

基于层次分析法与熵权法的城市轨道交通 牵引变压器健康状态评估

张明锐¹ 段宏伟¹ 徐 杰² 徐维甲²

(1. 同济大学电子与信息工程学院, 201804, 上海; 2. 上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海)

摘 要 [目的] 对牵引供电设备的健康状态进行评估, 以便为该设备运营、维修及保养提供参考。[方法] 基于层次分析法和熵权法建立了城市轨道交通牵引变压器健康状态评估模型。基于牵引变压器运行指标数据构建其健康状态评估层次结构, 运用层次分析法通过专家判断矩阵计算评估指标的主观权重, 利用熵权法求解试验指标的权重并将其与主观权重组合。依据评估指标计算牵引变压器健康状态得分, 确定其整体健康状态, 以此进行剩余寿命预测, 并评估不同检修方式对牵引变压器使用寿命的影响。以某牵引变电站牵引变压器的监测数据为例, 对该牵引变压器健康状态进行了评估。[结果及结论] 通过实例验证了所提牵引变压器健康状态评估方法的有效性。该评估方法实现了设备状态检测主客观因素的统一, 能够推广应用至其他城市轨道交通直流供电设备健康状态评估中。

关键词 城市轨道交通; 牵引变压器; 健康状态评估; 层次分析法; 熵权法

中图分类号 U264.3⁺6

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2025.01.025

Health Status Evaluation of Urban Rail Transit Traction Transformers Based on Analytic Hierarchy Process and Entropy Weight Method

ZHANG Mingrui¹, DUAN Hongwei¹, XU jie², XU Weijia²

(1. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China)

Abstract [Objective] The purpose of health status evaluation of the traction power supply equipment is to provide references for the operation, repair and maintenance of this equipment in urban rail transit. [Method] A health status evaluation model for urban rail transit traction transformer is established based on AHP (analytic hierarchy process) and EWM (entropy weight method). The hierarchical structure for evaluating the health status of the traction transformer is constructed

based on the operation indicator data of the traction transformer. The subjective weights of the evaluation indicators are calculated by using AHP through the expert judgment matrix, and the weights of the test indicators are solved by using EWM and then combined with the subjective weights. The health status score of the traction transformer is calculated according to the evaluation indicators to determine its overall health status, thereby predict its remaining service life and evaluate the impact of different maintenance methods on the service life. With the monitoring data of the traction transformer in a certain traction substation as an example, the health status of the traction transformer is evaluated. [Result & Conclusion] The effectiveness of the proposed health status evaluation method for traction transformer is verified through examples. The evaluation method realizes unification of the subjective and objective factors of equipment status detection, and can be popularized and applied to the health status evaluation of other urban rail transit DC power supply equipment.

Key words urban rail transit; traction transformer; health status evaluation; AHP; EWM

牵引变电站是整个城市轨道交通牵引供电系统的核心, 随着城市轨道交通运行规模的扩大和运行年限的增加, 供电设备健康状态评估的需求越来越大。以评估结果为指导, 对设备进行合理的检修和保养, 是未来城市轨道交通供电系统设备智慧维保的基本需求。

当前国内外学者提出了大量的设备可靠性评价和状态评估方法。文献[1]采用加权灰靶理论, 通过计算牵引变压器运行状态与标准状态的靶心度来实现健康状态的分级评估。文献[2]在采用层次分析法构建设备健康状态评估模型的基础上, 引入模糊隶属度修正权重来消除主观差异性的影响。文献[3]采用可拓云模型对设备健康状态进行等级划分, 并利用反馈神经网络算法调整动态权重, 从而降低等级划分的不确定程度。此外, 目前评估牵

引变压器状态的方法还有粗糙集^[4]、马尔可夫过程^[5]、健康指数^[6]及模糊层次分析法^[7]等。

本文综合考虑牵引供电设备中牵引变压器的工作状态,提出了一种层次分析法结合熵权法改良权重的健康状态评估方法,通过计算设备健康状态得分,拟合寿命函数,从而实现了较为准确的设备寿命预测,便于维保策略的提出。

1 牵引变压器健康状态评估方法

1.1 层次分析法

层次分析法作为一种定性与定量相结合的决策分析方法,在处理复杂系统和拥有大量指标的问题中有着良好表现。该方法将复杂的决策问题分解为若干层次进行简化,其核心思想是:考虑所要达到的目标,对目前所拥有的指标按照关系进行分层,构成递阶层次。对处于同一层次的指标进行两两相互比较,以确定不同指标的权重。对于该类指标下层的元素而言,既要考虑上层元素权重对其影响,亦要考虑本层元素两两比较而得出的权重分配。对各类指标进行层层计算,直到最后一层,从而得到不同层次、不同指标的权重值,进而计算出设备的健康状态^[8]。

在牵引变压器健康状态评估中,层次分析法的使用步骤如下:①确定健康状态评估指标,分析指标间的关系,从而建立系统的分层结构模型;②两两判断同层指标的重要度,建立专家判断矩阵。其指标权重的相关计算公式参见文献[2]。

1.2 熵权法

熵权法通过计算指标的信息熵,利用指标的差值程度来衡量数据中包含的有效信息和指标权重。其核心思想是利用指标的变异性大小来确定客观权重。某个指标的信息熵越小,表明其变异性程度越大,提供的信息量越多,则其在综合评价中起到的作用越大,其权重就越大^[8]。在牵引变压器状态评估中,对于试验指标数据可通过熵权法计算其客观权重,并与层次分析法求得的主观权重相结合。

根据评估指标性质的不同,可分为定量型和定性型指标。定量型指标是通过历史数据或试验数据等得到具有参考意义的数据值,而定性型指标不能简单通过一个数据描述。以牵引变压器健康评估为例,变压器运行试验参数项目层中的铁心接地电流、吸收比等均为定量型参数,而运行环境项目层中的污染度等为定性型参数,为此需要进行不同

处理。

对于定性型指标,采用减分原则进行隶属度的评取:即初始隶属度为1,健康得分为100分,当发生评估标准标明的情况时,根据次数和严重程度进行扣分处理。对于处理后的定性指标得分可参照定量型指标进行量纲一化处理。对于定量型指标,采用梯形模糊分布来求取隶属度,将试验测定的数据转化为一个量纲一的数 $A(x)$ 。其中 $A(x)$ 为0~1的值, $A(x)$ 越大,表明该指标越健康。

对于运行试验参数,除了运用专家判断矩阵对各个指标进行权重计算,得到主观权重 w_a 外,还可以采用文献[8]所示熵权法计算公式得到客观权重 w_b ,并结合式(1)求得组合权重 w 。

$$w = aw_a + bw_b \quad (1)$$

式中:

w ——改善后的组合权重;

a 、 b ——权重系数。考虑到实际健康评估中,专家经验对于设备的健康评估更具有影响力,取 $a = 0.7$, $b = 0.3$ 。

1.3 剩余寿命计算

有关电力设备的健康状态老化经验公式为:

$$H = H_0 e^{B(t_1 - t)} \quad (2)$$

式中:

H ——电力设备当前健康状态值;

H_0 ——电力设备初始健康状态值;

B ——电力设备老化系数;

t_1 ——电力设备设计使用寿命;

t ——电力设备投运时间。

对于牵引变压器,常用式(3)依据设备健康状态计算剩余寿命:

$$1 - H_t = (1 - H_0) e^{Bt} \quad (3)$$

式中:

H_t ——评估时的健康状态值。

在计算剩余寿命时,根据老化系数和健康状态值,可以计算牵引变压器的剩余寿命 t_0 :

$$t_0 = \frac{\ln(1 - H_t) - \ln(1 - H_0)}{B} \quad (4)$$

式中:

H_t ——退役时的健康状态值。

但上述方法进行评评估存在一定局限性,式(4)中的 B 是通过定义 H_0 、 H_t 和 t_1 求得的。其计算公式为:

$$B = \frac{\ln(1 - H_t) - \ln(1 - H_0)}{t_1} \quad (5)$$

对于同一类设备,由于设计年限等参数相同, B 相同,各设备的老化曲线完全相同。然而实际过程中具体设备由于运行环境、运行工况不同,其老化曲线也会有所区别,因此运用上述方法求解剩余寿命缺乏实际意义。鉴于此,将式(3)改为:

$$H_j = 1 - (1 - H_0)e^{Bt} \quad (6)$$

式中:

H_j ——基本参数中静态履历健康状态值。

将剩余寿命公式改为设备的一个评估指标,优点在于能够反映同类型设备健康度随运行时间变化的情况,一定程度上体现出设备的健康水平。

而对于设备的剩余寿命计算,通过建立设备的健康状态值和运行年限的集合,对健康状态值与运行年限依据式(7)进行拟合。

$$H_i = d - fe^{ct} \quad (7)$$

式中:

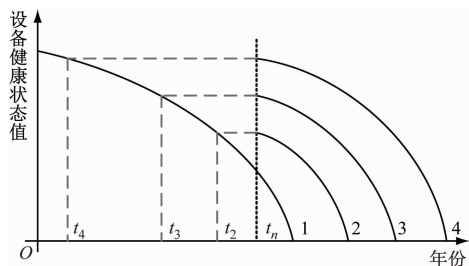
d, f, c ——待拟合参数;

H_i ——第 i 年设备健康状态值。

通过所建立的设备寿命模型,可以合理地求解设备剩余寿命并制定相关维修、保养策略,从而保障牵引供电设备健康稳定运行。

1.4 检修方式对牵引变压器健康状态的影响

对于一个正常使用且无故障情况发生的牵引变压器,其健康状态曲线如图 1 所示。



注: t_2, t_3, t_4, t_n 为当前设备健康状态值对应的设备运行年限; 1—设备继续运行; 2—设备小修; 3—设备大修; 4—设备更换。

图 1 设备健康状态值与运行年限关系拟合曲线

Fig. 1 Fitting curve of the relationship between equipment health status value and operating years

在实际使用过程中,对于长期使用的设备,通常采用大修、小修、更换等三种检修方式来进行维护。在电气设备的检修工作中:大修是对设备进行较全面的检查、清扫和修理,其间隔时间较长;小修是消除设备在运行中发现的缺陷,并重点检查易磨损部件,对其进行必要的处理或进行必要的清扫和

试验,其间隔时间较短;更换是直接对设备可能存在磨损的相关器件进行换新,其间隔时间长于大修所需的时间。

经过检修后的设备,其故障率通常会大幅度降低,设备健康状态值与相关联的设备运行年限也有所增长。图 1 给出了设备健康状态值与运行年限关系拟合曲线。假设供电设备运行到 t_n 时刻,需要对供电设备进行维护,采用继续运行、大修、小修及更换等四种检修方式,不同检修方式对供电设备的健康状态影响不同。

目前,大多数研究在评估可修复设备或系统的役龄时,运用了固定的役龄回退因子,忽略了设备的实际役龄和检修对设备状态的影响,甚至产生了检修疲劳的现象。

针对设备健康状态检修前后的差异,为更准确地评估设备健康状况,基于已有的役龄回退模型,结合生产实践过程中实际检修效果,建立检修后设备健康状态模型如下:

$$H_n = H + \frac{1 - H_i}{1 + (K_i J)^{\frac{1}{n}}} \quad (8)$$

式中:

K_i ——检修因子,小修时, $K_1 = 0.8$;大修时, $K_2 = 0.5$;更换时, $K_3 = 0.2$;

J ——检修水平;

H_n ——第 n 次检修后设备健康状态值。

1.5 牵引变压器健康状态评估流程

采用层次分析法与熵权法的牵引变压器健康状态评估流程如图 2 所示。

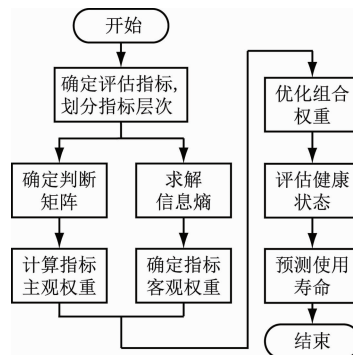


图 2 牵引变压器健康状态评估流程

Fig. 2 Flow chart of traction transformer health status evaluation

首先,基于 GB/T 10228—2015《干式电力变压器技术参数和要求》、GB/T 1094.3—2017《电力变

压器第3部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙》与相关专家建议,结合实际监测指标数据,选择牵引变压器相关指标并建立其层次结构,如图3所示。

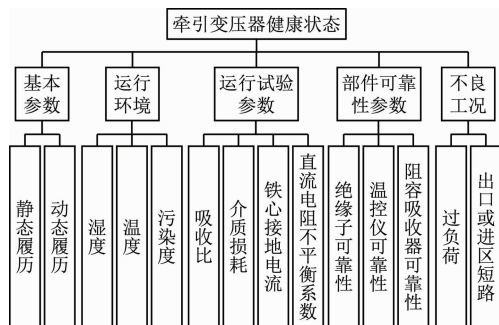


图3 牵引变压器健康评估层次结构

Fig.3 Hierarchy structure of traction transformer health status evaluation

其次,基于层次分析法运用专家经验建立判断矩阵,计算相关指标主观权重;对于部分指标,利用熵权法计算信息熵,从而求取其客观权重;通过两者结合得到改良权重。

最后,通过权重结合指标计算设备健康得分,从而评估设备健康状态并进行寿命预测。

2 实例分析

2.1 牵引变压器健康状态评估模型的建立

为验证本文方法的准确性和实用性,以某牵引变电站牵引变压器监测数据为例进行分析计算。基于牵引变压器健康状态评估指标及其层次结构,提出设备健康状态得分的计算公式:

$$H = k(w_1 H_{11} + w_2 H_{12} + w_3 H_{13} + w_4 H_{14}) \quad (9)$$

式中:

w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 ——基本参数、运行环境、运行试验参数、部件可靠性参数的权重;

H_{11} 、 H_{12} 、 H_{13} 、 H_{14} ——基本参数、运行环境、运行试验参数及部件可靠性参数的健康状态值;

k ——不良工况对牵引变压器整体健康状态的修正系数。

利用层次分析法构造专家矩阵,求解各项目层间的权重占比,其计算结果如表1所示。

2.2 基本参数健康状态值

基本参数分为静态履历和动态履历,其中 H_j 参照式(6)计算。该设备投运时间为10年,设计寿命为20年,取 H_0 为0.95, H_t 为0.20,则计算得到 B 为0.0924。依据式(6)求得 H_j 为0.87。

表1 项目层间判断矩阵及权重计算

Tab.1 Judgment matrix and weight calculation between items

项目层	重要性				权重
	基本参数	运行试验参数	运行环境	部件可靠性参数	
基本参数	1.00	2.0	3	4	0.48
运行试验参数	0.50	1.0	2	2	0.26
运行环境	0.33	0.5	1	1	0.14
部件可靠性参数	0.25	0.5	1	1	0.12

依据牵引变电器运行记录、故障记录及维修记录对 H_j 进行修正。其动态履历修正系数 k_0 的计算公式为:

$$k_0 = k_{11} k_{12} k_{13} \quad (10)$$

式中:

k_{11} ——运行记录系数;

k_{12} ——故障记录系数;

k_{13} ——维修记录系数。

牵引变压器动态履历见表2。

表2 牵引变压器动态履历

Tab.2 Transformer dynamic history

评估指标	实际情况
运行记录	长期运行状态良好
故障记录	存在3次故障情况
维修记录	仅在发生故障时进行维修

依据表2,分别选取 $k_{11} = 1.05$, $k_{12} = 0.98$, $k_{13} = 0.98$, 则 k_0 为1.01。设备基本参数的健康状态值 H_{11} 的表达式为:

$$H_{11} = k_0 H_j \quad (11)$$

修正后的 H_{11} 为0.88。

2.3 运行环境与部件可靠性健康状态值

同样构造运行环境与部件可靠性判断矩阵,并计算牵引变压器运行环境与部件可靠性得分权重,如表3所示。通过计算得到运行环境的健康状态值 H_{12} 为0.94,部件可靠性的健康状态值 H_{14} 为0.92。

2.4 运行试验参数健康状态评估

牵引变压器运行试验参数取值如表4所示。

采用熵权法计算吸收比、铁心接地电流、介质损耗、直流电阻不平衡系数等运行试验参数指标权重 w_b 依次为0.21、0.20、0.39、0.20。将客观权重与表5(牵引变压器运行试验参数判断矩阵及权重计算)所得主观权重相结合,可以求得上述4个指标的组合权重 w 分别为0.13、0.23、0.43、0.21,进

表3 牵引变压器运行环境与部件可靠性得分权重

Tab.3 Scores and weights for operation environment and component reliability of traction transformer

项目层	指标	得分/分	权重
运行环境	温度	92	0.30
	湿度	89	0.16
	污染度	98	0.54
部件可靠性	绝缘子可靠性	90	0.54
	温控仪可靠性	94	0.16
	阻容吸收器可靠性	96	0.30

表4 牵引变压器运行试验参数取值

Tab.4 Values of traction transformer operation test parameters

工况	吸收比	铁心接地电流/ A	介质损耗	直流电阻不平衡 系数
一	1.83	0.02	0.14	0.6
二	1.76	0.04	0.15	0.8
三	1.82	0.03	0.17	0.7

表5 牵引变压器运行试验参数判断矩阵及权重计算

Tab.5 Judgment matrix and weight calculation of traction transformer operation test parameters

运行参数	重要性				w_a
	吸收比	介质损耗	铁心接地 电流	直流电阻 不平衡系数	
吸收比	1	0.33	0.25	0.5	0.10
介质损耗	3	1.00	0.50	1.0	0.24
铁心接地电流	4	2.00	1.00	2.0	0.44
直流电阻 不平衡系数	2	1.00	0.50	1.0	0.22

而求得4个指标的健康状态得分别为94分、94分、97分和88分,则其健康状态值 H_B 计算为0.94。

2.5 不良状态评估与最终健康状态计算

依据监测数据,牵引变压器不良工况统计如表6所示。牵引变压器的出口或进区的短路情况共计2种。针对出口或进区短路工况,修正系数 k_1 为0.97;针对过负荷工况,修正系数 k_2 为0.88。依据式(12)可得不良工况下牵引变压器的整体健康状态修正系数 k 为0.85。

$$k = k_1 k_2 \quad (12)$$

根据式(9)可以得到该牵引变压器最终的健康状态值 H 为0.772。

2.6 剩余寿命计算

计算牵引变压器历年健康状态值,如表7所示。

表6 牵引变压器不良工况统计

Tab.6 Statistics of unfavorable working conditions for traction transformer

不良工况	状况描述	次数
出口或进区 短路	短路冲击电流为允许短路电流的50%~70%	3
	短路冲击电流为允许短路电流的70%~90%	1
过负荷	300%额定电流,运行时间大于1 min	1

表7 牵引变压器历年健康状态值

Tab.7 Values of traction transformer health status over the years

运行年限	健康状态值	运行年限	健康状态值
1	0.943	6	0.871
2	0.935	7	0.853
3	0.925	8	0.826
4	0.914	9	0.802
5	0.897	10	0.772

依据式(7)拟合得到牵引变压器健康状态拟合曲线,如图4所示。由图4可见:依据设备健康状态所拟合的设备使用寿命模型 $H = 1.017 - 0.06184 \times e^{0.1388t}$ 。由此,当设备临近退役健康状态时, t 为18.6年,可得当前时刻牵引变压器的剩余寿命约为8.6年。

此时若依据使用年限,采取大修方案进行检修,依据式(8)计算检修后的健康状态值为0.904。参照历年健康状态表可以推断,若保持当前牵引变压器的使用条件与日常维护情况,可延长近5年的使用寿命。在实际使用中,可依据牵引变压器使用检修记录,以及相关设备维护后使用时间,结合专家经验对提出的检修因子 K_i 进行修正。

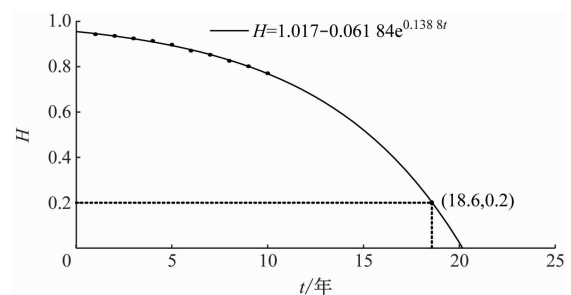


图4 牵引变压器健康状态拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of traction transformer health status

3 结语

本文采用层次分析法与熵权法结合的组合法

重来评估牵引变压器健康状态。基于历年牵引变压器健康状态数据,构建用于预测剩余寿命的牵引变压器寿命模型。在此基础上,进一步提出采用检修因子来评估检修对设备使用寿命的影响。通过某牵引变电站的实际运行数据,全面验证了所提出的设备健康状态评估方法和剩余寿命预测模型的有效性。

本文提出的牵引变压器状态评估方法实现了设备状态检测主客观因素的统一,能够推广应用到其他城市轨道交通的直流设备状态评估中。在实际推广使用中,可根据具体设备的监测指标和实际情况,对基于层次分析法建立的模型结构进行动态修正和优化,以确保评估方法的科学性和可行性。

参考文献

- [1] 何曦. 750 kV 变压器的健康状态评估[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
HE Xi. 750 kV Transformer health condition evaluation [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [2] 王智越. 基于 PCA 与层次分析法的电力变压器健康状态评估方法研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
WANG Zhiyue. Research on health assessment method of power transformer based on PCA and analytic hierarchy process [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.
- [3] 张懿议. 基于运行状态和寿命评估的电力变压器全寿命周期检修决策研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
ZHANG Yiyi. Study on life cycle cost based maintenance decision making for power transformers considering condition assessment and insulation life assessment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [4] 彭道刚, 陈跃伟, 范俊辉, 等. 基于层次分析法和粗糙集的变

压器状态评估研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 150.

PENG Daogang, CHEN Yuewei, FAN Junhui, et al. Research on assessment of transformer state using analytic hierarchy process and rough set theory [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 150.

- [5] 冯玓, 林圣, 张奥, 等. 基于连续时间马尔可夫退化过程的牵引供电设备可靠性预测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1937.

FENG Ding, LIN Sheng, ZHANG Ao, et al. Research on reliability prediction method for traction power supply equipment based on continuous time Markov degradation process [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1937.

- [6] 睦欢然. 电力变压器剩余寿命评估研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.

SUI Huanran. Study on the evaluation of residual service life for power transformer [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

- [7] 张晶晶, 许修乐, 丁明, 等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 75.

ZHANG Jingjing, XU Xiule, DING Ming, et al. A condition assessment method of power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 75.

- [8] ZHAO Y S, LI P F, WANG T, et al. Equipment health assessment based on AHP-CRITIC dynamic weight [C] // 2022 41st Chinese Control Conference (CCC). New York: IEEE, 2022: 5841.

· 收稿日期:2023-03-10 修回日期:2023-04-12 出版日期:2025-01-10

Received:2023-03-10 Revised:2023-04-12 Published:2025-01-10

· 第一作者:张明锐,教授,zmr@tongji.edu.cn

通信作者:段宏伟,硕士研究生,2233089@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

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题,以及新技术、新成果,邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述,是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

