



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103983757 B

(45) 授权公告日 2015. 10. 14

(21) 申请号 201410245018. 8

(22) 申请日 2014. 06. 04

(73) 专利权人 国家电网公司

地址 100031 北京市西城区西长安街 86 号

专利权人 国网重庆市电力公司万州供电分公司

(72) 发明人 何志满 王剑飞 杨溢 阳玉洁  
黄海舟 李川 邓军 刘郑 余洋  
顾婷

(74) 专利代理机构 北京同恒源知识产权代理有限公司 11275

代理人 赵荣之

(51) Int. Cl.

G01N 33/28(2006. 01)

G06F 17/50(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 103810328 A , 2014. 05. 21,

JP 特许第 5444110 号 B2 , 2014. 03. 19,

Zhiman HE 等. New Mixed Weibull Probability Distribution Model for Reliability Evaluation of Paper-oil Insulation. 《PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY》. 2013,

王有元等. 变压器油纸绝缘可靠性的威布尔混合评估模型. 《高电压技术》. 2010, 第 36 卷 (第 4 期),

王有元等. 电力变压器油纸绝缘可靠性与老化特征参量间的相关性. 《高电压技术》. 2011, 第 37 卷 (第 5 期),

于涛. 基于动态权重和静态权重的软件可靠性混合模型研究. 《中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑》. 2013, (第 12 期),

审查员 赵静

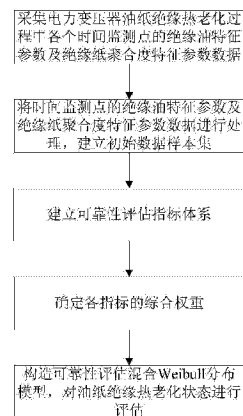
权利要求书2页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

基于混合 Weibull 分布的变压器绝缘热老化状态可靠性评估方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于混合 Weibull 分布的变压器绝缘热老化状态可靠性评估方法, 所述方法包括如下步骤: 1) 采集油纸绝缘热老化特征数据; 2) 建立可靠性评估指标体系; 3) 确定各指标的综合权重; 4) 构造可靠性评估混合 Weibull 分布模型, 对油纸绝缘热老化状态进行评估。本发明通过分析每个油纸绝缘热老化特征参数对热老化状态的灵敏度, 建立了可靠性评估指标体系, 并综合各指标的数据和权重进行油纸绝缘热老化状态可靠性评估。同现有的绝缘纸聚合度、油中糠醛含量等参数油纸绝缘热老化状态评价方法相比, 能够更加充分地考虑各指标可靠度对油纸绝缘总体可靠性的影响, 因此能够得到相对精确的油纸绝缘热老化可靠度数值, 从而有效提高油浸式电力变压器绝缘老化状态的监测及评估的准确率。



1. 基于混合 Weibull 分布的变压器绝缘热老化状态可靠性评估方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤 1). 采集电力变压器油纸绝缘热老化过程中各个时间监测点的绝缘油特征参数及绝缘纸聚合度特征参数数据;所述绝缘油特征参数包括油击穿电压、油酸值、油中糠醛含量、油中溶解特征气体含量,油中溶解特征气体包括  $H_2$ 、 $C_2H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ ;

步骤 2). 将时间监测点的绝缘油特征参数及绝缘纸聚合度特征参数数据进行处理,建立初始数据样本集;

步骤 3). 建立可靠性评估指标体系;评估指标包括油击穿电压、油中糠醛、油酸值、油中  $H_2$  含量、 $CO_2$  与  $CO$  比值、总烃含量 6 个特征参数;

步骤 4). 确定各指标的综合权重;

所述步骤 4) 具体包括以下子步骤:

步骤 41). 确定静态权重:选定波形相似系数来描述基于绝缘油理化参数与基于绝缘纸聚合度的可靠性 Weibull 分布曲线之间的相关性,并将相似系数计算结果作为指标的静态权重,则静态权重的表达式为,

$$NCC = \frac{\sum_{n=1}^N s_1(n) \cdot s_2(n)}{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^N s_1^2(n)\right) \cdot \left(\sum_{n=0}^N s_2^2(n)\right)}}, \text{ 式中, } s_1 \text{ 和 } s_2 \text{ 分别为待比较的归一化波形 1 和 2, 波}$$

形相似系数 NCC 描述两个波形的相似程度, NCC 的取值范围为 0 到 1 之间, 0 代表两个波形完全不相关, 1 则代表两个波形完全相同;

步骤 42). 确定动态权重:选用熵权法表征指标在热老化过程中数据的变化情况,确定各指标的动态权重,则动态权重的表达式为,

$$\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m], \sum_{i=1}^m \mu_i = 1, \mu_i \text{ 为第 } i \text{ 项评估指标的初始熵权,}$$

步骤 43). 确定综合权重:综合各评估指标的静态权重和动态权重得到指标的综合权重,则综合权重的表达式为

$$p_i = \frac{\omega_i \mu_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i \mu_i}, \omega_i \text{ 为某一参数指标与绝缘纸聚合度的波形相似}$$

系数;

步骤 5). 构造可靠性评估混合 Weibull 分布模型,对油纸绝缘热老化状态进行评估;

所述步骤 5) 具体包括以下子步骤:

步骤 51). 评估模型:综合 6 个评估指标,建立油纸绝缘热老化可靠性评估 Weibull 分布混合模型;所述油纸绝缘热老化可靠性评估 Weibull 分布混合模型为:  $M = p_1 R(Y_1) + \dots + p_6 R(Y_6)$ , 式中, M 代表油纸绝缘热老化可靠性评估结果;  $R(Y_1)$ ,  $R(Y_2)$ ,  $\dots$ ,  $R(Y_6)$  分别代表油纸绝缘 6 个指标的 Weibull 可靠性分布函数;  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $\dots$ ,  $p_6$  分别代表 6 个指标的综合权重;

步骤 52). 可靠性程度划分:根据油纸绝缘热老化可靠性评估 Weibull 分布混合模型将油纸绝缘热老化状态分成四个等级,分别表示油纸绝缘热老化可靠性高、较高、较低和很低

四个状态；

步骤 53). 指标可靠度 :将所采集得到的 6 个指标数据代入指标隶属度计算公式中,依次计算得到各指标在不同热老化阶段的可靠度；

步骤 54). 状态评估结果 :将不同老化阶段的指标可靠度计算结果代入评估模型中,通过加权和计算,得到各老化阶段油纸绝缘的热老化可靠度结果,即油纸绝缘的热老化可靠性状态。

## 基于混合 Weibull 分布的变压器绝缘热老化状态可靠性评估方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于变压器绝缘老化状态评估技术领域,尤其涉及一种基于混合 Weibull 分布模型的变压器绝缘热老化状态可靠性评估方法。

### 背景技术

[0002] 高压电气设备绝缘材料的老化寿命模型一直是国内外学者的研究热点之一。油纸绝缘老化状态评估技术有利于提高电力变压器的安全运行水平。油纸绝缘寿命评估模型主要包括两种研究方法:a) 根据油纸绝缘加速老化试验数据进行拟合得到寿命评估模型;b) 根据油纸绝缘老化的物理化学性质,结合空间电荷、局部放电等分析绝缘的破坏机理,并进行验证得到寿命评估模型。

[0003] 电力变压器在正常运行过程中或是在发生故障时,均会产生一定热量从而导致油纸绝缘的温度上升,进而产生化学和物理变化使得绝缘材料老化。表征油纸绝缘热老化状态的参数众多,各参数之间既相互关联又有所区别。目前虽对油纸绝缘热老化过程中的状态参量和评估方法做了大量研究,但在电力变压器内部绝缘老化评估实际应用中难以取得满意的结果。绝缘纸聚合度和抗拉强度虽可以反映绝缘纸的热老化降解程度,但由于现场取样方式的限制,在实际应用中存在难度;糠醛和油中溶解气体含量等绝缘油参数易于获取,但与电力变压器油纸绝缘热老化状态的关系还不十分明确;局部放电参数虽然被提出可用于油纸绝缘老化评估,但尚未得到现场应用的验证。

[0004] 此外,电力变压器油纸绝缘热老化状态的评估,主要依据热老化过程中确定的油纸绝缘参数的阈值。油纸绝缘热老化参数直接或间接地表征了绝缘的老化状态,但由于各参数指标包含信息的差异,以及测量手段导致的误差等,都对油纸绝缘热老化状态的准确评价带来困难。

[0005] 因此,为准确评估电力变压器油纸绝缘的热老化状态,迫切需要研究新的油纸绝缘热老化状态评估方法。针对这一问题,需要一种合适的评估方法,能够综合油纸绝缘热老化特征参数指标数据,对变压器油纸绝缘热老化状态进行评估。

### 发明内容

[0006] 鉴于此,本发明提供一种基于混合 Weibull 分布模型的变压器绝缘热老化状态可靠性评估方法,与现有方法相比,能够更加充分地考虑各指标可靠度对油纸绝缘总体可靠性的影响,因此能够得到相对精确的油纸绝缘热老化可靠度数值。

[0007] 本发明的目的是通过这样的技术方案实现的,基于混合 Weibull 分布的变压器绝缘热老化状态可靠性评估方法,包括以下步骤:步骤1). 采集电力变压器油纸绝缘热老化过程中各个时间监测点的绝缘油特征参数及绝缘纸聚合度特征参数数据;步骤2). 将时间监测点的绝缘油特征参数及绝缘纸聚合度特征参数数据进行处理,建立初始数据样本集;步骤3). 建立可靠性评估指标体系;步骤4). 确定各指标的综合权重;步骤5). 构造可靠性

评估混合 Weibull 分布模型,对油纸绝缘热老化状态进行评估。

[0008] 进一步,所述步骤 1) 中绝缘油特征参数包括油击穿电压、油酸值、油中糠醛含量、油中溶解特征气体含量,油中溶解特征气体包括  $H_2$ 、 $C_2H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 。

[0009] 进一步,步骤 3) 中建立可靠性评估指标体系选取的评估指标包括油击穿电压、油中糠醛、油酸值、油中  $H_2$  含量、 $CO_2$  与  $CO$  比值、总烃含量 6 个特征参数。

[0010] 进一步,所述步骤 4) 具体包括以下子步骤:步骤 41). 确定静态权重:选定波形相似系数来描述基于绝缘油理化参数与基于绝缘纸聚合度的可靠性 Weibull 分布曲线之间的相关性,并将相似系数计算结果作为指标的静态权重,则静态权重的表达式为,

$$NCC = \frac{\sum_{n=1}^N s_1(n) \cdot s_2(n)}{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^N s_1^2(n)\right) \cdot \left(\sum_{n=0}^N s_2^2(n)\right)}}$$

式中,  $s_1$  和  $s_2$  分别为待比较的归一化波形 1 和 2, 波形相似

系数 NCC 描述两个波形的相似程度, NCC 的取值范围为 0 到 1 之间, 0 代表两个波形完全不相干, 1 则代表两个波形完全相同; 步骤 42). 确定动态权重: 选用熵权法表征指标在热老化过程中数据的变化情况, 确定各指标的动态权重, 则动态权重的表达式为,  $\mu = [\mu_1, \mu_2, \dots$

,  $\mu_m]$ ,  $\sum_{i=1}^m \mu_i = 1$ ,  $\mu_i$  为第  $i$  项评估指标的初始熵权, 步骤 43). 确定综合权重: 综合各评估指

标的静态权重和动态权重得到指标的综合权重, 则综合权重的表达式为  $p_i = \frac{\omega_i \mu_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i \mu_i}$ ,  $\omega_i$

为某一参数指标与绝缘纸聚合度的波形相似系数。

[0011] 进一步,所述步骤 5) 具体包括以下子步骤:步骤 51). 评估模型:综合 6 个评估指标,建立油纸绝缘热老化可靠性评估 Weibull 分布混合模型;所述油纸绝缘热老化可靠性评估 Weibull 分布混合模型为:  $M = p_1 R(Y_1) + \dots + p_6 R(Y_6)$ , 式中,  $M$  代表油纸绝缘热老化可靠性评估结果;  $R(Y_1), R(Y_2), \dots, R(Y_6)$  分别代表油纸绝缘 6 个指标的 Weibull 可靠性分布函数;  $p_1, p_2, \dots, p_6$  分别代表 6 个指标的综合权重;步骤 52). 可靠性程度划分:根据油纸绝缘热老化可靠性评估 Weibull 分布混合模型将油纸绝缘热老化状态分成四个等级,分别表示油纸绝缘热老化可靠性高、较高、较低和很低四个状态;步骤 53). 指标可靠度:将所采集得到的 6 个指标数据代入指标隶属度计算公式中,依次计算得到各指标在不同热老化阶段的可靠度;步骤 54). 状态评估结果:将不同老化阶段的指标可靠度计算结果代入评估模型中,通过加权和计算,得到各老化阶段油纸绝缘的热老化可靠度结果,即油纸绝缘的热老化可靠性状态。

[0012] 由于采用了以上技术方案,本发明具有以下有益技术效果:

[0013] 根据本发明的评估方法,同现有的绝缘纸聚合度、油中糠醛含量等参数油纸绝缘热老化状态评价方法相并列,区别特征在于涉及更多的特征量指标,能够更加充分地考虑各指标可靠度对油纸绝缘总体可靠性的影响,因此能够得到相对精确的油纸绝缘热老化可靠度数值。

附图说明

[0014] 为了使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图对本发明作进一步的详细描述,其中:

[0015] 图 1 为本发明实施例的评估流程图。

### 具体实施方式

[0016] 以下将结合附图,对本发明的优选实施例进行详细的描述;应当理解,优选实施例仅为了说明本发明,而不是为了限制本发明的保护范围。

[0017] 通过定期分析变压器油纸绝缘系统中绝缘油老化特征参量变化情况,能够评估油纸绝缘的热老化状态。图 1 是本发明进行油纸绝缘热老化状态可靠性评估的流程图。其具体步骤如下:

[0018] 步骤 1):采集油纸绝缘热老化特征数据。采集电力变压器油纸绝缘热老化过程中各个时间监测点的绝缘油特征参数及绝缘纸聚合度特征参数数据,其中绝缘油特征参数包括油击穿电压、油酸值、油中糠醛含量、油中溶解特征气体含量,油中溶解特征气体包括  $H_2$ 、 $C_2H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 。

[0019] 步骤 2):记录采集得到的数据并建立初始数据样本集,记录中包含的信息有时间监测点以及油纸绝缘热老化特征参数的监测数据。

[0020] 步骤 3):建立可靠性评估指标体系。所选取的评估指标能全面、真实地反映油纸绝缘热老化状态,且容易获取。根据油纸绝缘热老化特点,本发明选取的 6 个指标包括油击穿电压、油中糠醛、油酸值、油中  $H_2$  含量、 $CO_2$  与  $CO$  比值、总烃含量 6 个特征参数。

[0021] 步骤 4):确定各指标的综合权重。选定波形相似系数来描述基于绝缘油理化参数与基于绝缘纸聚合度的可靠性 Weibull 分布曲线之间的相关性,并将相似系数计算结果作为指标的静态权重。选用熵权法表征指标在热老化过程中数据的变化情况,确定各指标的动态权重。综合各评估指标的静态权重和动态权重得到指标的综合权重。

[0022] 步骤 5):构造可靠性评估混合 Weibull 分布模型,对油纸绝缘热老化状态进行评估。综合 6 个评估指标可靠性函数,建立油纸绝缘热老化可靠性评估 Weibull 分布混合模型。油纸绝缘热老化可靠性评估模型可以计算出油纸绝缘热老化可靠性具体数值,本发明根据计算结果将油纸绝缘热老化状态分成四个等级,分别表示油纸绝缘热老化可靠性高、较高、较低和很低四个状态,如表 1 所示。将步骤 1 中所采集得到的 6 个指标数据,如油击穿电压、油中糠醛、油酸值等,代入指标隶属度计算公式中,依次计算得到各指标在不同热老化阶段的可靠度。将不同老化阶段的指标可靠度计算结果代入评估模型中,通过加权和计算,得到各老化阶段油纸绝缘的热老化可靠度结果,即油纸绝缘的热老化可靠性状态。

[0023]

评估结果	0.8~1	0.5~0.8	0.2~0.5	0~0.2
绝缘状态	可靠度高	可靠度较高	可靠度较低	可靠度很低

[0024] 表 1 变压器油纸绝缘热老化可靠性状态划分

[0025] 指标综合权重确定方法

[0026] 在评估之前,需要首先确定各指标的权重。由于不同参数反映油纸绝缘热老化可靠性的灵敏程度不一样,各参数数据包含的信息量也有差异,因此参数指标可靠性在油纸

绝缘总体可靠性评估模型中的重要度也不一样。针对油纸绝缘热老化可靠性评估,将各参数变化情况和指标相似度作为权重确定的两个因素,表征各参数对总体可靠性的重要程度。根据熵权法表征指标数据的变化情况,确定各指标的初始权重,根据参数波形相似系数,对初始权重进行修正得到指标的综合权重。

[0027] 参数波形相似系数计算中有如下假定:各指标数据均符合二参数 Weibull 分布。

[0028] 对于油纸绝缘热老化可靠性评估,假定已获得  $m$  个指标在  $n$  个阶段的初始数据矩阵  $X = \{x_{ij}\}_{m \times n}$ ,由于各指标量纲、数量级及指标优劣的取向均有很大差异,对各指标初始数据按下式做标准化处理。

$$[0029] \quad x'_{ij} = x_{ij} / \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

[0030] 得到如下式所示指标数据标准化矩阵  $X'$ 。

$$[0031] \quad X' = \{x'_{ij}\}_{m \times n} \quad (2)$$

[0032] 计算第  $i$  项指标的信息熵值,

$$[0033] \quad e_i = -k \sum_{j=1}^n x'_{ij} \ln x'_{ij} \quad (3)$$

[0034] 信息熵  $e_i$  可度量第  $i$  项指标信息 (指标的数据) 的效用价值,当信息完全无序时,  $e_i = 1$ 。此时,  $e_i$  的信息 (也就是第  $i$  项指标的数据所包含的信息) 对综合评估的效用值为零。所以,某项评估指标的信息效用价值取决于该评估指标信息熵  $e_i$  与 1 的差值  $h_i$ ,

$$[0035] \quad h_i = 1 - e_i \quad (4)$$

[0036] 熵权法的本质是利用评估指标数据所包含的价值系数来估算指标权重。当指标价值系数越高时,对评估结论的重要性和贡献就越大,计算得到第  $i$  项评估指标的初始熵权。

$$[0037] \quad \mu_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^m h_i} \quad (5)$$

[0038] 由此可得到各参数指标的初始熵权 (动态权重) 矩阵,

$$[0039] \quad \mu = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m], \quad \sum_{i=1}^m \mu_i = 1 \quad (6)$$

[0040] 指标静态权重,即各参数波形相似系数 (NCC) 的计算如下式所示。

$$[0041] \quad NCC = \frac{\sum_{n=1}^N s_1(n) \cdot s_2(n)}{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^N s_1^2(n)\right) \cdot \left(\sum_{n=0}^N s_2^2(n)\right)}} \quad (7)$$

[0042] 式中,  $s_1$  和  $s_2$  分别为待比较的归一化波形 1 和 2。波形相似系数 NCC 描述两个波形的相似程度, NCC 的取值范围为 0 到 1 之间, 0 代表两个波形完全不相关, 1 则代表两个波形完全相同。在本发明方法中,  $s_1$  波形均设定为基于绝缘纸聚合度的油纸绝缘可靠性 Weibull 分布曲线,  $s_2$  依次设定为基于油击穿电压、油酸值、油中糠醛含量、 $H_2$  含量、 $CO_2/CO$  和总烃含量的油纸绝缘可靠性 Weibull 分布曲线。

[0043] 计算得到指标初始熵权 (动态权重) 后,采用油纸绝缘热老化参数波形相似系数

NCC(静态权重)对指标初始熵权进行修正。设某一参数指标与绝缘纸聚合度的波形相似系数为  $\omega_i$ , 则按式(8)对初始熵权  $\mu_i$  进行修正可得到指标综合权重  $p_i$ 。

$$[0044] \quad p_i = \frac{\omega_i \mu_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i \mu_i} \quad (8)$$

[0045] 由此可得到油纸绝缘热老化参数指标综合权重矩阵 P,

$$[0046] \quad P = [p_1, p_2, \dots, p_m], \quad \sum_{i=1}^m p_i = 1 \quad (9)$$

[0047] 基于混合 Weibull 分布的评估方法

[0048] 油纸绝缘热老化可靠性由多个参数共同决定,难以采用单一 Weibull 分布模型来对油纸绝缘热老化可靠性进行评估。Weibull 分布混合模型、风险竞争模型、并联模型和分段模型等,能够综合各参数对油纸绝缘热老化状态的影响。其中,混合 Weibull 分布模型可用于描述具有多种失效因素的产品失效,本发明采用 Weibull 混合模型评估油纸绝缘热老化可靠性。

[0049] 油纸绝缘热老化可靠性评估模型包括 6 个评估指标。根据 Weibull 分布混合模型的基本原理,油纸绝缘热老化可靠性评估混合 Weibull 分布模型可表示为

$$[0050] \quad M = p_1 R(Y_1) + \dots + p_6 R(Y_6) \quad (10)$$

[0051] 式中, M 代表油纸绝缘热老化可靠性评估结果;  $R(Y_1), R(Y_2), \dots, R(Y_6)$  分别代表油纸绝缘 6 个指标的 Weibull 可靠性分布函数;  $p_1, p_2, \dots, p_6$  分别代表 6 个指标的综合权重。

[0052] 油纸绝缘热老化可靠性评估模型可以计算出油纸绝缘热老化可靠性具体数值,但可靠性数值与油纸绝缘热老化状态的对应关系未能确定。定义油纸绝缘热老化状态等级如下,

$$[0053] \quad H = \{H_1, H_2, \dots, H_n, \dots, H_N\} \quad (11)$$

[0054] 本发明中取  $N = 4$ , 即油纸绝缘热老化状态分成四个等级,分别表示油纸绝缘热老化可靠性高、较高、较低和很低四个状态。

[0055] 电力变压器油纸绝缘可靠性评估与失效分析的目的是为了优化维修策略,实现绝缘的状态维修。以可靠性为中心的电力变压器绝缘维修策略,一方面可节省不必要的维修费用,并避免由不必要的维修造成绝缘新的破坏,另一方面可避免由延误维修引起绝缘维修、更新费用的增加或绝缘失效带来的巨大经济损失。以最小的维修成本保证电力变压器绝缘可靠性,并在可靠性和维修费用之间建立平衡关系。根据油纸绝缘热老化状态可靠性评估结果,制定相应的检修策略,如表 2 所示。

[0056]

评估结果	0.8~1	0.5~0.8	0.2~0.5	0~0.2
绝缘状态	可靠度高	可靠度较高	可靠度较低	可靠度很低
检修策略	①	②	③	④
推荐周期	正常周期或延长一年	不大于正常周期	适时安排	尽快安排

[0057] 表 2 电力变压器绝缘检修策略

[0058] 检修策略①、②、③和④分别描述如下:



[0059] ①油纸绝缘热老化状态评估结果为可靠度很高时,根据电力变压器运行的实际情况,对于绝缘的检修可按照正常周期或延长一年执行。

[0060] ②油纸绝缘热老化状态评估结果为可靠度较高时,根据电力变压器运行的实际情况,对于绝缘的检修可按照正常周期执行,并加以适当注意。

[0061] ③油纸绝缘热老化状态评估结果为可靠度较低时,应适时安排检修,并跟踪评估绝缘可靠度状态变化情况,并辅助其他监测手段判断电力变压器绝缘是否存在故障及其严重程度和部位等。

[0062] ④油纸绝缘热老化状态评估结果为可靠度很低时,应尽快安排检修。

[0063] 实验及结果分析

[0064] 为了说明电力变压器油纸绝缘热老化可靠性评估模型的具体实现过程,本发明选用 90℃ 下油纸绝缘加速热老化试验数据对基于混合 Weibull 分布的可靠性评估模型进行分析。在热老化试验的 4 个阶段采集油纸绝缘特征参数指标数据,构建初始数据样本集。

[0065] 首先计算各指标的熵权(动态权重),如表 3 所示。

	参数	$e_i$	$h_i$	$\mu_i$
	$Y_1$ , 击穿电压	0.9792	0.0208	0.0574
	$Y_2$ , $CO_2/CO$	0.9697	0.0303	0.0836
[0066]	$Y_3$ , 酸值	0.8887	0.1113	0.3072
	$Y_4$ , $H_2$	0.9114	0.0886	0.2445
	$Y_5$ , 糠醛	0.9090	0.091	0.2512
	$Y_6$ , 总烃	0.9797	0.0203	0.0560

[0067] 表 3 六个参数指标的熵权(动态权重)

[0068] 计算得到各油纸绝缘热老化参数指标初始熵权  $\mu_i$  后,通过式 (8) 对初始权重进行修正得到各指标的综合权重。其中,经过计算得到的油纸绝缘参数指标初始熵权矩阵  $\mu = [0.0574, 0.0836, 0.3072, 0.2445, 0.2512, 0.0560]$ , 计算得到的绝缘油参数与绝缘纸聚合度的波形相似系数矩阵  $\omega = [0.9772, 0.9904, 0.9174, 0.9992, 0.9667, 0.9830]$ 。最后,根据式 (8) 计算得到油纸绝缘热老化可靠性评估中 6 个指标的综合权重矩阵  $P = [0.0583, 0.0860, 0.2927, 0.2537, 0.2522, 0.0572]$ 。

[0069] 然后,根据油纸绝缘在 90℃ 下的热老化验证数据,依次计算各老化参数指标在不同热老化阶段的 Weibull 分布可靠度,同时也计算了油浸绝缘纸聚合度在各老化阶段的 Weibull 分布可靠度,计算结果如表 4 所示。

[0070]	老化参数	老化时间 /天			
		55	174	264	428
	聚合度	0.8811	0.5900	0.5839	0.5025
	$Y_1$ , 击穿电压	0.8650	0.8471	0.6900	0.5106
	$Y_2$ , $CO_2/CO$	0.9284	0.4647	0.4486	0.4006
[0071]	$Y_3$ , 酸值	0.9391	0.5964	0.4994	0.4299
	$Y_4$ , $H_2$	0.9489	0.7635	0.7359	0.5895
	$Y_5$ , 糠醛	0.9760	0.6154	0.4000	0.3367
	$Y_6$ , 总烃	0.9513	0.8678	0.6736	0.5015

[0072] 表 4 油纸绝缘各指标的 Weibull 分布可靠度

[0073] 将各参数指标在不同老化阶段的可靠度计算结果代入式 (10) 中,通过加权和计算,得到油纸绝缘热老化可靠度随老化时间的变化情况,计算结果如表 5 所示。

	老化时间 /天	55	174	264	428
	总体评估结果	0.9464	0.6625	0.5511	0.4532
[0074]	对应状态	$H_1$ (可靠度高)	$H_2$ (可靠较高)	$H_2$ (可靠较高)	$H_3$ (可靠度较低)
	寿命阶段	早期	中期	中后期	后期

[0075] 表 5 油纸绝缘热老化状态可靠性评估结果

[0076] 由表 5 所示计算结果可知,通过油纸绝缘热老化可靠性评估 Weibull 混合模型计算得到的油纸绝缘热老化可靠度状态,与油浸绝缘纸聚合度的变化趋势一致。计算结果和对比分析表明,油纸绝缘热老化可靠性评估 Weibull 混合模型,可计算得到精确的油纸绝缘可靠度值,且计算得到的油纸绝缘可靠度与油纸绝缘热老化实际寿命阶段基本相符。

[0077] 以上所述仅为本发明的优选实施例,并不用于限制本发明,显然,本领域的技术人员可以对本发明进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样,倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内,则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

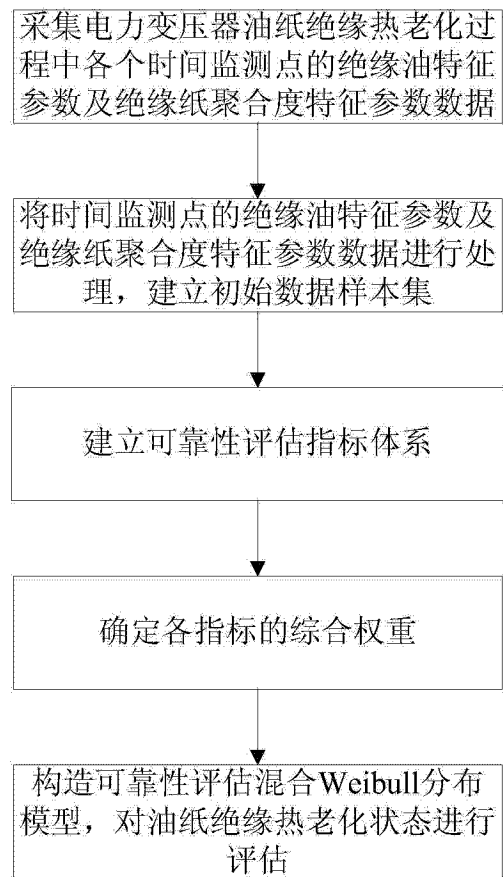


图 1