

# 不完备信息的航空电子装备诊断规则提取方法<sup>\*</sup>

赵亮亮<sup>1</sup>, 肖明清<sup>1</sup>, 盛 晟<sup>1</sup>, 智慧来<sup>2</sup>, 张 磊<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学航空航天工程学院 西安, 710038) (2. 河南理工大学计算机科学与技术学院 焦作, 454000)

**摘要** 针对不完备信息引发的不确定性给航空电子装备的诊断规则提取带来的挑战, 分别从广义狭义两个角度对故障诊断决策系统的完备性进行定义, 设计了一致性优先的相似度及属性值期望最大的缺失信息补齐算法, 解决间接补齐算法存在不一致性问题; 构建征兆属性概念格及诊断决策属性概念格, 生成不完备诊断决策信息系统的扩充辨识矩阵, 引入征兆属性概念等价关系计算最大一致征兆概念集, 求解最大一致征兆概念辨识函数的析取范式获取最优约简属性集, 根据约简后的诊断决策信息系统获取诊断规则。以某型航空装备的武器系统发射系统为例对方法验证, 诊断结果准确率达到 83.3%, 高于现有典型方法, 该方法在不完备信息处理、精确度及对象描述的直观简洁性方面具有显著优势。

**关键词** 不完备性; 辨识矩阵; 概念格; 约简; 诊断规则

**中图分类号** TP206.3; TH165

## 引 言

航空电子装备在现代空战中发挥着重要作用, 其性能好坏直接影响空战的结果, 在向综合化、模块化及智能化发展的过程中, 其结构及功能也变得复杂多样, 从而导致各种不确定性问题, 不完备性是造成不确定性的主要原因之一。某些文献<sup>[1-5]</sup>对不完备性的认识及定义具有片面性, 认为当前数据样本中至少存在某一属性值缺失的系统即为不完备信息系统, 该定义存在如下问题: 即使当前样本中的所有属性值均不存在缺失, 仍具有不能全面反映研究对象的可能, 则该信息系统仍是不完备的, 即哥德尔定义的不完备系统, 因此, 笔者从广义及狭义两个角度给出不完备性的定义。针对狭义不完备信息系统, 主要有间接和直接两种处理方法。间接方法通过数据预处理对缺失信息补齐, 转化为狭义完备信息系统之后进行处理。文献<sup>[6-7]</sup>存在的问题在于未能考虑征兆属性的缺失给不一致性造成的影响。笔者提出了一种一致性优先属性值缺失信息补齐方法。直接方法通过对定义及概念进行改进, 使其适应缺失情形的不完备信息系统, 进而解决不完备性带来的问题, 如文献<sup>[5, 8-10]</sup>。针对广义不完备性信息系统, 需要采用动态方法根据新的信息对已有规则进行更新, 获取当前时刻的最优诊断规则, 如文献

[11]。笔者本阶段工作主要针对的是狭义不完备性。

概念格是一种简洁直观的知识处理工具, 文献<sup>[7, 12]</sup>给出决策信息系统可以转化为形式背景的方法及依据, 将概念格用于规则提取, 相比基于粗糙集的规则提取方法<sup>[4, 13-15]</sup>具有简洁直观的优点, 且方法<sup>[4, 13-15]</sup>并不适用于不完备信息情形。文献<sup>[4]</sup>的诊断方法虽然针对不完备信息系统, 但无法直观形象表现对象属性间的等价关系, 同时也无法描述概念间的偏序及隶属关系。文献<sup>[16-19]</sup>的概念格故障诊断方法获取了较高精度的诊断规则, 但不能处理属性值缺失及新样本更新带来的问题。文献<sup>[1]</sup>给出一种基于概念格的不完备信息诊断规则提取方法, 但应对不一致性问题时存在缺点不足。针对不完备信息中的属性缺失带来的不一致性问题, 文献<sup>[5]</sup>提出广义决策规则的概念, 基于粗糙集理论对不完备故障诊断决策表中的不一致性进行描述, 但粗糙集理论相比概念格在信息描述表示的弱点。

笔者设计一种基于概念格理论的航空电子装备故障诊断规则提取方法, 适用于不完备信息情形。从广义及狭义两个角度给出不完备性的概念, 纠正当前定义的片面性, 并基于最大相似度及属性值期望最大原则, 在一致性优先的前提下给出了缺失属性值补齐方法。根据补齐后的诊断形式背景, 构建征兆属性及诊断属性概念格, 根据定义征兆属性概念等价关系计算最大一致征兆概念集, 并生成最大

一致征兆概念集的辨识矩阵及辨识函数,求解辨识函数的析取范式,比较属性获取难易度及属性值缺失情况选取析取主子式作为约简属性集合。根据约简后的诊断决策信息系统获取诊断规则,并根据某型武器发射系统的诊断历史数据进行实例验证,同时与已有规则提取方法进行了对比。

## 1 不完备故障诊断决策信息系统

**定义 1:**故障诊断决策信息系统表示为  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$ , 即故障诊断决策信息系统  $S$  是由  $U, A \cup D$  和  $f$  构成的整体。其中:  $U$  为对象的非空集合,称为故障对象论域;  $A$  为属性的有限非空集合,称为故障征兆属性集,  $A$  中的元素称为故障征兆属性;  $D$  故障决策属性集合满足  $A \cup D = \emptyset$ ;  $V_A = \bigcup_{a \in A} V_a$  为属性值的集合。  $V_a$  为属性  $a (a \in A)$  的值域;  $f: U \times A \rightarrow V_A$  为一个信息函数。

**定义 2:**设  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$  为不完备故障诊断决策信息系统,若  $(\forall r((S \vdash r) = .T.) \Rightarrow ((S \vdash r) = .T.))$ , 则称  $S$  为广义完备故障诊断决策信息系统;反之,若  $(\exists r((S \vdash r) = .T.) \Rightarrow ((S \vdash r) = .T.))$ , 则称  $S$  为广义不完备故障诊断决策信息系统。

对于广义完备故障诊断决策信息系统,通过逻辑或语义推理得出的任一客观诊断决策规则  $r$  成立  $((S \vdash r) = .T.)$ , 则亦可通过形式推理得出  $((S \vdash r) = .T.)$ ;反之,若存在某一客观诊断决策规则  $r$ , 可通过逻辑或语义推理得到,但无法通过形式推导得出  $((S \vdash r) = .T.)$ , 则系统为广义不完备故障诊断决策信息系统。广义完备故障诊断决策系统的任意诊断决策规则都可在构建的诊断决策系统获得,即系统未遗漏客观存在的所有诊断决策规则。

**定义 3:**对于故障诊断决策信息系统  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$ , 若  $\forall x \in U \forall a \in A (f_a(x) \neq *)$  ( $*$  表示属性值为空), 则称  $S$  为狭义完备故障诊断决策信息系统;反之,若  $\exists x \in U \exists a \in A (f_a(x) = * \wedge * \notin V_a)$ , 则称  $S$  为狭义不完备故障诊断决策信息系统,  $V_d$  为决策属性值域。

**定理 1:**设  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$  为狭义不完备故障诊断决策信息系统, 则  $(\forall r((S \vdash r) = .T.) \Rightarrow ((S \vdash r) = .T.)) \Rightarrow (\forall (x, a) \in N (S \vdash f_a(x)))$ ,  $N$  为属性值为空的对象属性序偶集合:  $N = \{(x, a) | f_a(x) = *\}$ , 在形式背景分析中称作概念。

## 2 一致性优先属性值缺失信息补齐

在不完备故障诊断系统中,征兆属性的缺失增加了故障诊断决策表的不一致性。因此,给出一种优先考虑一致性的补齐算法,减小不完备性造成的不一致性影响。

**定义 4:**设  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$  为不完备故障诊断决策信息系统,记  $\theta_M(x_i, x_j)$  为  $S$  的可扩充辨识基元,且  $\theta_M(x_i, x_j)$  的表示形式为

$$\theta_M(x_i, x_j) = \begin{cases} a_k \in M \\ (\text{if } a_k(x_i) \neq a_k(x_j) \wedge a_k(x_i) \neq * \wedge a_k(x_j) \neq *) \\ \emptyset & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

则  $\Theta_M = (\theta_M(x_i, x_j))$  为扩充辨识矩阵。

**定义 5:**设  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$  为不完备故障诊断决策信息系统,则对应遗失属性集  $AoD$ 、不可辨识对象集  $NoD$  及属性值缺失对象集  $AdS$  分别为

$$AoD_i = \left\{ a_k \left| \begin{array}{l} a_k(x_i) = * \\ i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m \end{array} \right. \right\} \quad (2)$$

$$AoD = (AoD_i) \quad (3)$$

$$NoD_i = \{x_k | D_M(x_i, x_k) = \emptyset, i \neq k; k = 1, 2, \dots, m\} \quad (4)$$

$$NoD = (NoD_i) \quad (5)$$

$$AdS = \left\{ x_k \left| \begin{array}{l} \exists a_l \in M (a_l(x_k) = *) \\ k = 1, 2, \dots, m; l = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \right\} \quad (6)$$

**定义 6:**设  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$  为不完备故障诊断决策信息系统,  $x_i \in U$ , 满足  $|AoD_i| = 1$ , 若存在  $x_j \in NoD_i$ , 使得  $(D(x_j) = D(x_i)) \wedge (|AoD_j| = 0)$ , 则称  $x_i$  为优先补齐信息。

优先补齐信息是首选的补齐对象,其属性缺失值由决策属性值相同的不可辨识对象的对应属性值补齐。

**定义 7:**设  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$  为不完备故障诊断决策信息系统,  $x_i \in U$ , 且  $x_j$  为样本  $x_i$  的不可辨识对象集  $NoD_i$  中的对象,  $x_j$  相对  $x_i$  的相似度为

$$Sim_{i,j} = \frac{|NoD_j|}{\sum_{x_k \in NoD_i} |NoD_k|} \quad (7)$$

**定义 8:**设  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$  为不完备故障诊断决策信息系统,记  $a_i \in A$  的属性值  $v_j \in V$  的属性值期望为

$$E_i^j = \frac{|\{x_k | f(x_k) = v_j\}|}{|x_i|} \quad (8)$$

一致性优先属性值缺失信息补齐算法1的步骤如下。输入初始不完备故障诊断决策信息系统 $S^0$ ；输出完备故障诊断决策信息系统 $S^n$ 。

1) 初始化 $n=0$ 。

2) 构造初始扩充辨识矩阵 $\Theta_M^n$ ，计算 $NoD^n$ ， $AoD^n$ 。

3) 确定优先补齐信息，补齐缺失属性值，更新 $S^{n+1}$ 。

4) 对非优先补齐信息，保留已有属性值，采取如下操作进行补齐构造 $S^{n+1}$ ：

若 $|NoD_i^n|=1$ ，且 $a_k^n(x_s) \neq *$ ，则 $a. D(x_i) = D(x_s)$ ， $a_k^{n+1}(x_i) = a_k^n(x_s)$ ，其中： $a_k^n \in AoD_i^n$ ， $x_s \in NoD_i^n$ ； $b. 且(D(x_i) \neq D(x_s)) \wedge (|AoD_i^n|=1)$ ，则 $a_k^{n+1}(x_i) = \neg a_k^n(x_s)$ 。

若 $|NoD_i^n| > 1$ ，且 $|\max(Sim_{i,j}^n)|=1$ ， $a_k^n(x_i) \neq *$ ，则 $a_k^{n+1}(x_i) = a_k^n(x_s)$ ，其中： $a_k^n \in AoD_i^n$ ， $x_s \in NoD_i^n$ ， $Sim_{i,s}^n = \max(Sim_{i,j}^n)$ ；若 $|\max(Sim_{i,j}^n)| > 1$ ，则采用属性值期望最大的对象的属性值进行补齐。

5) 若 $AoD^{n+1} = \emptyset$ ，则删除冗余信息，算法终止；否则， $n=n+1$ ，转到步骤2。

### 3 最大一致征兆概念集诊断规则提取

从数理逻辑层面讲，故障诊断规则的提取本质上是属性辨识的范畴，辨识矩阵及辨识函数<sup>[20]</sup>是对信息系统进行属性约简的有效方法，对于故障诊断信息系统，求属性最小约简是NP-难问题，运算量随属性个数的增加呈指数增长，目前尚没有一种通用的算法，笔者采用一种基于最大一致征兆概念集的诊断规则提取方法。

**定义9**：设五元组 $\mathcal{J}=(U, A, R, D, T)$ 是一个故障诊断形式背景， $L_1=L(U, A, R)$ ， $L_2=L(U, D, T)$ 为背景上的两个概念格，且 $A \cap D = \emptyset$ 。其中： $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为对象集，每个 $x_i (i \leq n)$ 为一个对象； $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 为征兆属性集，每个 $a_j (j \leq m)$ 为一个属性； $R$ 为 $U$ 和 $A$ 之间的二元关系： $R \subseteq U \times A$ ； $D = \{d_1, d_2, \dots, d_l\}$ 为决策属性集，每个 $d_j (j \leq l)$ 为一个决策属性； $T$ 为 $U$ 和 $D$ 之间的二元关系， $T \subseteq U \times D$ ；若 $(x, a) \in R((x, d) \in T)$ ，则称 $x$ 具有属性 $a(d)$ ，记为 $xRa(xRd)$ ，若 $(x, a) \notin R((x, d) \notin T)$ ，则称 $x$ 不具有属性 $a(d)$ 。

**定义10**<sup>[21]</sup>：设五元组 $\mathcal{J}=(U, A, R, D, T)$ 为一个故障诊断形式背景，若 $C \subseteq A$ ，则对于任意 $(X,$

$B) \in L_1, (Y, N) \in L_2$ ，当 $X \subseteq Y$ 时，存在 $(B \cap C)^* \subseteq Y$ ，则称 $C$ 为 $A$ 的一致诊断集；若 $C$ 为 $A$ 的一致诊断集，且其任意真子集均非一致诊断集，则称 $C$ 为 $A$ 的诊断约简属性。

故障诊断形式背景 $\mathcal{J}=(U, A, R, D, T)$ 上： $\forall (X, B) \in L_1, \exists (X^{*D^*D}, X^{*D}) \in L_2$ ，定义二元关系 $R_A^D$ 为

$$R_A^D = \{((X, X^*), (Y, Y^*)) \in L_1 \times L_1 \mid X^{*D^*D} = Y^{*D^*D}\} \quad (9)$$

其中： $X^{*D} = \{d \in D \mid \forall x \in U(x \in X \Rightarrow xTd)\} = \{d \in D \mid X \subseteq Td\} = \bigcap_{x \in X} xT$ 。

**定理2**<sup>[21]</sup>：设五元组 $\mathcal{J}=(U, A, R, D, T)$ 是一个故障诊断形式背景，则二元关系 $R_A^D$ 是 $L_1$ 上的等价关系。

**定义11**：设五元组 $\mathcal{J}=(U, A, R, D, T)$ 是一个故障诊断形式背景，定义 $\mathcal{J}$ 上的最大一致征兆概念集为 $L_1^{\text{MAX}} = \bigcup_{(X, B) \in L_1} \text{MAX}[(X, B)]_R$ ，其中： $\text{MAX}[(X, B)]_R = \{(Y, N) \in [(X, B)]_R \mid (Y, N) \not\prec (Y_1, N_1), (Y_1, N_1) \in [(X, B)]_R\}$ 。

**定理3**：设五元组 $\mathcal{J}=(U, A, R, D, T)$ 是一个故障诊断形式背景，对于 $C \subseteq A$ ，则 $C$ 是一致诊断集当且仅当 $\forall X((X, E) \in L_1^{\text{MAX}} \wedge (E \cap C)^* = X)$ 。

**定义12**：设五元组 $\mathcal{J}=(U, A, R, D, T)$ 是一个故障诊断形式背景， $(X_i, B_i), (X_j, B_j) \in L_1^{\text{MAX}}$ ，定义 $\mathcal{J}$ 上的诊断属性辨识集 $\vartheta_{i,j}$ 为： $\vartheta_{i,j} = B_i - B_i \cap B_j + B_j - B_i \cap B_j - B_i^{\square} \cup B_j^{\square}$ ， $\mathfrak{g} = (\vartheta_{i,j})$ 为 $\mathcal{J}$ 上的诊断属性辨识矩阵。其中： $B_j^{\square} = \bigcup_{(X_i, B_i) \in \text{MIN}[(X, B)]_R} B_i - B_j$ ； $\text{MIN}[(X, B)]_R = \{(Y, N) \in [(X, B)]_R \mid (Y, N) \not\prec (Y_1, N_1), (Y_1, N_1) \in [(X, B)]_R\}$ ； $\Delta(\mathfrak{g}) = \bigwedge_{(X_i, B_i), (X_j, B_j) \in L_1^{\text{MAX}}} \bigvee \vartheta_{i,j}$ 称为辨识函数的合取范式。

基于最大一致征兆概念集的诊断规则提取算法2的步骤如下。输入：采用算法1补齐后的故障诊断形式背景 $\mathcal{J}=(U, A, R, D, T)$ ；输出：约简后的征兆属性集合 $R = \text{RED}(A)$ 及诊断规则集。

1) 构造征兆属性概念格 $L_1=L(U, A, R)$ 及决策属性概念格 $L_2=L(U, D, T)$ ；

2) 对于任意 $(X, B) \in L_1$ ，根据 $L_2$ 计算 $X^{*D^*D}$ ，搜索 $\text{MAX}[(X, B)]_R$ ，构造最大一致征兆属性集 $L_1^{\text{MAX}}$ ；

3) 构造诊断属性辨识矩阵 $\mathfrak{g}$ ；

4) 计算辨识函数 $\Delta(\mathfrak{g}) = \bigwedge_{(X_i, B_i), (X_j, B_j) \in L_1^{\text{MAX}}} \bigvee \vartheta_{i,j}$ ；

5) 将 $\Delta(\mathfrak{g})$ 等价转换为析取范式；

6) 根据属性获取难度及属性值缺失情况选择析取主子式作为属性约简  $RED(A) = \{\mathcal{R}_l \mid \mathcal{R}_l = \{a_i; i \leq s_l\}, l \leq t\}$ ;

7) 保留  $RED(A)$ , 删除冗余属性, 生成诊断规则。

### 4 实例分析

某航空装备的武器发射系统负责载机与武器系统间的信息交互, 目前处于演示验证阶段, 通过地面及飞行试验获取的数据存在信息缺失情形, 具备狭义不完备性。随着项目的深入开展, 会生成新的样本信息, 具备广义不完备性。笔者选取该武器发射系统作为研究对象, 对提出的不完备信息下的诊断规则提取方法进行验证。

系统由电子分系统、气动分系统及机械分系统3部分组成。根据武器发射系统的分系统地面试验、分系统空中试验、全系统地面联试及空中联试过程的故障样本信息, 从全项测试的37项测试步骤中选取军械主控信号  $a_1$ 、H 位标码  $a_2$ 、X 投影信号  $a_3$ 、Y 投影信号  $a_4$ 、音响信号  $a_5$ 、锁定/解锁信号  $a_6$ 、阀门开启信号  $a_7$  和点火信号  $a_8$  共8个测试步骤进行故障的诊断与定位以提高诊断效率, 故障定位于电源控制单元  $d_1$ 、跟踪解算单元  $d_2$ 、发射点火单元  $d_3$  和通讯单元  $d_4$  共4个内场可更换单元 (shop replaceable unit, 简称 SRU), 构造故障诊断决策信息系统  $S = \langle U, A \cup D, V_A, f \rangle$ ,  $\{x_1, x_2, \dots, x_{12}\}$  为实

验中获取的历史故障信息, 故障征兆属性集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_8\}$ ;  $V_{a_i} = \{0, 1\}$  表示步骤  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 8$ ) 测试结果为合格、不合格; 故障决策属性集合  $D = \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ ;  $V_{d_j} = \{0, 1\}$  表示内场可更换单元  $d_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) 工作正常、故障。表1为该型武器发射系统的故障诊断决策表。

表1 某航空装备武器发射系统故障诊断决策表

Tab. 1 The aviation equipment weapon launching system fault diagnosis decision making table

$U$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
$x_1$	1	0	*	1	0	1	0	0	0	1	0	1
$x_2$	*	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0
$x_3$	0	1	0	0	1	*	0	0	0	1	1	0
$x_4$	1	0	0	1	0	1	0	*	0	1	0	1
$x_5$	*	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
$x_6$	0	0	1	1	0	1	*	0	0	1	0	0
$x_7$	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
$x_8$	0	0	*	1	0	1	1	0	0	1	0	0
$x_9$	1	1	0	1	0	*	0	1	1	1	0	0
$x_{10}$	1	0	0	1	*	0	1	1	1	1	0	1
$x_{11}$	1	1	0	*	1	0	0	1	0	0	0	1
$x_{12}$	1	1	*	0	1	1	0	0	1	0	0	1

采用算法1对表1所示的诊断决策系统进行信息补齐, 步骤如下。

1) 计算遗失属性集、属性值缺失对象集及初始扩充辨识矩阵

$$AoD = \{a_3, a_1, a_6, a_8, a_1, a_7, \emptyset, a_3, a_6, a_5, a_4, a_3\};$$

$$AdS = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}\};$$

$$\Theta_M^n =$$

$\emptyset$																			
$a_4 a_6 a_7 a_8$	$\emptyset$																		
$a_4 a_6 a_7 a_8$	$a_2 a_5 a_7 a_8$	$\emptyset$																	
$\emptyset$	$a_4 a_6 a_7$	$a_1 a_2 a_4 a_5$	$\emptyset$																
$a_4 a_6 a_7 a_8$	$a_2 a_1 a_7 a_8$	$a_4 a_5 a_8$	$a_2 a_6$	$\emptyset$															
$a_1$	$a_3 a_4 a_6$	$a_2 a_3 a_4 a_5$	$a_1 a_3$	$a_2 a_3 a_6 a_8$	$\emptyset$														
$a_1$	$a_2 a_4 a_7 a_8$	$a_2 a_3 a_4 a_5$	$a_1 a_3$	$a_2 a_3 a_6 a_8$	$\emptyset$	$\emptyset$													
$a_1 a_7$	$a_4 a_6 a_8$	$a_2 a_4 a_5 a_7$	$a_1 a_5 a_7$	$a_2 a_6 a_7 a_8$	$\emptyset$	$a_7$	$\emptyset$												
$a_2 a_8$	$a_2 a_4 a_7$	$a_1 a_4 a_5 a_8$	$a_2$	$\emptyset$	$a_1 a_2 a_3 a_8$	$a_1 a_2 a_3 a_8$	$a_1 a_2 a_7 a_8$	$\emptyset$											
$a_6 a_7 a_8$	$a_4$	$a_1 a_2 a_4 a_7 a_8$	$a_6 a_7$	$a_2 a_7$	$a_1 a_3 a_6 a_8$	$a_1 a_3 a_6 a_7 a_8$	$a_1 a_6 a_8$	$a_2 a_7$	$\emptyset$										
$a_2 a_5 a_6 a_8$	$a_2 a_5 a_7$	$a_1 a_8$	$a_2 a_5 a_6$	$a_5$	$a_1 a_2 a_3 a_5 a_6 a_8$	$a_1 a_2 a_3 a_5 a_6 a_8$	$a_1 a_2 a_5 a_6 a_7 a_8$	$a_5 a_6 a_8$	$a_2 a_7$	$\emptyset$									
$a_2 a_4 a_5$	$a_2 a_5 a_6 a_7 a_8$	$a_1$	$a_2 a_4 a_5$	$a_4 a_5 a_6$	$a_1 a_2 a_4 a_5$	$a_1 a_2 a_4 a_5$	$a_1 a_2 a_4 a_5 a_7$	$a_4 a_5 a_8$	$a_2 a_4 a_6 a_7 a_8$	$a_6 a_8$									

(10)

2) 计算不可辨识对象集

$$NoD = \left\{ \begin{array}{l} \{x_4\} \quad \emptyset \quad \emptyset \quad \{x_1\} \quad \{x_9\} \quad \{x_7 x_8\} \\ \{x_6\} \quad \{x_6\} \quad \{x_5\} \quad \emptyset \quad \emptyset \quad \emptyset \end{array} \right\}$$

3) 第1轮补齐

考虑  $|AoD_6| = 1$ , 且  $|AoD_8| = 0$ , 同时满足  $D(x_6) = D(x_8)$ , 所以  $x_6$  为优先补齐信息, 其缺失属性值依据  $x_8$  补齐  $a_7(x_6) = a_7(x_8) = 1$ 。

考虑  $|AoD_1| = |AoD_4| = |AoD_5| = |AoD_8| =$

$|AoD_9| = 1$  且  $|NoD_1| = |NoD_4| = |NoD_5| = |NoD_8| = |NoD_9| = 1$ , 同时满足对应不可辨识对象的决策属性相同, 则补齐如下属性缺失值:  $a_3(x_1) = a_3(x_4) = 0; a_8(x_4) = a_3(x_1) = 0; a_1(x_5) = a_1(x_9) = 1; a_6(x_5) = a_6(x_9) = 0; a_3(x_8) = a_3(x_6) = 1$ 。

4) 第 2 轮补齐

采用属性值期望最大方法进行第 2 轮补齐,  $a_6(x_3) = 1, a_5(x_{10}) = 0, a_4(x_{10}) = 1, a_4(x_{10}) = 0$ ,

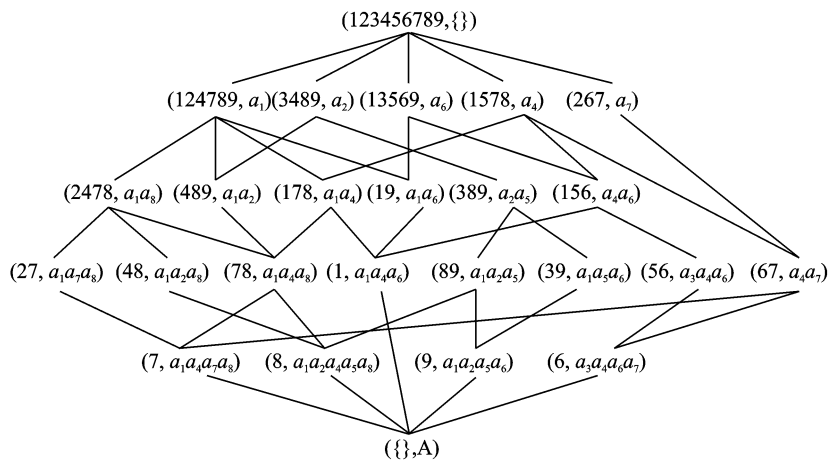


图 1 对象-征兆属性概念格

Fig. 1 Object-system attribute concept lattice

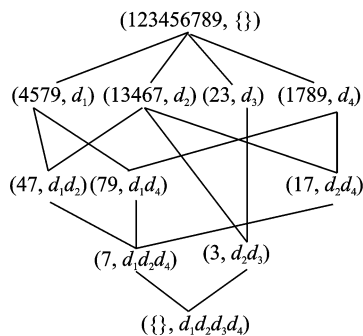


图 2 对象-决策属性概念格

Fig. 2 Object-decision making attribute concept lattice

2) 计算最大一致征兆概念集  $L_1^{MAX} = \{(U, \emptyset), (19, a_1 a_6), (178, a_1 a_4), (67, a_4 a_7), (1, a_1 a_4 a_6),$

$(89, a_1 a_2 a_5), (7, a_1 a_4 a_7 a_8), (9, a_1 a_2 a_5 a_6), (\emptyset, A)\}$

3) 构造诊断属性辨识矩阵

$$g(L_1^{MAX}) = \begin{bmatrix} \emptyset & & & & & & & & & & \\ a_1 a_6 & \emptyset & & & & & & & & & \\ a_1 a_4 & a_4 a_6 & \emptyset & & & & & & & & \\ a_4 a_7 & a_1 a_4 a_6 a_7 & a_1 a_7 & \emptyset & & & & & & & \\ a_1 a_4 a_6 & a_4 & a_6 & a_1 a_6 a_7 & \emptyset & & & & & & \\ a_1 a_2 a_5 & a_2 a_5 a_6 & a_2 a_4 a_5 & a_1 a_2 a_4 a_5 a_7 & a_2 a_4 a_5 a_6 & \emptyset & & & & & \\ a_1 a_4 a_7 a_8 & a_4 a_6 a_7 a_8 & a_7 a_8 & a_1 a_8 & a_6 a_7 a_8 & a_2 a_4 a_5 a_7 a_8 & \emptyset & & & & \\ a_1 a_2 a_3 a_6 & a_2 a_5 & a_2 a_4 a_5 a_6 & a_1 a_2 a_4 a_5 a_6 a_7 & a_2 a_4 a_5 & a_6 & a_2 a_4 a_5 a_6 a_7 a_8 & \emptyset & & & \\ A & a_2 a_3 a_5 a_7 a_8 & a_2 a_3 a_5 a_6 a_7 a_8 & a_1 a_2 a_3 a_5 a_6 a_8 & a_2 a_3 a_5 a_7 a_8 & a_3 a_4 a_6 a_7 a_8 & a_2 a_3 a_5 a_6 & a_3 a_4 a_7 a_8 & \emptyset & & \end{bmatrix} \quad (11)$$

4) 计算  $L_1^{MAX}$  的辨识函数  $\Delta(\mathcal{F})$ , 并转化为析取范式

$$\Delta(\mathcal{F}) = a_4 \wedge a_6 \cdots \wedge (a_1 \vee a_2 \vee a_3 \vee a_5 \vee a_6 \vee a_8) \wedge (a_2 \vee a_3 \vee a_4 \vee a_6 \vee a_7 \vee a_8) = (a_1 \wedge a_2 \wedge a_4 \wedge a_6 \wedge a_8) \vee (a_1 \wedge a_4 \wedge a_5 \wedge a_6 \wedge a_8) \vee (a_1 \wedge a_2 \wedge a_4 \wedge a_6 \wedge a_7) \vee (a_2 \wedge a_4 \wedge a_6 \wedge a_7 \wedge a_8) \vee (a_1 \wedge a_4 \wedge a_5 \wedge a_6 \wedge a_7) \vee (a_4 \wedge a_5 \wedge a_6 \wedge a_7 \wedge a_8) \quad (12)$$

5) 由于各属性的缺失情况为  $n(a_3) = 3, n(a_1) = n(a_6) = 2, n(a_4) = n(a_5) = n(a_7) = n(a_8) = 1, n(a_2) = 0$ 。考虑属性  $a_5$  的获取难度较大, 因此选取  $RED(A) = \{a_2, a_4, a_6, a_7, a_8\}$ , 约简后的决策表如

删除冗余对象  $\{x_4, x_8, x_9\}$ , 得到补齐后的故障诊断决策表。

采用算法 2 对补齐后的诊断决策系统进行诊断规则提取, 步骤如下。

1) 采用内涵势升序的遍历算法<sup>[22]</sup> 分别求解对象-征兆属性概念格及对象-决策属性概念格, 如图 1, 2 所示。

表 2 所示。

表 2 约简后的航空装备武器发射系统故障诊断决策表  
Tab. 2 Reduced aviation equipment weapon launching system fault diagnosis decision making table

$U$	$a_2$	$a_4$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
$x_1$	0	1	1	0	0	0	1	0	1
$x_2$	0	0	0	1	1	0	0	1	0
$x_3$	1	0	1	0	0	0	1	1	0
$x_4$	1	1	0	0	1	1	1	0	0
$x_5$	0	1	1	0	0	1	0	0	0
$x_6$	0	1	1	1	0	0	1	0	0
$x_7$	0	1	0	1	1	1	1	0	1
$x_8$	1	1	0	0	1	0	0	0	1
$x_9$	1	0	1	0	0	1	0	0	1

提取诊断规则如下:

$$r_1 : a_4 a_6 \Rightarrow (d_2 d_4, d_1); r_2 : a_7 a_8 \Rightarrow d_3; r_3 : a_2 a_6 \Rightarrow (d_2 d_3, d_1 d_4); r_4 : a_2 a_4 a_8 \Rightarrow d_1 d_2 d_4; r_5 : a_4 a_6 a_7 \Rightarrow d_2; r_6 : a_4 a_7 a_8 \Rightarrow d_1 d_2 d_4.$$

为检验方法的有效性,选取该型武器发射系统的 12 组历史故障记录进行验证,并与文献[1, 23]

方法进行比较。采取文献[7]给出的间接方法进行缺失信息补齐。历史故障记录及诊断结果如表 3 所示,“—”表示规则失效,无法根据征兆属性确定故障类型。对比结果可见,本研究方法的诊断结果准确率为 83.3%,而采用对比方法准确率则为 66.7%,极大地提高了诊断准确度。

表 3 武器发射系统故障历史纪录及结果比较

Tab. 3 Weapon launching system history fault records and result comparison for different methods

$U$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	对比方法	本研究方法
1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	$d_3$	$d_3$
2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	$(d_2 d_4, d_1)$	$(d_2 d_4, d_1)$
3	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	$(d_2 d_4, d_1)$	$(d_2 d_4, d_1)$
4	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	—	$d_2$
5	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	$(d_2 d_3, d_1 d_4)$	$(d_2 d_3, d_1 d_4)$
6	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	$d_3$	$d_3$
7	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	$d_1 d_2 d_4$	$d_1 d_2 d_4$
8	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	—	$d_2$
9	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	$d_1 d_2 d_4$	$d_1 d_2 d_4$
10	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	$d_3$	$d_3$
11	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	$d_2$	$d_2$
12	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	1	$d_1 d_2 d_4$	$d_1 d_2 d_4$

## 5 结束语

针对现有观点的片面性,给出了狭义广义完备性的概念,提出一种不完备信息下的航空电子装备故障诊断规则提取方法。在缺失属性值补齐的基础上,构造概念格生成诊断规则,该方法在缺失信息补齐及诊断规则提取过程中,能克服因信息缺失带来的信息不完备性,同时能较好解决不完备性带来的不一致性问题,具有直观简洁的优点,该方法也适用于其他装备的故障诊断规则提取。

故障诊断信息系统不完备性的一个重要体现是:依据当前的样本及信息纪录构建的形式推理系统并未蕴含诊断对象的所有诊断规则,诊断系统在使用过程中,不断生成新的样本及信息纪录,而伴随新的信息引入,必须对诊断概念格动态维护,更新先前生成的诊断规则。由于概念格是完全格且其构造是非确定多项式完全问题,维护具有较大困难,但在当前概念格及新生成信息的前提下进行概念格维护,相比重新构造概念格会减少极大的工作量,根据新的对象-属性对实施诊断规则动态更新将是下一步工作的重点。

### 参 考 文 献

[1] 文莹,肖明清,王东升,等. 不完备信息的概念格诊断规则提取方法[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(5): 887-893.

Wen Ying, Xiao Mingqing, Wang Dongsheng, et al. Diagnostic rule acquisition from incomplete information based on concept lattices[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnostis, 2013, 33(5): 887-893. (in Chinese)

[2] 蒙祖强,黄柏雄. 不一致不完备决策系统中属性约简的比较研究[J]. 控制与决策, 2011, 26(6):867-872. Meng Zuqiang, Huang Boxiong. Comparative study of attribute reduction in incomplete decision system[J]. Control and Decision, 2011, 26(6):867-872. (in Chinese)

[3] 王珉,胡芑庆,秦国军. 基于不完备信息的直升机传动系统故障诊断规则提取方法[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12):185-190. Wang Min, Hu Niaoqing, Qin Guojun. Method of rule extraction for fault diagnosis of a helicopter power train based on incomplete information[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(12):185-190. (in Chinese)

[4] 陈利安,肖明清,赵鑫. 基于粗糙集与信息熵的不完备测试信息条件下故障诊断[J]. 振动与冲击, 2012, 22: 24-28. Chen Li'an, Xiao Mingqing, Zhao Xin. Fault diagnostic under condition of incomplete test information based on rough set and information entropy[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 22:24-28. (in Chinese)

[5] 黄文涛,王伟杰,赵学增,等. 从不完备数据中获取诊断规则的粗糙集方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14):49-54. Huang Wentao, Wang Weijie, Zhao Xuezheng, et al. Extracting optimal generalized decision rules for fault diagnosis from incomplete data based on rough set[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14):49-54. (in Chinese)
- [6] Hong T. Learning rules from incomplete training examples by rough sets[J]. Expert Systems with Applications, 2002, 22:285-293.
- [7] 张铮. 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.
- [8] 张伟, 廖晓峰, 吴中福. 一种基于 Rough 集理论的不完备数据分析方法[J]. 模式识别与人工智能, 2003, 16(2):158-162.  
Zhang Wei, Liao Xiaofeng, Wu Zhongfu. An incomplete data analysis approach based on rough set theory[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2003, 16(2):158-162. (in Chinese)
- [9] 黄兵, 周献中, 胡作进. 不完备信息系统中一个变精度粗糙集模型[J]. 中北大学学报:自然科学版, 2006, 27(4):283-287.  
Huang Bing, Zhou Xianzhong, Hu Zuojin. A variable-precision rough-set model in incomplete information systems[J]. Journal of North University of China: Nature Science Edition, 2006, 27(4):283-287. (in Chinese)
- [10] 颜锦江, 黄兵. 不完备信息系统中基于相似度的变精度粗糙集模型[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(10):67-72.  
Yan Jinjiang, Huang Bing. Variable precision rough sets model based on similarity degree in incomplete information systems[J]. System Engineering Theory and Practice, 2006, 26(10):67-72. (in Chinese)
- [11] 李登, 万福, 尹亚兰, 等. 基于改进 RIG 算法的动态诊断策略生成[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2):159-163.  
Li Deng, Wan Fu, Yin Yalan, et al. Dynamic generation of diagnostic strategy based on modified RIG algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(2):159-163. (in Chinese)
- [12] 李爱, 陈果, 于明月. 基于支持向量机的航空发动机转静碰摩部位诊断规则提取[J]. 航空动力学报, 2013, 28(10):2181-2193.  
Li Ai, Chen Guo, Yu Mingyue. Aero-engine rotor-stator rubbing positions diagnosis rule acquisition based on support vector machine[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(10):2181-2193. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 索中英, 朱林户, 吴华, 等. 基于变精度粗糙集的航空发动机故障诊断[J]. 航空动力学报, 2008, 23(10):1842-1846. (in Chinese)  
Suo Zhongying, Zhu Linhu, Wu Hua, et al. Aero-engine fault diagnosis based on variable precision rough sets[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(10):1842-1846. (in Chinese)
- [15] 黄文涛, 赵学增, 王伟杰, 等. 基于粗糙集理论的故障诊断决策规则提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11):150-154.  
Huang Wentao, Zhao Xuezheng, Wang Weijie, et al. Extraction method of detection rules for fault diagnosis based on rough set theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11):150-154. (in Chinese)
- [16] 苏宏升, 李群湛. 概念格在变压器故障诊断中的应用研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(2):12-14, 17.  
Su Hongsheng, Li Qunzhan. Application study for fault diagnosis of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(2):12-14, 17. (in Chinese)
- [17] 刘永阔, 谢春丽, 虹夏. 基于概念格的核动力设备 NN-ES 故障诊断方法[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(6):718-724.  
Liu Yongkuo, Xie Chunli, Hong Xia. NN-ES fault diagnosis method in nuclear power equipment based on concept lattice[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(6):718-724. (in Chinese)
- [18] Wen Ying, Xiao Mingqing. Diagnosis rule mining of airborne avionics using formal concept analysis[C]//2013 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery. Beijing:[s. n.], 2013:259-265.
- [19] Sun Xiaobing, Li Bixin, Wen Wanzhi. CLPS-MFL: Using concept lattice of program spectrum for effective multi-fault localization[C]//13th International Conference on Quality Software. Nanjing:[s. n.], 2013:204-207.
- [20] Skowron A. A synthesis of decision rules: applications of discernibility matrix[C]//Proceedings of the International Conference on Intelligent Information Systems. Augustow, Poland:[s. n.], 1993.
- [21] Shao Mingwen, Yee Leung, Wu Weizhi. Rule acquisition and complexity reduction in formal decision contexts[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2014, 55:259-274.
- [22] 智慧来. 概念格构造与应用中的关键技术研究[D]. 上海:上海大学, 2010.
- [23] 文莹, 肖明清, 盛晟, 等. 基于概念格的航空雷达故障诊断研究[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(10):2612-2614.  
Wen Ying, Xiao Mingqing, Sheng Sheng, et al. Study of fault diagnosis of airborne radar based on concept lattice[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(10):2612-2614. (in Chinese)



**第一作者简介:** 赵亮亮, 男, 1987年5月生, 博士研究生。主要研究方向为故障诊断及预测、自动测试系统集成。曾发表《惯导飞控综合测试系统设计与实现》(《计算机测量与控制》2011年第19卷第3期)等论文。

E-mail: fareaststocking@163.com

