

基于交叉熵理论的配电变压器寿命组合预测方法

栗然, 刘会兰, 卢云, 韩彪

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 对配电变压器进行状态评估和剩余寿命预测, 是开展状态检修的重要前提。以变压器历年的健康指数 HI 为基础, 提出了一种基于交叉熵理论的配电变压器寿命组合预测模型。在剩余寿命模型中运用故障概率密度函数并引入交叉熵理论动态确定改进灰色理论和改进马尔科夫两个单一预测算法的权重。模型考虑了配电变压器寿命周期中故障概率密度函数形状参数和尺度参数的变化, 实现了对变压器全寿命周期健康指数的评估和预测, 确定了健康指数的分布函数。最后通过实际数据验证了模型的有效性和合理性, 相比于单一预测法更符合实际情况。

关键词: 剩余寿命; 交叉熵理论; 组合预测; 健康指数; 故障概率密度函数

A combination method for distribution transformer life prediction based on cross entropy theory

LI Ran, LIU Hui-lan, LU Yun, HAN Biao

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Distribution transformer condition assessment and remaining life prediction is an important prerequisite to carry out condition-based maintenance. This paper, based on the transformer health index (HI) of each year, puts forward a kind of distribution transformer life combination forecast model based on the theory of cross entropy. In residual life model, failure probability density function and cross entropy theory are introduced to dynamically determine the weight of the improved gray theory and Markov prediction algorithm. Considering the change of the shape parameter and scale parameter of failure probability density function in the life cycle of the distribution transformer, it realizes the evaluation of the full life cycle of transformer's health index and determines the distribution function of the health index. Actual data verify the effectiveness and reasonability of the model. It is more in line with the actual situation compared to a single prediction method.

Key words: remaining life; cross entropy theory; combination forecast; health index; failure probability density function

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0097-07

0 引言

配电网是连接电力系统与用户的重要纽带, 而配电变压器在其中又占有举足轻重的地位, 故提高配电变压器运行管理水平以及可靠性对整个电网的安全运行具有十分重要的意义。除了在变压器的设计制造过程中提升可靠性水平之外, 利用现代技术和方法对其剩余寿命进行评估预测, 实现其在安全条件下运行到最大使用寿命也是很重要的^[1-2]。

鉴于变压器寿命评估具有重要意义, 广大专家学者对寿命评估模型展开了相对深入的研究。文献[3]是基于可靠性理论, 通过统计确定变压器的故障率趋势走向, 来表征寿命状态。文献[4]提出了基于变压器老化机理的寿命预测模型, 引入了电力设备健康指数与投运时间的计算公式。但是该文在求取变压器剩余寿命方法中存在一定的局限性: 理想化

地认为老化系数 B 在整个寿命周期中为定值, 不具有实时性。另外也有一些学者利用预测算法^[5-6]研究变压器剩余寿命, 但是由于单一预测法自身的局限性, 使其预测精度和稳定性不高。随着信息时代的到来, 电力系统正逐步实现信息化, 信息熵^[7]、交叉熵在电力系统可靠性评估中得到了广泛应用。基于交叉熵理论的组合预测模型引起广泛重视, 交叉熵^[8]能够通过判断不同信息源之间的两两相交程度来确定相互支持度, 并依据相互支持度确定信息源的权重, 相互支持度越高, 所占权重越大。

基于此, 本文建立了完整的配电变压器寿命预测模型, 包括配电变压器健康指数模型和剩余寿命模型。剩余寿命模型是基于交叉熵理论的组合预测模型, 不仅可以得到变压器的剩余寿命, 最终也能确定健康指数与运行年限的变化规律, 实现实时预测变压器的运行状态。

1 配电变压器健康指数模型

考虑到配电变压器影响指标较多且各评估指标对结果影响的模糊性，现在广泛采用基于模糊综合评判法^[9]的配电变压器健康指数模型。但在模糊综合评判结果的处理上，使用不同的方法会得到不同的评价结果，鉴于此，本文采用文献[10]的模糊综合评判模型，其将配电变压器的状态数字化描述，最后的量化结果定义为配电变压器的健康指数 (Health Index, HI)。HI 是配电变压器健康程度的综合指标，根据《国家电网公司配网状态检修制度标准汇编》，规定：HI 的取值范围在 0~100 之间，HI 越接近 100 表示配电变压器的健康程度越高，HI 越接近 0 表示配电变压器的健康程度越低，HI=60 为设定阈值，即变压器应该大修或更换，已达到最大使用年限。当 HI>60 为正常状态，HI<60 为失效状态。

(1) 确定指标体系，如图 1 所示。

(2) 建立评语集 V

将配电变压器的运行状态划分为：正常、注意、异常、严重四种情况。设评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 。其中 $v_j (j=1,2,3,4)$ 表示第 j 个评定等级，给定与评判等级 1 级~4 级相应的分数分别为 100,80,70,60。即 $V = \{100,80,70,60\}$ 。

(3) 确定权重集 ω

建立指标体系后，需根据层次间、指标间的相对重要性赋予相应的权重 ω ，本文采用层次分析法^[11] (AHP) 对各指标赋予权重。

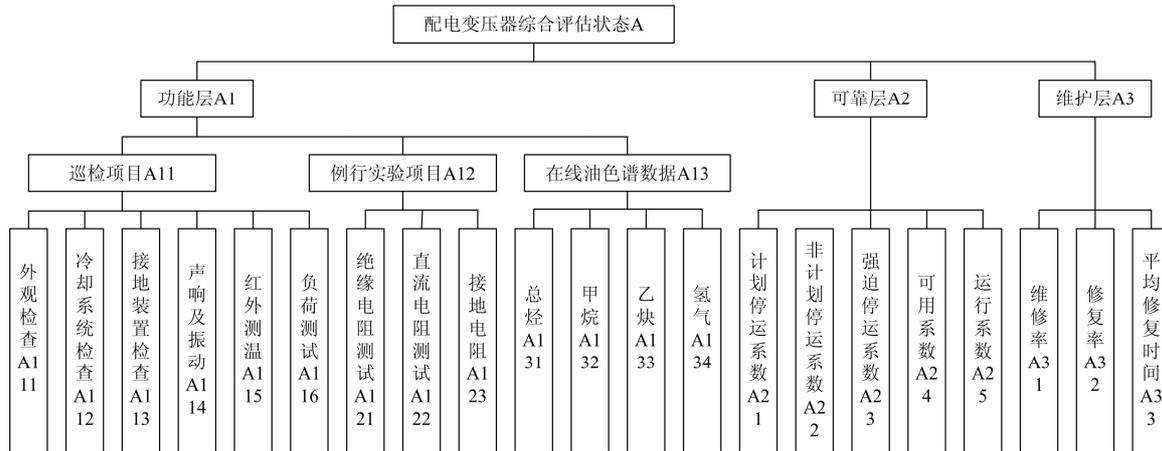


图 1 配电变压器指标体系

Fig. 1 Index system of distribution transformer

2 威布尔分布

由经验公式(4)^[13]，将配电变压器各时刻点的健康指数转化为相对应的故障率。

$$\lambda = Ke^{C \cdot (100 - HI)} \quad (4)$$

式(4)中： λ 为故障率； HI 为健康指数； K 为比例系数； C 为曲率系数。取 $K=0.0112$ ， $C=0.0451$ 。

本文的研究采用二参数形式的威布尔分布^[14]，

(4) 确定综合评判矩阵 R

评判矩阵由指标的隶属度 r_{ij} 构成的，故应确定指标层的隶属函数。对于定量指标（如绝缘电阻的大小等），引入相对劣化度的概念^[12]，利用三角形和半梯形组合的分布函数，建立各指标对应于不同状态等级的隶属函数。而针对外观检查等定性指标采用模糊统计试验法，应用专家打分法来确定各指标的隶属度。

(5) 模糊综合评价运算

模糊综合评判表达式为 $B = \omega \circ R$ ，采用 max-min 合成运算，即

$$B = \omega \circ R = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \circ (r_{ij})_{n \times m} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (1)$$

式中， $b_j = \bigvee_{i=1}^n (\omega_i \wedge r_{ij})$ ， $j=1,2,\dots,m$ ，其中 ω_i ， r_{ij} 分别为矩阵 ω 和 R 的元素。

(6) 综合评价结果 HI

$$HI = \sum_{j=1}^4 c_j v_j \quad (2)$$

式中， v_j 为评语集 V 中的元素， c_j 为

$$c_j = b_j / \sum_{j=1}^4 b_j \quad (3)$$

式中， b_j 为公式 (5) 中矩阵 B 的元素。

健康指数 HI 是综合考虑了配电变压器的各种影响指标得到的，是配电变压器健康度、可靠性和维修性等的综合反映，故本文剩余寿命模型建立在 HI 的基础上。

m 表示其形状参数, n 表示其尺度参数。

故障率函数 $\lambda(t)$ 为

$$\lambda(t) = \frac{m}{n} \left(\frac{t}{n} \right)^{m-1} \quad (5)$$

故障概率密度函数 $f(t)$ 为

$$f(t) = \frac{m}{n} \left(\frac{t}{n} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{n}\right)^m} \quad (6)$$

可以看出, 威布尔分布的故障率函数和故障概率密度函数具有相同的参数 m, n 。

通过统计分析配电变压器历年的健康指数数据, 可以求得各阶段的参数 m, n 。为提高拟合精度, 本文采用列文伯格—马夸尔特法^[15-16]对参数进行估计。

3 配电变压器剩余寿命模型

本文配电变压器剩余寿命模型采用组合预测方法, 组合预测即为一个信息融合的过程, 目前国内常用的信息融合方法主要包括加权融合与贝叶斯融合两种方法。考虑到贝叶斯融合需构造先验分布, 难以实现且主观性强, 故不适合工程应用。本文采用加权融合, 利用交叉熵理论确定剩余寿命组合预测模型的权重。单一的预测方法仅提供寿命预测的基本信息, 而本文的组合预测模型是以这些信息为依据, 通过交叉熵理论确定各单一预测方法的权重, 最后得到一个更为合理, 更为精确的配电变压器剩余寿命组合预测模型。

3.1 交叉熵理论

1948年, 香农(Shannon)提出了描述随机变量取值的不确定性的度量工具——信息熵, 并给出了信息熵的计算公式^[17]。

对于离散型随机变量:

$$H(X) = H(p_1, \dots, p_n) = -\sum_{i=1}^n p_i \log_c p_i = \sum_{i=1}^n p_i \log_c \left(\frac{1}{p_i} \right) \quad (7)$$

式(7)中, $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 是变量 X 的概率分布, 满足 $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 1$ 。

对于连续型随机变量:

$$H(X) = -\int_a^b f(x) \log_c f(x) dx \quad (8)$$

式(8)中, $f(x)$ 是变量 X 的概率密度函数, $\int f(x) dx = 1$ 。

特别地, 当 $c=2$ 时, 信息熵的单位为比特; 当 $c=e$ 时, 其单位为奈特。

根据熵的定义思想, 定义了一种度量两个随机向量之间信息量差异的计算方法, 称为交叉熵

(Cross Entropy)^[18], 也称为 Kullback-Leibler(K-L)距离, 用 $D(f \parallel g)$ 表示两概率分布的交叉熵。

对于离散情况

$$D(f \parallel g) = \sum_{i=1}^n f_i \log_c \frac{f_i}{g_i} \quad (9)$$

对于连续情况

$$D(f \parallel g) = \int_a^b f(x) \log_c \frac{f(x)}{g(x)} dx \quad (10)$$

式中, f 和 g 在离散情况下表示概率矢量, 连续情况分别表示概率密度函数。

性质: $D(f \parallel g) \geq 0$, 当且仅当 $f = g$ 时, 等号成立, 并且 $D(f \parallel g) \neq D(g \parallel f)$ 。

交叉熵量化了信息量之间的“距离”。但 K-L 距离不是真正的长度距离, 而是对两个概率分布之间差异性的描述。当两个概率分布越一致, 交叉熵的取值越小, 表示它们之间的接近程度越大。对于基于交叉熵的组合预测模型中, 交叉熵表示两个概率密度的支持程度, 即单一预测算法对整体的支持度大小。

交叉熵方法具有全局优化性。利用交叉熵方法求解主要需要解决两大问题: 建立概率密度函数, 形成交叉熵目标函数; 迭代求解权重系数。

交叉熵根据概率密度函数生成样本解, 样本解的整体优劣和概率分布形式与参数有关, 故已知概率密度函数是交叉熵适用的前提条件。本文采用配电变压器的故障概率密度函数 $f(t)$ ^[19]。

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (11)$$

式(11)中: $R(t)$ 是可靠度函数; $F(t)$ 是累积失效概率函数, 且 $\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$ 。

3.2 组合预测求解步骤

首先根据第1节介绍的配电变压器健康指数模型, 评估确定历年的健康指数, 再分别采用单一经典预测法(如灰色理论, 马尔科夫理论等)来预测配电变压器未来一段时间内的健康指数。通过公式(4)转化为相应的故障率, 根据 Levenberg-Marquardt 法, 分段估计得到参数 m, n 。利用二参数威布尔分布的故障率函数与故障概率密度函数参数值相同的特点, 可确定故障概率密度函数, 即故障概率分布。不同的预测方法, 对应不同的故障概率分布, 采用交叉熵理论确定各预测方法的权重, 进而得到配电变压器剩余寿命的组合预测模型。

基于交叉熵的配电变压器剩余寿命组合预测模型的求解步骤如下。

注: 本文采用的预测时间精度为0.5年, 即每

两个时间节点间隔 0.5 年。

①对历史时刻状态评估。

根据模糊综合评判健康指数模型, 得到配电变压器历年的健康指数。

②对历史时刻进行虚拟预测。

设配电变压器的已运行年限为 t , 共有 M 个时间节点。采用 K 种预测算法分别对历史时刻的健康指数进行虚拟预测, 每种算法得到 M 个健康指数值 HI_{km} ($m=1,2,\dots,M$)。

③预测未来时刻的健康指数值。

采用 K 种预测算法分别预测配电变压器未来时刻的健康指数值, 设未来的时间年限有 N 个时间节点, 得到的结果分别为 HI_{tm} ($t=1,2,\dots,T$)。加上原来的 HI_m , 对于第 k 种算法, 就有 $(M+N)$ 个健康指数值 HI_k 。

④定义故障概率密度函数。

根据公式 (4), 将每种算法的健康指数值转化为故障率。对于第 k 种算法, 运用 Levenberg-Marquardt 法对配电变压器的早期故障期, 偶然故障期和耗损故障期进行参数估计, 可以得到三个故障期的故障概率密度函数 $f_{kq}(t)$ ($q=1,2,3$)。

$$f_{kq}(t) = \frac{m_{kq}}{n_{kq}} \left(\frac{t}{n_{kq}} \right)^{m_{kq}-1} e^{-\left(\frac{t}{n_{kq}}\right)^{m_{kq}}} \quad (12)$$

参数 m_{kq} , n_{kq} 为根据每一故障期的 $(t_1, \lambda_1), (t_2, \lambda_2), \dots, (t_n, \lambda_n)$, 采用 Levenberg-Marquardt 法估计得到的。

设 $f_q(t)$ ($q=1,2,3$) 为融合各影响因素后配电变压器的组合故障概率密度函数, $f_{kq}(t)$ 为第 k 种预测模型下的故障概率密度函数, 满足

$$\sum_{k=1}^K \omega_k = 1 \quad (13)$$

$$f_q(t) = \sum_{k=1}^K \omega_k f_{kq}(t) \quad (14)$$

⑤建立支持向量, 导出交叉熵目标函数

建立支持向量

$$S=(S_1, S_2, \dots, S_K)$$

设

$$S_k = D[f_q(t) \| f_{kq}(t)] = \int f_q(t) \ln[f_q(t)/f_{kq}(t)] dt \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad \int f_q(t) dt = 1 (q=1,2,3)$$

记

$$A_k = S_k / \sum_{k=1}^K S_k \quad (16)$$

一般地, 2 个概率分布相似程度越大, 两者的

相互支持程度越高, 用 $D[f_q(t) \| f_{kq}(t)]$ 来表示两个概率分布的支持程度, 支持程度越高, 对应的 S_k 越小。因此为使权重反应不同信源之间的支持程度, 令

$$\omega_k = \frac{1/A_k}{\sum_{k=1}^K 1/A_k} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1, i \neq k}^K A_k/A_i} \quad (17)$$

建立目标函数

$$F_q = \min \left(\sum_{k=1}^K D[f_q(t) \| f_{kq}(t)] \right) \quad (18)$$

s.t. $f_q(t)$ 与 $f_{kq}(t)$ 属于同一分布类。

⑥求解最小交叉熵优化问题

综上所述, 目标函数是关于权重系数 ω_k 的函数, 因此, 其优化问题转化为对 F 求极小值的非线性规划问题, 利用非线性规划方法即可解出。

⑦分别求取三个故障期中, 每个预测模型对应的权重系数, 得到每个故障期中的每个时间节点的健康指数综合值 HI 。

$$HI = \sum_{k=1}^K \omega_k HI_k \quad (19)$$

式(19)中: HI_k 为第 k 种单一预测法得到的健康指数值; ω_k 为其在组合预测模型中所占的权重。

⑧根据健康指数综合值 HI 与运行年限 t 的对应关系, 应用 Levenberg-Marquardt 曲线拟合方法得到配电变压器的健康指数综合值 HI 分布函数为

$$HI = ae^{-bt} \quad (20)$$

式(20)中: a , b 为常数 (不同的故障期对应不同的 a , b); t 为变压器运行年限。

⑨由公式 (20), 可以得到运行年限 t 为

$$t = \frac{\ln(a/HI)}{b} \quad (21)$$

令 $HI = 60$ 代入公式 (21), 即可确定配电变压器的寿命 T 。则剩余寿命 ΔT 为

$$T = \frac{\ln(a/60)}{b} \quad (22)$$

$$\Delta T = T - t \quad (23)$$

4 实例分析

现以河北省邢台市电力公司 1 台 S11-315/10 型、额定变比为 $10000 \pm 5\%/400V$, 已运行 14 年的配电变压器为例, 应用前述方法对其进行状态评估和寿命预测, 验证提出的剩余寿命模型的有效性和合理性。

根据历史数据, 采用第 1 节论述的健康指数模

型评估此变压器历年的健康指数, 如表 1 所示。

表 1 此变压器历年的健康指数

Table 1 Health index of this transformer over the years

运行 年限	HI	运行 年限	HI	运行 年限	HI	运行 年限	HI
0.5	88	4	95	7.5	94	11	92
1	99	4.5	95	8	95	11.5	93
1.5	97	5	97	8.5	93	12	94
2	97	5.5	96	9	96	12.5	92
2.5	98	6	96	9.5	95	13	93
3	96	6.5	95	10	94	13.5	92
3.5	95	7	95	10.5	93	14	91

本文采用两种常用的预测方法: 改进的灰色理论预测法 GM(1,1)和改进的马尔科夫链预测法 Markov^[20-21], 对变压器未来时刻的健康指数进行预测, 分别得到的配电变压器健康指数的预测结果 HI_1 、 HI_2 , 由图 2 所示, 可以看出 2 种常用预测方法都能够比较好地预测配电变压器寿命的变化趋势。在偶然故障期, 对照历史时刻, 改进灰色理论预测法更接近真实值。

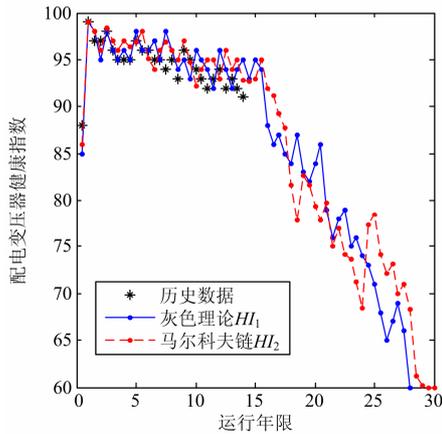


图 2 单一预测法的配电变压器健康指数结果

Fig. 2 Results of the health index of the single prediction method of distribution transformer

图 3 为配电变压器的故障率曲线, 由改进灰色理论和改进马尔科夫链预测法得到的健康指数, 先转化为设备的故障率, 再经曲线拟合得到。由于早期故障期较短, 由图可以看出, 得到的故障率曲线只包含偶然故障期和耗损故障期两个阶段, $t=15.5$ 年为分界点, 符合浴盆曲线的特点, 从而也验证了 2 种单一预测法可以较好地预测配电变压器寿命的变化趋势。

表 2 列出两种单一预测法对应的故障率函数的威布尔分布参数 m , n 。

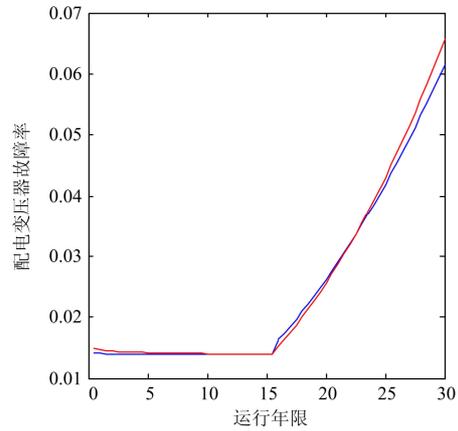


图 3 配电变压器故障率拟合曲线

Fig. 3 Distribution transformer failure rate fitting curve

表 2 单一预测法的威布尔分布参数

Table 2 Weibull distribution parameters of the single prediction method

预测算法	偶然故障期 ($t < 15.5$ 年)	耗损故障期 ($t > 15.5$ 年)
GM(1,1)	$m=0.9810, n=72.7586$	$m=3.3296, n=35.1087$
Markov	$m=0.9967, n=71.7823$	$m=3.1119, n=35.4720$

根据以上分析结果, 采用基于交叉熵理论动态确定权重的组合预测法确定此配电变压器的剩余寿命。表 3 列出了不同故障期各预测算法的权重系数。可以看出在偶然故障期, 改进灰色理论的权重系数略大于改进马尔科夫链的权重, 与图 2 相符。

表 3 交叉熵模型的权重

Table 3 Weight of the cross entropy model

故障期	ω_1 (GM(1,1))	ω_2 (Markov)
偶然故障期	0.58	0.42
耗损故障期	0.45	0.55

由 $HI = \omega_1 \cdot HI_1 + \omega_2 \cdot HI_2$, 加权计算得到健康指数最终预测结果 HI 。图 4 为包含组合预测法的预

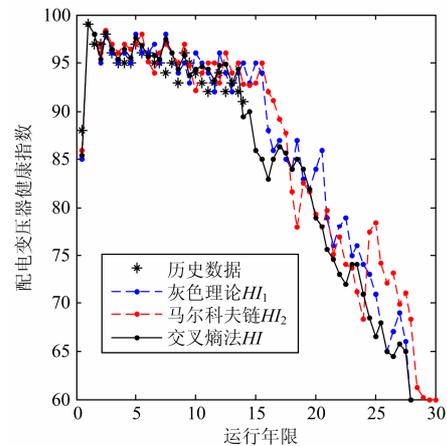


图 4 组合预测模型的预测结果

Fig. 4 Prediction results of combination forecasting model

测结果,与单一预测法对比,组合预测能更好地反映变压器的真实健康指数与运行年限的趋势走向。尽管两单一预测法都有较大误差,但由于交叉熵理论的全局优化作用,该模型仍然得到较满意的预测结果。

根据得到的组合预测模型的健康指数与运行年限的关系,拟合得到此台配电变压器的健康指数与运行年限的分布函数。函数曲线如图5所示。

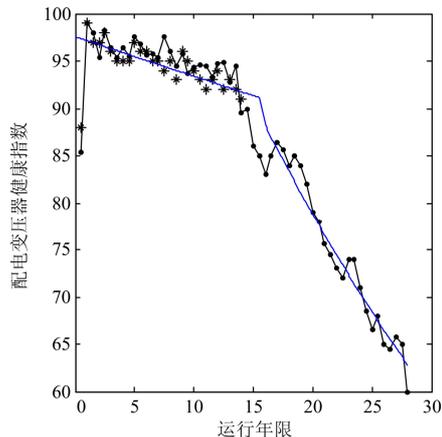


图5 此配电变压器健康指数的分布函数

Fig. 5 Distribution function of the health index of this distribution transformer

分布函数表达式为

$$HI(t) = \begin{cases} 97.5994 \cdot e^{-0.0044t} & (t \leq 15.5) \\ 138.7710 \cdot e^{-0.0283t} & (t > 15.5) \end{cases}$$

则寿命 T 为

$$T = \frac{\ln(a/60)}{b} = \frac{\ln(138.7710/60)}{0.0283} = 29.6 \text{ (年)}$$

配电变压器的剩余寿命 ΔT 为

$$\Delta T = T - t = 29.6 - 14 = 15.6 \text{ (年)}$$

以上对邢台供电公司实际运行的配电变压器采用交叉熵组合预测方法进行了寿命预测,相比单一预测方法,预测结果更加贴近实际情况。这是因为交叉熵理论在预测过程中,不同于其他组合预测方法仅通过简单的数学处理确定每个预测算法的动态权重,而是考虑到每种预测模型之间的信息融合,通过判断各预测方法的相互交叉程度,动态确定了各个方法所占权重。排除了很多不合理成分,最终得到了更加准确的预测结果。

5 结语

本文应用交叉熵理论,确定了改进灰色理论和改进马尔科夫预测法的权重系数,建立了配电变压器剩余寿命的组合预测模型。相比于单一预测法,提高了预测精度。模型能够得到变压器健康指数综

合值与运行年限的变化规律,并拟合确定了各个阶段健康指数的分布函数。根据全寿命周期内健康指数的运行趋势可以指导电力公司的状态检修,也为最终实现配电变压器的全寿命周期管理提供理论支撑。

参考文献

- [1] 尹金良,朱永利,俞国勤,等. 基于高斯过程分类器的变压器故障诊断[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 158-164.
YIN Jin-liang, ZHU Yong-li, YU Guo-qin, et al. Fault diagnosis of transformers based on Gaussian process classifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 158-164.
- [2] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等. 电力变压器油纸绝缘老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-11.
LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, ZHENG Han-bo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-11.
- [3] 张黎,张波. 电气设备故障率参数的一种最优估计算法[J]. 继电器, 2005, 33(17): 31-34.
ZHANG Li, ZHANG Bo. An algorithm for optimal parameter estimation of the failure rate of electrical equipment[J]. Relay, 2005, 33(17): 31-34.
- [4] 刘伟. 电力变压器健康状态评估与剩余寿命分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
LIU Wei. Power transformer health-condition evaluation and EOL analysis[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [5] 项文强,张华,王姮,等. 基于L-M算法的BP网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 100-111.
XIANG Wen-qiang, ZHANG Hua, WANG Heng, et al. Application of BP neural network with L-M algorithm in power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 100-111.
- [6] 杨廷方,刘沛,李浙,等. 应用新型多方法组合预测模型估计变压器油中溶解气体浓度[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 108-113.
YANG Ting-fang, LIU Pei, LI Zhe, et al. A new combination forecasting model for concentration prediction of dissolved gases in transformer oil[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 108-113.
- [7] 韩中合,朱霄珣. 基于信息熵的支持向量回归机训练样本长度选择[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(20): 112-116.
HAN Zhong-he, ZHU Xiao-xun. Selection of training sample length in support vector regression based on information entropy[J]. Proceedings of the CSEE, 2010,

- 30(20): 112-116.
- [8] 陈宁, 沙倩, 汤奕, 等. 基于交叉熵理论的风电功率组合预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 29-34. CHEN Ning, SHA Qian, TANG Yi, et al. A combination method for wind power predication based on cross entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 29-34.
- [9] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20. ZHANG Yi-yi, LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20.
- [10] 王钦, 文福拴, 刘敏, 等. 基于模糊集理论和层次分析法的电力市场综合评价[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 33-37. WANG Qin, WEN Fu-shuan, LIU Min, et al. Combined use of fuzzy set theory and analytic hierarchy process for comprehensive assessment of electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 33-37.
- [11] Tang W H, Spurgeon K, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(4): 1696-1703.
- [12] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75. LIAO Rui-jin, WANG Qian, LUO Si-jia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 70-75.
- [13] 潘乐真, 张焰, 俞国勤, 等. 状态检修决策中的电气设备故障率推算[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(2): 91-94. PAN Le-zhen, ZHANG Yan, YU Guo-qin, et al. Prediction of electrical equipment failure rate for condition-based maintenance decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(2): 91-94.
- [14] 周津慧. 重大设备监测与寿命预测方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006. ZHOU Jin-hui. Study on the methods for detecting the conditions of key devices and predicting their remaining lives[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2006.
- [15] 孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆, 等. 基于 Marquardt 法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 85-90. SUN Peng, CHEN Shao-hui, ZHANG Cai-qing, et al. Assessment of failure rate for substation equipment life cycle based on Marquardt parameter estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 85-90.
- [16] 易永辉. 继电保护装置寿命分析及寿命影响机理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 79-83. YI Yong-hui. Research of relay protection device's life and relative effect mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 79-83.
- [17] 姜殿玉. 带熵博弈的局势分析与计策理论[M]. 北京: 科学出版社, 2012. JIANG Dian-yu. Situation analysis and trick theory on games with entropy[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [18] 周军妮, 杨润玲, 王燕妮, 等. 一种结合交叉熵和投影特征的图像匹配算法[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(24): 405-408. ZHOU Jun-ni, YANG Run-ling, WANG Yan-ni, et al. Image matching algorithm based on cross-entropy and projection features[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(24): 405-408.
- [19] 邱仕义. 电力设备可靠性维修[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004. QIU Shi-yi. Reliability of electrical equipment maintenance[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [20] 郭超众. 基于马尔可夫模型的寿命预测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. GUO Chao-zhong. Study of remaining life prediction based on markov model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [21] 郭奎麟, 谭伦农, 黄虎. 基于小波包的马尔科夫方法在短期负荷预测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 66-70. GUO Kui-lin, TAN Lun-nong, HUANG Hu. The application of wavelet packet based Markov Chain in short-term load forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 66-70.

收稿日期: 2013-05-10

作者简介:

栗 然(1965-), 女, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制;

刘会兰(1986-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, 变压器的寿命预测; E-mail: liuhuilan111@163.com

卢 云(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。