

粗糙集理论在 IEC-60599 三比值 故障诊断决策规则中的应用

蔡金锭, 王少芳

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建省 福州市 350002)

APPLICATION OF DECISION RULES FOR IEC-60599 THREE-RATIO FAULT DIAGNOSIS BASED ON ROUGH SET THEORY

CAI Jin-ding, WANG Shao-fang

(School of Electrical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, Fujian Province, China)

ABSTRACT: An improved IEC-60599 three-ratio fault diagnosis technique for power transformer is proposed, which is based on the Rough Set Theory. Firstly, a logical diagnostic table of IEC-60599 is presented, and a decision table can be constructed by applying the Rough Set Theory based on the IEC-60599 three-ratio fault diagnosis table. Then, the reduction of the decision table will be obtained, and an improved new IEC-60599 three-ratio fault diagnosis decision table for transformer fault diagnosis can be acquired. The results of the experiment demonstrate that the improved new IEC-60599 three-ratio fault diagnosis technique extends the coding area of the earlier IEC-60599 three-ratio fault diagnosis technique, the actual malfunction diagnosis ability is proved and fault diagnosis accuracy is higher compared with the earlier IEC-60599 three-ratio diagnosis technique at the incompleteness and complexity of fault diagnosis for power transformer. The method is easily used to engineering technician. All these properties can be applied in practice.

KEY WORDS: Power transformer diagnosis; The rough set; The decision table

摘要: 基于粗糙集理论提出一种改进的新导则 IEC 三比值的变压器故障诊断决策新方法。文中从实际诊断中出发首次将 IEC-60599 三比值故障诊断表编写成对应的逻辑编码表, 然后应用粗糙集理论构造决策表并对决策表进行约简, 最后建立改进的新导则 IEC-60599 三比值故障诊断决策规则。这种改进的新导则 IEC-60599 三比值诊断方法使用简单, 便于操作。同时它还扩展了 IEC-60599 三比值的故障诊断范围、提高了故障诊断能力和复合故障的识别能力。在诊断信息不完备的情况下, 可以避开遗漏信息实现较为准确的故障诊

断。实际诊断结果表明, 它的故障诊断正确率比 IEC-60599 三比值诊断法高达 19.7% 左右。这种改进的新导则 IEC-60599 三比值故障诊断决策规则简单实用, 便于技术人员的现场使用, 在实际工程中具有实用价值。

关键词: 电力变压器诊断; 粗糙集; 决策表

1 引言

IEC三比值故障诊断法是目前普遍应用于变压器故障诊断的一种方法。它是根据变压器油中提取的五种气体 (H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2) 含量计算出相应的比值, 由编码规则, 得到一组编码, 再由 IEC 三比值故障诊断表查找出与其相对应的故障类型^[1]。这种诊断方法虽然简单实用, 但故障诊断正确率较低。IEC 新导则 IEC-60599 为了避免比值编码边界过于绝对化, 对 IEC-599 中 DGA 判断方法进行改进, 如取消了编码故障诊断, 直接采用 $\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$ 、 $\varphi(CH_4)/\varphi(H_2)$ 、 $\varphi(CH_4)/\varphi(C_2H_6)$ 三比值的范围进行故障判断、对典型的故障分类方法也进行了修改, 如将原来的 8 种典型故障改为 6 种, 即将过去的高、低能量局部放电合并为局部放电; 而将小于 150℃ 的低温过热和 150~300℃ 的低温过热统称为低温过热^[2]。这些改变使得新的导则比旧的导则更为灵活, 在边界定值方面有了明显的改进、处理报警值等方面也更加切合实际情况。但是, 在实际故障诊断中新导则 IEC-60599 三比值诊断法的分类及边界仍然过于绝对化, 比值边界存在着重叠分布的现象, 仍未能妥善解决实际存在的复合性故障 (如放电兼过热等) 等问题。因而, 这

种诊断方法在工程实际应用中还存在以下方面问题^[3-4]：①当油中特征气体含量未达到注意值时，无法用这种方法进行诊断；②当故障诊断获得的一组比值超出或不属于已知故障类型的范围时，则无法找到对应的故障；③当多种故障同时发生时，新的导则IEC三比值诊断法无法故障诊断。因而，在实际故障诊断过程中仍会出现误判或无法诊断等情况，所以在实际工程中得不到广泛的应用^[5]。

近年来，粗糙集理论在电力变压器故障诊断方面提出了多种诊断方法^[6-11]，虽然它们在理论上取得了一定的进展，但是它们都尚未解决IEC-60599三比值故障诊断中存在的问题，在实用性和方便操作方面还存在一定的差距。如文献[6]应用决策表的约简技术对变压器故障进行分类和诊断，然而它尚未解决不完备信息时的故障诊断问题；文献[7]用粗糙集的方法对人工神经网络的学习样本进行约简，在不降低故障诊断率的前提下提高了神经网络的学习速度，但是，它需要大量的学习样本以及没有解决在缺少关键信息时的故障诊断；文献[8]和[9]将粗糙集与专家系统相结合，从历史数据中提取隐含的知识结构建立专家诊断系统，虽然在模型上进一步得到完善，但是在实际操作时较为繁琐也没有解决缺少关键信息的故障诊断；文献[10]把粗糙集理论与Petri网络有机结合，利用粗糙集简化技术对专家知识和故障特征进行压缩，虽然它提高了计算速度等，但是它也没有解决信息不完备情况下的故障诊断问题；文献[11]虽然在理论上提出不完备信息的故障诊断模型，但是它需要较多的条件属性和较为繁琐的运算，不便于技术人员的现场应用同时也无法诊断放电兼过热等复合性故障。本文从实用性和方便操作出发，在故障信息不完善的情况下应用粗糙集理论针对新导则IEC-60599 诊断法存在的问题进行改进，它通过信息的隐含性和关键性构建故障诊断决策规则。这种改进的新导则故障诊断方法不但拓宽了IEC-60599 三比值诊断法的诊断范围，而且它还解决了在信息不完备和边界重叠分布以及复合性故障的诊断等问题。

2 粗糙集理论

粗糙集理论^[12-13]是一种处理模糊性和不精确问题的数学工具。它不需要提供求解问题时所需要处理的数据集合之外的任何先验信息，通过不可分

辨关系和等价类能有效地分析和处理不精确、不一致和各种不完备的数据，从中发现隐含的知识，找出该问题的潜在规律。

在粗糙集理论中^[12]，用等价关系代替分类。设 U 是对象的非空有限集合，称为论域； R 是 U 上的一族等价关系，二元对 $K=(U, R)$ 构成一个近似空间。 R 将论域 U 分成一族等价类 $E_i (i=1, \dots, n)$ ， E_i 和空集 Φ 称为 R 的基本集。如果 U 上的一个子集 X 不能用基本集的并集准确表示出来，则称 X 为粗糙集。粗糙集是用上近似集和下近似集两个精确集来描述的，其数学定义如下：

集合 X 关于 R 的下近似(Lower approximation)

$$R_-(X) = \{x \in U : [x]_R \subseteq X\} \quad (1)$$

集合 X 关于 R 的上近似(Upper approximation)：

$$R^+(X) = \{x \in U : [x]_R \cap X \neq \Phi\} \quad (2)$$

其中 x 为 U 中的一个对象， $[x]_R$ 表示所有与 X 不可分辨的对象组成的集合，即由 X 决定的等价类。实际上 $R_-(X)$ 是 U 中包含在 X 中的最大可定义集， $R^+(X)$ 是 U 中包含在 X 中的最小可定义集。

决策表系统 (Information System)，设 $S_I = \langle U, A, V_a, f_a \rangle$ ，其中 U 为非空有限集合； A 为对象属性的非空有限集，称为属性集合； $V_a = \bigcup_{a \in A} V_a$ 是属性值的集合， V_a 表示属性 $a \in A$ 的值域； $f : U \times A \rightarrow V_a$ 称为信息函数。信息系统也称为知识表达系统。由这样的“属性-值”构成一张二维表，称之为信息表。

如果 A 由条件属性 C 和决策属性 D 组成，且 C 、 D 满足：

$$C \cup D = A \quad C \cap D = \phi$$

则称 S 为决策系统。决策系统的每一列表示一个属性，每一行表示一个对象。

决策表中的一个属性对应一个等价关系，在决策表中并非所有的条件属性都是必要的，有些是多余的，去除这些多余的属性不影响原有的表达效果。决策表的化简就是删除这些多余的条件属性，即去除冗余的条件属性，它仍具有化简前的决策功能。

对决策表的化简可由决策表的条件属性构造可辨识矩阵 $S_D(i, j)$ 。可辨识矩阵 S_D 中的第 i 行第 j 列的元素定义为^[13]

$$s_D(i, j) = \begin{cases} \{a_k \mid a_k \in C \wedge a_k(x_i) \neq a_k(x_j), d(x_i) \neq d(x_j)\} \\ 0, & d(x_i) = d(x_j) \end{cases} \quad (3)$$

式中 a_k 和 d_k 是条件属性 C 和决策属性 D 子集中的元素。由式(3)定义可见：当两个样本的决策属性取值相同时，它们所对应的可辨识矩阵元素的值为0；当两个样本的决策属性取值不同时，它们所对应的可辨识矩阵元素的取值为这两个样本属性值不相同的条件属性集合。

可辨识矩阵 S_D 中的所有非空集合元素 $S_{ij}(S_{ij} \neq \emptyset, S_{ij} \neq \phi)$ ，建立相应的析取逻辑表达式 Q_{ij} ，即

$$Q_{ij} = \bigcup_{a_i \in c_{ij}} a_i \tag{4}$$

将所有的析取逻辑表达式 Q_{ij} 进行合取运算，得到一个合取范式 δ ，即

$$\delta = \bigcap_{c_{ij} \neq \emptyset, c_{ij} \neq \phi} Q_{ij} \tag{5}$$

再将合取范式 δ 转换为析取范式的形式，得

$$\zeta = \bigcup_i \delta_i \tag{6}$$

式中 \cup 和 \cap 符号分别表示合取运算和析取运算。每个合取项包含的属性组合约简后条件属性集合，则可获得决策表的核值表和简化的决策规则表。

3 基于粗糙集决策规则的 IEC-60599 三比值故障诊断方法

在故障诊断过程中，由于故障的形式不唯一，故障机理也模糊不清。比如变压器的某一故障特征状态可能出现在多个测量信号之中，它们之间存在冗余关系，可能只需要用某一个或少量几个特征信号就可以表征出该故障类型^[5]。因此，它适合于应用粗糙集理论和方法来处理这些模糊信号。其基本思想是：从故障状态的原始信号数据出发，把观察或测量到的故障征兆作为对故障分类的条件属性，实际故障类型作为决策属性、确定故障征兆属性集合和故障决策属性集合、建立决策系统表^[13]，利用粗糙集理论的约简技术对原始决策表进行化简，删除条件属性集合中的冗余条件属性，得到与原始决策表等价的所有约简，然后找出最小约简，建立决策表的核值表，获取故障分类规则或简化的故障诊断决策表。这种诊断方法，即使在诊断信息不完备时，也可以避开遗漏的或错误的信息得到较为准确的故障诊断结果。

文中首先对新导则IEC-60599 三比值故障诊断表1进行对应的逻辑编码。为了使诊断更切合实际情况，在逻辑编码表2中增加了 $\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$ 气体比值大于2.5的对应编码，见表2。

表1 新导则 IEC-60599 故障诊断表

Tab.1 Fault decision table for IEC-60599 the three-ratio

代号	故障类型	$\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$	$\varphi(CH_4)/\varphi(H_2)$	$\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$
PD	局部放电	痕量	<0.1	<0.2
D ₁	低能量放电	>1	0.1~0.5	>1
D ₂	高能量放电	0.6~2.5	0.1~1.0	>2
T ₁	低温过热 ($T < 300^\circ C$)	痕量	>1	<1
T ₂	中温过热 ($300^\circ C \leq T \leq 700^\circ C$)	<0.1	>1	1~4
T ₃	高温过热 ($T > 700^\circ C$)	<0.2	>1	>4

表2 新导则 IEC-60599 三比值的对应编码表

Tab.2 Code table for IEC-60599 the three-ratio

$\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$ 编码	$\varphi(CH_4)/\varphi(H_2)$ 编码	$\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$ 编码
<0.1	1	<0.1 0
[0.1, 0.2]	2	[0.1, 0.5] 1
[0.6, 1]	3	(0.5, 1) 2
(1, 2.5]	4	>1 3
>2.5	5	[2, 4] 3
		[0.2, 1] 4

现将表2的比值编码代入表1，经重新整理和排序后得到与新导则IEC-60599 三比值故障诊断表1具有相同诊断性质而且便于操作的诊断表3。现将表3中的三个比值： $\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$ 、 $\varphi(CH_4)/\varphi(H_2)$ 和 $\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$ 分别作为粗糙集理论的条件属性，新导则IEC三比值的6种故障类型则对应决策属性，即新导则IEC-60599 三比值故障诊断分类表可看作一个粗糙集理论的决策表。如表3所示。

表3 新导则 IEC-60599 故障诊断表

Tab.3 Fault decision table for IEC-60599 the three-ratio

序号	条件属性			决策属性
	$\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$ (d_1)	$\varphi(CH_4)/\varphi(H_2)$ (d_2)	$\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$ (d_3)	
1	1-5	0	0	局部放电 (PD)
2	4	1	2	低能量 放电 (D ₁)
3	5	1	2	
4	4	1	3	
5	5	1	3	
6	4	1	1	
7	5	1	1	高能量 放电 (D ₂)
8	3	1	3	
9	3	1	1	
10	3	2	3	
11	4	2	3	
12	3	2	1	低温过热 (T ₁)
13	4	2	1	
14	1-5	3	0	
15	1-5	3	4	中温过热 (T ₂)
16	1	3	2	
17	1	3	3	
18	1	3	1	高温过热 (T ₃)
19	2	3	1	

应用式(3)构造故障诊断表 3 的可辨识矩阵 S_D ，然后用品式(4)~(6)对可辨识矩阵 S_D 中的所有非空集合元素进行合取运算和析取运算，求得新导则 IEC-60599 三比值故障诊断分类的核值表，见表 4。

表 4 IEC-60599 三比值法故障判断决策的核值表
Tab.4 The core table for the decision of IEC-60599 the three-ratio diagnosis

序号	条件属性			决策属性
	$\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$	$\varphi(CH_4)/\varphi(H_2)$	$\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$	
1	*	0	*	局部放电(PD)
2	*	*	*	
3	*	*	*	
4	4	1	*	低能量放电(D ₁)
5	5	*	*	
6	*	*	*	
7	5	*	*	
8	3	*	*	
9	3	*	*	
10	*	*	*	高能量放电(D ₂)
11	*	*	*	
12	*	*	*	
13	*	*	*	
14	*	3	0	低温过热(T ₁)
15	*	*	4	
16	*	*	2	
17	*	*	3	中温过热(T ₂)
18	*	*	1	
19	*	*	*	
20	1	*	1	高温过热(T ₃)

注：表 4 中“*”表示该项比值可以忽略，而不影响故障诊断结果。

再由故障分类核值表 4 求得与 IEC-60599 三比值诊断表等价的其中一组改进的 IEC-60599 三比值故障诊断决策表，见表 5。

从表 5 中可见，改进的新导则 IEC-60599 三比值故障诊断决策表忽略了一些非关键气体的比值，它保留能够刻画故障类型的关键气体的比值，它不仅与 IEC-60599 三比值表具有相同的分类能力，而且，在一定程度上改善了三比值故障诊断的缺损问题，拓展了新导则 IEC-60599 三比值的故障诊断范围，在诊断信息不完备情况下，可以避开遗漏的或错误的信息得到较为准确的故障诊断，同时还具有复合故障的诊断能力。从而提高了 IEC 三比值诊断法在实际应用中的灵活性、实用性和容错性，便于工程技术人员的现场应用。

4 不同诊断方法的诊断结果比较

应用改进的新导则 IEC-60599 三比值故障诊断决策表 5 和新导则 IEC-60599 三比值诊断表 1，分

别对电力变压器的 62 个故障信息样本进行诊断，并将诊断结果加以比较，见表 6。

表 5 改进的新导则 IEC-60599 三比值故障诊断决策表
Tab.5 The improved decision table for IEC-60599 the three-ratio fault diagnosis

序号	条件属性			决策属性
	$\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$	$\varphi(CH_4)/\varphi(H_2)$	$\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$	
1	*	0	*	局部放电(PD)
2	4	1	*	
3	4	*	2	
4	5	*	2	低能量放电(D ₁)
5	5	*	3	
6	5	*	2	
7	5	1	*	
8	5	*	1	
9	*	1	1	D ₁ 或 D ₂
10	3	*	3	
11	3	1	*	
12	3	*	1	
13	3	2	*	高能量放电(D ₂)
14	4	2	*	
15	*	2	1	
16	4	*	3	
17	4	*	1	
18	*	3	0	低温过热(T ₁)
19	*	3	4	
20	1	*	4	
21	*	3	2	
24	*	3	3	中温过热(T ₂)
25	1	*	3	
26	1	*	2	
27	*	3	1	高温过热(T ₃)
28	1	*	1	

注：表 5 中“*”表示该项比值为非关键量，不影响三比值诊断结果。

从表 6 中的诊断结果可见：用新导则 IEC-60599 三比值法诊断，在 62 个诊断样本中，有 24 个样本超出三比值的诊断范围，无对应故障类型，它的正确诊断率约为 61.3%；应用改进的新导则 IEC-60599 三比值故障诊断决策表诊断，虽然也会出现误诊断（误诊断样本有 9 个），但是它与新导则 IEC-60599 三比值法比较，它的正确诊断率约为 85.48%。如果选择足够量的故障信息 (109 个) 样本进行诊断，诊断结果表明，应用改进的新导则 IEC-60599 三比值故障诊断决策表诊断，它的正确故障诊断率高达 83.2%左右，而用新导则 IEC-60599 三比值诊断法诊断的正确诊断率仅约为 63.5%左右。由此可见，改进的新导则 IEC-60599 比 IEC-60599 具有较高的正确故障诊断率。

表6 实际样本诊断结果比较
Tab.6 The results of the actual fault diagnosis

编号	三比值			IEC-60599 诊断结果	改进的 IEC-60599 决策表诊断结果		实际故障
	$\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$	$\varphi(CH_4)/\varphi(H_2)$	$\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$		编码	诊断结果	
1	0	0.6237	0.8605	#	1*4	低温过热(×)	中温过热
2	0.0196	1.2470	10.2286	高温过热	*31	高温过热	高温过热
3	1.1888	0.2000	7.9444	低能放电	41*	低能放电	工频续流放电
4	0.0050	7.1233	8.5714	高温过热	*31	高温过热	磁路高温过热
5	0.0122	8.3333	19.7931	高温过热	*31	高温过热	引线接头过热
6	0	0.8125	2.9091	#	1*3	中温过热(×)	低温过热
7	0.0065	1.0000	2.5455	#	1*3	中温过热(×)	低温过热
8	0	1.3509	0.3621	低温过热	*34	低温过热	低温过热
9	0	0.1646	1.3824	#	1*2	中温过热(×)	有局部放电
10	0.0541	1.2551	8.9697	高温过热	*31	高温过热	层间绝缘不良
11	0.0763	0.8333	9.3000	#	1*1	高温过热	高温过热
12	0.0738	0.2509	0.2571	#	1*4	低温过热(×)	正常
13	0	0.0815	0.5882	#	*04、1*4	低温过热局部放电	有局部放电
14	0	1.4475	2.5143	中温过热	*33	中温过热	中低温过热
15	0.0464	1.9323	4.6992	高温过热	*31	高温过热	高温过热
16	0.4166	0.3891	12.4647	#	*11	高能放电	高能放电
17	1.2308	0.7600	0.7647	#	42*	高能放电(×)	正常
18	0.0237	3.8924	2.4976	中温过热	*33	中温过热	中温过热
19	0.0246	0.9655	8.2797	#	*21、1*1	高能放电局部过热	局部高温过热
20	0.0075	5.1071	9.6667	高温过热	*31	高温过热	导电回路高温过热
21	0.0050	7.1233	8.5714	高温过热	*31	高温过热	磁路高温过热
22	0	2.3095	3.8217	中温过热	*33	中温过热	铁心多点接地
23	0	14.8125	5.1087	高温过热	*31	高温过热	导电回路高温过热
24	0.0804	1.2791	5.1111	高温过热	*31	高温过热	高温过热
25	0	0.0594	1.3824	#	*0*、1*2	局部放电兼过热	有局部放电
26	0	0.0956	0.0536	局部放电	*0*	局部放电	有局部放电
27	1.2700	0.1763	2.5000	低能放电	41*	低能放电	低能放电
28	1.1197	0.2400	8.3571	低能放电	41*	低能放电	工频续流放电
29	1.0476	0.1698	9.0000	低能放电	41*	低能放电	围屏放电
30	1.3846	0.1800	11.6071	低能放电	41*	低能放电	围屏放电
31	0.2143	0.4746	7.7778	#	*11	高能放电	分解开关电弧
32	0.0060	1.2963	5.7328	高温过热	*31	高温过热	高温过热
33	0	0.0745	0.2069	#	*04、1*4	低温过热局部放电	有局部放电
34	0.0652	1.9125	6.5714	高温过热	*31	高温过热	层间绝缘不良
35	10.5556	0.2467	0.2118	#	51*	低能放电	低能放电
36	0.1342	1.2553	13.0939	高温过热	*31	高温过热	电弧放电兼过热
37	0.0242	0.1699	1.8452	#	1*2	中温过热	温度 607℃
38	0.0121	0.8191	7.3821	#	1*1	高温过热	铁心多点接地
39	1.2308	0.7600	0.7647	#	42*	高能放电(×)	无故障
40	0.0214	0.4930	3.2370	#	1*3	中温过热(×)	高温过热
41	1.3846	0.1800	17.1053	低能放电	41*	低能放电	围屏放电
42	0.0237	3.8924	2.4976	中温过热	*33	中温过热	中温过热
43	0.0051	5.6345	8.1800	高温过热	*31	高温过热	分解开关接触不良而过热
44	0.1241	11.2453	Inf	高温过热	*31	高温过热	放电兼过热
45	0.9104	0.6728	18.1081	高能放电	3*1	高能放电	放电故障
46	0.0421	1.4878	1.9126	中温过热	1*2	中温过热	铁心两点或多点接地
47	1.2075	0.7495	0.4206	#	42*	高能放电	电弧放电
48	0.0464	1.9306	4.7267	高温过热	*31	高温过热	高温过热
49	1.4545	0.8425	14.0000	高能放电	42*	高能放电	高能放电
50	0.0292	1.5455	11.4286	高温过热	*31	高温过热	高温过热
51	0.0062	1.8824	9.8113	高温过热	*31	高温过热	高温过热

续表 6

编号	三比值			IEC-60599 诊断结果	改进的 IEC-60599 决策表诊断结果		实际故障
	$\varphi(C_2H_2)/\varphi(C_2H_4)$	$\varphi(CH_4)/\varphi(H_2)$	$\varphi(C_2H_4)/\varphi(C_2H_6)$		编码	诊断结果	
52	0.0032	3.3333	1.5000	中温过热	1*2	中温过热	中低温过热
53	1.0476	0.1698	9.0000	高能放电	41*	低能放电(x)	高能放电
54	1.1408	0.3254	1.8727	低能放电	41*	低能放电	低能放电
55	0	1.4475	2.5143	中温过热	*33	中温过热	中低温过热
56	0.0100	16.4108	5.7114	高温过热	*31	高温过热	高温过热
57	0	44.6759	1.0593	中温过热	1*2	中温过热	中低温过热
58	0.3483	0.6287	12.7600	#	*21	高能放电	高能放电
59	0	0.0815	0.5882	#	*04、1*4	低温过热兼局放	低能放电
60	0.2639	1.6333	2.0000	#	*32	中温过热	中温过热
61	0.00	0.04	0.87	#	*04、1*4	低温过热兼局放	局部放电
62	0.00	0.38	0.61	#	*04、1*4	低温过热兼局放	绕组内部过热

注：表 6 中符号“#”表示无对应的故障类型（无法诊断）；“x”表示误诊断；“*”表示该项比值为非关键量，不影响三比值诊断结果。

5 结论

本文提出的改进新导则 IEC-60599 三比值诊断决策法不但保留了新导则三比值法的故障诊断能力，而且还拓宽了新导则三比值诊断法的诊断范围，它在故障信息不完备的情况下，通过信息的隐含性质，提取故障诊断决策规则。同时在故障信息不完备和边界值重叠的情况下，同样可以进行故障识别。它具有复合故障的诊断能力和较高的故障诊断正确率。这种改进的诊断方法使用简单，便于工程技术人员的现场使用，在实际工程中有实际应用价值。

参考文献

- [1] IEC-599, International Electrotechnical Commission. Internation for the analysis in transformer and other on-filled electrical equipment in service[S].
- [2] IEC-60599, Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-guide to the interpretation of dissolved and free gases Analysis[S].
- [3] 刘一, 倪远平. 三比值灰关联度分析的变压器故障诊断法[J]. 高电压技术, 2002, 28(10): 16-17.
Liu Yi, Ni Yuanping. A transformer faults diagnosis method based on the grey correlation theory[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(10): 16-17.
- [4] 王少芳, 蔡金锭. GA-BP 混合算法在变压器色谱诊断法中的应用[J]. 高电压技术, 2002, 29(7): 3-5.
Wang Shaofang, Cai Jinding. Applications of the GA-BP mixed arithmetic in transformer gas chromatography[J]. High Voltage Engineering, 2002, 29(7): 3-5.
- [5] 王少芳, 蔡金锭, 刘庆珍. 基于改进 GA-BP 混合算法的电力变压器故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 30-33.
Wang Shaofang, Cai Jinding, Liu Qingzhen. Power transformer faults diagnosis by improved hybrid based on genetic algorithm and back propagation algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 30-33.
- [6] 袁保奎, 郭基伟, 唐国庆. 基于粗糙集的电力变压器故障分类[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 39(1): 1-4.

Yuan Baokui, Guo Jiwei, Tang Guoqing *et al.* The transformer fault classification based on rough set[J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 39(1): 1-4.

- [7] 俞晓东, 孙莹, 马铮. 一种基于粗糙集的电力变压器故障综合诊断方法[J]. 高压电器, 2003, 9(1): 30-33.
Yu Xiaodong, Sun Ying, Ma Zheng. A synthetic diagnosis method for electric power transformer fault based RS theory[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 9(1): 30-33.
- [8] 束洪春, 孙向飞, 司大军. 电力变压器故障诊断系统知识库建立和维护的粗糙集方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 31-35.
Shu Hongchun, Sun Xiangfei, Si Dajun. A RS approach to founding and maintaining ES knowledge base for fault diagnosis of power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 31-35.
- [9] 王楠, 律方成, 刘云鹏, 等. 基于粗糙集理论与模糊 Petri 网络的油浸电力变压器综合故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 127-132.
Wang Nan, Lü Fangcheng, Liu Yunpeng *et al.* Synthetic fault diagnosis of oil-immersed power transformer based on rough set theory and fuzzy petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 127-132.
- [10] 项建新. 粗糙集理论在变压器故障诊断专家系统中的应用研究[J]. 科技通报, 2003, 9(4): 287-291.
Xiang Jianxin. The study of rough set theory in fault diagnosis expert system of transform[J]. Bulletin of Science and Technology, 2003, 19(4): 288-291.
- [11] 莫娟, 王雪, 董明, 等. 基于粗糙集理论的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 162-167.
Mo Juan, Wang Xue, Dong Ming *et al.* Diagnostic model of insulation faults in power equipment based on rough set theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 162-167.
- [12] Wang G Y, Liu F. The inconsistency in based rule generation[C]. The Second International conference on Rough Set and Current Trends in Computing, 2000: 332-339.
- [13] 王国胤. 粗糙集理论与知识获取[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.

收稿日期: 2005-01-30。

作者简介:

蔡金锭 (1954-), 男, 博士, 教授, 长期从事电力网络的优化设计、电力变压器故障的智能诊断和人工智能技术方面的研究和教学工作;
王少芳 (1977-), 男, 硕士, 从事电力系统人工智能技术的研究。