

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.02.017

# 计及指标重要度的地铁供电设备健康状态分级评估方法

叶东<sup>1</sup>, 郑杰<sup>1</sup>, 代一平<sup>1</sup>, 靳疆禾<sup>1</sup>, 陈智超<sup>2</sup>, 冯玘<sup>2</sup>, 林圣<sup>2</sup>

(1. 成都地铁运营有限公司, 成都 610058; 2. 西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

**摘要:** 针对现有维修模式中存在的“维修不足”和“维修过度”等问题, 提出了一种计及指标重要度的地铁供电设备健康状态分级评估方法。根据层次分析和模糊统计相结合的方法求解设备健康值, 并将指标的重要度考虑在内, 对设备所处的健康状态进行等级划分, 最后以干式变压器为例进行实例分析。研究表明: 利用本文提出的评估方法能够合理地表征地铁供电设备的健康状态, 与实际情况符合, 验证了方法的准确性及可行性。

**关键词:** 轨道交通; 供电设备; 状态维修; 分级评估; 健康值; 健康状态

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)02-0116-08

## Health Status Grading Evaluation Method of Subway Power Supply Equipment Considering Index Importance

YE Dong<sup>1</sup>, ZHENG Jie<sup>1</sup>, DAI Yiping<sup>1</sup>, JIN Jianghe<sup>1</sup>, CHEN Zhichao<sup>2</sup>, FENG Ding<sup>2</sup>, LIN Sheng<sup>2</sup>

(1. Chengdu Metro Operation Co., Ltd., Chengdu 610058;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

**Abstract:** To address the problems of “insufficient maintenance” and “excessive maintenance” in existing maintenance modes, a health status grading evaluation method for subway power supply equipment that considers the importance of indicators is proposed. First, the equipment health value was solved according to a combination of an analytic hierarchy process and fuzzy statistics. The importance of the index was considered, and the health status of the equipment was graded. Finally, a dry-type transformer was considered for analysis. The results show that the obtained results can reasonably characterize the health status of the subway power supply equipment, which is consistent with the actual situation, and verify the accuracy and feasibility of the method.

**Keywords:** rail transit; power supply equipment; condition-based maintenance; grading assessment; health value; health status

地铁供电设备作为地铁的重要组成部分, 其可靠运行对于确保地铁运维的安全性和稳定性至关重要, 地铁供电设备的可靠运行需要维修维护工作的有效开展。现有的以定期维修、事后维修为主的维修体制易造成人力和财力的极大浪费<sup>[1-2]</sup>, 而以健康状态评估结果为依据的状态维修能够很好地解决这一问题<sup>[3]</sup>, 通过评估设备的状态对设备的故障发展趋势进行判断,

可以达到更好的评估效果。

针对设备健康评估, 已有研究基于失效物理模型的方法, 通过采用 Wiener 过程<sup>[4]</sup>、Gauss-Poisson 过程<sup>[5]</sup>和部分可观察马尔科夫过程<sup>[6]</sup>来描述设备劣化过程, 很好地契合了设备性能劣化随时间逐步加速这一特性。由于设备实际运行过程的复杂性, 仅仅依靠物理模型无法准确地求解出设备的健康状态, 需要利用传

收稿日期: 2023-10-30 修回日期: 2023-12-04

第一作者: 叶东, 男, 本科, 高级工程师, 从事地铁供电设备维护与健康管理工作, yedong16@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(52277128)

引用格式: 叶东, 郑杰, 代一平, 等. 计及指标重要度的地铁供电设备健康状态分级评估方法[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(2): 116-123.

YE Dong, ZHENG Jie, DAI Yiping, et al. Health status grading evaluation method of subway power supply equipment considering index importance[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 116-123.

传感器或试验获取的数据来对设备健康状态进行分析,文献[7-8]采用隐马尔可夫模型评估设备的健康状态;文献[9]基于支持向量机拟合设备健康指标,并以此对设备健康状态进行评估;文献[10]根据人工神经网络方法搭建健康评估模型。

考虑到部分情况下无法获取足够的数据用于健康评估,可对设备的历史故障记录进行统计,从而推测出其可靠性,用以衡量设备的健康状态。文献[11-12]采用贝叶斯网络分析方法,搭建出设备故障树分析模型,分析不同故障下设备的健康状态;文献[13]结合模糊统计数学的理论,以量化评价的方法减少了传统健康评估方法的主观性。

对于设备的量化评价,需要给出不同健康状态之间的临界值,文献[14-16]分别给出电力系统、高铁和地铁中设备分数值与健康状态之间的对应关系,从而求解不同实测数据下设备的健康状态。此类研究在获取设备健康状态的过程中虽给出了不同健康状态的临界值,但针对其临界值的定量获取方式,目前鲜有研究。

本文以地铁供电设备作为研究对象,结合已有研究,对能够表征地铁供电设备的状态指标进行整理和归纳,提出层次分析(analytic hierarchy process, AHP)和模糊统计相结合的方法,对指标权重值和设备健康值进行计算,在获取各状态指标权重的基础上,将各状态指标对应的权重转化为百分制进行扣分处理,得到“健康”“亚健康”“预警”和“告警”4种健康状态之间的健康分数临界值,达到实现地铁供电设备健康值范围与健康状态相对应的目的。

## 1 基于AHP-模糊统计的地铁供电设备健康值计算

本文采用层次分析法,通过专家评分的方法获取地铁供电设备各状态指标的初始权重,并利用模糊统计的方法,通过引入模糊隶属度来修正权重,减少认知主观性对健康评估结果的影响,从而获取地铁供电设备各状态指标的综合权重。最后根据状态指标实测值的不同对指标相应分数进行扣分处理,得到地铁供电设备的健康值。

### 1.1 地铁供电设备状态指标权重计算

根据已有文献[17-19],获取能够表征地铁供电设备健康状态的  $n$  个指标。

邀请现场多位专家对  $n$  个状态指标的重要程度进

行两两比较,通过对所有专家的评分结果计算平均值,得到一个  $n \times n$  的成对比较矩阵  $A$ , 有  $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 。

对于矩阵  $A$  中的各元素,有  $a_{ij} > 0$ ,  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ ,  $a_{ii} = 1$ 。将第  $i$  个状态指标和第  $j$  个状态指标的重要程度进行比较。指标  $i$  与指标  $j$  重要程度相同时,  $a_{ij} = 1$ ; 指标  $i$  与指标  $j$  相比稍微重要时,  $a_{ij} = 3$ ; 指标  $i$  与指标  $j$  相比明显重要时,  $a_{ij} = 5$ ; 指标  $i$  与指标  $j$  相比强烈重要时,  $a_{ij} = 7$ ; 指标  $i$  与指标  $j$  相比极端重要时,  $a_{ij} = 9$ 。

对获取的成对比较矩阵  $A$  进行一致性检验。若通过一致性检验,说明矩阵的一致性偏离程度在合理范围内,通过计算矩阵  $A$  最大特征值  $\lambda_{\max}$  所对应的特征向量即可得到地铁供电设备各状态指标的初始权重  $W=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 其中  $\omega_n$  表示第  $n$  个指标的初始权重;若未通过一致性检验,则需重新进行评分,直至得到的矩阵通过一致性检验。

由于专家在对状态指标的重要程度进行比较的过程中,会存在一定的主观性,从而对最终的评价结果产生影响。故需要采用隶属度来确定不同实测值下,各指标所属“健康”“亚健康”“预警”“告警”4种健康状态等级的概率,从而减少主观因素所带来的影响。

结合指标的隶属度函数曲线,计算各个状态指标隶属于“健康”“亚健康”“预警”“告警”4个健康状态的隶属度  $\lambda_i^{(1)}$ 、 $\lambda_i^{(2)}$ 、 $\lambda_i^{(3)}$ 、 $\lambda_i^{(4)}$ ,  $i$  代表各指标对应的序号,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ , 则有  $\lambda_i^{(1)} + \lambda_i^{(2)} + \lambda_i^{(3)} + \lambda_i^{(4)} = 1$ 。

结合文献[17-19]中的规定,获取各状态指标的阈值范围(指标处于正常运行状态下的实测值范围)。根据状态指标阈值的区间范围不同,可以将状态指标划分为成本型指标、效益型指标和限制型指标3类。其中,成本型指标阈值范围存在上限,效益型指标阈值范围存在下限,限制型指标阈值范围同时存在上下限。

考虑到设备未发生故障时,虽然会受到环境等因素的影响,但文献[20-21]指出,设备健康状态与指标实测值  $z$  之间近似成线性变化关系,故在此处以一次函数的形式对状态指标隶属度随实测值的变化情况进行表征。3类状态指标的隶属度函数曲线如图1所示。

1) 成本型指标隶属度函数:成本型指标的阈值范围存在上限,实测值越小越好,其隶属度函数曲线如图1(a)所示。

在图1(a)中,  $a_{i1}$  为状态指标最优临界值,  $b_{i1}$  为状态指标最差临界值,当状态指标实测值小于等于  $a_{i1}$  时,状态指标完全隶属于“健康”状态;当状态指标实测值大于等于  $b_{i1}$  时,状态指标完全隶属于“告警”

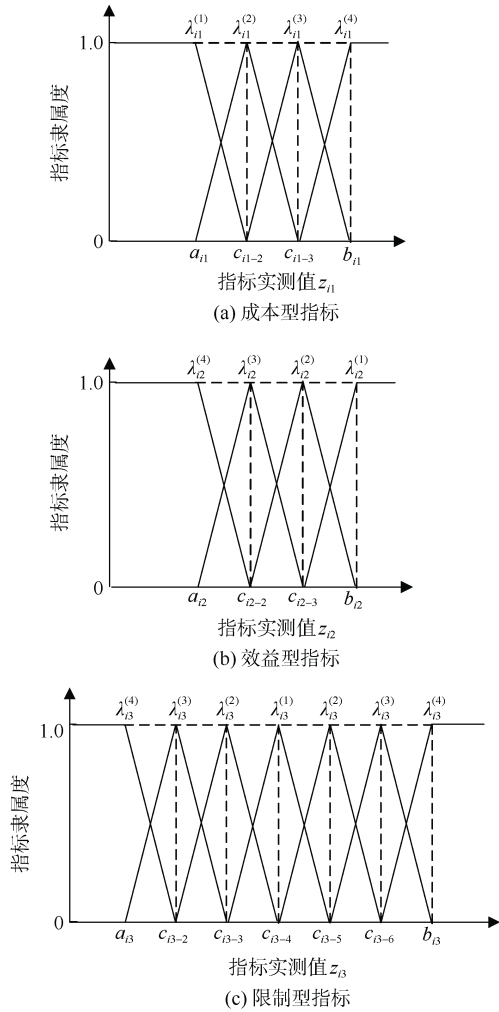


图 1 3 类状态指标的隶属度函数曲线  
Figure 1 Membership function curves of the three-class status indicators

状态。其中， $a_{i1}$  可通过现场人员结合自身经验给出具体数值， $b_{i1}$  可通过查阅文献[20]获取，在  $(a_{i1}, b_{i1})$  内插入  $c_{i1-2}$ ， $c_{i1-3}$  两个点，将其等分为 3 个区间，各区间长度  $d_{i1}=(b_{i1}-a_{i1})/3$ ，代入指标实测值  $z_{i1}$ ，成本型指标的隶属度  $\lambda_{i1}^{(1)}$ 、 $\lambda_{i1}^{(2)}$ 、 $\lambda_{i1}^{(3)}$ 、 $\lambda_{i1}^{(4)}$  计算式分别为

$$\lambda_{i1}^{(1)} = \begin{cases} 1, & z_{i1} < a_{i1} \\ \frac{c_{i1-2} - z_{i1}}{d_{i1}}, & a_{i1} \leq z_{i1} < c_{i1-2} \\ 0, & z_{i1} \geq c_{i1-2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\lambda_{i1}^{(2)} = \begin{cases} 0, & z_{i1} < a_{i1} \\ \frac{z_{i1} - a_{i1}}{d_{i1}}, & a_{i1} \leq z_{i1} < c_{i1-2} \\ \frac{c_{i1-3} - z_{i1}}{d_{i1}}, & c_{i1-2} \leq z_{i1} < c_{i1-3} \\ 0, & z_{i1} \geq c_{i1-3} \end{cases} \quad (2)$$

$$\lambda_{i1}^{(3)} = \begin{cases} 0, & z_{i1} < c_{i1-2} \\ \frac{z_{i1} - c_{i1-2}}{d_{i1}}, & c_{i1-2} \leq z_{i1} < c_{i1-3} \\ \frac{b_{i1} - z_{i1}}{d_{i1}}, & c_{i1-3} \leq z_{i1} < b_{i1} \\ 0, & z_{i1} \geq b_{i1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda_{i1}^{(4)} = \begin{cases} 0, & z_{i1} < c_{i1-3} \\ \frac{z_{i1} - c_{i1-3}}{d_{i1}}, & c_{i1-3} \leq z_{i1} < b_{i1} \\ 1, & z_{i1} \geq b_{i1} \end{cases} \quad (4)$$

2) 效益型指标隶属度函数：效益型指标的阈值范围存在下限，实测值越大越好，其隶属度函数曲线如图 1(b)所示。

在图 1(b)中， $a_{i2}$  为状态指标最差临界值， $b_{i2}$  为状态指标最优临界值，当状态指标实测值小于等于  $a_{i2}$  时，状态指标完全隶属于“告警”状态；当状态指标实测值大于等于  $b_{i2}$  时，状态指标完全隶属于“健康”状态。其中， $a_{i2}$  可通过查阅文献[20]获取， $b_{i2}$  可通过现场人员结合自身经验给出具体数值，在  $(a_{i2}, b_{i2})$  内插入  $c_{i2-2}$ ， $c_{i2-3}$  两个点，将其等分为 3 个区间，各区间长度  $d_{i2}=(b_{i2}-a_{i2})/3$ ，代入指标实测值  $z_{i2}$ ，效益型指标的隶属度  $\lambda_{i2}^{(1)}$ 、 $\lambda_{i2}^{(2)}$ 、 $\lambda_{i2}^{(3)}$ 、 $\lambda_{i2}^{(4)}$  计算式分别为

$$\lambda_{i2}^{(1)} = \begin{cases} 0, & z_{i2} < c_{i2-3} \\ \frac{z_{i2} - c_{i2-3}}{d_{i2}}, & c_{i2-3} \leq z_{i2} < b_{i2} \\ 1, & z_{i2} \geq b_{i2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda_{i2}^{(2)} = \begin{cases} 0, & z_{i2} < c_{i2-2} \\ \frac{z_{i2} - c_{i2-2}}{d_{i2}}, & c_{i2-2} \leq z_{i2} < c_{i2-3} \\ \frac{b_{i2} - z_{i2}}{d_{i2}}, & c_{i2-3} \leq z_{i2} < b_{i2} \\ 0, & z_{i2} \geq b_{i2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda_{i2}^{(3)} = \begin{cases} 0, & z_{i2} < a_{i2} \\ \frac{z_{i2} - a_{i2}}{d_{i2}}, & a_{i2} \leq z_{i2} < c_{i2-2} \\ \frac{c_{i2-3} - z_{i2}}{d_{i2}}, & c_{i2-2} \leq z_{i2} < c_{i2-3} \\ 0, & z_{i2} \geq c_{i2-3} \end{cases} \quad (7)$$

$$\lambda_{i2}^{(4)} = \begin{cases} 1, & z_{i2} < a_{i2} \\ \frac{c_{i2-2} - z_{i2}}{d_{i2}}, & a_{i2} \leq z_{i2} < c_{i2-2} \\ 0, & z_{i2} \geq c_{i2-2} \end{cases} \quad (8)$$

3) 限制型指标隶属度函数: 限制型指标的阈值范围同时存在上下限, 实测值越靠近上下限越差, 其隶属度函数曲线如图 1(c)所示。

在图 1(c)中,  $a_{i3}$ 、 $b_{i3}$  均为状态指标最差临界值, 当状态指标实测值小于等于  $a_{i3}$  或大于等于  $b_{i3}$  时, 状态指标完全隶属于“告警”状态。其中,  $a_{i3}$ 、 $b_{i3}$  均可通过查阅标准或文献获取, 在  $(a_{i3}, b_{i3})$  内插入  $c_{i3-2}$ 、 $c_{i3-3}$ 、 $c_{i3-4}$ 、 $c_{i3-5}$ 、 $c_{i3-6}$  5 个点, 将其等分为 6 个区间, 各区间长度  $d_{i3}=(b_{i3}-a_{i3})/6$ , 代入指标实测值  $z_{i3}$ , 限制型指标的隶属度  $\lambda_{i3}^{(1)}$ 、 $\lambda_{i3}^{(2)}$ 、 $\lambda_{i3}^{(3)}$ 、 $\lambda_{i3}^{(4)}$  的计算式分别为

$$\lambda_{i3}^{(1)} = \begin{cases} 0, & z_{i3} < c_{i3-3} \\ \frac{z_{i3} - c_{i3-3}}{d_{i3}}, & c_{i3-3} \leq z_{i3} < c_{i3-4} \\ \frac{c_{i3-3} - z_{i3}}{d_{i3}}, & c_{i3-4} \leq z_{i3} < c_{i3-5} \\ 0, & z_{i3} \geq c_{i3-5} \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda_{i3}^{(2)} = \begin{cases} 0, & z_{i3} < c_{i3-2} \\ \frac{z_{i3} - c_{i3-2}}{d_{i3}}, & c_{i3-2} \leq z_{i3} < c_{i3-3} \\ \frac{c_{i3-4} - z_{i3}}{d_{i3}}, & c_{i3-3} \leq z_{i3} < c_{i3-4} \\ \frac{z_{i3} - c_{i3-4}}{d_{i3}}, & c_{i3-4} \leq z_{i3} < c_{i3-5} \\ \frac{c_{i3-6} - z_{i3}}{d_{i3}}, & c_{i3-5} \leq z_{i3} < c_{i3-6} \\ 0, & z_{i3} \geq c_{i3-6} \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda_{i3}^{(3)} = \begin{cases} 0, & z_{i3} < a_{i3} \\ \frac{z_{i3} - a_{i3}}{d_{i3}}, & a_{i3} \leq z_{i3} < c_{i3-2} \\ \frac{c_{i3-3} - z_{i3}}{d_{i3}}, & c_{i3-2} \leq z_{i3} < c_{i3-3} \\ 0, & c_{i3-3} \leq z_{i3} < c_{i3-5} \\ \frac{z_{i3} - c_{i3-5}}{d_{i3}}, & c_{i3-5} \leq z_{i3} < c_{i3-6} \\ \frac{b_{i3} - z_{i3}}{d_{i3}}, & c_{i3-6} \leq z_{i3} < b_{i3} \\ 0, & z_{i3} \geq b_{i3} \end{cases} \quad (11)$$

$$\lambda_{i3}^{(4)} = \begin{cases} 1, & z_{i3} < a_{i3} \\ \frac{c_{i3-2} - z_{i3}}{d_{i3}}, & a_{i3} \leq z_{i3} < c_{i3-2} \\ 0, & c_{i3-2} \leq z_{i3} < c_{i3-6} \\ \frac{z_{i3} - c_{i3-6}}{d_{i3}}, & c_{i3-6} \leq z_{i3} < b_{i3} \\ 1, & z_{i3} > b_{i3} \end{cases} \quad (12)$$

对于任意状态指标  $i$ , 根据式(1)~式(12), 通过输入其实测值  $z_{ik}(k=1, 2, 3)$ , 即可得到状态指标反映的设备状态分别隶属于“健康”“亚健康”“预警”“告警”4 个等级的隶属度  $\lambda_{ik}^{(1)}$ 、 $\lambda_{ik}^{(2)}$ 、 $\lambda_{ik}^{(3)}$ 、 $\lambda_{ik}^{(4)}(k=1, 2, 3)$ ; 同时以数值最大的隶属度作为状态指标权重系数的修正值  $e_i$ 。

对计算得到各状态指标修正值  $e_1, e_2, \dots, e_n$  进行归一化处理, 可得到状态指标的修正系数  $\alpha_i$  为

$$\alpha_i = \frac{1/e_i}{\sum_{i=1}^n 1/e_i} \quad (13)$$

结合各状态指标的修正系数  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  和专家评分得到的状态指标初始权重  $\mathbf{W}=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ , 求解得到各状态指标的综合权重  $\mathbf{B}=(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)^{[22]}$ 。其中,  $\beta_i$  为各指标所对应的综合权重,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ ,  $\beta_i$  的计算式为

$$\beta_i = \frac{\alpha_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \omega_i} \quad (14)$$

## 1.2 地铁供电设备健康值求解

在计算地铁供电设备健康值的过程中, 采取对各状态指标进行扣分的方法, 通过将各状态指标所扣分数进行累加得到所扣除的总分, 最终求解出地铁供电设备的健康值分数。

为了计算不同指标实测值下各指标所扣除的分数, 引入各指标的状态扣分值  $t_i$  来反映不同实测值下各状态指标的扣分情况, 在地铁供电设备健康值求解过程中, 将状态扣分值  $t_i$  与综合权重  $\mathbf{B}$  相结合, 计算各状态指标的扣分值, 进而获取不同实测值下地铁供电设备的健康值。

基于 1.1 中求解得到的各状态指标的隶属度, 根据不同求解结果得到相应的指标状态扣分值, 具体步骤如下:

1) 当状态指标完全隶属于“健康”或“亚健康”时, 认为处于该实测值下的指标不会对设备运行造成负面影响, 此时对该状态指标不予以扣分, 对应的状态扣分值  $t_i$  为 0;

2) 当状态指标完全隶属于“亚健康”或“预警”时, 认为处于该实测值下的指标会对设备运行造成一定的负面影响, 此时对该状态指标扣除一定的分值, 由于该情况下“预警”的隶属度与指标所造成的负面影响呈正相关关系, 故此时对应的状态扣分值  $t_i$  为“预警”的隶属度  $\lambda_i^{(3)}$ ;

3) 当状态指标完全隶属于“预警”或“告警”时,认为处于该实测值下的指标会对设备运行造成较大的负面影响,此时对该状态指标扣除全部的分值,对应的状态扣分值  $t_i$  为 1;

在不同隶属度计算结果下,对应的状态扣分值具体如表 1 所示。表 1 中,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为  $[0, 1]$  的常数,满足  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

表 1 指标隶属度情况与指标状态扣分值之间的对应关系  
Table 1 Corresponding relationship between the index membership degree and the index state deduction score

隶属度				指标对应的 状态扣分值 $t_i$
$\lambda_i^{(1)}$	$\lambda_i^{(2)}$	$\lambda_i^{(3)}$	$\lambda_i^{(4)}$	
1	0	0	0	0
$\lambda_1$	$\lambda_2$	0	0	0
0	1	0	0	0
0	$\lambda_1$	$\lambda_2$	0	$\lambda_2$
0	0	1	0	1
0	0	$\lambda_1$	$\lambda_2$	1
0	0	0	1	1

根据表 1 得到的各指标状态扣分值  $t_i$  的结果,将其与综合权重  $B$  相结合进行扣分处理,求解出地铁供电设备的健康值  $H$  为

$$H = 100 \left( 1 - \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot t_i \right) \quad (15)$$

## 2 地铁供电设备健康状态分级评估

为了将计算得到的地铁供电设备健康值与“健康”“亚健康”“预警”“告警”4 种健康状态相对应,需要计算出 4 种健康状态之间的健康分数临界值。本文将指标重要度考虑在内,通过扣除不同个数的状态指标所对应的分数值来与不同健康状态之间的临界值相对应,实现地铁供电设备健康状态的分级评估。

首先,通过输入地铁供电设备的所有状态指标实测值  $z_1, z_2, \dots, z_n$ ,判断是否存在指标超出阈值范围。若存在,说明此时需要及时对该指标所对应的设备零部件进行更换,故认为设备处于“告警”状态;若不存在,说明此时所有状态指标均未超出最差临界值,故此时需要根据计算得到的健康值  $H$  来判断设备处于何种健康状态,具体方法如下:

1) 将所有状态指标根据初始权重大小  $W=(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$  由低到高进行排序,得到排序后的初始权重集  $Q=(q_1, q_2, \dots, q_n)$ ;

2) 考虑到设备健康状态分级评估过程中,需要求解出 3 个临界值,即“健康”与“亚健康”之间的临界值  $H_1$ 、“亚健康”与“预警”之间的临界值  $H_2$ 、“预警”与“告警”之间的临界值  $H_3$ 。当健康值为  $[H_1, 100]$  时,设备的健康状态为“健康”;当健康值为  $[H_2, H_1)$  时,设备的健康状态为“亚健康”;当健康值为  $[H_3, H_2)$  时,设备的健康状态为“预警”;当健康值为  $[0, H_3)$  时,设备的健康状态为“告警”。将所有状态指标等分为 4 部分,分别选取状态指标初始权重集  $Q$  中排序前四分之一对应的指标集  $I_a=(I_1, I_2, \dots, I_{n/4})$ 、初始权重排序前二分之一对应的指标集  $I_b=(I_1, I_2, \dots, I_{n/2})$ 、初始权重排序前四分之三对应的指标集  $I_c=(I_1, I_2, \dots, I_{3n/4})$ ,若所需取得的指标个数为小数,则向下取整;

3) 计算各健康状态之间临界值。

① “健康”与“亚健康”之间的临界值  $H_1$ 。由于处于“健康”与“亚健康”之间的设备健康值较高,扣分量最少,此时扣除  $I_a$  中所有状态指标所对应的分数,即

$$H_1 = 100 \left( 1 - \sum_{i=1}^{\frac{n}{4}} \omega_i \cdot 1 \right) \quad (16)$$

② “亚健康”与“预警”之间的临界值  $H_2$ 。由于处于“亚健康”与“预警”之间的设备健康值中等,扣分量居中,此时扣除  $I_b$  中所有状态指标所对应的分数,即

$$H_2 = 100 \left( 1 - \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \omega_i \cdot 1 \right) \quad (17)$$

③ “预警”与“告警”之间的临界值  $H_3$ 。由于处于“预警”与“告警”之间的设备健康值较低,扣分量最多,此时扣除  $I_c$  中所有状态指标所对应的分数,即

$$H_3 = 100 \left( 1 - \sum_{i=1}^{\frac{3n}{4}} \omega_i \cdot 1 \right) \quad (18)$$

地铁供电设备健康状态分级评估流程如图 2 所示。

## 3 案例分析

对某市地铁线路 3 个工区的 12 个干式变压器进行调研,获取相间绕组直流电阻不平衡度  $I_1$ 、线间绕组直流电阻不平衡度  $I_2$ 、绕组绝缘电阻  $I_3$ 、吸收比  $I_4$ 、

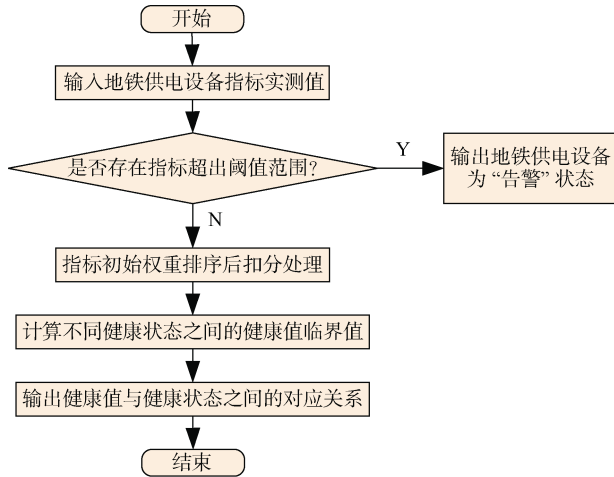


图2 地铁供电设备健康状态分级评估流程  
Figure 2 Health status grading evaluation process of subway power supply equipment

绕组温升  $I_5$ 、进线总谐波电压  $I_6$ 、局部放电量  $I_7$ 、铂电阻阻值偏差  $I_8$  共 8 个能够表征干式变压器健康状态的指标，确定以上 8 个指标的阈值范围，并按照指标的类型不同进行分类，具体如表 2 所示。

表 2 干式变压器状态指标

Table 2 Dry-type transformer state index table

健康度指标	指标阈值	所定义指标下限	指标上限	指标类型
$I_1$	$\leq 2\%$	0.2%	2%	成本型
$I_2$	$\leq 1\%$	0.1%	1%	成本型
$I_3$	$\geq 70\%$	70%	100%	效益型
$I_4$	$\geq 1.3$	1.3	2.2	效益型
$I_5$	$\leq 100$	65	100	成本型
$I_6$	$\leq 5\%$	0.5%	5%	成本型
$I_7$	$\leq 10\text{pC}$	1pC	10pC	成本型
$I_8$	$-2\% \sim 2\%$	-2%	2%	限制型

针对干式变压器状态指标表，求解不同指标实测数据下的干式变压器的健康状态，具体步骤如下：

1) 初始权重求解。现场 27 位专家根据 1.1 中的原则对  $I_1, I_2, \dots, I_8$  等 8 个状态指标的重要程度进行两两比较，对获取的评价结果求平均值，得到成对比较矩阵为：

$$A_{T_1} = \begin{pmatrix} 1 & 0.82 & 0.40 & 0.33 & 0.35 & 0.20 & 0.41 & 0.24 \\ 1.22 & 1 & 0.48 & 0.28 & 0.34 & 0.19 & 0.47 & 0.25 \\ 2.48 & 2.09 & 1 & 0.43 & 0.44 & 0.25 & 0.89 & 0.32 \\ 3.02 & 3.54 & 2.32 & 1 & 0.47 & 0.29 & 3 & 0.42 \\ 2.89 & 2.98 & 2.29 & 2.12 & 1 & 0.43 & 4 & 0.44 \\ 5.07 & 5.13 & 4.06 & 3.46 & 2.32 & 1 & 4.35 & 1.96 \\ 2.43 & 2.12 & 1.13 & 0.33 & 0.25 & 0.23 & 1 & 0.33 \\ 4.11 & 4.03 & 3.13 & 2.36 & 2.29 & 0.51 & 3.01 & 1 \end{pmatrix}$$

经计算，求解得到的成对比较矩阵通过一致性检验。求解得其最大特征值对应的特征向量即为该设备的初始权重，即有  $W_{T_1} = (0.0401, 0.0422, 0.0693, 0.1197, 0.1554, 0.2971, 0.0658, 0.2104)$ 。

2) 健康值与健康状态对应关系求解。通过对  $W_{T_1}$  中的各状态指标初始权重大小进行排序，结合式(16)~式(18)计算得到不同健康状态之间的健康值临界值： $H_1=100(1-0.0401-0.0422)=91.77$ ， $H_2=100(1-0.0401-0.0422-0.0658-0.0693)=78.26$ ， $H_3=100(1-0.0401-0.0422-0.0658-0.0693-0.1197-0.1554)=50.75$ 。

因此，当健康值为[91.77, 100]时，设备的健康状态为“健康”；当健康值为[78.26, 91.77)时，设备的健康状态为“亚健康”；当健康值为[50.75, 78.26)时，设备的健康状态为“预警”；当健康值为[0, 50.75)时，设备的健康状态为“告警”。

3) 不同实测数据下设备健康值计算。代入两次干式变压器实测值结果，分别计算两次实测值下的干式变压器状态指标综合权重和指标状态扣分值，具体如表 3 所示。

表 3 两次实测值下干式变压器的综合权重

Table 3 Comprehensive weight of the dry-type transformer under two measured values

状态指标	第 1 次实测结果			第 2 次实测结果		
	实测值	综合权重	指标状态扣分值	实测值	综合权重	指标状态扣分值
$I_1$	1.5%	0.0360	1	1.65%	0.0423	1
$I_2$	0.4%	0.0316	0	0.5%	0.0390	0.3333
$I_3$	95%	0.1040	0	88%	0.0534	0.2000
$I_4$	1.95	0.1077	0	1.77	0.1301	0.4333
$I_5$	75	0.1360	0	80	0.1341	0.2857
$I_6$	2.1%	0.2387	0.0667	1.2%	0.3432	0
$I_7$	1.5pC	0.0592	0	1.1pC	0.0419	0
$I_8$	0.3%	0.2868	0	0.4%	0.2160	0

根据式(15)分别计算两次实测值下的干式变压器健康值  $H_{T_{-1}}$  和  $H_{T_{-2}}$ 。其中  $H_{T_{-1}}=100 \times (1-0.0360 \times 1-0.2387 \times 0.0667)=94.80$ ， $H_{T_{-2}}=100 \times (1-0.0423 \times 1-0.0390 \times 0.3333-0.0534 \times 0.2000-0.1301 \times 0.4333-0.1341 \times 0.2857)=83.93$ 。

4) 健康状态分析。由表 3 可知，第 1 次实测结果下的干式变压器处于“健康”状态，第 2 次实测结果下的干式变压器处于“亚健康”状态。经现场验证，

计算得到的地铁供电设备健康状态与实际情况相符合,对后续地铁供电设备采取状态维修工作具有一定的指导意义。

## 4 结论

本文基于地铁供电设备的状态指标实测结果,通过层次分析和模糊统计相结合的方法计算健康值,并将指标重要度这一因素考虑在内,对设备健康状态求解问题进行了研究,结果表明:

1) 提出不同健康状态之间的健康值临界值计算方法,确保求解得到的地铁供电设备健康值能够与“健康”、“亚健康”、“预警”、“告警”4种健康状态相匹配。

2) 通过求解得到地铁供电设备的健康状态,能够准确地与所制定的维修方案相对应,对于后续现场针对地铁供电设备展开状态维修具有一定的指导意义。

针对调研标准和文献获取的状态指标,尚未将数据之间的关联性考虑在内,后续可结合设备相关实时数据、故障工单、维修记录等,充分融合数据之间的关联信息,研究考虑数据耦合关系的地铁供电设备健康评估方法,确保最终获取的结果更符合现场实际情况。

## 参考文献

- [1] 赵渊, 张煦, 杨清. 基于可靠性成本/效益分析的电网计划检修周期优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 54-60. ZHAO Yuan, ZHANG Xu, YANG Qing. Optimal preventive maintenance cycle based on reliability cost-benefit analysis[J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(20): 54-60.
- [2] 赵洪山, 张路朋. 基于可靠度的风电机组预防性机会维修策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3777-3783. ZHAO Hongshan, ZHANG Lupeng. Preventive opportunistic maintenance strategy for wind turbines based on reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3777-3783.
- [3] 陈绍宽, 彭宏勤, 毛保华, 等. 基于费用最小的铁路牵引变电所维修计划优化模型[J]. 铁道学报, 2011, 33(8): 39-44. CHEN Shaokuan, PENG Hongqin, MAO Baohua, et al. Optimization model of least-cost-based maintenance schedules for railway traction substations[J]. Journal of the China railway society, 2011, 33(8): 39-44.
- [4] 林圣, 李楠, 杨超, 等. 基于可线性化 Wiener 过程的牵引供电设备状态检修决策研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(4): 51-59. LIN Sheng, LI Nan, YANG Chao, et al. Condition-based maintenance strategy research for traction power supply equipment based on available linearized Wiener process[J]. Journal of the China railway society, 2021, 43(4): 51-59.
- [5] 张奥, 林圣, 冯玓, 等. 基于马尔可夫过程的牵引供电设备维修决策模型及其应用[J]. 铁道学报, 2017, 39(11): 38-45. ZHANG Ao, LIN Sheng, FENG Ding, et al. Maintenance decision-making model based on Markov process for traction power supply equipment and its application[J]. Journal of the China railway society, 2017, 39(11): 38-45.
- [6] LIN S, FAN R D, FENG D, et al. Condition-based maintenance for traction power supply equipment based on partially observable Markov decision process[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(1): 175-189.
- [7] ZHOU Y Q, HUANG J X, ZHOU L, et al. Reliability evaluation method of PMFSM system based on hidden Markov[J]. International journal of applied electromagnetics and mechanics, 2022, 70(3): 229-251.
- [8] TOBON-MEJIA D A, MEDJAHER K, ZERHOUNI N, et al. A data-driven failure prognostics method based on mixture of Gaussians hidden Markov models[J]. IEEE transactions on reliability, 2012, 61(2): 491-503.
- [9] 李弘扬, 董鹏, 李蕴哲. 基于支持向量机的发动机健康状态评估[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(5): 158-163. LI Hongyang, DONG Peng, LI Yunzhe. Engine health status assessment based on SVM[J]. Ship electronic engineering, 2023, 43(5): 158-163.
- [10] 孙思齐. 面向安全大数据应用的车辆设备健康状态评估及预测研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019. SUN Siqi. Health condition assessment and prediction of vehicle equipment for the safety big data application[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019.
- [11] 谢晨娟. 计及天气因素的接触网可靠性评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2018. XIE Chenjuan. Operation reliability assessment of catenary with weather[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [12] 王宇, 师蔚. 基于故障树-贝叶斯网络的受电弓系统可靠性评估[J]. 测控技术, 2017, 36(9): 131-134, 141. WANG Yu, SHI Wei. Reliability evaluation of pantograph system based on fault tree-bayesian network[J]. Measurement & control technology, 2017, 36(9): 131-134.
- [13] ZHAO Z Y, QUAN Q, CAI K Y. A profust reliability based approach to prognostics and health management[J]. IEEE transactions on reliability, 2014, 63(1): 26-41.
- [14] 杨杰明, 董玉坤, 曲朝阳, 等. 基于区间权重和改进云模型的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 102-109. YANG Jieming, DONG Yukun, QU Zhaoyang, et al. Condition assessment for transformer based on interval weight and improved cloud model[J]. Power system protection and control, 2016, 44(23): 102-109.
- [15] 张凤霞, 米根锁. 基于健康指数的轨道电路设备寿命预测方法的研究[J]. 铁道学报, 2015, 37(12): 61-66. ZHANG Fengxia, MI Gensuo. Research on life prediction methods for track circuit equipment based on health index[J]. Journal of the China railway society, 2015, 37(12): 61-66.
- [16] 许玉海, 乔渊玮, 张梓鸿, 等. 基于模糊综合评价模型

- 的地铁盾构隧道结构健康状态评价[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(10): 17-22.
- XU Yuhai, QIAO Yuanwei, ZHANG Zihong, et al. Health status evaluation of metro shield tunnel structure based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Urban mass transit, 2023, 26(10): 17-22.
- [17] 纪锡海. 变压器油中溶解气体色谱分析与故障诊断[J]. 科技促进发展, 2010(增刊 1): 105.
- Ji Xihai. Chromatographic analysis and fault diagnosis of dissolved gas in transformer oil[J]. Science & technology for development, 2010(S1): 105.
- [18] 李志慧. 地铁供电系统中 OVPD 的主要参数分析[J]. 电气化铁道, 2016, (1): 38-41.
- LI Zhihui. Analysis of Main Parameters of OVPD in Subway Power Supply System[J]. Electric railway, 2016, (1): 38-41.
- [19] 白梁军, 黄萌, 饶臻, 潘尚智, 查晓明, 刘国友. 基于 GARCH 模型的 IGBT 寿命预测[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5787-5796.
- BAI Liangjun, HUANG Meng, RAO Zhen, et al. Lifetime prediction of IGBT based on GARCH model[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5787-5796.
- [20] WANG Q, LIN S, LI T, et al. Intelligent proactive maintenance system for high-speed railway traction power supply system[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2020, 16(11): 6729-6739.
- [21] 石宜金, 谭贵生, 赵波, 等. 基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 167-176.
- SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion[J]. Power system protection and control, 2022, 50(21): 167-176.
- [22] 王玘. 基于健康状态的高速铁路牵引供电系统主动维护策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- WANG Qi. Study on proactive maintenance strategy for high-speed railway traction power supply system based on health status[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

(编辑: 王艳菊)

(上接第 106 页)

- [7] 张钦喜, 闫金波, 王成名, 等. 悬挂式止水帷幕室内模型试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(11): 1640-1645.
- ZHANG Qinxi, YAN Jinbo, WANG Chengming, et al. Study on indoor model test of suspended water curtain[J]. Journal of Northeastern University (natural science), 2020, 41(11): 1640-1645.
- [8] XU Yeshuang, SHEN Shuilong, MA Lei, et al. Evaluation of the blocking effect of retaining walls on groundwater seepage in aquifers with different insertion depths[J]. Engineering geology, 2014, 183: 254-264.
- [9] 欧雪峰, 张学民, 刘学勤, 等. 基坑开挖与降水引起下卧隧道变形的解析计算方法[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 147-154.
- OU Xuefeng, ZHANG Xuemin, LIU Xueqin, et al. Analytic calculation method of underlying tunnel deformation caused by excavation and dewatering of upper pit[J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(3): 147-154.
- [10] 任印文. 基坑开挖诱发地铁隧道变化的模型试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
- REN Yinwen. Model Test Study on the Change of Subway Tunnel Induced by Excavation[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2021.
- [11] 陈凌铜, 朱丹, 杨超, 等. 隔水帷幕对深基坑降水开挖变形控制的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(4): 24-32.
- CHEN Lingtong, ZHU Dan, YANG Chao, et al. Influence of waterproof curtain on deformation control of deep foundation pit dewatering and excavation[J]. Journal of civil and environmental engineering, 2021, 43(4): 24-32.
- [12] 周守强, 汪鹏程, 王景. 潜水地区深基坑降水开挖对下卧隧道影响分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(3): 356-361.
- ZHOU Shouqiang, WANG Pengcheng, WANG Jing. Analysis of the effect of dewatering excavation of deep foundation pit in phreatic aquifer on underlying tunnel[J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2022, 45(3): 356-361.
- [13] 黄春晖, 李春剑, 任磊. 人工湖积水对下方地铁盾构区间结构变形影响分析[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 125-132.
- HUANG Chunhui, LI Chunjian, REN Lei. Influence of artificial lake water on the structural deformation of the subway shield section below the lake[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 125-132.
- [14] Cashman P M P M. Groundwater lowering in construction: a practical guide to dewatering[M]. 2016.
- [15] 郑刚, 邓旭, 刘庆晨. 承压含水层减压降水对既有盾构隧道影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 178-188.
- ZHENG Gang, DENG Xu, LIU Qingchen. Analysis of responses of existing shield tunnel to pressure-relief in confined aquifer[J]. Rock and soil mechanics, 2015, 36(1): 178-188.

(编辑: 傅依萱)