



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104198840 A

(43) 申请公布日 2014. 12. 10

(21) 申请号 201410386551. 6

(22) 申请日 2014. 08. 07

(71) 申请人 华北电力大学(保定)

地址 071003 河北省保定市永华北大街 619 号

(72) 发明人 张卫华 苑津莎

(74) 专利代理机构 北京众合诚成知识产权代理有限公司 11246

代理人 朱琨

(51) Int. Cl.

G01R 31/00(2006. 01)

G06F 19/00(2011. 01)

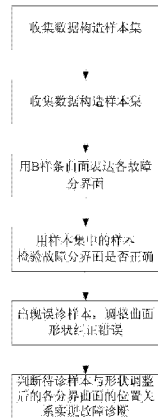
权利要求书3页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

一种应用 B 样条理论改进的变压器三比值故障诊断方法

(57) 摘要

本发明属于电力主设备故障诊断技术领域, 尤其涉及一种应用 B 样条理论改进的变压器三比值故障诊断方法, 包括: 收集油中溶解气体样本数据构造样本库, 并用三比值法构成三维空间, 得到各故障模式的特征区域, 建立用 B 样条曲面表达的各故障分界面方程; 计算样本与故障分界面的位置关系判断变压器的故障类型; 对于诊断错误的故障样本, 应用 B 样条曲面的反算方法重新计算曲面参数, 将误诊样本纳入到正确的故障特征区域中; 计算待诊样本与形状调整后的各分界面的位置关系实现变压器的故障类型的判断。本发明以改良三比值法确定的故障特征区域为基础, 通过柔性自适应的调整故障区域间的分界面形状实现了动态学习功能, 方法具有很好的实用性和推广性。



1. 一种应用 B 样条理论改进的变压器三比值故障诊断方法,其特征在于,主要包括:
 步骤 1、收集实际工程中采集到的油中溶解气体样本数据来构造样本库;
 步骤 2、以变压器的 5 种油中溶解特征气体的三组气体含量比值来构成三维立体空间;
 步骤 3、根据改良三比值法得到各故障模式的特征区域,建立用 B 样条曲面表达的各故障分界面方程;

步骤 4、计算样本库中的样本与故障分界面的位置关系判断变压器的故障类型,用以检验故障分界面是否正确;

步骤 5、对于诊断错误的故障样本,应用 B 样条曲面的反算方法重新计算曲面参数,实现曲面形态的调整,将误诊样本纳入到正确的故障特征区域中;

步骤 6、计算待诊样本与形状调整后的各分界曲面的位置关系实现变压器的故障类型的判断。

2. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述步骤 1 中的样本数据来源于在实际工程,包括通过油中溶解气体分析方法获取的五种气体组分 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 的含量数据和该数据对应的实际故障类型,其中实际故障类型包括:低于 $150^\circ C$ 的低温过热、 $150 \sim 300^\circ C$ 的低温过热、 $300 \sim 700^\circ C$ 的中温过热、高于 $700^\circ C$ 的高温过热、局部放电、电弧放电、电弧放电兼过热、低能放电、低能放电兼过热、不能识别的故障模式 1、不能识别的故障模式 2,共 11 类,分别用 F1 ~ F11 表示。

3. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述步骤 2 中以 $x = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$, $y = \frac{CH_4}{H_2}$, $z = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ 三组气体含量比值为坐标轴建立三维立体空间,定义比值上限为 100, x 、 y 、 z 的取值范围为: $x \in [0, 100]$, $y \in [0, 100]$, $z \in [0, 100]$ 。

4. 根据权利要求 1 所述的方法,其特征在于,所述步骤 3 中根据三比值法的故障特征区域分布建立式 (1) 定义的 6 个平面为各故障间的分界面:

$$\begin{cases} \text{平面 } S_1: & x = 0.1 \\ \text{平面 } S_2: & x = 3 \\ \text{平面 } S_3: & y = 0.1 \\ \text{平面 } S_4: & y = 1 \\ \text{平面 } S_5: & z = 1 \\ \text{平面 } S_6: & z = 3 \end{cases} \quad (1)$$

该故障分界面要求能够柔性光滑调整,达到二阶导数连续,故选择双三次 B 样条曲面表示各故障分界面, B 样条曲面的表达式为:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v), \quad u_k \leq u \leq u_{m+1}, v_l \leq v \leq v_{n+1} \quad (2)$$

其中, $d_{i,j}$ 称为曲面的控制顶点,逐次用线段连接点列 $d_{i,j}$ 中相邻两点组成的空间网格叫做曲面的控制网格, $N_{i,k}(u)$ 、 $N_{j,l}(v)$ 分别是由节点矢量 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{m+k+1}\}$ 和 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n+l+1}\}$ 定义的 B 样条基函数,次数分别为 k 和 l , $N_{i,k}(u)$ 表示第 i 个 k 次 B 样条

基函数, $N_{j,1}(v)$ 表示第 j 个 1 次 B 样条基函数, 其表达式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{j,0}(v) = \begin{cases} 1, & \text{若 } v_j \leq v < v_{j+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{j,l}(v) = \frac{v - v_j}{v_{j+l} - v_j} N_{j,l-1}(v) + \frac{v_{j+l+1} - v}{v_{j+l+1} - v_{j+1}} N_{j+1,l-1}(v) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{array} \right.$$

其中, $N_{i,0}(u)$ 是一个阶梯函数, 它在半开区间 $u \in [u_i, u_{i+1}]$ 外都为零; 当 $k > 0$ 时, $N_{i,k}(u)$ 是两个 $k-1$ 次基函数的线性组合; $N_{j,0}(v)$ 是一个阶梯函数, 它在半开区间 $v \in [v_j, v_{j+1}]$ 外都为零; 当 $l > 0$ 时, $N_{j,l}(v)$ 是两个 $l-1$ 次基函数的线性组合;

其中, 用 B 样条曲面表达故障分界面的过程包括以下步骤:

步骤 301、在初始分界平面上均匀的构造 $(m+1) \times (n+1)$ 的数据网格点阵 $p_{i,j}$ ($i = 0, 2, \dots, m; j = 0, 2, 3 \dots, n$), 并按照其分布情况, 设一个方向为 u 方向, 另一个方向为 v 方向;

步骤 302、确定节点矢量 U 和 V ; 任选一个 j 和 i , 分别有数据点列 $p_{0,j}, \dots, p_{m,j}$ 和 $p_{i,0}, \dots, p_{i,n}$, 计算每个点的参数值 $\bar{u}_{i,j}$ ($i=0, 1, \dots, m$) 和 $\bar{v}_{i,j}$ ($j=0, 1, \dots, n$), 其计算公式为

$$\begin{aligned} \bar{u}_{0,j} = 0, \bar{u}_{m,j} = 1, \bar{u}_{i,j} = \frac{i}{m}, \quad i = 1, 2, \dots, m-1 \\ \bar{v}_{i,0} = 0, \bar{v}_{i,n} = 1, \bar{v}_{i,j} = \frac{j}{n}, \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (4)$$

然后, 对所有的 $\bar{u}_{i,j}$ ($j=0, 1, \dots, n$) 和 $\bar{v}_{i,j}$ ($i=0, 1, \dots, m$) 取平均值得到 \bar{u}_i ($i=0, 1, \dots, m$) 和 \bar{v}_j ($j=0, 1, \dots, n$), 即

$$\begin{aligned} \bar{u}_i = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \bar{u}_{i,j}, \quad i = 0, 1, \dots, m \\ \bar{v}_j = \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m \bar{v}_{i,j}, \quad j = 0, 1, \dots, n \end{aligned} \quad (5)$$

最后, 计算节点矢量 U 和 V , 公式为

$$\begin{aligned} u_0 = \dots = u_k = 0, u_{n+1} = \dots = u_{n+k+1} = 1, \quad u_{j+k} = \frac{1}{k} \sum_{i=j}^{j+k-1} \bar{u}_i, \quad j = 1, 2, \dots, n-k \\ v_0 = \dots = v_l = 0, v_{m+1} = \dots = v_{m+l+1} = 1, \quad v_{i+l} = \frac{1}{l} \sum_{i=j}^{i+l-1} \bar{v}_j, \quad i = 1, 2, \dots, m-l \end{aligned} \quad (6)$$

步骤 303、计算曲面的控制顶点按照以下两步求解:

第一步, 对于 $j = 0, 1, \dots, n$, 构造 $n+1$ 条以 u 为参数的等参数线 $q_j(u)$, 其控制顶点为

$\bar{d}_{i,j} (i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n)$, 即

$$q_j(u_i) = \sum_{i=0}^m \bar{d}_{i,j} N_{i,k}(u_i) = p_{i,j}, \quad i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n \quad (7)$$

式 (7) 是系数矩阵为 $(n+1) \times (n+1)$ 的线性方程组, 求解得 $\bar{d}_{i,j}$;

第二步, 以 v 为参数构造 $m+1$ 条 B 样条曲线 $r_i(v)$ 插值于控制点 $\bar{d}_{i,j}$, 即

$$r_i(v_j) = \sum_{j=0}^n \bar{d}_{i,j} N_{j,l}(v_j) = \bar{d}_{i,j}, \quad i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n \quad (8)$$

式 (8) 是系数矩阵为 $(m+1) \times (m+1)$ 的线性方程组, 求解得 $d_{i,j} (i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n)$, 即所求 B 样条曲面的控制顶点。

5. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述步骤 5 中, 若初始时故障 F_x 和 F_y 两类故障间存在一个故障分界面, F_x 和 F_y 属于故障 $F_1 \sim F_{11}$, 当一个已被验证了故障的样本 p 产生误判时, 即点 p 对应的实际故障类型为 F_y , 但其坐标位于 F_x 故障特征区域内; 此时, 柔性自适应地调整分界面的形状, 使该故障样本被包含到 F_y 对应的特征区域内, 调整后的曲面凸起部分的最高点为样本数据点 p , 并且曲面具有柔性光滑的过渡, 为了保证凸起部分的截面具有钟形曲线形状, 选择高斯函数作为凸起截面的形态函数:

$$f(x) = ae^{-\frac{x^2}{c^2}} \quad (9)$$

其中, a 是曲面凸起的高度; 参数 c 确定样本点影响范围; x 是插值点距离曲面凸起中心的距离;

其中, 曲面调整就是根据故障样本数据, 采用曲面插值反算方法重构曲面, 具体步骤包括:

步骤 501、将样本数据点 p 向初始故障分界面投影, 得到 p' ;

步骤 502、计算 pp' 的距离 d , 即为曲面凸起的高度 a , 为保证调整后的曲面将该点包含进去, 取 a 的数值略大于 d ;

步骤 503、按照式 (9) 计算曲面数据网格节点处的坐标调整值, 并据此计算出新的数据网格节点坐标;

步骤 504、按照公式 (4) ~ (8) 计算出新的曲面控制网格顶点坐标及节点矢量 U 、 V , 完成曲面的重构。

6. 根据权利要求 1 所述的方法, 其特征在于, 所述步骤 6 中故障模式间的分界面经过调整后, 对应的故障特征区域变为由曲面围成的不规则形状, 通过计算样本坐标与各个故障分界面的位置关系来确定其所处的故障特征区域, 进而判断变压器故障类型, 具体步骤包括:

步骤 601、将样本数据点 p 向初始故障分界面投影, 得到点 p' ;

步骤 602、计算 p' 点的曲面参数 $u_{p'}$ 和 $v_{p'}$;

步骤 603、根据 $u_{p'}$ 、 $v_{p'}$ 以及曲面的节点向量 U 、 V , 通过式 (4) 计算曲面上点 p'' 的坐标;

步骤 604、比较 p 和 p'' 的位置关系, 确定 p 与故障分界面的位置关系, 再根据位置关系进行故障诊断。

一种应用 B 样条理论改进的变压器三比值故障诊断方法

技术领域

[0001] 本发明属于电力主设备故障诊断技术领域,尤其涉及一种应用 B 样条理论改进的变压器三比值故障诊断方法。

背景技术

[0002] 电力变压器是电力系统中的最重要的设备之一,是发电厂与电力用户之间输送电能与分配电能的重要设备,它担负着变电的重要任务。其在运行中一旦发生故障,轻则影响生产,给人们的生活带来不便;重则危及人们的生命和财产安全,妨碍整个国民经济的发展。因此,通过有效的故障诊断技术,及时准确的发现变压器内部的潜伏性故障及其故障类型具有重要意义。油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)是目前对油浸式变压器进行故障诊断最方便、有效的手段之一,能够比较准确、可靠地发现逐步发展的潜伏性故障,防止由此引起重大事故。其中改良三比值法是判断变压器故障类型的主要方法之一,具有以下优点:(1)具有较高的诊断准确率;(2)改良三比值法中定义的各种故障模式之间具有清晰的分界,不会产生模棱两可的判断。因此,作为国标推荐的判断油浸式变压器故障类型的主要方法,三比值法在工程实践中有着广泛应用。但改良三比值法在实际应用过程中会产生诊断错误的情况,作为一种静态的故障诊断方法,其不具备自适应的学习机制,因此不能纠正相应的诊断错误。

发明内容

[0003] 针对改良三比值法在变压器故障诊断中存在的问题,本发明提出一种应用 B 样条理论改进的变压器三比值故障诊断方法,主要包括:

[0004] 步骤 1、收集实际工程中采集到的油中溶解气体样本数据来构造样本库;

[0005] 步骤 2、以变压器的 5 种油中溶解特征气体的三组气体含量比值来构成三维立体空间;

[0006] 步骤 3、根据改良三比值法得到各故障模式的特征区域,建立用 B 样条曲面表达的各故障分界面方程;

[0007] 步骤 4、计算样本库中的样本与故障分界面的位置关系判断变压器的故障类型,用以检验故障分界面是否正确;

[0008] 步骤 5、对于诊断错误的故障样本,应用 B 样条曲面的反算方法重新计算曲面参数,实现曲面形态的调整,将误诊样本纳入到正确的故障特征区域中;

[0009] 步骤 6、计算待诊样本与形状调整后的各分界曲面的位置关系实现变压器的故障类型的判断。

[0010] 所述步骤 1 中的样本数据来源于在实际工程,包括通过油中溶解气体分析方法获取的五种气体组分 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 的含量数据和该数据对应的实际故障类型,其中实际故障类型包括:低于 $150^\circ C$ 的低温过热、 $150 \sim 300^\circ C$ 的低温过热、 $300 \sim 700^\circ C$ 的中温过热、高于 $700^\circ C$ 的高温过热、局部放电、电弧放电、电弧放电兼过热、低能放电、低能放电兼

过热、不能识别的故障模式 1、不能识别的故障模式 2, 共 11 类, 分别用 F1 ~ F11 表示。

[0011] 所述步骤 2 中以 $x = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$, $y = \frac{CH_4}{H_2}$, $z = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ 三组气体含量比值为坐标轴建立三维立体空间, 定义比值上限为 100, x 、 y 、 z 的取值范围为: $x \in [0, 100]$, $y \in [0, 100]$, $z \in [0, 100]$ 。

[0012] 所述步骤 3 中根据三比值法的故障特征区域分布建立式 (1) 定义的 6 个平面为各故障间的分界面:

[0013]

$$\begin{cases} \text{平面 } S_1: & x = 0.1 \\ \text{平面 } S_2: & x = 3 \\ \text{平面 } S_3: & y = 0.1 \\ \text{平面 } S_4: & y = 1 \\ \text{平面 } S_5: & z = 1 \\ \text{平面 } S_6: & z = 3 \end{cases} \quad (1)$$

[0014] 该故障分界面要求能够柔性光滑调整, 达到二阶导数连续, 故选择双三次 B 样条曲面表示各故障分界面, B 样条曲面的表达式为:

$$[0015] \quad S(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v), \quad u_k \leq u \leq u_{m+1}, v_l \leq v \leq v_{n+1} \quad (2)$$

[0016] 其中, $d_{i,j}$ 称为曲面的控制顶点, 逐次用线段连接点列 $d_{i,j}$ 中相邻两点组成的空间网格叫做曲面的控制网格, $N_{i,k}(u)$ 、 $N_{j,l}(v)$ 分别是由节点矢量 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{m+k+1}\}$ 和 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n+l+1}\}$ 定义的 B 样条基函数, 次数分别为 k 和 l , $N_{i,k}(u)$ 表示第 i 个 k 次 B 样条基函数, $N_{j,l}(v)$ 表示第 j 个 l 次 B 样条基函数, 其表达式为:

[0017]

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \\ N_{j,0}(v) = \begin{cases} 1, & \text{若 } v_j \leq v < v_{j+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{j,l}(v) = \frac{v - v_j}{v_{j+l} - v_j} N_{j,l-1}(v) + \frac{v_{j+l+1} - v}{v_{j+l+1} - v_{j+1}} N_{j+1,l-1}(v) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

[0018] 其中, $N_{i,0}(u)$ 是一个阶梯函数, 它在半开区间 $u \in [u_i, u_{i+1}]$ 外都为零; 当 $k > 0$ 时, $N_{i,k}(u)$ 是两个 $k-1$ 次基函数的线性组合; $N_{j,0}(v)$ 是一个阶梯函数, 它在半开区间 $v \in [v_j, v_{j+1}]$ 外都为零; 当 $l > 0$ 时, $N_{j,l}(v)$ 是两个 $l-1$ 次基函数的线性组合;

[0019] 其中,用 B 样条曲面表达故障分界面的过程包括以下步骤:

[0020] 步骤 301、在初始分界平面上均匀的构造 $(m+1) \times (n+1)$ 的数据网格点阵 $p_{i,j}$ ($i = 0, 2, \dots, m; j = 0, 2, 3 \dots, n$), 并按照其分布情况, 设一个方向为 u 方向, 另一个方向为 v 方向;

[0021] 步骤 302、确定节点矢量 U 和 V ; 任选一个 j 和 i , 分别有数据点列 $p_{0,j}, \dots, p_{m,j}$ 和 $p_{i,0}, \dots, p_{i,n}$, 计算每个点的参数值 $\bar{u}_{i,j}$ ($i=0,1,\dots,m$) 和 $\bar{v}_{i,j}$ ($j=0,1,\dots,n$), 其计算公式为

$$\begin{aligned} \bar{u}_{0,j} = 0, \bar{u}_{m,j} = 1, \bar{u}_{i,j} = \frac{i}{m}, \quad i=1,2,\dots,m-1 \\ \bar{v}_{i,0} = 0, \bar{v}_{i,n} = 1, \bar{v}_{i,j} = \frac{j}{n}, \quad j=1,2,\dots,n-1 \end{aligned} \quad (4)$$

[0023] 然后, 对所有的 $\bar{u}_{i,j}$ ($j=0,1,\dots,n$) 和 $\bar{v}_{i,j}$ ($i=0,1,\dots,m$) 取平均值得到 \bar{u}_i ($i=0,1,\dots,m$) 和 \bar{v}_j ($j=0,1,\dots,n$), 即

$$\begin{aligned} \bar{u}_i = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \bar{u}_{i,j}, \quad i=0,1,\dots,m \\ \bar{v}_j = \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m \bar{v}_{i,j}, \quad j=0,1,\dots,n \end{aligned} \quad (5)$$

[0025] 最后, 计算节点矢量 U 和 V , 公式为

$$\begin{aligned} u_0 = \dots = u_k = 0, u_{n+1} = \dots = u_{n+k+1} = 1, \quad u_{j+k} = \frac{1}{k} \sum_{i=j}^{j+k-1} \bar{u}_i, \quad j=1,2,\dots,n-k \\ v_0 = \dots = v_l = 0, v_{m+1} = \dots = v_{m+l+1} = 1, \quad v_{i+l} = \frac{1}{l} \sum_{i=j}^{i+l-1} \bar{v}_j, \quad i=1,2,\dots,m-l \end{aligned} \quad (6)$$

[0027] 步骤 303、计算曲面的控制顶点按照以下两步求解:

[0028] 第一步, 对于 $j = 0, 1, \dots, n$, 构造 $n+1$ 条以 u 为参数的等参数线 $q_j(u)$, 其控制顶点为 $\bar{d}_{i,j}$ ($i=0,1,\dots,m; j=0,1,\dots,n$), 即

$$q_j(u_i) = \sum_{i=0}^m \bar{d}_{i,j} N_{i,k}(u_i) = p_{i,j}, \quad i=0,1,\dots,m; j=0,1,\dots,n \quad (7)$$

[0030] 式 (7) 是系数矩阵为 $(n+1) \times (n+1)$ 的线性方程组, 求解得 $\bar{d}_{i,j}$;

[0031] 第二步, 以 v 为参数构造 $m+1$ 条 B 样条曲线 $r_i(v)$ 插值于控制点 $\bar{d}_{i,j}$, 即

$$r_i(v_j) = \sum_{j=0}^n d_{i,j} N_{j,l}(v_j) = \bar{d}_{i,j}, \quad i=0,1,\dots,m; j=0,1,\dots,n \quad (8)$$

[0033] 式 (8) 是系数矩阵为 $(m+1) \times (m+1)$ 的线性方程组, 求解得 $d_{i,j}$ ($i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n$), 即所求 B 样条曲面的控制顶点。

[0034] 所述步骤 5 中, 若初始时故障 F_x 和 F_y 两类故障间存在一个故障分界面, F_x 和 F_y 属于故障 $F_1 \sim F_{11}$, 当一个已被验证了故障的样本 p 产生误判时, 即点 p 对应的实际故障类型为 F_y , 但其坐标位于 F_x 故障特征区域内; 此时, 柔性自适应地调整分界面的形状, 使该故障样本被包含到 F_y 对应的特征区域内, 调整后的曲面凸起部分的最高点为样本数据点 p , 并且曲面具有柔性光滑的过渡, 为了保证凸起部分的截面具有钟形曲线形状, 选择高斯函数作为凸起截面的形态函数:

$$[0035] \quad f(x) = ae^{-\frac{x^2}{c^2}} \quad (9)$$

[0036] 其中, a 是曲面凸起的高度;参数 c 确定样本点影响范围;x 是插值点距离曲面凸起中心的距离;

[0037] 其中, 曲面调整就是根据故障样本数据, 采用曲面插值反算方法重构曲面, 具体步骤包括:

[0038] 步骤 501、将样本数据点 p 向初始故障分界面投影, 得到 p' ;

[0039] 步骤 502、计算 pp' 的距离 d, 即为曲面凸起的高度 a, 为保证调整后的曲面将该点包含进去, 取 a 的数值略大于 d ;

[0040] 步骤 503、按照式 (9) 计算曲面数据网格节点处的坐标调整值, 并据此计算出新的数据网格节点坐标;

[0041] 步骤 504、按照公式 (4) ~ (8) 计算出新的曲面控制网格顶点坐标及节点矢量 U、V, 完成曲面的重构。

[0042] 所述步骤 6 中故障模式间的分界面经过调整后, 对应的故障特征区域变为由曲面围成的不规则形状, 通过计算样本坐标与各个故障分界面的位置关系来确定其所处的故障特征区域, 进而判断变压器故障类型, 具体步骤包括:

[0043] 步骤 601、将样本数据点 p 向初始故障分界面投影, 得到点 p' ;

[0044] 步骤 602、计算 p' 点的曲面参数 $u_{p'}$ 和 $v_{p'}$;

[0045] 步骤 603、根据 $u_{p'}$ 、 $v_{p'}$ 以及曲面的节点向量 U、V, 通过式 (4) 计算曲面上点 p'' 的坐标;

[0046] 步骤 604、比较 p 和 p'' 的位置关系, 确定 p 与故障分界面的位置关系, 再根据位置关系进行故障诊断。

[0047] 本发明的有益效果在于: 在改良三比值法定义的静态故障特征空间上充分利用了改良三比值法蕴含经验或知识, 在此基础上通过有针对性的动态调整曲面形态, 得到更加准确的故障特征区域划分, 极大地提高变压器故障诊断的准确率, 并且为改良三比值法提供了自适应的学习功能, 这种自主学习具有如下优点: (1) 不需要大量的训练样本, 只要出现新的案例即可进行, 并且学习是在原有基础上增量进行的, 速度快; (2) 学习过程是可视的, 可以通过可视化技术显示分界曲面的形态; (3) 学习效果是可控的, 曲面调整的形态和调整幅度可由计算控制, 保证了学习的效果; 并且随着学习的不断深入, 其诊断精度将不断提高, 故该方法具有很好的实用性和推广性。

附图说明

[0048] 图 1 为本发明的步骤图;

[0049] 图 2a ~ 2c 为应用 B 样条曲面的反算方法重新计算曲面过程图;

[0050] 图 3 为调整后曲面的实例图。

具体实施方式

[0051] 下面结合附图和实施例对本发明所提出的方法做进一步的说明。

[0052] 一种应用 B 样条改进的变压器三比值故障诊断方法, 如图 1 所示具体步骤包括:

- [0053] 步骤 1、收集实际工程中采集到的油中溶解气体样本数据来构造样本库；
- [0054] 步骤 2、以变压器的 5 种油中溶解特征气体的三组气体含量比值来构成三维立体空间；
- [0055] 步骤 3、根据改良三比值法得到各故障模式的特征区域，建立用 B 样条曲面表达的各故障分界面方程；
- [0056] 步骤 4、计算样本库中的样本与故障分界面的位置关系判断变压器的故障类型，用以检验故障分界面是否正确；
- [0057] 步骤 5、对于诊断错误的故障样本，应用 B 样条曲面的反算方法重新计算曲面参数，实现曲面形态的调整，将误诊样本纳入到正确的故障特征区域中；
- [0058] 步骤 6、计算待诊样本与形状调整后的各分界曲面的位置关系实现变压器的故障类型的判断。

[0059] 其中步骤 1 中的样本数据来源于在实际工程，包括通过油中溶解气体分析方法获取的五种气体组分： H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 的含量数据和该数据对应的实际故障类型，其中实际故障类型包括：低温过热（低于 $150^\circ C$ ）、低温过热（ $150 \sim 300^\circ C$ ）、中温过热（ $300 \sim 700^\circ C$ ）、高温过热（高于 $700^\circ C$ ）、局部放电、电弧放电、电弧放电兼过热、低能放电、低能放电兼过热、不能识别的故障模式 1（三比值编码 000）、不能识别的故障模式 2（三比值编码 011），共 11 类，分别用 F1 ~ F11 表示。现收集到某变压器油中溶解气体样本： $H_2 = 18.3$ 、 $CH_4 = 23$ 、 $C_2H_6 = 10.7$ 、 $C_2H_4 = 164$ 、 $C_2H_2 = 18.2$ ，实际故障类型为高温过热（F4），将该样本保存到样本库中。

[0060] 步骤 2 中以 $x = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ ， $y = \frac{CH_4}{H_2}$ ， $z = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ 三组比值为坐标轴建立三维立体空间，

定义比值上限为 100，因此， x 、 y 、 z 的取值范围为： $x \in [0, 100]$ ， $y \in [0, 100]$ ， $z \in [0, 100]$ 。

[0061] 步骤 3 中根据三比值法的故障特征区域分布建立式 (1) 定义的 6 个平面为各故障间的分界面：

[0062]

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{平面 } S_1: \quad x = 0.1 \\ \text{平面 } S_2: \quad x = 3 \\ \text{平面 } S_3: \quad y = 0.1 \\ \text{平面 } S_4: \quad y = 1 \\ \text{平面 } S_5: \quad z = 1 \\ \text{平面 } S_6: \quad z = 3 \end{array} \right. \quad (1)$$

[0063] 该故障分界面要求能够柔性光滑调整，应达到二次导数连续，故选择双三次 B 样条曲面表示各故障分界面，B 样条曲面的表达式为：

$$[0064] \quad S(u, v) = \sum_{i=0}^m d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v), \quad u_k \leq u \leq u_{m+1}, v_l \leq v \leq v_{n+1} \quad (2)$$

[0065] 其中， $d_{i,j}$ 称为曲面的控制顶点，逐次用线段连接点列 $d_{i,j}$ 中相邻两点组成的空间网格叫做曲面的控制网格， $N_{i,k}(u)$ 、 $N_{j,l}(v)$ 分别是由节点矢量 $U = \{u_0, u_1, \dots, u_{m+k+1}\}$ 和 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n+l+1}\}$ 定义的 B 样条基函数，次数分别为 k 和 l ， $N_{i,k}(u)$ 表示第 i 个 k 次 B 样条

基函数, $N_{j,1}(v)$ 表示第 j 个 1 次 B 样条基函数, 其表达式为:

[0066]

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+k}-u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1}-u}{u_{i+k+1}-u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_{j,0}(v) = \begin{cases} 1, & \text{若 } v_j \leq v < v_{j+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{j,l}(v) = \frac{v-v_j}{v_{j+l}-v_j} N_{j,l-1}(v) + \frac{v_{j+l+1}-v}{v_{j+l+1}-v_{j+1}} N_{j+1,l-1}(v) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{array} \right.$$

[0067] 其中, $N_{i,0}(u)$ 是一个阶梯函数, 它在半开区间 $u \in [u_i, u_{i+1}]$ 外都为零; 当 $k > 0$ 时, $N_{i,k}(u)$ 是两个 $k-1$ 次基函数的线性组合; $N_{j,0}(v)$ 是一个阶梯函数, 它在半开区间 $v \in [v_j, v_{j+1}]$ 外都为零; 当 $l > 0$ 时, $N_{j,l}(v)$ 是两个 $l-1$ 次基函数的线性组合;

[0068] 步骤 3 中用 B 样条曲面表达故障分界面的过程, 以构造 S_1 平面为例, 包括以下步骤:

[0069] 步骤 301、取 $m = 40, n = 40$, 在初始分界平面上均匀的构造 $(m+1) \times (n+1)$ 的数据网格点阵 $p_{i,j} (i = 0, 2, \dots, m; j = 0, 2, 3 \dots, n)$, 取 u 和 y 轴方向平行, v 和 z 轴方向平行;

[0070] 步骤 302、确定节点矢量 U 和 V 。确定节点矢量 U 和 V ; 任选一个 j 和 i , 分别有数据点列 $p_{0,j}, \dots, p_{m,j}$ 和 $p_{i,0}, \dots, p_{i,n}$, 计算每个点的参数值 $\bar{u}_{i,j} (i=0,1,\dots,m)$ 和 $\bar{v}_{i,j} (j=0,1,\dots,n)$, 其计算公式为

$$\bar{u}_{0,j} = 0, \bar{u}_{m,j} = 1, \bar{u}_{i,j} = \frac{i}{m}, \quad i = 1, 2, \dots, m-1$$

$$\bar{v}_{i,0} = 0, \bar{v}_{i,n} = 1, \bar{v}_{i,j} = \frac{j}{n}, \quad j = 1, 2, \dots, n-1$$

[0071] (4)

[0072] 然后, 对所有的 $\bar{u}_{i,j} (j=0,1,\dots,n)$ 和 $\bar{v}_{i,j} (i=0,1,\dots,m)$ 取平均值得到 $\bar{u}_i (i=0,1,\dots,m)$ 和 $\bar{v}_j (j=0,1,\dots,n)$, 即

$$\bar{u}_i = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \bar{u}_{i,j}, \quad i = 0, 1, \dots, m$$

$$\bar{v}_j = \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m \bar{v}_{i,j}, \quad j = 0, 1, \dots, n$$

[0073] (5)

[0074] 最后, 计算节点矢量 U 和 V , 公式为

$$u_0 = \dots = u_k = 0, u_{n+1} = \dots = u_{n+k+1} = 1, \quad u_{j+k} = \frac{1}{k} \sum_{i=j}^{j+k-1} \bar{u}_i, \quad j = 1, 2, \dots, n-k$$

$$v_0 = \dots = v_l = 0, v_{m+1} = \dots = v_{m+l+1} = 1, \quad v_{i+l} = \frac{1}{l} \sum_{j=i}^{i+l-1} \bar{v}_j, \quad i = 1, 2, \dots, m-l$$

[0075] (6)

[0076] 步骤 303、计算控制顶点。计算曲面的控制顶点按照以下两步求解：

[0077] 第一步,对于 $j = 0, 1, \dots, n$, 构造 $n+1$ 条以 u 为参数的等参数线 $q_j(u)$, 其控制顶点为 $\bar{d}_{i,j} (i=0,1,\dots,m; j=0,1,\dots,n)$, 即

$$[0078] \quad q_j(u_i) = \sum_{i=0}^m \bar{d}_{i,j} N_{i,k}(u_i) = p_{i,j}, \quad i=0,1,\dots,m; j=0,1,\dots,n \quad (7)$$

[0079] 式 (7) 是系数矩阵为 $(n+1) \times (n+1)$ 的线性方程组, 求解可得 $\bar{d}_{i,j}$;

[0080] 第二步,以 v 为参数构造 $m+1$ 条 B 样条曲线 $r_i(v)$ 插值于控制点 $\bar{d}_{i,j}$, 即

$$[0081] \quad r_i(v_j) = \sum_{j=0}^n \bar{d}_{i,j} N_{j,l}(v_j) = \bar{d}_{i,j}, \quad i=0,1,\dots,m; j=0,1,\dots,n \quad (8)$$

[0082] 式 (8) 是系数矩阵为 $(m+1) \times (m+1)$ 的线性方程组, 求解可得 $d_{i,j} (i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n)$, 即所求 B 样条曲面的控制顶点。

[0083] 步骤 4 中判断变压器故障类型可通过计算样本数据与各个故障分界面的位置关系得到。表 1 所示为各故障特征区域与各故障分界面的位置关系, 以故障分界面 S_3 为例, “ \uparrow ”表示特征区域内点的 y 坐标大于 0.1; “ \downarrow ”表示特征区域内点的 y 坐标小于 0.1; “—”表示不需判断特征区域内点与 S_3 的位置关系, 即取“ \uparrow ”和“ \downarrow ”均可, 其他故障分界面的计算与此类似。

[0084] 表 1 故障模式特征区域与故障分界面关系

[0085]

编号	故障名称	与故障分界面关系					
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
F1	低温过热(低于 150°C)	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\downarrow	\uparrow	\downarrow
F2	低温过热(150~300°C)	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow	\downarrow	\downarrow
F3	中温过热(300~700°C)	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\downarrow
F4	高温过热(高于 700°C)	\downarrow	\downarrow	—	—	\uparrow	\uparrow
F5	局部放电	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow
F6	电弧放电	\uparrow	\downarrow	—	\downarrow	—	—
F7	电弧放电兼过热	\uparrow	\downarrow	\uparrow	\uparrow	—	—
F8	低能放电	\uparrow	\uparrow	—	\downarrow	—	—
F9	低能放电兼过热	\uparrow	\uparrow	\uparrow	\uparrow	—	—
F10	不能识别的故障模式 1	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow
F11	不能识别的故障模式 2	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\downarrow	\uparrow	\downarrow

[0086] 计算样本库中样本与各故障分界面的关系: S_1 : “ \uparrow ”、 S_2 : “ \downarrow ”、 S_3 : “ \uparrow ”、 S_4 : “ \uparrow ”、 S_5 : “ \uparrow ”、 S_6 : “ \uparrow ”, 判断该故障模式为电弧放电兼过热 (F7), 诊断结果与实际故障类型不符, 产生了误判。

[0087] 关于曲面形态的调整过程, 以图 2a ~ 2c 举例说明。初始时, 故障 F4 和 F7 两类故障间存在一个故障分界面, 如图 2a, 当一个已被验证了故障的样本 p 产生误判时, 即点 p 对应的实际故障类型为 F4, 但其坐标位于 F7 故障特征区域内, 如图 2b 所示; 此时, 柔性自适

应地调整分界面的形状,使该故障样本被包含到 F4 对应的特征区域内,如图 2c 所示。

[0088] 步骤 5 中,通过调整 S_1 曲面形状,修正原有故障特征区域,使该样本数据包含到 F4 故障特征区域内,为了保证曲面调整具有柔性光滑的过渡,凸起部分的截面选择高斯函数作为凸起截面的形态函数:

$$[0089] \quad f(x) = ae^{-\frac{x^2}{c^2}} \quad (9)$$

[0090] 其中, a 是曲面凸起的高度;参数 c 确定样本点影响范围; x 是插值点距离曲面凸起中心的距离。

[0091] 曲面调整就是根据故障样本数据,采用曲面插值反算方法重构曲面,具体步骤包括:

[0092] 步骤 501、将样本数据点 p 向初始故障分界面投影,得到 p' ;

[0093] 步骤 502、计算 pp' 的距离 d ,此即为曲面凸起的高度 a ,为保证调整后的曲面将该点包含进去,可取 a 的数值略大于 d ;

[0094] 步骤 503、按照式 (9) 计算曲面数据网格节点处的坐标调整值,并据此计算出新的数据网格节点坐标;

[0095] 步骤 504、按照公式 (4) ~ (8) 计算出新的曲面控制网格顶点坐标及节点矢量 U 、 V ,完成曲面的重构。调整后的计算面形状如图 3 所示。

[0096] 步骤 6 中故障模式间的分界面经过调整后,对应的故障特征区域变为由曲面围成的不规则形状,此时只能通过计算样本坐标与各个故障分界面的位置关系来确定其所处的故障特征区域,进而判断变压器故障类型。步骤包括:

[0097] 步骤 601、将样本数据点 p 向初始故障分界面投影,得到点 p' ;

[0098] 步骤 602、计算 p' 点的曲面参数 $u_{p'}$ 和 $v_{p'}$;

[0099] 步骤 603、根据 $u_{p'}$ 、 $v_{p'}$ 以及曲面的节点向量 U 、 V ,通过式 (4) 计算曲面上点 p'' 的坐标;

[0100] 步骤 604、比较 p 和 p'' 的位置关系,确定 p 与故障分界面的位置关系,再按照表 1 的定义进行故障诊断。

[0101] 经过曲面调整,样本库中的样本对各分界曲面的位置关系为: S_1 :“↓”、 S_2 :“↓”、 S_3 :“↑”、 S_4 :“↑”、 S_5 :“↑”、 S_6 :“↑”,符合该位置关系的故障类型为高温过热 (F4),即对该误诊情况进行了纠正,准确的识别出对应的故障类型。

[0102] 以上所述,仅为本发明较佳的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

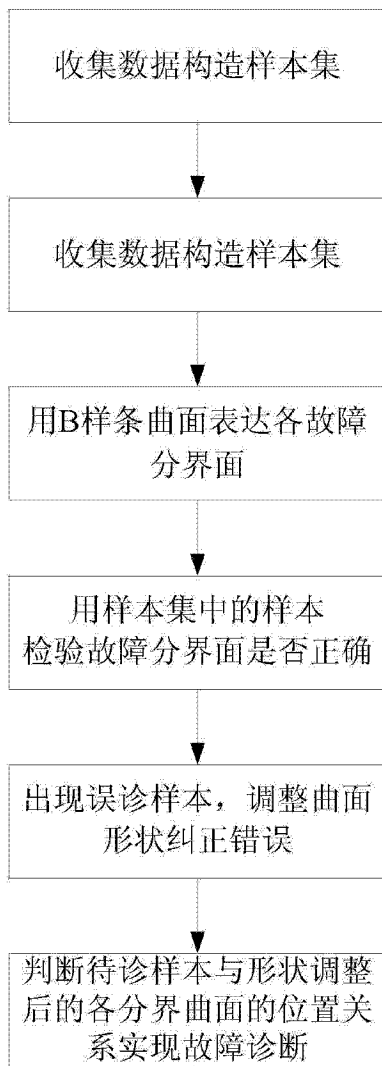


图 1

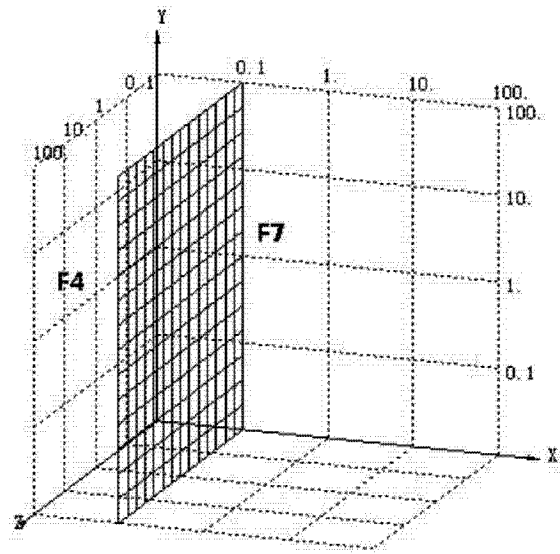


图 2a

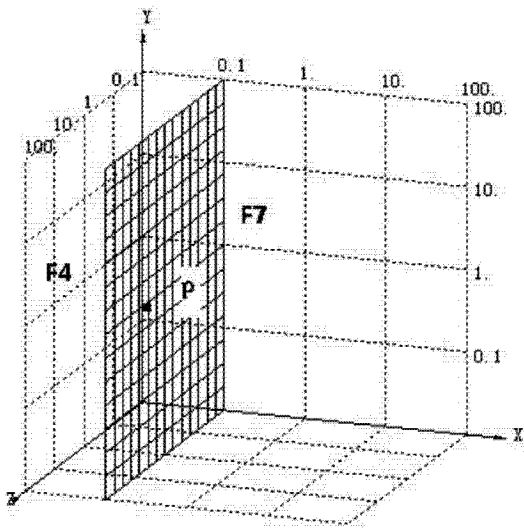


图 2b

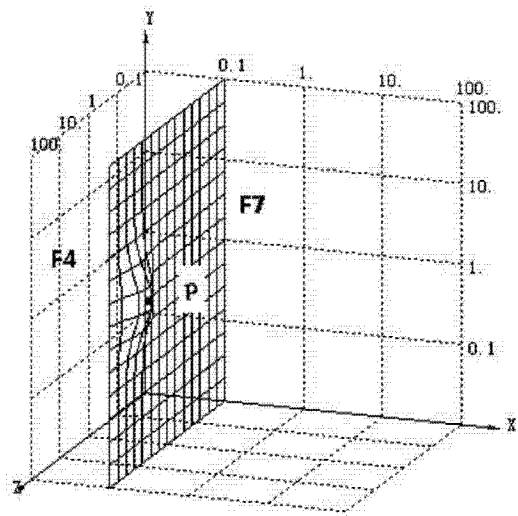


图 2c

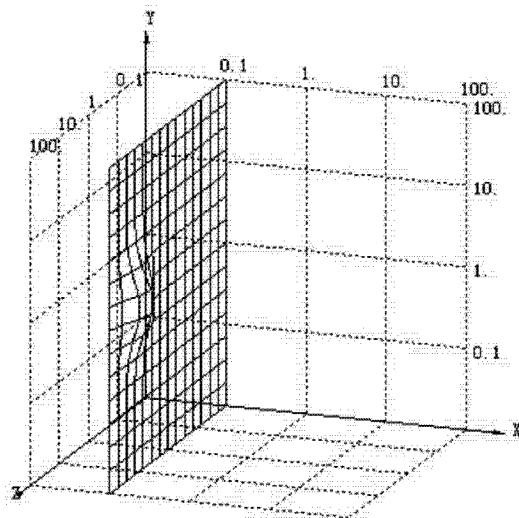


图 3