

# 利用元件替换测试求诊断\*

李占山<sup>1,2,3+</sup>, 王涛<sup>4</sup>, 孙吉贵<sup>1,2</sup>, 林海<sup>1,2</sup>, 冯果忱<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>(吉林大学 计算机科学与技术学院,吉林 长春 130012)

<sup>2</sup>(符号计算与知识工程教育部重点实验室(吉林大学),吉林 长春 130012)

<sup>3</sup>(吉林大学 数学研究所,吉林 长春 130012)

<sup>4</sup>(长春工业大学 计算机科学与工程学院,吉林 长春 130012)

## Testing and Computing Diagnoses by Using Component Replacement

LI Zhan-Shan<sup>1,2,3+</sup>, WANG Tao<sup>4</sup>, SUN Ji-Gui<sup>1,2</sup>, LIN Hai<sup>1,2</sup>, FENG Guo-Chen<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

<sup>2</sup>(Key Laboratory of Symbol Computation and Knowledge Engineering of Ministry of Education (Jilin University), Changchun 130012, China)

<sup>3</sup>(Institute of Mathematics, Jilin University, Changchun 130012, China)

<sup>4</sup>(School of Computer Science and Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-431-5166478, E-mail: zsli@email.jlu.edu.cn

Received 2004-03-22; Accepted 2005-05-09

**Li ZS, Wang T, Sun JG, Lin H, Feng GC. Testing and computing diagnoses by using component replacement. *Journal of Software*, 2005,16(9):1599–1605. DOI: 10.1360/jos161599**

**Abstract:** This paper mainly fills the gap of diagnosis test for non-observable common variables or high cost of testing common variables. The concept of replacement test is presented as a new alternative to diagnosis test. The concept of relevant replacement test is proposed for some observations, and makes best use of the effects of component replacement upon the observations of the system being diagnosed to characterize the discrimination of candidate diagnoses, and the generation of new conflicts. Based on it, the concept of replacing decomposition for diagnostic problems is proposed by virtue of the characteristics of replacement, and the decomposition of the system being diagnosed through replacing the components in the intersection set of some subsystems with normal components directly is investigated. In non-observable common variables or high cost of testing common variables, the results in this paper can improve the adaptation and the effectiveness of diagnosis tests, reduce the cost of the test, and provide a theoretical basis for decomposing the system being diagnosed.

**Key words:** model-based diagnosis; test; replacement test; replacing decomposition for diagnostic problems

---

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant Nos.60073039, 60273080 (国家自然科学基金); the Natural Science Foundation of Jilin Province of China under Grant No.20040526 (吉林省自然科学基金)

作者简介: 李占山(1966 - ),男,吉林公主岭人,博士,副教授,主要研究领域为基于模型的诊断,智能规划与决策及其应用;王涛(1969 - ),女,讲师,主要研究领域为基于模型的诊断及其应用;孙吉贵(1962 - ),男,博士,教授,博士生导师,CCF高级会员,主要研究领域为常识推理,约束程序,约束推理;林海(1981 - ),男,助教,主要研究领域为自动推理,基于模型的诊断;冯果忱(1935 - ),男,教授,博士生导师,主要研究领域为非线性问题解法,计算机数学.

**摘要:** 主要填补了对系统参量不可观测或观测成本高的诊断测试研究这一空白,提出了替换测试作为诊断测试一种新的可选择方法.在提出相关替换测试概念的基础上,利用元件替换对系统观测值的影响刻画了诊断的判定、新冲突的生成.在此基础上,提出了替换分解诊断问题的概念,刻画了诊断问题的替换分解等相关问题;研究了直接利用正常元件替换几个子系统交集元件分解待诊断系统的方法.其结果能够改善诊断与测试的效率、降低诊断成本,并为研究诊断问题分解提供理论依据.

**关键词:** 基于模型的诊断;测试;替换测试;诊断问题的替换分解

**中图法分类号:** TP18 **文献标识码:** A

使用传统方法构造的诊断专家系统有很多缺点,知识的不完备、系统依赖性以及从专家那里获取必要知识的困难阻碍了这些系统的广泛应用.基于模型诊断是近年来人工智能领域出现的一个十分活跃的研究分支,其正确性、完备性及可维护性等特点能够克服传统诊断系统的缺点,因而显示出充满生机的诱人前景<sup>[1-3]</sup>.作为诊断重要步骤的测试已有一些研究者从理论上进行了刻画,比如,1992年,McIlraith和Reiter对假设推理的测试进行了刻画<sup>[4]</sup>;1994年,McIlraith又从溯因角度对诊断测试进行了刻画<sup>[5]</sup>,Struss研究了利用故障行为模型测试诊断的方法<sup>[6]</sup>,1994年,我国学者侯爱民结合Reiter的工作<sup>[7]</sup>,从第一原理出发刻画了诊断的度量<sup>[8]</sup>.但他们的工作是以系统的上下文数据以及系统状态不变为前提的,当系统中一些参量值不便测试或测试成本较高时,对利用上下文数据以及系统状态改变情况下的测试问题没有进行刻画.为此,我们研究了上下文数据以及系统状态可以改变条件下的诊断测试,并得到了一些有用的结果<sup>[9,10]</sup>.本文对利用元件替换测试诊断进一步给予了研究,提出了相对于候选诊断的相关替换测试的概念,研究了替换行为发生后系统诊断的判定、换元系统冲突生成.近年来基于模型的诊断获得了长足的发展,一些基于模型的诊断系统已经在社会生产生活中得到了应用,如基于模型的诊断在对VHDL设计的诊断<sup>[11,12]</sup>以及获得美国宇航局奖的Livingstone系统<sup>[13]</sup>.1998年10月24日在美国肯尼迪航天中心成功发射的“深空一号”探测飞船中,一组人工智能软件使“深空一号”探测器在没有地面控制人员指挥的情况下作出了一些重要的决定,还使“深空一号”探测器自我诊断飞行器的故障并发出更正指令.虽然如此,诊断问题,像许多其他任务一样计算代价高昂.一般解决复杂性较高问题的常用方法是把问题分解,把全局的复杂问题分解成局部的简单问题.对诊断问题我们也可以考虑用分解的方法.结合我们的前期工作,本文首先利用元件替换研究了诊断测试问题,然后利用替换考察了诊断问题的分解方法,最后研究了直接利用正常元件替换几个子系统交集元件分解待诊断系统的方法,并得到了一些新的结果.希望我们的工作能够为诊断测试、系统修复以及降低诊断问题复杂性提供新的理论依据.

## 1 替换测试及其性质

为了便于问题描述,我们首先给出一些相关概念.

**定义 1.1.** 设 $(SD, COMPS)$ 是一个系统, $\sigma \subseteq \Delta_1 \Delta_2 \dots \Delta_n$ 是该系统的一个替换,其中 $\Delta_i, i=1,2,\dots,n$ 表示对 $(SD, COMPS, OBS)$ 的第 $i$ 个候选诊断.用与 $\sigma$ 中元件对应的完好元件代替 $\sigma$ 中的嫌疑元件的过程叫做元件替换.

**定义 1.2.** 设 $(SD, COMPS)$ 是一个系统,把对系统 $(SD, COMPS)$ 做替换 $\sigma$ 后的结果表示为 $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$ ,叫做 $(SD, COMPS)$ 的换元系统.

在换元系统中不必考虑换元后的元件,因为它们是正常元件.因此有下面的关系成立:

$$\begin{aligned} SD^\sigma &= SD \setminus \{\neg AB(x) | x \in \sigma\}, \\ COMPS^\sigma &= COMPS - \sigma. \end{aligned}$$

**定义 1.3.** 设 $(SD, COMPS)$ 是一个系统, $\Delta$ 是对 $(SD, COMPS, OBS)$ 的候选诊断, $\sigma = \{c_1, c_2, \dots, c_r\}$ 为 $(SD, COMPS)$ 的一个替换, $O$ 是换元系统 $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$ 在与 $(SD, COMPS)$ 相同输入 $IN$ 下相对 $\Delta$ 的预期输出,则称 $(\sigma, O)$ 为 $(SD, COMPS)$ 相对于 $\Delta$ 的替换测试.

此定义是说,不改变系统输入而用完好元件替换嫌疑元件,根据系统预期系统来测试诊断.

**定义 1.4.** 设 $(SD, COMPS)$ 是一个系统,替换测试 $(\sigma, O)$ 的结果是 $O, \neg O$ 之一.其中 $O$ 是系统替换后观测参量

的预期行为,  $\neg O$  是非预期行为, 即观测结果只能是与预测相同或不同两种情况存在。

这个定义是说, 进行元件替换以后, 系统的输出行为或者与我们预测的结果  $O$  相同, 或者与我们预测的结果  $O$  有差异, 即  $\neg O$ . 但不论结果是什么, 我们都能够对一些系统候选诊断或元件的正常与异常做出判断, 从而达到测试的目的。

**定义 1.5.** 从换元系统  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$  的输出结果  $O$  得到的新冲突是一个集合  $\{c_1, c_2, \dots, c_r\}$ , 使得  $SD \text{ OBS} \{-\neg AB(c_1), \neg AB(c_2), \dots, \neg AB(c_r)\}$  是相容的, 而  $SD \text{ IN } O \{-\neg AB(c_1), \neg AB(c_2), \dots, \neg AB(c_r)\}$  是不相容的。

根据这个定义我们可以确定换元系统的冲突, 从而计算新的候选诊断。

为了保证问题求解的正确性, 我们限定以下的诊断求解过程只针对系统输出异常的系统, 而对输出正常的系统我们不加考虑. 在发生故障的系统中, 如果得到的某候选诊断是引起系统故障的真正原因, 用完好元件替换该候选诊断中元件以后, 系统的异常输出必然会发生变化, 因此有下面的结论。

**定理 1.1.** 设  $(SD, COMPS)$  是一个系统,  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$  是对该系统施行替换  $\sigma$  后所得换元系统,  $\Delta \in HYP$  是对  $(SD, COMPS, OBS)$  的候选诊断且  $\sigma \cap \Delta \neq \emptyset$ . 如果换元系统  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$  在相同输入  $IN$  下的观测结果  $\alpha$  仍为  $OBS$ , 那么  $\alpha$  否定  $\Delta$ .

证明: 因为  $\Delta$  是对  $(SD, COMPS, OBS)$  的候选诊断, 我们知道  $\Delta$  中元件是嫌疑元件, 且  $\sigma \cap \Delta \neq \emptyset$ , 说明  $\Delta$  中有元件被替换, 从而如果  $\Delta$  为真, 我们能够预测在换元系统中有  $SD^\sigma \text{ IN } \{-\neg AB(x) | x \in COMPS^\sigma - (\Delta - \sigma)\} = \neg OBS$  成立, 即  $SD^\sigma \text{ IN } \{-\neg AB(x) | x \in COMPS^\sigma - (\Delta - \sigma)\} \text{ OBS}$  不可满足. 由于我们观测到换元系统的输出为  $OBS$ , 即  $OBS$  实际上为真, 因此我们可以推出  $SD^\sigma \text{ IN } OBS = \neg \{-\neg AB(x) | x \in COMPS^\sigma - (\Delta - \sigma)\}$ . 这就是说,  $COMPS^\sigma - (\Delta - \sigma)$  实际上是一个冲突, 因此  $\Delta$  是对  $(SD, COMPS, OBS)$  的诊断假设不成立, 从而  $\alpha$  否定  $\Delta$ .

由于替换集合  $\sigma$  可以只是一个候选诊断中的嫌疑元件, 也可以是几个候选诊断中选出的嫌疑元件的并, 如果替换  $\sigma$  后观测不变, 利用定理 1.1 可以同时否定几个候选诊断。

**定理 1.2.** 设  $(SD, COMPS)$  是一个系统,  $\sigma = \{c_1, c_2, \dots, c_r\}$  为  $(SD, COMPS)$  的一个替换,  $F$  是对  $(SD, COMPS, OBS)$  的极小冲突, 如果替换发生后换元系统  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$  在相同输入  $IN$  下的观测仍是  $OBS$ , 那么  $F - \sigma$  是对  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma, OBS)$  的冲突。

证明: 因为  $F$  是对  $(SD, COMPS, OBS)$  的极小冲突, 因此  $SD \text{ OBS IN } \{-\neg AB(x) | x \in F\}$  不可满足, 那么  $SD \{-\neg AB(x) | x \in \sigma\} \text{ OBS IN } \{-\neg AB(x) | x \in F - \sigma\}$  不可满足, 即  $SD^\sigma \text{ OBS IN } \{-\neg AB(x) | x \in F - \sigma\}$  不可满足, 因此  $F - \sigma$  是对  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma, OBS)$  的冲突。

这个定理是说, 替换发生后, 如果系统观测值没有改变, 那么替换发生前的冲突集合中的元件, 在去掉被替换元件后, 剩下的元件构成的集合是换元系统的冲突。

## 2 利用替换分解诊断问题

在前面的研究中,  $O$  和  $OBS$  是对整个系统而言的, 有时我们会只对部分输出变量的观测感兴趣, 此时我们只要选择其影响路径上的嫌疑元件作为替换元件就足够了。

**定义 2.1.** 设  $(SD, COMPS)$  是一个系统, 对该系统中参量  $v$  的相关元件是传播或影响  $v$  的例化值 (instantiated value) 的所有可能元件  $RCOMPS_v$ .

例 2.1: 图 1 有 3 个乘法器  $M1, M2, M3$  和 2 个加法器  $A1, A2$  相互连接构成的一个电路, 输入、输出如图 1 所示. 参量  $O1$  的相关元件集  $RCOMPS_{O1}$  是  $\{M1, M2, A1\}$ , 参量  $Y$  的相关元件集  $RCOMPS_Y$  是  $\{M2\}$ . 当某一参量  $v$  的例化值异常时, 其相关元件集合  $RCOMPS_v$  就是一个冲突。

**定义 2.2.** 设  $(SD, COMPS)$  是一个系统,  $\sigma$  为  $(SD, COMPS)$  的一个替换,  $\Delta$  是对  $(SD, COMPS, OBS)$  的候选诊断. 若  $\sigma \cap RCOMPS_v = \sigma \neq \emptyset$ , 那么我们就把对  $\Delta$  的替换测试  $(\sigma, O_v)$  称作相对于  $v$  的部分替换测试, 其中  $O_v$  是替换  $\sigma$  后换元系统中  $v$  的预期观测结果。

例 2.2: 图 1 中的电路, 利用 Reiter 的基于模型诊断方法<sup>[7]</sup> 得到 4 个候选诊断  $[M1], [A1], [M2, M3], [M2, A2]$ . 若取  $\sigma = \{M1\}$ ,  $\sigma \cap RCOMPS_{O1} = \sigma = \{M1\}$ , 则替换测试  $(\{M1\}, O1)$  就是相对于  $O1$  的部分替换测试。

替换发生后的换元系统如果输出结果仍然异常, 新要求新的冲突和候选诊断, 如果我们仅对部分异常输出

的诊断感兴趣,那么我们是否可以把对换元系统冲突的求解过程利用替换的特点化分成此异常输出相关部分子系统与其余部分子系统冲突的求解过程呢?下面的定理回答了这一问题.

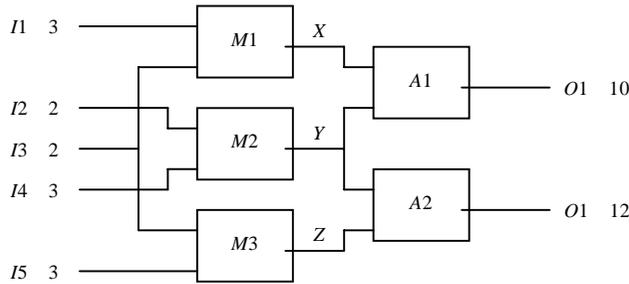


Fig.1 A simple circuit  
图 1 一个简单的电路

定理 2.1. 设  $(SD, COMPS)$  是一个系统,  $\sigma$  为  $(SD, COMPS)$  的一个替换,  $(SD1, COMPS1)$  和  $(SD2, COMPS2)$  是构成该系统的两个子系统, 即  $SD = SD1 \cup SD2$  且  $COMPS = COMPS1 \cup COMPS2$ . 如果  $COMPS1 \cap COMPS2 = C \subseteq \sigma$ . 那么换元系统  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$  在观测  $OBS$  下的极小冲突集合  $MF(SD^\sigma \text{ IN } OBS) = MF(SD1^\sigma \text{ IN } OBS1) \cup MF(SD2^\sigma \text{ IN } OBS2)$ . 其中  $MF(SD \text{ IN } OBS)$  表示从  $SD \text{ IN } OBS$  推出的极小冲突集合,  $OBS1$  和  $OBS2$  分别是只与  $SD1^\sigma$  和  $SD2^\sigma$  相关的参量例化值合取式.

证明:  $F(SD1^\sigma \text{ IN } OBS) \cup F(SD2^\sigma \text{ IN } OBS) \subseteq F(SD^\sigma \text{ IN } OBS)$  是显然的, 因为  $|SD1^\sigma \text{ IN } OBS| = \beta$  或  $|SD2^\sigma \text{ IN } OBS| = \beta$  蕴涵着  $|SD^\sigma \text{ IN } OBS| = \beta$ .

为了证明  $F(SD^\sigma \text{ IN } OBS) \subseteq F(SD1^\sigma \text{ IN } OBS) \cup F(SD2^\sigma \text{ IN } OBS)$ , 我们只要证明  $|SD^\sigma \text{ IN } OBS| = \beta$  蕴涵着  $|SD1^\sigma \text{ IN } OBS| = \beta$  或  $|SD2^\sigma \text{ IN } OBS| = \beta$  就足够了. 因为对任意一个子句  $\beta$ , 假设  $|SD^\sigma \text{ IN } OBS| = \beta$ , 那么一定存在着从  $SD^\sigma \text{ IN } OBS$  到  $\beta$  的推导过程. 我们使用归结方法, 假设  $\beta1$  和  $\beta2$  是在此过程归结在一起的两个子句, 那么  $\beta1$  和  $\beta2$  一定是从  $SD1^\sigma \text{ IN } OBS$  或  $SD2^\sigma \text{ IN } OBS$  推导出的, 因为从  $SD1^\sigma \text{ IN } OBS$  推导出的子句中只有涉及  $C$  的子句才有可能与从  $SD2^\sigma \text{ IN } OBS$  推导出的涉及  $C$  的子句归结 (除此之外, 从两个子系统中推出的子句由于没有公共变量, 因此不能归结). 但由于  $C \subseteq \sigma$ , 即在换元系统  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$  中已不考虑它们, 因此从  $SD1^\sigma \text{ IN } OBS$  推导出的子句不能与  $SD2^\sigma \text{ IN } OBS$  推导出的任意子句归结, 以致于  $|SD1^\sigma \text{ IN } OBS| = \beta$  或  $|SD2^\sigma \text{ IN } OBS| = \beta$ , 由此我们得到  $F(SD^\sigma \text{ IN } OBS) \subseteq F(SD1^\sigma \text{ IN } OBS) \cup F(SD2^\sigma \text{ IN } OBS)$ . 综合上述结果, 我们得到  $F(SD^\sigma \text{ IN } OBS) = F(SD1^\sigma \text{ IN } OBS) \cup F(SD2^\sigma \text{ IN } OBS)$ .

$F(SD1^\sigma \text{ IN } OBS)$  中没有子句会真包含  $F(SD2^\sigma \text{ IN } OBS)$  中任意子句, 反之亦然, 因为  $SD1^\sigma$  和  $SD2^\sigma$  之间的公共元件不考虑. 因此在  $F(SD^\sigma \text{ IN } OBS)$  中的最小子句是那些在  $F(SD1^\sigma \text{ IN } OBS)$  中的最小子句或在  $F(SD2^\sigma \text{ IN } OBS)$  中的最小子句, 因而  $MF(SD^\sigma \text{ IN } OBS) = MF(SD1^\sigma \text{ IN } OBS) \cup MF(SD2^\sigma \text{ IN } OBS)$ .

容易证明  $MF(SD1^\sigma \text{ IN } OBS) = MF(SD1^\sigma \text{ IN } OBS1)$  和  $MF(SD2^\sigma \text{ IN } OBS) = MF(SD2^\sigma \text{ IN } OBS2)$ , 以致于  $MF(SD^\sigma \text{ IN } OBS) = MF(SD1^\sigma \text{ IN } OBS1) \cup MF(SD2^\sigma \text{ IN } OBS2)$ .

例 2.3: 对图 1 中电路, 假设  $\sigma = \{M2\}$ , 受  $M2$  的状态影响的参量是  $O1$  和  $O2$ ,  $SD1$  是相关元件  $M1, M2, A1$  部分的背景理论描述,  $COMPS1 = \{M1, M2, A1\}$ ;  $SD2$  是相关元件  $M2, M3$  和  $A2$  部分的背景理论描述,  $COMPS2 = \{M2, M3, A2\}$ .  $C = COMPS1 \cap COMPS2 = \{M2\} \subseteq \sigma$ . 替换发生后, 若观测到  $O1=11$  和  $O2=13$ , 那么换元系统的极小冲突集合  $MF(SD^\sigma \text{ IN } OBS) = \{\{M1, A1\}, \{M3, A2\}\}$ , 两个子系统的极小冲突集合分别是  $MF(SD1^\sigma \text{ IN } OBS) = \{\{M1, A1\}\}$  和  $MF(SD2^\sigma \text{ IN } OBS) = \{\{M3, A2\}\}$ . 与我们利用定理 2.1 得到的结果是相同的. 若观测结果没有变化, 即  $O1=10$  和  $O2=12$ , 那么换元系统的极小冲突集合  $MF(SD^\sigma \text{ IN } OBS) = \{\{M1, A1\}\}$ , 两个子系统的极小冲突集合分别是  $MF(SD1^\sigma \text{ IN } OBS) = \{\{M1, A1\}\}$  和  $MF(SD2^\sigma \text{ IN } OBS) = \emptyset$ . 这与利用定理 2.1 得到的结果仍是相同的.

当替换使换元系统中各子系统间公共元件不必考虑时, 就可利用定理 2.1 把对系统冲突求解转化成对各子

系统冲突的求解过程.如果我们仅对部分异常观测值感兴趣,则只需把与此观测值相关的子系统与系统其余部分的公共元件替换,就可以把这部分子系统独立出来,单独进行诊断,这样就降低了问题的复杂性.此定理特别适用于树型(或类似树型)结构系统替换测试求解冲突集合.

前面研究的是在诊断系统求出一些候选诊断的基础上,利用正常元件替换嫌疑元件进行的替换测试与分解,实际上,基于一致的诊断问题复杂性比较高,一般情况下是 NP 的,因此求解候选诊断集的过程随着系统元件个数的增多而呈指数增长.例如,对于有  $n$  个元件的系统诊断,最坏情况下有  $2^n$  个候选诊断,而  $n-1$  个元件的系统只有  $2^{n-1}$  个,如果能够把待诊断系统分成几个子系统,虽然不能够在最坏情况下降低计算复杂性,但绝大多数情况下,系统的诊断数量会呈指数级减少(如当  $n=6$  时,  $2^6=64$ ;若  $n$  分为 5 和 1,则变为  $2^5+2^1=34$ ;若  $n$  分为 4 和 2,则  $2^4+2^2=20$ ;若  $n$  分为 3 和 3,则  $2^3+2^3=16$ ),这也是研究人员提高问题求解效率的有效办法,因此,研究分解诊断问题十分必要.为了方便描述问题,我们需要给出新的概念.

**定义 2.3.** 设  $(SD, COMPS)$  是一个系统,诊断问题是一个三元组  $(SD, COMPS, OBS)$ ,相对于  $(SD, COMPS, OBS)$  的替换诊断问题是一个三元组  $(SD, \langle RCOMPS_{OBS^+}, RCOMPS_{OBS^-} \rangle, \langle OBS^+, OBS^- \rangle)$ ,其中  $OBS = OBS^+ \cup OBS^-$ ,  $COMPS = RCOMPS_{OBS^+} \cup RCOMPS_{OBS^-}$ ,  $OBS^+$  是与系统正常预测行为相一致的观测,  $OBS^-$  是与系统正常预测行为不相一致的观测,  $RCOMPS_{OBS^+}$  与  $RCOMPS_{OBS^-}$  是分别和  $OBS^+$  与  $OBS^-$  相对应的相关元件集合.那么由定理 2.1 我们能够得到下面的结论.

**定理 2.2.** 设  $(SD, \langle RCOMPS_{OBS^+}, RCOMPS_{OBS^-} \rangle, \langle OBS^+, OBS^- \rangle)$  是相对于  $(SD, COMPS, OBS)$  的替换诊断问题,令  $RCOMPS_{OBS^+} \cap RCOMPS_{OBS^-} = \sigma$ .若  $\sigma = \emptyset$ ,则对  $(SD, COMPS, OBS)$  的诊断等价于对  $(SD, RCOMPS_{OBS^-}, OBS^-)$  的诊断.

这个定理是说,若异常观测的相关元件与正常观测的相关元件没有交,那么引起系统异常的元件只能在异常观测相关元件子系统中,因此考虑这一部分的诊断就足够了.

**定理 2.3.** 设  $(SD, \langle RCOMPS_{OBS^+}, RCOMPS_{OBS^-} \rangle, \langle OBS^+, OBS^- \rangle)$  是相对于  $(SD, COMPS, OBS)$  的替换诊断问题,令  $RCOMPS_{OBS^+} \cap RCOMPS_{OBS^-} = \sigma$ .若  $\sigma \neq \emptyset$  且对  $\sigma$  中元件进行替换后系统  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$  的观测仍为  $OBS$ ,则对  $(SD, COMPS, OBS)$  的诊断等价于对  $(SD, RCOMPS_{OBS^-} \setminus \sigma, OBS^-)$  的诊断.

这个定理是说,公共元件正常后,若异常的观测不变,说明引起异常行为的故障元件只能在  $RCOMPS_{OBS^-} \setminus \sigma$  中.因此只要考虑这部分子系统就足够了.

**命题 2.1.** 设  $(SD, \langle RCOMPS_{OBS^+}, RCOMPS_{OBS^-} \rangle, \langle OBS^+, OBS^- \rangle)$  是相对于  $(SD, COMPS, OBS)$  的替换诊断问题,令  $RCOMPS_{OBS^+} \cap RCOMPS_{OBS^-} = \sigma$ .若  $\sigma \neq \emptyset$ ,且对  $\sigma$  中元件替换后系统  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$  的输出  $OBS^\sigma$  正常,那么对  $(SD, COMPS, OBS)$  的诊断等价于对  $(SD, RCOMPS_{OBS^+}, OBS^+)$  的诊断.

换元系统的输出  $OBS^\sigma$  是系统正常行为,表明  $\sigma$  中有故障元件,但  $OBS^+$  部分系统输出行为没有变化,可以推出  $RCOMPS_{OBS^+} \setminus \sigma$  中还有故障元件,而  $OBS^-$  部分系统输出行为变为正常,表明原系统这部分行为的异常是由  $\sigma$  中异常元件引起的,故原系统的诊断在没有新的信息时只考虑  $RCOMPS_{OBS^+}$  部分就可以了.

**命题 2.2.** 设  $(SD, \langle RCOMPS_{OBS^+}, RCOMPS_{OBS^-} \rangle, \langle OBS^+, OBS^- \rangle)$  是相对于  $(SD, COMPS, OBS)$  的替换诊断问题,令  $RCOMPS_{OBS^+} \cap RCOMPS_{OBS^-} = \sigma$ .若  $\sigma \neq \emptyset$ ,且对  $\sigma$  中元件替换后系统  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma)$  的输出为  $OBS_-^\sigma \cup OBS_+^\sigma$ ,那么对  $(SD^\sigma, COMPS^\sigma, OBS_-^\sigma \cup OBS_+^\sigma)$  的诊断等价于对  $(SD^\sigma, RCOMPS_{OBS^-} \setminus \sigma, OBS_-^\sigma)$  的诊断.其中  $OBS_+^\sigma$  和  $OBS_-^\sigma$  分别表示换元系统的正常与异常输出行为.

由此命题的结论,我们就能够把换元系统的诊断限定在较小的范围内,并利用定理 2.1 得到进一步的分解,从而以较小的代价求出系统的诊断.

**例 2.4:**如图 2 所示,是广播站或电信局中使用的音频转换开关矩阵电路.该矩阵电路可以根据用户需要构造,能够包含 1 000 个输入输出,因而可由多达 1 000 000 个元件组成.为了说明并简化问题,我们使用 1 个输入放大器,1 000 个输出放大器和 1 000 个开关元件构成的  $1 \times 1000$  矩阵,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,并假定导线正常.三角形的元件表示缓冲器,矩形的元件表示与门.

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  $c_5$  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, $c_3$  的输出应为 0, $c_5$  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标准方法,我们将得到下列冲突集: $ab(c_2)\vee ab(c_3),ab(c_1)\vee ab(c_4)\vee ab(c_5),ab(c_4)\vee ab(c_5)\vee ab(c_6)\vee ab(c_7),\dots,ab(c_4)\vee ab(c_5)\vee ab(c_{2000})\vee ab(c_{2001})$ .由这些冲突利用求最小碰集的方法,我们将得到大约  $2\times 3\times 2^{998}$  个候选诊断(在计算时,我们对重复的候选诊断仅保留一个),计算量是惊人的.实际上,我们可以利用元件替换的方法进行诊断问题的分解,把要诊断的部分控制在少数几个元件上,这样就会简化计算,提高效率.比如,我们用同型号完好的缓冲器替换  $c_1$ ,如果系统输出行为没有变化,则对换元系统的诊断只考虑有元件  $c_2$  与  $c_3,c_4$  与  $c_5$  构成的两个子系统就足够了,因此问题得到简化;如果系统输出发生变化,则对换元系统的诊断只考虑输出异常的相关元件子系统就足够了,问题同样得到简化.

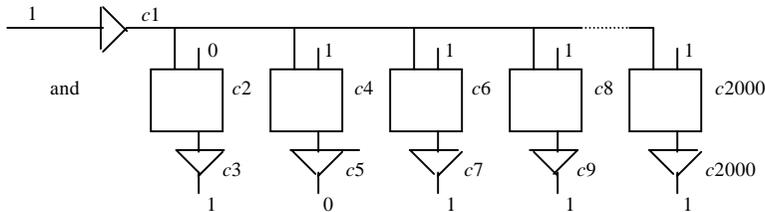


Fig.2 Logical representation of an audio matrix

图 2 音频矩阵电路逻辑表示

### 3 结论与分析

基于模型的诊断,像其他一些约束满足问题一样,计算代价较高,一般情况下是 NP 的.为了降低问题复杂性,提高诊断效率,诊断工作者进行了一些研究.比如,1992 年,Mozeic 利用诊断系统的层次性从抽象到详细层次诊断控制搜索的范围<sup>[14]</sup>,从而提高求解诊断的效率,但是这种方法对相同层次上多个元件无效;1994 年,Freitag 和 Friedrich 利用诊断系统结构与候选诊断优先标准分离诊断<sup>[15]</sup>,能够处理相同层次上多个元件的分离问题,但是仍然要产生多个候选诊断;Darwiche 和 Provan 利用诊断系统的观测值分解诊断问题<sup>[16]</sup>,如果已经观测到系统的公共参量值,那么利用他们的方法就能够分解系统,如果公共参量值没有观测到则无法使用;我们研究了利用有条件假定公共参量例化值分解诊断问题<sup>[17]</sup>,在各公共参量可取值较少时非常有效;1995 年,Fattah 和 Dechter 把树串应用于树型结构电路的诊断<sup>[18]</sup>,给出了实验结果,但是他们没有给出形式化刻画,而利用元件替换分解诊断问题的研究还没有看到.为此,本文提出了部分替换测试、替换分解诊断问题的概念,并利用替换给系统输出行为带来的影响刻画了诊断问题分解的过程.通过例 2.4 可以看出,与 Freitag 和 Friedrich 的工作相比,利用我们的方法仅需产生几个候选诊断,在公共参量不可测试或测试成本高而替换元件方便时,我们的方法效果较好.希望本文的结果能够为提高诊断效率提供一个可行方案.

由于替换的特点,这种方法不仅适用于基于模型的诊断,而且也适用于其他诊断方法获得的候选诊断鉴别,替换测试尤其适用于标准插件大量应用的电子电路领域.此外,对树型结构的网络、供电、供水、供气等系统发生故障时,维修人员同样可以利用上述方法,首先判定管路或线路公共节点元件是否存在问题,如果故障元件在节点处,问题会很快得到确认,如果问题不在公共节点处,那么根据故障征兆以及获得的信息也会很快缩小搜索范围,因此在这些领域有一定的应用前景.宇宙飞船、导弹、卫星或空间探测器在飞行过程中发生故障时也可以采用备用元件替换的办法进行修复.把本文的方法应用到产品配置中,也是一个值得研究的问题.

### References:

- [1] Li ZS, Jiang YF. A retrospect prospect on model-based diagnostic reasoning. *Computer Science*, 1998,25(6):54-57 (in Chinese with English abstract).
- [2] Hamscher W, Console L, de Kleer J. *Readings in Model-Based Diagnosis*. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1992. 1-24.
- [3] Console L, Friedrich G. Introduction. In: Console L, Friedrich G, eds. *Model-Based Diagnosis*. Basel-Switzerland: Science Publishers, 1994. 1-10.

- [4] McIlraith S, Reiter R. On tests for hypothetical reasoning. In: Hamscher W, Console L, de Kleer J, eds. Readings in Model-Based Diagnosis. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1992, 89–96.
- [5] McIlraith S. Generating tests using abduction. In: Dyle J, Sandwall E, Torasso P, eds. Proc. of the 4th Int'l Conf. on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. Bonn: Morgan Kaufmann Publishers, 1994. 449–460.
- [6] Struss P. Testing for discrimination of diagnoses. In: Proc. of the 5th Int'l Workshop on Principles of Diagnosis (DX'94). New Paltz, 1994. [http://www.radig.informatik.tu-muench.de/People/struss/index\\_e.html](http://www.radig.informatik.tu-muench.de/People/struss/index_e.html)
- [7] Reiter R. A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, 1987,32(1):57–96.
- [8] Hou AM. A theory of measurement in diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, 1994,65(2):281–328.
- [9] Li ZS, Jiang YF. A correction and extension to the testing theory for model-based diagnosis. *Journal of Software*, 2000,11(7): 979–983 (in Chinese with English abstract).
- [10] Jiang YF, Li ZS. On component replacement and replacement tests for model-based diagnosis. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(6):666–672 (in Chinese with English abstract).
- [11] Friedrich G, Stumptner M, Wotawa F. Model-Based diagnosis of hardware designs. *Artificial Intelligence*, 1999,111(1-2):3–39.
- [12] Stumptner M, Wotawa F. A model-based tool for finding faults in hardware designs. 1996. <http://www.ist.tugraz.at/staff/wotawa.t>
- [13] Williams BC, Nayak PP. A model-based approach to reactive self-configuring systems. 1996. [http://www.qrg.northwestern.edu/papers/Files/qr-workshops/QR96/Williams\\_1996\\_Model-Based\\_Approach\\_Self-Configuring\\_Systems.pdf](http://www.qrg.northwestern.edu/papers/Files/qr-workshops/QR96/Williams_1996_Model-Based_Approach_Self-Configuring_Systems.pdf)
- [14] Mozetic I. Hierarchical model-based diagnosis. In: Hamscher W, Console L, de Kleer J, eds. Readings in Model-Based Diagnosis. San Mateo: Morgan-Kaufmann Publishers, 1992. 354–372.
- [15] Freitag H, Friedrich G. Focusing on independent diagnosis problems. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 1994,11: 329–349.
- [16] Darwiche A, Provan G. The effect of observations on the complexity of model-based diagnosis. In: Proc. of the AAAI'97. Providence, 1997. 94–99. <http://www.cs.ucla.edu/~darwiche/abstracts.htm>
- [17] Li ZS, Jiang YF, Wang T. The decomposition for model-based diagnosis problems and its algorithm. *Chinese Journal of Computers*, 2003,26(9):1171–1176 (in Chinese with English abstract).
- [18] Fattah YE, Dechter R. Diagnosing tree-decomposable circuits. In: Proc. of the 14th Int'l Joint Conf. on Artificial Intelligence. Montrel, 1995. <http://citeseer.csail.mit.edu/elfattah95diagnosing.html>

#### 附中文参考文献:

- [1] 李占山,姜云飞.基于模型诊断推理的回顾与展望. *计算机科学*,1998,25(6):54–57.
- [9] 李占山,姜云飞.基于模型诊断测试理论的修正与扩充. *软件学报*,2000,11(7):979–983.
- [10] 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.
- [17] 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):1171–1176.