

城市轨道交通牵引变电所健康状态综合评估

裴丽君¹ 章 达¹ 蔡彬彬¹ 赵 晨¹ 张长开² 谢晨琳³

(1. 南京地铁建设有限责任公司, 210012, 南京; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 211102, 南京;

3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘 要 为提高城市轨道交通牵引变电所的可靠性,选取TEV(局部放电检测)瞬时值、超声波瞬时值、SF₆(六氟化硫)气压表压力、SF₆气压表温度、SF₆气压表密度、开关触头温度和电缆接头温度作为牵引变电所SF₆开关柜的评价指标,建立牵引变电所健康状态综合评价模型。以我国东部某城市轨道交通公司建立的牵引变电所示范站为研究对象,整理和归纳牵引变电所在实际运行中各项评价指标的实时监测数据并对其进行分析,采用层次分析法和熵权法相结合的方法确定其权重,得出对牵引变电所健康状态影响较大的评价指标;对该牵引变电所在不同时段的健康状态评分。结果表明:在SF₆开关柜的影响因素中,开关触头温度对牵引变电所健康状态影响较大;我国南方地区在每年的2、3、4月份气候最为潮湿,7、8月份气温较高,不利于城轨牵引变电所的健康运行。建议在牵引变电所的运营中,应着重做好开关触头温度的监测工作,同时做好牵引变电所的检修和维护,以提升牵引变电所的健康状态,确保牵引变电所处于良好的运行环境之中。

关键词 城市轨道交通; 牵引变电所; 健康状态; 评估

中图分类号 U224:U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.004

analyzed. The weights are determined by combining the AHP (analytic hierarchy process) and EWM (entropy weight method), and the evaluation indicators that have a significant impact on traction substation health status are obtained. The health status scores of the traction substation in different periods are also evaluated. Results show that among the factors affecting the SF₆ switchgear, switch contact point temperature has a great impact on traction substation health status. The southern region of China is the most humid in February, March, and April each year, and the temperature is higher in July and August, all are not conducive to the healthy operation of urban rail traction substation. The monitoring of the switch point contact temperature should be emphasized, and the maintenance and repair of traction substation should be carried out to improve its health status and ensure that it operates in a good environment.

Key words urban rail transit; traction substation; health status; evaluation

First-author's address Nanjing Metro Construction Co., Ltd., 210012, Nanjing, China

Comprehensive Evaluation of Urban Rail Transit Traction Substation Health Status

PEI Lijun, ZHANG Da, CAI Binbin, ZHAO Chen, ZHANG Changkai, XIE Chenlin

Abstract To improve the reliability of urban rail transit traction substation, TEV (transient earth voltage) instantaneous value, ultrasonic instantaneous value, SF₆ (sulfur hexafluoride) pressure gauge pressure, SF₆ pressure gauge temperature, SF₆ pressure gauge density, switch contact point temperature, and cable joint temperature are selected as evaluation indicators for traction substation SF₆ switchgear. A comprehensive evaluation model of traction substation health status is established. Taking the traction substation demonstration station established by an urban rail company in eastern China as the research object, the real-time monitoring data of various evaluation indicators of the traction substation in actual operation are sorted and

城市轨道交通(以下简称“城轨”)直流牵引供电系统通过在一次设备上加装智能监控设备、传感器等在线监控装置,能够及时获取牵引变电所设备的状态量并实现快速预警。

文献[1]采用FTA(故障树分析)和FMEA(故障模式影响分析)法综合评估城轨牵引供电系统的可靠性。文献[2]采用GO法(一种以成功为导向的系统可靠性分析方法)分析得到各元件对牵引变电所可靠性的影响,并从定量和定性两个方面评估了牵引变电站的可靠性。文献[3]主要考虑了城轨牵引变电所的电缆、开关柜和牵引变压器,分析了牵引变电所的可靠性。文献[4]利用层次分析法构建了城轨牵引供电系统的健康评价模型,并通过模糊统计的方法进行了综合评估。文献[5]将组合赋权与模糊灰色聚类相结合来评价牵引变电所的健

康状态。上述研究大部分针对牵引变电所的牵引变压器和电缆的状态进行健康评价,并未涉及开关柜、室内监测和室内环境参数等因素。

城轨牵引变电所内设有牵引变压器、SF₆(六氟化硫)开关柜、直流开关柜、电缆和整流器等关键设备。本文以我国东部某城轨公司建立的牵引变电所示范站为研究对象,对 SF₆ 开关柜、牵引变压器、室内监测及室内环境参数等进行了详细分析;根据在线监测系统获取城轨运行过程中牵引变电所的实时数据,构建城轨牵引变电所健康状态评价指标体系;采用层次分析和熵权法作为城轨牵引变电所评分的依据^[6],综合评价城轨牵引变电所的健康状态。结果可为城轨牵引变电所的运行维护提供参考。

1 牵引变电所健康状态综合评价模型

本文选用城轨牵引变电所的部分重要参数描

述其健康状态。首先选取 TEV(局部放电检测)瞬时值、超声波瞬时值、SF₆ 气压表压力、SF₆ 气压表温度、SF₆ 气压表密度、开关触头温度和电缆接头温度作为牵引变电所 SF₆ 开关柜的评价指标。局部放电采用 TEV 法检测放电脉冲,采用压电传感器检测超声波。牵引变电所示范站可对 SF₆ 开关柜充气设备内部气体压力、温度及微水含量变化进行一体化实时监测。采用无线测温传感器检测开关触头和电缆接头的温度。

牵引变压器评价指标选取其振动噪声和电缆接头温度。室内监测指标选取 SF₆ 质量浓度和电缆隧道漏水量。牵引变电所示范站电缆隧道设置水浸传感器,用来检验漏水的严重程度。此外,还需考虑室内环境参数,良好的运行状态需要适宜的环境温度和湿度。

城轨牵引变电所健康状态综合评价模型见图 1。

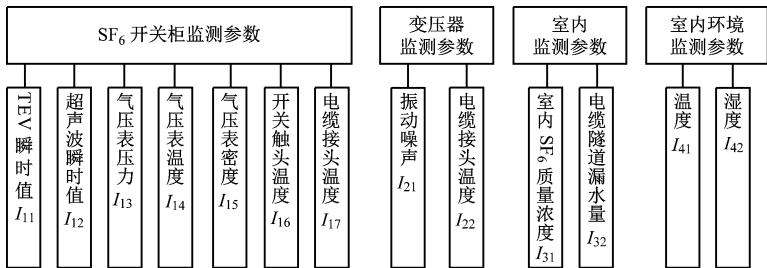


图 1 城轨变电所健康状态综合评价模型

Fig. 1 Comprehensive evaluation model of urban rail substation health status

2 主客观赋权的全局评价

2.1 主客观赋权的全局评价模型

收集整理城轨牵引变电所健康状态评价指标数据,对这些指标参数进行量纲一化。本次评价对一级指标采用 AHP(层次分析法)计算,将 AHP 和熵权法结合计算二级评价指标权重^[6]。对不同时段城轨牵引变电所的健康状态进行评分并得出结论。主客观赋权的全局评价模型见图 2。

2.2 数据量纲一化

对原始指标进行数据量纲一化,是进行城轨牵引变电所健康状态综合评价的基础。量纲一化能够消除不同指标维度造成的差异。

对城轨牵引变电所健康状态综合评价指标进行量纲一化时的指标隶属度分类见表 1。线性函数量纲一化计算式见式(1)一式(3)。

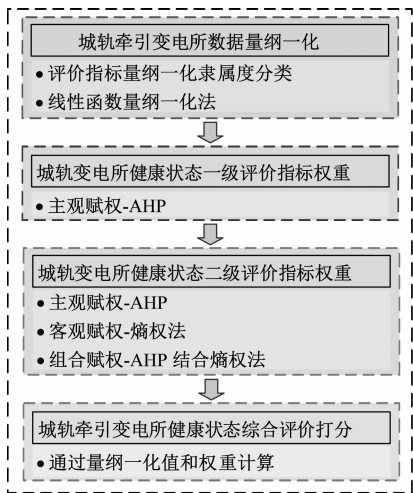


图 2 主客观赋权的全局评价模型

Fig. 2 Comprehensive evaluation model with subjective and objective weighting

“极大型”指标 $x_{i,max}$ 量纲一化的计算式为:

表 1 城轨变电所健康状态评价指标量纲一化方法分类
Tab.1 Normalization method classification of urban rail substation health status evaluation indicators

指标类型	城轨变电所健康状态评价指标
“区间型”指标	SF ₆ 气压表压力、SF ₆ 气压表温度、SF ₆ 气压表密度
“极小型”指标	TEV 瞬时值、超声波瞬时值、SF ₆ 开关柜开关触头温度、SF ₆ 开关柜电缆接头温度、牵引变压器振动噪声、牵引变压器电缆接头温度、室内 SF ₆ 质量浓度、电缆隧道漏水量

$$x_{i,\max} = \frac{x_i - x_1}{x_h - x_1}, i = 1, 2, \cdots, m \quad (1)$$

式中:

- x_i ——第 i 个原始参数值;
 - x_h ——该指标参数的极大值;
 - x_1 ——该指标参数的极小值。
- “极小型”指标 $x_{i,\min}$ 量纲一化的计算式为:

$$x_{i,\min} = \frac{x_h - x_i}{x_h - x_1}, i = 1, 2, \cdots, m \quad (2)$$

“区间型”指标量纲一化的计算式为:

$$x_i = \begin{cases} 1 - \frac{d_1 - x_i}{\max(d_1 - x_1x_h - d_2)}, & x_i < d_1 \\ 1, & x_i \in [d_1, d_2] \\ -\frac{x_i - d_2}{\max(d_1 - x_1x_h - d_2)}, & x_i > d_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

- d_1 ——评价指标阈值的下限;
- d_2 ——评价指标阈值的上限。

2.3 AHP

对于一级指标,采用 AHP 赋权^[7]。首先构建判断矩阵,分别以上一层指标为基准,两两对比本层和上层相关的指标,根据比较结果赋予本层指标不同的值以表示评价指标的相对重要性,并依据判断矩阵 1 到 9 级标度及含义来对指标赋值得。

判断矩阵的一致性指标 I_C 采用式(4)描述,矩阵一致性比例 R_C 计算式见式(5)。如果通过计算得到 $R_C < 0.1$,表征判断矩阵的一致性可以接受;但若 $R_C \geq 0.1$,则有必要进一步分析评价指标两两之间的相对重要性,对判断矩阵进行修改后,再重新计算 R_C ,直到其值降到 0.1 以下为止。

$$I_C = \lambda_{\max} / (n - 1) \quad (4)$$

$$R_C = I_C / I_R \quad (5)$$

式中:

- λ_{\max} ——判断矩阵的最大特征根;
- n ——评价指标的个数;
- I_R ——平均随机一致性指标,其取值有严格规定。

AHP 权重有多种计算方法,由于根法简便易行,故选用根法。选用根法的权重 w_i 计算式为:

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{M_i}}{\sum_{j=1}^n \sqrt[n]{M_j}}, i = 1, 2, \cdots, n \quad (6)$$

式中:

M_i, M_j ——分别为判断矩阵第 i, j 行元素的乘积。

2.4 熵权法

熵权法是通过熵的方法估计评价指标的权重^[8]。根据客观数据,考虑每个影响因子相关度和每个影响因子提供的信息量来确定权重,从而避免了层次分析法主观因素在一定程度上造成的偏差^[9]。

构建量纲一化矩阵 R , 见式(7)。式(7)中, r_{ij} 为第 i 个待评价样本的第 j 项评价指标量纲一化后的值。

$$R = (r_{ij})_{n \times m} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (7)$$

特征值比重 p_{ij} 的计算式为:

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}}, i = 1, 2, \cdots, n, j = 1, 2, \cdots, m \quad (8)$$

评价指标的熵值 e_j 的计算式为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (9)$$

熵权 w_j 的计算式为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j}, j = 1, 2, \cdots, m \quad (10)$$

2.5 组合赋权及评价打分

组合权重 w_k 为主观权重 w_{k-AHP} 和客观权重 $w_{k-Entropy}$ 的线性组合,计算式见式(11)。对不同时段牵引变电所的健康状态进行打分,计算式见式(12)和式(13)。

$$w_k = 0.6 w_{k-AHP} + 0.4 w_{k-Entropy} \quad (11)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n w_k x_{ik} \quad (12)$$

$w_k = w_j w_{jk}$ (13)

式中:

x_{ik} ——评价指标原始数据量纲一化值;

w_{jk} ——直接利用 AHP-熵权法求得的二级评价指标权重;

Q_i ——牵引变电所健康状态评分。

3 牵引变电所健康状态综合评价实例

选取 2020 年 8 月到 2021 年 8 月我国东部某城轨公司建立的牵引变电所示范站的监测数据,依据本文的量纲一化法对原始数据做量纲一化处理,以每个月上、中、下旬划分时间。根据判断矩阵构建原则,本次评价一级评价指标两两标度取值见表 2。

表 2 一级评价指标两两标度取值

Tab.2 Pairwise scale value of primary evaluation indicators

一级评价指标	标度			
	SF ₆ 开关柜	牵引变压器	室内监测	室内环境参数
SF ₆ 开关柜	1	1/3	3	5
牵引变压器	3	1	5	7
室内监测	1/3	1/5	1	3
室内环境参数	1/5	1/7	1/3	1

由表 2 可得判断矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 5 \\ 3 & 1 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/7 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

求解判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 为 4.12,计算 I_c 取值为 0.039。当判断矩阵阶数为 4, I_R 取值为 0.89, R_c 为 0.043 8 < 0.100 0 时,一级评价指标的一致性通过检验。根据式(6)计算得到城轨牵引变电所一级评价指标的权重,见表 3。

表 3 城轨牵引变电所健康状态一级评价指标权重

Tab.3 Weights of urban rail traction substation health status primary evaluation indicators

一级评价指标	权重
SF ₆ 开关柜	0.263 4
牵引变压器	0.563 8
室内监测	0.117 8
室内环境参数	0.055 0

构建二级评价指标的 AHP 判断矩阵 R_1 :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 3 & 5 & 1/3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1 & 3 & 1/5 & 1/3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1 & 1/7 & 1/5 \\ 1/3 & 1 & 3 & 1 & 3 & 1/5 & 1/3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 & 1/3 & 1 & 1/7 & 1/5 \\ 3 & 5 & 7 & 5 & 7 & 1 & 3 \\ 1 & 3 & 5 & 3 & 5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

根据规定,当评价指标总数为 7, I_R 取值为 1.36 时,计算得到最大特征根 λ_{\max} 为 7.18。将该值代入式(4)和式(5)可得, I_c 为 0.030 3, R_c 为 0.022 3 < 0.100 0。根据式(6)得到 SF₆ 开关柜二级评价指标的权重,见表 4。

表 4 AHP 下 SF₆ 开关柜评价指标的 w_{k-AHP}

Tab.4 w_{k-AHP} of SF₆ switchgear evaluation indicators under AHP method

二级评价指标	w_{k-AHP}
I_{11}	0.189 6
I_{12}	0.081 3
I_{13}	0.035 7
I_{14}	0.081 3
I_{15}	0.035 7
I_{16}	0.386 7
I_{17}	0.189 6

对于剩余一级指标,每项指标中包含两个二级评价指标,数量较少。由于熵权法具有很强的客观性,会使得误差数据对评价结果影响很大,故通过 AHP 求得牵引变压器、室内检测及室内环境参数评价指标的权重。

牵引变压器、室内监测及室内环境参数评价等一级指标只有两项二级评价指标,判断矩阵无需再经过一致性检验。根据牵引变电所相关规则和现场维修经验,对比各项二级评价指标的重要性可见,牵引变压器的两项二级评价指标重要性相同。室内监测及室内环境参数的判断矩阵 R_2 如下:

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

利用式(6)计算得到各自的权重。牵引变压器、室内监测及室内环境参数等评价指标的权重见表 5。

利用式(7)一式(10)计算 SF₆ 开关柜指标的客观权重,见表 6。

根据式(11)求得 SF₆ 开关柜二级评价指标的

组合权重,见表7。

表5 牵引变压器、室内监测和室内环境参数评价指标权重
Tab.5 Weights of traction transformer, indoor monitoring and indoor environmental parameter evaluation indicators

二级评价指标	权重
I_{21}	0.50
I_{22}	0.50
I_{31}	0.75
I_{32}	0.25
I_{41}	0.75
I_{42}	0.25

表6 熵权法下SF₆开关柜评价指标的w_{k-Entropy}
Tab.6 w_{k-Entropy} of SF₆ switchgear evaluation indicators under EWM

二级评价指标	w _{k-entropy}
I_{11}	0.360 0
I_{12}	0.117 6
I_{13}	0.071 0
I_{14}	0.043 1
I_{15}	0.072 5
I_{16}	0.197 4
I_{17}	0.138 5

表7 SF₆开关柜二级评价指标的组合权重
Tab.7 Combined weights of SF₆ switchgear secondary evaluation indicators

二级评价指标	w _{k-AHP}	w _{k-Entropy}	w _k
I_{11}	0.189 6	0.360 0	0.257 7
I_{12}	0.081 3	0.117 6	0.095 8
I_{13}	0.035 7	0.071 0	0.049 8
I_{14}	0.081 3	0.043 1	0.066 0
I_{15}	0.035 7	0.072 5	0.050 4
I_{16}	0.386 7	0.197 4	0.311 0
I_{17}	0.189 6	0.138 5	0.169 2

将SF₆开关柜二级评价指标按权重大小进行排序(见表8),得出权重最大的为开关触头温度。

将二级评价指标权重与其一级指标权重相乘,得到城轨变电所健康状态综合评价二级评价指标的最终权重,见表9。

根据式(12)和式(13)对不同时段牵引变电所的健康状态进行打分,结果见表10。

由表10可知:牵引变电所健康状态评分大于0.8的时段,城轨牵引变电所健康状态良好;2020年

表8 SF₆开关柜二级评价指标的组合权重排序
Tab.8 Combined weight ranking of SF₆ switchgear secondary evaluation indicators

二级评价指标	组合权重	权重排序
I_{16}	0.311 0	1
I_{11}	0.257 7	2
I_{17}	0.169 2	3
I_{12}	0.095 8	4
I_{14}	0.066 0	5
I_{15}	0.050 4	6
I_{13}	0.049 8	7

表9 牵引变电所健康状态综合评价二级评价指标总权重
Tab.9 Total weights of urban rail traction substation health status secondary evaluation indicators

二级评价指标	权重	二级评价指标	权重
I_{11}	0.067 9	I_{21}	0.281 9
I_{12}	0.025 2	I_{22}	0.281 9
I_{13}	0.013 1	I_{31}	0.088 4
I_{14}	0.017 4	I_{32}	0.029 5
I_{15}	0.013 3	I_{41}	0.041 3
I_{16}	0.081 9	I_{42}	0.013 8
I_{17}	0.044 6		

和2021年7、8月份牵引变电所健康状态评估结果介于0.6到0.8之间,因为该时段正值7、8月份,室温较高,导致牵引变电所综合评估得分较低;由于南方2、3、4月份气候较为潮湿,室内环境湿度较大,室内监测的SF₆质量浓度和电缆隧道漏水量都较高,故评分低于0.6,说明城轨牵引变电所的健康状态较差。

4 结语

本文全面考虑影响城市轨道交通牵引变电所健康状态的因素,构建了城轨牵引变电所健康状态综合评价模型,将AHP与熵权法相结合,对我国东部某城轨牵引变电所示范站近两年的实时监测数据进行分析。根据牵引变电所健康状态评估结果得出,在SF₆开关柜的影响因素中,开关触头温度对城轨牵引变电所健康状态影响较大。故在城轨牵引变电所的运营中,要着重做好开关触头温度的监测,以提升城轨牵引变电所的健康状态。

由于我国南方地区在每年的2、3、4月份气候最为潮湿,7、8月份气温较高,不利于城轨牵引变电所

表 10 城轨变电所健康状态综合评分

Tab.10 Comprehensive scores of urban rail substation health status

时段	评分				
	SF ₆ 开关柜	牵引变压器	室内监测	室内环境参数	健康状态
2021 年 1 月中旬	0.170 7	0.499 2	0.211 8	0.019 3	0.901 0
2021 年 3 月中旬	0.131 3	0.465 8	0.215 8	0.017 8	0.830 8
2020 年 12 月下旬	0.146 1	0.443 7	0.215 4	0.019 2	0.824 5
2020 年 12 月中旬	0.089 5	0.490 3	0.212 9	0.020 3	0.813 1
2020 年 11 月上旬	0.139 2	0.429 2	0.205 4	0.026 9	0.800 7
2020 年 8 月中旬	0.172 0	0.375 4	0.210 1	0.019 3	0.776 8
2020 年 8 月下旬	0.135 6	0.405 2	0.203 2	0.020 0	0.764 1
2021 年 1 月下旬	0.152 4	0.385 5	0.181 7	0.029 1	0.748 7
2021 年 7 月下旬	0.117 7	0.390 2	0.214 8	0.020 8	0.7434
2021 年 7 月上旬	0.122 4	0.355 9	0.210 4	0.020 1	0.708 9
2020 年 10 月下旬	0.129 9	0.340 7	0.210 4	0.027 5	0.708 5
2020 年 10 月中旬	0.114 9	0.401 5	0.165 8	0.026 3	0.708 4
2021 年 5 月上旬	0.133 4	0.329 8	0.203 6	0.031 5	0.698 3
2021 年 1 月上旬	0.143 8	0.303 0	0.212 1	0.029 5	0.688 5
2021 年 6 月上旬	0.163 3	0.286 4	0.204 1	0.023 0	0.676 8
2021 年 6 月下旬	0.137 0	0.330 5	0.185 2	0.022 3	0.674 9
2020 年 9 月上旬	0.101 6	0.334 1	0.209 6	0.021 4	0.666 8
2021 年 8 月上旬	0.108 9	0.319 9	0.215 6	0.017 6	0.662 0
2020 年 10 月上旬	0.145 5	0.286 4	0.199 5	0.029 2	0.660 7
2020 年 8 月上旬	0.144 5	0.262 0	0.215 4	0.029 1	0.651 0
2021 年 8 月下旬	0.094 7	0.391 4	0.134 4	0.027 9	0.648 4
2021 年 8 月中旬	0.152 7	0.247 9	0.214 2	0.032 1	0.646 9
2020 年 9 月下旬	0.109 3	0.329 0	0.171 6	0.036 5	0.646 4
2021 年 6 月中旬	0.119 6	0.295 3	0.201 9	0.021 6	0.638 5
2020 年 9 月中旬	0.135 9	0.330 3	0.142 7	0.018 4	0.627 2
2021 年 5 月下旬	0.158 5	0.222 3	0.213 8	0.028 3	0.622 9
2021 年 2 月中旬	0.112 1	0.278 6	0.201 0	0.027 1	0.618 8
2021 年 4 月中旬	0.108 1	0.271 4	0.213 8	0.023 1	0.616 3
2020 年 11 月下旬	0.100 0	0.304 3	0.181 9	0.029 5	0.615 6
2021 年 5 月中旬	0.112 5	0.259 1	0.209 0	0.028 5	0.609 2
2020 年 11 月中旬	0.094 4	0.275 4	0.208 8	0.030 5	0.609 1
2021 年 7 月中旬	0.112 2	0.259 8	0.209 8	0.021 6	0.603 4
2021 年 4 月上旬	0.133 4	0.288 3	0.153 1	0.023 5	0.598 3
2021 年 2 月下旬	0.118 2	0.261 7	0.187 4	0.028 8	0.596 1
2021 年 3 月下旬	0.155 4	0.285 0	0.104 1	0.024 6	0.569 1
2021 年 3 月上旬	0.084 7	0.307 6	0.138 8	0.021 8	0.552 9
2021 年 2 月上旬	0.111 1	0.321 1	0.071 4	0.027 4	0.531 0
2020 年 12 月上旬	0.143 0	0.296 3	0.053 7	0.033 8	0.526 8
2021 年 4 月下旬	0.143 2	0.289 7	0.063 3	0.022 5	0.518 7

的健康运行,故建议在上述时段要做好城轨牵引变电所的检修和维护,并确保城轨牵引变电所处于良好的运行环境之中。

参考文献

- [1] 胡海涛,高朝晖,何正友,等.基于FTA和FMEA法的地铁牵引供电系统可靠性评估[J].铁道学报,2012,34(10):48.
HU Haitao, GAO Zhaohui, HE Zhengyou, et al. Reliability evaluation of metro traction power supply system based on FTA and FMEA methods[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(10): 48.
- [2] 陈民武.基于GO法的高速铁路牵引变电所可靠性评估[J].电力系统保护与控制,2011,39(18):56.
CHEN Minwu. The reliability assessment of traction substation of high speed railway by the GO methodology[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 56.
- [3] 曾德容,何正友,于敏.地铁牵引变电所可靠性分析[J].铁道学报,2008,30(4):22.
ZENG Derong, HE Zhengyou, YU Min. Reliability analysis of metro's traction substation[J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30(4): 22.
- [4] 王玘,何正友,程宏波,等.基于多层免疫原理与模糊统计的地铁牵引供电系统健康评估方法[J].铁道学报,2015,37(12):31.
WANG Qi, HE Zhengyou, CHENG Hongbo, et al. Health assessment method for metro traction power supply system based on multi-layer immune principle and fuzzy statistics[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(12): 31.

- [5] 赵峰,陈子文,陈小强,等.高速铁路牵引变电所健康状态评估[J].铁道科学与工程学报,2019,16(9):2162.
ZHAO Feng, CHEN Ziwen, CHEN Xiaoqiang, et al. Assessment of health status of high speed railway traction substation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(9): 2162.
- [6] 刘润恺,于龙,陈德明.基于AHP-熵权法的高铁接触网可信性评价研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(8):1882.
LIU Runkai, YU Long, CHEN Deming. Research on dependability evaluation of high-speed railway catenary based on AHP-entropy method[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(8): 1882.
- [7] 陈嘉杨,张洪彦,王敏.AHP-熵权法在综合传动装置健康状态综合评估中的应用[J].车辆与动力技术,2017(1):38.
CHEN Jiayang, ZHANG Hongyan, WANG Min. Application of the AHP-entropy method on health status assessment of the integrated transmission device[J]. Vehicle & Power Technology, 2017(1): 38.
- [8] YANG S, ZHANG Z. Entropy weight method for evaluation of invulnerability in instant messaging network [C] // IEEE. 2009 Fourth International Conference on Internet Computing for Science and Engineering (ICICSE). Harbin: IEEE, 2009.
- [9] NIE H, YU T. Comprehensive evaluation for transmission network planning scheme based on entropy weight method and VIKOR method[C]//IEEE. 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC). Jilin: IEEE, 2011.

(收稿日期:2021-11-17)

国内首条商用运营城市空轨在武汉建成试跑

新华社消息,2023年5月11日武汉光谷的光谷空轨正处于综合联调和试运行阶段,进展顺利。

空轨即悬挂式轨道交通系统,是一种新型中低运量轨道交通制式。与传统交通方式不同,空轨列车车体悬挂于轨道梁下方凌空“飞行”,被称为“空中列车”。具有不占用地面路权、环境适应性强、景观效果好等优点,兼具通勤和观光功能。

光谷空轨列车初期采用2节编组,最多可容纳220余人,最高运行时速可达60 km。列车起动、停车、出库、入库、开关门及正线运行等均实现了全过程自动控制,无需人工操作,司乘人员只需随车应对突发情况。光谷空轨列车内部的透明舷窗引人瞩目。列车采用大开度侧窗,并且在车厢地板部分区域设置了观景窗,让乘客可拥有270°的观景视角。

(摘编自新华网)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. tongji. edu. cn