

不完备信息条件下的航空发动机故障诊断方法*

胡雷刚^{1,2,3}, 肖明清², 禹航², 褚真福²

(1. 总参谋部陆航研究所 北京, 101121) (2. 空军工程大学工程学院 西安, 710038)

(3. 陆军航空兵学院第61213部队 临汾, 041000)

摘要 针对不完备、不协调信息条件下的故障诊断问题,研究了一种基于相似关系的最优故障诊断方法。首先,采用不完备诊断信息系统描述不完备诊断信息,根据不完备诊断信息系统的最优完备选择,设计了不协调的不完备诊断信息系统的属性约简方法;然后,对于不完备的诊断对象,设计了基于可信度的最优诊断方法;最后,将该方法应用于航空发动机故障诊断,验证了该方法处理不完备、不协调信息的可行性和有效性,提高了不完备信息条件下的故障诊断效率。

关键词 不完备信息; 故障诊断; 粗糙集; 属性约简

中图分类号 TP206.3

引言

现代设备数据信息的多源化、多样化与当前监测、测试手段的局限性之间存在冲突,导致了突出的信息残缺、矛盾等问题,数据信息的不完备和不协调特征给设备故障诊断、健康管理提出了更高要求。对故障诊断而言,不完备信息指诊断系统中某一数据对象或多个数据对象的属性(一般为条件属性)丢失、不完全或无法确定,表现为数据信息残缺;不协调信息指两个或多个数据对象的条件相同,但诊断结果不一致,表现为数据信息矛盾^[1]。

不完备、不协调是不确定性的两种表现,处理不确定性问题的方法主要有粗糙集、贝叶斯网络和D-S证据理论等。粗糙集处理不确定信息具有客观、无需额外信息的优点,但只能处理完备信息系统,对描述知识的不确定性问题及对错误的判断机制过于简单^[2-4]。贝叶斯网络和D-S证据理论擅长于规则推理,但对不协调信息处理能力较弱^[5-8]。不完备信息主要采用删除法、补齐法进行完备化^[1,9]。删除法直接删除不完备对象或条件属性,得到完备的信息系统。删除法有很大的局限性,删除严重时会对极大地损害信息系统的完整性。当不完备信息较多时,补齐法会导致数据激增,且补齐法通常会造成较大的信息失真。

笔者采用基于可信度的方法进行不完备诊断信息系统的属性约简和故障诊断,既保持了信息系统的完整性,又避免了信息失真。首先,引入不完备诊断信息系统的扩展诊断辨识矩阵和诊断辨识函数概念,对不协调的诊断信息系统定义了最优完备选择;然后,根据最优完备选择对不完备诊断信息系统进行了属性约简,得到了不完备条件下的诊断规则;最后,以某型航空发动机为实例验证了不完备信息条件下的故障诊断方法的可行性与有效性。

1 不完备诊断信息系统

定义 1^[10] 设 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为设备对象集, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 为属性集, $F = \{F_l = U \rightarrow P_0(V_l) \mid l \leq m\}$ 为对象与属性的关系集, $H = (U, A, F)$ 为集值信息系统。其中: V_l 为属性 a_l 的值域; $P_0(V_l)$ 为 V_l 不含 ϕ 的全体子集合; 若 $\forall a_l \in A, x_i \in U, F_l(x_i)$ 为单点集, 称 (U, A, F) 为完备信息系统, 若 $\exists a_l \in A, x_i \in U$, 使 $F_l(x_i)$ 不是单点集, 称 (U, A, F) 为不完备信息系统。

设 $H = (U, A, F)$ 为不完备信息系统, 对于任意 $B \subseteq A$ 有相似关系

$$\text{SIM}(B) = \{(x_i, x_j) \in U \otimes U \mid F_l(x_i) \cap F_l(x_j) \neq \emptyset, N_B(a_l \in B)\} \quad (1)$$

$$S_B(x_i) = \{x_j \in U \mid (x_i, x_j) \in \text{SIM}(B)\} \quad (2)$$

* 空军工程大学研究生创新基金资助项目(编号: Dx2010107)

收稿日期: 2011-05-04; 修改稿收到日期: 2011-07-25

其中: N_B 为相似关系 $\text{SIM}(B)$ 的相似阈值, $S_B(x_i)$ 为 x_i 的相似类。

对于不完备信息系统 $H = (U, A, F)$, 若 $S^f = (U, A, f)$ 为完备信息系统, 且 S^f 满足对 $\forall a \in A, \forall x_i \in U$, 有 $f_a(x_i) \in F_a(x_i)$, 称 S^f 为 (U, A, F) 的一个选择, 或称 S^f 是 (U, A, F) 的一个完备化, 记 S_H 为 (U, A, F) 的所有选择的集合。

定义 2 设 $d \in A$ 为诊断属性, $d: U \rightarrow V_d$ 表示对象在诊断属性上的映射, 称 (U, A, F, d) 为诊断信息系统。 $\forall x_i \in U, d(x_i)$ 为一个单点集。若信息系统 (U, A, F) 是完备的, 称 (U, A, F, d) 为完备诊断信息系统; 若信息系统 (U, A, F) 是不完备的, 则称 (U, A, F, d) 为不完备诊断信息系统。

对于不完备诊断信息系统 (U, A, F, d) , 如果 $\text{SIM}(A) \subseteq R_d$, 则 (U, A, F, d) 是协调的诊断信息系统; 否则 (U, A, F, d) 为不协调的诊断信息系统。对于 $B \subseteq A$ 满足 $\text{SIM}(B) \subseteq R_d$, 称 B 为协调集。若 B 是协调集, 且 B 的任何真子集都不是协调集, 称 B 为 (U, A, F, d) 的约简集。

2 不完备诊断信息系统的属性约简

对于协调的不完备诊断信息系统, 通过属性约简可以获得确定的诊断规则; 对于不协调的不完备诊断信息系统, 可以研究其最大分布诊断, 获得带有可信度的诊断规则。

2.1 协调的不完备诊断信息系统的属性约简

对协调的不完备诊断信息系统 (U, A, F, d) , 定义其可辨识属性集和诊断辨识矩阵

$$D(x_i, x_j) = \begin{cases} \{a \in A \mid |F_a(x_i) \cap F_a(x_j)| \geq N_A\} & d(x_i) \neq d(x_j) \\ \emptyset & d(x_i) = d(x_j) \end{cases} \quad (3)$$

$$D = \{D(x_i, x_j) \mid x_i, x_j \in U\} \quad (4)$$

其中: $D(x_i, x_j)$ 为设备对象 x_i, x_j 的可辨识属性集; D 为诊断信息系统 (U, A, F, d) 的诊断辨识矩阵。

定义协调不完备诊断信息系统 (U, A, F, d) 的诊断辨识函数为

$$F(x_i, x_j) = \begin{cases} 1 & D(x_i, x_j) = \emptyset \\ \sum_{k \leq |D(x_i, x_j)|} a_k & D(x_i, x_j) \neq \emptyset \end{cases} \quad (5)$$

$$F = \prod_{x_i, x_j \in U} F(x_i, x_j) \quad (6)$$

其中: \sum 表示合取运算; \prod 表示析取运算; $F(x_i,$

$x_j)$ 为设备对象 x_i, x_j 的诊断辨识函数; F 为不完备诊断信息系统 (U, A, F, d) 的诊断辨识函数。

对于协调的不完备诊断信息系统, 定义了诊断辨识矩阵和诊断辨识函数后, 即可按照基本粗糙集的方法进行属性约简: 根据式(3)、式(4)计算可辨识属性集 $D(x_i, x_j)$ 和诊断辨识矩阵 D ; 根据式(5)、式(6)获得诊断辨识函数 $F(x_i, x_j)$ 及 F ; 对诊断辨识函数 F 进行析取运算得到极小析取范式; 综合考虑参数监测、检测的便捷性、经济性等因素, 选取适合约简集。

2.2 不协调的不完备诊断信息系统的属性约简

定义 3 设 (U, A, F, d) 为不完备诊断信息系统, $B \subseteq A, U/R_d = \{D_1, D_2, \dots, D_r\}$ 。记

$$D\left(\frac{D_j}{S_B(x_i)}\right) = \frac{|D_j \cap S_B(x_i)|}{|S_B(x_i)|} \quad (7)$$

$$\mu_B(x_i) = \left(D\left(\frac{D_1}{S_B(x_i)}\right), D\left(\frac{D_2}{S_B(x_i)}\right), \dots, D\left(\frac{D_r}{S_B(x_i)}\right) \right) \quad (8)$$

$$m_B(x_i) = \max_{j \leq r} D\left(\frac{D_j}{S_B(x_i)}\right) = D\left(\frac{D_{j_0}}{S_B(x_i)}\right) (x_i \in U) \quad (9)$$

$$\gamma_B(x_i) = \left\{ D_{j_0} \mid D\left(\frac{D_{j_0}}{S_B(x_i)}\right) = \max_{j \leq r} D\left(\frac{D_j}{S_B(x_i)}\right) \right\} (x_i \in U) \quad (10)$$

其中: $D\left(\frac{D_j}{S_B(x_i)}\right)$ 为上 U 的包含度; $\mu_B(x_i)$ 为 U/R_d 上的概率分布密度; $m_B(x_i)$ 为设备对象 y 的诊断结果“若 $y \in S_B(x_i)$, 则 $y \in D_{j_0}$ ”的可信度; $\gamma_B(x_i)$ 为最大分布诊断函数。

若对任意 $x_i \in U$, 有 $\gamma_B(x_i) = \gamma_A(x_i)$, 称 B 为 (U, A, F, d) 的最大分布协调集。若 B 为最大分布协调集, 且 B 的任何真子集均不是最大分布协调集, 称 B 为 (U, A, F, d) 的最大分布约简集。

定义 4^[11] 设 $I = (U, A, F, d)$ 为不完备诊断信息系统, $S^f = (U, A, F, d)$ 是 I 的一个选择, 且 B_f 是 S^f 的最大分布约简集。若 B_f 为 I 的所有选择中的最小集合, 且满足 $\min_{x_i \in U} m_{B_f}(x_i) = \max_{x_i \in U} \min m_{B_g}(x_i)$, 称约简的完备信息系统 (U, B_f, F, d) 是 I 的最优完备选择。

由于充分利用了已知条件属性, 最优完备选择避免了不完备数据补齐方法带来的信息失真, 排除了人为的主观因素。

对不协调的不完备诊断信息系统 (U, A, F, d) , 可按如下步骤进行属性约简, 即获得最优完备选择:

1) 根据不完备属性 a_i 的取值范围 V_i 获得不完

备诊断信息系统(U, A, F, d)的所有选择;

2) 对(U, A, F, d)的所有选择,分别计算其所有最大分布约简集(不协调信息条件下的最大分布约简方法见文献[12]);

3) 由 $x_i(x_i \in U)$ 最大分布诊断可信度 $m_{B_f}(x_i)$, 计算最大分布约简集 B_f 的精度 $\min_{x_i \in U} m_{B_f}(x_i)$;

4) 对于(U, A, F, d)的所有选择,计算 $m_{\max} = \max_{x_i \in U} \min m_{B_g}(x_i)$;

5) 确定 m_{\max} 对应的选择(U, A, f_m, d),使其最大分布约简集 B_{f_m} 满足 $\min_{x_i \in U} m_{f_m}(x_i) = m_{\max}$;

6) 获得不完备诊断信息系统(U, A, F, d)的最优选择(U, B_{f_m}, f_m, d)及约简集 B_{f_m} 。

3 不完备信息条件下的故障诊断方法

3.1 协调不完备信息条件下的故障诊断方法

协调的不完备诊断信息系统通过属性约简可以获得确定的诊断规则,进而进行故障诊断。设(U, A, F, d)为协调的不完备诊断信息系统,协调不完备信息条件下的故障诊断可遵循图1所示的流程。

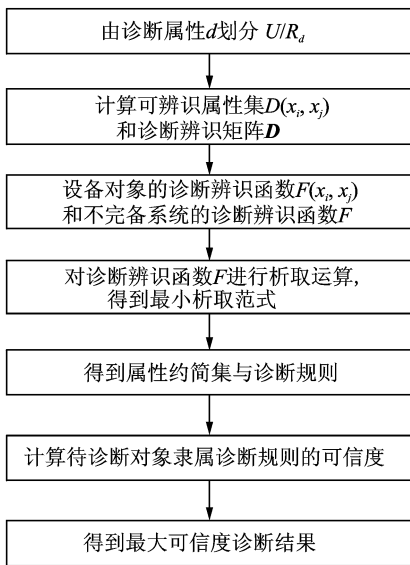


图1 协调不完备信息条件下的故障诊断流程

待诊断对象隶属于诊断规则的可信度定义如下。

定义5 设(U, A, F, d)为不完备诊断信息系统, B 为其最大分布约简集, $\{b_1, b_2, \dots, b_m\} \rightarrow d_n$ 为诊断规则, $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 为待诊断向量, $c_i(i \leq m)$ 为待诊断向量的不完备属性, V_i 为 c_i 的取值范围。记 f_k 为 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 的第 $k(k \leq |V_i|)$ 个选择

$$f_k = \{c_1, c_2, \dots, c_i^k, \dots, c_m\} \quad (11)$$

$$m_k = D\left(\frac{D_n}{S_B(f_k)}\right) \quad (12)$$

$$m_0 = \max_{k \leq |V_i|} D\left(\frac{D_n}{S_B(f_k)}\right) = D\left(\frac{D_n}{S_B(f_{k_0})}\right) \quad (13)$$

其中: m_k 为 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 的选择 f_k 隶属于诊断规则 $\{b_1, b_2, \dots, b_m\} \rightarrow d_n$ 的可信度; m_0 为不完备向量 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 隶属 $\{b_1, b_2, \dots, b_m\} \rightarrow d_n$ 的可信度。

3.2 不协调不完备信息条件下的故障诊断方法

不协调不完备信息条件下,可通过不协调的不完备信息系统属性约简获得最优选择及约简集,进而进行故障诊断。设(U, A, F, d)为不协调的不完备诊断信息系统,不协调不完备信息条件下的故障诊断可按以下步骤实施:

1) 根据诊断属性 d 划分 U/R_d ;

2) 根据不完备属性 a_i 的取值范围 V_i , 获得不完备诊断信息系统(U, A, F, d)的所有选择;

3) 对不完备诊断信息系统(U, A, F, d)的所有选择(U, A, f_i, d),分别计算所有最大分布约简集;

4) 对选择(U, A, f_i, d)的最大分布约简集 B_{f_i} , 计算其精度 $\min_{x_i \in U} m_{B_{f_i}}(x_i)$;

5) 对不完备诊断信息系统(U, A, F, d)的所有选择,由 $\max_{x_i \in U} \min m_{B_g}(x_i)$ 获得最优完备选择(U, B_{f_m}, f_m, d)和约简集 B_{f_m} ;

6) 由最优完备选择(U, B_{f_m}, f_m, d)和约简集 B_{f_m} , 得到不完备诊断信息系统的最优诊断规则;

7) 根据诊断对象 y 的不完备属性 c_i 的取值范围 V_i , 计算 y 隶属于各诊断规则的可信度;

8) 选取可信度最大的诊断规则为不完备对象 y 的最大可信度故障诊断结果。

4 不完备信息条件下的航空发动机诊断实例

由于航空发动机结构与使用环境的复杂性,导致故障原因与故障征兆呈现多样性,其故障信息的不完备和不协调特征给故障诊断带来挑战。为检验本研究故障诊断方法处理不完备、不协调信息的能力,选取某型航空发动机作为对象进行实例验证。

4.1 不完备故障信息系统

选取发动机稳态工作过程的进口温度 a_1 、涡轮后燃气总温 a_2 、低压转子转速 a_3 、高压转子转速 a_4 、

扇进口导向器叶片转角 a_5 、高压气机静子叶片转角 a_6 、尾喷口指示值 a_7 、滑油压力 a_8 和机匣振动值 a_9 共9个参数来表征发动机性能状况。

定检 β 加力状态下监测数据经过离散化处理后故障信息系统如表1所示(离散化方法参考文献[13-14])。

表1 定检 β 加力状态下的诊断信息系统

U	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	d
x_1	1	1	3	3	3	3	1	2	3	1
x_2	1	1	3	3	2	3	1	2	1	1
x_3	2	1	3	3	3	2	2	2	1	1
x_4	2	2	3	3	3	3	2	1	1	1
x_5	2	1	2	3	3	3	2	1	1	1
x_6	3	1	2	3	2	2	2	X	1	1
x_7	3	X	3	3	3	3	2	1	3	1
x_8	1	1	3	3	3	3	2	2	2	1
x_9	1	1	3	3	3	3	2	1	3	1
x_{10}	3	1	2	3	{2,3}	3	2	1	3	1
x_{11}	3	1	2	3	2	2	2	1	1	1
x_{12}	3	1	3	3	1	3	2	2	2	1
x_{13}	1	1	3	3	2	3	2	2	2	1
x_{14}	1	3	3	3	3	3	2	3	3	0
x_{15}	1	1	1	1	1	1	2	2	1	0
x_{16}	2	3	3	3	3	3	3	3	1	0
x_{17}	2	3	2	3	1	1	2	2	2	0
x_{18}	2	1	1	1	1	2	3	2	2	0
x_{19}	3	2	2	3	3	3	2	1	3	0
x_{20}	1	2	1	1	1	3	1	2	3	0
x_{21}	3	1	2	3	2	X	2	1	1	0
x_{22}	1	1	2	1	1	3	3	1	1	0
x_{23}	3	1	1	1	1	2	3	3	2	0
x_{24}	3	1	3	3	1	3	3	1	1	0
x_{25}	3	1	1	1	1	2	3	2	2	0
x_{26}	1	1	1	1	1	1	1	2	2	0

表1所述诊断信息系统 (U, A, F, d) 论域 $U = \{x_1, x_2, \dots, x_{26}\}$, 参数集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_9\}$, 其中 d 取值1表示处于正常工作状态, 取值0处于故障状态。分析所述诊断信息系统可知, $F_2(x_7), F_5(x_{10}), F_6(x_{21})$ 和 $F_8(x_6)$ 均不是单点集, 由定义知该诊断信息系统为不完备诊断信息系统。

根据属性 $d, U/R_d = \{\{x_1 \sim x_{13}\}, \{x_{14} \sim x_{26}\}\}$, 分析诊断信息系统知 $F_4(x_{10}) \cap F_4(x_{19}) = \{3\}$, 则 $(x_{10}, x_{19}) \in \text{SIM}(A)$ 。但由于 $(x_{10}, x_{19}) \notin U/R_d$, 所以 $\text{SIM}(A) \not\subseteq U/R_d$, 即表1所述诊断信息系统为不协调的不完备诊断信息系统。

4.2 不完备诊断信息系统的约简

对于上述不协调的不完备诊断信息系统 $(U, A,$

$F, d)$, 按照前述方法进行属性约简。

1) 根据不完备属性 a_2, a_5, a_6 和 a_8 的取值范围, 获得 (U, A, F, d) 的所有54个选择。

2) 对 (U, A, F, d) 的54个选择, 分别计算其最大分布约简集。如 $F_2(x_7)=1, F_5(x_{10})=2, F_6(x_{21})=1, F_8(x_6)=1$ 时, 最大分布约简集有12个。

3) 取相似阈值 $N_B=3$, 对于每个选择的最大分布约简集, 依 $\min_{x_i \in U} m_{B_f}(x_i)$ 计算精度。步骤2中的12个最大分布约简集的精度见表2。

表2 选择的最大分布约简集精度示例

最大分布约简集	精度	最大分布约简集	精度
$\{a_1, a_2, a_6, a_7\}$	0.50	$\{a_1, a_2, a_3, a_6, a_9\}$	0.50
$\{a_2, a_3, a_6, a_7\}$	0.50	$\{a_1, a_2, a_5, a_6, a_8\}$	0.50
$\{a_2, a_5, a_6, a_9\}$	0.50	$\{a_1, a_3, a_5, a_6, a_8\}$	0.50
$\{a_2, a_6, a_7, a_9\}$	0.56	$\{a_2, a_3, a_5, a_6, a_8\}$	0.53
$\{a_1, a_2, a_4, a_6, a_9\}$	0.50	$\{a_3, a_5, a_6, a_8, a_9\}$	0.50
$\{a_1, a_2, a_6, a_8, a_9\}$	0.50	$\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_8, a_9\}$	0.50

4) 根据步骤3获得的最大分布约简集的精度及 $\max_{x_i \in U} \min m_{B_g}(x_i)$ 式计算每个选择的最大精度; 54个选择的最大精度如表3所示。

表3 所有选择的最大分布约简集最大精度

$F_2(x_7)$	$F_5(x_{10})$	$F_6(x_{21})$	$F_8(x_6)$	最大精度
1	2	1	1	0.555 6
1	2	1	2	0.538 5
1	2	1	3	0.545 5
1,2,3	2,3	2	1	0.571 4
1	2	2	2,3	0.538 5
1	2,3	3	1,2,3	0.533 3
1	3	1	1,3	0.529 4
1	3	1,2	2	0.538 5
1	3	2	3	0.555 6
2	2	1	1,2,3	0.555 6
2,3	2	2	2,3	0.562 5
2	2	3	1,2,3	0.538 5
2,3	3	1	1,3	0.555 6
2,3	3	1	2	0.545 5
2,3	3	2	2,3	0.538 5
2	3	3	1,2,3	0.500 0
3	2	1	1	0.545 5
3	2	1	2,3	0.555 6
3	2	3	1,2,3	0.500 0
3	3	3	1,2,3	0.545 5

5) 由步骤4及表3知 $m_{\max} = 0.571 4$, 对应有6个选择, 且满足 $\min_{x_i \in U} m_{f_m}(x_i) = 0.571 4$ 的最大分布约简集均为 $B_{f_m} = \{a_2, a_3, a_4, a_6, a_8, a_9\}$ 。

6) 获得最大可信度选择为 $F_2(x_7) = \{1, 2, 3\}$, $F_5(x_{10}) = \{2, 3\}$, $F_6(x_{21}) = 1$, $F_8(x_6) = 1$, 最大分布约简集为 $\{a_2, a_3, a_4, a_6, a_8, a_9\}$ 。

根据所得最大可信度选择及其最大分布约简集, 得到不完备信息条件下的诊断规则, 如表4所示。

表4 最大可信度诊断规则

R	a_2	a_3	a_4	a_6	a_8	a_9	d
r_1	1	3	3	3	2	1,2,3	1
r_2	1	3	3	2	2	1	1
r_3	2	3	3	3	1	1	1
r_4	1	2	3	2,3	1	1	1
r_5	1	2	3	2	1	1	1
r_6	1,2,3	3	3	3	1	3	1
r_7	1	2	3	3	1	3	1
r_8	3	3	3	3	3	1,3	0
r_9	1	1	1	1	2	1,2	0
r_{10}	3	2	3	1	2	2	0
r_{11}	1	1	1	2	2,3	2	0
r_{12}	2	2	3	3	1	3	0
r_{13}	2	1	1	3	2	3	0
r_{14}	1	2	1	3	1	1	0
r_{15}	1	3	3	3	1	1	0

4.3 不完备信息条件下的故障诊断

为检验笔者设计的不完备信息条件下的故障诊断方法的有效性, 选取同样在定检加力 β 状态下的数据进行验证, 测试样本如表5所示。

表5 定检 β 加力状态下的测试样本

U	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	d
y_1	2	1	2	2	1	1	1	3	1	1
y_2	3	1	2	3	2	3	3	2	1	1
y_3	3	1	2	3	2	X	3	3	1	1
y_4	1	1	2	2	3	3	2	2	2	1
y_5	2	2	2	2	1	1	1	1	3	1
y_6	3	2	X	3	3	3	2	2	1	1
y_7	2	1	3	3	2	3	1	3	1	1
y_8	1	3	3	3	X	3	1	2	2	1
y_9	2	3	3	3	1	3	3	X	1	1
y_{10}	2	1	3	3	2	3	3	3	1	1
y_{11}	1	2	3	3	2	1	2	2	1	0
y_{12}	1	1	1	3	2	1	2	2	2	0
y_{13}	2	3	2	3	1	1	1	2	2	0

根据属性约简得到的诊断规则(即表4), 进行测试样本的故障诊断:

1) 对于属性约简后完备的测试样本 $\{y'_1, y'_2,$

$y'_4, y'_5, y'_7, y'_8, y'_{10} \sim y'_{13}\}$, 可获得可信度条件下的诊断结果;

2) 对于属性约简后不完备的测试样本 $\{y'_3, y'_6, y'_9\}$, 根据不完备属性的取值范围, 获得可信度最高的最大可信度诊断结果, 如表6所示。

表6 测试样本的诊断结果

U	a_2	a_3	a_4	a_6	a_8	a_9	BN	RS	本研究方法	
y'_1	1	2	2	1	3	1	0	0	1	0.50
y'_2	1	2	3	3	2	1	X	X	1	0.83
y'_3	1	2	3	X	3	1	X	X	1	0.83
y'_4	1	2	2	3	2	2	1	1	1	0.50
y'_5	2	2	2	1	1	3	0	0	0	0.67
y'_6	2	X	3	3	2	1	1	X	1	0.83
y'_7	1	3	3	3	3	1	0	1	1	0.83
y'_8	3	3	3	3	2	2	X	X	0	0.83
y'_9	3	3	3	3	X	1	1	0	0	1.0
y'_{10}	1	3	3	3	3	1	X	1	1,0	0.83
y'_{11}	2	3	3	1	2	1	1	1	1	0.67
y'_{12}	1	1	3	1	2	2	0	X	0	0.83
y'_{13}	3	2	3	1	2	2	0	0	0	1.0

对于不完备信息, 贝叶斯网络(BN)采用不确定推理和诊断, 粗糙集(RS)采用补齐法进行属性约简和故障诊断。比较表6中3种方法诊断结果可知: 粗糙集方法对于不完备和不协调的信息处理能力较弱, 故障诊断的识别率仅为30.8%; 贝叶斯网络具有一定的不完备推理能力, 但对于不协调信息处理能力不足, 诊断识别率为38.5%; 本研究设计诊断方法具有较强的不完备、不协调信息处理能力, 诊断的识别率达到61.5%。

5 结束语

针对不完备信息条件下的故障诊断问题, 研究了一种基于相似关系的最优故障诊断方法。利用不完备、不协调信息条件下的航空发动机故障诊断实例, 验证了基于协调近似表示空间的故障诊断方法的可行性和有效性, 较于贝叶斯网络和粗糙集方法, 该方法具备较强的不完备、不协调信息处理能力, 提高了不完备信息条件下的故障诊断准确率。

参 考 文 献

[1] 张峥. 不完备不协调信息条件下的设备智能故障诊断[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Zhang Zheng. Intelligence fault diagnosis for equipment with incomplete and inconsistent information

- [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese).
- [2] 黄国顺. 基于粗糙集的决策表知识约简研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Huang Guoshun. Research on the knowledge reduction based on rough set theory for decision table[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [3] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008:8-24.
Zhang Wenxiu, Wu Weizhi, Liang Jiye, et al. Theory and approach of rough set [M]. Beijing: Science Press, 2008:8-24. (in Chinese)
- [4] 陈恬, 孙建国. 粗糙集与神经网络在航空发动机气路故障诊断中的应用[J]. 航空动力学报, 2006, 21(1): 207-212.
Chen Tian, Sun Jianguo. Aero-engine gas path fault diagnosis using rough set and neural networks [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(1): 207-212. (in Chinese)
- [5] 张连文, 郭海鹏. 贝叶斯网络引论[M]. 北京: 科学出版社, 2006:17-38.
Zhang Lianwen, Guo Haipeng. Introduction of Bayesian network [M]. Beijing: Science Press, 2006: 17-38. (in Chinese)
- [6] 张德利. 基于贝叶斯网络的故障智能诊断方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
Zhang Deli. Research of fault intelligent diagnosis based on Bayesian network [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006. (in Chinese)
- [7] 卜乐平, 刘开培, 侯新国. 采用D-S证据推理的电机转子故障诊断[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 23-26.
Pu Leping, Liu Kaipei, Hou Xinguo. D-S evidential theory induction motor wavelet packets transformation faults diagnosis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1): 23-26. (in Chinese)
- [8] 苏晓燕, 邓勇, 吴英. 基于改进D-S组合规则的故障模式分类[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(2): 144-149.
Su Xiaoyan, Deng Yong, Wu Ying. D-S evidence theory information fusion conflict evidence consensus fault diagnosis [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(2): 144-149. (in Chinese)
- [9] 瞿彬彬. 基于粗糙集理论的决策信息系统知识获取研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
Qu Binbin. Research on knowledge acquisition for decision information system based on rough set theory [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] 张文修, 仇国芳. 基于粗糙集的不确定决策[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005:40-56.
Zhang Wenxiu, Qiu Guofang. Uncertainty decision based on rough set [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2005:40-56. (in Chinese)
- [11] Zhang Wenxiu, Mi Jusheng. Incomplete information system and its optimal selections[J]. Computers and Mathematics with Application, 2004, 48(5): 691-698.
- [12] 胡雷刚, 肖明清, 方甲永. 不协调信息条件下的协调近似表示空间故障诊断方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 53-58.
Hu Leigang, Xiao Mingqing, Fang Jiayong. Fault diagnostic approach with inconsistent information based on consistent approximate denoted space [J]. System Engineering and Electronics, 2011, 33(8): 53-58. (in Chinese)
- [13] 索中英. 基于粗糙集的航空发动机故障诊断规则提取方法研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2009.
Suo Zhongying. Approach of aero-engine based on rough set [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [14] 程嗣怡, 索中英, 吴华, 等. 基于协调近似表示空间的航空发动机故障诊断[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1644-1648.
Cheng Siyi, Suo Zhongying, Wu Hua, et al. Aero-engine fault diagnosis based on consistent-approximative denoted space [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1644-1648. (in Chinese)



第一作者简介:胡雷刚,男,1985年8月生,博士。主要研究方向为故障诊断、预测与健康管。曾发表《不协调信息条件下的协调近似表示空间故障诊断方法》(《系统工程与电子技术》2011年第33卷第8期)等论文。

E-mail: hl-2@163.com