



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104360190 B

(45)授权公告日 2017.07.07

(21)申请号 201410640672.9

(22)申请日 2014.11.13

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104360190 A

(43)申请公布日 2015.02.18

(73)专利权人 华北电力大学
地址 102206 北京市昌平区朱辛庄北农路2号

专利权人 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心

(72)发明人 齐波 魏振 彭翔 吕家圣 杨栋 许毅 夏辉 李成榕

(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 张文宝

(51)Int.Cl.
G01R 31/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 101581745 A, 2009.11.18,
KR 10-2010-0061309 A, 2010.06.07,
CN 102495320 A, 2012.06.13,
CN 103163420 A, 2013.06.19,
CN 203838239 A, 2014.09.17,

尹金良 等.基于多分类相关向量机的变压器故障诊断新方法.《电力系统保护与控制》.2013,第41卷(第5期),第77-82页.

张建文 等.应用特征空间矢量进行变压器故障诊断.《高电压技术》.2000,第26卷(第6期),第57-59页.

唐勇波 等.基于双空间特征提取的变压器故障诊断模型.《湖南大学学报(自然科学版)》.2013,第40卷(第11期),第70-76页.

唐勇波 等.PCA和KICA特征提取的变压器故障诊断模型.《高电压技术》.2014,第40卷(第2期),第557-563页.

审查员 王子浩

权利要求书2页 说明书7页 附图1页

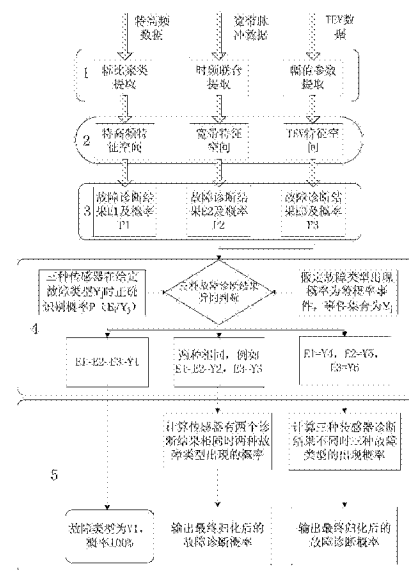
(54)发明名称

基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法

(57)摘要

本发明公开了属于特高压直流输电设备故障诊断技术领域的一种基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法。该方法首先使用目前在工程上能够实现在线检测仪作为三种传感器:特高频、宽带脉冲及暂态地电压TEV检测仪,得到换流变压器的在线数据;调用实测换流变压器的在线数据实现故障诊断,包括从实测换流变压器的在线数据中提取有效放电信息,建立三种传感器特征空间,得到三种特征空间故障诊断结果,进而对三种故障诊断结果异同判断,最终输出诊断结果,综合三种传感器的数据进行推理,得到该情况下的最终诊断结果,该方法有效提高了换流变压器故障诊断精度,实现了换流变压器故障的在线诊断。

CN 104360190 B



1. 一种基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法,其特征在于,所述在线诊断方法是首先使用目前在工程上能够实现在线检测的检测仪作为三种传感器:特高频、宽带脉冲及暂态地电压TEV检测仪,得到换流变压器的在线数据;调用实测换流变压器的在线数据实现故障诊断,包括以下步骤:

- 1) 从实测换流变压器的在线数据中提取有效放电信息;
- 2) 三种传感器特征空间建立;
- 3) 三种特征空间故障诊断结果;
- 4) 三种故障诊断结果异同判断;
- 5) 最终诊断结果输出。

2. 根据权利要求1所述基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法,其特征在于所述步骤1)有效放电信息提取是针对不同传感器分别选用不同的提取方式,特高频采用幅比聚类提取法,宽带脉冲采用时频联合提取法,TEV采用幅值参数提取法。

3. 根据权利要求1所述基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法,其特征在于所述步骤2)所建立的用于表征放电特点的特征空间分别为特高频特征空间,宽带特征空间及TEV特征空间,各特征空间包括基于图像的颜色矩、形状特征和纹理特征的代表放电特性的元素属性:

颜色矩为图像的基本视觉特征包括一阶矩、二阶矩和三阶矩;

纹理特征采用灰度-梯度共生矩阵,是用灰度和梯度的综合信息提取纹理特征,其考虑的是像素灰度与边缘梯度的联合统计分布;

形状特征用于描述图像的形状,采用Hu不变矩以及相对矩及Zernike矩,将三个传感器检测到的幅值相位信息转化为灰度图,分别提取上述图像特征,形成特征矩阵,构成特征空间。

4. 根据权利要求1所述基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法,其特征在于所述步骤3)通过分别调用传感器自有指纹库实现故障诊断结果输出,并且给出诊断概率。

5. 根据权利要求1所述基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法,其特征在于所述步骤4)对三种传感器诊断结果进行异同判断,再输入两个辅助边界条件的同时,将三种情况分类输出;其中,两个辅助边界条件包括:条件1假定故障类型出现概率为等概率事件时,事件集合为 Y_j ;条件2,三种传感器在给定故障类型时,故障事件 Y_j 出现时的故障类型 E_i 出现的概率 $P(E_i|Y_j)$,其中 E_i 为假定故障类型;

异同判断结果根据两个辅助边界条件判断结果分为3种情况包括:

- 1) 三种传感器诊断的故障类型相同时,输出100%故障概率;
- 2) 如果步骤4)三个传感器诊断出的故障类型中有两种故障相同时,计算在此情况下这两种不同故障类型的出现概率 P_{Y_j} ,随后输出最终归一化后的故障诊断概率;
- 3) 如果三种故障诊断结果都不相同时,分别计算这种情况时的三种故障类型出现概率 P_{Y_j} ,并输出归一化结果,其中,计算故障出现概率公式为:

$$P_{Y_j} = \frac{P(E_1, \dots, E_i | Y_j) P(Y_j)}{P(E_1, \dots, E_i)} \quad (1)$$

其中, P_{Y_j} 为故障类型的出现概率, $P(E_1, \dots, E_i | Y_j)$ 为故障事件 Y_j 出现的条件下, 故障类型 (E_1, \dots, E_i) 同时出现的概率, 该概率为经验概率, $P(E_1, \dots, E_i)$ 为 i 个传感器故障类型同时出现的概率; 其中 i, j 分别表示第几个传感器; i, j 均为正整数。

基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法

技术领域

[0001] 本发明属于特高压直流输电设备故障诊断技术领域,特别涉及一种基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法。

背景技术

[0002] 特高压直流输电工程是我国重点建设的工程项目之一,随着直流输电线路的投运运行,直流设备的安全稳定运行被广泛提及,作为直流输电系统中的关键设备,换流变压器的正常运行关系着整个直流系统的稳定性。绝缘问题是换流变压器的主要故障原因,目前保证设备安全运行最有效的方法就是实现换流变压器的故障诊断,这对于及时发现问题,提前做出反应,避免严重经济损失,并保证设备正常运行有重要意义。

[0003] 目前,应用于换流变压器故障诊断方法较少,多采用单一传感器在离线测量时进行放电数据的获取,进行故障诊断,因此该方法存在以下几个问题,首先,诊断精度不足,诊断结果不够丰富,不能全面反映换流变压器可能出现的故障情况;其次,诊断方法为离线方式,所以不能够及时发现故障问题,缺少换流变压器预警诊断的实时性。

发明内容

[0004] 本发明的目的提出一种基于三传感器推理的故障诊断方法,其特征在于,所述在线诊断方法是首先使用目前在工程上能够实现在线检测仪作为三种传感器:特高频、宽带脉冲及暂态地电压(TEV)检测仪,得到换流变压器的在线数据;调用实测换流变压器的在线数据实现故障诊断,包括以下步骤:

- [0005] 1) 从实测换流变压器的在线数据中提取有效放电信息;
- [0006] 2) 三种传感器特征空间建立;
- [0007] 3) 三种特征空间故障诊断结果;
- [0008] 4) 三种故障诊断结果异同判断;
- [0009] 5) 最终诊断结果输出。

[0010] 所述步骤1有效放电信息提取是针对不同传感器分别选用不同的提取方式,特高频采用幅比聚类提取法,宽带脉冲采用时频联合提取法,TEV采用幅值参数提取法。

[0011] 所述步骤2所建立的用于表征放电特点的特征空间分别为特高频特征空间,宽带特征空间及TEV特征空间,各特征空间包括基于图像的颜色矩、形状特征、纹理特征等可代表放电特性的元素属性:颜色矩为图像的基本视觉特征包括一阶矩、二阶矩和三阶矩;纹理特征采用灰度-梯度共生矩阵,是用灰度和梯度的综合信息提取纹理特征,其考虑的是像素灰度与边缘梯度的联合统计分布;形状特征用于描述图像的形状,采用Hu不变矩以及相对矩及Zernike矩,将三个传感器检测到的幅值相位信息转化为三色图,分别提取上述图像特征,形成特征矩阵。

[0012] 所述步骤3通过分别调用传感器自有指纹库实现故障诊断结果输出,并且给出诊断概率。

[0013] 所述步骤4对三种传感器诊断结果进行异同判断,再输入两个辅助边界条件:的同时,将三种情况分类输出;其中,输入两个辅助边界条件:条件1假定故障类型出现概率为等概率事件时,事件集合为 Y_j ;条件2,三种传感器在给定故障类型时的正确识别概率 $P(E_i|Y_j)$,其中 E_i 为假定故障类型;

[0014] 异同判断结果是根据两个辅助边界条件判断结果分为3种情况包括:

[0015] 1) 三种传感器诊断的故障类型相同时,输出100%故障概率;

[0016] 2) 如果步骤4三个传感器诊断出的故障类型中有两种故障相同时,计算在此情况下这两种不同故障的出现概率 P_{Y_j} ,随后输出归一化后的概率;

[0017] 3) 如果三种故障诊断结果都不相同时,分别计算这种情况时三种故障出现的概率 P_{Y_j} ,并输出归一化结果

[0018] 计算故障出现概率公式为:

$$P_{Y_j} = \frac{P(E_1, \dots, E_i | Y_j) P(Y_j)}{P(E_1, \dots, E_i)} \quad (1)$$

[0020] 其中, P_{Y_j} 为故障类型的出现概率, $P(E_1, \dots, E_i)$ 为*i*个传感器给出的故障类型的正确识别概率, $P(E_1, \dots, E_i)$ 为*i*个传感器诊断故障类型同时出现的概率。

[0021] 本发明的有益效果是实现换流变压器故障在线诊断,提高识别精度。

附图说明

[0022] 图1基于三传感器的换流变压器故障在线诊断方法示意图。

具体实施方式

[0023] 本发明提出一种基于三传感器推理的故障诊断方法。下面结合附图予以说明。

[0024] 如图1所示,本发明是基于三传感器推理的换流变压器故障在线诊断方法,首先使用目前在工程上能够实现在线检测仪作为三种传感器:特高频、宽带脉冲及TEV检测仪,得到换流变压器的在线数据;该方法包括以下五个步骤:(1)从实测换流变压器的在线数据中提取有效放电信息,(2)三种传感器特征空间建立,(3)三种特征空间故障诊断结果,(4)三种故障诊断结果异同判断,(5)最终诊断结果输出。由于放电数据中不可避免的具有噪声信号,影响放电诊断,所以为了获得有效的放电数据,步骤(1)针对不同传感器分别选用不同的提取方式,特高频采用幅比聚类提取法,宽带脉冲采用时频联合提取法,TEV采用幅值参数提取法,放电数据提取的方法是通过多种方法对比而选取。步骤(2)所建立的特征空间分别为特高频特征空间,宽带特征空间及TEV特征空间。

[0025] 各特征空间包括基于图像的颜色矩、形状特征、纹理特征等可代表放电特性的元素属性:

[0026] 颜色矩为图像的基本视觉特征包括一阶矩、二阶矩和三阶矩:

$$\mu_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_{ij} \quad (2)$$

$$\sigma_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (p_{ij} - \mu_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

[0029]
$$s_i = \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (p_{ij} - \mu_i)^2 \right]^{1/3} \quad (4)$$

[0030] 式(2)~(4)中, p_{ij} 是图像中 (i, j) 像素点的颜色分量, μ_i 为第 i 行所有 j 个颜色分量的平均值, N 为像素点个数。

[0031] 纹理特征采用灰度-梯度共生矩阵,是用灰度和梯度的综合信息提取纹理特征,其考虑的是像素灰度与边缘梯度的联合统计分布,灰度-梯度共生矩阵为 $\{H_{ij}, i=0, 1, \dots, L-1; j=0, 1, \dots, L_g-1\}$,其中, L_g 为灰度级, H_{ij} 定义为集合 $\{(x, y) \mid f(x, y) = i, G(x, y) = j\}$ 中元素的数目。将 $[H_{ij}]_{L \times L_g}$ 做归一化处理,得到 $[P_{ij}]_{L \times L_g}$ 。利用灰度-梯度共生矩阵,可以定义常用的纹理特征统计量如表1所示。

[0032] 表1图像纹理特征

[0033]

序号	纹理特征表征量	表达式
1	小梯度优势	$T_1 = \sum_{ij} (P_{ij} / j^2)$
2	大梯度优势	$T_2 = \sum_{ij} j^2 P_{ij}$
3	灰度分布不均匀性	$T_3 = \sum_i \left[\sum_j H_{ij} \right]^2 / \sum_{ij} H_{ij}$
4	梯度分布不均匀性	$T_4 = \sum_j \left[\sum_i H_{ij} \right]^2 / \sum_{ij} H_{ij}$
5	能量	$T_5 = \sum_{ij} P_{ij}^2$
6	灰度平均	$T_6 = \sum_i i \left[\sum_j P_{ij} \right]$
7	梯度平均	$T_7 = \sum_j j \left[\sum_i P_{ij} \right]$
8	灰度均方差	$T_8 = \sqrt{\sum_i (i - T_6)^2 \left[\sum_j P_{ij} \right]}$
9	梯度均方差	$T_9 = \sqrt{\sum_j (j - T_7)^2 \left[\sum_i P_{ij} \right]}$
10	相关	$T_{10} = \sum_{ij} (i - T_6)(j - T_7) P_{ij}$
11	灰度熵	$T_{11} = -\sum_i \left[\sum_j P_{ij} \right] \log_2 \left[\sum_j P_{ij} \right]$
12	梯度熵	$T_{12} = -\sum_j \left[\sum_i P_{ij} \right] \log_2 \left[\sum_i P_{ij} \right]$
13	混合熵	$T_{13} = -\sum_{ij} P_{ij} \log_2 P_{ij}$
14	惯性	$T_{14} = \sum_{ij} (i - j)^2 P_{ij}$
15	逆差距	$T_{15} = \sum_{ij} \frac{1}{1 + (i - j)^2} P_{ij}$

[0035] 表1所示每幅谱图的纹理特征为15个特征量:谱图形状特征描述与图像的形状,采

用Hu不变矩、相对矩及Zernike矩:

[0036] 1) Hu不变矩以及相对矩

[0037] 假设 $f(x, y)$ 为二值图像,表示形状区域,在区域范围内取“1”,其他地方取“0”。

[0038] 图像的 $p+q$ 阶矩定义为:

$$[0039] \quad m_{pq} = \iint x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (p, q = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

[0040] 当图像发生平移变化时, m_{pq} 也将发生改变。为使 m_{pq} 具有平移不变性,定义 $p+q$ 阶中心矩为:

$$[0041] \quad \mu_{pq} = \iint (x-x_0)^p (y-y_0)^q f(x, y) dx dy \quad (p, q = 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

[0042] 其中, (x_0, y_0) 为形状区域的质心,其表达式如式(7)(8)所示。

$$[0043] \quad x_0 = \frac{\iint xf(x, y) dx dy}{\iint f(x, y) dx dy} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad (7)$$

$$[0044] \quad y_0 = \frac{\iint yf(x, y) dx dy}{\iint f(x, y) dx dy} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (8)$$

[0045] 组合二阶和三阶中心矩,可以得到7个对平移和旋转不变的矩特征,表达式如式(9)~(15)所示。

$$[0046] \quad \eta_1 = \mu_{20} + \mu_{02} \quad (9)$$

$$[0047] \quad \eta_2 = (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2 \quad (10)$$

$$[0048] \quad \eta_3 = (\mu_{30} - 3\mu_{12})^2 + (3\mu_{21} - \mu_{03})^2 \quad (11)$$

$$[0049] \quad \eta_4 = (\mu_{30} + \mu_{12})^2 + (\mu_{21} + \mu_{03})^2 \quad (12)$$

$$[0050] \quad \eta_5 = (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{30} + \mu_{12}) [(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2] \quad (13)$$

$$[0051] \quad + (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{21} + \mu_{03}) [3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2]$$

$$[0052] \quad \eta_6 = (\mu_{20} - \mu_{02}) [(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2] \quad (14)$$

$$[0053] \quad + 4\mu_{11}(\mu_{30} + \mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03})$$

$$[0054] \quad \eta_7 = (3\mu_{21} - \mu_{03})(\mu_{30} + \mu_{12}) [(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - 3(\mu_{21} + \mu_{03})^2] \quad (15)$$

$$[0055] \quad - (\mu_{30} - 3\mu_{12})(\mu_{21} + \mu_{03}) [3(\mu_{30} + \mu_{12})^2 - (\mu_{21} + \mu_{03})^2]$$

[0056] 上述几种矩特征的的定义都不具有尺度不变性,因此,需要对 μ_{pq} 进行归一化处理。为了快速计算区域不变矩,Chen等人又提出了利用区域边界来计算区域矩的快速算法,其算法与前面提到Hu不变矩一致,只是在对 μ_{pq} 进行归一化处理时,采用公式(16)的算法:

$$[0057] \quad \eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^r} \quad (16)$$

[0058] 其中, $r = p+q+1$, $p+q = 2, 3, 4, \dots$ 。由于 r 值的表示不同,这将导致计算区域和结构不变矩公式的不统一。为了得到适用于区域、封闭和不封闭的结构的统一的不变矩公式,可以用相对矩来描述形状特征,利用矩之间的比值去除比例因子 μ_{00} ,从而使不变矩公式与面积或结构的比例缩放无关,而仅与几何形状有关。

[0059] 相对矩提取图像形状特征的特征如表2所示。

[0060] 表2相对矩的图像形状特征参数

[0061]

序号	特征参数
1	$R_1 = \frac{\sqrt{\eta_2}}{\eta_1} = \frac{\sqrt{(\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11}^2}}{\eta_{20} + \eta_{02}} = \frac{\sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}}{\mu_{20} + \mu_{02}}$
2	$R_2 = \frac{\eta_1 + \sqrt{\eta_2}}{\eta_1 - \sqrt{\eta_2}}$
3	$R_3 = \frac{\sqrt{\eta_3}}{\sqrt{\eta_4}}$
4	$R_4 = \frac{\sqrt{\eta_3}}{\sqrt[4]{ \eta_5 }}$
5	$R_5 = \frac{\sqrt{\eta_4}}{\sqrt[4]{ \eta_5 }}$
6	$R_6 = \frac{ \eta_6 }{\eta_1 \cdot \eta_3}$
7	$R_7 = \frac{ \eta_6 }{\eta_1 \cdot \sqrt{ \eta_3 }}$
8	$R_8 = \frac{ \eta_6 }{\eta_3 \cdot \sqrt{ \eta_2 }}$
9	$R_9 = \frac{ \eta_6 }{\sqrt{ \eta_2 } \cdot \eta_5 }$
10	$R_{10} = \frac{ \eta_5 }{\eta_3 \cdot \eta_4}$

[0062] 2) Zernike矩

[0063] Zernike矩的思想与傅里叶变换的思想类似的,并且在计算Zernike矩时不用考虑边界的信息,从而更适用于描述复杂形状。复数Zernike矩是从Zernike多项式得到的,表达式如式(16)所示。

[0064] $V_{nm}(x, y) = V_{nm}(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta) = R_{nm}(\rho) \exp(im\theta)$ (17)

[0065] 式中,ρ表示点(x, y)到图像形状质心的半径,θ为ρ与x轴的夹角,m代表的是重复度,n是Zernike矩的阶数,m、n均为整数,且(n-|m|)为正偶数。

[0066]
$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! (\frac{n+|m|}{2} - s)! (\frac{n-|m|}{2} - s)!} \rho^{n-2s}$$
 (18)

[0067] Zernike多项式为单位圆内的一组完备的正交复数基。(n,m)阶复数Zernike矩定义式为式(18)所示,其中,f(x, y)为二值图像,*表示复数共轭。

$$[0068] \quad A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) V_{nm}^*(x, y), \quad (x^2 + y^2 \leq 1) \quad (19)$$

[0069] 在Zernike矩的基础上有人提出了伪Zernike矩的概念,它与Zernike矩的区别就在多项式公式的不同,伪Zernike矩的多项式公式如(19):

$$[0070] \quad R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{n-|m|} (-1)^s \frac{(2n+1-s)!}{s!(n-|m|-s)!(n+|m|+1-s)!} \rho^{n-s} \quad (20)$$

[0071] 对于每一幅图像,其形状特征参数总共为25个,其中,采用相对矩方法提取的特征参数有10个,Zernike矩15个。

[0072] 将三个传感器检测到的幅值相位信息转化为三色图,分别提取上述图像特征,形成特征矩阵。步骤(3)通过分别调用传感器自有指纹库实现故障诊断结果输出,并且给出诊断概率,诊断方法选用有基于图像特征故障诊断、基于谱图特征的故障诊断等。步骤(4)设计识别器,分别识别三种传感器的故障诊断结果,对三种传感器诊断结果进行异同判断,并将三种情况分类输出,另外为了进行下一步的推理过程,需要设定两个辅助边界条件:条件1假定故障类型出现概率为等概率事件时,事件集合为 Y_j ,该条件事先假定各种故障出现的可能性是相同的;条件2,三种传感器在给定故障类型时的正确识别概率 $P(E_i | Y_j)$,该概率为经验概率,是传感器本身对已知故障的识别正确率。步骤(5)根据步骤(4)的判断结果分为3种情况:

[0073] 1) 三种传感器诊断结果都为 Y_1 时,输出100%故障概率 Y_1 ;

[0074] 2) 有两种故障相同时,例如 $E_1 = E_2 = Y_2, E_3 = Y_3$,首先分别计算在此情况下这两种故障的出现概率:

$$[0075] \quad P_{Y_2} = \frac{P(E_1, E_2 | Y_2) P(Y_2)}{P(E_1, E_2)} \quad (21)$$

$$P_{Y_3} = \frac{P(E_3 | Y_3) P(Y_3)}{P(E_3)}$$

[0076] 其中, $P(E_1, E_2 | Y_2)$ 为故障事件 Y_2 出现的条件下,故障类型 E_1, E_2 同时出现的概率; $P(Y_2)$ 为等概率事件集合中故障事件 Y_2 出现的概率; $P(E_1, E_2)$ 为故障类型事件中 E_1, E_2 同时出现的概率, $P(E_3)$ 为 E_3 出现的概率;

[0077] 随后计算最终归化后的故障诊断输出结果及概率:

$$[0078] \quad P_{Y_2FINAL} = \frac{P_{Y_2}}{P_{Y_2} + P_{Y_3}} \%$$

$$P_{Y_3FINAL} = \frac{P_{Y_3}}{P_{Y_2} + P_{Y_3}} \%$$

$$(22)$$

[0079] 3) 三种故障诊断结果都不相同时,分别计算这种情况时三种故障出现概率:

$$\begin{aligned}
 P_{Y4} &= \frac{P(E1|Y4)P(Y4)}{P(E1)} \\
 [0080] \quad P_{Y5} &= \frac{P(E2|Y5)P(Y5)}{P(E2)} \\
 P_{Y6} &= \frac{P(E3|Y6)P(Y6)}{P(E3)}
 \end{aligned} \tag{23}$$

[0081] 其中 $P(E_i|Y_j)$ 为故障事件 Y_j 出现时故障类型为 E_i 的概率; $P(E_i)$ 为故障类型 E_i 为真时的概率; $P(Y_j)$ 为等概率事件中故障事件 Y_j 出现的先验概率。

[0082] 最后输出最终归化后的诊断结果及概率:

$$\begin{aligned}
 P_{Y4FINAL} &= \frac{P_{Y4}}{P_{Y4} + P_{Y5} + P_{Y6}} \% \\
 [0083] \quad P_{Y5FINAL} &= \frac{P_{Y5}}{P_{Y4} + P_{Y5} + P_{Y6}} \% \quad \circ \\
 P_{Y6FINAL} &= \frac{P_{Y6}}{P_{Y4} + P_{Y5} + P_{Y6}} \%
 \end{aligned} \tag{24}$$

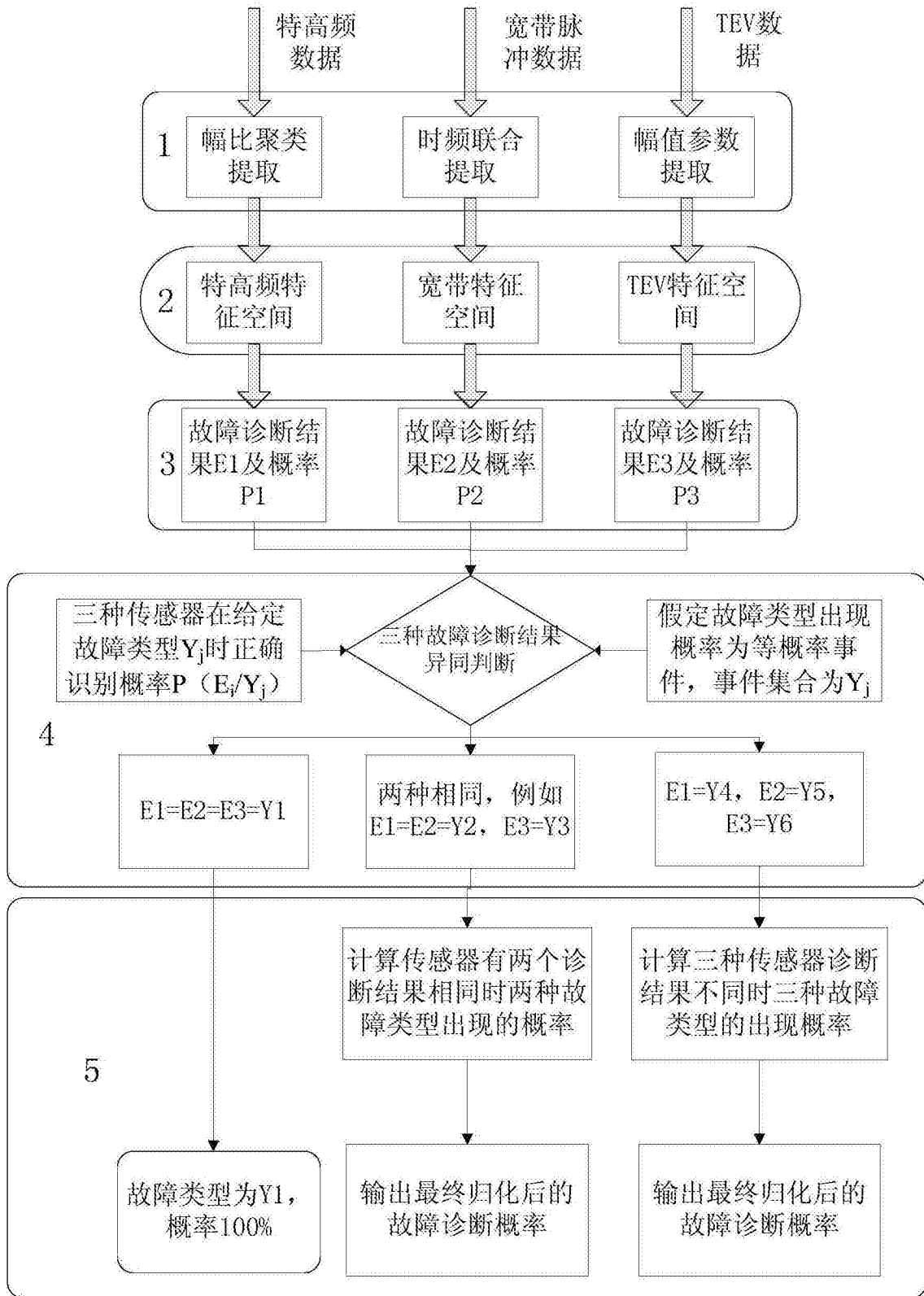


图1