ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software, Vol.19, No.3, March 2008, pp.584−593
DOI: 10.3724/SP.J.1001.2008.00584

E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel/Fax: +86-10-62562563

基于模型诊断的分步求解*

张学农[1,2+], 姜云飞[1], 陈蔼祥[1], 张立成[2]

[1](中山大学 软件研究所,广东 广州 510275)
[2](广东药学院 网络中心,广东 广州 510006)

A Gradual Approach for Model-Based Diagnosis

ZHANG Xue-Nong[1,2+], JIANG Yun-Fei[1], CHEN Ai-Xiang[1], ZHANG Li-Cheng[2]

[1](Institute of Software Research, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)
[2](Network Center, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, China)
+ Corresponding author: Phn: +86-20-39352220, E-mail: zxnxlq@163.com

Zhang XN, Jiang YF, Chen AX, Zhang LC. A gradual approach for model-based diagnosis. *Journal of Software*, 2008,19(3):584−593. http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/584.htm

Abstract: This paper investigates the decomposition of diagnosis problem and gives a theorem for decomposition and combination of the diagnosis. On the basis of the above work, an algorithm using gradual approach to decomposing the diagnosis problem is proposed. Besides, the correctness, completeness and complexity of the algorithm are proved in this paper. The experimental results indicate that the algorithm can apparently improve the effectiveness of diagnosing multi-output system. Comparing with the method of decomposition by assuming instantiations of some variables, the algorithm is more efficient and applies to more general diagnosis problems.
Key words: model-based diagnosis; diagnosis decomposition; gradual reasoning

摘 要: 对诊断问题的分解进行研究,给出了候选诊断的分解与组合定理.在此基础上,提出了利用分步求解方法实现诊断分解的算法,并对算法的正确性、完备性和复杂性进行了证明.实验结果表明,分步求解方法明显提高了包含多个输出的系统的诊断效率.与利用变量假定例化值分解诊断问题的方法相比,该算法能提高了效率并且扩大了适用范围.
关键词: 基于模型的诊断;诊断分解;分步推理
中图法分类号: TP18 **文献标识码**: A

基于模型的诊断[1]就是根据系统组成元件与元件之间的连接建立待诊断系统模型.这种模型通常用一阶逻辑语句来描述.根据系统的逻辑模型以及系统的输入,我们能够通过逻辑的推理理论推导出系统在正常情况下的预期行为,如果观测到的系统实际行为与系统预期行为有差异,就说明系统存在故障,利用逻辑的推理理论,能够确定引发故障的元件集合.

诊断问题是 NP 完全问题,因此,提高基于模型诊断的效率极其重要.在系统模型中加入一些约束可以缩小诊断空间,提高诊断的效率.欧阳丹彤[2]等人通过引入定义信息和表示伴随关系的信息,有效地提高了诊断的效

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60173039 (国家自然科学基金)
Received 2007-05-11; Accepted 2007-07-17

率,减少了候选诊断的数量.陈荣[3]等人提出了含有约束的基于模型的诊断系统,通过增加约束控制诊断空间,并给出了选取理想约束的理论依据.Fattah 和 Dechter[4]与 Stumptner 和 Wotawa[5]给出了诊断树型结构系统的方法,对于特定系统,算法在多项式时间内结束.栾尚敏[6]等人给出了利用结构信息的故障诊断方法,对于一些特殊结构的系统,可在多项式时间内结束.Mozetic[7]与 Childress 和 Valtorta[8]介绍了求第 k 个诊断的方法.Haenni[9]给出了计算结论求诊断的方法.Lamperti[10]等人采用基于相似性的推理技术实现诊断的重用,并应用于大规模离散事件系统的诊断.Portinale[11]等人结合了基于案例的推理和基于模型的推理方法,有效地提高了诊断的效率.应明生[12]对诊断的知识转换和融合进行了理论研究,为基于规则的诊断和基于模型的诊断的结合提供了理论依据和方法指导.

许多研究者对具有层次结构性系统的诊断进行研究并取得了效果,Chittaro[13]等人采用结构抽象的方法实现分层的基于模型的诊断,取得了很好的结果,然而,对如何降低不具有层次结构性系统(如电能分布网络或音频路由系统)的诊断问题复杂性则描述得较少.Console[14]等人对复杂系统的分布式诊断进行了研究.Darwiche[15]对不具有层次结构性系统的诊断进行了研究,讨论了观测对基于模型的诊断复杂性的影响,并给出了计算冲突的分解定理.李占山[16]等人进一步对非层次结构系统的基于模型的诊断问题分解进行了研究,给出了诊断问题分解的判定定理,研究了利用系统观测值和假定某些变量例化值分解诊断问题.Pencolé[17,18]等人提出了大规模离散事件系统的分解诊断方法,并应用于通信网络的在线诊断.

本文在文献[16]的基础上提出了诊断的分步求解方法,对诊断问题的分解做出进一步的研究工作.

1 问题的提出

为便于理解,我们简单介绍基于模型的诊断[1]的基本概念.

(1) 系统诊断问题是一个三元组($SD,COMPS,OBS$),其中,SD 是一阶句子集合,表示系统描述;$COMPS$ 是有限常量集合,表示系统元件;OBS 是一阶句子集合,表示系统观测.

(2) 候选诊断是对系统中每一元件的行为方式指派的合取式,也就是对于$\Delta\subseteq COMPS,H=\{ab(c)|c\in\Delta\}\cup\{\neg ab(c)|c\in COMPS-\Delta\}$是对($SD,COMPS,OBS$)的候选诊断,当且仅当 $SD\cup OBS\cup H$ 是可满足的.

(3) ab-文字是对某元件 $c\in COMPS$ 的 $ab(c)$或$\neg ab(c)$.

(4) 对($SD,COMPS,OBS$)的冲突 F 定义为不含有互补 ab-文字对的 ab-文字析取式,且限定 $SD\cup OBS\vdash F$,最小冲突是没有真子析取式也是冲突的冲突.

我们通过文献[16]中的音频矩阵电路诊断问题介绍其主要方法,并提出本文待解决的问题.

例 1:图 1 所示的是广播站中使用的音频转换开关矩阵电路.该矩阵电路包含 1 个输入放大器,1 000 个输出放大器和 1 000 个开关元件,使用逻辑上产生同样行为的缓冲器和与门表示该音频矩阵电路,假定导线正常.三角形元件表示缓冲器,矩形元件表示与门.

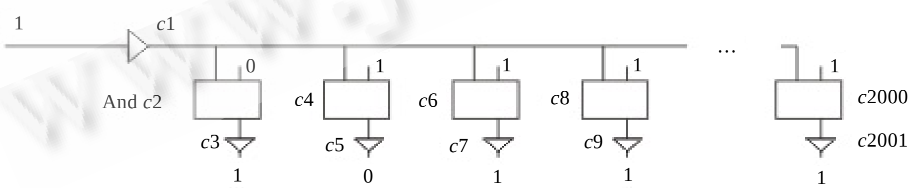

Fig.1 Circuit of audio-matrix

图 1 音频矩阵电路

假设我们观测到下面的情形:输入是 1,第 1 个与门接收到 0,其余的与门接收到 1 作为输入.缓冲器 $c5$ 的输出是 0,所有其余的缓冲器输出是 1.根据缓冲器和与门的行为描述,$c3$ 的输出应为 0,$c5$ 的输出应为 1,因此,我们知道系统有故障.使用基于模型的诊断的经典方法[1],我们会得到下列冲突集:$ab(c2)\vee ab(c3)$, $ab(c1)\vee ab(c4)\vee ab(c5)$,$ab(c4)\vee ab(c5)\vee ab(c6)\vee ab(c7)$,…,$ab(c4)\vee ab(c5)\vee ab(c2000)\vee ab(c2001)$.显然,计算代价是非

常大的.

文献[16]采用诊断分解的方法实现了对结构焦点的独立诊断.所谓结构焦点就是与异常输出相关的部分系统,例如,图 1 中的{*c*1,*c*4,*c*5}就是一个结构焦点.

定义 1(系统关系图). 设(*SD*,*COMPS*)是一个系统,称有向图 *G*=(*P*,*A*)为该系统的关系图,如果点集 *P* 代表 *COMPS*,有向边集 *A* 表示元件(点)间的连接,则从元件的输出指向与之相关联元件输入的所有有向边组成的集合.

定义 2(相关元件). 令(*SD*,*COMPS*)是一个系统,*G*=(*P*,*A*)是该系统关系图.变量 *O* 是元件 *Co* 的一个输出,那么, *O* 的相关元件 *RCOMPSo*⊆*COMPS* 是由 *Co* 和到 *Co* 在 *G*=(*P*,*A*)中至少有 1 条有向通路的所有元件一起组成的元件集合.

令 *vars*(*RCOMPSo*)是与 *RCOMPSo* 中所有元件相关的变量集合,*border*(*RCOMPo*)=*vars*(*RCOMPSo*)∩*vars*(*COMPS* –*RCOMPSo*)是建立相关元件和相关元件外部联系的所有公共变量集合.

定理 1. 给定诊断问题(*SD*,*COMPS*,*OBS*),*RCOMPSo*⊆*COMPS* 是公共变量 *O* 相关的元件集合.若 *border*(*RCOMPSo*)中所有变量例化值在 *OBS* 中,那么,(*SD*,*COMPS*,*OBS*)是可分解诊断问题.

根据上述定理,图 1 中结构焦点{*c*1,*c*4,*c*5}可以通过假定例化值的方法实现诊断分解.由于 *c*1 的输出是各个子系统的公共变量,因此,在假定 *c*1 输出为 1 的情况下,可以利用定理 1 把与 *c*5 的输出相关的子系统(包含元件 *c*4,*c*5)独立出来单独诊断,而不必考虑其他输出正常的子系统.如果 *c*1 的输出为 0,仍然可以利用定理 1 对各个子系统进行单独诊断.因此,诊断的效率大为提高.

值得注意的是,在上述例子中,*c*1 的可能取值只有 0 和 1 两种情况.如果遇到元件的可能取值很多的情况,则计算费用会大为增加;如果遇到元件的可能取值是无限的情况,则采用假定例化值的方法实现诊断分解是不可行的(见例 2).

例 2:考虑如图 2 所示的系统:元件 *M*1,*M*2 和 *M*3 是乘法器,*A*1 和 *A*2 是加法器,系统输入为 *A*=3,*C*=3,*E*=3,*B*=2, *D*=2,*F*=2,系统输出为 *G*=10,*H*=12.对于焦点结构{*M*1,*A*1,*M*2},无法采用假定例化值的方法实现诊断分解,因为元件 *M*2 的输出变量 *Y* 是公共变量,其可能取值是无限多的.

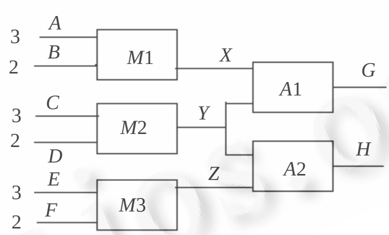

Fig.2 Polybox system

图 2 Polybox 系统

对于上述情况,我们如何利用诊断分解的思想来降低复杂性呢?这是本文将讨论的问题.

2 诊断问题的分步求解

2.1 分步求解的基本思想

为解决第 1 节提出的问题,我们采用分步求解的方法来限定公共变量的值,采用逐步分解的诊断方法求解.考虑下面的例子.

例 3:继续考虑例 2 中的诊断问题,其候选诊断是(为了简化表示,候选诊断只写出了认为发生故障的元件而忽略了正常元件,后面的例子也如此):{*ab*(*M*1)},{*ab*(*A*1)},{*ab*(*M*2),*ab*(*A*2)},{*ab*(*M*2),*ab*(*M*3)}.采用分步求解的方法,我们可以得到上述候选诊断.首先,我们只考虑焦点结构{*M*1,*A*1,*M*2},可以得到 3 个候选诊断:{*ab*(*M*1)}, {*ab*(*A*1)}和{*ab*(*M*2)}.根据现有的诊断结果,可以确定公共变量 *Y* 的值.比如,根据诊断{*ab*(*M*1)}或{*ab*(*A*1)}可以

确定 Y=6;而根据诊断{$ab(M2)$}可以确定 Y=4.然后,根据上述两种情况分别完成系统其余部分的诊断:当 Y=6 时,对结构{$M3,A2$}进行诊断,得到候选诊断∅;当 Y=4 时,对结构{$M3,A2$}进行诊断,得到候选诊断{$ab(M3)$}和{$ab(A2)$}.最后,将各部分系统得到的诊断合成系统的诊断:{$ab(M1)$}∪∅={$ab(M1)$},{$ab(A1)$}∪∅={$ab(A1)$},{$ab(M2)$}∪{$ab(M3)$}={$ab(M2),ab(M3)$},{$ab(M2)$}∪{$ab(A2)$}={$ab(M2),ab(A2)$}.至此,我们完成了系统的诊断.

从上述例子可以看出,采用分步求解的方法,我们确实可以得到候选诊断.实际上,分步求解的诊断方法也是一种诊断分解的方法.值得注意的是,我们把公共变量 Y 的值从无限可能的情况缩小为两种取值情况,实现了诊断的分解,而这是文献[16]的方法所不能处理的.对于例 1 中的音频矩阵电路诊断问题,分步诊断方法可以取得与文献[16]相同的效果,因为通过对结构焦点{$c1,c4,c5$}的诊断可以把公共变量 $c1$ 的输出限定为 0 和 1 两种情况.由此可见,分步求解的方法可以缩小公共变量的取值范围,既能提高效率,又能扩大诊断的适用范围.

2.2 诊断的分步求解的理论基础

本节给出诊断解释的定义,并在此基础上给出诊断分解与合成的定理,为实现诊断的分步求解算法提供理论依据.

定义 3(诊断解释). 给定诊断问题($SD,COMPS,OBS$),IN 和 OUT 分别为系统的输入变量集合和输出变量集合,诊断 H 的解释 I_H 是对所有的系统变量的赋值,使得 $SD\cup I_H\cup H$ 一致,且 $I_H(OUT\cup IN)=OBS$.I_H 的任意子集 $I_H(V)$ 称为诊断 H 的部分解释,V 是部分解释 $I_H(V)$对应的变量集合.

在对整个系统进行诊断时,系统的冲突和候选诊断是通过整个系统元件传播所有观测值得到的,整个系统的大量元件会导致巨大的计算成本,这是诊断分解的出发点.但是,正因为冲突和候选诊断是通过系统元件传播所有观测值得到的,在得到候选诊断的同时,我们也可以得到相应的诊断解释,该解释可以合理地解释系统的当前现象(见例 4).这也是基于模型的诊断方法的优点之一.

例 4:考虑例 2 中的候选诊断 H={$ab(M1)$},对应的解释 I_H={$A/3,C/3,E/3,B/2,D/2,F/2,G/10,H/12,Y/6,X/4,Z/6$}.该解释的含义是:由于 $M1$ 故障,产生错误输出 X=4,$M2$ 正常,输出 Y=6,$A1$ 正常,输出 G=10;$M3$ 正常,输出 Z=6,$A2$ 正常,输出 H=12.

在上述定义的基础上,我们给出候选诊断的分解与合成的基本定理,作为分步求解方法的理论基础.

定理 2. 给定诊断问题($SD,COMPS,OBS$),$H=\{ab(c)|c\in\Delta\}\cup\{\neg ab(c)|c\in COMPS-\Delta\}$是对($SD,COMPS,OBS$)的候选诊断,当且仅当存在解释 I_H 满足以下条件:

(1) $I_H(OUT\cup IN)=OBS$,IN 和 OUT 分别为系统的输入变量集合和输出变量集合;

(2) 把系统分解为 n 个子系统($SD_1,COMPS_1$),…,($SD_n,COMPS_n$),满足 $COMPS_1\cup\ldots\cup COMPS_n=COMPS$,且 $COMPS_i\cap COMPS_j=\varnothing$,其中,$i,j=1,\ldots,n$.($SD_i,COMPS_i$)的外部输出变量集合是 OUT_i,外部输入变量集合是 IN_i,$H_i=\{ab(c)|c\in\Delta_i\}\cup\{\neg ab(c)|c\in COMPS_i-\Delta_i\}$是($SD_i,COMPS_i,I_H(OUT_i\cup IN_i)$)的候选诊断,其中,$\Delta_i=\Delta\cap COMPS_i$,$H=H_1\cup\ldots\cup H_n$, $I_{H_i}\subset I_H$ 是 H_i 的解释,对应的变量集合是 $vars(COMPS_i)$,且 $I_H=I_{H_1}\cup\ldots\cup I_{H_n}$.

证明:(⇒)给定诊断问题($SD,COMPS,OBS$),$H=\{ab(c)|c\in\Delta\}\cup\{\neg ab(c)|c\in COMPS-\Delta\}$是对($SD,COMPS,OBS$)的候选诊断,则存在解释 I_H 满足以下条件:(1) $I_H(OUT\cup IN)=OBS$;(2) $SD\cup I_H\cup H$ 是一致的.把系统分解为 n 个子系统($SD_1,COMPS_1$),…,($SD_n,COMPS_n$),满足 $COMPS_1\cup\ldots\cup COMPS_n=COMPS$,且 $COMPS_i\cap COMPS_j=\varnothing$.$H_i=\{ab(c)|c\in\Delta_i\}\cup\{\neg ab(c)|c\in COMPS_i-\Delta_i\}$,其中,$\Delta_i=\Delta\cap COMPS_i$,由于 $SD\cup I_H\cup H$ 是一致的,其任意子集也是一致的,所以,H_i 是($SD_i,COMPS_i,I_H(OUT_i\cup IN_i)$)的候选诊断,且 $I_{H_i}\subset I_H$ 是 H_i 的解释,对应的变量集合是 $vars(COMPS_i)$;显然,$I_H=I_{H_1}\cup\ldots\cup I_{H_n}$;由于 $COMPS_1\cup\ldots\cup COMPS_n=COMPS$,且 $COMPS_i\cap COMPS_j=\varnothing$,$\Delta_i=\Delta\cap COMPS_i$,所以,$H=H_1\cup\ldots\cup H_n$.

(⇐)设解释 I_H 满足以下条件:(1) $I_H(OUT\cup IN)=OBS$;(2) 把系统分解为 n 个子系统($SD_1,COMPS_1$),…,($SD_n,COMPS_n$),满足 $COMPS_1\cup\ldots\cup COMPS_n=COMPS$,且 $COMPS_i\cap COMPS_j=\varnothing$,$H_i=\{ab(c)|c\in\Delta_i\}\cup\{\neg ab(c)|c\in COMPS_i-\Delta_i\}$是($SD_i,COMPS_i,I_H(OUT_i\cup IN_i)$)的候选诊断,其中,$\Delta_i=\Delta\cap COMPS_i$, $I_{H_i}\subset I_H$ 是 H_i 的解释,对应的变量集合是 $vars(COMPS_i)$,且 $I_H=I_{H_1}\cup\ldots\cup I_{H_n}$.令 $H=H_1\cup\ldots\cup H_n$,由于各子系统不包含相同元件,没有公共变量,所以,

各子系统的诊断是独立的,又有 H_i 是$(SD_i,COMPS_i,I_H(OUT_i \cup IN_i))$的候选诊断,$I_{H_i} \subset I_H$ 是 H_i 的解释,所以,H 是$(SD,COMPS,OBS)$的候选诊断,I_H 是诊断解释. □

上述定理表明,系统的任意候选诊断可以分解为各个互不相交的子系统的候选诊断,由所有互不相交的子系统的候选诊断可以合成系统的候选诊断.这为本文的分步求解的诊断方法提供了理论基础.

例 5:考虑例 2 中的候选诊断 $H=\{ab(M1)\}$,对应的解释 $I_H=\{A/3,C/3,E/3,B/2,D/2,F/2,G/10,H/12,Y/6,X/4,Z/6\}$.把系统分解为两个子系统 S_1 和 S_2,S_1 对应的元件集合 $COMPS_1$ 是$\{M1,M2,A1\}$,OBS_1 是$\{A=3,B=2,C=3,D=2,G=10\}$;S_2 对应的元件集合 $COMPS_2$ 是$\{A2,M3\}$,OBS_2 是$\{Y=6,E=3,F=2,Z=6,H=12\}$.如定理 2 所说,$H_1=\{ab(M1)\}$是 S_1 的诊断,$I_{H_1}=\{A/3,C/3,B/2,D/2,G/10,Y/6,X/4\}$是相应的解释;$H_2=\varnothing$是 S_2 的诊断,$I_{H_2}=\{Y/6,E/3,F/2,Z/6,H/12\}$是相应的解释;$H=H_1 \cup H_2$ 是系统的候选诊断,$I_H=I_{H_1} \cup I_{H_2}$.

在实际的诊断过程中,人们往往首先关注与系统的异常输出相关的部分元件,我们通过定义输出相关子系统来刻画与系统的异常输出相关的子系统.

定义 4(输出相关子系统). 令$(SD,COMPS)$是一个系统,OUT 是系统输出变量集合,$SubOUT=\{O_1,\ldots,O_k\}$是 OUT 的子集,$SD' \subseteq SD$ 是系统对应于 $RCOMPS_{SubOUT}=RCOMPS_{O_1} \cup \ldots \cup RCOMPS_{O_k}$ 的描述,$(SD',RCOMPS_{SubOUT})$称为 $SubOUT$ 的输出相关子系统.

特别地,如果只考虑系统的单个输出 O_i,则$(SD', RCOMPS_{O_i})$称为 O_i 的输出相关子系统,其中,$SD' \subseteq SD$ 是系统对应于 $RCOMPS_{O_i}$ 的描述.

例 6:考虑图 2 中的系统,输出 G 的相关子系统是由元件 $M1,M2$ 和 $A1$ 组成的系统.输出 H 的相关子系统是由元件 $M3,M2$ 和 $A2$ 组成的系统.

定义 5(补系统). 令$(SD,COMPS)$是一个系统,$(SD',RCOMPS_{SubOUT})$是 $SubOUT$ 的输出相关子系统.$(SD-SD', COMPS-RCOMPS_{SubOUT})$称为$(SD',RCOMPS_{SubOUT})$的补系统.

例 7:考虑图 2 中的系统,输出 G 的相关子系统是由元件 $M1,M2$ 和 $A1$ 组成的系统,其补系统是由元件 $M3$ 和 $A2$ 组成的系统.

定理 3. 给定诊断问题$(SD,COMPS,OBS)$,IN 和 OUT 分别为系统的输入变量集合和输出变量集合,$(SD', RCOMPS_{SubOUT})$是 $SubOUT$ 的输出相关子系统,H_i 是$(SD',RCOMPS_{SubOUT},OBS')$的候选诊断,$OBS'$是 OBS 的子集,其对应的变量集合是$(SD',RCOMPS_{SubOUT})$的输入变量 $SubIN$ 和输出变量 $SubOUT$ 的并,I_{H_i} 是诊断 H_i 的解释;H_j 是补系统$(SD-SD',COMPS-RCOMPS_{SubOUT},(OBS-OBS') \cup I_{H_P})$的候选诊断,$I_{H_j}$ 是诊断 H_j 的解释,其中,I_{H_P} 是 I_{H_i} 的子集,对应的变量是 $border(RCOMPS_{SubOUT})$,则 $H_i \cup H_j$ 是$(SD,COMPS,OBS)$的候选诊断,$I_H=I_{H_i} \cup I_{H_j}$ 是诊断 $H=H_i \cup H_j$ 的解释.

证明:考察解释 $I_H=I_{H_i} \cup I_{H_j}$,易知 $I_H(OUT \cup IN)=OBS$;显然,$RCOMPS_{SubOUT} \cap COMPS-RCOMPS_{SubOUT}=\varnothing$,且 $RCOMPS_{SubOUT} \cup COMPS-RCOMPS_{SubOUT}=COMPS$.由于 H_i 是$(SD',RCOMPS_{SubOUT},OBS)$的候选诊断,$I_{H_i}$ 是诊断 H_i 的解释;H_j 是补系统$(SD-SD',COMPS-RCOMPS_{SubOUT},OBS \cup I_{H_P})$的候选诊断,$I_{H_j}$ 是诊断 H_j 的解释,其中,I_{H_P} 是 I_{H_i} 的子集,对应的变量是 $border(RCOMPS_{SubOUT})$,由定理 2 可知,$H=H_i \cup H_j$ 是$(SD,COMPS,OBS)$的候选诊断,$I_H=I_{H_i} \cup I_{H_j}$ 是诊断 H 的解释. □

2.3 分步求解算法

根据定理 3,我们可以给出诊断问题的分步求解算法.首先对异常输出的相关子系统进行诊断,根据诊断结果,分别对异常输出的相关子系统的补系统形成新的诊断问题,再递归调用分步求解算法求候选诊断,然后合并异常输出的相关子系统及其补系统的诊断得到整个系统的诊断.借鉴文献[16]中的算法,每当找到候选诊断时,我们就对其进行测试,如果不是真实诊断,则继续寻找其他候选诊断.

算法.

GRADUAL-DIAG$(SD,COMPS,OBS)$.

Begin

```
    if (有异常输出) then
    {
       DIAG=∅;
       CALL FIND-DIAG(SD,COMPS,OBS);
    }
    else return ∅;
End
FIND-DIAG(SD,COMPS,OBS)
Begin
    SubOUT←所有异常输出对应的变量;
    SD′←对应于 RCOMPS_SubOUT 的系统描述;
    TEMP1←resolver(SD′,RCOMPS_SubOUT,OBS); //: resolver 是完备的诊断求解器*
    对 TEMP1 中的元素排序**;
    for (每个 H∈TEMP1)
    do {
       for (H 的解释 I_H)
       do {
         I_Hp ←I_H(border(RCOMPS_SubOUT));
         if (补系统对于 OBS∪ I_Hp 有异常输出) then
            {
               TEMP2=FIND-DIAG(SD−SD′,COMPS−RCOMPS_SubOUT,OBS∪ I_Hp );
               for (每个 H′∈TEMP2)
               do {
                  DIAG=DIAG∪{H∪H′};
               }
            }
            else
            {
               测试 DIAG 中第 1 个未标记的候选诊断;
               if (得到真实诊断) then
               {
                  提示修复系统;
                  Stop;
               }
               else  标记 DIAG 中的候选诊断;
            }
         }
```

* *resolver* 可以采用已有的诊断分解方法.例如,对于例 1 中结构焦点{$c1$,$c4$,$c5$}补系统的诊断.由于 $c1$ 的输出是各个子系统的公共参量,且其值已经由结构焦点{$c1$,$c4$,$c5$}的诊断解释所限定,因此,可以利用定理 1 对各个子系统进行单独诊断.

** 与 *OUT-SubOUT* 的相关元件集合不相交的诊断为 I 类,与 *OUT-SubOUT* 的相关元件集合相交的诊断为 II 类.I 类诊断排前,同类诊断中包含元件数少的排前.

}
return *DIAG*;
End

定理 4. 分步求解算法是可靠且完备的.

证明:由定理 3 可知,分步求解算法是可靠的,这里只需证明其完备性.由于分步求解是递归算法,只需证明给定诊断问题$(SD,COMPS,OBS)$,任意候选诊断 H 可以通过对输出相关子系统$(SD_i,COMPS_i)$和补系统$(SD_j,COMPS_j)$的分步诊断得到.对任意候选诊断 H,由定理 2 可知,存在解释 I_H 满足以下条件:

(1) $I_H(OUT\cup IN)=OBS$,IN 和 OUT 分别为系统的输入变量集合和输出变量集合;

(2) 把系统分解为输出相关子系统$(SD_i,COMPS_i)$和补系统$(SD_j,COMPS_j)$,$H_i=\{ab(c)|c\in\Delta_i\}\cup\{\neg ab(c)|c\in COMPS_i-\Delta_i\}$是$(SD_i,COMPS_i,I_H(OUT_i\cup IN_i))$的候选诊断;$H_j=\{ab(c)|c\in\Delta_j\}\cup\{\neg ab(c)|c\in COMPS_j-\Delta_j\}$是$(SD_j,COMPS_j,I_H(OUT_j\cup IN_j))$的候选诊断;$H=H_i\cup H_j$, $I_{H_i}\cup I_{H_j}=I_H$.

由于算法调用的 *resolver* 是完备的诊断求解器,因此 H_i 一定被计算得到.又因为算法考虑了诊断 H_i 的所有解释且 *resolver* 是完备的,所以 H_j 也一定被计算得到.由于 $H=H_i\cup H_j$,所以,H 可以通过对输出相关子系统$(SD_i,COMPS_i)$和补系统$(SD_j,COMPS_j)$的分步诊断得到. □

本文的算法每得到一个候选诊断就对其进行测试,因此,我们希望优先得到可能性大的候选诊断.以下通过例 8 来讨论算法的优选性.

例 8:考虑图 2 所示的系统.考察候选诊断$\{M1\}$,诊断解释是:由于 $M1$ 故障,产生错误输出 $X=4$,$M2$ 正常,输出 $Y=6$,$A1$ 正常,输出 $G=10$;$M3$ 正常,输出 $Z=6$,$A2$ 正常,输出 $H=12$.候选诊断$\{A1\}$的解释是,由于 $A1$ 故障直接导致系统的异常输出 $G=10$.而$\{M2,A2\}$的解释是:由于 $M2$ 故障,产生错误输出 $Y=4$,导致系统的异常输出 $G=10$,同时,由于 $A2$ 故障,在 $Y=4$,$Z=6$ 时得到错误的输出 $H=12$;而从表面上看,系统输出 H 反而正常.诊断$\{M2,M3\}$的解释是:由于 $M2$ 故障,产生错误输出 $Y=4$,导致系统的异常输出 $G=10$,同时,由于 $M3$ 故障,产生错误输出 $Z=8$;由于两个异常值相互屏蔽,从表面上看,系统输出 H 反而正常.根据常识,$\{M1\}$和$\{A1\}$的可能性较大,而$\{M2,A2\}$和$\{M2,M3\}$的可能性较小.而算法恰好先得到$\{M1\}$和$\{A1\}$,后得到$\{M2,A2\}$和$\{M2,M3\}$.

从上述例子我们可以得到根据常识判定诊断可能性大小的规则:诊断包含的故障元件集合与系统正常输出相关元件集合的交集越小,该诊断的可能性越大.在此前提条件下,诊断包含的元件越少,其可能性越大.

性质 1. 分步求解算法是优选的.

证明:算法总是先对系统输出异常的部分 $RCOMPS_{SubOUT}$ 计算诊断,对于这一部分的诊断,排序规则(见脚注**)如下:I 类诊断排前,同类诊断中包含元件数少的排前.对于 I 类诊断,与之相应的补系统的诊断结果是∅,即补系统无异常,该类诊断的可能性较大.对于II类诊断,与之相应的补系统的诊断结果非空,即补系统也存在异常元件,该类诊断的可能性较小.对于同类诊断,显然故障元件多的可能性小.因此,分步求解算法是优选的. □

上述定理和性质告诉我们,分步求解算法是可靠且完备的,并且这些诊断是按可能性由高到低的顺序输出的.这对于算法的实用性很重要:事实上,为了得到真正的诊断,必须对候选诊断进行测试,可以增加观测或进行元件替换[19].因此,基于模型的诊断通常被理解为不断迭代的诊断产生、诊断测试和鉴别的过程,并且,人们总是采用可能性高的诊断优先测试的策略.文献[20]对诊断的鉴别进行了理论性的研究.

2.4 复杂性分析和实验结果

本文的分步求解方法没有限定对每个子系统的诊断方法,因此,对于单输出系统的诊断并不能提高诊断效率,而对于有多个输出相关子系统的系统的诊断能够有效提高效率.下述定理给出了分步求解算法计算候选诊断的搜索空间复杂性.

定理 5. 分步求解算法计算一个候选诊断的搜索空间复杂性是 $O(rK^m2^S)$,其中,r 是系统的输出数,K 是公共变量 x 的可能取值数,m 是最大的公共变量集合的元数,S 是最大的 $RCOMPS_{SubOUT}$ 的元数.

证明:分步求解算法是一种深度优先的搜索算法,最多对每个子系统搜索 1 次,可以得到一个候选诊断.因为 K 是每个公共变量的可能取值数(我们假定每个元件的 K 是相同的),而最多有 m 个公共变量,因此,公共变量

赋值方式最多有 K^m 种.显然,I_{H_p} 的数目是不超过 K^m 的.在递归过程中,每次针对 $RCOMPS_{SubOUT}$ 计算候选诊断,由于最大的 $RCOMPS_{SubOUT}$ 的元数是 S,在最坏情况下有 2^S 个候选诊断,因此,算法计算一个候选诊断的搜索空间的复杂性是 $O(rK^m2^S)$. □

在有 n 个元件系统的诊断中,利用一般基于模型诊断方法,计算一个候选诊断的搜索空间为 2^n.一般地,K 是常数,m 会远小于 n,S 的取值也会明显小于 n,这样,rK^m2^S 远小于 2^n.特别地,对于类似音频矩阵电路的扁平型的系统, m 和 S 都是常数,计算一个候选诊断的空间复杂性为 $O(r)$.因此,本文的算法能够提高诊断效率.

我们在 Windows 环境的 PC 机上对分步求解诊断算法(在实验过程中不进行诊断测试,直接计算所有诊断)进行了测试,加大本文中 Polybox 系统的规模,类似音频矩阵电路,保持其子系统元件数为 3,逐步增加子系统的数目,得到的结果如图 3 所示.

然后测试系统的结构对分步求解方法的影响.A 类系统保持其子系统数为 2,逐步增加子系统的元件数目;B 类系统保持其子系统元件数不变而逐步增加子系统的数目.在系统元件数相同的情况下,得到的结果如图 4 所示.

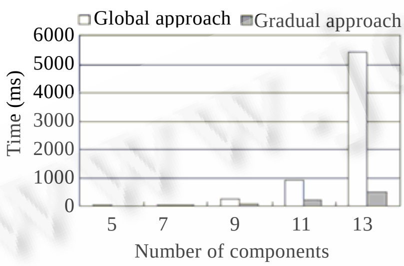

Fig.3 Experimental results (1)

图 3 实验结果(1)

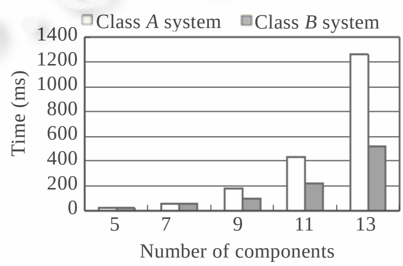

Fig.4 Experimental results (2)

图 4 实验结果(2)

从图 3 可以看出,分步求解的诊断方法其效率明显高于整体求解的诊断方法.从图 4 可以看出,在系统元件数相同的情况下,包含的子系统越多,分步求解的诊断方法的效率越高.当系统包含 13 个元件、6 个输出相关子系统时,分步求解方法的计算时间为 520ms;而系统包含 13 个元件、2 个输出相关子系统时,分步求解方法的计算时间为 1 260ms.

虽然文献[16]方法的效率也明显高于整体求解的诊断方法,但是对于本文实验中的系统,该方法无法使用,这是由于无法有效地假设变量的例化值.因为分步求解的方法可以缩小公共变量的取值范围,换句话说,诊断解释对应的变量取值不会超过变量的取值范围;同时,文献[16]的部分结论仍然可以在本文的算法中应用(见第 2.3 节的脚注 1).因此,对于音频矩阵电路这一类系统的诊断,分步求解的诊断方法其效率也不低于文献[16]的方法.

3 相关工作比较

一些研究者对具有层次结构性系统的诊断进行了研究,Chittaro[13]等人采用结构抽象的方法实现分层的基于模型的诊断,取得了很好的结果.Console[14]等人对复杂系统的分布式诊断进行了研究.Darwiche[15]对不具有层次结构性系统的诊断进行了研究,分析了观测对基于模型诊断复杂性的影响,并给出了计算冲突的分解定理,但没有对公共变量例化值未知时的情况进行研究.李占山[16]等人对不具有层次结构性系统的基于模型的诊断问题分解进行研究,给出了诊断问题分解的判定定理,研究了利用系统观测值和假定某些变量例化值的分解诊断问题.如果遇到元件的可能取值很多甚至是无限的情况,则采用假定例化值的方法实现诊断分解是不可行的,文献[16]对此没有进一步研究,这是本文工作的出发点.借鉴文献[17,18]提出的动态系统的增量分布式诊断思想,本文提出了静态系统诊断的分步求解方法.因为分步求解的方法可以缩小公共变量的取值范围,对于文献[16]中方法适用的诊断问题,本文的分步诊断方法的效率不低于文献[16]的方法;对于文献[16]中方法不适用的诊断问题,本文的分步诊断方法仍然可以采用分解的方法得到诊断.因此,分步求解的方法扩大了诊断的适用范围.

4 结 论

本文对诊断问题的分解做了进一步的研究,提出了分步诊断的思想,给出了利用分步求解方法实现诊断分解的方法.该方法是正确和完备的,进一步提高了效率并扩大了诊断分解的适用范围.本文的结果不仅可以处理非层次结构系统诊断问题的分解,尤其是具有树型结构系统的诊断问题分解(如音频矩阵电路、供电系统、自来水、煤气管道等扁平的类树型结构系统),而且也可用于层次诊断问题的分解.实验结果表明,分步求解方法对提高基于模型的诊断方法的实用性是有积极意义的.

References:

[1] Reiter R. A theory of diagnosis from first principles. Artificial Intelligence, 1987,32:57−96.

[2] Ouyang DT, Jiang YF. Model based diagnosis of a general causal theory. Journal of Computer Research and Development, 1999, 36(1):31−35 (in Chinese with English abstract).

[3] Chen R, Jiang YF. Model-Based diagnosis system with constraints. Chinese Journal of Computers, 2001,24(2):127−135 (in Chinese with English abstract).

[4] Fattah YE, Dechter R. Diagnosing tree-decomposable circuits. In: Mellish CS, ed. Proc. of the 14th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence. Montreal, 1995. 572−578. http://citeseer.ist.psu.edu/elfattah95diagnosing.html

[5] Stumptner M, Wotawa F. Diagnosing tree-structured systems. Artificial Intelligence, 2001,127:1−29.

[6] Luan SM, Dai GZ. An approach to diagnosing a system with structure information. Chinese Journal of Computers, 2005,28(5): 801−808 (in Chinese with English abstract).

[7] Mozetic I. A polynomial-time algorithm for model-based diagnosis. In: Neumann B, ed. Proc. of the 10th European Conf. on Artificial Intelligence. 1992. 729−733. http://citeseer.ist.psu.edu/225261.html

[8] Childress RL, Valtorta M. Polynomial-Time model-based diagnosis with the critical set algorithm. In: Proc. of the 4th Int'l Workshop on Principles of Diagnosis. Aberystwyth, 1993. 166−177. http://citeseer.ist.psu.edu/493594.html

[9] Haenni R. A query-driven anytime algorithm for argumentative and abductive reasoning. In: Bustard D, Liu W, Sterritt R, eds. Proc. of the 1st Int'l Conf. on Software. 2002. 114−127.

[10] Lamperti G, Zanella M. Flexible diagnosis of discrete-event systems by similarity-based reasoning techniques. Artificial Intelligence, 2006,170:232−297.

[11] Portinale L, Magro D, Torasso P. Multi-Modal diagnosis combining case-based and model-based reasoning: A formal and experimental analysis. Artificial Intelligence, 2004,158:109−153.

[12] Ying MS. Knowledge transformation and fusion in diagnostic systems. Artificial Intelligence, 2005,163:1−45.

[13] Chittaro L. Hierarchical model-based diagnosis based on structural abstraction. Artificial Intelligence, 2004,155:147−182.

[14] Console L, Picardi C, Dupr DT. A framework for decentralized qualitative model-based diagnosis. In: Veloso MM, ed. Proc. of the Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence. 2007. 286−291.

[15] Darwiche A, Provan G. The effect of observations on the complexity of model-based diagnosis. In: Proc. of the Int'l Conf. on Artificial Intelligence. Providence, 1997. 94−99. http://citeseer.ist.psu.edu/darwiche97effect.html

[16] Li ZS, Jiang YF, Wang T. The decomposition for model-based diagnosis problem and its algorithm. Chinese Journal of Computers, 2003,26(9):1177−1182 (in Chinese with English abstract).

[17] Pencole Y, Cordier MO, Roze L. Incremental decentralized diagnosis approach for the supervision of a telecommunication network. In: Proc. of the Int'l Workshop on Principles of Diagnosis. 2001. 151−158. http://citeseer.ist.psu.edu/pencole02 incremental.html

[18] Pencole Y. A formal framework for the decentralized diagnosis of large scale discrete event systems and its application to telecommunication networks. Artificial Intelligence, 2005,164:121−170.

[19] Jiang YF, Li ZS. On component replacing and replacement tests for model based diagnosis. Chinese Journal of Computers, 2001, 24(6):666−672 (in Chinese with English abstract).

[20] McIlraith S, Reiter R. On tests for hypothetical reasoning. In: Hamscher W, Console L, de Kleer J, eds. Proc. of the Readings in Model-Based Diagnosis. San Mateo: Morgan-Kaufmann Publishers, 1992. 89−96. http://citeseer.ist.psu.edu/mcilraith92tests.html

附中文参考文献:

[2] 欧阳丹彤,姜云飞.广义因果理论的基于模型的诊断.计算机研究与发展,1999,36(1):31–35.

[3] 陈荣,姜云飞.含约束的基于模型的诊断系统.计算机学报,2001,24(2):127–135.

[6] 栾尚敏,戴国忠.利用结构信息的故障诊断方法.计算机学报,2005,28(5):801–808.

[16] 李占山,姜云飞,王涛.基于模型的诊断问题分解及其算法.计算机学报,2003,26(9):1177–1182.

[19] 姜云飞,李占山.基于模型诊断的元件替换与替换测试.计算机学报,2001,24(6):666–672.

张学农(1973－),男,湖南冷水江人,博士生,高级工程师,主要研究领域为智能诊断,智能规划.

陈蔼祥(1979－),男,博士生,主要研究领域为智能规划,智能诊断.

姜云飞(1945－),男,教授,博士生导师,主要研究领域为自动推理,智能诊断,智能规划.

张立成(1975－),男,工程师,主要研究领域为智能诊断.

****

中国科学院软件研究所筹建国内首家软件博物馆

近日，中国科学院软件研究所发起建设我国首家以计算机软件为主题的软件博物馆。

软件博物馆旨在记录软件发展历程，展示软件发展成就，传播软件科技知识，宣传软件科学文化。软件博物馆将以丰富而翔实的史料及珍贵的实物,将计算机软件从起步到现在的发展状况以及未来发展趋势生动、直观地展示给大众。通过各种展示手段，追溯软件的发展历程，发掘软件文化内涵，弘扬科学精神，普及科技知识。

软件博物馆计划于 2008 年中期向公众开放。目前，正面向社会各界广泛征集能够反映国内、外软件发展历程和软件发展成就的实物、照片、回忆文章、模型、成果展示材料等。有捐赠意向的单位及个人请与软件博物馆建设办公室联系。

联系地址：北京市中关村南四街 4 号中科院软件园区 5 号楼 202 室

邮政编码：100080

联系人：李洁

E-mail：rjbwg@iscas.ac.cn

电话：86-10-62661035

传真：86-10-62661035