,可计算断路器运行试验参数健康指数  $H_{12}$  为 0.922。

3.3 运行环境和部件可靠性参数健康评估

同样分别建立运行环境和部件可靠性的判断矩阵  $P_3, P_4$ :

$$P_3 = \begin{bmatrix} 1.0 & 2 & 0.50 \\ 0.5 & 1 & 0.33 \\ 2.0 & 3 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0.5 & 0.33 \\ 1 & 1 & 0.5 & 0.33 \\ 2 & 2 & 1.0 & 0.50 \\ 3 & 3 & 2.0 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (9)$$

求解运行环境指标层权重  $w_3 = [0.30 \quad 0.16 \quad 0.54]$ ,部件可靠性指标层权重  $w_4 = [0.14 \quad 0.10 \quad 0.26 \quad 0.46]$ ,均满足一致性检验。

根据实际检测数据,参照运行人员工作经验与专家建议,断路器运行环境各因素(温度、湿度及污染度)得分分别为 94 分、92 分及 100 分,部件可靠性各因素(二次回路元件、端子排二次电缆、继电保

护装置及变送器)得分分别为 89 分、92 分、99 分及 94 分。由此可以计算得到运行环境的健康指数  $H_{13}$  为 0.969,部件可靠性参数的健康指数  $H_{14}$  为 0.943。

3.4 不良工况修正

直流断路器两类不良工况统计如表 4 所示。设备不良工况的整体修正系数计算公式为:

$$k = k_1 k_2 \tag{10}$$

式中:

- $k_1$ ——开短路电流修正系数;
- $k_2$ ——过量操作修正系数。

依据表 4 所示不良工况记录,计算  $k$  为 0.94。

表 4 直流断路器不良工况记录

Tab.4 Bad service records of DC circuit breaker		
不良工况	状况描述	修正系数
开短路电流	开短路电流超过厂家规定值的 80%, 次数累计 2 次	0.95
过量操作	分合闸次数达到厂家规定值的 52%	0.98

根据式(1)可以得到该断路器最终的健康指数  $H_1$  为 0.823。

3.5 剩余寿命计算

依据上述步骤,采用相同方法对直流断路器历年健康状态值进行计算,结果如表 5 所示。

表 5 直流断路器历年健康指数

Tab.5 Health index of DC circuit breaker over the years			
运行时间/年	健康状态值	运行时间/年	健康状态值
1	0.943	6	0.892
2	0.935	7	0.877
3	0.926	8	0.860
4	0.916	9	0.841
5	0.905	10	0.823

在此基础上对相关数据进行仿真拟合,得到直流断路器寿命模型如图 1 所示。拟合后所得到的断路器运行年限的健康状态曲线为  $H_1 = 1.017 - 0.06184e^{0.13887}$ 。

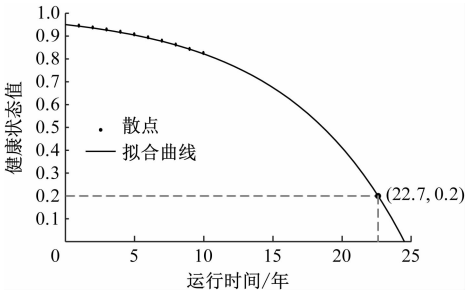


图 1 直流断路器寿命模型

Fig.1 Life span model of DC circuit breaker

由此可以计算出,当断路器临近退役健康状态值 0.2 时,运行时间为 22.7 年。依据当前断路器的使用强度可判断,该直流断路器的剩余寿命约为 10.7 年。

4 结语

本文采用健康指数描述并量化直流断路器设备健康状况,建立直流断路器状态评估模型。首先合理选择评估指标建立设备运行状态评估体系;其次将层次分析法与熵权法相结合重新确定各分项特征指标的组合权重,从而计算表征设备运行状态的综合健康指数;最后建立寿命模型来描述设备综合健康指数随运行时间的退化情况,并通过拟合历史数据预测设备未来健康状态和剩余使用寿命,以便提前对设备进行维护。实例验证了直流断路器状态评估模型的有效性。

本文提出的直流断路器状态评估模型充分考虑了状态检测指标的科学性,实现了评估计算过程的主客观统一,可以对设备剩余使用寿命进行预测。该模型具有一定的实用性和可行性,能够推广运用到地铁其他直流设备的状态评估过程中,可为制定相关牵引供电设备维保策略提供理论依据和参考。

参考文献

[1] 谢静,束洪春,王科,等. 基于突变级数法的高压开关柜状态评价算法[J]. 高电压技术, 2014, 40(8):2372.  
XIE Jing, SHU Hongchun, WANG Ke, et al. State evaluation algorithm based on catastrophe progression method of high voltage switchgears[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8):2372.

[2] 王竞,夏加富,刘晓晖,等. 牵引变电站直流断路器机械状态监测与故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 33.  
WANG Jing, XIA Jiafu, LIU Xiaohui, et al. Research on mechanical condition monitoring and fault diagnosis for DC circuit breaker in traction substation[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 33.

[3] 林勇,徐钦炜,张俊强,等. 基于 ECP 的轨道交通直流牵引供电系统开关状态评价算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5):16.  
LIN Yong, XU Qinwei, ZHANG Junqiang, et al. Status evaluation algorithm of DC traction power supply system switchgear based on ECP for rail transit[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5):16.

[4] 赵成晨,李奎,郝运金,等. 基于竞争失效的低压开关电器可靠性建模方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 7094.  
ZHAO Chengchen, LI Kui, HAO Yunqian, et al. Research on re-

liability modeling method of low-voltage switchgear based on competitive failure [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (21): 7094.

- [5] 赵书涛, 王波, 华回春, 等. 基于马尔科夫模型的直流断路器可靠性评估方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34 (增刊 1): 126.

ZHAO Shutao, WANG Bo, HUA Huichun, et al. Reliability evaluation method of DC circuit breaker based on Markov model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (S1): 126.

- [6] 李海英, 冯冬, 宋建成. 中压真空断路器状态的雷达图法评

估模型[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2053.

LI Haiying, FENG Dong, SONG Jiancheng. Condition-based assessment model of MV vacuum circuit breaker with radar chart method[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2053.

- 收稿日期:2023-08-09 修回日期:2023-11-20 出版日期:2024-03-10  
Received:2023-08-09 Revised:2023-11-20 Published:2024-03-10  
· 通信作者:郭德龙,高级工程师, gdl2088@126.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 164 页)

China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited. Research report on reasonable design value of dynamic parameter and reasonable stiffness for shanghai suburban railway beam bridge[R]. Shanghai: China Railway Shanghai Design Institute Group Corporation Limited, 2022.

- [7] 张军. 高速铁路简支梁动力系数影响因素分析及合理取值研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.

ZHANG Jun. Study on influencing factors and suggestive value for high-speed railway simple supported beam bridge[D]. Changsha: Central South University, 2012.

- [8] 胡所亭, 王丽, 蔡超勋. 铁路桥梁设计动力系数研究进展

[J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 1.

HU Suoting, WANG Li, CAI Chaoxun. Research progress on dynamic coefficient of railway bridge design[J]. Railway Engineering, 2019, 59(12): 1.

- 收稿日期:2023-03-16 修回日期:2023-05-20 出版日期:2024-03-10  
Received:2023-03-16 Revised:2023-05-20 Published:2024-03-10  
· 第一作者:朱永兵,高级工程师, zhuyb@sty.sh.cn  
通信作者:吴定俊,教授, Tjwdj@tongji.edu.cn  
· ©《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 170 页)

- [5] 江伟, 黄玉萍. 一种智能挡板防淹系统设计[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2020, 19(4): 21.

JIANG Wei, HUANG Yuping. A Kind of Smart Damper Flood Prevention System Design[J]. Journal of Guangdong Communication Polytechnic, 2020, 19(4): 21.

- [6] 曾国保, 王聪, 姚建华. 城市轨道交通防洪工程建设思路探讨[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(4): 89.

ZENG Guobao, WANG Cong, YAO Jianhua. Discussion on flood control project construction of urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(4): 89.

- [7] 郑建春. 地铁车辆基地出入段线内涝灾害数据采集与模拟分析: 以北京易涝地铁车辆基地为例[J]. 安全, 2022, 43 (7): 1.

ZHENG Jianchun. Data acquisition and simulation analysis of waterlogging disaster in inlet/outlet line of subway vehicle base taking subway vehicle bases prone to waterlogging in Beijing[J]. Safety, 2022, 43(7): 1.

- [8] 邵鹏飞, 赵燕伟, 杨明霞. 城市内涝监测预警信息系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(2): 49.

SHAO Pengfei, ZHAO Yanwei, YANG Mingxia. Research on ur-

ban waterlogging monitoring and pre-warning system[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(2): 49.

- [9] 秦兆明. 水利工程河道防洪堤光纤式智能监测研究[J]. 水利技术监督, 2022, 30(6): 60.

QIN Zhaoming. Study on optical fiber intelligent monitoring of river flood dike in water conservancy project[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2022, 30(6): 60.

- [10] 吴建松, 许声弟, 张辉. 城市地下空间水灾试验与数值模拟研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(9): 1.

WU Jiansong, XU Shengdi, ZHANG Hui. A review of experimental and numerical simulation studies on flooding in urban underground spaces[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26 (9): 1.

- 收稿日期:2023-09-01 修回日期:2023-11-25 出版日期:2024-03-10  
Received:2023-09-01 Revised:2023-11-25 Published:2024-03-10  
· 作者:胡立翔,高级工程师, 670740975@qq.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

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821