

# 基于值传递的快速故障诊断

张学农<sup>1,2</sup> 姜云飞<sup>1</sup> 蔡永铭<sup>2</sup>

(中山大学软件研究所 广州 510275)<sup>1</sup> (广东药学院网络中心 广州 510224)<sup>2</sup>

**摘要** 本文提出了一种基于值传递的系统模型,重新定义了诊断,该定义与 Reiter 经典的诊断定义等价。在此基础上,给出了一种线性时间找到一个极小诊断的算法,该方法不需要计算极小冲突而直接得到极小诊断。该算法在给出诊断的同时,还给出了系统与该诊断对应的当前行为的一种合理解释。最后,给出了该方法与诊断测试结合实现系统修复的方法。

**关键词** 值传递,基于模型诊断,极小诊断

## An Efficient Approach to Diagnosing a System with Value Propagation Model

ZHANG Xue-Nong<sup>1,2</sup> JIANG Yun-Fei<sup>1</sup> CAI Yong-Ming<sup>2</sup>

(Institute of Software Research, Zhongshan University, Guangzhou 510275)<sup>1</sup>

(Network Center, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510224)<sup>2</sup>

**Abstract** This paper presents a system model based on value propagation and redefined the diagnosis, which is equivalent with Reiter's classical definition. On the bases of above, a linear-time algorithm for finding one minimal diagnosis is brought out. It need not compute minimal conflicts. Corresponding to the minimal diagnosis, it outputs a suitable interpretation of system's current behavior. At last, this paper presents a method for repairing system by integrating diagnoses and test.

**Keywords** Value propagation, Model-based diagnosis, Minimal diagnosis

## 1 引言

基于模型诊断<sup>[1]</sup>就是根据系统组成元件之间的连接建立起待诊断系统模型。如果观测到的系统行为与系统预期行为有差异,说明系统存在故障。利用逻辑推理,能够确定引发故障的元件集合。

模型构建是基于模型诊断的基础。经典模型<sup>[1]</sup>采用一阶逻辑表示系统,描述系统的组成和行为。Luca Chittaro<sup>[2]</sup>等扩充了经典模型,提出了多错误分层诊断模型,描述元件在各种状态下的行为,包括正常状态和各种不同的异常状态。P. Baroni<sup>[3]</sup>等提出了一种采用有限状态自动机描述动态系统的模型。Console<sup>[4]</sup>等采用进程代数刻画诊断问题,给出了不同类型的物理系统的统一描述。

诊断的计算复杂性是很高的,提高诊断的效率极其重要。Luca Chittaro<sup>[2]</sup>等采用结构抽象的方法实现分层的基于模型的诊断。李占山<sup>[5]</sup>等研究了基于模型的诊断问题分解及其算法。Yannick Pencole<sup>[6]</sup>等提出了大规模离散事件系统的分解诊断方法。欧阳丹彤<sup>[7]</sup>等通过引入定义信息和表示伴随关系的信息,减少候选诊断的数量。陈荣<sup>[8]</sup>等提出了含约束的基于模型的诊断系统,通过增加约束控制诊断空间。Fattah 和 Dechter<sup>[9]</sup>与 Stumptner 和 Wotawa<sup>[10]</sup>给出了诊断树型结构系统的方法。栾尚敏<sup>[11]</sup>等给出了利用结构信息的故障诊断方法,对一些特殊结构的系统在多项式时间内结束。Mozetic<sup>[12]</sup>与 Childress 和 Valtorta<sup>[13]</sup>介绍了求第  $k$  个诊断的方法。Gerhard Friedrich<sup>[14]</sup>等给出了多项式时间找到一个极小诊断的方法。Portinale<sup>[15]</sup>等结合了基于案例的推理和基于模型的

推理方法,提高了诊断的效率。Console<sup>[16]</sup>、Heiko Milde<sup>[17]</sup>等提出了时态判定树并应用于系统实时诊断。

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<sup>[18]</sup>。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。

Reite 将诊断的过程分两步:1)产生所有的极小冲突集;2)求极小冲突集的极小碰集得到极小诊断。然而通过定理证明器或归结方法计算冲突集的复杂性是指数级的。

Reiter 的方法以及其后改进没有显式地考虑系统的值传递,值传递隐含在归结过程的变量替换中。首先,许多归结与冲突集的产生无关。其次,归结过程可能产生许多重复的结果。因此,该方法的效率比较低。

人在实际的故障诊断过程中会直接考虑系统的值传递,尽快找到一个可能性较大的候选诊断,然后对其进行测试和鉴别,往往能获得很高的效率。本文尝试显式地考虑系统的值传递以实现极小诊断的高效计算。

本文内容组织如下:第2节通过实例说明值传递诊断方法的主要思想;第3节给出值传递模型的形式描述和值传递诊断方法的理论基础;第4节给出值传递诊断算法、讨论算法的复杂性并给出相应的实验结果;第5节叙述与相关工作的比较。

## 2 基于值传递故障诊断的基本思想

人在故障诊断过程中通常会直接考虑系统的值传递。考虑如下两个断言:

(1) 给定静态的待诊断系统, 针对每一次观察, 系统所有元件都有一个具体的输入输出值与系统当前的输入输出相对应。

(2) 如果元件的输入输出值与其功能描述不一致, 则该元件故障。

模仿人的直观推理过程, 系统元件的值传递可以从正向和逆向两方面考虑。所谓正向的值传递是根据元件的输入确定输出, 逆向的值传递是根据元件的输出和部分输入确定其它输入。为了寻找候选诊断, 我们尽可能假设系统元件正常, 并且根据系统当前的输入输出进行值传递推理, 直到确定了系统所有元件的输入输出值。对于未进行值传递的元件, 如果通过上述推理确定的输入输出值与其功能描述不一致, 则认为该元件故障。

例 1 考虑图 1 所示的系统: 元件 M1、M2、M3 是乘法器, M1 的可靠性为 0.97, M2 的可靠性为 0.99, M3 的可靠性为 0.97。A1、A2 是加法器, A1 的可靠性为 0.98, A2 的可靠性为 0.975。系统输入为 A、C、E=3, B、D、F=2, 系统输出为 G=10, H=12。极小诊断有 4 个: {M1}、{A1}、{M2、A2}、{M2、M3}。

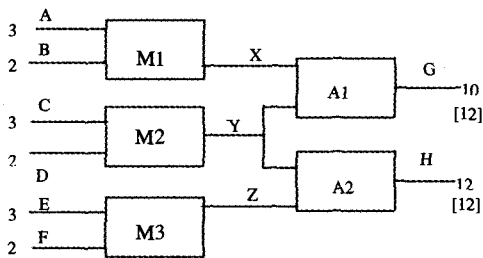


图 1 Playbox 系统

通过值传递推理, 可以快速寻找极小诊断。首先, 假设可靠性最高的 M2 正常, 根据 M2 的输入可以确定它的输出 Y=6; 再假设可靠性较高 A1 正常, 根据 A1 的输入和输出可以确定它的输入 X=4; 最后假设可靠性较高 A2 正常, 根据 A2 的输入和输出可以确定它的输入 Z=6。至此, 所有元件的输入输出值都确定了。显然, 元件 M2、A1、A2 的输入输出值和它的功能是一致的。考察元件 M1 和 M3, 可以确定 M3 的输入输出和它的功能一致, 而 M1 的输入输出和它的功能不一致, 由此可以得到一个极小诊断 {M1}。显然, 该诊断能合理地解释当前的现象: 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。

一旦获得一个极小诊断, 我们可以立刻进行测试。即使我们得到所有的极小诊断, 仍然需要进行测试和鉴别。

如果经过测试, 表明元件 M1 是故障元件, 我们可以对其进行修复或替换。如果测试表明 M1 正常, 则该测试对系统进行了限制, 即 M1 的可靠性限定为 1, 显然 M1 的输出值 X=6。假设可靠性最高的 M2 正常, 根据 M2 的输入可以确定它的输出 Y=6; 再假设可靠性较高 A2 正常, 根据 A2 的输入和输出可以确定它的输入 Z=6; 至此, 所有元件的输入输出值都确定了。考察元件 M3 和 A1, 可以得到极小诊断 {A1}。

如果 A1 仍然不是故障元件, 则继续通过上述方法可以找到极小诊断 {M2、M3} 和 {M2、A2}。

从上述例子可以看出值传递推理方法可以快速完成一次计算, 直接得到一个极小诊断。并且通过与测试相结合, 实现

诊断产生、诊断测试和修复的迭代, 直到获得真正的诊断并完成系统修复。然而, 通过该方法找到的候选诊断是否一定是极小诊断; 其次, 通过该方法是否一定能得到极小诊断; 我们将在下一节中尝试讨论。

### 3 值传递模型

Reiter<sup>[1]</sup> 采用一阶逻辑描述系统模型, 适合采用归结方法查找冲突集。为了显式地考虑系统的值传递, 我们采用不同于经典模型的值传递模型, 用有向图表示系统结构, 值约束关系表示元件功能。

#### 定义 1 系统模型

系统  $\Sigma$  的模型  $M_{\Sigma}$  是一个有向图  $G(V, E)$ :

(1)  $V = I(\Sigma) \cup O(\Sigma) \cup COMPS(\Sigma)$ ;

(2)  $E = \{e_{ij} | j \in COMPS(\Sigma) \wedge i \text{ 的输出是 } j \text{ 的输入}\}$ 。

其中  $I(\Sigma)$  是系统  $\Sigma$  的输入节点集合,  $O(\Sigma)$  是系统  $\Sigma$  的输出节点集合,  $COMPS(\Sigma)$  是系统  $\Sigma$  的元件集合。当元件  $c$  处于正常状态时, 它的输入和输出满足反映元件功能的值约束关系  $R_{normal}(c)$ , 约束变量为  $x_1, \dots, x_n$ , 其中  $x_1, \dots, x_{n-1}$  表示元件  $c$  的输入,  $x_n$  表示输出。  $R_{normal}(c) = \{ \langle a_1, \dots, a_n \rangle | f(a_1, \dots, a_{n-1}) = a_n \text{ and } a_i \in D(x_i) \}$ , 其中  $D(x_i)$  是变量  $x_i$  的可能取值的集合, 函数  $f: x_1, \dots, x_{n-1} \rightarrow x_n$  表示元件  $c$  的功能。当元件  $c$  处于故障状态时, 它的输入  $x_1, \dots, x_{n-1}$  和输出  $x_n$  满足的值约束关系  $R_{abnormal}(c) = D(x_1) \times \dots \times D(x_n)$ 。  $E$  中的每条边都有约束变量与之对应。

如图 1 所示系统的元件 M1, A 和 B 是输入变量, X 是输出变量, 功能是  $A \times B = X$ 。M1 正常状态下对应的值约束关系如下:

$$R_{normal}(M1) = \{ \langle a_1, a_2, a_3 \rangle | a_1 \times a_2 = a_3 \text{ and } a_1 \in D(A), a_2 \in D(B), a_3 \in D(X) \}$$

由于系统是静态的, 不存在反馈结构, 因此  $G(V, E)$  是有向无环图。图 2 就是图 1 所示系统对应的有向图。

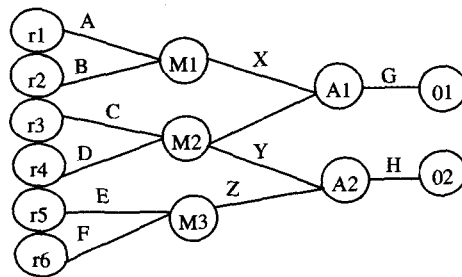


图 2 图 1 所示系统对应的有向图

#### 定义 2 系统赋值

系统赋值  $\langle I_V, I_E \rangle$  是指对系统所有元件  $c \in COMPS(\Sigma)$  指派一个状态  $s \in \{normal, abnormal\}$ , 对所有约束变量  $x$  指派一个值  $a \in D(x)$ 。如果  $I_{VP} \subseteq I_V, I_{EP} \subseteq I_E$ , 则称  $\langle I_{VP}, I_{EP} \rangle$  是部分系统赋值。

#### 定义 3 一致的系统赋值

系统赋值  $\langle I_V, I_E \rangle$  是一致的, 当且仅当任意元件  $c \in COMPS(\Sigma)$ , 满足  $\langle I_E(x_1), \dots, I_E(x_n) \rangle \in R_m(c)$ , 其中  $x_1, \dots, x_n$  是元件  $c$  对应的约束变量,  $m = I_V(c)$ 。

#### 定义 4 诊断问题

关于系统  $\Sigma$  的诊断问题是一个三元组  $(M_{\Sigma}, IN, OUT)$ , 其中  $M_{\Sigma}$  是系统模型, IN 是系统所有输入对应的约束变量的赋值, OUT 是所有系统输出对应的约束变量的赋值。

**定义 5 系统诊断**

系统诊断是一个一致的系统赋值  $\langle I_V, I_E \rangle$ , 且对任意与系统输入对应的约束变量  $x, I_E(x) = IN(x)$ ; 对任意与系统输出对应的约束变量  $y, I_E(y) = OUT(y)$ 。

系统诊断是对系统的当前行为的一种可能解释: 如果系统元件赋值  $I_V$  表明所有元件正常, 则系统约束变量赋值  $I_E$  给出了系统的正常行为描述; 如果  $I_V$  表明某些元件故障, 则  $I_E$  给出了系统对应的行为描述: 由于某些元件故障而输出异常, 这些输出值经过其它正常元件的传播, 最终导致系统当前的异常输出。

实际上, 本文定义的诊断和 Reiter 定义的基于一致性的诊断是等价的。本文的诊断是对系统的当前行为的一种合理解释, 因此在逻辑上是一致的。反之亦然。

**定义 6 极小诊断**

称系统诊断  $\langle I_V, I_E \rangle$  是极小诊断, 当且仅当不存在系统诊断  $\langle I_V', I_E' \rangle$ , 满足  $\{c \in COMPS(\Sigma) \mid I_V'(c) = abnormal\} \subset \{c \in COMPS(\Sigma) \mid I_V(c) = abnormal\}$ 。

为了表示方便, 我们把系统极小诊断  $\langle I_V, I_E \rangle$  简化地表示为故障元件集合:  $D = \{c \in COMPS(\Sigma) \mid I_V(c) = abnormal\}$ 。这与 Reiter 的极小诊断表示方法是相同的。

接下来讨论系统的值传递及其与系统诊断之间的关系。

**定义 7 元件的值传递**

对任意正常元件  $c$ , 通过已知部分变量值  $x_1 = a_1, \dots, x_k = a_k$  和关系  $R_{normal}(c)$  确定其它变量的值  $y_1 = b_1, \dots, y_j = b_j$  称为元件  $c$  的值传递, 记为  $c[(x_1/a_1, \dots, x_k/a_k) \rightarrow (y_1/b_1, \dots, y_j/b_j)]$ 。

根据元件的输入确定输出是正向的值传递, 根据元件的输出和部分输入确定其它输入是逆向的值传递。例如图中元件  $M1$ , 由  $A=3$  和  $B=2$  确定  $X=6$  就是元件  $M1$  的值传递。

**定义 8 系统值传递**

系统值传递是一个形如  $\langle I_{VP1}, I_{EP1} \rangle \dots \langle I_{VPn}, I_{EPn} \rangle$  的部分系统赋值序列, 满足: 1. 序列中任意两个相邻的元素  $\langle I_{VPi}, I_{EPi} \rangle$  和  $\langle I_{VPi+1}, I_{EPi+1} \rangle$ , 存在一个值传递  $c[(x_1/a_1, \dots, x_k/a_k) \rightarrow (y_1/b_1, \dots, y_j/b_j)]$ , 满足  $\{x_1/a_1, \dots, x_k/a_k\} \subseteq I_{EPi}$ , 使得  $I_{VPi} \cup \{c/normal\} = I_{VPi+1}, I_{EPi} \cup \{y_1/b_1, \dots, y_j/b_j\} = I_{EPi+1}$ 。2.  $I_{VP1} = \emptyset, I_{EP1} = IN \cup OUT, EPn = E$ 。记  $I_{VPn}$  为  $I_{VP}$ , 称  $\langle I_{VP}, I_E \rangle$  为系统值传递的结果, 其中  $VP$  是所有完成值传递的元件集合。

系统值传递是给定系统输入、输出的情况下, 通过元件的值传递对系统  $G(V, E)$  的节点和边赋值的过程。系统值传递的结果是对图  $G(V, E)$  所有边(约束变量)的赋值  $I_E$  和对完成值传递的元件的赋值  $I_{VP}$ 。

**例 2** 如图 1 所示的系统, 序列  $u_1 u_2 u_3 u_4$  就是一个系统值传递的实例,  $u_4$  就是系统值传递的结果。

$$u_1 = \langle \emptyset, \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/10, H/12\} \rangle$$

$$u_2 = \langle \{M2/normal\}, \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/10, H/12, Y/6\} \rangle$$

$$u_3 = \langle \{M2/normal, A1/normal\}, \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/10, H/12, Y/6, X/4\} \rangle$$

$$u_4 = \langle \{M2/normal, A1/normal, A2/normal\}, \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/10, H/12, Y/6, X/4, Z/6\} \rangle$$

$$u_1 u_2 \text{ 对应的元件值传递是 } M2[(C/3, D/2) \rightarrow (Y/6)]$$

$$u_2 u_3 \text{ 对应的元件值传递是 } A1[(G/10, Y/6) \rightarrow (X/4)]$$

$$u_3 u_4 \text{ 对应的元件值传递是 } A2[(H/12, Y/6) \rightarrow (Z/6)]$$

系统值传递的结果的直观含义如下: 给定系统输入、输出并确定部分元件正常, 如果通过这些元件可以完成系统值传递, 则系统值传递的结果反应了系统当前的必然行为(见定理 1)。

**定理 1** 给定系统输入输出, 确定正常元件集合  $N, I$  为所有元件的实际输入输出的变量-值对应关系集合, 如果存在系统值传递得到结果  $\langle I_{VP}, I_E \rangle$ , 且  $VP \subseteq N$ , 则  $I_E = I$ 。

证明: 通过系统值传递, 图  $G(V, E)$  所有边的值都被正向的值传递或逆向值传递确定。设  $I_{EP}$  对应正向的值传递元件完成的赋值,  $I_{EN}$  对应逆向的值传递完成的赋值,  $IN \cup OUT \cup I_{EP} \cup I_{EN} = I_E$ , 并且  $I_{EP} \cap I_{EN} = \emptyset$ 。按照对  $I_E$  的划分, 对  $I$  做同样的划分,  $I_P$  对应  $I_{EP}, I_N$  对应  $I_{EN}, IN \cup OUT \cup I_P \cup I_N = I$ , 并且  $I_P \cap I_N = \emptyset$ 。

由于  $VP \subseteq N, N$  为已知正常的元件集合, 易知  $I_P = I_{EP}$ 。

由于图  $G(V, E)$  是有向无环图, 在逆向的值传递元件中, 存在元件  $c$  的输出被  $OUT$  赋值。设  $I_{EN}(x)$  是  $c$  进行值传递得到的输入赋值, 由于  $VP \subseteq N$ , 因此  $c$  是正常元件, 根据元件值传递的定义, 可知  $I_N(x) = I_{EN}(x)$ , 否则不可能得到当前的系统输出。如果直接提供上述输入的元件  $c'$  也是逆向的值传递元件,  $I_{EN}(x')$  是  $c'$  进行值传递得到的输入赋值, 通过同样的方法可以证明  $I_N(x') = I_{EN}(x')$ 。通过对所有逆向的值传递元件做上述判断, 可以证明  $I_N = I_{EN}$ 。

由上述结论可知,  $I_E = I$ 。

**定理 2** 给定系统  $\Sigma$  的诊断问题  $(M_\Sigma, IN, OUT)$ , 存在系统值传递可以得到系统值传递结果  $\langle I_{VP}, I_E \rangle$ 。

证明: 由于系统行为是确定的, 对于系统的任意元件, 确定其所有输入值, 就可以确定其输出值, 因此, 给定系统的输入  $IN$  和输出  $OUT$ , 如果存在未被赋值的变量, 总是可以通过正向的值传递确定该变量的值, 尽管也可能通过逆向的值传递确定该变量的值。换句话说, 如果存在未被赋值的变量, 一定存在可以进行值传递的元件。因此, 给定系统  $\Sigma$  的诊断问题  $(M_\Sigma, IN, OUT)$ , 存在系统值传递可以得到系统值传递结果  $\langle I_{VP}, I_E \rangle$ 。

**定理 3** 给定系统  $\Sigma$  的诊断问题  $(M_\Sigma, IN, OUT)$ , 如果存在系统值传递得到结果  $\langle I_{VP}, I_E \rangle$ , 则存在一个系统极小诊断  $\langle I_V, I_E \rangle$  与  $\langle I_{VP}, I_E \rangle$  对应。

证明: 给定系统  $\Sigma$  的诊断问题  $(M_\Sigma, IN, OUT)$ , 如果存在系统值传递得到结果  $\langle I_{VP}, I_E \rangle$ , 构造对未经值传递的元件的赋值  $I$ , 满足对任意未经值传递的元件  $c$ , 如果  $\langle I_E(x_1), \dots, I_E(x_n) \rangle \in R_{normal}(c)$ , 其中  $x_1, \dots, x_n$  是  $c$  对应的约束变量, 则  $I(c) = normal$ , 否则  $I(c) = abnormal$ 。令  $I_V = I \cup I_{VP}$ , 由系统诊断的定义可知  $\langle I_V, I_E \rangle$  是一个系统诊断。

假设  $\langle I_V, I_E \rangle$  不是系统  $\Sigma$  的极小诊断, 则存在  $\langle I_V', I_E' \rangle$  也是系统诊断, 记  $D = \{c \in COMPS(\Sigma) \mid I_V(c) = abnormal\}, D' = \{c' \in COMPS(\Sigma) \mid I_V'(c') = abnormal\}$ , 由定义 6 可知  $D' \subset D$ 。构造与待诊断系统模型相同的系统  $\Sigma', D'$  中的元件均为故障元件,  $COMPS(\Sigma')/D'$  中的元件均为正常元件, 显然, 给定与待诊断系统相同的输入,  $\Sigma'$  会得到与待诊断系统相同的输出, 令  $I_E'$  为所有元件的输入输出的变量-值对应关系集合,  $I_E'$  与  $D/D'$  中元件的功能一致。由于  $VP \subset COMPS(\Sigma')/D'$ , 在  $\Sigma'$  中执行相同的计算过程仍会得到值传递结果  $\langle I_{VP}, I_E \rangle, I_E$  与  $D/D'$  中元件的功能不一致。由于  $VP \subset COMPS(\Sigma')/D'$ , 由定理 1 可知  $I_E = I_E'$ , 得到矛盾结果, 因

此  $D$  是极小诊断。

定理 2 和定理 3 给出了系统的值传递和系统诊断之间的关系。定理 2 表明通过值传递的方法一定可以得到系统值传递结果。定理 3 说明通过值传递方法得到的系统值传递结果与系统的极小诊断相对应。我们可以得到如下推论：

**推论 1** 给定系统  $\Sigma$  的诊断问题  $(M_{\Sigma}, IN, OUT)$ , 存在系统值传递可以得到系统极小诊断  $\langle I_V, I_E \rangle$ 。

证明：由定理 2 和定理 3 可证。

至此，我们给出了基于值传递模型的故障诊断方法的理论依据。例 3 给出了一个基于值传递模型的故障诊断的具体过程。

**例 3** 如图 1 所示系统，序列  $u_1 u_2 u_3 u_4$  (见例 3) 是一个系统值传递，可以得到系统值传递结果  $\langle I_V, I_E \rangle$ ：

$$I_V = \{M2/normal, A1/normal, A2/normal\}$$

$$I_E = \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/10, H/12, Y/6, X/4, Z/6\}$$

从而可以得到系统极小诊断  $\langle I_V, I_E \rangle$ , 简记为  $D = \{M1\}$ ：

$$I_V = \{M2/normal, A1/normal, A2/normal, M1/abnormal, M3/normal\}$$

$$I_E = \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/10, H/12, Y/6, X/4, Z/6\}$$

#### 4 基于值传递的故障诊断方法

由第 3 节的结论可知，采用值传递推理可以得到系统的一个极小诊断。因此，对于待诊断系统，我们可以通过如下诊断与测试相结合的方法实现系统的诊断和修复：

(1) 采用值传递推理可以得到系统的一个可能性较大的极小诊断；

(2) 对该诊断进行测试和鉴别，如果是故障元件，进行修复或替换；

(3) 对系统进行限定，形成新的诊断问题，重复该过程直到系统输出正常。

上述方法的关键问题是步骤(1)，下面我们将讨论查找一个极小诊断的算法实现及其复杂性。

##### 4.1 查找一个极小诊断的算法

算法 1: 计算一个极小诊断

**FIND-ONE-DIAG**( $M_{\Sigma}, IN, OUT$ )

**Begin**

集合  $D$  置空；

找出所有可以进行值传递的元件集合  $K$ ；

**while** ( $K$  非空)

**do**{

在  $K$  中选择一个元件  $c$  进行值传递；

$K = K / \{c\} \cup \{\text{新增可以进行值传递的元件}\}$ ；

}

**for** (每个未经值传递的元件)

**do**{

**if** (输入输出与功能不一致) **then** 该元件加入集合  $D$ ；

}

返回  $D$ ；

**End**

上述算法 1 首先找出所有可以进行值传递的元件集合，然后从中选择一个元件进行值传递，并更新可以进行值传递的元件集合，直到没有可以进行值传递的元件可供选择，因此

算法必定终止。需要说明的是为什么算法 1 终止后一定可以得到一个系统值传递结果。这由定理 2 的证明过程可以知道。

**算法 1** 在选择元件进行值传递时是自由的。在实际应用中，我们可以给系统元件给定一个可靠性的先验值(见例 1)，算法每次选择可靠性最高的满足值传递条件的元件进行值传递，这样可以得到包含故障可能性较大的元件的极小诊断。

**命题 1** 如果算法 1 返回  $D$  非空，则系统存在故障元件， $D$  为系统的极小诊断。

证明：假设系统  $\Sigma$  的所有元件正常， $I$  为所有元件的输入输出的变量-值对应关系集合。令算法得到值传递结果为  $\langle I_V, I_E \rangle$ 。由于  $VP \subset COMPS(\Sigma)$ ，由定理 1 可知  $I_E = I$ 。由于系统所有元件正常， $I_E$  与所有元件的功能一致，这与返回集合  $D$  非空矛盾，因此系统存在故障元件。由定理 2 和定理 3 可知， $D$  极小诊断。

由命题 1 可知，如果系统异常，算法会得到一个极小诊断。有定理 1 和命题 1 容易知道，如果返回集合  $D$  是空集合，表示系统当前行为正常，并且值传递结果中的  $I_E$  就是系统的当前行为(见例 4)。这一点对于大规模系统来说是有意义的，因为人为地判断系统是否输出异常往往是困难的。

**例 4** 如图 1 所示的系统，设系统输入为  $A, C, E=3, B, D, F=2$ ，系统输出为  $G=12, H=12$ 。算法 1 会执行系统值传递  $u_1 u_2 u_3 u_4$ ，就是系统值传递的结果。

$$u_1 = \langle \emptyset, \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/12, H/12\} \rangle$$

$$u_2 = \langle \{M2/normal\}, \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/12, H/12, Y/6\} \rangle$$

$$u_3 = \langle \{M2/normal, A1/normal\}, \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/12, H/12, Y/6, X/6\} \rangle$$

$$u_4 = \langle \{M2/normal, A1/normal, A2/normal\}, \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/12, H/12, Y/6, X/6, Z/6\} \rangle$$

$$u_1 u_2 \text{ 对应的元件值传递是 } M2[(C/3, D/2) \rightarrow (Y/6)]$$

$$u_2 u_3 \text{ 对应的元件值传递是 } A1[(G/12, Y/6) \rightarrow (X/6)]$$

$$u_3 u_4 \text{ 对应的元件值传递是 } A2[(H/12, Y/6) \rightarrow (Z/6)]$$

$$I_E = \{A/3, C/3, E/3, B/2, D/2, F/2, G/12, H/12, Y/6, X/6, Z/6\}$$

从而可以得到系统极小诊断  $D$  是空集合，表示系统当前行为正常： $A=3, C=3, E=3, B=2, D=2, F=2, G=12, H=12, Y=6, X=6, Z=6$ 。

##### 4.2 复杂性分析和实验结果

不失一般性，设系统任意一个元件的输出最多是  $k$  个元件的输入， $k$  是常数。从以下几点我们可以得到算法 1 的时间复杂性是  $O(kn+n)$ 。

(1) 找出所有可以进行值传递的元件集合  $K$  最多需要  $n$  次计算，

(2) 更新集合  $K$  需要  $k$  次计算，

(3) 最多需要进行  $n$  次值传递。

我们在 windows 环境的 PC 机(CPU: P4 3.2GHz 内存: 1024M) 上对算法 1 进行了测试，加大本文中 playbox 系统的规模，得到的结果如表 1。

从结果可以看出，即使在系统元件数较大的情况下，值传递诊断方法也可以快速找到一个极小诊断。这对实际应用是有意义的。

表1 实验结果

系统元件数	计算时间(毫秒)
15	1
120	7
500	30
1000	75

## 5 相关工作比较

Reiter<sup>[1]</sup>给出了由冲突集来求诊断的方法,其复杂性是指数级的,难以在实际中应用。文[2,5,7,8]等在该方法的基础上做了进一步的研究,提高了诊断效率,缩减了诊断空间,但是具体的求解过程仍要通过调用定理证明器,仍然有很高的复杂性。

Fattah 和 Dechter<sup>[9]</sup>、Stumptner 和 Wotawa<sup>[10]</sup>给出了树型结构系统的多项式时间结束的诊断方法,但是他们没有把该方法推广到非树型结构系统上,这就限制了它的应用。文[11]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,并且给出了一种直接求诊断的方法。Gerhard Friedrich<sup>[14]</sup>等给出了多项式时间找到一个极小诊断的方法。

Console<sup>[15]</sup>和 Heiko Milde<sup>[16]</sup>等采用了判定树的方法应用于实际系统。利用系统模型,通过穷举所有可能的系统错误,或者穷举所有可能的观察,构造判定树。需要进行系统诊断时,仅需对判定树进行搜索即可完成。但是,对于规模较大的系统,判定树的规模将十分庞大,限制了它的应用范围。

**结论和未来的工作** 本文的研究尝试显式地考虑系统的值传递以实现极小诊断的高效计算。给出了一种基于有向图上值传递的系统模型,并重新定义了诊断,该定义与 Reiter 给出的基于一致性的诊断等价。在此基础上,给出了找到一个极小诊断的算法,时间复杂性是  $O(kn+n)$ 。该算法在给出诊断(可能故障的元件集合)的同时,还给出了与该诊断对应的系统当前行为的一种可能解释。特别地,如果算法返回空集合,表示系统当前行为正常。实验结果表明,在系统元件数较大的情况下,值传递诊断方法可以快速找到极小诊断。同时,本文给出了该方法与诊断测试结合实现系统修复的框架。

对于给定的诊断问题,可能存在多个值传递得到值传递结果,因此,可能得到不同的极小诊断。但是,对于大规模系统,可能的值传递的数目将会十分庞大。我们以后会对该问

题进行研究和讨论。

## 参考文献

- 1 Reiter. A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, 1987, 32(1):57~96
- 2 Chittaro L. Hierarchical model-based diagnosis based on structural abstraction. *Artificial Intelligence*, 2004, 155:147~182
- 3 Baroni P. Diagnosis of large active systems *Artificial Intelligence*, 1999 (110):135~183
- 4 Console L, Picardi C, Ribaud M. Process algebras for systems diagnosis. *Artificial Intelligence*, 2002, 142:19~51
- 5 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
- 6 Pencole Y. A formal framework for the decentralised diagnosis of large scale discrete event systems and its application to telecommunication networks. *Artificial Intelligence*, 2005, 164: 121~170
- 7 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, 36:31~35
- 8 陈荣,姜云飞. 含约束的基于模型的诊断系统. *计算机学报*, 2001, 24:127~135
- 9 Fattah Y E, Dechter R. Diagnosing tree-decomposable circuits. In: *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Montreal, Canada, 1995. 572~578
- 10 Stumptner M, Wotawa F. Diagnosing tree-structured systems. *Artificial Intelligence*, 2001, 127(1): 1~29
- 11 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
- 12 Mozetic I. A polynomial-time algorithm for model-based diagnosis. In: *Proceeding of the 10th European Conference on Artificial Intelligence*, Vienna, 1992. 729~733
- 13 Childress R L, Valtorta M. Polynomial-time model-based diagnosis with the critical set algorithm. In: *Proceeding of the 4th International Workshop on Principles of Diagnosis*, Aberystwyth, Wales, 1993. 166~177
- 14 Friedrich G, Gottlob G, Nejd W. Physical Impossibility Instead of Fault Models. *AAAI*, 1990. 331~336
- 15 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
- 16 Console L. Temporal decision Trees; Model-based Diagnosis of Dynamic Systems on-board. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2003, 19:469~512
- 17 Milde H. Integrating model-based diagnosis techniques into current work processes—three case studies from the INDIA project. *AI Communications*, 2000, 13:99~123
- 18 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, 24:666~672

(上接第 209 页)

于 URL 结构的静态 Web 页面相似性度量的缺陷,详细讨论了 Web 页面访问时间的计算方法,提出将 URL 结构和页面访问时间结合起来度量 Web 页面对之间的相似性并给出了相应度量标准。最后,用实验证明了采用我们提出的度量标准得到的结果准确性更高,更接近于用户浏览兴趣。Web 页面对之间的相似性度量标准的确定为研究 Web 会话之间的相似性进而研究 Web 挖掘系统打下了坚实的基础。

## 参考文献

- 1 Li Chaofeng, Lu Yansheng. Research on Web Usage Mining for Electronic Commerce. In: *Proceedings of 2005 International Conference on Management Science and Engineering*, 2005. 703~710
- 2 Bharat K, Broder A, et al. Connectivity Server. Fast Access to Linkage Information on the Web. In: *Proceedings of the 7th International World Wide Web Conference*, 1998. 469~477
- 3 Huang S H S, Molina-Rodriguez C H, et al. Exploring similarity among Web pages using the hyperlink structure. *Information Technology: Coding and Computing*, 2004, *Proceedings*, 2004 (1):344~348
- 4 Ester M, Kriegel H P, Schubert M. Accurate and Efficient Crawling for Relevant Websites. In: *Proc. 30th Int Conf. on Very Large Databases (VLDB'04)*, 2004. 396~407
- 5 Kailing K, et al. Efficient Similarity Search for Hierarchical Data in Large Databases. In: *Proc. 9th Int Conf on Extending Database Technology (EDBT 2004)*, 2004. 676~693
- 6 Wang W, Zaane O R. Clustering Web Sessions by Sequence Alignment. In: *SIGMOD Conference*, 2002. 394~398
- 7 李超锋. Web 使用挖掘数据源分析. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2005(4):82~85
- 8 Shahabi C, Zarski A M, Adibi V S J. Knowledge discovery from users web-page navigation. In: *Proc. 7th Intl Conf on Research Issues in Data Engg*, 1997. 20~29