

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191307

# 基于粗糙集贪心算法的逆变器开路故障诊断

韩素敏, 郑书晴, 何永盛

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 针对逆变器开路故障时特征信息的冗余性、复杂性和精确度不高的问题, 提出一种粗糙集贪心算法来进行数据离散和属性约简并提取有效规则表。该方法可以在系统的不可分辨关系不改变的前提下实现数据的离散化, 并从数据样本集中提取重要度较高的条件属性进行属性约简, 最后提取有效规则表实现逆变器开路故障诊断。该方法很好地解决了逆变器开路故障诊断时处理数据的冗余性和复杂性的问题, 大幅度减小故障数据特征维度, 同时运用有效规则表可快速准确地进行故障诊断, 节省大量时间。

**关键词:** 逆变器; 故障诊断; 粗糙集; 贪心算法; 约简

## Open circuit fault diagnosis for inverters based on a greedy algorithm of a rough set

HAN Sumin, ZHENG Shuqing, HE Yongsheng

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of redundancy, complexity and low accuracy of feature information in the open circuit fault of an inverter, a rough set greedy algorithm is proposed to discretize data, reduce attributes and extract an effective rule table. This method can realize the discretization of data without changing the indiscernible relationship of the system, extract the condition attributes with high importance from the data sample set for attribute reduction, and finally extract the effective rule table to realize the open circuit fault diagnosis of the inverter. This method solves the problem of data redundancy and complexity in open circuit fault diagnosis of the inverter, greatly reduces the feature dimension of fault data, and uses an effective rule table to diagnose the fault quickly and accurately, saving a lot of time.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0600906).

**Key words:** inverter; fault diagnosis; rough set; greedy algorithm; reduction

## 0 引言

随着电力电子技术的日益发展, 电压源型逆变器因其良好的控制性能在传动领域中越来越重要, 由逆变器供电的电机调速系统如今已成为一个工业标准<sup>[1-2]</sup>。然而, 逆变器中主电路的开关器件及其控制电路是最容易发生事故的薄弱环节, 其中, 逆变器的故障原因主要是开关元件的开路或短路, 所以必须对逆变器中开关元件的故障进行及时诊断<sup>[3-4]</sup>。当发生短路故障时, 逆变电路会通过自身的熔断器将其转换为开路故障<sup>[5]</sup>, 因此, 及时进行逆变器的开关管开路故障诊断对于提高系统可靠性具有重大意义。

此前, 国内外学者对逆变器故障诊断已开展了不少研究。其中, 文献[6]提出了一种利用差异化的粗糙集属性约简与有向无环图-支持向量机相结合的方法来实现变压器的故障诊断, 但该方法只适用于小样本数据且数据离散化效果较差。文献[7]通过检测每相输出的正负半波无功功率的诊断方法, 对STATCOM主回路开关器件IGBT和续流二极管进行开路故障诊断, 该方法能够准确定位到单管IGBT故障和二极管故障, 但是双管故障不太适用。文献[8]分别对单管和双管开路故障诊断进行研究, 利用小波变换和改进的布谷鸟优化SVM算法对三电平逆变器进行故障诊断, 该方法简单有效, 可以降低复杂程度。文献[9]采用神经网络方法对三相逆变器进行故障诊断, 该算法解决了非线性问题, 但诊断速度不够快。文献[10]通过建立故障分类器, 实现

基金项目: 国家重点研发计划专项资助(2016YFC0600906)

对变频器逆变电路 IGBT 开路故障的精确定位, 与传统 BP 神经网络相比, 实现起来简单方便, 但是训练时间较长。文献[11]将傅里叶变换-主元分析-贝叶斯网络的故障诊断方法应用到多电平逆变器上, 该方法对故障诊断快速且准确, 但试验数据存在随机噪声的影响, 致使整体性能较差。文献[12]提出了一类逆向卡尔曼滤波故障诊断方法, 解决了逆变器中等效电阻异变的故障诊断问题, 该算法的跟随性强, 准确度高和实时性好, 但是结构复杂。

综上所述, 对于逆变器开路故障诊断的研究, 诊断样本结构的复杂性、数据的冗余性及精确度不高是亟待解决的问题。故在针对逆变器发生的各种开路故障类型中提出了一种将粗糙集理论与贪心算法相结合的方法对诊断样本数据进行属性约简, 提高了算法的收敛性能和求解效率。对实际逆变器开路故障诊断数据进行处理分析, 进行贪心算法离散化与贪心算法属性约简, 依据提取的有效规则实现故障诊断, 使得诊断过程简单, 精确度高。

## 1 粗糙集贪心算法

粗糙集理论能够从众多的数据中找到关键数据, 对所研究的事件实现最优约简<sup>[13-15]</sup>。基于粗糙集理论的故障诊断方法能利用最小决策表提取诊断规则, 在逆变器存在复杂故障的情况下减少故障数据特征维度, 更加简洁方便。

### 1.1 粗糙集理论

定理 1<sup>[16-17]</sup> 四元组  $S=(U,A,V,f)$  为一个信息系统, 其中,  $U$  为论域;  $A=C\cup D$  属性集,  $C$  表示条件属性,  $D$  表示决策属性;  $V$  为全体属性的值域;  $f$  表示  $U\times A\rightarrow V$  的一个映射, 称为信息函数。知识表达系统  $S$  称为一个决策表。

定理 2<sup>[6]</sup> 对于  $x,y\in U, P\subseteq Q$ , 且  $P\neq\emptyset$ , 则  $I_P(P$  中所有等价关系的交集) 仍然是论域  $U$  上的一个等价关系, 称为  $P$  上的不可分辨关系, 记为  $IND(P)$ , 常简记为  $P$ 。而且

$$\forall x\in U, [x]_{IND(P)} = [x] = \bigcap_{R\in P} [x]_R \quad (1)$$

定理 3<sup>[18]</sup> 令  $R$  为一族等价关系,  $r\in R$ , 如果  $\text{ind}(R) = \text{ind}(R-\{r\})$  (2)

则称  $r$  为  $R$  中冗余, 否则  $r$  为  $R$  中必要。

定理 4<sup>[19]</sup> 对数据表  $S=(U,A,V,f)$ , 称  $C$  中所有必要属性构成的集合为  $C$  的核, 记为  $\text{Core}(C)$ 。

若  $U/R_B=U/R_C$ , 且  $B$  是独立的, 称  $B\subseteq C$  是一个约简, 记为  $\text{red}(C)$ 。

### 1.2 贪心算法

为了进一步提高粗糙集理论的约简效率和应用效果, 本文研究了一种贪心算法<sup>[20]</sup>。其基本思想是从需要解决的原始状态入手, 采用迭代的方法, 进行多次的贪心选择后得到最优解。

#### 1.2.1 贪心算法连续属性离散化

从粗糙集的观点看, 离散化是利用一些合适的划分点将连续属性值域范围划分为离散区间, 将处于同一区间属性值归为一类<sup>[21]</sup>。在求取断点时, 希望得到最小数目的断点集, 故选用贪心算法。基于贪心算法的离散化流程图如图 1 所示。

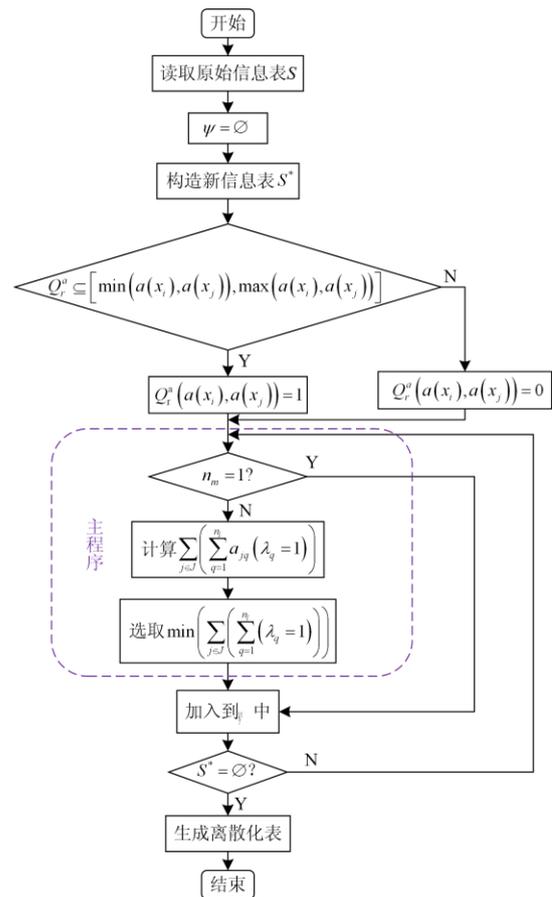


图 1 连续属性离散化流程图

Fig. 1 Flow chart of continuous property discretization

Step1: 在原始信息表  $S=(U,A,V,f)$  的基础上构造新的信息表  $S^*=(U^*,A^*,V^*,f^*)$ 。其中

$$U^* = \{(x_i, x_j) \in U \times V \mid d(x_i) \neq d(x_j)\} \quad (3)$$

$(x_i, x_j)$  是由决策属性值不同的两条样本产生的新元素。

$$A^* = \{P_r^a \mid a \in C\} \quad (4)$$

将各条件属性由小到大排列,  $P_r^a$  是相邻两个属

性值的中点。对于  $\forall P_r^a$ ，若满足  $P_r^a \subseteq [\min(a(x_i), a(x_j)), \max(a(x_i), a(x_j))]$ ，那么  $P_r^a(a(x_i), a(x_j)) = 1$ ，否则  $P_r^a(a(x_i), a(x_j)) = 0$ 。

Step2: 假设  $\psi$  为断点集，原始状态为空。

Step3: 计算新信息表  $S^*$  中各断点所在列值为 1 的数目和，删去 1 的个数最多的断点所在的列和在此断点上数值为 1 的所有行，把该断点值添加到  $\psi$  中；如果列中 1 的个数相同的断点大于 1 个，则需要对该断点进行再次计算，接着对列值为 1 的所有行中的 1 进行叠加，取和最小的断点加入到  $\psi$  中。

Step4: 删除信息表  $S^*$  中所取断点所在列属性值是 1 的记录，判断信息表  $S^*$  是否为空，若否，则重复进行 Step3，否则停止。所求断点集就是  $\psi$ 。

### 1.2.2 贪心算法属性约简

属性约简的过程，就是在不影响原有决策真实性的前提下，从决策表的所有条件属性中删减多余的条件属性，进而分析最终约简中的条件属性对于决策属性的决策规则<sup>[22]</sup>。

基于贪心算法的属性约简步骤与 1.2.1 节所述离散化步骤相似，只是新信息表  $S^*$  的构造方法有所差异，属性约简流程图如图 2 所示。

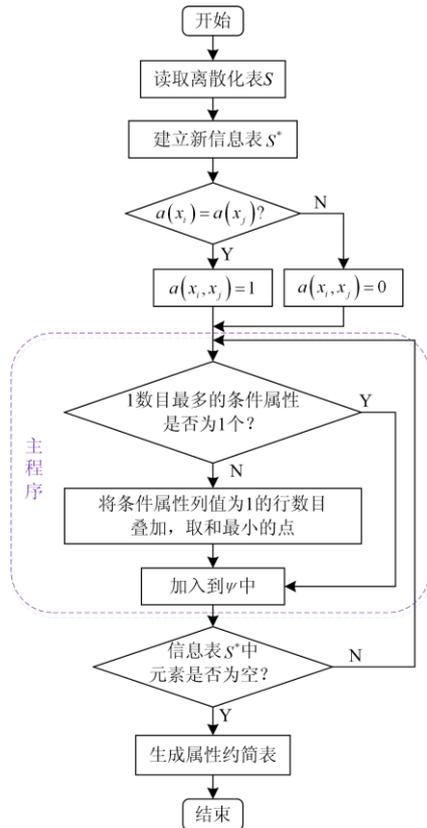


图 2 属性约简流程图

Fig. 2 Attribute reduction flowchart

Step1: 根据原信息表  $S=(U, A, V, f)$  构造新信息表  $S^*=(U^*, A^*, V^*, f^*)$ 。其中：

$$U^* = \{(x_i, x_j) \in U \times V \mid d(x_i) \neq d(x_j)\} \quad (5)$$

$$A^* = \{P_r^a \mid a \in C\} \quad (6)$$

如果属性  $a$  的值  $a(x_i) \neq a(x_j)$ ，那么  $a(x_i, x_j) = 1$ ，否则  $a(x_i, x_j) = 0$ 。

Step2: 假设  $\psi$  为所求的最佳属性集。

Step3: 重复进行 1.2.1 节的 Step3 和 Step4，直至信息表  $S^*$  为空。此时  $\psi$  就是所求的条件属性集。

经比较图 1 和图 2 可知，两个程序的主体循环部分基本相同，在利用该算法建立程序时可大大降低编程的工作量。

## 2 基于贪心算法的逆变器开路故障诊断

三相电压型交-直-交变频器的逆变电路如图 3 所示。其中， $C_1$ 、 $C_2$  为直流侧电容， $N'$  为直流电容中性点， $T_k$  为 IGBT 开关管， $g_k$  为 IGBT 的基极， $u_{ab}$  和  $u_{bc}$  分别为 AB 相和 BC 相的电压。文献<sup>[23]</sup>说明故障的主要原因多为逆变电路的开路，且 1 个或 2 个 IGBT 的开路故障居多，故在此建立了一种基于粗糙集贪心算法的逆变器开路故障诊断模型，诊断流程图如图 4 所示。

粗糙集理论能在保持分类能力不变时，导出问题的决策规则<sup>[24]</sup>，而贪心算法由于能在粗糙集理论的基础上简便高效地解决海量数据的约简问题，成为故障诊断中应用较广的方法之一。在故障诊断中，以提取的故障特征信息为条件属性，故障类型为决策属性，依据两者的联系关系建立初始决策表<sup>[25]</sup>。由于决策表的条件属性较多，信息较为冗余，全部计算会导致计算量大大增加，故需进行属性约简。

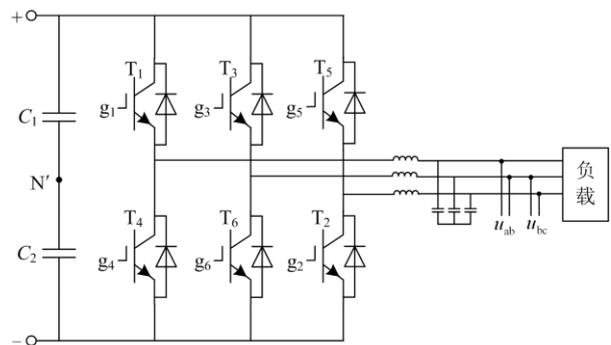


图 3 三相电压型交-直-交变频器的逆变电路

Fig. 3 Inverter circuit of three-phase voltage AC-DC-AC frequency converter

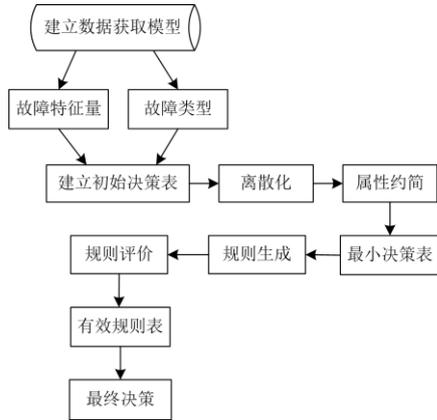


图 4 逆变器开路故障诊断流程图

Fig. 4 Flow chart of inverter open circuit fault diagnosis

### 2.1 建立初始决策表

本文选取的数据为逆变器 IGBT 开路故障数据。先利用数据获取模型对开关管发生的各种故障类型进行仿真获取波形, 由于贪心算法不能直接对波形进行分析和诊断, 故需要对波形进行特征提取。快速傅里叶变换(FFT)是一种用途广泛的频谱分析方法, 可以将时域信号转换为频域信号<sup>[26]</sup>。先对 FFT 变换后的频率幅值进行分析, 之后提取故障特征。故障谐波频谱图如图 5 所示。

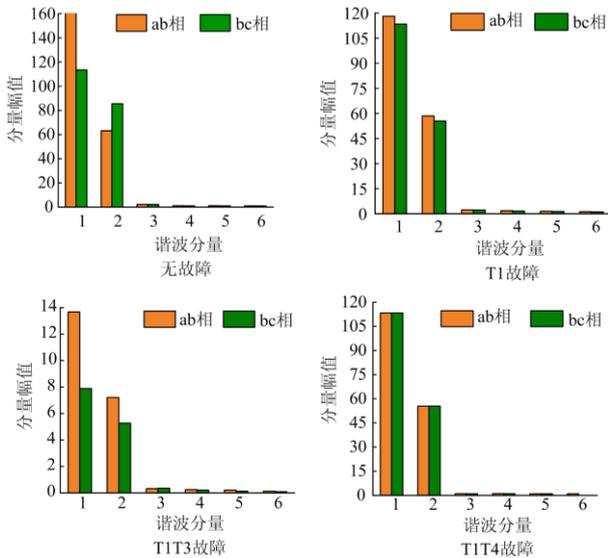


图 5 故障谐波频谱图

Fig. 5 Fault harmonic spectrum diagram

分析 FFT 变换后的各频率幅值, 发生不同类型的开路故障时, 线电压的基波分量及二次谐波幅值会发生明显变化, 三次谐波及以上变化不大且幅值较小, 故选择基波分量及二次谐波分量作为诊断的两个故障特征; 正常情况下,  $u_{ab}$  和  $u_{bc}$  的直流分量几乎为 0, 而故障情况下,  $u_{ab}$  和  $u_{bc}$  所在的直流分

量幅值明显增加, 因此直流幅值可作为故障特征; 当同一相位的不同桥臂发生故障时, 例如当  $T_1$  和  $T_6$  分别发生故障时,  $u_{ab}$  经 FFT 变换后的幅度谱是完全相同的, 对比发现这两种故障的相位谱不同, 基波相位不同, 直流相位相差  $180^\circ$ ; 故可以提取基波相位和直流相位作为故障特征。

综上所述, 最终可提取的故障特征为: 经过 FFT 变换后的线电压  $u_{ab}$  和  $u_{bc}$  的直流幅值、直流相位、基波幅值、基波相位和二次谐波幅值共 10 个。

由定义 1 将已搜集的逆变器开路历次故障数据作为论域  $U$ , 对逆变器故障进行分类, 选取三种单管故障和三种双管故障用来研究, 单管故障为开关管  $T_1$  故障、开关管  $T_4$  故障和开关管  $T_6$  故障, 双管故障为上下桥臂的开关管  $T_1T_4$  故障、同一半桥上的开关管  $T_1T_3$  故障和交叉连接的开关管  $T_1T_6$  故障。部分故障仿真波形如图 6 所示。

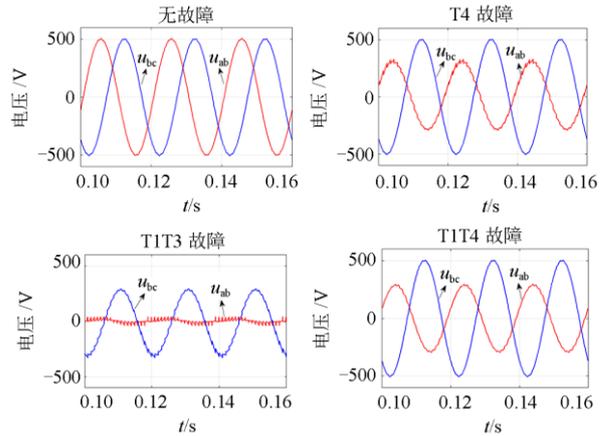


图 6 故障仿真波形

Fig. 6 Fault simulation waveform

将条件属性用  $c_i (i=1, 2, L, 10)$  表示, 决策属性用  $F_j (j=1, 2, L, 7)$  表示。条件属性集和决策属性集分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 条件属性集

Table 1 Conditional attribute set

符号	故障特征信息
$c_1$	$u_{ab}$ 直流幅值
$c_2$	$u_{ab}$ 直流相位
$c_3$	$u_{ab}$ 基波幅值
$c_4$	$u_{ab}$ 基波相位
$c_5$	$u_{ab}$ 二次幅值
$c_6$	$u_{bc}$ 直流幅值
$c_7$	$u_{bc}$ 直流相位
$c_8$	$u_{bc}$ 基波幅值
$c_9$	$u_{bc}$ 基波相位
$c_{10}$	$u_{bc}$ 二次幅值

表 2 决策属性集

Table 2 Decision attribute set

符号	故障类型
$F_1$	无故障
$F_2$	$T_1$ 故障
$F_3$	$T_4$ 故障
$F_4$	$T_6$ 故障
$F_5$	$T_1T_4$ 故障
$F_6$	$T_1T_3$ 故障
$F_7$	$T_1T_6$ 故障

分别多次模拟 7 种故障状态, 搜集已确定故障类型数据 385 条, 随机抽取其中 280 条作为样本训练集, 剩余的作为测试集, 各故障样本皆均匀分布, 以此建立初始决策表。

### 2.2 贪心算法离散和约简

构建的初始决策表是连续系统, 需对其进行数据离散化处理<sup>[27]</sup>, 采用 1.2.1 节的贪心算法离散化步骤对初始决策表进行连续属性离散化。为了求得最小的断点集, 贪心算法每次都取重要性最高的断点, 将此断点加入到  $\psi$ , 重复进行 Step3 直至  $S^*$  为空。离散化后的决策表如表 3 所示。

贪心算法约简过程依据 1.2.2 节步骤进行, 依次将所在列值为 1 的数目最多的一个条件属性加入到  $\psi$  中, 直至  $S^*$  为空, 所得最小决策表如表 4 所示。

表 3 离散化后的决策表

Table 3 Decision table after discretization

序号	条件属性										决策属性
	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$c_7$	$c_8$	$c_9$	$c_{10}$	$F$
1	6	1	1	6	1	5	2	2	5	3	$F_1$
2	1	2	6	2	1	1	1	5	6	1	$F_1$
3	2	2	2	4	3	4	2	4	2	4	$F_2$
4	2	1	3	1	4	4	2	4	2	4	$F_2$
5	5	1	1	2	2	3	2	1	6	3	$F_3$
6	1	1	4	2	5	1	2	3	5	3	$F_3$
7	2	1	3	1	5	1	1	3	4	3	$F_4$
8	10	2	2	1	6	9	1	2	4	7	$F_4$
9	2	1	3	6	4	4	2	4	2	4	$F_5$
10	2	2	2	5	3	4	2	4	2	4	$F_5$
11	1	1	1	3	1	1	2	1	5	1	$F_6$
12	2	1	1	2	1	1	2	1	5	1	$F_6$
13	2	2	1	3	1	6	2	3	5	3	$F_7$
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
279	3	2	1	3	1	8	1	3	5	3	$F_7$
280	10	2	1	3	4	9	1	2	4	7	$F_7$

表 4 最小决策表

Table 4 Minimum decision table

序号	约简结果			
	$c_1$	$c_3$	$c_4$	$c_{10}$
1				

可见, 经贪心算法约简后, 删除了 6 条冗余条件属性, 获得 4 条与故障相关的必要属性。由此不仅使故障特征维度大幅度降低, 也可节约大量时间。

### 2.2 规则生成与评价

在得到所有实例的最小约简后, 可以获得决策表中各实例支持的决策规则<sup>[28]</sup>。将获得的决策规则表示成  $c_i \rightarrow F_j$  的形式, 并采用支持量、覆盖度和精

确度作为评价指标, 其中支持量  $a$  为支持该规则实例的个数; 覆盖度  $\mu = a/m$  为该规则的支持量在相应决策类中所占的比例,  $m$  为训练集中的实例总数; 精确度  $\eta = b/n$  为该规则用于测试集进行验证时的准确度,  $b$  为单一规则与测试集属性完全相同的个数,  $n$  为单一规则的决策属性与测试集中决策属性相同的总数。规则生成评价方法为

$$\begin{cases} \mu > \varepsilon_1, & \varepsilon_1 \in [0,1] \\ \eta > \varepsilon_2, & \varepsilon_2 \in [0,1] \end{cases} \quad (7)$$

由规则生成表知,  $a \in [5,26]$ ,  $\mu \in [0.1,0.375]$ ,

$\eta \in [0, 1]$ , 经过多次对比试验验证, 当  $a=9$ ,  $\varepsilon_1=0.225$  且  $\varepsilon_2=0.8$  时, 规则的有效性最高, 除去小于设定值的规则, 可得 7 条有效规则, 即有效规则表。规则生成表和有效规则表见表 5 和表 6。

根据表 3 中的决策规则, 需已知 10 个征兆属性值方可做逆变器开路故障诊断, 而表 6 中的决策规

则仅需知 4 个征兆属性值便可判断, 所以表 6 的故障诊断决策规则是对表 3 中诊断信息的直观表示与精炼概括, 可作为逆变器故障诊断的重要依据。

表 6 中有效规则在规则生成表中的涵盖个数如图 7 所示。

表 5 规则生成表  
Table 5 Rule generation table

序号	规则	$a$	$\mu$	$\eta$
1	$c_1(1) \wedge c_3(6) \wedge c_4(2) \wedge c_{10}(1) \rightarrow F_1$	6	0.15	0.8
2	$c_1(3) \wedge c_3(2) \wedge c_4(4) \wedge c_{10}(7) \rightarrow F_1$	8	0.2	1
3	$c_1(2) \wedge c_3(3) \wedge c_4(1) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_2$	9	0.225	1
4	$c_1(5) \wedge c_3(2) \wedge c_4(4) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_2$	9	0.225	1
5	$c_1(10) \wedge c_3(2) \wedge c_4(4) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_2$	9	0.225	1
6	$c_1(2) \wedge c_3(2) \wedge c_4(4) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_2$	11	0.275	1
7	$c_1(1) \wedge c_3(4) \wedge c_4(2) \wedge c_{10}(3) \rightarrow F_3$	9	0.225	1
8	$c_1(5) \wedge c_3(1) \wedge c_4(2) \wedge c_{10}(3) \rightarrow F_3$	9	0.225	1
9	$c_1(2) \wedge c_3(1) \wedge c_4(2) \wedge c_{10}(3) \rightarrow F_3$	8	0.2	1
10	$c_1(2) \wedge c_3(3) \wedge c_4(1) \wedge c_{10}(3) \rightarrow F_4$	16	0.4	1
11	$c_1(8) \wedge c_3(2) \wedge c_4(1) \wedge c_{10}(2) \rightarrow F_4$	7	0.175	1
12	$c_1(10) \wedge c_3(2) \wedge c_4(1) \wedge c_{10}(7) \rightarrow F_4$	11	0.275	1
13	$c_1(2) \wedge c_3(3) \wedge c_4(6) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_5$	10	0.25	1
14	$c_1(5) \wedge c_3(2) \wedge c_4(5) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_5$	4	0.1	0
15	$c_1(2) \wedge c_3(2) \wedge c_4(5) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_5$	15	0.375	1
16	$c_1(1) \wedge c_3(1) \wedge c_4(3) \wedge c_{10}(1) \rightarrow F_6$	9	0.225	1
17	$c_1(2) \wedge c_3(1) \wedge c_4(2) \wedge c_{10}(1) \rightarrow F_6$	26	0.65	1
18	$c_1(1) \wedge c_3(1) \wedge c_4(3) \wedge c_{10}(3) \rightarrow F_7$	8	0.2	1
19	$c_1(3) \wedge c_3(1) \wedge c_4(3) \wedge c_{10}(3) \rightarrow F_7$	5	0.125	0
20	$c_1(2) \wedge c_3(1) \wedge c_4(3) \wedge c_{10}(3) \rightarrow F_7$	13	0.325	1

表 6 有效规则表  
Table 6 Valid rules table

序号	有效规则
1	$c_1(2) \wedge c_3(2) \wedge c_4(4) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_2$
2	$c_1(2) \wedge c_3(3) \wedge c_4(1) \wedge c_{10}(3) \rightarrow F_4$
3	$c_1(10) \wedge c_3(2) \wedge c_4(1) \wedge c_{10}(7) \rightarrow F_4$
4	$c_1(2) \wedge c_3(3) \wedge c_4(6) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_5$
5	$c_1(2) \wedge c_3(2) \wedge c_4(5) \wedge c_{10}(4) \rightarrow F_5$
6	$c_1(2) \wedge c_3(1) \wedge c_4(2) \wedge c_{10}(1) \rightarrow F_6$
7	$c_1(2) \wedge c_3(1) \wedge c_4(3) \wedge c_{10}(3) \rightarrow F_7$

### 3 实例分析与比较

以前述的 280 组训练样本进行贪心算法的验证, 以降维后的 4 种特征属性提取的有效规则表作为输入, 将输出的故障诊断结果与实际故障进行比较, 结果如表 7 所示。

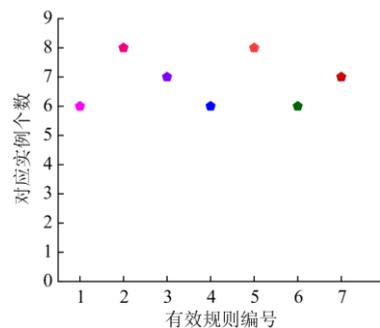


图 7 有效规则的涵盖个数

Fig. 7 Number of valid rules covered

由表 7 测试结果可知, 当  $u_{ab}$  直流幅值为 2、 $u_{ab}$  基波幅值为 2、 $u_{ab}$  基波相位为 4 和  $u_{bc}$  二次幅值为 4 时, 贪心算法诊断结果为开关管的  $T_1$  故障, 实际故障为开关管的  $T_1$  故障, 诊断结果与实际故障相符,

表 7 逆变器开路故障诊断实例

Table 7 An example of inverter open circuit fault diagnosis

序号	条件属性				贪心算法 诊断结果	实际 故障
	$c_1$	$c_3$	$c_4$	$c_{10}$		
1	2	2	4	4	$F_2$	$F_2$
2	2	3	1	3	$F_4$	$F_4$
3	10	2	1	7	$F_4$	$F_4$
4	2	3	6	4	$F_5$	$F_5$
5	2	2	5	4	$F_5$	$F_5$
6	2	1	2	1	$F_6$	$F_6$
7	2	1	3	3	$F_7$	$F_7$

与表 3 中的实例 3 一致。剩余的 6 条逆变器开路故障诊断实例依次对应于表 3 中的实例。

结合表 7 和表 3 可知，有效规则表的故障类型判定与实例中的故障类型完全相同，最终判断与实际相符，准确率和精确度较高。

为验证贪心算法的效果，利用剩余的 105 条数据作为测试集数据，分别采用 BP 神经网络、贝叶斯网络和贪心算法，在相同的条件下进行故障诊断效果比较，结果如表 8 和表 9 所示。把测试集数据中的条件属性作为输入，将测试集中输出的故障诊断结果与实际故障进行比较，结果如图 8 所示。

表 8 三种方法诊断不同故障的诊断时间

Table 8 Diagnosis time using three methods to diagnose different fault

故障诊断方法	不同故障的诊断时间/ms						
	无故障	T1 故障	T4 故障	T6 故障	T1T3 故障	T1T4 故障	T1T6 故障
BP 神经网络	3.67	4.4	4.25	4.73	6.68	7.32	6.41
贝叶斯网络	2.4	3.6	4.42	3.8	5.52	5.49	5.61
贪心算法	2.2	3.3	3.21	3.45	4.9	4.3	4.74

表 9 三种方法诊断不同故障的诊断精度

Table 9 Diagnostic accuracy using three methods to diagnose different faults

故障诊断方法	不同故障的诊断精度/%							总正确率
	无故障	T1 故障	T4 故障	T6 故障	T1T3 故障	T1T4 故障	T1T6 故障	
BP 神经网络	100	92	94	88	91	90	84	91.3
贝叶斯网络	100	94	95	90	93	96	90	94
贪心算法	100	99	99.9	100	99.8	98.9	98	99.4

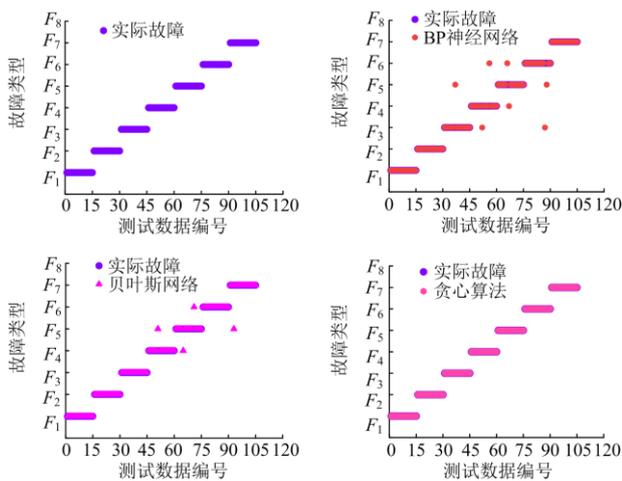


图 8 验证结果

Fig. 8 Verification result

由表 8 和表 9 中不同方法下测试样本的分析结果可以看出：在时间方面，BP 神经网络故障诊断时间最长，贪心算法耗时相对较短；在诊断精度方面，贪心算法的精度较高，而 BP 神经网络的效果较差，

主要是由于 BP 神经网络诊断算法的准确率建立在大量样本的学习基础上，因此样本数量的不足导致学习不充分，诊断效果不理想。再由图 8 的验证结果显示，在条件属性输入完全相同的条件下，贪心算法输出的故障类型与实际故障几乎完全相同，而另外两种算法则有偏差。综上所述，贪心算法在诊断时间和诊断精度上均有优势，有利于实现逆变器开路故障诊断。

#### 4 结论

针对逆变器开路故障诊断特征信息冗余度高与诊断精度不高的问题，提出了一种粗糙集贪心约简算法的诊断方法。通过对海量故障数据连续属性离散化，随之提取出重要度较高的条件属性进行属性约简，最后用有效规则实现故障诊断。利用一个逆变器的 IGBT 开路故障数据诊断实例验证本文提出的贪心算法，结果表明：此诊断方法能有效减小故障特征冗余信息，降低故障数据特征维度，还可以从决策表中直接获取形式简洁且准确的故障诊断决策规则，诊断速度快，诊断精度高。

## 参考文献

- [1] LIN Q B, CHEN S C, LIN C M. Parametric fault diagnosis based on fuzzy cerebellar model neural networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 8104-8115.
- [2] HAN S M, HE Y S, ZHENG S Q, et al. Intelligent fault inference of inverters based on a three-layer Bayesian network[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019(21): 1-15.
- [3] LI S B, WU G N, GAO B, et al. Interpretation of DGA for transformer fault diagnosis with complementary SaE-ELM and arctangent transform[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 586-595.
- [4] 程向文, 黄辉, 李钙, 等. 使用 SiC 开关的两电平和三电平逆变器损耗与效率分析[J]. 广东电力, 2018, 31(1): 99-105.  
CHENG Xiangwen, HUANG Hui, LI Gai, et al. Analysis on losses and efficiencies of two-level and three-level inverters using SiC switches[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1): 99-105.
- [5] 沈艳霞, 苗贝贝. 三电平逆变器的开关管开路故障诊断策略[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(8): 3058-3065.  
SHEN Yanxia, MIAO Beibei. Open circuit fault diagnosis strategy switch of three level inverter[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3058-3065.
- [6] 孟宏鹏, 徐海燕, 宋遐淦. 基于粗糙集属性约简和支持向量机的变压器故障诊断[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(4): 504-510.  
MENG Hongpeng, XU Haiyan, SONG Xiagan. Transformer fault diagnosis based on attribute reduction of rough set and SVM[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(4): 504-510.
- [7] 田凤兰, 张恩泽, 潘思蓉, 等. 基于特征量优选与 ICA-SVM 的变压器故障诊断模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 163-170.  
TIAN Fenglan, ZHANG Enze, PAN Sirong, et al. Fault diagnosis model of power transformers based on feature quantity optimization and ICA-SVM[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 163-170.
- [8] 廖俊勃, 帕孜来·马合木提, 支婵, 等. 三电平逆变器 IGBT 的开路故障诊断研究[J]. 电测与仪表, 2015, 52(20): 35-40.  
LIAO Junbo, PAZILAT Mahemuti, ZHI Chan, et al. Study on open-circuit fault diagnosis of the IGBT in three-level inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(20): 35-40.
- [9] 刘艳, 李海燕. 三相逆变器功率管故障智能诊断研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(1): 15-20.  
LIU Yan, LI Haiyan. Research on intelligent fault diagnosis of transistors in three-phase inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(1): 15-20.
- [10] 韩素敏, 杜永恒, 曹斌. 基于 BP 神经网络的逆变器开路故障诊断方法[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2018, 37(5): 122-127.  
HAN Sumin, DU Yongheng, CAO Bin. An open circuit fault diagnosis method of inverter based on BP neural network[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2018, 37(5): 122-127.
- [11] 刘卓, 王天真, 汤天浩, 等. 一种多电平逆变器故障诊断与容错控制策略[J]. 山东大学学报: 工学版, 2017, 47(5): 229-237.  
LIU Zhuo, WANG Tianzhen, TANG Tianhao, et al. A fault diagnosis and fault-tolerant control strategy for multilevel inverter[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2017, 47(5): 229-237.
- [12] 刘子幸, 王子赞, 纪志成. 基于逆向卡尔曼滤波的电力变换器故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 19-26.  
LIU Zixing, WANG Ziyun, JI Zhicheng. Inverse Kalman filtering based converter fault diagnosis method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 19-26.
- [13] BHALLA D, BANSAL R K, GUPTA H O. Integrating AI based DGA fault diagnosis using Dempster-Shafer Theory[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 48: 31-38.
- [14] 陈鑫影, 李冠宇, 刘彦含. 基于决策依赖度的粗糙集约简模型研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(2): 505-516.  
CHEN Xinying, LI Guanyu, LIU Yanhan. Research on rough set reduction model based on decision dependency degree[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2016, 36(2): 505-516.
- [15] 贾志成, 张智晟, 刘远龙, 等. 基于 RS-SVM 算法的配电网故障诊断方法[J]. 广东电力, 2019, 32(9): 107-114.  
JIA Zhicheng, ZHANG Zhisheng, LIU Yuanlong, et al. Fault diagnosis method based on RS-SVM algorithm for power distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(9): 107-114.
- [16] MELLO OLIVEIRA A B, MORENO R L, RIBEIRO E R. Short-circuit fault diagnosis based on rough sets theory for a single-phase inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 34(5): 4747-4764.

- [17] 刘艳, 程璐, 孙林. 基于 K-S 检验和邻域粗糙集的特征选择方法[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2019, 47(2): 21-28.  
LIU Yan, CHENG Lu, SUN Lin. Feature selection method based on K-S test and neighborhood rough sets[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2019, 47(2): 21-28.
- [18] 叶东毅, 黄翠微, 赵斌. 粗糙集中属性约简的一个贪心算法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(9): 63-65.  
YE Dongyi, HUANG Cuiwei, ZHAO Bin. A greedy algorithm for attribute reduction in rough set[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(9): 63-65.
- [19] 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.
- [20] 宁伟, 赵明清. 关于决策表离散化贪心算法的进一步改进[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(3): 173-174.  
NING Wei, ZHAO Mingqing. More improved greedy algorithm for discretization of decision table[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(3): 173-174.
- [21] 李春茂, 周妹末, 刘亚婕, 等. 基于邻域粗糙集与多核支持向量机的变压器多级故障诊断[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3474-3482.  
LI Chunmao, ZHOU Meimo, LIU Yajie, et al. Multi-level fault diagnosis of transformer based on neighborhood rough set and multiple kernel support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3474-3482.
- [22] 黎永壹, 王远干, 曹婧华. 基于粗糙集属性约简的海洋数据融合算法[J]. 计算机仿真, 2012, 29(3): 222-226.  
LI Yongyi, WANG Yuangan, CAO Jinghua. Attribute reduction fusion algorithm of marine data based on rough set[J]. Computer Simulation, 2012, 29(3): 222-226.
- [23] 李卫国, 运泽健, 张师, 等. 基于粗糙集理论的 t 检验广域保护区划分方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 122-130.  
LI Weigu, YUN Zejian, ZHANG Shi, et al. Partition method of t-test wide-area protection area based on rough set theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 122-130.
- [24] 谢敏, 邓佳梁, 吉祥, 等. 基于信息熵和变精度粗糙集优化的支持向量机降温负荷预测方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 210-214.  
XIE Min, DENG Jiali, JI Xiang, et al. Cooling load forecasting method based on support vector machine optimized with entropy and variable accuracy roughness set[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 210-214.
- [25] 于军, 丁博, 何勇军. 基于平均多粒度决策粗糙集和 NNBC 的滚动轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2019, 38(15): 209-215.  
YU Jun, DING Bo, HE Yongjun. Rolling bearing fault diagnosis based on mean multi-granularity decision rough set and NNBC[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(15): 209-215.
- [26] 黄建明, 瞿合祚, 李晓明. 基于短时傅里叶变换及其谱峭度的电能质量混合扰动分类[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3184-3191.  
HUANG Jianming, QU Hezuo, LI Xiaoming. Classification for hybrid power quality disturbance based on STFT and its spectral kurtosis[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3184-3191.
- [27] 郑文彬, 李进金, 何秋红. 基于属性重要度的变精度邻域粗糙集属性约简算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(12): 261-265.  
ZHENG Wenbin, LI Jinjin, HE QiuHong. Attribute reduction algorithm for neighborhood rough sets with variable precision based on attribute importance[J]. Computer Science, 2019, 46(12): 261-265.
- [28] 王鲜芳, 王岁花, 杜昊泽, 等. 基于模糊粗糙集和支持向量机的化工过程故障诊断[J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 353-356.  
WANG Xianfang, WANG Suihua, DU Haoze, et al. Fault diagnosis of chemical industry process based on FRS and SVM[J]. Control and Decision, 2015, 30(2): 353-356.

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2020-01-13

作者简介:

韩素敏(1979—), 女, 在读博士, 副教授, 研究方向为智能信息处理, 智能故障诊断; E-mail: hansumin@hpu.edu.cn

郑书晴(1997—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能故障诊断; E-mail: 211807010012@home.hpu.edu.cn

何永盛(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能故障诊断。E-mail: 211707010017@home.hpu.edu.cn

(编辑 魏小丽)