

基于粗集模型的歼击机损伤故障检测

胡寿松, 徐德友, 刘 亚

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 从粗集的观点出发, 将歼击机的损伤故障信息表示为一种信息系统, 进而表示为决策表的形式, 然后利用粗集方法对决策表进行属性简化, 提取决策规则, 再利用规则完成歼击机的损伤故障检测. 粗集方法可直接处理歼击机的可测输出信号, 不需要对象的数学模型和相关先验知识. 仿真结果表明了所提出方法的有效性和实用性.

关键词: 粗集; 故障检测; 信息系统; 不可分辨关系; 决策表

中图分类号: TP391; V249.121 **文献标识码:** A

Damage fault detection of fighter based on rough set model

HU Shou-song, XU De-you, LIU Ya

(College of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, China)

Abstract: The information of aircraft's faults was denoted as a kind of information system based on rough set, and then as a decision table. Rough set based algorithms were applied to attributes reduction, rules extraction, fulfilling the detection of the damage faults. The proposed method dealt with measurable signal of the aircraft, mathematical model and no relevant transcendental knowledge was needed. The results of the simulation revealed the efficiency and practicality of this method.

Key words: rough set; fault detection; information system; indiscernibility relation; decision table

1 引言(Introduction)

随着人们对动态系统设备的安全性、可靠性和有效性的要求越来越高, 故障检测技术已成为国际自控界的热点研究方向之一. 歼击机损伤故障是指歼击机舵面缺损情况下引起歼击机偏离正常运行状态的故障类型. 对于基于残差模型^[1]的故障检测方法, 由于存在不可避免的建模误差及空间环境的急剧改变等因素, 常使得基于该方法进行故障检测的检测精度低而产生误报警. 本文利用粗集方法, 不需要残差以及其他任何先验知识, 直接从给定问题的描述集合出发, 处理对象的可测输出, 通过不可分辨关系和等价类确定给定问题的近似域, 从而找出问题的内在规律. 由于不需要建立对象的残差模型, 从而可以避免由于建模不准确而引起的误差, 检测精度较高, 具有较高的实用价值.

粗集理论^[2]是由 Zdzislaw Pawlak 于 1982 年提出的一种处理不完整性和不确定性的新的数学理论, 其最大的特点就是它仅利用数据本身所提供的

信息, 不需要任何附加信息或先验知识, 比如证据理论中的基本概率赋值、模糊集理论中的隶属度函数、统计学中的概率分布等. 因此粗集理论相对于其他处理不确定知识的方法, 更具有实用性. 粗集方法以对观察和测量所得数据进行分类的能力为基础, 有着广泛的应用, 其中就有模式识别、近似分类.

本文基于粗集理论的基本概念和理论基础, 将歼击机损伤故障信息表示为一种特殊的信息系统——决策系统. 首先对决策系统进行条件属性简化, 求得其约简集, 删除冗余属性, 得到简化决策表, 然后对决策表进行规则提取, 最后利用规则进行歼击机的损伤故障检测.

2 粗集理论的基本概念和理论基础^[2] (Basic concept and theory of rough set)

定义 1 信息系统被定义为如下的四元组: $S = (U, A, V, f)$, 其中, U 是对象的非空有限集合, $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; A 是属性的非空有限集合, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$; $V = \bigcup_{a \in A} V_a$ 是属性的值域集, V_a 是

属性 $a \in A$ 的值域; f 是信息函数, $f: U \times A \rightarrow V$, $f(x_i, a) \in V_a$. 如果 $A = C \cup D$, $C \cap D = \emptyset$, C 表示条件属性集, D 表示决策属性集, 则该类信息系统又称为决策系统, 决策系统是一类最为常见的信息系统.

定义 2 对于子集 $B \subseteq A$, 则 B 在 U 上的不可分辨关系定义为

$$\text{IND}(B) = \{(x, x') \in U^2 \mid \forall a \in B, a(x) = a(x')\}.$$

不可分辨关系是一种等价关系. 用 $U/\text{IND}(B)$ 表示 U 的所有等价类. 对于元素 $x \in U$, 它的 B 等价类定义为

$$[x]_B = \{y \mid (x, y) \in \text{IND}(B)\}.$$

定义 3 给定一个信息系统 $S = (U, A)$, 对于任意一个对象集合 $X \subseteq U$ 以及属性集合 $B \subseteq A$. X 的 B 下逼近定义为

$$\underline{B}X = \{x \mid [x]_B \subseteq X\},$$

X 的 B 上逼近定义为

$$\overline{B}X = \{x \mid [x]_B \cap X \neq \emptyset\}.$$

X 的 B 边界区定义为

$$BN_B(X) = \overline{B}X - \underline{B}X.$$

如果 $BN_B(X)$ 非空, 则称 X 是 B -粗集. 可用如下的指标评价粗集的精度:

$$\alpha_B(X) = |\underline{B}X| / |\overline{B}X|,$$

$|\cdot|$ 表示集合的基数. 有限集合的基数就是集合中元素的个数.

定义 4 信息系统的分辨矩阵 $M(S) = (m_{ij})$ 是一个 $n \times n$ 的矩阵, 其中

$$m_{ij} = \{a \in A \mid a(x_i) \neq a(x_j)\}, \\ i, j = 1, 2, \dots, n.$$

信息系统的分辨函数定义为

$$f_S = \bigwedge \{ \bigvee m_{ij} \mid 1 \leq j \leq i \leq n, m_{ij} \neq \emptyset \}.$$

可以由分辨矩阵来计算分辨函数.

定义 5 对于信息系统 $S = (U, A)$, 任何最小集 $B \subseteq A$ 且 $\text{IND}(A) = \text{IND}(B)$ 是信息系统的约简. 记 $\text{RED}(A)$ 表示所有的约简集. 所有约简集的交称为信息系统的核.

对于决策系统 $S = (U, C \cup D)$, C 为条件属性集合, D 为决策属性集合. $B \subseteq C$, 定义 B 相对于 D 的正域为

$$\text{POS}_B(D) = \{\underline{B}X \mid X \in U/\text{IND}(D)\},$$

其中 $U/\text{IND}(D)$ 为 D 对 U 划分所得到的等价类集合. 设 $a \in C$, 若有 $\text{POS}_C(D) = \text{POS}_{C-\{a\}}(D)$, 则称

a 为 C 中 D 可省略. 当 C 中每个元素都不为 C 中 D 可省略时, 称 C 为 D 独立. 当 $C' = C - C^*$ 为 D 独立, 且 C^* 中的所有元素都是 D 可省略时, 则称 C' 为 C 的 D 相对约简.

3 基于粗集模型的歼击机损伤故障检测 (Damage fault detection of fighter based on rough set model)

用粗集分类器进行故障检测的解算过程可表示为如图 1 所示的过程.

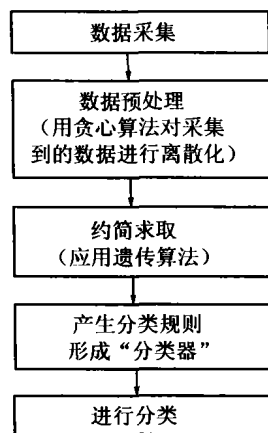


图 1 粗集分类器进行故障检测过程

Fig. 1 Process of fault detection based on rough set classifier

对于歼击机系统, 作者构造如下信息系统 $S = (U, A \cup d)$, $x_i \in U$ 表示不同的歼击机结构故障状态, 这里取 $i = 1, \dots, 16$; $A = \{a_1, \dots, a_7\}$ 表示条件属性, 表示歼击机的状态, 分别为: 攻角、侧滑角、俯仰角速度、滚转角速度、偏航角速度及过载.

d 为决策属性, 有 6 种可能的决策值 (无故障、右平尾损伤故障、左平尾损伤故障、右副翼损伤故障、左副翼损伤故障、方向舵损伤故障), 以上信息系统形成如表 1 所示决策表.

表 1 决策表

Table 1 Decision chart

状态	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	d
1	28.91	24.05	0.03	-2.71	0.07	3.60	0.00	1
2	27.32	21.83	0.15	-16.12	0.25	3.40	0.00	1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
16	29.25	24.48	0.00	0.03	0.03	3.64	0.00	0

注: 仅列出部分数据, 表中数据来源于地面物理仿真. 对于 d : (0—无故障; 1—右平尾损伤故障; 2—左平尾损伤故障; 3—右副翼损伤故障; 4—左副翼损伤故障; 5—方向舵损伤故障)

3.1 数据预处理 (Pre-processing of data)

对于粗集算法而言, 所要处理的属性值必须是离散化的数据, 然而, 歼击机传感器输出数据都是连续数

据,因此在应用粗集时必须对数据进行离散化处理。

离散化本质上可归结为利用选取的断点来对条件属性构成的空间进行划分的问题。把 n (n 为条件属性个数) 维空间划分成有限个区域,使得每个区域中的对象的决策值相同。本文采用 S. H. Nguyen 所提出的布尔逻辑和粗集理论相结合的离散化算法^[3],该算法不改变原信息系统的不可分辨关系。在求取实际的断点集时,采取贪心算法。贪心算法如下:

首先构造一个新的信息表 $S' = (U', A')$, 其中

$$U' = \{(x_i, x_j) \in U \times U : d(x_i) \neq d(x_j)\},$$

d 为决策属性;

$$A' =$$

$$\{P_r^a : a \in A, r \text{ 是属性 } a \text{ 的第 } r \text{ 个断点 } [c_r^a, c_{r+1}^a]\};$$

表2 离散化后的决策表

Table 2 Decision chart after discretization

状态	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	d
1	[12.66,29.08)	[21.83,24.27)	[0.02,0.84)	[-60.34,-1.34)	[0.05,0.29)	[1.58,3.62)	[-0.03,0.02)	1
2	[12.66,29.08)	[21.83,24.27)	[0.02,0.84)	[-60.34,-1.34)	[0.05,0.29)	[1.58,3.62)	[-0.03,0.02)	1
n	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
16	[28.08,*)	[24.27,*)	[-0.01,0.02)	[-1.34,1.40)	[0.01,0.05)	[3.62,*)	[-0.03,0.02)	0

3.2 计算 A 的 d 相对约简集 (Calculation of reducts)

p 称为一个布尔函数 f 的蕴含 (implicant) 是指存在偏序关系 $p \leq f$; 如果存在以下关系 $p \leq q \leq f \Rightarrow p = q$, 则称 p 为 f 的素蕴含 (prime implicants)。

求取约简集的过程可以归结为寻找分辨函数的素蕴含的过程。本文采用遗传算法^[4]求取约简集。

考虑信息系统 $S = (U, C \cup d)$, 对于如下集合:

$$S_{f_s} = \{M_S(x, y) \mid M_S(x, y) \text{ 用来形成 } f_s\},$$

其中, $M_S(x, y)$ 是分辨矩阵, f_s 是分辨函数。对于 $A_h \in A$ 且 A_h 与 S_{f_s} 中每个集相交均非空, 则称 A_h 为 S_{f_s} 的命中集 (hitting set)。如果去掉 A_h 中的任一元素后 A_h 不再是 S_{f_s} 的命中集, 则称 A_h 为 S_{f_s} 的最小命中集。 S_{f_s} 的一个命中集是 f_s 的一个蕴含, S_{f_s} 的一个最小命中集是 f_s 的一个素蕴含, 也就是决策表的一个约简。对于表 2, 应用上述算法得到如下 A 的 d 相对约简集:

$$\{\{a_5, a_6\}, \{a_3, a_6\}, \{a_1, a_4\}, \{a_1, a_5\}, \{a_2, a_3\}, \{a_2, a_4\}, \{a_2, a_5\}, \{a_1, a_3\}, \{a_4, a_6\}\}.$$

3.3 规则提取 (Rule extraction)

对于决策系统

$$S = (U, A \cup d),$$

对于任意 $P_r^a \in A'$, 如果

$$[c_r^a, c_{r+1}^a) \subseteq$$

$$[\min(a(x_i), a(x_j)), \max(a(x_i), a(x_j))),$$

则 $P_r^a(x_i, x_j) = 1$; 否则 $P_r^a(x_i, x_j) = 0$ 。算法步骤如下:

1) 根据原来的信息系统 S 构造一个新的信息系统 S' ; 初始化断点集 $\text{cut} = \emptyset$;

2) 选取所有列中 $P_r^a = 1$ 的个数最多的断点加入 cut 中, 去掉此断点所在的列和在此断点上 P_r^a 值为 1 的行;

3) 如果信息系统 S' 中的元素不为空, 则转 2), 否则停止。此时 cut 即是所求的断点集。依据上述离散化方法, 对表 1 进行离散化处理, 得到表 2。

$$V = \bigcup \{V_a \mid a \in A\} \cup V_d,$$

$$a \in B, v = V_a, B \subseteq A \cup d.$$

B 和 V 上的描述符 (descriptor) 是形为 $a = v$ 的原子式。包含 B 和 V 上所有原子式的最小集记为 $C(B, V)$ 。一条决策规则是指任何形如 $\varphi \Rightarrow d = v$ 的表达式, 其中 $\varphi \in C(B, V)$, $v \in V_d$, φ 称为决策规则的前因, $d = v$ 称为决策规则的后果。

把相对约简集分别应用于原始决策表中的每个对象, 即可以产生相应的规则, 新产生的与以前重复的规则被忽略。对于上面所产生的相对约简集及表 2, 可以提取如下的规则 (仅列一部分):

$$a_5([0.05, 0.29)) \text{ and } a_6([1.58, 3.62)) \Rightarrow d(1),$$

$$a_5([0.58, 0.64)) \text{ and } a_6([1.58, 3.62)) \Rightarrow d(1),$$

$$a_3([-2.04, -0.01)) \text{ and } a_6([1.58, 3.62)) \Rightarrow d(2),$$

$$a_3([0.84, *)) \text{ and } a_6([0.01, 1.58)) \Rightarrow d(3),$$

$$a_1([12.66, 29.08)) \text{ and } a_4([1.40, 46.20)) \Rightarrow d(2),$$

$$a_1([0.03, 12.66)) \text{ and } a_4([*, -60.34)) \Rightarrow d(3),$$

$$a_1([12.66, 29.08)) \text{ and } a_5([0.58, 0.64)) \Rightarrow d(1),$$

$$a_1([12.66, 29.08)) \text{ and } a_5([*, 0.01)) \Rightarrow d(2).$$

3.4 故障检测结果 (Results of fault detection)

以上产生的规则可以称为是一个“分类器”。分别对歼击机设置右平尾损伤故障、左平尾损伤故障、

右副翼损伤故障、左副翼损伤故障和方向舵损伤故障,采集相应的数据如表 3 所示.

应用“分类器”对表 3 各对象进行分类,结果如表 3 最后一列所示.由上述结果可见,从决策表中提取的规则形成的“分类器”是有效的.

为了验证上述“分类器”的鲁棒性,本文分别设置方向舵和右副翼的损伤故障,并分别加入方差为 0.03 和 0.08 的噪声,相应的采集数据如表 4.分类结果如表 4 最后一列所示.可见,在加入了噪声之后,“分类器”仍能正确进行分类.

表 3 故障数据及检测结果
Table 3 Fault data and detection results

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	d
右平尾损伤故障	28.17	23.05	0.08	-8.87	0.15	3.51	0.00	1
左平尾损伤故障	27.32	21.83	-0.15	16.17	-0.19	3.40	0.00	2
右副翼损伤故障	0.31	0.36	1.41	-90.5	0.47	0.04	0.02	3
左副翼损伤故障	-0.31	-0.30	1.41	-90.5	0.47	-0.04	0.02	4
方向舵损伤故障	0.00	0.03	-9.83	68.49	11.04	0.00	-0.11	5

最后一列为检测结果.对于决策属性 d : (0—无故障;1—右平尾损伤故障;2—左平尾损伤故障;3—右副翼损伤故障;4—左副翼损伤故障;5—方向舵损伤故障)

表 4 故障数据及检测结果
Table 4 Fault data and detection results

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	d
右副翼损伤故障(方差 0.03)	0.43	0.48	1.55	-90.33	0.65	0.08	0.04	3
右副翼损伤故障(方差 0.08)	0.41	0.46	1.58	-89.18	0.69	0.10	0.04	3
方向舵损伤故障(方差 0.03)	0.00	0.06	-9.73	67.12	10.84	0.00	-0.18	5
方向舵损伤故障(方差 0.08)	0.00	0.05	-9.86	68.55	10.01	0.00	-0.13	5

注:最后一列为检测结果.

4 结论(Conclusions)

本文用条件-决策表来表达一个歼击机损伤故障信息系统的知识,在此基础上利用粗集理论进行故障信息分析、推理,得到可能的简化决策规则,然后应用规则进行歼击机损伤故障检测.该方法直接处理歼击机的可测输出,不需要歼击机的数学模型,也不需要先验知识,并且对噪声有抑制作用,具有较高的实用价值.

参考文献(References):

[1] GERTLER J, MONAJEMY R. Generating directional residuals with dynamic parity relations [J]. *Automatica*, 1995, 31(4): 627-635.
[2] PAWLAK Z. Rough set [J]. *Int J of Information and Computer Sci-*

ence, 1982, 11(5): 341-356.
[3] NGUYEN H S, SKOWRON A. Quantization of real values attributes, rough set and boolean reasoning approaches [A]. *Proc of the Second Joint Annual Conf on Information Science* [C]. Wrightsville Beach: [s. n.], 1995: 34-37.
[4] WROBLEWSKI, JAKUB. Finding minimal reducts using genetic algorithm(extended version) [R]. [s. l.]: Warsaw University of Technology, Institute of Computer Science, 1995.

作者简介:

胡寿松 (1937—),男,教授,博士生导师,研究方向:智能故障检测与自修复控制;
徐德友 (1974—),男,博士.研究方向:故障诊断,智能控制,自修复控制;
刘亚 (1975—),女,博士研究生.研究方向:智能故障检测与自修复控制.