

基于粗糙集理论的电力变压器绝缘故障诊断

王少芳, 蔡金锭, 刘庆珍

(福州大学电气工程系, 福建 福州 350002)

摘要: 提出了一种基于粗糙集理论的电力变压器绝缘故障诊断新方法,它能够根据不完整征兆信息对电力变压器故障进行诊断。该方法不但可直接从完备的故障征兆样本集中导出正确的诊断结论,而且还能从不完备的故障征兆样本集中导出满意的诊断结论,它揭示了故障征兆信息的冗余性。实例诊断结果证实了该方法的有效性。

关键词: 电力变压器; 粗糙集; 决策表; 故障诊断

中图分类号: TM85 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)02-0023-04

0 引言

电力系统朝着超高压、大容量的方向发展,对电力设备运行可靠性的要求不断提高。大型电力变压器作为电力系统中重要的变电设备,其运行状态将直接影响到电力系统的安全运行。所以,迅速而准确地对其进行故障诊断,将是保障供电可靠性的重要手段之一。

电力变压器的故障诊断实质上是一个模式分类问题,即根据各种各样的故障征兆,判断出故障发生的部位或区域。由于电力变压器故障征兆与故障原因之间存在着很多不确定因素,所以一种故障可能会有多个征兆,而一种征兆又可能由几种故障引起。本文用粗糙集理论,考虑到故障征兆信息的不准确、不完备性,提出一种电力变压器常见绝缘故障的诊断模型。

1 粗糙集理论

粗糙集理论(Rough Set Theory,简称RST)是Pawlak Z及其合作者于1982年提出的一种处理模糊性和不精确问题的新型数学工具^[1,2]。它的最大特点是不需要提供求解问题时所需处理的数据集合之外的任何先验信息(如统计中要求的先验概率和模糊集中要求的隶属度),就能有效地分析和处理不精确、不一致、不完整等各种不完备数据,并从中发现隐含的知识,揭示其潜在的规律^[3]。

1.1 粗糙集的上、下近似集^[3]

在RST中,用等价关系代替分类,设 U 是

论域, R 为 U 上的一族等价关系,二元对 $K = (U, R)$ 构成一个近似空间(Approximation space)。 R 将论域 U 分成一族等价类 $E_i (i = 1, \dots, n)$, E_i 和空集称为 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):

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

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。

1.2 决策表^[4]

信息系统 IS (Information System) 可表示为 $IS = (U, A, V_a, f_a)$, 其中 U 是对象的非空有限集合,称为论域; A 是对象属性的非空有限集合,称为属性集合; $V_a = \bigcup_a V a_a$ 是属性值的集合, $V a_a$ 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”对就构成了一张二维表,称之为信息表 (Information table)。

如果 A 由条件属性 C 和结论属性 D 组成,且 C, D 满足:

$$C \cap D = A, \quad C \cap D = \emptyset$$

则称 IS 为决策系统 (Decision System, 简称 DS)。

实际使用时,决策系统一般表示成一张决策表 (Decision table) 的形式,每一列表示一个属性,每一行表示一个对象。

基金项目: 福建省教育厅基金资助项目 (JB01035)、福州大学人才基金

例 1:假设一个由 7 个对象组成的简单决策系统,有 4 个条件属性 c_1, c_2, c_3, c_4 , 一个决策属性 d , 如表 1 所示:

表 1 某一决策表
Tab. 1 A decision table

U	c_1	c_2	c_3	c_4	d
1	1	0	0	1	1
2	1	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0
4	1	1	0	1	0
5	1	1	0	2	2
6	2	1	0	2	2
7	2	2	2	2	2

1.3 决策表的化简及分类规则的提取

决策表中的一个属性对应一个等价关系,一个决策表可看作是定义的一族等价关系。决策表中并非所有的条件属性都是必要的,有些是多余的,去除这些属性不会影响原有的表达效果。决策表的化简就是化简表中多余的条件属性,即去除冗余的条件属性,在删除这些属性后不会影响原有的表达效果,化简后的决策表具有更少的条件属性但具有化简前的决策表的功能。

决策表的简化步骤如下:

1) 删除条件属性集合的冗余属性,找到所有约简。首先定义决策规则的协调性:相同的规则前代(即属性部)必然有相同的后继(即结论部);不同的规则前代允许有不同或者相同的后继;相同的后继允许有相同或不同的前代。判断某一个条件属性冗余或可省的准则是:若去掉条件属性集中某属性后,算法中所有规则仍然协调,则该属性可省去;若有一个规则不协调,则该属性不可省。同理,依次单独去掉其他条件属性来考察规则的协调与否,最终去掉所有冗余条件属性。例如逐一除去表 1 中条件属性 c_1, c_2, c_3, c_4 , 看看该列决策表是否协调。检查后发现 c_3 是多余的,而 c_1, c_2, c_4 是必需的属性。 $\{c_1, c_2, c_4\}$ 称为原条件属性集 $\{c_1, c_2, c_3, c_4\}$ 的一个约简。一个决策表的条件属性集可能存在多个约简。本例中只有一个,见表 2。

2) 对每个约简进一步化简,找到最小约简。假设每个约简有 L 个决策规则, R 个条件属性,那么先删除第 i 个决策规则的第 j 个条件属性 a_{ij} , 然后将该决策规则剩余的 $R - 1$ 个条件属性 $a_{in} (n = 1 \sim R, n \neq j)$ 与其余 $L - 1$ 个决策规则的对条件属性 $a_{mn} (m = 1 \sim L, m \neq i)$ 进行比较,若条件属性完全相

同则再看决策属性是否相同,相同则表示该被删除的条件属性 a_{ij} 是冗余的,反之则不是冗余的,依此类推以实现最小约简。对于表 2 化简后得到的最终决策表见表 3,符号 * 表示该属性的取值对分类没有影响。显然,表 3 比表 1 要简单得多,它仅包含了那些在决策时所必需的条件属性值,但它具有原始知识系统的所有知识和分类能力。

3) 从最小约简中提取分类规则。

从表 3 中可以提取 3 条分类规则,Rule1:if ($c_1 = 1$ and $c_2 = 0$) Then ($d = 1$);Rule2: if ($c_1 = 0$) or ($c_2 = 1$ and $c_4 = 1$) Then ($d = 0$);Rule3:if ($c_4 = 2$) Then ($d = 2$)。

表 2 约简 $\{c_1, c_2, c_4\}$
Tab. 2 The reduct $\{c_1, c_2, c_4\}$

U	c_1	c_2	c_4	d
1	1	0	1	1
2	1	0	0	1
3	0	0	0	0
4	1	1	1	0
5	1	1	2	2
6	2	1	2	2
7	2	2	2	2

表 3 约简 $\{c_1, c_2, c_4\}$ 的最小约简
Tab. 3 The minima of reduct $\{c_1, c_2, c_4\}$

U	c_1	c_2	c_4	d
1	1	0	*	1
2	0	*	*	0
3	*	1	1	0
4	*	*	2	2

2 基于粗糙集理论的变压器故障诊断

变压器的故障诊断可描述成一个模式分类问题,因此很适合用粗糙集理论的决策表方法来处理,其基本思想是把观察或测量到的变压器故障征兆作为对故障分类的条件属性,把实际存在的故障作为决策属性建立决策表,先利用粗糙集理论强大的约简能力对原始信息进行化简而得到多个与原始信息表等价的约简,然后对约简进一步化简,找到最小约简并抽取决策规则。根据实际某台电力变压器的故障征兆,找到对应的规则,就能对其进行诊断。实际上,它是利用故障信息的冗余性,通过避开遗漏的或错误的信息来处理不完备的故障信息。

表 4 给出了征兆集合 M 列表,表 5 给出了故障类型及其相应的征兆^[5],根据表 5 就可以写出电力变压器故障诊断的决策表(见表 6)。在表 6 中 U 表示样本

编号, $m_i (i = 1, 2, \dots, 11)$ 和 D 分别表示条件属性和决策属性。其中条件属性 m_i 的值为 1 表示该征兆信息出现或不正常, 0 表示不出现或正常。

表 4 征兆集合 M 列表

Tab.4 List of symptom set M

编号	征兆类型
m_1	铁心接地电流
m_2	三比值编码呈过热性故障特征
m_3	绕组直流电阻三相不平衡系数
m_4	变压器本体油中含水量
m_5	三比值编码呈放电性故障特征
m_6	瓦斯继电器保护动作
m_7	绕组变比
m_8	PD 测量
m_9	CO/CO ₂
m_{10}	绕组之间或对地间的电容量
m_{11}	绕组的绝缘电阻

表 5 故障类型及其相应的征兆

Tab.5 Fault types and relevant symptoms

编号	故障类型	相应征兆
d_1	铁心多点接地及局部短路	$m_1, m_2, m_5, m_6, m_8, m_9$
d_2	漏磁发热或磁屏蔽放电过热	$m_2, m_5, m_6, m_8,$
d_3	匝绝缘损伤并匝间短路	m_6, m_7, m_8, m_9
d_4	绝缘受潮	m_4, m_{11}
d_5	分接开关事故及引线故障	m_2, m_3, m_6
d_6	悬浮放电	m_5, m_6, m_8
d_7	围屏放电	m_4, m_5, m_6, m_8, m_9
d_8	线圈变形并匝间短路	$m_6, m_7, m_8, m_9, m_{10}$
d_9	其它	

表 6 对应于表 5 的决策表

Tab.6 Decision table according to Tab.5

U	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}	m_{11}	D
1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	d_1
2	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	d_2
3	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	d_3
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	d_4
5	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	d_5
6	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	d_6
7	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	d_7
8	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	d_8
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	d_9

决策表 6 经过删除多余的条件属性, 获得 11 个约简: $\{m_2, m_7, m_8, m_9, m_{10}, m_{11}\}, \{m_2, m_4, m_5, m_9, m_{10}\}, \{m_2, m_5, m_9, m_{10}, m_{11}\}, \{m_2, m_4, m_8, m_9, m_{10}\}, \{m_2, m_3, m_4, m_6, m_9, m_{10}\}, \{m_1, m_2, m_4, m_7, m_8, m_{10}\}, \{m_1, m_2, m_4, m_5, m_8, m_{10}\}, \{m_1, m_2, m_4, m_5, m_7, m_{10}\}, \{m_1, m_2, m_4, m_5, m_6, m_{10}\}, \{m_2, m_3, m_6, m_7, m_9, m_{10}, m_{11}\}, \{m_1,$

$m_2, m_3, m_4, m_6, m_7, m_{10}\}$, 其中约简 $\{m_2, m_4, m_8, m_9, m_{10}\}$ 如表 7 所示。这 11 个约简保持了与原决策表完全相同的分类能力, 但所需的条件属性却大大减少, 对以上 11 个约简进一步消去每一决策规则的冗余属性, 可得最小约简, 其中约简 $\{m_2, m_4, m_8, m_9, m_{10}\}$ 的最小约简如表 8 所示。决策表的最小约简清晰地显示了每个故障的重要特征, 它们具有与原决策表相同的诊断能力。

表 7 约简 $\{m_2, m_4, m_8, m_9, m_{10}\}$

Tab.7 The reduct $\{m_2, m_4, m_8, m_9, m_{10}\}$

U	m_2	m_4	m_8	m_9	m_{10}	D_1
1	1	0	1	1	0	d_1
2	1	0	1	0	0	d_2
3	0	0	1	1	0	d_3
4	0	1	0	0	0	d_4
5	1	0	0	0	0	d_5
6	0	0	1	0	0	d_6
7	0	1	1	1	0	d_7
8	0	0	1	1	1	d_8
9	0	0	0	0	0	d_9

表 8 约简 $\{m_2, m_4, m_8, m_9, m_{10}\}$ 的最小约简

Tab.8 The minima of reduct $\{m_2, m_4, m_8, m_9, m_{10}\}$

U	m_2	m_4	m_8	m_9	m_{10}	D_1
1	1	*	*	1	*	d_1
2	1	*	1	0	*	d_2
3	0	0	*	1	0	d_3
4	*	1	0	*	*	d_4
5	1	*	0	*	*	d_5
6	0	*	1	0	*	d_6
7	*	1	1	*	*	d_7
8	*	*	*	*	1	d_8
9	0	0	0	*	*	d_9

表中: * 表示取 0 或 1

从表 8 中可提取 9 条简化的故障诊断规则, 如规则 1 (Rule1): if ($m_2 = 1$ and $m_9 = 1$) Then ($D = d_1$); 规则 2 (Rule2): if ($m_2 = 1$ and $m_8 = 1$ and $m_9 = 0$) Then ($D = d_2$) 等。利用这些简化的诊断规则可以很容易地对电力变压器的故障进行诊断。

对表 8 中的 9 条判断变压器故障类型的规则进行测试可以看到: (a) 若故障的征兆完备, 它们能准确地区别这 9 种类型的故障; (b) 若遗漏的或错误的信息不是约简中的关键信息, 对分类结果无影响; (c) 若遗漏了关键信息, 可选择不同的约简, 通过避

开遗漏的关键属性,利用多数判决的原则进行综合诊断。

3 故障诊断实例

河南某变电站#2电力变压器色谱结果如下: $\text{CH}_4 = 74.9 \times 10^{-6}$, $\text{C}_2\text{H}_6 = 30.4 \times 10^{-6}$, $\text{C}_2\text{H}_4 = 136 \times 10^{-6}$, $\text{C}_2\text{H}_2 = 1.1 \times 10^{-6}$, $\text{H}_2 = 2.11 \times 10^{-6}$,按三比值判断为高温过热; $\text{CO} = 133 \times 10^{-6}$, $\text{CO}_2 = 1575 \times 10^{-6}$,则有 $\text{CO}/\text{CO}_2 = 0.084$,其值小于0.09,似为异常;在电气实验数据中,又给出了三相不平衡系数,其值大于2%,不正常;局部放电量100 pC,合格^[5]。由表8中提取的规则:

Rule1 :if($m_2 = 1$ and $m_9 = 1$) Then($D = d_1$)

Rule5 :if($m_2 = 1$ and $m_8 = 0$) Then($D = d_5$)

判断故障为铁心多点接地及局部短路和分接开关事故及引线故障两种故障。实际吊芯检查结果为铁芯接地铜片过长,搭接了铁轭部分硅钢片,从而造成铁心局部短路;同时有载分接开关的操作杆下端槽口有烧黑痕迹。可见诊断结果与实际情况相符合。

4 小结

1) 由于RS理论在处理不精确问题时,不需要提供求解问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息,且能够在保留关键信息的前提下对数据进行化简并求得知识的最小表达,能够处理含有遗漏或错误的信息,适合于变压器故障诊断,能够处理变压器的复合故障。

2) 把电力变压器的故障征兆作为对故障分类的条件属性集,以决策表为主要工具,利用决策表的约简形式,抽取诊断规则,就能实现电力变压器的故障诊断。该方法不但可直接从完备的故障征兆样

本集中导出正确的诊断结论,而且还能从不完备的故障征兆样本集中导出令人满意的诊断结论,也揭示了故障征兆信息的冗余性。实例诊断结果表明了该方法不但能处理变压器的复合故障,而且还能初步确定故障的部位。

参考文献:

- [1] Pawlak Z. Rough Sets[J]. International Journal of Computer and Information Sciences, 1982, 11(3): 341 - 356.
- [2] Pawlak Z, et al. Rough Sets - Theoretical Aspects of Reasoning about Data. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [3] 王国胤(WANG Guo-yin). Rough集理论与知识获取(Rough Set Theory and Its knowledge Acquisition) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press), 2001.
- [4] 李玉榕(LI Yurong). 信息融合与智能处理的研究(Study on Information Fusion and Intellectual Approach) [D]. 杭州:浙江大学(Hangzhou: Zhejiang University), 2001.
- [5] 杨莉,钱政,周跃峰,等(YANG Li, QIAN Zheng, ZHOU Yue-feng, et al). 基于约覆盖集理论的电力变压器绝缘故障诊断模型(Parsimonious Covering Theory Applied for Identifying Power Transformer Malfunction) [J]. 西安交通大学学报(Journal of Xi'an Jiaotong University), 1998, 33(4): 17 - 20.

收稿日期: 2003-05-07; 修回日期: 2003-06-08

作者简介:

王少芳(1977-),男,硕士研究生,研究方向为人工智能技术在电力变压器故障诊断中的应用;

蔡金锭(1954-),男,博士、教授,从事电力网络的优化设计和电力电子、电力变压器的故障诊断研究。

Diagnosis of insulation malfunction in power transformer based on Rough Set theory

WANG Shao-fang, CAI Jin-ding, LIU Qing-zhen

(Dept. of Electrical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: A new method used to identify power transformer insulation malfunction based on rough set theory is proposed. With this method power transformer malfunction can be known based on incomplete symptom information. Not only the accurate diagnosis can be obtained directly from the set of complete fault samples, but also the satisfactory diagnosis results can be got from the set of incomplete fault samples by using this method. The inherent redundancy of the fault information is revealed. The effectiveness of the approach has been verified by the diagnosis results of some examples.

Key words: power transformer; Rough Set; decision table; fault diagnosis

恭贺广大读者新年快乐、万事如意!