

基于粗糙集理论的卫星故障诊断方法

杨天社^{1,2} 杨开忠² 李怀祖¹

¹(西安交通大学工业工程系 西安 710049)

²(中国西安卫星测控中心)

摘 要

卫星结构和控制的复杂性、独特性和诱发故障的多源性导致其故障诊断的困难。卫星的一种故障模式与许多症状变量有关,目前的故障诊断推理因未充分考虑症状变量的冗余变量而比较复杂。提出了基于粗糙集理论的故障症状约简新方法,用卫星故障实例研究了新方法的应用,结果表明该约简方法对消除卫星故障症状信息冗余、简化和优化故障诊断推理非常有效。

关键词 粗糙集; 约简; 卫星; 故障诊断

1 引言

卫星的一个故障模式通常与星上若干分系统的许多特征参数有关。现行的卫星故障诊断方法是基于模型和残差分析的方法,故障诊断时一般考虑与该故障模式相关的绝大部分特征参数,导致故障诊断推理很复杂,甚至无法进行。基于人工智能的诊断方法从根本上讲是基于模式识别和模式分类的方法,当模式较多时不可避免的存在组合爆炸,对信息冗余、不一致等问题也不能很好地处理。要简化和优化现行的卫星故障诊断方法,必须寻找其他理论。作者曾在“应用证据推理实现卫星故障诊断信息的融合方法”一文中研究了卫星故障诊断中专家判断信息的融合问题。本文研究应用粗糙集理论消除卫星故障症状的冗余问题。应用粗糙集理论进行故障诊断是当前国内外机械设备故障诊断领域的一个研究热点。对于一个实际的卫星故障诊断问题,尽管与该故障相关的条件属性(故障特征参数)很多,但不是每个条件属性都是必要的,为了降低决策的复杂性又使故障诊断不失准确性,就有必要对其进行约简。本文提出的基于粗糙集理论的卫星故障诊断方法,直接从卫星遥测数据中获取知识,提取故障诊断规则,无需进行系统建模,研究表明该方法对消除故障症状信息的冗余、简化和优化卫星故障诊断非常有效。

2 粗糙集理论及其约简方法

2.1 粗糙集理论

粗糙集理论是由 Zdzislaw Pawlak 提出的,该理论从新视角对“知识”进行了如下定

2002-11-07 收到原稿, 2003-03-15 收到修定稿

义: 给定一组数据与等价关系集合 R , 在等价关系集合 R 下对数据集合 U 的划分, 称为知识, 记为 U/R . 根据粗糙集理论对知识的定义, 按所讨论对象的特征差异对其进行分类的能力, 均可以称为知识. 粗糙集理论主要概念如下:

把数据集合 U 的一个划分定义为有限个类 $X_1, X_2, \dots, X_n$, 且 X_i 满足

$$\emptyset X_i \subset U, \quad X_i \neq \emptyset, \quad X_i \cap X_j = \emptyset, \quad \bigcup_{i=1}^n X_i = U, \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

则 X_i 为 U/R 的等价类.

决策信息系统 $S = \langle U, R, V, f \rangle$, 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:

$$\text{IND}(B) = \{(x, y) | (x, y) \in U^2, \quad \forall b \in B, \quad b(x) = b(y)\}$$

为不分明关系.

不分明关系 $\text{IND}(B)$ 为一等价关系且

$$\text{IND}(B) = \bigcap_{b \in B} \text{IND}(b).$$

2.2 约简方法

决策信息系统由条件属性和决策属性组成, 对象根据其条件属性不同被划分到具有不同决策属性的决策类, 决策是根据条件属性确定决策属性的过程. 决策信息系统中的条件属性往往存在着一定程度上的依赖或关联, 即存在一定的冗余, 粗糙集理论的一个重要用途就是对决策信息系统的条件属性进行约简, 通过约简获取知识, 导出系统的分类规则. 这种约简是在保持决策信息系统中决策属性与条件属性之间的依赖关系不发生变化的前提下的约简, 即条件属性集合 C 的相对约简 C' 是 C 相对于决策属性 D 的最大独立子集.

给定决策信息系统的对象集 U , P, Q 是定义在 U 上的等价关系簇且 $Q \subset P$, 若对于 $R \in P$,

$$\text{IND}(P \setminus \{R\}) = \text{IND}(P),$$

则 R 对 P 是绝对不必要的, 否则, 是绝对必要的. 如果每一个 R 对 P 是绝对必要的, 则 P 是独立的, 否则, 是互相依赖的. P 中所有绝对必要关系组成的集合为关系簇 P 的绝对核 ($\text{CORE}(P)$).

若 $\text{IND}(Q) = \text{IND}(P)$ 且 Q 独立, 则 Q 是 P 的一个绝对约简.

对决策信息系统进行约简时, 一般是针对其辨识矩阵进行的. 辨识矩阵的定义如下:

决策信息系统 $S = \langle U, R, V, f \rangle$, U 为对象集, $R = C \cup D$ 为属性集, $C = \{a_i | i = 1, 2, \dots, m\}$ 为条件属性, $D = \{d\}$ 为决策属性. $a_i(x_i)$ 为样本 x_i 在 a_i 上的取值. $C_D(i, j)$ 表示辨识矩阵中第 i 行 j 列的元素, 则辨识矩阵 C_D 定义为

当 $d(x_i) \neq d(x_j)$ 时, $C_D(i, j) = \{a_k | a_k \in C \wedge a_k(x_i) \neq a_k(x_j)\}$.

当 $d(x_i) = d(x_j)$ 时, $C_D(i, j) = 0$.

基于辨识矩阵的属性约简算法如下.

对辨识矩阵中的所有取值为非空集合的元素 $C_{ij} (C_{ij} \neq \emptyset, C_{ij} \neq \emptyset)$, 建立相应的析取逻辑表达式 L_{ij} ,

$$L_{ij} = \bigvee_{a_i \in C_{ij}} a_i.$$

将所有的析取逻辑表达式 L_{ij} 进行合取运算, 得到一个合取范式 L , 即

$$L = \bigwedge_{C_{ij} \neq \emptyset, C_{ij} \neq \emptyset} L_{ij},$$

将所有合取范式转换为析取范式,

$$L' = \bigvee_i L_i.$$

析取范式中的每个合取项对应一个属性约简结果, 每个合取项中所包含的属性组成约简后的条件属性集合.

3 实际应用

应用粗糙集理论进行卫星故障诊断的基本步骤如下.

(1) 原始症状信息的提取, 故障诊断表的形成. 在形成诊断表时, 需量化每一个症状参数的取值范围, 属性值范围要能正确区分所有故障特征的最小属性值集合.

(2) 约简条件属性, 得到“核”症状参数.

(3) 根据“核”症状参数形成故障诊断规则.

表 1 陀螺故障诊断表
Table 1 Gyro fault diagnosis table

对象	症状变量属性值			故障
	θ	ω	T	
x_1	θ_2	ω_1	T_3	d_1 (卡死)
x_2	θ_3	ω_2	T_1	d_2 (停转)
x_3	θ_2	ω_1	T_3	d_1
x_4	θ_2	ω_2	T_3	d_2
x_5	θ_1	ω_1	T_4	d_3 (漂移过大)
x_6	θ_1	ω_1	T_2	d_3
x_7	θ_3	ω_2	T_1	d_2
x_8	θ_1	ω_1	T_4	d_3
x_9	θ_2	ω_1	T_3	d_1
x_{10}	θ_3	ω_2	T_1	d_2

假设诊断卫星姿态控制系统陀螺故障的症状变量(条件属性)有3个: 俯仰红外地球敏感器输出角度(θ)、陀螺转速(ω)和陀螺温度(T), 故障有3类: 卡死、停转、漂移过

大. 故障对象用 x 表示, 决策结果用 d 表示. 若统计 10 次故障, 则该故障诊断问题用粗糙集理论描述为

$$U = \{x_1, x_2, \dots, x_{10}\},$$

$$A = \{\theta, \omega, T\},$$

$$D = \{d\}.$$

故障诊断表如表 1 所示.

为表述方便, 把表 1 变换为表 2 形式.

表 2 陀螺故障诊断表

Table 2 Gyro fault diagnosis table

对象	症状变量属性值			故障发生
	θ	ω	T	
x_1	2	1	3	1
x_2	3	2	1	2
x_3	2	1	3	1
x_4	2	2	3	2
x_5	1	1	4	3
x_6	1	1	2	3
x_7	3	2	1	2
x_8	1	1	4	3
x_9	2	1	3	1
x_{10}	3	2	1	2

根据表 2 可得到分类表如表 3.

表 3 分类表

Table 3 Classification table

U/A	θ	ω	T
$\{x_1, x_3, x_9\} = C_1$	2	1	3
$\{x_2, x_7, x_{10}\} = C_2$	3	2	1
$\{x_4\} = C_3$	2	2	3
$\{x_5, x_8\} = C_4$	1	1	4
$\{x_6\} = C_5$	1	1	2

根据表 3 可得到辨识矩阵表 4.

表 4 辨识矩阵

Table 4 Discernible matrix

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
C_1	—	$\{\theta, \omega, T\}$	$\{\omega\}$	$\{\theta, T\}$	$\{\theta, T\}$
C_2	$\{\theta, \omega, T\}$	—	$\{\theta, T\}$	$\{\theta, \omega, T\}$	$\{\theta, \omega, T\}$
C_3	$\{\omega\}$	$\{\theta, T\}$	—	$\{\theta, \omega, T\}$	$\{\theta, \omega, T\}$
C_4	$\{\theta, T\}$	$\{\theta, \omega, T\}$	$\{\theta, \omega, T\}$	—	$\{T\}$
C_5	$\{\theta, T\}$	$\{\theta, \omega, T\}$	$\{\theta, \omega, T\}$	$\{T\}$	—

根据辨识矩阵计算方法可得到经约简后的条件属性的“核”,

$$C = \bigwedge_{d(x_i) \neq d(x_j)} C_{ij} = \{\theta, \omega\} \cup \{\omega, T\}.$$

所以, 条件属性 (故障诊断的症状信息) 的“核”有两个, 一个是 $\{\theta, \omega\}$, 另一个是 $\{\omega, T\}$. 这说明进行故障诊断时 3 个症状变量中可省略一个.

如果以核 $\{\theta, \omega\}$ 进行故障诊断, 可得到如下决策规则:

IF $\theta = \theta_2$ and $\omega = \omega_1$, THEN 故障 = 卡死.

IF $\omega = \omega_2$, THEN 故障 = 停转.

IF $\theta = \theta_1$, THEN 故障 = 漂移过大.

如果以核 $\{\omega, T\}$ 进行决策, 可得到如下决策规则:

IF $\omega = \omega_2$ and $T = T_3$, THEN 故障 = 卡死.

IF $\omega = \omega_2$ and $T = T_1$ or T_3 , THEN 故障 = 停转.

IF $T = T_2$ or T_4 , THEN 故障 = 漂移过大.

4 讨论

对基于粗糙集理论进行卫星故障诊断方法讨论如下.

(1) 基于粗糙集理论的约简不存在对卫星故障诊断症状参数的主观评价, 因而是对卫星故障诊断的定量、客观简化, 约简计算依据有严格的数学方法.

(2) 条件属性的选取: 在卫星故障诊断中, 条件属性的选取非常重要, 它直接影响着故障诊断的效率. 然而对于实际的故障诊断问题, 合理地选取条件属性是一个比较困难的问题. 条件属性选取不属于本文研究的范围, 因而没有进行深入的讨论, 本文只研究方法的应用, 对条件属性的选取没有严格要求. 选取较多条件属性的代价是增加约简计算的复杂性, 但关键属性将保留到最后的约简结果中. 选取比较多的、与该卫星故障诊断有关的条件属性, 可以充分剔除条件属性的冗余.

(3) 本文提出的卫星故障诊断方法直接基于航天地面测控系统实际测得的卫星遥测数据, 应用粗糙集理论从其中获取诊断知识, 不需要建立相关诊断的准确模型. 条件属性 (故障诊断特征参数) 越多, 则诊断结果越精确、合理, 并且有助于减少不一致信息的发生与处理.

(4) 基于粗糙集理论的卫星故障诊断方法具有处理不一致信息的能力, 这是因为粗糙集理论本身就考虑了“不一致、不完备信息”情况下的决策问题.

(5) 基于粗糙集理论的卫星故障诊断方法是假设所有卫星遥测数据是完全可信的, 各类遥测数据的置信度均相同. 由于卫星地面测控系统测量卫星遥测数据时要受到一些无法避免的因素的限制, “完全可信”的要求在卫星的实际测控中难以达到. 解决该问题的途径是把模糊推理引入到基于粗糙集理论的卫星故障诊断方法中, 使二者相互结合, 取长补短, 如此可改善卫星故障诊断系统的性能.

(6) 约简计算的复杂性问题: 随着卫星故障诊断中条件属性和决策属性数量的增加, 粗糙集理论约简计算的复杂程度会相应地增加, 甚至会增加很快. 如何降低约简计算的复

杂性是粗糙集理论的一个研究热点和难点. 本文的重点是约简卫星故障诊断系统中的冗余信息, 因而未涉及约简计算的复杂性问题, 但在应用基于粗糙集的方法进行卫星故障诊断时, 该问题是值得关注的.

5 结论

目前航天测控系统中卫星故障的诊断尚未采用不确定性推理方法, 导致有些故障诊断的困难, 甚至无法对某些故障进行诊断. 本文提出了一种基本不确定性推理理论中的粗糙集理论进行卫星故障诊断的新方法. 随着卫星结构和控制复杂性的不断增加, 故障诊断中的不确定因素也会相应增加, 因此本文提出的方法有着广阔的应用前景, 将在卫星故障诊断中发挥越来越大的作用. 本文研究内容为粗糙集理论在诊断卫星姿态故障中的应用, 应用粗糙集理论进行卫星故障诊断时的一些难题 (如故障症状数量的选取、约简复杂性的降低等方法) 尚需进一步研究.

参 考 文 献

- [1] Ziarko W, Golan R, Edwards D. An Application of Data Logic/r Knowledge Discovery Tool to Identify Strong Predictive Rules in Stock Market Data. In: AAAI. Proc. AAAI Works. Know. Dis. Database. Washington: AAAI Press, 1993. 93—101
- [2] Pawlak Zdzislaw. Rough sets. *Comm. ACM*, 1995, **38**(11):89—95
- [3] Zhang Wenxiu, Liang Yi. Principle of Uncertainty Reasoning Theory. Xian: Xian Jiaotong University Press, 1996, 57—114. in Chinese (张文修, 梁怡. 不确定性推理原理. 西安: 西安交通大学出版社, 1996, 57—114)
- [4] Tsumoto S, Tanaka H. Automated discovery of medical expert system rules from clinical database based on rough sets. In: AAAI. Proc. 2nd Intern. Conf. Know. Disc. Data Min., Washington: AAAI Press, 1996. 63—69
- [5] Shan N, Hamilton H J. Discretization of continuous valued attributes in classification systems. In: RFSD'96. Proc. 4th Intern. Works. Rough Sets, Fuzzy Sets, Mach. Disc., Tokyo: Organizer of RFSD'96, 1996. 74—81
- [6] Zeng Huanglin. Rough Set Theory and Its Application. Chongqing: Chongqing University Press, 1998, 98—152. in Chinese (曾黄麟, 粗糙集理论及应用. 重庆: 重庆大学出版社, 1998, 98—152)
- [7] Xu Min, Huang Shaoyi. Handbook of Fault Diagnosis of Equipment. Xian: Xian Jiaotong University Press, 1998, 87—162. in Chinese (徐敏, 黄昭毅. 设备故障诊断手册. 西安: 西安交通大学出版社, 1998, 87—162)
- [8] Lixiang Shen. Francis E H. Tay, Fault diagnosis using rough sets theory. *Comp. Ind.*, 2000, **43**(1): 61—72
- [9] Wang Guoyin. Theory of Rough Set and Acquisition of Knowledge. Xian: Xian Jiaotong University Press, 2001, 117—146. in Chinese (王国胤. Rough 集理论与知识获取. 西安: 西安交通大学出版社, 2001, 117—146)
- [10] Wang Weiping, Li Xiya. Minimization of fault diagnosis for numerical control lathe based on rough set. *Autom. Proc. Tech.*, 2001, **16**(2):31—34. in Chinese (王卫平, 李熙亚. 基于粗糙集的数控机床故障诊断最小化方法, 自动化加工技术, 2001, **16**(2):31—34)
- [11] Li Xiaolei, Zhang Zhenhua. Fault diagnosis of vehicle transmission system based on rough set theory. *J. Beijing Ins. Tech.*, 2001 **10**(2): 204—208
- [12] Yang Tianshe, Yang Kaizhong, Cao Yuping. Method of satellite fault diagnosis applying evidence reasoning theory to merge information. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(3):226—232. in Chinese (杨天社, 杨开忠, 曹雨平. 应用证据推理理论实现卫星故障诊断信息融合方法. 空间科学学报, 2003, **23**(3):226—232)

METHOD OF SATELLITE FAULT DIAGNOSIS BASED ON ROUGH SET

YANG Tianshe^{1,2} YANG Kaizhong² LI Huaizu¹

¹(Department of Industrial Engineering, Xian Jiaotong University, Xian 710049)

²(Xian Satellite Control Center of China)

Abstract

The fault diagnosis of satellites is a difficult problem due to the complex and unique of structure and control of satellite and the presence of multi-excite sources. Generally, one satellite fault mode is relative to many symptom variables. These variables comprise a set, called the primary symptom set of the fault mode. If each variable in the primary symptom set is necessary to the fault diagnosis? The answer is "no". That is, some variables in the set are redundancy variables. Current reasoning method of fault diagnosis uses all of the variables of primary symptom set to diagnose fault. Because of the redundancy variables in the set, the reasoning method is usually complicated. The redundancy variables not only give no contributions to the fault diagnosis, but also affect the accuracy of the fault diagnosis. So, the methods that can remove the redundancy variables in the primary set should be found. Rough set is a kind of advanced uncertainty reasoning theory. It has several advantages. One of them is to be used to simplify and optimize the sets, which have redundancy variables. Based on Rough set, a new method of satellite fault diagnosis is proposed in this paper. This method removes the redundancy variables in the primary symptom set of satellite fault mode firstly. The remainder variables comprise a set, called the reduction symptom set of satellite fault mode. Then, on condition that the diagnosis accuracy is guaranteed, the proposed method only uses the variables in the reduction symptom set to diagnose fault. The diagnosis reasoning is relatively simpler, because it uses fewer variables to diagnose fault. The content of this paper is organized as following: Firstly, the shortage of current methods of satellite fault diagnosis and the necessity of applying Rough set to satellite fault diagnosis are analyzed. Secondly, the theoretical method of Rough set for diagnosing satellite fault is briefly studied. Thirdly, the practical application of the method is given. Finally, the proposed method is discussed and the conclusions of this paper are given. It is shown that the method proposed in this paper is effective for satellite fault diagnosing.

Key words Rough set, Reduction, Satellite, Fault and diagnosis