

基于多维劣度融合的变压器健康状态评估及寿命预测研究



杨建敏¹, 方亚林², 李德志¹, 李星^{3,*}

¹巨邦集团有限公司, 浙江乐清 325603

²中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽合肥 230601

³南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京 211106

摘要: 电力变压器是电力系统中的核心设备, 其健康状态关乎着电力系统的安全稳定运行, 对变压器的健康程度和运行寿命进行准确评估和可靠预测, 能够为变压器运维提供重要信息, 降低运行成本和故障风险。本文提出一种多维劣度融合的变压器健康状态评估及寿命预测方法, 首先分析影响变压器健康状态的多维指标, 建立指标体系, 并通过指标参数相对初始值的偏移来量化各维指标劣度; 其次, 分析各指标对变压器健康影响的程度, 得出各维劣度对变压器健康影响的贡献权重, 并考虑指标劣度变化对变压器健康影响的非线性, 建立基于多维劣度非线性融合映射的变压器健康评估模型和寿命预测模型; 最后, 利用建立的数学模型, 结合实例进行了变压器健康状态评估与寿命预测, 结果表明该方法评估结果与实际相符, 模型有效。

关键词: 变压器; 健康状态评估; 寿命预测; 多维劣度

DOI: [10.57237/j.jest.2024.04.002](https://doi.org/10.57237/j.jest.2024.04.002)

Research on Transformer Health Status Assessment and Lifespan Prediction Based on Multidimensional Deterioration Fusion

Jianmin Yang¹, Yalin Fang², Dezhi Li¹, Xing Li^{3,*}

¹Jubang Group Co., Ltd., Yueqing 325603, China

²China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China

³College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: Power transformer is the core equipment in the power system, and its health status concerns the safe and stable operation of power system. Accurately evaluating and reliably predicting on the health status and lifespan of the transformer can provide important information for transformer operation and maintenance, consequently reduce the cost and fault risk. This work proposes a multidimensional degradation fusion method for evaluating the health status and predict the lifespan of transformers. Firstly, the multidimensional indicators that affect the health status of transformers are analyzed, and thus an indicator system is established. The degradation of each indicator is quantified by calculating the deviation between the measurement value and the initial value. Secondly, we analyzed impacts of various indicators

*通信作者: 李星, nuaalixing@nuaa.edu.cn

on the health of transformers, hence we obtained the contribution weights of each dimension of deterioration on the health of transformers. Furthermore, we considered the nonlinear impact of indicator deterioration changes on transformer health. Consequently, we established the transformer health assessment model and the lifespan prediction model based on multidimensional deterioration nonlinear fusion mapping. Finally, we took an example to evaluate the health status of a transformer by utilizing the established mathematical model. The results demonstrated that the evaluation results of this method were consistent with reality, and the model was effective.

Keywords: Transformer; Health Status Evaluation; Lifespan Prediction; Multidimensional Deterioration

1 引言

电力变压器是电网中电压变换和电能传输的核心,是电力系统中最重要的设备之一,变压器的良好健康状态是电力系统安全和稳定运行的重要保障。随着中国电力工业的飞速发展,电力系统中电力变压器数量规模不断增大,对变压器的健康状态进行有效评估,保证变压器正常运行非常必要和重要。变压器是一个复杂的大型电力设备,主要包含油箱、铁芯、绕组、套管、绝缘、分接开关等多个子系统,影响变压器健康性能的参数较多,如何基于在线监测与预防性试验中获取的参数数据,建立各参数表征变压器整体健康的数学映射模型,从而评估变压器健康状态和预测其运行寿命,是国内外研究的热点问题之一。

目前,针对变压器的健康状态评估,国内外已有相关研究,取得了一些成果,但也存在不足之处。部分研究在变压器健康评估中,忽略变压器系统的复杂性,仅关注对变压器健康程度关系密切的局部结构的主要性能或一些重要特征信号,如绝缘油和油纸绝缘性[1]、变压器振动信号[2]和局部放电信号等[3],以此来表征变压器整体的健康状态。这些方法降低了评估数学模型的复杂性,一定程度上能够反映变压器的故障和健康状态,但未全面综合考虑各个因素的影响,提取的表征变压器性能的信息还不够全面,建立的模型也相对简单,评估的准确性尚需要提高。文献[4]基于健康指数理论,建立变压器的健康指数模型,并较全面地融合了影响变压器健康的多个指标,但未考虑指标对健康指数影响的非线性,指标的量化也较困难,评估准确度还有待进一步提高。电力变压器系统复杂,局部监测的状态参数与变压器整体健康状态之间的关系具有模糊性和不确定性。为解决这一问题,一些研究人员通过贝叶斯网络[5]、马尔科夫链[6]、模糊理论[7]、云理论[8]、集对分析[9]等方法,建立变压器健康评估模型,进一步丰富了评估策略和方法。另外,近

年来,随着大数据和人工智能技术的发展,通过对大量监测和试验数据进行数据挖掘、信息融合[10],从而提取表征变压器健康状态的信息,也成为重要的评估方法之一。

综上,电力变压器健康状态评估虽已有部分研究,但评估方法的准确性和普适性还有待进一步提高。变压器运行信息繁杂,与其健康状态相关的指标众多,影响的数学关系较为模糊,目前还未建立统一的、定量化的数学模型,评估结果还有一定局限性。因此,本文将综合考虑影响变压器健康状态的多维指标,并定量化其劣化信息,建立指标体系劣度与变压器整体健康状态的融合非线性数学模型,从而实现不同时刻不同工况下变压器健康状态的定量化评估,并可据此预测变压器剩余寿命。

2 变压器健康状态评估指标体系

变压器的健康状态是一个笼统的定性概念,受到诸多因素影响,这些因素包括自身参数、运行工况等,其中部分存在交叉、因果关系,并非完全独立,在评估指标体系建立中,应当尽可能全面且独立的包含所有影响因素。

考虑到变压器运维中,人为的检修维护也是影响变压器健康状态的重要因素,通过专业的维护检修,能够有效改善变压器的性能,延迟其运行寿命。因此指标体系中,除包含所有独立影响变压器健康的自身指标外,将人为检修以修正因子的形式引入到指标体系中。通过综合分析和文献调研[11],能够表征变压器健康状态的信息主要包括绝缘油的品质及其析出其他的成分和通过试验测试的部分电气参数。综上,建立的变压器健康状态评估指标体系及各指标之间的关系如下图1所示:

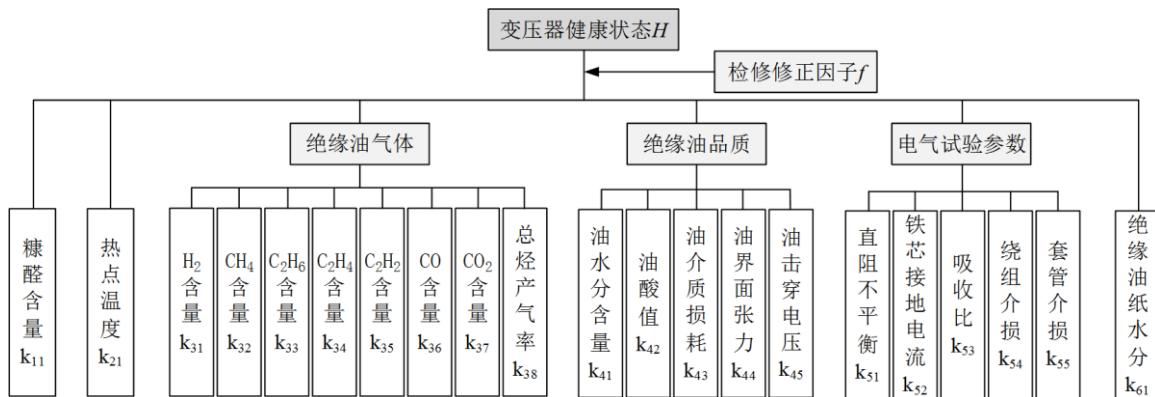


图 1 变压器健康状态评估指标体系

建立的变压器健康状态指标体系中，主要包含了反映变压器运行中绝缘老化的糠醛含量、绝缘油溶解气体、绝缘油品质、绝缘油纸水分等参数，以及反映变压器电学性能的一些电气测试参数，能够较为全面和准确地表征变压器的整体健康性能。

3 多维劣度融合变压器健康评估模型

3.1 指标劣度量化

电力变压器老化机理复杂，与之相关的因素众多，各指标之间的数值差异较大，且具有不同的量纲。为综合考虑各指标对变压器健康性能影响的贡献，建立统一融合的数学评估模型，需将各指标数值进行无量纲化和归一化，得到指标劣度量化值。

变压器服役初期性能良好，各指标具有初始值（出厂值） k_0 ，当指标达到老化极限或厂家给定的不可继续运行的临界值时，具有极限阈值 k_{cr} ，在服役过程 t 时刻指标数值为 k_t ，则其劣度可定义为

$$D_k(t) = \left| \frac{k_t - k_0}{k_{cr} - k_0} \right|, \quad |k_0| < |k_t| < |k_{cr}| \quad (1)$$

式中，考虑到指标数值存在越小变压器越健康和越大表示变压器越健康两种情况，故采用绝对值函数避免产生负数。通过上述数学处理，从劣度表达式可知，各指标劣度范围在 0~1 之间，且数值越大反映指标劣化程度越大，保证了各维指标劣度对变压器健康程度影响的单调性。

3.2 劣度贡献基函数

影响变压器健康性能的指标数值与健康程度之间关系复杂，呈现非线性关系，而(1)式指标劣度与指标数值之间为线性表达，与实际工程情况有一定差异，降低了模型准确度。例如，某指标劣度从 0.1 变为 0.2 和从 0.8 变为 0.9，对变压器的健康程度反映是不同的，一般地，劣度越接近 1，对变压器的健康影响越大，指标劣度对健康程度的影响在数学上表现为凹函数特性。因此，为体现指标体系中各指标劣度对变压器整体健康程度贡献的非线性特点，且保证各劣度指标之间的归一化特点不发生变化，须定义指标劣度影响变压器健康程度的非线性函数，本文称之为劣度贡献基函数，令指标劣度对变压器整体健康程度影响的贡献通过非线性劣度贡献基函数表示为

$$G(t) = g[D_k(t)] \quad (2)$$

为更加准确描述指标劣度对变压器健康影响程度的变化规律，劣度贡献基函数 $g(\cdot)$ 应具有以下特点：

- 1) 定义域：(0,1)；
- 2) 值域：(0,1)；
- 3) 单调递增，且二阶导数为正。

通过研究分析发现，自然指数量型函数满足上述特点，且较符合客观老化规律，因此本文提出非线性劣度贡献基函数为

$$g(D_k) = e^{D_k - \ln(e-1)} - \frac{1}{e-1} \quad (3)$$

基函数的直观图像如图 2 所示。

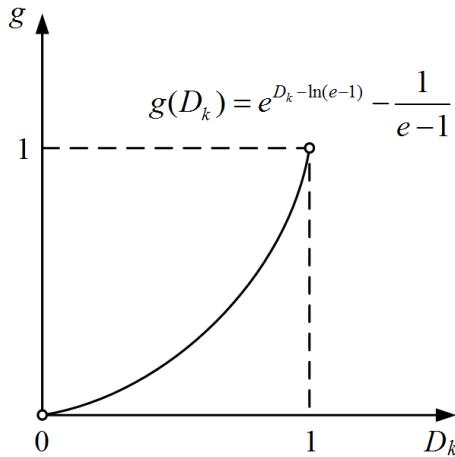


图 2 劣度贡献基函数图像

通过将指标的直接劣度数值代入劣度贡献基函数, 将得到各指标劣度对变压器整体健康程度的非线性贡献。

3.3 健康评估模型

变压器的健康评估需要将指标体系中各指标劣度的贡献融合为统一的数学模型, 即建立从指标劣度到健康程度的数学映射, 其映射框图如图 3 所示。

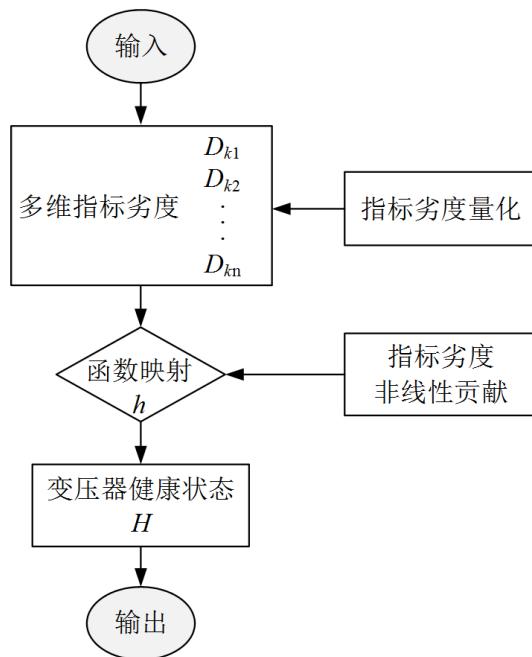


图 3 多维劣度到变压器健康状态的映射模型

变压器健康评估的数学模型为:

$$H = h(D_{k1}, D_{k2}, \dots, D_{kn}) \quad (4)$$

式中, H 为变压器整体健康评估数值, $(D_{k1}, D_{k2}, \dots, D_{kn})$ 为指标体系中各指标劣度, h 表示抽象函数映射。

由泰勒公式可知, 函数 h 可以展开为多项式函数之和, 为减低模型复杂度, 可保留线性项忽略高阶项来对函数 h 进行近似, 即

$$H = \sum_{i=1}^n (w_i D_{ki} + b_i) \quad (5)$$

进一步地, 评估变压器的健康状态在工程中一般考虑相对变化程度, 因此忽略常数项 b_i , 则

$$H = \sum_{i=1}^n w_i D_{ki} \quad (6)$$

将非线性基函数代入上式, 并得到指标体系映射变压器健康状态的评估数学模型为

$$H = \sum_{i=1}^n w_i g(D_{ki}) \quad (7)$$

考虑变压器运维中的检修对变压器健康性能的提高, 将评估结果加以修正, 并将评估结果数据变换到区间(0,1), 且数值越大表示变压器健康程度越高, 则可令

$$H = 1 - f \cdot \sum_{i=1}^n w_i g(D_{ki}) \quad (8)$$

式中, f 表示运维检修对健康程度的修正因子, 可参照下表 1 取值。

表 1 变压器检修修正因子

评估时距离最近检修时长	修正系数 f
0~2 年	0.8
2~5 年	0.9
5~10 年	0.95

变压器健康评估表达式(8)中, 各指标劣度贡献基函数系数 w_i 可视为单个指标劣度对变压器整体健康影响贡献的权重。确定指标权重的方法已经有较多研究, 一般通过专家打分层次分析法获得, 本文不再赘述, 在模型中将采用文献[11]中的指标权重如表 2 所示。

表 2 指标体系权重

指标	权重
k_{11}	0.0795
k_{21}	0.2020
$k_{31} \sim k_{38}$	[0.0355, 0.0213, 0.0213, 0.0216, 0.0456, 0.0221, 0.0220]

指标	权重
	0.0443]
$k_{41} \sim k_{45}$	[0.0441, 0.0188, 0.0236, 0.0176, 0.0121]
$k_{51} \sim k_{55}$	[0.0395, 0.0251, 0.0261, 0.0368, 0.0329]
k_{61}	0.2080

通过将指标权重及劣度数据代入评估模型(8)，将得到该评估时刻的变压器健康评估数值，评估数值的大小反映了当前变压器的健康状态，可为其运维策略提供指导。一般地，根据工程经验，变压器健康评估数值与其实际工程状态的对应关系可参照下表3。

表 3 变压器健康状态等级标准

健康评估数值	状态描述
0.0~0.3	严重劣化：劣化明显且趋势加剧，应退出运行，立即检修
0.3~0.5	劣化：性能较差，劣化明显，应尽快安排检修
0.5~0.7	一般：存在不明显劣化趋势，应考虑优先检修
0.7~0.9	良好：劣度参量裕度较大，无明显劣化，可延期检修
0.9~1.0	优良：接近出厂性能，可持续运行，延期检修

3.4 寿命预测模型

在对变压器的健康状态进行评估的同时，工程往往关心变压器接下来的寿命情况。变压器在全寿命周期运行中，若不考虑检修对运行寿命的延长，根据 weibull 可靠性理论[12, 13]，其性能的老化规律满足负指数衰减模型，函数曲线如图 4 所示。

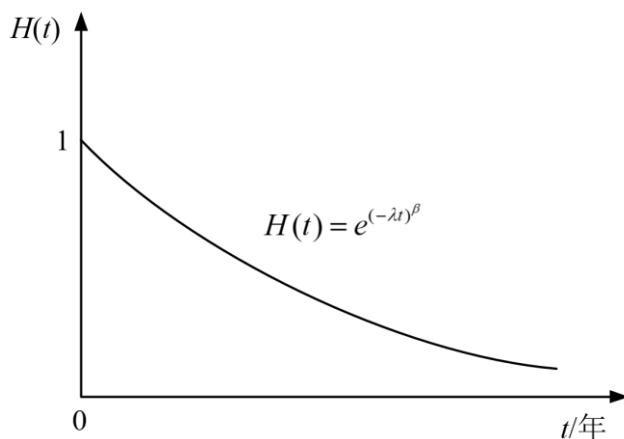


图 4 变压器健康老化曲线

其数学表达为

$$H(t) = e^{(-\lambda t)^\beta} \quad (9)$$

式中， H 为变压器健康状态数值， λ 和 β 均为常数，表征老化速度的快慢，其中 β 与变压器全寿命周期

期的故障率分布有关。

在实际工程中，变压器作为电力系统重要设备，其可靠性较高，可令表征其故障率的因子 $\beta=1$ ，即故障率为常数，则变压器健康程度随时间的变化关系简化为

$$H(t) = e^{-\lambda t} \quad (10)$$

在工程中将不同时刻对变压器健康状态的评估结果及对应的时刻构成序列 (t_i, H_i) ，并对序列进行(10)式函数拟合，将得到变压器健康老化曲线。基于实际工程数据拟合得到的老化曲线，可得出未来不同时刻的变压器健康数值，当变压器健康数值达到设定的临界数值时，可认为变压器达到运行寿命，即为寿命预测结果。

4 算例分析

为方便对比分析，以文献[11]中型号为 OSFPS-150000/220 的某 220 kV、150 MVA 电力变压器为例，进行健康状态评估。在某一时刻，对变压器进行预防性试验，得到的指标体系测试数据如下表 4 和表 5 所示。

表 4 变压器绝缘油中溶解气体测试数据 (μL/L)

H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	CO ₂	总烃
17.2	25.8	6.34	16.21	0	637.2	2890.6	48.34

表 5 变压器预防性试验数据

指标	试验值
糠醛含量/ (mg/L)	0.013
油中水分/ (μL/L)	6.5
油酸值/ (mgKOH/g)	0.006
油介损 (90 °C) / %	0.031
界面张力 (25 °C) / (mN/m)	35.1
油击穿电压/kV	58.7
直阻不平衡系数*/%	0.31
铁芯接地电流/A	0.032
吸收比	1.647
绕组介损 (20 °C) / %	0.195
套管介损 (20 °C) / %	0.38
纸 (板) 水分含量/ %	0.47

通过查阅变压器手册和电力设备预防性试验规程[14-16]获取各指标的出厂值和临界阈值，并基于劣度计算式得到指标体系在该时刻的劣度如下表 6 所示。

表 6 指标体系劣度

指标	劣度
k_{11}	0.065
k_{21}	0.1763
$k_{31} \sim k_{38}$	[0.0937, 0.1934, 0.0975, 0.3242, 0, 0.3465, 0.2891, 0.2100]
$k_{41} \sim k_{45}$	[0.25, 0.06, 0.0077, 0.3090, 0.1905]
$k_{51} \sim k_{55}$	[0.1058, 0.3200, 0.3060, 0.2438, 0.5350]
k_{61}	0.1567

将上述劣度数据和指标权重代入变压器健康评估模型(8), 由于变压器处于投运前初期阶段, 未进行检修, 故检修修正因子 $f=1$, 则得到评估结果为:

$$H = 1 - f \cdot \sum_{i=1}^n w_i g(D_{ki}) = 0.8810 \quad (11)$$

从评估结果看, 改变变压器健康状态属于良好状态, 查阅其投运资料可知, 评估时刻距离最初投运时间 14 年, 处于变压器服役前中期, 其良好状态与实际情况相符, 且与文献中其他评估方法评估结果一致, 证明了该评估模型的有效性。

在本例中, 对变压器的寿命进行预测, 将健康评估数据点 (14, 0.8810) 代入式(10), 可得 $\lambda \approx 0.01$ 。则该变压器的健康老化函数为

$$H(t) = e^{-0.01t} \quad (12)$$

在实际工程中, 大型变压器的设计寿命一般在 20 到 40 年之间。当健康评估数值低于 0.7 时, 表示变压器存在劣化, 须安排优先检修, 否则容易发生故障, 寿命终止。本例中, 将 $H=0.7$ 代入式(12), 得到 $t \approx 35.7$ 年, 表明若不安排检修的情况下, 变压器寿命为 35.7 年, 目前变压器已运行 14 年且状态良好, 则剩余寿命约为 21.7 年, 与实际情况相符。

5 结论

本文通过建立变压器健康影响的多维指标, 定量化其劣化程度, 并考虑劣度贡献的非线性, 建立多维指标劣度融合的变压器健康程度评估数学模型。该模型综合全面地考虑表征变压器健康性能的内部指标参数, 通过指标数值相对初始值的偏移程度量化指标劣度, 并非线性处理后, 加权融合得到变压器整体健康评估数值。通过示例分析可知, 该模型能够有效评估变压器的健康状态, 评估结果与实际

运行状态相符, 对变压器的状态把握和运维检修具有指导作用。

参考文献

- [1] 黄正勇, 赵晨, 王超凡, 等. 油浸式变压器复合酯类环保绝缘油介电与老化特性 [J]. 变压器, 2024, 61(07): 13-21.
- [2] 叶开迪, 万前宏, 张师. 基于振动信号的变压器故障分析 [J]. 电气开关, 2024, 62(03): 85-87.
- [3] 刘永, 杨在葆, 韩克俊, 等. 基于电容耦合传递关系的局放故障定位技术研究及工程应用 [J]. 变压器, 2023, 60(02): 54-58.
- [4] 李喜桂, 常燕, 罗运柏, 等. 基于健康指数的变压器剩余寿命评估 [J]. 高压电器, 2012, 48(12): 80-85.
- [5] 杨玥, 康琪, 杨军, 等. 基于贝叶斯网络的变压器健康状况分析 [J]. 测控技术, 2021, 40(09): 38-47.
- [6] 陈长征, 刘洋. 基于隐马尔科夫模型的变压器剩余寿命分析 [J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(04): 412-416.
- [7] 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.
- [8] 于丹, 王昭雷, 林博伟, 等. 基于云理论的电力变压器故障诊断研究 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37(06): 147-149.
- [9] 滕杰, 孙学武, 贺志强. 基于集对分析方法和证据融合的变压器状态评估方法研究 [J]. 自动化应用, 2020, (10): 93-96.
- [10] 李洁珊, 王朝硕, 章禹, 等. 基于历史信息挖掘的变压器健康状态聚类方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 94-99.
- [11] 孟繁津. 基于健康状态的电力变压器可靠性和经济性寿命评估研究 [D]. 重庆大学, 2014.
- [12] 张良勇, 董晓芳. 排序集抽样下 Weibull 分布的产品可靠度估计 [J]. 运筹与管理, 2024, 33(06): 100-105.
- [13] 张学萍, 王娜. 基于遗传算法的汽车底盘件疲劳寿命威布尔分布参数估计 [J]. 浙江水利水电学院学报, 2024, 36(02): 77-80+90.
- [14] DL/T 596-1996. 电力设备预防性试验规程 [S].
- [15] DL/T 722-2000. 变压器油中溶解气体分析和判断导则 [S].
- [16] GB/T 1094.7-2008. 电力变压器第 7 部分: 油浸式电力变压器负载导则 [S].