

文章编号: 1001-0920(2006)02-0233-03

基于粗集理论的一种混合智能故障诊断新方法

朱张青, 周 川, 胡维礼

(南京理工大学 自动化系, 南京 210094)

摘 要: 采用基于需求的约简方法, 将依赖于系统数学模型和依赖于故障特征信息的两类故障诊断方法相融合, 提出一种混合智能故障诊断新方法. 以非线性系统故障诊断为例, 给出了混合智能故障诊断方法提取系统故障诊断规则的步骤. 该方法不仅可以扩大故障诊断的范围, 而且能紧密联系工程实际. 最后以异步电动机常见故障的诊断为例, 说明了该方法的可行性和有效性.

关键词: 故障诊断; 粗糙集; 混合智能; 非线性系统

中图分类号: TP271 **文献标识码:** A

New Approach of Integrated Intelligent Fault Diagnosis Based on Rough Set Theory

ZHU Zhang-qing, ZHOU Chuan, HU Wei-li

(Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: ZHU Zhang-qing, E-mail: zq_hf@163.com)

Abstract: The shortcoming of the traditional intelligent fault diagnosis based on rough set theory is analyzed. The reduction algorithm meeting users' requirements is adopted, and a new approach of integrated intelligent fault diagnosis combining the method relied on the system's model and the strategy depending on fault information is presented. For fault detection on nonlinear systems, the steps of getting the diagnosis rules are given. The approach can expand the fault diagnosis bounds, and is easy to implement in engineering practice. Finally, an example of AC motor fault diagnosis is studied to show the validity of the approach.

Key words: Fault diagnosis; Rough set; Integrated intelligence; Nonlinear systems

1 引 言

动态系统故障诊断方法可分为两大类^[1]: 1) 依赖于系统数学模型方法, 通过对系统状态的观测或参数的估计, 从检测残差中提取故障特征以实现故障诊断; 2) 不依赖于系统数学模型方法, 根据可测信号的特征参数与故障模式之间的因果关系进行故障诊断. 在故障检测与诊断研究领域, 这两类方法一直被割裂开来研究, 前一种方法忽视了故障的外在表现, 在实用中遇到很大困难; 后一种方法由于特征参数难以全面反映系统内部变化, 使得诊断结果的可靠性不高, 且不具一般性.

本文利用粗集理论中基于需求的约简方法, 将

上述两类方法相结合, 提出一种混合智能故障诊断新方法. 该方法不仅扩大了故障诊断的范围, 使现有两类方法有机结合诊断系统故障成为可能, 而且得到的诊断规则比基于粗集理论的故障诊断方法更实际、更有效. 最后以交流异步电动机为例, 具体论述了所提出方法的有效性.

2 混合智能故障诊断方法

基于粗集理论的智能故障诊断方法, 是将系统运行时可测特征量作为属性 A , 可列故障作为论域 U , 根据系统的信息知识和经验列出决策表, 采用基于属性的约简方法得到约简集, 再由最小约简直接

收稿日期: 2004-12-17; 修回日期: 2005-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(60174019); 清华大学智能技术与系统国家重点实验室基金项目.

作者简介: 朱张青(1968—), 男, 安徽无为, 副教授, 博士生, 从事智能故障诊断、容错控制的研究; 胡维礼(1941—), 男, 江苏南通人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、自适应控制等研究.

给出系统故障诊断推理规则, 实现故障诊断^[2,3]. 现有方法主要存在以下不足:

- 1) 没有结合系统数学模型, 可诊断范围和故障模式数是有限的;
- 2) 采用基于属性的约简方法所求得的最小约简, 在理论上可能是最优的, 但没有考虑工程实际(用户需求), 也难以保证诊断结果的及时性和准确性

针对现有方法的不足, 下面利用基于需求的约简算法, 提出一种结合两类故障诊断方法的混合智能故障诊断方法

定义1 一个信息系统可表示为

$$S = (U, A, C, D).$$

其中: $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 是对象的非空有限集合, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 是属性非空有限集合, C 表示条件属性集, D 表示决策属性集

定义2 对于上述信息系统, 定义任何最小集

$$R \subseteq C, ND(C) = ND(R) \quad (1)$$

为系统的一个约简, 记 $RED(C)$ 表示所有约简集; 所有约简集的交称为信息系统的核

如果记 S 的差别矩阵为 M , 则由差别矩阵理论定义约简为: 若 $R \subseteq C$ 满足以下两个条件: 1) 对于每个差别项 $\alpha \in M, R \cap \alpha \neq \emptyset$; 2) 对于每个 $r \in R$, 存在差别项 $\beta \in M$, 使 $R \cap \beta = r$. 则 R 是 S 的独立约简(简称约简).

定义3 设一个属性 $a \in C$, 如果对任一个 $R \in RED(C)$, 都有 $a \in R$, 则称 a 是 S 中的冗余属性; 如果 $R \subseteq C$ 是 S 中的一个约简, 则称 $C - R$ 为自由属性集合, 其中任一个属性称为 R 的自由属性

定理1 设 $R \subseteq C$ 是差别矩阵 M 中的一个约简, $B = C - R$ 是 R 的自由属性集合. 如果从 M 中删除 B, M 变为 M' , 则 M' 只包含一个约简 R , 且每个 $r \in R$ 都是 M' 的核

证明 设 $R \subseteq C \neq \emptyset$ 是差别矩阵 M 中的一个约简, 由定义2, 对于每个 $r \in R$, 有差别项 $\beta \in M$, 使 $R \cap \beta = r$ 非空

如果 $B = C - R$ 是 R 的自由属性集合, 则由定义3, 必有 $B \cap R = \emptyset, M'$ 包含上述所有 β . 则有

$r = R$ 成立, 显然 M' 只包含一个约简 R , 每个 $r \in R$ 都是 M' 的核

如果将属性按实际需求排序, 得到的结果记为属性序 $Od(C)$, $FirstOd(C)$ 记为第1个属性, 同时记 $[c]$ 为 M 中包含属性 c 的差别项, cB 是 $[c]$ 中的一个差别项, 其中 B 是这个差别项中除 c 外的所有属性, 则有如下推论和算法:

推论1 r 是 C 中的一个属性 ($r \in C$), β 是包含 r 的一个差别项 ($\beta \in [r]$), 记 $\beta = rB$. 如果 M 中的一个约简 R 包含 r , 且 B 中包含自由属性 ($R \subseteq C - B$), 则在差别矩阵 M 中删除 B , 得到新的差别矩阵 M', M' 的任何一个约简都是 M 的约简, 且包含属性 r .

算法1 记 M 为信息系统差别矩阵, $Od(C)$ 是设置的属性序, $R = \emptyset$.

- 1) 如果 $M = \emptyset$, 则停止;
- 2) 记 M 中所有属性为 $Y, Od(Y)$ 是将 Y 中所有属性按照 $Od(C)$ 排序, 用吸收律处理 M ;
- 3) 如果 M 中有核属性 r , 则 $R = R \cup \{r\}, M = M - [r]$;
- 4) $c = FirstOd(Y)$, 从 $[c]$ 中选择一个 α , 记为 $\alpha = cB$;
- 5) $R = R \cup \{c\}, M = M - [c]$;
- 6) 对于所有 $\beta \in M, \beta = \beta B$;
- 7) 返回1).

算法操作符“ \ominus ”定义为从差别项中剔除一些属性, $\alpha \ominus B = \alpha - (\alpha \cap B)$.

定理2 上述算法对于独立约简是完备的

证明 设 $\alpha \in M, \alpha = cB$, 差别矩阵 $M - [c]$ 剔除 B 变为 $M' = \emptyset \dots \emptyset$, 则有

$$\alpha \ominus M' = (\alpha \ominus \emptyset) \dots (\alpha \ominus \emptyset) \\ (B \ominus \emptyset) \dots (B \ominus \emptyset). \quad (2)$$

由 M' 的特点可知, 对于所有 $b \in B, b \notin \emptyset, \alpha \ominus M'$ 是 M' 的主蕴涵. 故对于任何 $\beta \in M$, 必有 $\beta = \beta B \cap \emptyset, M \cap \emptyset$ 成立, \emptyset 必存在. 则算法最终输出 $R = \alpha \ominus \emptyset$ 是 $\alpha \in M'$ 的主蕴涵, 由它的性质可知 R 是独立约简的^[4].

结合上述分析, 下面以非线性系统故障诊断为例, 给出混合智能故障诊断方法的具体实现步骤

设非线性系统方程

$$\dot{x}(t) = f(x, u, t), \quad (3)$$

其中 $x \in R^n$ 和 $u \in R^m$ 分别为系统状态向量和输入向量

假设系统的故障模式是可列的, 即

$$\Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_r), \quad (4)$$

其中 $\Omega_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 表示第 i 个独立的故障模式

系统状态的改变直接反映了系统内部的变化, 故基于系统数学模型的故障诊断方法多通过对系统状态的观测得到对应故障信息^[5]. 对于系统(2), 设由系统状态观测器得到状态估计

$$\hat{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (5)$$

通过状态变化与故障模式之间的关系, 对应可识别的故障向量为

$$\Omega_x = (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_r), r_x < r \quad (6)$$

设系统实际运行时可测故障特征信息向量

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_N] \quad (7)$$

通过经验知识获得特征信息与故障模式之间的关系^[6], 对应可识别的故障向量为

$$\Omega_x = (\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_r), r_x < r \quad (8)$$

得到上述参数后, 非线性系统混合智能故障诊断方法的步骤如下:

1) 建立系统状态和特征信息与故障模式之间关系的决策表;

2) 将所有属性按实际综合性能要求进行排序: 一般将核及与故障模式关系密切、可快速准确方便测试的属性排在属性序的前面, 而将时延较长或准确测试困难的属性排在属性序的后面;

3) 按照基于需求的约简算法求得所需要的约简, 约简结果应尽可能多地包含排在前面的属性, 删除排在后面的属性;

4) 由约简结果直接得到诊断推理规则, 即 If-then 规则;

5) 若诊断过程中出现一个不在 Ω 中的新故障模式, 即 $\Omega = \Omega_k + \Omega_x - \Omega_k$, Ω_k 不成立, 则将这一故障模式加入决策表, 组成新的决策表, 再按已确定的属性排序, 由式 (3) 求得新的约简, 并修改或补充原有的诊断推理规则

与基于属性约简的故障诊断方法相比, 基于需求的约简算法是从特征信息的综合性能出发 (如信息对故障诊断的贡献程度, 信息检测的难易程度, 信息本身的及时性等), 所得到的诊断规则更结合生产实际, 更符合系统故障诊断性能指标的要求

3 实例研究

现以鼠笼式交流异步电动机的常见故障为例, 说明所提出的混合智能故障诊断新方法的有效性。鼠笼式交流异步电动机的常见故障包括电气故障和机械故障, 其中电气故障有 4 种模式: 1) Ω_1 (通): 槽绝缘老化或受损, 外壳带电; 2) Ω_2 和 Ω_3 (断): 分别为定子绕组断路和转子鼠笼断条; 3) Ω_4 (短): 定子绕组短路。常见的机械故障主要是轴承磨损 (Ω_5)。

令决策系统论域 (常见故障集)

$$U = \Omega = (\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4, \Omega_5), \quad (9)$$

属性集 (参数集) 为

$$A = (x_1, x_2, X_1, X_2, X_3, X_4). \quad (10)$$

其中: x_1 为定子电流 (为简化只取一相), x_2 为转子磁通, 可由状态观测器获得估计值^[7]; X_1 为机体振动幅度, X_2 为转子转速, X_3 为机体温度, X_4 为对地电压, 它们都是可测的外部信息

用本文的混合智能故障诊断方法实现鼠笼异步电动机的常见故障诊断, 具体步骤如下:

1) 由异步电动机知识可得到决策表 1。不失一般性, 表中属性值取布尔值, 其中 1 表示此参数值超过允许界限, 0 表示参数值基本不变

表 1 鼠笼异步电动机常见故障模式决策表

x		X				Ω
x ₁	x ₂	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	
0	0	0	0	0	0	正常
0	0	0	0	0	1	Ω ₁
1	0	1	1	1	0	Ω ₂
0	1	0	1	0	0	Ω ₃
1	1	1	1	1	0	Ω ₄
0	1	1	0	0	0	Ω ₅

由表 1 可知, 采用状态估计方法无法识别故障 Ω_1 , 难以区分故障 Ω_3 和 Ω_5 ; 采用故障特征信息方法难以区分故障 Ω_2 和 Ω_4 。两种方法结合后, 可以识别所有的故障模式

2) 属性分析及排序: X_4 是核; 转子转速 X_2 与各故障模式关系密切, 且可方便快速准确检测; X_1 的准确检测较难实现; 相对于故障的发生, X_3 的显著变化有很长的时延。通过上述分析列出属性排序

$$X_4 > x_1 > X_2 > x_2 > X_1 > X_3$$

3) 采用基于需求的约简算法进行运算, 得到约简结果为 (X_4, x_1, X_2, x_2) 。

4) 根据约简结果所对应的决策表, 得到故障诊断推理规则

4 结 语

随着实际系统复杂性的增加和可靠性要求的提高, 单一的故障诊断方法越来越难以满足实际需求。故障诊断智能化和多故障方法相结合, 已成为故障诊断技术发展的必然趋势。本文针对现有的粗集理论故障诊断方法的不足, 以及传统故障诊断领域中两类方法一直被割裂开来研究的缺点, 提出一种混合智能故障诊断新方法, 并给出其应用于非线性系统故障诊断的具体步骤和实例。新方法不仅完善了已有成果, 而且两类故障诊断方法相融合, 克服了彼此固有的缺陷, 将大大提高系统故障诊断的有效性和准确性

参考文献 (References)

[1] 胡昌华, 许化龙. 控制系统的故障诊断与容错控制的分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 5-7.
(Hu C H, Xu H L. Design and Analysis of Fault-tolerant Control and Fault Diagnosis for Control System [M]. Beijing: Published by National Defence Industry, 2001: 5-7.)

(下转第 240 页)

参考文献(References)

- [1] Mehmed K. *Data Mining Concepts, Models, Methods and Algorithms* [M]. New York: IEEE Press, 2002
- [2] Trevor H, Robert T, Jerome F. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction* [M]. New York: Springer-Verlag Press, 2001
- [3] 邓聚龙. *灰预测与灰决策* [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002
(Deng J L. *Grey Prediction and Grey Decision* [M]. Wuhan: The Press of Huazhong University of Science and Technology, 2002)
- [4] Yeh M F, Chen Y J, Chang K C. ECG Signal Pattern Recognition Using Grey Relational Analysis [A]. *Proc of the 2004 IEEE Int Conf on Networking, Sensing and Control* [C]. New York: IEEE Press, 2004: 725-730
- [5] Lin Z C, Lin W S. The Application of Grey Theory to the Prediction of Measurement Points for Circularity Geometric Tolerance [J]. *J of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17(5): 348-360
- [6] 潘红华, 胡家升, 张圣云, 等. 基于灰色系统模型的预测函数控制方法研究 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(1): 117-119
(Pan H H, Hu J S, Zhang S Y, et al. Study of Predictive Functional Control Algorithm Based on Grey System Models [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(1): 117-119)
- [7] Norihito S, Osamu U, Chikara K. Introduction of Time Series Data Analysis Using Grey System Theory [A]. *Proc of the 2th Int Conf on Knowledge-based Intelligent Electronic Systems* [C]. New York: IEEE Press, 1998: 67-72
- [8] Wen K L, Chang T C, Chang W C, et al. The Study of Missing Point in GM (1, 1) Model [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics* [C]. New York: IEEE Press, 2000: 3384-3387

(上接第 232 页)

- [7] 庄开宇, 张克勤, 苏宏业, 等. 高阶非线性系统的 Terminal 滑模控制 [J]. *浙江大学学报*, 2002, 36(5): 482-486
(Zhuang K Y, Zhang K Q, Su H Y, et al. Terminal Sliding Mode Control for High-order Nonlinear Dynamic Systems [J]. *J of Zhejiang University*, 2002, 36(5): 482-486)
- [8] 高为炳. *变结构控制的理论及设计方法* [M]. 北京: 科学出版社, 1996
(Gao W B. *Variable Structure Control Theory and Design Methods* [M]. Beijing: Science Press, 1996)

(上接第 235 页)

- [2] Liu S L, Shi W G. Rough Set Intelligence Diagnostic System for Valves in Reciprocating Pumps [A]. *IEEE Proc of the American Control Conf* [C]. Arlington, 2001: 353-358
- [3] Bonaldi E L, Borges S, Lamber T, et al. Using Rough Sets Techniques as a Fault Diagnosis Classifier for Induction Motors [A]. *IEEE Proc of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Shanghai, 2002: 3383-3388
- [4] Zhao K, Wang J. A Reduction Algorithm Meeting Users' Requirements [J]. *J Computer Science and Technology*, 2002, 23(9): 578-593
- [5] Zhang X D, Marisv P, Thomasp P. Robust Fault Isolation for a Class of Non-linear Input-output Systems [J]. *Int J Control*, 2001, 74(13): 1295-1310
- [6] Karsten Spreitzer, Peter Balle A. Multimodel Approach for Detection and Isolation of Sensor and Process Faults for a Heat Exchanger [A]. *IEEE Proc of the American Control Conf* [C]. Chicago, 2000: 2720-2724
- [7] 夏超英. 转子坐标下笼型感应电动机转子的模型、辨识和自适应观测 [J]. *天津大学学报*, 1998, 31(3): 265-271.
(Xia C Y. The Model and Identification and Adaptive Observation for the Induction Motor in the Rotor Reference Frame [J]. *J of Tianjing University*, 1998, 31(3): 265-271)