

# 含故障模式的诊断系统设计

张学农<sup>1</sup> 陈蔼祥<sup>2</sup> 张立成<sup>1</sup>

(广东药学院 广州 510006)<sup>1</sup> (广东商学院 广州 510275)<sup>2</sup>

**摘要** 为基于模型的诊断系统设计建立了一个基本理论框架。以系统模型为基础,生成一组诊断测试,并以之代替系统模型而建立了一个基于测试的诊断系统。从完备和可靠性两方面证明了以测试为基础的诊断系统的诊断能力与基于一致性的诊断系统是相同的。

**关键词** 基于模型的诊断,诊断测试,故障模式

**中图分类号** TP31 **文献标识码** A

## Design of Multi-faults Diagnostic System

ZHANG Xue-nong<sup>1</sup> CHEN Ai-xiang<sup>2</sup> ZHANG Li-cheng<sup>1</sup>

(Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, China)<sup>1</sup> (Guangdong University of Business Studies, Guangzhou 510275, China)<sup>2</sup>

**Abstract** This paper presented framework of diagnostic models and diagnostic systems, and discussed two important properties, sound and complete that describe the power of a diagnostic system. For designing a diagnostic system, a set of models were selected to be tested such that a diagnostic system based on these tests is sound and complete, then tests were designed for all selected model to obtain a diagnostic system. Finally, the equivalence between diagnostic system using tests and the model-based diagnostic system was proved.

**Keywords** Model-based design, Diagnostic test, Fault model

### 1 研究背景

随着人工智能理论和技术的不断发展,智能故障诊断成为一个值得关注的研究领域。基于模型诊断<sup>[1]</sup>是以描述系统功能和结构的知识为基础的,根据系统模型以及系统的表现,通过基于模型的推理得到诊断结果。基于模型的诊断主要分为基于一致性的诊断和溯因诊断两类<sup>[5]</sup>,已经应用于很多领域。

经典模型<sup>[1]</sup>采用一阶逻辑表示系统, Luca Chittaro 等<sup>[2]</sup>建立了含故障模式的层次模型,经典模型中的正常和异常两种状态只是其中的特例。Baroni 等<sup>[3]</sup>提出了一种描述动态系统的模型。Console 等<sup>[4]</sup>采用进程代数刻画诊断问题,有效地提高了诊断效率。本文提出了一种基于值传递的系统模型,实现了诊断过程的抽象与重用<sup>[5]</sup>。另外,我们提出了一个诊断的形式概念框架,在抽象层次上统一了多种诊断概念<sup>[6]</sup>。王楠等刻画了基于模型诊断的抽象分层过程<sup>[7]</sup>。

诊断问题的计算复杂性是 NP 难的,这也是限制其实际应用的一个瓶颈。针对该问题,许多研究人员做了一系列有意义的工作<sup>[8-11]</sup>。姜云飞教授等研究了基于模型诊断的元件替换与替换测试<sup>[13]</sup>,我们也在在此基础上进行了研究<sup>[14]</sup>。

实际上,在线地判定一个候选诊断是否满足系统模型和当前的观测是困难的。面对这个问题,离线做一些有效的预处理是一个可选的方法。解决方案之一是根据诊断模型设计

一组测试<sup>[12]</sup>。用这组测试代替系统模型用于诊断。由于对测试的评判比基于模型的推理要容易得多,该方法可能用于在线诊断。

用一组测试是否可以完全代替系统模型呢?为此本文主要关注如何根据系统模型生成一个可靠且完备的基于测试的诊断系统。

### 2 基于模型的诊断和故障模式

为便于理解,我们先简单介绍 Reiter 提出的基于一致性的诊断理论。

#### 2.1 基于模型的诊断的形式定义

定义 1(基于一致性的(极小)诊断<sup>[1]</sup>) 给定诊断问题  $(SD, COMPS, OBS)$ , 基于一致性的(极小)诊断是一个(极小)集合  $D \subseteq COMPS$ , 满足  $SD \cup OBS \cup \{\neg ab(c) \mid c \in COMPS - D\}$ , 其中:

$SD$  称为系统描述, 是一个有限的一阶语句集合;

$COMPS$  表示系统元件, 是一个有限的常量集合;

$OBS$  表示观测, 是一个有限的一阶语句集合;

$ab$  是一元谓词, 如果元件  $c$  故障, 则  $ab(c)$  为真。

定义 2(冲突集<sup>[1]</sup>) 诊断问题  $(SD, COMPS, OBS)$  的冲突集是集合  $S_{con} \subseteq COMPS$ , 使得  $SD \cup OBS \cup \{\neg ab(c) \mid c \in S_{con}\}$  是不一致的。

定义 3((极小)溯因诊断<sup>[1]</sup>) 给定诊断问题  $(SD,$

到稿日期:2012-09-13 返修日期:2012-12-23 本文受国家自然科学基金项目(60173039),广东省自然科学基金项目(S2011010002511)资助。

张学农(1973-),男,博士,教授,CCF会员,主要研究方向为智能诊断和智能规划,E-mail:zxnxlq@163.com;陈蔼祥(1979-),男,博士,副教授,主要研究方向为智能规划和智能诊断;张立成(1975-),男,硕士,工程师,主要研究方向为智能诊断。

COMPS, OBS), (极小)溯因诊断是一个(极小)集合  $D \subseteq COMPS$ , 满足  $SD \cup \{\neg ab(c) \mid c \in COMPS - D\}$  是一致的且  $SD \cup \{\neg ab(c) \mid c \in COMPS - D\} \vdash OBS$ 。

## 2.2 故障模式

Reiter的定义是基于逻辑一致性的,元件只包含两种状态:正常或异常。Luca Chittaro扩充了Reiter的系统模型,提出了一种含故障模式的系统模型,SD被细分为BD和CD,其分别描述系统的行为和结构。

**定义4(元件的行为描述<sup>[2]</sup>)** 元件的行为描述(记为  $BD_c$ )是型如  $T_c(c, Z_c) \rightarrow [m(c) \rightarrow \sigma_c(Z_c)]$  的语句集合,其中:  
 $T_c(c, Z_c)$  是元件  $c$  的类型谓词,  $Z_c$  列出了该元件的输入输出端口;

$m$  是元件  $c$  的行为模式谓词;

$\sigma_c(Z_c)$  刻画元件在相应的行为模式下,该元件的输入输出端口对应的变量之间的关系。

**定义5(系统的行为描述<sup>[2]</sup>)** 系统的行为描述  $BD$  是  $COMPS$  中所有元件的行为描述的并。

**定义6(系统结构描述<sup>[2]</sup>)** 系统结构描述  $CD$  是型如  $T_c(S, Z_S) \equiv \exists z_1, z_2, \dots, z_n (\bigwedge_{c \in COMPS} T_c(c, Z_c))$  的语句。

**例1** 图1是一个简单的供水系统。泵把水压入水箱,水箱上有监测水位的传感器,水箱的水通过阀门流出。

该系统可能处于如下4种状态:(1)所有元件正常工作(Normal);(2)泵故障(PS);(3)水箱底部堵塞(TC);(4)阀门泄漏(VL)。

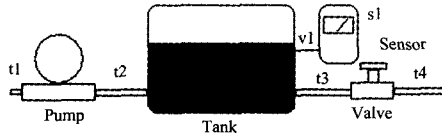


图1 供水系统

假设水管和传感器不会出故障,系统各元件的行为模式如表1所列。

表1 供水系统元件的行为模式

| 元件     | 行为模式         |
|--------|--------------|
| Pump   | {Normal, PS} |
| Tank   | {Normal, TC} |
| Sensor | {Normal}     |
| Valve  | {Normal, VL} |

综合各元件的行为模式,系统的行为模式如表2所列。

表2 供水系统的行为模式

| 元件 COMPS | 类型谓词 $T_c(c, Z_c)$         | 行为模式 $m(c) \rightarrow \sigma_c(Z_c)$  |
|----------|----------------------------|--|
| Pump     | $Pump(x, [t_1, t_2])$      | $Normal(x) \rightarrow t_1 = t_2$<br>$PS(x) \rightarrow t_1 = 0$                       |
| Tank     | $Tank(x, [v_1, t_2, t_3])$ | $Normal(x) \rightarrow v_1 = t_2^2$<br>$TC(x) \rightarrow v_1 = k \cdot t_2^3 (k < 1)$ |
| Sensor   | $Sensor(x, [v_1, s_1])$    | $Normal(x) \rightarrow s_1 = v_1$  |
| Valve    | $Valve(x, [t_3, t_4])$     | $Normal(x) \rightarrow t_4 = t_3$<br>$VL(x) \rightarrow t_4 = h \cdot t_3 (h < 1)$     |

供水系统的结构描述  $CD$  表示为如下公式:  $Watersys(ws, [t_1, s_1, t_4]) \equiv \exists t_2, v_1, t_3 [Pump(pm, [t_1, t_2]) \wedge Tank(ta, [v_1, t_2, t_3]) \wedge Sensor(se, [v_1, s_1]) \wedge Valve(va, [t_3, t_4])]$ 。

在上述基础上我们重新定义基于一致性的(极小)诊断和溯因诊断。

**定义7(冲突)** 所谓冲突,就是对一些元件行为模式的指派  $C$ ,使得不存在对这些元件的输入输出端口对应的变量的赋值  $I$  满足  $I \vdash SD \cup OBS \cup C$ 。

**定义8(基于一致性的诊断)** 基于一致性的诊断是对所有元件行为模式的指派  $C$ ,使得存在对这些元件的输入输出端口对应的变量的赋值  $I$  满足  $I \vdash SD \cup OBS \cup C$ 。

**定义9(极小诊断)** 称一个诊断  $C$  是极小的,当且仅当不存在诊断  $C'$  满足  $\{c' \in COMPS \mid C'(c') = normal\} \supset \{c \in COMPS \mid C(c) = normal\}$ 。

**定义10(溯因诊断)** 称一个诊断  $C$  是溯因诊断,如果  $SD \cup C \vdash OBS$ 。

## 3 诊断系统设计

### 3.1 诊断测试

人们进行软件测试时,通过不同的测试用例来发现和定位程序的BUG。借鉴该方法,诊断系统的设计可分为两部:针对待诊断系统,首先选择一组用户关注的系统行为模式,然后根据系统行为模式设计相应的测试,进而得到诊断系统。

每个测试都可以用关于系统外部变量  $Z_S$  的函数  $Test(Z_S)$  来构成。所谓系统外部变量就是系统的输入输出变量,如  $t_1, s_1, t_4$  就是供水系统的系统外部变量。 $Test(Z_S) = 0$  对应一种系统行为模式,如果根据观测发现  $Test(Z_S) \neq 0$ ,则系统不处于该种行为模式。在实际应用中,由于各种“噪音”的影响,测试往往以区间代替确定的数值。

**定义11(诊断测试)** 诊断测试  $T(S_i)$  是型如  $S_i \rightarrow Test_i(Z_S) \notin Reg_i$  的公式,其中:

$Test_i(Z_S)$  是测试函数;

$Reg_i$  是排除区间;

$S_i \subseteq BD$  是行为假设。

下面以供水系统为例说明诊断测试的直观含义、作用和生成方法。

**例2** 考虑供水系统所有元件正常的情况。系统行为模式  $S_j = \{Normal(pm), Normal(ta), Normal(se), Normal(va)\}$ 。下列等式成立:

$$Normal(pm) \rightarrow v_1 = t_2^2$$

$$Normal(va) \rightarrow t_4 = t_3$$

$$Normal(se) \rightarrow s_1 = v_1$$

消去变量  $v_1$  和  $t_3$ , 得到:

$$s_1 - t_4^2 = 0$$

从而得到一个测试函数:

$$Test_j(s_1, t_4) = s_1 - t_4^2$$

然后确定排除区间  $Reg_j$ , 显然其应满足  $0 \notin Reg_j$ , 可以做如下选择:

$$Reg_j = \{Test_j : |Test_j| > 1\}$$

于是得到诊断测试  $T(S_j): S_j \rightarrow Test_j(Z_S) \notin Reg_j$ 。

如果观测  $s_1, t_4$  发现  $Test_j(s_1, t_4) \in Reg_j = \{Test_j : |Test_j| > 1\}$ , 则行为假设  $S_j = \{Normal(pm), Normal(ta), Normal(se), Normal(va)\}$  是不合理的,表明系统存在故障。

有趣的是,如果一个测试  $S_i \rightarrow Test_i(Z_S) \notin Reg_i$  被排除,则行为假设  $S_i$  对应一个冲突,而冲突的计算是基于一致性诊断的关键步骤。

**命题1** 给定诊断系统  $P = (SD, COMPS, OBS)$ , 如果存

在诊断测试  $T(S_i)$  满足  $(S_i \rightarrow Test_i(Z_S) \notin Reg_i)$ ,  $S_i$  是一个冲突。

证明: 如果存在诊断测试  $T(S_i)$  满足  $(S_i \rightarrow Test_i(Z_S) \notin Reg_i)$ , 则  $Test_i(Z_S) \in Reg_i \rightarrow \neg S_i$ 。也就是说不存在  $I(Z_S)$  满足  $I \vdash SD \cup I(Z_S) \cup S_i$ , 根据定义 7,  $S_i$  是一个冲突。

### 3.2 诊断测试的性质

显然, 对给定的系统, 按照例 2 的方法可以生成许多的诊断测试。值得注意的是, 可能存在两个或更多的行为假设生成的诊断测试是相同的, 因此, 这些行为假设就构成了其相应测试的等价类。

**定义 12(行为假设等价类)** 如果行为假设  $S_1, \dots, S_i$  生成相同的测试函数  $Test(Z_S)$  和排除区间  $Reg$ , 则  $\{S_1, \dots, S_i\}$  称为该测试函数的行为假设等价类。

这意味着该诊断测试对这些行为假设是没有判别能力的, 除非结合其它测试或增加额外的观测。

**定义 13(判定测试)** 如果行为假设等价类只包含一个元素  $S$ , 则称诊断测试  $T(S)$  为行为假设  $S$  的判定测试。

上述定义表明, 我们可以通过判定测试来确定系统是否处于该测试所对应的行为状态。

**定义 14(不可判定的行为假设集)** 如果行为假设集合  $K = \{S_1, \dots, S_i\}$  与任意的行为假设等价类  $D$  的交满足  $K \cap D = \emptyset$  或使得  $K \cap D \neq \emptyset$  成立的等价类满足  $K \cap D = K$ , 则称  $K$  为不可判定的行为假设集。

这意味着所有诊断测试对这些行为假设是没有分辨能力的, 除非增加额外的观测而生成新的测试, 增强其判别能力。

### 3.3 诊断系统

正如研究背景所介绍的, 根据系统模型并通过自动推理来求诊断的时间复杂性很高, 给诊断系统的实际应用造成了困难。因此, 我们用一组诊断测试来代替系统模型, 建立诊断系统。

**定义 15(诊断系统)** 诊断系统  $D_T$  是一组诊断测试  $\{T(S_1), \dots, T(S_i)\}$ 。给定诊断问题  $P$ ,  $D_T(P) = BD \cap (BD/S_j) \cap \dots \cap (BD/S_k)$  是该诊断系统的解。

直观来说, 诊断过程就是经过一系列的测试后得到的与观测一致的系统行为模式。

值得注意的是测试的顺序, 通常把用户关注程度高的系统行为模式所对应的测试放在前面。

定义 12—定义 15 提示我们, 在设计诊断系统时应注意:

- (1) 对于用户关注程度高的系统行为模式, 应尽量生成对应的判定测试;
- (2) 尽量减少不可判定的行为假设集。

### 3.4 诊断系统的生成

诊断系统的生成主要是获得一组诊断测试。诊断系统生成包含如下过程:

- (1) 列举所有可能的故障行为模式;
- (2) 针对每一行为模式设计诊断测试;
- (3) 计算行为假设等价类;
- (4) 标记判定测试;
- (5) 计算不可判定的行为假设集。

步骤(2)既可手工实现, 也可自动完成, 如调用约束求解过程等, 步骤(4)(5)用来评价诊断系统的判别能力。

由于现实系统中多个元件同时发生故障的概率低, 我们

一般只考虑单故障的情况, 这样可以大大降低诊断系统生成的复杂程度。

### 3.5 诊断系统的完备性和可靠性

与基于模型的诊断方法不同, 我们取消以系统模型为依据进行推理的复杂过程, 而代之以一个测试的评判过程。当然这组测试是根据系统模型事先设计的, 这也是它可以用于在线诊断的原因。显然, 我们关注的问题是: 这两种方法在诊断能力上等价吗?

为便于表述, 现约定  $D_C(P)$  表示诊断问题  $P = (SD, COMPS, OBS)$  的基于一致性诊断的解集。  $D_T(P)$  表示诊断问题  $P = (SD, COMPS, OBS)$  的基于测试诊断的解集。我们期望  $D_C(P) = D_T(P)$ 。

**定义 16(完备性)** 诊断系统  $D_T$  是完备的, 当且仅当  $D_C(P) \subseteq D_T(P)$  对任意诊断问题  $P = (SD, COMPS, OBS)$  成立。

**定义 17(可靠性)** 诊断系统  $D_T$  是可靠的, 当且仅当  $D_C(P) \supseteq D_T(P)$  对任意诊断问题  $P = (SD, COMPS, OBS)$  成立。

由上述定义可知, 如果诊断系统  $D_T$  是完备和可靠的, 则该系统的诊断能力与基于一致性的诊断系统是相同的。能否生成一个完备和可靠的诊断系统呢? 以下定理给出了肯定的答案。

**定理 1** 对任意给定的诊断问题  $P = (SD, COMPS, OBS)$ , 存在一个完备和可靠的诊断系统。

证明: 根据定义 8 和命题 1, 存在一个诊断系统  $D_T$  满足  $D_C(P) \supseteq D_T(P)$ 。

如果有一个赋值  $I$  满足  $I \vdash SD \cup I(Z_S) \cup S_i$ , 则诊断假设  $S_i$  是合理的。因此, 对每个满足  $I \vdash SD \cup I(Z_S) \cup S_i$  的  $I(Z_S)$ , 可以生成一个诊断测试  $T(S_i) \equiv S_i \rightarrow Test_i(Z_S) \notin Reg_i$ 。根据定义 12 有,  $D_T(P) = BD \cap (BD/S_j) \cap \dots \cap (BD/S_k)$ 。由定义 8 可知,  $D_C(P) \subseteq D_T(P)$ 。

因此,  $D_T$  是一个完备和可靠的诊断系统。

定理 1 表明, 可以生成一个完备和可靠的诊断系统, 它和基于一致性的诊断系统是等价的。完全可以用它代替系统模型。

另一个重要的问题是: 真实诊断是否包含在  $D_T(P)$  中呢? 以  $m_{actual}$  表示真实诊断, 即系统的真实状态。定理 2 给出了答案。

**定理 2** 给定诊断问题  $P = (SD, COMPS, OBS)$ , 如果  $D_T$  是一个完备和可靠的诊断系统,  $m_{actual} \in D_T(P)$ 。

证明: 显然, 给定诊断问题  $P = (SD, COMPS, OBS)$ , 存在赋值  $I$  满足  $I \vdash SD \cup OBS \cup m_{actual}$ 。因此,  $m_{actual} \in D_C(P)$ 。

如果  $D_T$  是一个完备和可靠的诊断系统, then  $D_C(P) = D_T(P)$ 。所以,  $m_{actual} \in D_T(P)$ 。

至此, 我们为基于模型的诊断系统设计建立了一个基本理论框架。在其指导下设计的以测试为基础的诊断系统的诊断能力与基于一致性的诊断系统是相同的。如果系统模型正确, 则真实诊断一定包含在诊断解集中。这对诊断系统的有效性是有积极意义的。

**结束语** 本文以系统模型为基础, 生成一组诊断测试, 分析了诊断测试所具备的特点, 并以之代替系统模型而建立了一个基于测试的诊断系统。从完备和可靠性两方面证明了以测试为基础的诊断系统的诊断能力与基于一致性的诊断系统

(下转第 243 页)

- [7] Paul T K, Iba H. Extraction of informative genes from microarray data[A]//Proceedings of the 2005 Conference on Genetic and Evolutionary Computation, 2005 [C]. Washington, DC, USA:ACM,2005:453-460
- [8] Zhang C, Tian Y, Deng N. The new interpretation of support vector machines on statistical learning theory[J]. Science China Mathematics, 2010, 53(1): 151-164
- [9] Damaševičius R. Optimization of SVM parameters for recognition of regulatory DNA sequences[J]. Top. , 2010, 18(2): 339-353
- [10] Guo L, Wu Y, Zhao L, et al. Classification of mental task from EEG signals using immune feature weighted support vector machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 866-869
- [11] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York, Springer-Verlag, 1995
- [12] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]// Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1995[C]. Perth, Australia, 1995:1942-1948
- [13] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[A]// Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1997[C]. Orlando, USA, 1997:4104-4108
- [14] Xu Y, Liu G. A method of emotion recognition based on ECG signal[A]// Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing, 2009[C]. Wu Han, China: CINC, 2009: 202-205
- [15] Mohamad M S, Omatu S, Deris S, et al. Particle swarm optimization with a modified sigmoid function for gene selection from gene expression data[J]. Artificial Life and Robotics, 2010, 15(1): 21-24
- [16] 吴光华, 刘光远, 龙正吉. 免疫机制对皮肤电信号情感特征选择的影响[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(12): 4558-4564
- [17] 吴希贤. 基于优化算法的基因选择与癌症分类[D]. 长沙: 湖南大学, 2008
- [18] Alon U, Barkai N, Notterman D A, et al. Broad patterns of gene expression revealed by clustering of tumor and normal colon tissues probed by oligonucleotide arrays[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 1999, 96(12): 6745-6750
- [19] 张焕萍, 宋晓峰, 王惠南. 基于离散粒子群和支持向量机的特征基因选择算法[J]. 计算机应用与化学, 2007, 9(24): 1159-1162
- [20] 王思漫. 基于基因表达谱的肿瘤分类方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012
- [21] 李欣. 基于决策森林法的肿瘤基因表达谱数据分析[D]. 北京: 北京工业大学, 2011
- [22] Zhang Z, Li J, Hu H, et al. On the effectiveness of gene selection for microarray classification methods[J]. Intelligent Information and Database Systems Lecture Notes in Computer Science, 2010, 5991(1): 300-309
- [23] Mohammadi A, Saraee M, Salehi M. Identification of disease-causing genes using microarray data mining and gene ontology [J]. BMC Medical Genomics, 2011, 4(1): 12
- [24] Guyon I, Weston J, Barnhill S, et al. Gene selection for cancer classification using support vector machines[J]. Machine Learning, 2002, 46(3): 389-422
- [25] Gordon D. Epidemiologic evidence underscores role for folate as foiler of colon cancer[J]. Gastroenterology, 1999, 116(1): 3-4
- [26] Karakiulakis G, Papanikolaou C, Jankovic S M, et al. Increased type iv collagen-degrading activity in metastases originating from primary tumors of the human colon[J]. Invasion and Metastasis, 1997, 17(3): 158-168

(上接第 231 页)

是相同的。不同于在线计算的方法, 诊断测试的生成是离线完成的。因此, 基于诊断测试的方法可用于在线诊断。

但对于复杂的系统, 通过本文提出的方法生成完备和可靠的诊断系统是困难的。利用系统的结构特点来分解是可以尝试的方法。另外, 如何在不显著提高成本的情况下, 尽量多地生成对应的判定测试, 尽量减少不可判定的行为假设集, 也是值得研究的。

### 参 考 文 献

- [1] Reiter. A theory of diagnosis from first principles[J]. Artificial Intelligence, 1987, 32: 57-96
- [2] Chittaro L. Hierarchical model-based diagnosis based on structural abstraction[J]. Artificial Intelligence, 2004, 155: 147-182
- [3] Baroni P. Diagnosis of large active systems[J]. Artificial Intelligence, 1999, 110: 135-183
- [4] Console L, Picardi C, Ribaudo M. Process algebras for systems diagnosis[J]. Artificial Intelligence, 2002, 142: 19-51
- [5] 张学农, 姜云飞, 陈漓祥, 等. 值传递诊断过程的的抽象与重用[J]. 计算机学报, 2009, 32(7): 1264-1279
- [6] Zhang Xue-nong. Formal analysis of diagnostic notions[C]// Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Xi'an, China, 2012: 1303-1307
- [7] 王楠, 欧阳丹彤. 基于模型诊断的抽象分层过程[J]. 计算机学报, 2011, 34(2)
- [8] Pencole Y. A formal framework for the decentralised diagnosis of large scale discrete event systems and its application to telecommunication networks[J]. Artificial Intelligence, 2005, 164: 121-170
- [9] Portinale L, Magro D, Torasso P. Multi-modal diagnosis combining case-based and model-based reasoning; a formal and experimental analysis[J]. Artificial Intelligence, 2004, 158: 109-153
- [10] Console L. Temporal decision Trees: Model-based Diagnosis of Dynamic Systems On-board[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2003, 19: 469-512
- [11] Milde H. Integrating model-based diagnosis techniques into current work processes-three case studies from the INDIA project [J]. AI Communications, 2000, 13: 99-123
- [12] Gertler J, Singer D. A new structural framework for parity equation-based failure detection and isolation[J]. Automatica, 1990, 26(2): 381-388
- [13] 姜云飞, 李占山. 基于模型诊断的元件替换与替换测试[J]. 计算机学报, 2001, 24(6): 666-672
- [14] 张学农, 姜云飞, 陈漓祥. 一致性诊断的测试[J]. 2008, 29(8): 1525-1528