

研究报告

# 不确定性推理理论在卫星故障检测和诊断中的应用

杨天社, 李怀祖, 曹雨平  
(西安交通大学, 西安 710043)

**[摘要]** 推理理论一般分为确定性推理理论和不确定性推理理论。传统的卫星故障检测和诊断应用的是确定性推理。然而, 在卫星故障检测和诊断的实践中, 仅使用确定性推理是很难对某些故障进行检测和诊断的, 因为这时需要合情推理和容错能力。不确定性推理理论可以满足此要求。目前, 航天领域的许多专家 and 实际工作者正致力于应用不确定性推理理论检测和诊断那些用确定性推理无法检测和诊断的故障。不确定性推理理论包括诸如包含度理论、粗糙集理论、证据推理理论、概率推理理论、模糊推理理论等。笔者研究的卫星故障检测和诊断的三种新方法, 分别应用了包含度理论、粗糙集理论和证据推理理论。

**[关键词]** 卫星; 故障; 检测; 诊断; 不确定性推理

**[中图分类号]** TP18; V474.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2003) 02-0068-07

## 1 概述

通常在进行卫星故障检测和诊断时, 人们往往想到确定性推理理论。然而在卫星故障检测和诊断的许多方面, 如症状信息获取、决策信息系统生成和约简等方面都不可避免地要运用合情推理和容错能力。不确定性推理理论可以实现合情推理和容错能力, 而确定性推理理论却不能。因而仅仅应用确定性推理理论是难以对某些卫星故障进行自动检测和诊断的。目前, 人们正在研究不确定性推理理论在卫星故障检测和诊断中的应用, 相应的系统也正在开发。不确定性推理理论包括若干理论。笔者研究的卫星故障检测和诊断的三种新方法, 分别基于不确定性推理理论中的包含度理论、粗糙集理论和证据推理理论<sup>[1,2]</sup>。

## 2 三种新方法简介

### 2.1 包含度理论方法

设<sup>[1]</sup>:

- $X$  为对象集合,  $A_i \subset X (i \leq k)$  为  $X$  的分划, 即满足  $A_i \cap A_j = \Phi (i \neq j)$ , 且  $\bigcup_{i=1}^k A_i = X$ 。
- $A_x$  是  $X$  的一个分划,  $A_x = \{ A_i; i \leq k \}$ 。
- $D$  是  $X$  上分划的全体。
- $X$  上的两个分划  $A_x = \{ A_i; i \leq k \}$  和  $B_x = \{ B_j; j \leq l \}$ 。

若有  $A_i \subset B_j$ , 称  $B_x$  依赖于  $A_x (A_x \subset B_x)$ 。如果  $A_i \in A_x, B_j \in B_x$  且  $A_i \subset B_j$ , 称  $A_i$  影响到  $B_j$ 。

$D(B_j/A_i)$  和  $D(B_x/A_x)$  分别是  $X$  和  $D$  上的包含度。包含度定义如下:

$$D(B_x/A_x) = \bigwedge_{i=1}^k (\bigvee_{j=1}^l D(B_j/A_i)),$$

$$A_x \leq B_x, D(B_x/A_x) = 1,$$

$$A_x \times B_x = \{ A_i \cap B_j; i \leq k, j \leq l \},$$

$$A_x \times B_x \leq A_x, A_x \times B_x \leq B_x。$$

若  $D(B_x/A_x) = \bigwedge_{i=1}^k (\bigvee_{j=1}^l D(B_j/A_i)) < 1$  且  $i \leq k$ , 存在  $B_{ji}$ , 满足  $D(B_{ji}/A_i) = \bigvee_{j=1}^l D(B_j/A_i)$ , 则

[收稿日期] 2002-10-11; 修回日期 2002-11-29

[作者简介] 杨天社 (1964-), 男, 陕西渭南市人, 西安卫星测控中心高级工程师, 西安交通大学博士生

可得到如下规则：

如果是  $A_i$ ，则为  $B_{ji}$ 。

### 2.2 粗糙集理论方法

讨论使用粗糙集 (rough set) 理论进行决策信息系统约简的方法。约简指在保持决策信息系统依赖关系不变的情况下对其进行简化。约简依据以下定义<sup>[3-11]</sup>：

定义 1 决策信息系统可表示为  $S = \langle U, R, V, f \rangle$ 。 $U$  为对象集， $R = C \cup D$  为属性集 ( $C$  为条件属性， $D$  为决策属性)。 $V = \bigcup_{r \in R} V_r$  是属性值的集合， $f: U \times R \rightarrow V$  为  $U$  中每一个对象  $x$  的属性值。对于每一个属性值集  $B \subset R$ ，定义不分明关系 (IND)：

$$IND(B) = \{(x, y) \mid (x, y) \in U^2, \forall b \in B, b(x) = b(y)\}。$$

IND(B) 为一等价关系，且

$$IND(B) = \bigcap_{a \in B} IND(a)。$$

定义 2  $U$  为对象集， $P$  是定义在  $U$  上的一个等价关系簇， $R \in P$ 。如果  $IND(P \setminus \{R\}) = IND(P)$ ， $R$  对  $P$  是绝对不必要的，否则，是绝对必要的。

定义 3  $U$  为对象集， $P$  是定义在  $U$  上的一个等价关系簇， $R \in P$ 。如果每一个  $R \in P$  对  $P$  都是绝对必要的，则  $P$  是独立的，否则，是互相依赖的。

定义 4  $U$  为对象集， $P$  是定义在  $U$  上的一个等价关系簇。 $P$  簇所有绝对必要关系组成的集合为关系簇  $P$  的绝对核 (CORE(P))。

定义 5  $U$  为对象集， $P$  和  $Q$  是定义在  $U$  上的两个等价关系簇且  $Q \subset P$ 。如果  $IND(Q) = IND(P)$ ，且  $Q$  是独立的，则  $Q$  是  $P$  的一个绝对约简。

定义 6 对  $X$  和不分明关系  $B$ ，包含于  $X$  的最大可定义集  $B_-(X)$  和最小可定义集  $B^-(X)$  都能够根据  $B$  确定。 $B_-(X)$  和  $B^-(X)$  分别称为  $X$  的  $B$  下逼近和上逼近：

$$B_-(X) = \bigcup \{Y \in U/IND(B) : Y \subset X\},$$

$$B^-(X) = \bigcup \{Y \in U/IND(B) : Y \cap X \neq \emptyset\}。$$

定义 7  $U$  为对象集， $P$  和  $Q$  是定义在  $U$  上的两个等价关系簇， $Q$  的  $P$  正域为  $POS_P(Q) = \bigcup_{x \in U/Q} P_-(x)$ 。

定义 8  $U$  为对象集， $P$  和  $Q$  是定义在  $U$  上

的两个等价关系簇。如果  $POS_P(Q) = POS_{(P \setminus \{r\})}(Q)$ ，则  $r$  是  $P$  中相对于  $Q$  可省略的，否则，是不可省略的。

定义 9  $U$  为对象集， $P$  和  $Q$  是定义在  $U$  上的两个等价关系簇。如果  $POS_P(Q) \neq POS_{(P \setminus \{r\})}(Q)$ ， $P$  为相对于  $Q$  独立的。

定义 10  $U$  为对象集， $P$  和  $Q$  是定义在  $U$  上的两个等价关系簇，且  $S \subset P$ 。如果  $POS_S(Q) = POS_P(Q)$ ，则  $S$  为  $P$  的  $Q$  约简 (RED<sub>Q</sub>(P))。

定义 11  $U$  为对象集， $P$  和  $Q$  是定义在  $U$  上的两个等价关系簇， $P$  的所有  $Q$  不可省略关系簇为  $P$  的  $Q$  核 (CORE<sub>Q</sub>(P))。

定义 12  $U$  为对象集， $P$  和  $Q$  是定义在  $U$  上的两个等价关系簇，如果  $POS_P(Q) = U$ ，则  $U$  是  $P$  上相对于  $Q$  一致的。

定义 13 决策信息系统条件属性集合  $C$  的相对约简  $C'$  是  $C$  相对于决策属性  $D$  的最大独立子集。

### 2.3 证据推理理论方法

证据推理理论的关键概念是 mass 函数。mass 函数的值是由专家依据他们的态度、经验、知识等确定的。对于同一决策问题，各位专家给出的值往往不同。如果仅应用确定性推理理论，依据专家们给出的 mass 函数值进行决策是困难的。若应用证据推理理论，决策就比较容易，因为证据推理理论可以合理地合并这些 mass 函数。证据推理理论的这一特点对于卫星故障检测和诊断是非常有用的。在卫星故障检测和诊断实际中，经常会有这样的情况：对于同一个现象，专家们根据其经验和知识给出的结果是不同的，其原因是定位卫星故障和确定导致卫星故障的因素都是困难的。此时，就可以应用证据推理理论合成各位专家的不同观点，得到合理的结果<sup>[12-14]</sup>。

mass 函数合成方法如下 ( $H$  为假设空间)：

$$m(D) = \frac{1}{N} \sum_{A \cap B = D} m_1(A) \cdot m_2(B), (D \subset H)$$

其中

$$m(\emptyset) = 0,$$

$$N = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m_1(A) \cdot m_2(B) > 0。$$

设  $m$  是  $X$  上的 mass 函数，则：

$$B(A) = \sum_{D \subset A} m(D), (D \subset X),$$

$$L(A) = \sum_{D \cap A \neq \emptyset} m(D), (D \subset X)。$$

近似精度  $\mu = B(A)/L(A)$ 。通过求  $\mu_{\max}$ ，确

定导致卫星故障的原因。

应用证据推理理论时, 要注意以下五点:

· 导致卫星故障的因素是不相关的。

· 可以对各位专家的 mass 函数给出不同的权重, 导致不同因素故障的权重也可以不同。

· 一种故障通常可能由多种因素同时引起, 应启发专家在确定 mass 函数值时考虑多种因素。

· 如果不同因素的  $\mu$  比较接近, 则故障可能是由这几种因素共同作用的结果。

· 要考虑非显著因素的综合效果。若非显著因素的综合效果大于某个显著因素的效果, 则应该用另一种方法进行故障诊断, 以验证证据推理理论的诊断结果。

### 3 三种新方法的实际应用

#### 3.1 包含度理论的应用

设姿态控制计算机故障的有关因素为<sup>[1,15~20]</sup>:

· 卫星是否穿越地球北极;

· 是否实施轨道控制;

· 星上主份陀螺是否在线。

根据包含度理论, 卫星姿态控制计算机故障信息系统的原始形式如表 1。

表 1 卫星姿态控制计算机故障信息系统 (原始形式)

Table 1 Information system of the fault of satellite attitude control computer (original form)

故障对象	症状			决策
	穿越地球北极	轨道控制	主份陀螺在线	
$F_1$	是	是	是	$D_1$
$F_2$	是	否	否	$D_2$
$F_3$	否	是	否	$D_3$
$F_4$	否	是	否	$D_3$
$F_5$	是	是	是	$D_1$
$F_6$	是	是	是	$D_1$
$F_7$	是	否	否	$D_2$
$F_8$	否	是	否	$D_3$

定义  $F$  表示故障,  $C$  表示故障症状属性,  $D$  表示故障决策属性。

症状属性中的“是”用 1 表示, “否”用 0 表示; 决策属性中的“ $D_1$ ”用 1 表示, “ $D_2$ ”用 2 表示, “ $D_3$ ”用 3 表示。为表述方便, 用 PNP 表示“穿越地球北极”, 用 OM 表示“轨道控制”, 用 MGO 表示“主份陀螺在线”, 则卫星姿态控制计

算机故障信息系统的形式化形式如表 2。

表 2 卫星姿态控制计算机故障信息系统 (形式化形式)

Table 2 Information system of the fault of satellite attitude control computer (formulary form)

$F$	$C$			$D$
	PNP	OM	MGO	
$F_1$	1	1	1	1
$F_2$	1	0	0	2
$F_3$	0	1	0	3
$F_4$	0	1	0	3
$F_5$	1	1	1	1
$F_6$	1	1	1	1
$F_7$	1	0	0	2
$F_8$	0	1	0	3

分别按 PNP, OM 和 MGO 划分  $F$ :

$$A_{1-PNP} = \{F_i; PNP = 1\} = \{F_1, F_2, F_5, F_6, F_7\},$$

$$A_{2-PNP} = \{F_i; PNP = 0\} = \{F_3, F_4, F_8\},$$

则 PNP 对  $F$  的划分 (PNP\*) 为

$$PNP^* = \{\{F_1, F_2, F_5, F_6, F_7\}, \{F_3, F_4, F_8\}\}.$$

$$A_{1-OM} = \{F_i; OM = 1\} = \{F_1, F_3, F_4, F_5, F_6, F_8\}$$

$$A_{2-OM} = \{F_i; OM = 0\} = \{F_2, F_7\},$$

则 OM 对  $F$  的划分 (OM\*) 为

$$OM^* = \{\{F_1, F_3, F_4, F_5, F_6, F_8\}, \{F_2, F_7\}\}.$$

$$A_{1-MGO} = \{F_i; MGO = 1\} = \{F_1, F_5, F_6\},$$

$$A_{2-MGO} = \{F_i; MGO = 0\} = \{F_2, F_3, F_4, F_7, F_8\},$$

则 MGO 对  $F$  的划分 (MGO\*) 为

$$MGO^* = \{\{F_1, F_5, F_6\}, \{F_2, F_3, F_4, F_7, F_8\}\}.$$

于是, 得到关于  $F$  依不同属性的所有划分:

$$F = \{PNP^*, OM^*, MGO^*, PNP^* \times OM^*,$$

$$PNP^* \times MGO^*, OM^* \times MGO^*,$$

$$PNP^* \times OM^* \times MGO^*\}.$$

按  $D$  划分  $F$ :

$$A_{1-D} = \{F_i; D = 1\} = \{F_1, F_5, F_6\},$$

$$A_{2-D} = \{F_i; D = 2\} = \{F_2, F_7\},$$

$$A_{3-D} = \{F_i; D = 3\} = \{F_3, F_4, F_8\},$$

则  $D$  对  $F$  的划分 ( $D^*$ ) 为

$$D^* = \{\{F_1, F_5, F_6\}, \{F_2, F_7\}, \{F_3, F_4, F_8\}\}.$$

由于  $PNP^* > D^*$ ,  $OM^* > D^*$ ,  $MGO^* > D^*$ , 所以, 依赖  $PNP^*$ ,  $OM^*$ ,  $MGO^*$  其中之一不能形成决策规则。但是,  $PNP^* \times OM^* \leq D^*$ ,  $OM^* \times MGO^* \leq D^*$ , 表明可以用 PNP 与 OM 或

OM 与 MOG 划分  $D$ 。

例如：

$$PNP^* \times OM^* = \{\{F_1, F_5, F_6\}, \{F_2, F_7\}, \{F_3, F_4, F_8\}\},$$

$$OM^* \times MGO^* = \{\{F_1, F_5, F_6\}, \{F_2, F_7\}, \{F_3, F_4, F_8\}\},$$

则有

$$\{F_1, F_5, F_6\} = \{F_i; PNP = 1, OM = 1\} = \{F_i; D = D_1\},$$

$$\{F_2, F_7\} = \{F_i; PNP = 1, OM = 0\} = \{F_i; D = D_2\},$$

$$\{F_3, F_4, F_8\} = \{F_i; PNP = 0, OM = 1\} = \{F_i; D = D_3\},$$

$$\{F_1, F_5, F_6\} = \{F_i; OM = 1, MGO = 1\} = \{F_i; D = D_1\},$$

$$\{F_2, F_7\} = \{F_i; OM = 0, MGO = 0\} = \{F_i; D = D_2\},$$

$$\{F_3, F_4, F_8\} = \{F_i; OM = 1, MGO = 0\} = \{F_i; D = D_3\}。$$

因而得到以下决策规则：

规则 1：

如果  $(PNP=1, OM=1)$ ，则  $D = D_1$ ；

如果  $(PNP=1, OM=0)$ ，则  $D = D_2$ ；

如果  $(PNP=0, OM=1)$ ，则  $D = D_3$ 。

规则 2：

如果  $(OM=1, MGO=1)$ ，则  $D = D_1$ ；

如果  $(OM=0, MGO=0)$ ，则  $D = D_2$ ；

如果  $(OM=1, MGO=0)$ ，则  $D = D_3$ 。

### 3.2 粗糙集理论的应用

设引起卫星姿态故障的姿态控制部件包括推力器、陀螺、动量轮、磁力矩器。为表述方便，“推力器”用 Thruster 表示，“陀螺”用 Gyro 表示、“动量轮”用 MW 表示，“磁力矩器”用 MT 表示<sup>[3-11,15-20]</sup>，每个姿态控制部件的症状信息如表 3。

表 3 症状信息

Table 3 Symptom information

部件	名称	症状信息		
$P_1$	Thruster	$T_{H1}$	$T_{H2}$	$T_{H3}$
$P_2$	Gyro	$G_1$	$G_2$	$G_3$
$P_3$	MW	$M_1$	$M_2$	
$P_4$	MT	$T_{O1}$	$T_{O2}$	

为表述方便，用  $T_{H1}, T_{H2}, T_{H3}$  分别表示 Thruster 遥测数据的三种取值；用  $G_1, G_2, G_3$  分别表示 Gyro 遥测数据的三种取值；用  $M_1, M_2$  分别表示 MW 遥测数据的两种取值；用  $T_{O1}, T_{O2}$  分别表示 MT 遥测数据的两种取值。

根据卫星历史测量数据得到的初始决策信息系统如表 4。

表 4 决策信息系统

Table 4 Decision information system

部件属性值				故障状态
$T_{H1}$	$G_3$	$M_2$	$T_{O2}$	无
$T_{H1}$	$G_3$	$M_2$	$T_{O1}$	无
$T_{H2}$	$G_3$	$M_2$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$G_2$	$M_2$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$G_1$	$M_1$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$G_1$	$M_1$	$T_{O1}$	无
$T_{H2}$	$G_1$	$M_1$	$T_{O1}$	有
$T_{H1}$	$G_2$	$M_2$	$T_{O2}$	无
$T_{H1}$	$G_1$	$M_1$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$G_2$	$M_1$	$T_{O2}$	有
$T_{H1}$	$G_2$	$M_1$	$T_{O1}$	有
$T_{H2}$	$G_2$	$M_2$	$T_{O1}$	有

定义  $C$  为条件属性集（部件属性）：

$C = \{\text{推力器 } (a_1), \text{陀螺 } (a_2), \text{动量轮 } (a_3), \text{磁力矩器 } (a_4)\}。$

设  $D$  为决策属性集：

$$D = \{\text{Decision}(d)\},$$

则有如下“不分明关系 (IND)”和“正域 (POS)”：

$$IND(C) = \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{10\}, \{11\}, \{12\}\};$$

$$IND(D) = \{\{1,2,6,8\}, \{3,4,5,7,9,10,11,12\}\};$$

$$POS_C(D) = U;$$

$$IND(C \setminus a_1) = \{\{1,3\}, \{2\}, \{4,8\}, \{5,9\}, \{6,7\}, \{10\}, \{11\}, \{12\}\};$$

$$IND(C \setminus a_2) = \{\{1,8\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{5, 10\}, \{6\}, \{7\}, \{9\}, \{11\}, \{12\}\};$$

$$IND(C \setminus a_3) = \{\{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4,10\}, \{5\}, \{6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{11\}, \{12\}\};$$

$$IND(C \setminus a_4) = \{\{1,2\}, \{3\}, \{4\}, \{5,6\}, \{7\}, \{8\}, \{9\}, \{11\}, \{12\}\}。$$

由此可得

$$\text{POS}_{(C \setminus a_1)}(D) = \{2, 5, 9, 10, 11\},$$

$$\text{POS}_{(C \setminus a_2)}(D) = U = \text{POS}_C(D),$$

$$\text{POS}_{(C \setminus a_3)}(D) = U = \text{POS}_C(D),$$

$$\text{POS}_{(C \setminus a_4)}(D) = \{1, 2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}.$$

因此, 在判断该故障时, 陀螺或动量轮的因素是不必要的。但是:

$$\text{IND}(C \setminus (a_2, a_3)) = \{\{1, 8, 9\}, \{2, 11\}, \{3\}, \\ \{4, 5, 10\}, \{6\}, \{7\}\},$$

$$\text{POS}_{(C \setminus (a_2, a_3))}(D) = \{3, 4, 5, 6, 7, 10, 12\}.$$

所以, 条件属性集 {推力器 ( $a_1$ )、陀螺 ( $a_2$ )、磁力矩器 ( $a_4$ )} 和 {推力器 ( $a_1$ )、动量轮 ( $a_3$ )、磁力矩器 ( $a_4$ )} 能够决定决策属性集 {Decision ( $d$ )},  $C$  的所有  $D$  约简为

$$\text{RED}_D(C) = \{\{\text{Thruster } (a_1), \text{Gyro } (a_2), \\ \text{MT } (a_4)\}, \{\text{Thruster } (a_1), \\ \text{MW } (a_3), \text{MT } (a_4)\}\}.$$

$C$  的  $D$  核为

$$\text{CORE}_D(C) = \cap \text{RED}_D(C) = \\ \{\{\text{Thruster}(a_1), \text{MT}(a_4)\}\}.$$

根据基于辨识矩阵和逻辑运算的决策表属性约简算法, 得到决策信息系统的两个约简  $A$  和  $B$ , 如表 5, 表 6。

**表 5 决策信息系统约简 A**  
(推力器, 陀螺, 磁力矩器)

Table 5 Reduction A of the decision information system (Thruster, Gyro, MT)

部件属性值			故障状态
$T_{H1}$	$G_3$	$T_{O2}$	无
$T_{H1}$	$G_3$	$T_{O1}$	无
$T_{H2}$	$G_3$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$G_2$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$G_1$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$G_1$	$T_{O1}$	无
$T_{H2}$	$G_1$	$T_{O1}$	有
$T_{H1}$	$G_2$	$T_{O2}$	无
$T_{H1}$	$G_1$	$T_{O2}$	有
$T_{H1}$	$G_2$	$T_{O1}$	有
$T_{H2}$	$G_2$	$T_{O1}$	有

**表 6 决策信息系统约简 B**  
(推力器, 动量轮, 磁力矩器)

Table 6 Reduction B of the decision information system (Thruster, MW, MT)

部件属性值			故障状态
$T_{H1}$	$M_2$	$T_{O2}$	无
$T_{H1}$	$M_2$	$T_{O1}$	无
$T_{H2}$	$M_2$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$M_2$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$M_1$	$T_{O2}$	有
$T_{H3}$	$M_1$	$T_{O1}$	无
$T_{H2}$	$M_1$	$T_{O1}$	有
$T_{H1}$	$M_1$	$T_{O2}$	有
$T_{H1}$	$M_1$	$T_{O1}$	有
$T_{H2}$	$M_2$	$T_{O1}$	有

### 3.3 证据推理理论的应用

设导致卫星姿态故障的部件有动量轮故障 ( $P_1$ )、推力器故障 ( $P_2$ )、姿态敏感器故障 ( $P_3$ ), 专家给出以下判断 ( ${}_Y P_j$  表示是该部件导致姿态故障,  ${}_N P_j$  表示不是该部件导致姿态故障)<sup>[12~14, 17~19]</sup>:

$$m_1({}_N P_1) = 0.6, m_2({}_N P_1) = 0.2, \\ m_3({}_Y P_2) = 0.4, m_4({}_N P_3) = 0.8, \\ m_5({}_Y P_2) = 0.3, m_6({}_N P_1) = 0.5, \\ m_7({}_Y P_1) = 0.3, m_8({}_Y P_3) = 0.7.$$

mass 函数合并:

$$1) \text{ 合并 } m_1 \text{ 和 } m_2, m = m_1 \oplus m_2$$

$$m_1({}_N P_1) = 0.6, m_1(U) = 1 - 0.6 = 0.4,$$

$$m_2({}_N P_1) = 0.2, m_2(U) = 1 - 0.2 = 0.8,$$

$$m_9(U) = (m_1 \oplus m_2)(U) = 0.4 \times 0.8 = 0.32,$$

$$m_9({}_N P_1) = 1 - 0.32 = 0.68.$$

$$2) \text{ 合并 } m_9 \text{ 和 } m_6$$

$$m_{10}(U) = (m_9 \oplus m_6)(U) = 0.5 \times 0.32 = 0.16,$$

$$m_{10}({}_N P_1) = (m_9 \oplus m_6)({}_N P_1) = 1 - 0.16 = 0.84.$$

$$3) \text{ 合并 } m_3 \text{ 和 } m_5$$

$$m_{11}(U) = (m_3 \oplus m_5)(U) = 0.6 \times 0.7 = 0.42,$$

$$m_{11}({}_N P_1) = (m_3 \oplus m_5)({}_Y P_2) = 1 - 0.42 = 0.58.$$

$$4) \text{ 合并 } m_7 \text{ 和 } m_{10}$$

$$N = 1 - 0.84 \times 0.3 = 0.254,$$

$$m_{12}({}_Y P_1) = (0.16 \times 0.3) / 0.254 = 0.064,$$

$$m_{12}({}_N P_1) = (0.84 \times 0.7) / 0.254 = 0.768,$$

$$m_{12}(U) = (0.16 \times 0.7) / 0.254 = 0.150。$$

5) 合并  $m_4$  和  $m_8$

$$m_{13}(Y P_3) = 0.318,$$

$$m_{13}(N P_3) = 0.545,$$

$$m_{13}(U) = 0.136。$$

6) 最后

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus$$

$$m_5 \oplus m_6 \oplus m_7 \oplus m_8,$$

$$m(Y P_1) = 0.0263,$$

$$m(N P_1) = 0.058,$$

$$m(Y P_2) = 0.704,$$

$$m(Y P_3) = 0.160,$$

$$m(N P_3) = 0.044,$$

$$m(U) = 0.011,$$

$$m_{\max} = m(Y P_2),$$

求  $\mu_{\max}$

$$\mu_{\max} = \mu(Y P_2) = B(Y P_2) / L(Y P_2) =$$

$$0.704 / 0.817 = 0.8617。$$

诊断结果为“推力器故障导致姿态故障”。

## 4 结论

笔者首先分析了仅使用确定性推理理论进行卫星故障检测和诊断的缺陷, 然后研究了应用不确定性推理理论中的包含度理论、粗糙集理论和证据推理理论进行卫星故障检测和诊断的方法, 最后给出了分别应用不确定性推理理论中的上述三种理论进行卫星故障检测和诊断的三个实例。通过这些分析和研究, 得出以下结论:

1) 同时应用确定性推理理论和不确定性推理理论, 可使卫星故障检测和诊断得到合理解决。

2) 由于人们经常遇到只应用确定性推理理论无法对某些卫星故障进行检测和诊断的困境, 因而应用以不确定性推理理论进行卫星故障检测和诊断的方法是十分有效和实用的。

### 参考文献

- [1] 张文修. 不确定性推理原理[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996
- [2] 徐敏, 黄少毅. 设备故障诊断手册[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998
- [3] Pawlak Z. Why rough sets? [A]. IEEE International Conference on Industrial Electronics [C], 1996. 738~743
- [4] 曾黄麟. 粗糙集理论及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1998
- [5] 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
- [6] Shen Lixiang. Fault diagnosis using rough set theory [A], Computer in Industry [C], 2000. 61~72
- [7] Gediga D G. Rough set data analysis [A]. Encyclopedia of Computer Science and Technology [C], 2000
- [8] Wang G Y. The inconsistency in rough set based rule generation [A], The Second International Conference on Rough Set and Current Trend in Computing [C], 2000. 332~339
- [9] 胡涛. 基于粗糙集理论的燃气轮机发电机组故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2001, (3): 11~16
- [10] 曹长修. 基于粗糙集理论的内燃机故障诊断专家系统[J]. 重庆大学学报, 2001, (4): 45~47
- [11] 刘宜平. 设备故障诊断的粗糙集方法[J]. 高科技通讯, 2001, (5): 77~79
- [12] 段新生. 证据推理理论、决策和人工智能[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1993
- [13] 戴冠中. 证据推理的进展及存在的问题[J]. 控制理论与应用, 1999, 16 (3): 465~469
- [14] 高洪涛. 证据理论在旋转机械综合故障诊断中的应用[J]. 大连理工大学学报, 2001, (4): 459~462
- [15] 陈芳允. 卫星操作手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993
- [16] 石书济. 卫星测控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- [17] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学和控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998
- [18] 杨大明. 空间飞行器姿态控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001
- [19] 吴德安. 卫星姿态控制系统自主故障诊断与重构[J]. 上海航天, 2001, (1): 39~43
- [20] Breed J. Spacecraft emergency response system for autonomous mission operation [M]. NASA Goddard Space Flight Center, 2001



## Application of Uncertainty Reasoning Theory to Satellite Fault Detection and Diagnosis

Yang Tianshe, Li Huaizu, Cao Yuping

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710043, China)

[**Abstract**] Generally, reasoning theory can be divided into certainty reasoning theory and uncertainty reasoning theory. Traditionally, certainty reasoning theory is used to detect and diagnose satellite faults. However, in practice, it is difficult to detect and diagnose some satellite faults automatically only by use of certainty reasoning theory. The reason is that detection and diagnosis of these faults requires reasonable reasoning and fault-tolerant capability, but certainty reasoning theory can not realize the capability. Fortunately, uncertainty reasoning theory can meet this requirement. Now, it is attracting attention of many researchers and practitioners in the space field all over the world that uncertainty reasoning theory is applied to detect and diagnose the satellite faults which can not be handled properly by certainty reasoning theory. Uncertainty reasoning theory includes several kinds of theories, such as inclusion degree theory, rough set theory, evidence reasoning theory, probabilistic reasoning theory, fuzzy reasoning theory, and so on. This paper introduces three new methods to detect and diagnose the satellite faults, in which inclusion degree theory, rough set theory and evidence reasoning theory of the uncertainty reasoning theory are used respectively.

[**Key words**] satellite; fault; detection; diagnosis; uncertainty reasoning theory

---

(cont. from p. 34)

[**Abstract**] Entering the era of 21st century, there are two characteristics bearing on thinking—innovation and comprehension. As to innovation, how to exite creative-thinking is a warm problem. From the high level of philosophy—epistemology and relative-truth of materialist-dialectics, this paper shows that there is the duality of every form of thinking including the thinking of deduction and that of socalled fixed-accustoming. There is an existence of both non-creative thinking and creative thinking and under certain conditions non-creative thinking may be turn into creative thinking which can make new knowledge and innovative achievements. As to comprehension, there are many different opinions on how to define and classify thinkings. By combining physiology and psychology, this paper divides thinkings into 2 parts and 7 basic forms. Connecting dialectics with comprehension, the conclusions of this paper are shown: the duality of non-creative thinking and creative thinking, the duality of reasoning thinking and understanding thinking, the duality of original knowledge and new knowledge, the duality of idea and test-verification, the duality of discovery and invention, the duality of science (sense of truth ) and art (sense of beauty ). The last conclusion is expressed as an example of seeking the theory of a cross-course —industrial design, the main contents of which are technology, art and market. This theory of ID is the first advance in ID.

[**Key words**] creative thinking; turn-condition; relativity of knowledge; comprehension