第 24卷 第 2期
2001年 2月

计 算 机 学 报
CHINESE J. COMPUTERS

Vol. 24 No. 2
Feb. 2001

含约束的基于模型的诊断系统

陈 荣 姜云飞
(中山大学软件研究所 广州 510275)

摘 要 在诊断空间中如何选取理想诊断是诊断系统面临的一个重要问题. 在实际的诊断过程中, 人们会利用限制条件排除不太可能的诊断, 或者利用强制条件选取较优的诊断. 按照这个思想, 作者提出含约束的基于模型的诊断系统, 通过增加依赖于应用领域的约束控制诊断空间, 这是一种能够融入计算过程的选择诊断的机制; 同时作者在系统拓扑结构的基础上给出了选取理想约束的理论依据.

关键词 基于模型的诊断, 溯因, 因果关系, 约束
中图法分类号: TP18

Model-Based Diagnosis System with Constraints

CHEN Rong JIANG Yun-Fei
(*Institute of Software Research, Zhongshan University, Guangzhou* 510275)

Abstract The task of fault diagnosis is to, from the observations and the knowledge, decide whether there is a fault or not and also identify the fault. Model-based diagnosis is to perform diagnosis by means of models. The diagnosis process is composed of three iterative stages: hypotheses generation, hypotheses testing and hypotheses discrimination. These stages show that how to select ideal diagnosis from diagnosis space is an important problem with which a diagnosis system must face. As we know, in the real process of diagnosis, one would use a restriction to exclude some less plausible ones, or he would use a coercion to find preferable ones from all possible diagnosis. Based on such an idea, we present a model-based diagnosis system augmented with domain-dependent constraints. These constraints, which can melt with the process of computing diagnosis, are selection criteria to control the process of diagnosis generation in the sense of filtering some plausible diagnosis or preferring some credible ones. The advantage of our approach is that ideal constraints can reduce half of the candidate diagnosis space. Also this paper addresses how to discover various valuable constraints. By a theorem presenting a sufficient condition when discriminating constraints exist, we demonstrate that our results build the theoretical foundation for selecting ideal constraints on the basis of system structure.

Keywords model-based diagnosis, abduction, causality, constraints

1 引 言

当对某设备的实际测量与它的正常行为有差异时, 就产生了诊断问题. 基于模型的诊断有两个重要的研究方法, 它们是基于一致性的诊断[1]和溯因诊断[2]. 溯因诊断对诊断空间的限制强, 但如果待诊断系统的模型不完备 (由于知识是不完备的, 很难完美

收稿日期: 1999-11-26 本课题得到国家自然科学基金 (69873047)及广东省自然科学基金 (980260)资助. 陈 荣, 男, 1969年生, 博士, 主要研究领域为扩展的逻辑程序设计和诊断. 姜云飞, 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为自动推理、智能规划和诊断.

地模型化一个实际诊断问题), 就可能丢失真正的解; 而基于一致性的诊断对诊断空间的要求太弱, 诊断空间会包含无用解. 现在人们认识到溯因诊断空间包含在基于一致性诊断空间里, 两种方法可以融合在一起[3]. 但即使是这样, 基于模型的诊断方法还是存在不足之处:

(1) 对于复杂一些的诊断问题, 诊断的效率不高. 基于模型的诊断常常被理解为不断迭代的假设产生、假设测试和假设辨别过程. 假设产生的基本任务是, 已知一个差异, 确定哪些部件发生故障才能导致所出现的差异; 假设测试的基本任务是, 对假设产生过程中得到的每一个假设进行测试, 看看哪个能够解释对设备所做的所有观测. 一般地, 会有几个假设通过测试. 此时假设辨别的任务就是, 应该搜集什么样的额外信息才能辨别它们, 以得出最后的诊断. 有时会因为做些额外的观测或者改变输入值, 要重新产生新的假设[3]. 这说明在诊断过程中先要生成所有的极小诊断, 然后再采取一些措施选择最理想的诊断. 诊断过程的每个阶段都需要用到与领域相关的知识, 得到的诊断空间也可能是庞大的, 因此影响了诊断效率. 定义选择理想诊断的度量标准是困难的, 人们虽然提出开发故障模型、使用溯因限制诊断空间、利用部件故障概率[4-7]以及解释相干性[8]等方法, 但这个问题尚未得到完全解决[3].

(2) 诊断空间里包含着一些不太可能甚至是没有意义的诊断. 例如考虑并联电路诊断问题: 电路是由电源 s 和 3个同型号的灯泡 a, b, c 并联组成, 电源接通时观察到只有 c 灯亮. 使用部件的正常行为描述模型化该电路, 得到两个极小诊断: 一个说 a 和 b 出了故障; 另一个说 c 和 s 出了故障[3]. 显然第二个诊断是不可接受的, 因为从直观上看, c 亮说明 c 和 s 都是正常的; 而该诊断指出二者出了故障, c 竟然在电源出故障的情况下亮了! ! 因此计算时不考虑这样的诊断是有益的.

在实际的诊断中, 征兆是在诊断过程当中逐步得到的, 诊断解也是逐步形成的; 在诊断过程中, 人们会利用限制条件排除掉不太可能的诊断, 或者利用强制条件选取较优的诊断. 例如考虑一个医学诊断问题: 医生发现患者有头痛和流鼻涕的症状. 根据医学知识, 普通感冒、流感、鼻窦炎、周期性偏头痛和肺炎都可能引起这样的症状; 还知道胸部充血 (chest congestion)会导致流鼻涕, 而在这些可能的病因中, 只有鼻窦炎和周期性偏头痛没有胸部充血的现象. 因此医生分析时会根据患者没有胸部充血这个事实, 怀疑患者得了鼻窦炎或者周期性偏头痛, 而把其它病因从他的诊断空间中排除掉, 这就是说胸部充血是一种限制条件, 它削减了医生所拥有的诊断空间; 进一步假设患者说头有搏动的 (throbbing)痛感, 据此医生会认为患者得周期性偏头痛的可能性更大, 医生会作出周期性偏头痛的诊断; 换句话讲搏动痛是医生选择周期性偏头痛的强制条件. 在这种启发之下, 我们提出一种含约束的基于模型的诊断系统, 思想是对诊断系统加上一定的用逻辑语言表示的依赖于应用领域的约束条件, 以达到削减诊断空间, 选择理想诊断的目的. 以图 1所示的全加器诊断问题为例, 它由异或门 x_1 和 x_2, 与门 a_1 和 a_2 以及或门 o 所组成. 图中给定了一组合法的电路输入值, 并把电路输出的正常值放在方括号里面; 此时对它的两个输出端做测量, 实际观测值中一个与正常值相等, 另一个不等. 使用基于模型的诊断方法, 得到十六个诊断, 其中有四个是极小诊断. 如果我们把 x_1 的输出值限制为 1, 即 $out(x_1)=1$, 增加这个约束后, 计算得到的极小诊断只剩下一个, 即出故障的是 x_2, 这也是最可能的诊断. 可见研究含约束的诊断系统是有意义的. 我们的系统具有这样的特点: (1)与"先生成全部诊断再按照一定的度量标准选择最理想诊断"的方法相比, 它提供了一种能够融入计算过程的选择诊断的机制, 这种选择标准具有语义特征. (2)在系统拓扑结构基础上给出了选取理想约束的理论依据. (3)含约束的诊断对诊断空间的限制更强, 它与溯因诊断并不相同.

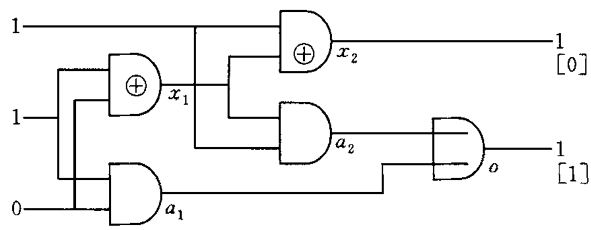

图 1 全加器

2 含约束的极小诊断

本文使用一阶逻辑 (含等词)作为模型化诊断系统的语言. 令 C 是一个子句, 若 C 中的文字都是正(负)的, 则把 C 称做正 (负)子句. 令 S 是一公式集合, 为书写方便, 约定 $\neg S = \bigvee_{\text{任意}F\in S} \neg F$, $S^+ = \{C \mid \text{正子句 } C\in S\}$. 若常量 a 在公式 F 中出现, 则把该公式写成 $F(a)$.

定义 1 系统是一个四元组 (SD, $COMPS$,

CXT, OBS), 其中:

(1) SD 为系统描述, 它是一阶谓词公式的集合.

(2) $COMPS$ 为组成系统的部件集合, 它是一个有限的常量集.

(3) CXT 是表示上下文数据的基原子集合.

(4) OBS 为一个观测集合, 它是命题公式的有限集.

SD 描述了待诊断系统的相关背景知识, 以电路诊断问题为例, 这些知识包括电路组成部件的行为模型(即对部件正常工作时的行为描述, 如输入与输出间的对应关系)、故障模型(即部件失常时所表现出来的行为特征)、部件间的拓扑连接关系(即系统结构)以及合法的输入组合等. OBS 是指对系统当前行为的实际测量, 典型的例子是医学应用中的临床发现和化验结果, 或是其它应用中的设备输出. 当它与系统的正常行为所预期的值不相符时, 就产生了诊断问题. 有时需要用诊断来解释与观测相关的数据. 上下文数据 CXT 与观测是有区别的, 它提供了关于待考察的特定情形的信息; 典型的例子是医学诊断中患者的年龄、性别, 或是其它应用中的设备输入, 它是不必用诊断来解释的. 这种数据非常重要, 因为根据它们可以对诊断系统的行为作出预报.

例 1 考虑图 1所示的全加器诊断问题. 可以用系统(SD, $COMPS$, CXT, OBS)描述这个诊断问题. 我们将使用等词公式描述部件的输入与输出值. 为了描述部件的状态, 需要使用一个一元谓词 AB, 意味着反常(abnormal). 当某部件 $c\in COMPS$ 出现故障时, $AB(c)$为真. 为了简化描述, 假设电线正常工作. $COMPS=\{x_1, x_2, a_1, a_2, o\}$, SD 包含部件的行为公理:

$AND(x)\wedge\neg AB(x)\wedge(in_1(x)=v_1)\wedge(in_2(x)=v_2)\supset(out(x)=(v_1\times v_2))$, 其中$\times$ 表示与运算;

$OR(x)\wedge\neg AB(x)\wedge(in_1(x)=v_1)\wedge(in_2(x)=v_2)\supset(out(x)=(v_1+v_2))$, 其中$+$ 表示或运算;

$XOR(x)\wedge\neg AB(x)\wedge(in_1(x)=v_1)\wedge(in_2(x)=v_2)\supset(out(x)=(v_1\oplus v_2))$, 其中$\oplus$ 表示异或运算;

SD 还包含电路结构和部件种类的信息:

$AND(a_1)$, $AND(a_2)$, $OR(o)$, $XOR(x_1)$, $XOR(x_2)$,

$out(x_1)=in_1(x_2)$, $out(x_1)=in_1(a_2)$, $out(a_1)=in_1(o)$, $out(a_2)=in_2(o)$;

CXT 包含与合法输入有关的信息:

$in_1(x_1)=1$, $in_2(x_1)=0$, $in_1(x_2)=1$, $in_1(a_1)=1$, $in_2(a_1)=0$;

而 $OBS=\{out(x_2)=1, out(o)=1\}$.

定义 2 对于任意 $c\in COMPS$, 把 $AB(c)$和$\neg AB(c)$称作 AB 文字.

定义 3 AB 子句是 AB 文字组成的析取式, 且它不含有互补文字和重复文字.

定义 4 设$FAULTY\subseteq COMPS$, $OK\subseteq COMPS$, 且 $FAULTY\cap OK=\varnothing$. 则把合取式 $D(FAULTY, OK)=\bigwedge_{x\in FAULTY}AB(x)\wedge\bigwedge_{x\in OK}\neg AB(x)$称作关于$COMPS$的一种赋值. 当$FAULTY\cup OK=COMPS$时, 称赋值是完全的.

按照定义, AB 子句是一种不含互补文字和重复文字的基子句. 显然若 $D(FAULTY, OK)$是一种赋值, 则$\neg D(FAULTY, OK)$就是一个 AB 子句; 反之亦然. 为了书写方便, 我们把完全赋值 $D(FAULTY, COMPS-FAULTY)$简记为$D(FAULTY, \cdot)$; 在以后的内容里我们还会用$\neg D(FAULTY, OK)$表示一个 AB 子句.

如果使用一阶逻辑的术语, 差异的含义是, 当假设所有部件正常工作时, 逻辑结果与观察集合 OBS 相矛盾, 即 $SD\cup CXT\cup OBS\cup\{D(\varnothing, COMPS)\}$是不可满足的; 而诊断的任务就是给出一种能够消除矛盾的关于 $COMPS$ 的赋值. 于是我们就有了诊断的形式化定义.

定义 5 设(SD, $COMPS$, CXT, OBS)是一个系统, 令 $FAULTY\subseteq COMPS$. 该系统的诊断是一个完全赋值$D(FAULTY, \cdot)$, 使得$SD\cup CXT\cup OBS\cup\{D(FAULTY, \cdot)\}$是可满足的. 令$D(FAULTY, \cdot)$是系统($SD$, $COMPS$, CXT, OBS)的一个诊断, 如果不存在$FAULTY'\subset FAULTY$满足$D(FAULTY', \cdot)$也是该系统的一个诊断, 则$D(FAULTY, \cdot)$是系统的极小诊断.

应注意我们给出的极小诊断与 Reiter定义的诊断[1]是完全一致的, 有的文献为了同溯因诊断区别开来, 也把它称为基于一致性的诊断. 我们之所以没做这样的明确划分, 是因为根据 Console的结果, 溯因诊断包含在基于一致性的诊断空间中[9].

定义 6 设(SD, $COMPS$, CXT, OBS)是一个系统. 若一个 AB 子句$\neg D(FAULTY, OK)$满足$SD\cup CXT\cup OBS\models\neg D(FAULTY, OK)$, 则把它称做 OBS 的一个冲突. 称 OBS 的一个冲突是它的最小冲突当且仅当该冲突的任意一个真子子句都不是 OBS 的冲突. OBS 的全体冲突构成它的冲突集.

称 OBS 的冲突集是最小的当且仅当该集合的任意一个真子集都不是 OBS 的冲突集. 把 OBS 的最小冲突集简记为 Γ, 用 Γ^+ 表示 OBS 的最小正冲突集.

由于待诊断系统的部件数目是有限的, 有代表性的诊断系统 (如 GDE, $SHERLOCK$, DDE 等)都是采用 $ATMS$ 构造 OBS 的最小冲突集的[3]; 根据冲突集就可以产生系统的全部极小诊断, 为此需要给出本原蕴涵者 (prime implicant)的定义.

定义 7. 设 Σ 是命题公式集合, Σ 的一个本原蕴涵者是一个合取式 C, 满足:

(1) $C\models\Sigma$,

(2) 若 C' 是一个满足 $C'\models\Sigma$ 和 $C\models C'$ 的合取式, 则 $C'\models C$.

下面的定理说明了极小诊断与 OBS 的最小正冲突集之间的关系.

定理 1[10]. $D(FAULTY,\cdot)$ 是系统 $(SD, COMPS, CXT, OBS)$ 的一个极小诊断当且仅当 $D(FAULTY,\varnothing)$ 是 OBS 的最小正冲突集 Γ^+ 的一个本原蕴涵者.

例 2 继续考虑例 1. 从 $SD\cup CXT\cup OBS$ 出发求出的最小冲突集 $\Gamma=\{AB(x_1)\vee AB(x_2),\ AB(x_2)\vee AB(a_1)\vee AB(a_2)\vee AB(o)\}$. Γ 的本原蕴涵者有 4个: $AB(x_2)$, $AB(x_1)\wedge AB(a_1)$, $AB(x_1)\wedge AB(a_2)$, $AB(x_1)\wedge AB(o)$. 根据定理 1, 系统 $(SD, COMPS, CXT, OBS)$ 的极小诊断是 $D(\{x_2\},\cdot)$, $D(\{x_1, a_1\},\cdot)$, $D(\{x_1, a_2\},\cdot)$ 和 $D(\{x_1, o\},\cdot)$; 不难验证对于这样一个简单的问题, 诊断空间里竟然有 16个诊断! 因此有必要对诊断空间做进一步的限制.

定义 8 含约束的系统是一个五元组 $(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$, 其中 $(SD, COMPS, CXT, OBS)$ 构成一个系统; DC 是一个一阶谓词公式的集合, 把它称做诊断约束集 (diagnosis constraints), 它使得 $DC\cup CXT$ 是可满足的.

定义 9. 设 $(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$ 是一个含约束的系统, 令 $FAULTY\subseteq COMPS$. 该系统的一个含约束的诊断是一种完全赋值 $D(FAULTY,\cdot)$, 满足:

(1) $D(FAULTY,\cdot)$ 是系统 $(SD, COMPS, CXT, OBS)$ 的一个诊断,

(2) $SD\cup CXT\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}\cup DC$ 是可满足的.

定义 10. 设 $(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$ 是一个含约束的系统. 称 $D(FAULTY,\cdot)$ 是该系统的一个含约束的极小诊断, 当且仅当对于任意 $FAULTY'\subset FAULTY$, $D(FAULTY',\cdot)$ 都不是该系统的含约束的诊断. 把系统 $(SD, COMPS, CXT, OBS)$ 的 (极小)诊断也称做含约束的系统 $(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$ 的 (极小)诊断.

显然, 含约束的诊断一定是一个诊断; 但反之不然. 在含约束的系统中, 诊断约束是一种有目的地选择理想诊断的方法.

定义 11 设 $(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$ 是一个含约束的系统. 若一 AB 子句 $\neg D(FAULTY, OK)$ 满足 $SD\cup CXT\cup DC\models\neg D(FAULTY, OK)$, 则把它称做 DC 的一个冲突. 称 DC 的一个冲突是它的最小冲突当且仅当该冲突的任意一个真子子句都不是 DC 的冲突. DC 的全体冲突构成它的冲突集. 称 DC 的冲突集是极小的当且仅当该集合的任意一个真子集都不是 DC 的冲突集. 把 DC 的最小冲突集简记为 K.

定理 2 设 $(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$ 是一个含约束的系统, 令 Γ 是 OBS 的最小冲突集, K 是 DC 的最小冲突集. $D(FAULTY,\cdot)$ 是一个含约束的诊断当且仅当 $\Gamma\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$ 是可满足的, $K\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$ 也是可满足的.

证明. (充分性) 令 $FAULTY\subseteq COMPS$, 设 $\Gamma\cup\{D(FAULTY,\circ)\}$ 是可满足的, $K\cup\{D(FAULTY,\circ)\}$ 也是可满足的. 不妨设 $SD\cup CXT\cup DC\cup\{D(FAULTY,\circ)\}$ 是不可满足的, 那么 $SD\cup CXT\cup DC\models\{\neg D(FAULTY,\circ)\}$, 由于 $\neg D(FAULTY,\circ)$ 是一个 AB 子句, 因此或者它属于 K 或者存在一个 AB 子句 $C\in K$ 满足 $C\models\neg D(FAULTY,\circ)$. 无论是哪种情况, 都与 $K\cup\{D(FAULTY,\circ)\}$ 可满足相矛盾. 类似可证 $SD\cup CXT\cup OBS\cup\{D(FAULTY,\circ)\}$ 也是可满足的. 因此 $D(FAULTY,\circ)$ 是一个含约束的诊断.

(必要性) 设 $D(FAULTY,\cdot)$ 是一个含约束的诊断, 则 $SD\cup CXT\cup OBS\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$ 是可满足的, $SD\cup CXT\cup DC\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$ 也是可满足的. 因为 $SD\cup CXT\cup OBS\models\Gamma$, $SD\cup CXT\cup DC\models K$, 所以 $\Gamma\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$ 和 $K\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$ 都是可满足的. 证毕.

更进一步我们有如下结论.

引理 1 设 $(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$ 是一个含约束的系统, 令 Γ 是 OBS 的最小冲突集, K 是 DC 的最小冲突集. $D(FAULTY,\cdot)$ 是一个含约束的极小诊断当且仅当 $FAULTY$ 是一个极小集合,

它使得 $C\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}$和 $K\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}$都是可满足的.

证明. (充分性)根据集合 $FAULTY$ 的极小性,对于任意部件 $a\in FAULTY$, $K\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}\cup\{\neg AB(a)\}$是不可满足的. 因此 $K\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}\models\{AB(a)\}$, 由 a 的任意性, $K\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}\models\{\bigwedge_{x\in FAULTY}AB(x)\}$, 即$\{D(FAULTY,\cdot)\}\cup K$是可满足的. 类似可证 $C\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$也是可满足的. 根据定理 2, $D(FAULTY,\cdot)$是一个含约束的极小诊断.

(必要性)结合定理 2和$D(FAULTY,\circ)$的极小性, 易得. 证毕.

根据冲突集与最小冲突集的逻辑等价性, 由定理 2和引理 1不难有这样的推论.

推论 1 设$(SD, COMPS, CXT, OBS)$是一个系统, 令 C 是OBS的最小冲突集. $D(FAULTY,\cdot)$是一个诊断当且仅当 $C\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$是可满足的. 更进一步, $D(FAULTY,\cdot)$是一个极小诊断当且仅当 $FAULTY$ 是一个使得 $C\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}$可满足的极小集合.

下面的定理描述了含约束的极小诊断的产生办法.

定理 3 $D(FAULTY,\cdot)$是含约束的系统$(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$的一个含约束的极小诊断当且仅当$D(FAULTY,\varnothing)$是冲突集$(C\cup K)^+$的一个本原蕴涵者.

证明. (必要性)假设$D(FAULTY,\circ)$是一个含约束的极小诊断. 根据定理 2, $C\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$和$K\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$都是可满足的. $C^+\subseteq C$, $C^+\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$也可满足. 由于$D(FAULTY,\cdot)$是完全赋值, C^+中的每个子句都包含$D(FAULTY,\cdot)$里的一个文字, 因此$D(FAULTY,\cdot)\models C^+$. 因为 C^+ 中没有负文字, $D(FAULTY,\varnothing)\models C^+$. 类似可证$D(FAULTY,\cdot)\models K^+$. 由$D(FAULTY,\cdot)$的极小性, $(C\cup K)^+=C^+\cup K^+$, $D(FAULTY,\cdot)$是$(C\cup K)^+$的本原蕴涵者.

(充分性) 令 $FAULTY\subseteq COMPS$, 假设 $D(FAULTY,\varnothing)$是冲突集$(C\cup K)^+$的一个本原蕴涵者. 因此$D(FAULTY,\varnothing)$的子合取式是 C^+的一个本原蕴涵者. 根据定理 1, $D(FAULTY,\cdot)$是系统$(SD, COMPS, CXT, OBS)$的一个诊断. 根据推论 1, $C\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$是可满足的. 假设 $K\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}$是不可满足的. 于是 $K\models\neg D(\varnothing, COMPS-FAULTY)$, 显然 $D(FAULTY,\cdot)\models\neg D(\varnothing, COMPS-FAULTY)$. 因此存在部件 $a\in FAULTY$, 使得$AB(a)$是 AB 子句$\neg D(\varnothing, COMPS-FAULTY)$中的一个文字, 但这是不可能的. 所以 $K\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}$是可满足的. 断言 $FAULTY$ 是一个使得 $C\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}$和 $K\cup\{D(\varnothing, COMPS-FAULTY)\}$都可满足的极小集合. 否则假设 $FAULTY'\subset FAULTY$ 才具有这样的性质. 根据引理 1, $D(FAULTY',\cdot)$是一个含约束的极小诊断. 结合必要性的证明过程, $D(FAULTY',\varnothing)$是$(C\cup K)^+$的一个本原蕴涵者. 因为 $FAULTY'\subset FAULTY$, $D(FAULTY',\varnothing)\models D(FAULTY',\varnothing)$, 这说明$D(FAULTY',\varnothing)$是$(C\cup K)^+$的一个本原蕴涵者, 矛盾. 根据引理 1, $D(FAULTY,\cdot)$是含约束的系统$(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$的一个含约束的极小诊断. 证毕.

定理 3表明, 作为选择理想诊断的方法, 诊断约束完全融入了诊断的计算过程. 当 $OBS\cup DC$ 相容时, 计算一次就可以得到 $C\cup K$, 因为根据经典逻辑的单调性, $C\cup K=\{\neg D(FAULTY, OK)\mid SD\cup CXT\cup OBS\cup DC\models\neg D(FAULTY, OK)\}$. 下面一个重要的问题是, 在含约束的系统中采取什么样的约束才会对诊断空间产生影响呢?

定义 12 设$(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$是一个含约束的系统, 令$DS$是它的诊断集合, 公式$F\in DC$. 设$D(FAULTY_1, OK_1)\in DS$, $D(FAULTY_2, OK_2)\in DS$. 若 $SD\cup CXT\cup OBS\cup OK_1\models F$, 而$SD\cup CXT\cup OBS\cup OK_2\models\neg F$, 则称 F 是一个判别约束.

定义 13 设$(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$是一个含约束的系统, 令$DS$是它的诊断集合, 公式$F\in DC$. 设$D(FAULTY_1, OK_1)\in DS$. 若$SD\cup CXT\cup OBS\cup OK_1\models\neg F$, 则称 F 是一个候选约束.

显然判别约束都是候选约束, 但反之不然. 由定义可知, 一个候选约束至少把一个诊断排除在诊断空间之外; 在含约束的系统中至少应该采用候选约束. 相比之下判别约束对诊断空间的影响能力更强, 理想的情况下, 一个判别约束能够削减掉诊断空间里的一半诊断. 下面我们通过实例看看候选/判别约束的作用.

例 3 继续考虑例 2我们说与其它诊断相比, 极小诊断$D(\{x_2\},\cdot)$的可能性更大, 因为既然或门

o的输出值与它的预期输出值相等，人们通常会认为与o的输出相关的部件是正常工作的. 为此进一步考虑含约束的系统$(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$，其中$DC=\{out(x_1)=1\}$. 从$SD\cup CXT\cup DC$出发得到最小冲突集$K=\{AB(x_2)\}$. $C\cup K$的本原蕴涵者只有一个$AB(x_2)$，根据定理3，该系统也就只有一个含约束的极小诊断$D(\{x_2\}, \cdot)$. 这说明通过向系统增加诊断约束我们得到了理想的诊断. 不难验证$out(x_1)=1$是一个判别约束，它大大削减了诊断空间，因为它把16个诊断削减为9个受控诊断；把4个极小诊断削减为1个受控的极小诊断！

现在假设$OBS=\{out(x_2)\neq 0, out(o)\neq 1\}$. 此时如果把候选约束$DC=\{out(x_1)\neq 1\}$作为强制条件，经过类似的计算过程可以得到含约束的极小诊断$D(\{x_1\}, \circ)$，直观上它也是最可能的诊断.

3 诊断约束

根据定义，候选约束肯定存在；判别约束却不一定存在，例如令DS是系统的诊断集合，设$D(FAULTY, \cdot)\in DS$，$D(FAULTY', \cdot)\in DS$，满足$FAULTY\subset FAULTY'$，对于这样的两个诊断，判别约束不存在. 判别约束是影响含约束的诊断系统效率的关键要素，那么如何确立判别约束呢？解决这样一个具有普遍性的问题很困难，因为实际诊断问题是千变万化的. 不过这方面的工作是有价值的，本节的主要结果就是给出判别约束存在的充分条件.

引理**2** 给定一个含约束的系统$(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$. 对于它的极小诊断集$MDS$中的任意两个诊断，判别约束一定存在.

证明. 设$D(FAULTY, OK)\in MDS$，由于$OK=COMPS-FAULTY$，根据极小诊断的定义，$SD\cup CXT\cup OBS\cup D(\varnothing, OK)$是极大可满足的. 令$D(FAULTY', OK')$是$MDS$里的不同于$D(FAULTY, OK)$的极小诊断，同理$SD\cup CXT\cup OBS\cup D(\varnothing, OK')$也是极大可满足的. 既然$OK\neq OK'$，$SD\cup CXT\cup OBS\cup D(\varnothing, OK\cup(OK'-OK))$是不可满足的，因此$SD\cup CXT\cup OBS\cup OK\models\neg D(\varnothing, OK'-OK)$. 显然$SD\cup CXT\cup OBS\cup OK\models D(\varnothing, OK'-OK)$，因此根据定义12，$D(\varnothing, OK'-OK)$就是一个判别约束. 证毕.

理想的含约束的诊断系统是在没有计算诊断之前，先确立诊断约束，再计算得到最可能的含约束的极小诊断. 而引理2的条件是极小诊断已知，因此实际应用价值有限. 为了获得更一般的结果，需要从千差万别的系统行为模型中把共性特征抽象出来.

使用原因和结果可以解释日常发生的许多事情，比如医学诊断将疾病作为原因，症状作为结果；机械和电子系统将部件状态和输入作为原因，输出作为结果；规划领域将规划作为原因，输出作为结果等等[81]. 自然从系统行为模型中可以抽象出因果关系(causality).

定义**14** 给定一个含约束的系统$(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$，令部件$c\in COMPS$. 假设部件$c$有$n$个输入端，它的一组合法输入值$IN(c)=\{in_1(c)=v_1, \cdots, in_m(c)=v_m, \cdots, in_n(c)=v_n\}$已知，且满足$1\leq m\leq n$，$\{in_1(c)=v_1, \cdots, in_m(c)=v_m\}\subseteq CXT$，其它输入端$m+1, \cdots, n$分别与不同于$c$的部件$b_s$的输出端相连接($m+1\leq s\leq n$，$b_s$可以重复)；再设$c$的输出和输入满足函数关系$f$. 令$C$是含约束的系统上的二元关系，称之为因果关系. 定义有关部件c的因果关系$C_c=\{(F, out(c)=f(v_1, \cdots, v_n))\mid F\in(IN(c)\cap CXT)\cup\{\neg AB(c)\}\cup\{out(b_s)=v_s\mid m+1\leq s\leq n\}\}$；含约束的系统的因果关系$C=\bigcup_{c\in COMPS}C_c$.

为了叙述上的方便，定义所考虑的部件只有一个输出端，但容易把它推广到部件具有多个输出端的情形中去. 直观上，因果关系抽象的是，以部件拓扑连接关系为基础，部件正常工作时输入与输出之间的对应关系；例如考虑图1中的与门a_1，$C_{a_1}=\{(in_1(a_1)=1, out(a_1)=0), (in_2(a_1)=0, out(a_1)=0), (\neg AB(a_1), out(a_1)=0)\}$. 根据系统的结构信息是容易得到因果关系的；因果关系的实质是对部件正常行为在更高层次上的模型化，我们把它称做系统的因果模型. 在此模型之下有下面的结论.

引理**3** 给定一个含约束的系统$(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$，假设$c\in COMPS$有$n$个输入端，它的输出和输入满足函数关系$f$. $\bigwedge_{c\in COMPS, (F, out(c)=f(v_1, \cdots, v_n))\in C_c} F\supset out(c)=f(v_1, \cdots, v_n)$.

根据引理3，不难证明以下定理.

引理**4** 因果关系具有传递性.

引理4是一条很自然的性质，比如当部件1和部件2级连时，部件1的输出是部件2输出的原因之一；自然部件1的输入也是部件2输出的原因. 进一步讲当上下文数据已知时可以定义因果关系C的传递闭包$C^*=\bigcup_{自然数i}C^i$. 为书写方便，以下把关于部

件 c 的那部分子集简记为 C_c^*. 例如考虑图 1的全加器, 按照部件是如何连接的, $C_{x_2}^* = \{(in_1(x_1)=1, out(x_2)=0), (in_2(x_1)=0, out(x_2)=0), (\neg AB(x_1), out(x_2)=0), (in_1(x_2)=1, out(x_2)=0), (out(x_1)=1, out(x_2)=0), (in_2(x_2)=1, out(x_2)=0), (\neg AB(x_2), out(x_2)=0)\}$. 可见 C^* 中有关部件 c 的关系或者与上下文数据有关, 把它们简记为 $INP(C_c^*)=\{F \mid F\in CXT$, 且 $(F, out(c)=f(v_1,\cdots,v_n))\in C_c^*\}$; 或者与 AB 文字有关, 把它们简记 $ASS(C_c^*)=\{L \mid L$ 是 AB 文字, 且 $(L, out(c)=f(v_1,\cdots,v_n))\in C_c^*\}$; 或者与同 c 相连的部件的输出值有关. 可以发现 $\{a \mid \neg AB(a)\in ASS(C_c^*)\}\subseteq COMPS$; 对于部件 $a\in COMPS$, 在 C_c^* 中有关 a 的公式 $F(a)$ 或者是描述该部件输出的等词公式, 或者是描述该部件正常工作的 AB 文字, 或者是 CXT 中的输入数据.

定理 4　给定一个含约束的系统 $(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$, 假设 $c\in COMPS$ 有 n 个输入端, 它的输出和输入满足函数关系 f. $SD\cup CXT\cup ASS(C_c^*)\models out(c)=f(v_1,\cdots,v_n)$.

证明. 对 $ASS(C_c^*)$ 中的元素个数 $|ASS(C_c^*)|$ 使用归纳法.

当 $|ASS(C_c^*)|=1$ 时, $INP(C_c^*)=CXT$, 根据引理 3, 结论显然.

假设当 $|ASS(C_c^*)|\leq n$ 时, 结论也成立.

当 $|ASS(C_c^*)|=n+1$ 时, 不妨设 $SD\cup CXT\cup ASS(C_c^*)\not\models out(c)=f(v_1,\cdots,v_n)$, 即 $SD\cup CXT\cup ASS(C_c^*)\cup\{out(c)\neq f(v_1,\cdots,v_n)\}$ 是可满足的, $SD\cup CXT\cup ASS(C_c^*)$ 也是可满足的. 令 $S=\{b_i \mid 1\leq i\leq n, (out(b_i)=v_i, out(c)=f(v_1,\cdots,v_n))\in C_c^*\}$. 对于任意 $b\in S$, $|ASS(C_b^*)|\leq n$, 根据归纳假设, $SD\cup CXT\cup ASS(C_b^*)\models out(b)=v_b$. 因为 $ASS(C_c^*)=\bigcup_{b\in S}ASS(C_b^*)$, $SD\cup CXT\cup ASS(C_c^*)$ 可满足, $SD\cup CXT\cup ASS(C_c^*)\models out(b)=v_b$. 结合引理 3, $SD\cup CXT\cup ASS(C_b^*)\cup\{out(b)=v_b\}\models out(c)=f(v_1,\cdots,v_n)$. 因此 $SD\cup CXT\cup ASS(C_c^*)\cup\{out(c)\neq f(v_1,\cdots,v_n)\}$ 是不可满足的, 矛盾!

证毕.

定理 5　给定一个含约束的系统 $(SD, COMPS, CXT, OBS, DC)$, 令部件 $b\in COMPS$, $c\in COMPS$, 假设 b 和 c 的输入端个数分别是 n 和 m, 它们的输出和输入分别满足函数关系 f 和 g. 当 $INP(C_b^*)\subseteq CXT$, $INP(C_c^*)\subseteq CXT$ 时, 若 $\{out(b)=f(v_1,\cdots,v_n), out(c)=g(u_1,\cdots,u_m)\}\subseteq OBS$, 且存在非空子集 $COMPS'\subset COMPS$, 满足对于任意 $a\in COMPS'$, $(F(a), out(b)=f(v_1',\cdots,v_n'))\in C_b^*$, $(F(a), out(c)=g(u_1,\cdots,u_m))\in C_c^*$, $F(a)\cup CXT$ 可满足, $\{out(b)=f(v_1',\cdots,v_n')\}\cup OBS$ 是不可满足的, 则 $F(a)$ 就是一个判别约束.

证明. 令部件 b 和 c 输入端个数分别是 n 和 m, 它们的输出和输入分别满足函数关系 f 和 g. 假设 $INP(C_b^*)\subseteq CXT$, $INP(C_c^*)\subseteq CXT$, $\{out(b)=f(v_1,\cdots,v_n), out(c)=g(u_1,\cdots,u_m)\}\subseteq OBS$; 再设存在 $(F, out(b)=f(v_1',\cdots,v_n'))\in C_b^*$, $\{out(b)=f(v_1',\cdots,v_n')\}\cup OBS$ 是不可满足的. 因此 $OBS\models\{out(b)\neq f(v_1',\cdots,v_n')\}$. 根据定理 4, $SD\cup CXT\cup ASS(C_b^*)\models out(b)=f(v_1',\cdots,v_n')$, $SD\cup CXT\cup\{out(b)\neq f(v_1',\cdots,v_n')\}\models\neg ASS(C_b^*)$, $SD\cup CXT\cup OBS\models\neg ASS(C_b^*)$. 因此 AB 子句 $D=\neg ASS(C_b^*)=\bigvee_{L\in ASS(C_b^*)}\neg L$ 是 OBS 的一个最小冲突. 那么对于任意真子集 $S'\subset ASS(C_b^*)$, AB 子句 $\neg S'$ 都不再是 OBS 的冲突. 令 $COMPS'=\{a \mid$ 满足 $(\neg AB(a), out(b)=f(v_1',\cdots,v_n'))\in C_b^*$, $(\neg AB(a), out(c)=g(u_1,\cdots,u_m))\in C_c^*\}$, 假设 $COMPS'$ 非空. 对于 $a\in COMPS'$, 假设 a 的输入端个数是 k_a, 它的输出和输入满足函数关系 h_a. 对于 $a\in COMPS'$, 令公式 $F(a)$ 或者是 $out(a)=h_a(w_1,\cdots,w_{k_a})$ 或者是 $\neg AB(a)$. 显然 $(F(a), out(b)=f(v_1',\cdots,v_n'))\in C_b^*$, $(F(a), out(c)=g(u_1,\cdots,u_m))\in C_c^*$, $F(a)\cup CXT$ 可满足. 令 $S=\bigcup_{a\in COMPS'}ASS(C_a^*)$, 显然 S 非空, $S\subset ASS(C_b^*)$. 因此 AB 子句 $\neg S$ 不再是 OBS 的冲突, $SD\cup CXT\cup OBS\cup S$ 可满足. 而根据诊断的定义 $SD\cup CXT\cup OBS\cup ASS(C_b^*)\cup ASS(C_c^*)$ 是不可满足的. $S=ASS(C_b^*)\cap ASS(C_c^*)$, 所以 AB 子句 $D'=\neg(ASS(C_b^*)\cup ASS(C_c^*)-S)$ 是 OBS 的一个冲突. 由于 S 非空, D 不会蕴涵 D', D 和 D' 对计算诊断都有贡献. 以下把析取式看成文字的集合. $D\cap D'=\neg(ASS(C_b^*)-S)$, $D-D'=\neg(ASS(C_b^*)-S)$, $D'-D=\neg(ASS(C_c^*)-S)$. 在系统的诊断集合 DS 里, 一定存在两个不同的诊断 $D(FAULTY_1, OK_1)\in DS$ 和 $D(FAULTY_2, OK_2)\in DS$, 分别满足 $OK_1=COMPS-FAULTY_1$, $FAULTY_1\subseteq\{x \mid AB(x)\in D\cap D'\}$; $FAULTY_2=COMPS-OK_2$, $OK_2\supseteq\{x \mid AB(x)\in(D-D')\cup(D'-D)\}$. 断言 $OK_1\supseteq\{a \mid \neg AB(a)\in S\}$, $FAULTY_2\supseteq\{a \mid \neg AB(a)\in S\}$. 否则 $\{D(FAULTY_1, OK_1), D\}$ 不可满足; $\{D(FAULTY_2,$

OK_2), D'}不可满足, 根据推论1, $D(FAULTY_1, OK_1)$和$D(FAULTY_2, OK_2)$不是诊断, 矛盾. 因为$S\subseteq\{\neg AB(a)|a\in OK_1\}$, 所以$SD\cup CXT\cup D(FAULTY_1, OK_1)\models F(a)$, $SD\cup CXT\cup D(FAULTY_2, OK_2)\models \wedge_{a\in COMPS'}F(a)$. 由于$S\subseteq\{\neg AB(a)|a\in FAULTY_2\}$, 于是有$SD\cup CXT\cup D(FAULTY_1, OK_1)\models\wedge_{a\in COMPS'}\neg AB(a)$; 又因$\neg AB(a)$蕴涵$\neg F(a)=(out(a)\neq h_a(w_1,\cdots,w_k))$, 所以$SD\cup CXT\cup D(FAULTY_1, OK_1)\models\wedge_{a\in COMPS'}\neg F(a)$. 所以对于任意$a\in COMPS'$, $F(a)$都是一个判别约束. 证毕.

直观上, 定理5是说系统在结构上有共享部分, 当有的输出正常, 有的异常时, 判别约束一定存在; 并且根据系统的结构信息就可以得到判别约束. 只测量系统的一个输出值, 如果该测量值表明系统出现异常, 那么只考虑系统的极小诊断就足够了. 因此根据引理2和定理5的证明过程, 可以得到以下推论.

推论2 给定一个含约束的系统(SD, $COMPS$, CXT, OBS, DC), 令$c\in COMPS$, 假设c的输入端个数是m, 它的输出和输入满足函数关系g. 当$INP(C_c^*)\subseteq CXT$时, 若$OBS=\{out(c)=g(u_1,\cdots,u_m)\}$, 且存在非空子集$COMPS'\subset COMPS$, 满足对于任意$a\in COMPS'$, $(F(a), out(c)=g(u_1',\cdots,u_m'))\in C_c^*$, $F(a)\cup CXT$可满足, $\{out(c)=g(u_1,\cdots,u_m)\}\cup OBS$是不可满足的, 则$F(a)$就是一个判别约束.

本节的结果给出了建立判别约束的方法——让我们回头再看看例1, 全加器的一个输出正常, 另一个异常. 此时根据定理5, 判别约束一定存在. 根据图1所给出的输入值和结构信息, 可以得到$\{(out(x_1)=1, out(x_2)=1), (\neg AB(x_1), out(x_2)=0)\}\subseteq C_{x_2}^*$, $\{(out(x_1)=1, out(o)=1), (\neg AB(x_1), out(o)=1)\}\subseteq C_o^*$, $ASS(C_{x_2}^*)\cap ASS(C_o^*)=\{\neg AB(x_1)\}$. 而$OBS=\{out(o)=1, out(x_2)=1\}$, $\{out(x_2)=0\}\cup OBS$是不可满足的, 根据定理5, $\neg AB(x_1)$和$out(x_1)=1$都是判别约束.

4 相关工作的比较

含约束的诊断与溯因诊断[2,12]即有区别也有联系. 与含约束的诊断类似, 溯因诊断的含义要比诊断更强.

定义15 设$D(FAULTY,\cdot)$是含约束的系统(SD, $COMPS$, CXT, OBS, DC)的溯因诊断, 如果它满足(1) $SD\cup CXT\cup D(FAULTY,\cdot)$可满足, (2) $SD\cup CXT\cup D(FAULTY,\cdot)\models OBS$.

不难看出溯因诊断要求诊断能够解释观察, 它仍是一个诊断; 但反过来不成立, 因为当假设溯因诊断$D(FAULTY,\cdot)$存在时, $SD\cup CXT\cup D(FAULTY,\cdot)$可满足, 而$SD\cup CXT\cup D(FAULTY,\cdot)\models OBS$, 所以$SD\cup CXT\cup D(FAULTY,\cdot)\cup OBS$可满足. 我们知道, 不论是基于一致性的诊断还是溯因诊断都不允许有空诊断产生(即$SD\cup CXT\not\models OBS$), 否则被认为是无效的诊断问题[9]. 因此我们有以下引理.

引理5 设(SD, $COMPS$, CXT, OBS, DC)是一个含约束的诊断系统, 则$SD\cup CXT\cup OBS$和$SD\cup CXT\cup\neg OBS$都是可满足的.

既然如此, 我们可以讨论一类使得$DC=\neg OBS$的含约束的诊断系统. 此时可以使用OBS的冲突集以及$DC=\neg OBS$的冲突集来刻画溯因诊断.

定理6[11]. 设(SD, $COMPS$, CXT, OBS, $\neg OBS$)是一个含约束的系统, 令C是OBS的最小冲突集, K是$\neg OBS$的最小冲突集. $D(FAULTY,\cdot)$是一个溯因诊断当且仅当$C\cup\{D(FAULTY,\cdot)\}$是可满足的, 并且存在$\neg D(FAULTY', OK')\in K$使得$\{D(FAULTY,\cdot), D(FAULTY', OK')\}$是可满足的.

推论3 设(SD, $COMPS$, CXT, OBS, $\neg OBS$)是一个含约束的系统, 令C是OBS的最小冲突集, K是$\neg OBS$的最小冲突集. 当K里只有一个冲突时, $D(FAULTY,\circ)$是一个溯因诊断当且仅当它也是一个含约束的诊断.

该推论说明溯因诊断和含约束的诊断有可能相等; 而下面的定理表明某些情况下含约束的诊断与溯因诊断相互排斥.

定理7 设(SD, $COMPS$, CXT, OBS, $\neg OBS$)是一个含约束的系统, 令DS是它的诊断集合. DS里没有含约束的诊断当且仅当DS里的诊断都是溯因诊断.

证明. 由引理5, $SD\cup CXT\cup OBS$和$SD\cup CXT\cup\neg OBS$都是可满足的. 因此OBS的冲突集和$\neg OBS$的冲突集都存在. 对于任意$D(FAULTY_i,\cdot)\in DS$, $SD\cup CXT\cup OBS\cup D(FAULTY_i,\cdot)$可满足. 如果$D(FAULTY_i,\cdot)$都不能成为含约束的诊断, 当且仅当$SD\cup CXT\cup D(FAULTY_i,\cdot)\cup$

¬OBS 都是不可满足的, 当且仅当 $SD \cup CXT \cup D(FAULTY_i, \cdot) \models OBS, D(FAULTY_i, \cdot)$ 是一个溯因诊断. 证毕.

de Kleer等人提出了一种计算不同诊断的概率的方法, 并使用这些概率值来指导下一步的测量[4]; 在文献 [5, 6]中他们利用部件的故障概率信息来选择最可能的诊断. Poole在溯因方法中使用概率推理来寻找最有可能的解释[7]. 相比之下, 这样的选择标准是不受应用领域约束的, 而候选约束依赖于应用领域; 概率方法缺少语义的特征, 它遇到的困难是如何恰当给出先验概率, 而候选约束的选择是以应用领域的知识 (包括结构特征)为基础的, 有规矩可寻. 解释相干性方法利用了证明图中的结构特征, 它是一种句法性的选择标准[8]. 文献 [4– 8]采用的都是一种“先生成诊断集再按照一定的度量标准选择理想诊断”的方法, 这样的选择标准尚不能完全融入证明过程.

5 结束语

含约束的基于模型的诊断系统提供了一种能够融入计算过程的有目的地选择诊断的机制, 这种选择标准具有语义特征. 我们给出了判别约束存在的充分条件, 它是建立在系统拓扑结构基础上的, 具有直观的含义.

复杂设备的诊断问题是难解的, 此时如果能够利用诊断人员对于当前诊断问题的经验或者猜测, 就可以解决这样的大型诊断问题. 含约束的诊断系统提供了这样的辅助诊断途径, 因为诊断约束是外在的, 可以人为地加上去, 这样系统就可以变成了交互式的诊断系统.

我们将进一步考虑: (1)能否给出判别约束存在的充要条件. (2)在本文给出的两层模型的基础上, 建立一个基于多模型的边诊断边修复的复杂设备的诊断系统, 它将涉及如何撤消约束和如何从失败中加强约束.

致 谢 作者同欧阳丹彤博士进行了有益的讨论, 在此表示感谢.

参 考 文 献

1 Reiter R A. Theory of diagnosis from first principles. Artificial Intelligence, 1987, 32(1): 57– 96

2 Poole D, Goebel R, Aleliunas R. Theorist: A logical reasoning system for defaults and diagnosis. In: Cercone N, McCalla G eds. The Knowledge Frontier: Essays in the Representation of Knowledge. New York: Springer-Verlag, 1987. 331– 352

3 Dressler O, Struss P. The consistency-based approach to automated diagnosis of device. In: Brewka G ed. Principles of Knowledge Representation. California: CSLI Publications, 1996. 267– 311

4 de Kleer J, Williams B C. Diagnosing multiple faults. Artificial Intelligence, 1987, 32(1): 97– 130

5 de Kleer J. Using crude probability estimates to guide diagnosis. Artificial Intelligence, 1990, 45(3): 381– 391

6 de Kleer J. Focusing on probable diagnoses. In: Proc 9th National Conference on Artificial Intelligence, Anaheim, CA, 1991. 842– 848

7 Poole D. Representing diagnostic knowledge for probabilistic horn abduction. In: Proc 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Sydney, Australia, 1991. 1129– 1135

8 Ng Hwee Tou, Mooney R J. On the role of coherence in abductive explanation. In: Proc 8th National Conference on Artificial Intelligence, Cambridge, 1990. 337– 342

9 Console L, Torasso P A. A spectrum of logical definitions of model-based diagnosis. Computational Intelligence, 1991, 7(3): 133– 141

10 de Kleer J, Mackworth A K, Reitor R. Characterizing diagnosis and systems. Artificial Intelligence, 1992, 56(2/3): 197– 222

11 Ouyang Dan-Tong, Jiang Yun-Fei. Kernel consistency-besed diagnosis and kernel abductive diagnosis. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(6): 540– 545(in Chinese)
(欧阳丹彤, 姜云飞. 基于一致性的中心诊断及溯因中心诊断. 计算机学报, 1998, 21(6): 540– 545)

12 Cox P T, Pietrykowalski T. Generating diagnosis by abductive inference. In: Proc IEEE Symposium on Logic Programming, San Francisco, 1987. 183– 189