

# 结合问题特征的分组式诊断方法

刘 梦<sup>1,2</sup>, 欧阳彤<sup>1,2</sup>, 刘博文<sup>1,2</sup>, 张立明<sup>1,2</sup>, 张永刚<sup>1,2</sup>

(1. 吉林大学计算机科学与技术学院, 吉林长春 130012;  
2. 吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室, 吉林长春 130012)

**摘 要:** 模型诊断方法是人工智能领域重要的系统故障自动检测方法, 被广泛应用于软件故障检测和硬件诊断. 近年来由于电路规模和复杂度不断增大, 其诊断难度也不断增大. 本文通过对电路模型特征的研究, 结合 LLBRS-tree (Last-Level Based on Reverse Search-tree) 诊断算法提出分组式诊断方法 GD (Grouped Diagnosis): 首先结合电路特征确定组件的故障相关性并对电路组件进行分组, 可缩减电路中需检测的规模; 其次, 利用分组后电路并结合非诊断解定理和 SAT (SATisfiability) 求解特征定位部分非诊断解, 从而避免该部分的一致性检测来加速求解. 本文算法可应用于电子电路故障诊断领域, 并且实验结果表明该算法与 LLBRS-tree 算法相比求解效率平均提高了 1.5 倍, 最多提高了 3 倍.

**关键词:** 基于模型的诊断; 问题特征; 分组; SAT 求解器; 集合枚举树

**中图分类号:** TP306 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)03-0589-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.011

## Grouped Diagnosis Approach Using the Feature of Problem

LIU Meng<sup>1,2</sup>, OUYANG Dan-tong<sup>1,2</sup>, LIU Bo-wen<sup>1,2</sup>, ZHANG Li-ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong-gang<sup>1,2</sup>

(1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;

2. Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering (Jilin University), Ministry of Education, Changchun, Jilin 130012, China)

**Abstract:** Model-based diagnosis is an automatic fault detection approach in artificial intelligence. It is used in software fault detection and hardware diagnosis. Recently, the difficulty of circuit diagnosis is increasing with the increasing size and complexity of the circuit. After studying the characteristics of the circuit model, this paper proposes the grouped diagnosis (GD) approach based on the LLBRS-tree (Last-Level Based on Reverse Search-tree) algorithm. Firstly, the component grouped method is used to identify the component's faulty correlation and group the components. And the scale of the circuit to be detected can be reduced. Secondly, through the grouped circuit, the non-diagnostic solution theorem is given to locate some non-diagnostic solutions with the feature of satisfiability. It can help us avoid checking consistency on these non-diagnostic solutions so as to accelerate the processing. Our algorithm can be used in electronic circuit fault diagnosis. And the experimental results show that it improves the efficiency by 1.5 times and even 3 times compared with the LLBRS-tree algorithm.

**Key words:** model-based diagnosis; the feature of problem; grouped; SAT solver; set-enumeration-tree

## 1 引言

基于模型诊断 (Model-Based Diagnosis, MBD) 是为克服传统基于规则诊断方法的严重缺陷而兴起的智能推理诊断方法, 被一些人工智能专家誉为诊断方法和理论上的革命<sup>[1]</sup>. MBD 方法主要包括基于冲突诊断方法和直接求解诊断方法, 主要应用在软件故障检测和硬件诊断等, 如溯因推理、智能规划、软件调试、通讯网

络、大型软件验证、航天飞机安全性的动态诊断, 电子电路故障的静态诊断. 本文主要涉及的是关于电子电路的故障诊断问题.

基于冲突诊断方法多集中于碰集算法, 其中碰集问题在其他领域有着重要应用<sup>[2,3]</sup>. 碰集问题主流方法是基于枚举树: Reiter R<sup>[4]</sup> 等学者提出 HS-tree (Hitting-Set-tree) 算法加入重用结点和剪枝策略; 姜云飞<sup>[5]</sup> 等学者提出 BHS-tree (Binary-Hitting-Set-tree) 算法, 避免漏解

并能增量求解;赵相福<sup>[6]</sup>等学者提出 CHS-tree (Cardinality-based Hitting-Set-tree) 算法,结合集合势及元素出现频率选择扩展集合,缩小问题规模;张立明<sup>[7]</sup>等学者提出避免极小性判定过程的极小碰集求解方法。

直接求解诊断方法与基于冲突诊断方法相比求解效率更高<sup>[8]</sup>,一个重要分支是基于 SAT 诊断方法。Smith<sup>[9]</sup>等提出利用 SAT 求解 MBD 问题。Siddiqi<sup>[10]</sup>等在此基础上提出分层诊断方法,利用 1987 年 Kirkland<sup>[11]</sup>等学者提出的 Dominator 概念将电路进行抽象,缩减诊断问题规模;Metodi<sup>[12,13]</sup>等进一步提出 Section 概念并利用加入启发式加速求解过程;Marques-Silva J<sup>[14]</sup>等提出利用电路观测对电路进行过滤的方法。周建华<sup>[15]</sup>等提出基于枚举树并利用 SAT 求解器的无解空间剪枝方法——LLBRS-tree 算法,结合枚举树及 SAT 求解器特点,是一种求解诊断效率较高的算法。

本文在充分分析 LLBRS-tree 算法的基础上,发现非故障输出子电路元件间组合形成的结点肯定不是解,然而该算法仍然要对其进行判断,针对此问题本文给出 GD 算法,提出两个优化策略:元件分组方法,结合问题特征并利用单元传播规则和电路逻辑对电路元件分组;非诊断解定理和分组式诊断方法,利用非故障输出子电路元件间组合形成的结点肯定不是解的特性缩减问题规模,提高诊断求解效率。

## 2 预备知识

### 2.1 基于模型的诊断

**定义 1 基于模型诊断**<sup>[12]</sup> 基于模型诊断问题可用三元组  $\langle SD, COMPS, OBS \rangle$  表示,分别表示系统描述、元件集、观测集。

**定义 2 诊断问题**<sup>[12]</sup> MBD 问题  $\langle SD, COMPS, OBS \rangle$  产生当  $SD \cup \{ \neg AB(c) \mid c \in COMPS \} \cup OBS$  不一致。

**定义 3 诊断**<sup>[12]</sup> 给定 MBD 问题  $\langle SD, COMPS, OBS \rangle$ ,  $\Delta \subseteq COMPS$  是该诊断问题的一个诊断当  $SD \cup \{ AB(c) \mid c \in \Delta \} \cup \{ \neg AB(c) \mid c \in COMPS - \Delta \} \cup OBS$  一致。其中,  $\Delta$  是极小诊断当  $\Delta' \subset \Delta$  都不是诊断,  $\Delta$  是极小势诊断当  $\Delta' \subseteq COMPS$ ,  $|\Delta| \leq |\Delta'|$ 。

### 2.2 SAT 问题

在命题逻辑的定义当中,析取用符号  $\vee$  表示,合取用符号  $\wedge$  表示。

**定义 4 文字**<sup>[16]</sup> 给定  $n$  个布尔变量  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ,  $X_i$  或  $\neg X_i$  的否定称作文字。

**定义 5 子句**<sup>[16]</sup> 将文字用析取符号连接而成的公式称作子句  $C$ 。

**定义 6 合取范式 (Conjunctive Normal Form, CNF)**<sup>[16]</sup> 形式如  $C_1 \wedge C_2 \wedge \dots \wedge C_m$  的由多个不同子句

的合取所组成的公式称为合取范式。

**定义 7 SAT 问题**<sup>[16]</sup> SAT 问题通常是指合取范式的可满足问题。

## 3 基于模型诊断的无解空间剪枝方法

本节首先介绍基于模型诊断无解空间剪枝方法相关概念,然后介绍其算法思想。

### 3.1 相关概念

**定义 8 有解剪枝**<sup>[15]</sup> 在枚举树中可满足结点向下拓展的所有结点都不是极小诊断解,可被剪枝。

**定义 9 无解剪枝**<sup>[15]</sup> 在枚举树中不可满足结点所有祖先结点都不是诊断解,不需对这些祖先结点进行一致性检测。

**定义 10 反向搜索**<sup>[15]</sup> 从枚举树的最左叶子结点向根结点进行搜索的过程称作反向搜索。

**定义 11 完全集合枚举树**<sup>[15]</sup> 给定集合  $S$ , 将枚举出集合  $S$  中元素的所有组合情况的树结构称作完全集合枚举树。

本文中使用的部分是部分集合枚举树,即完全集合枚举树中删去对应集合  $S$  全集的结点。

### 3.2 基于模型诊断中结合问题特征的无解空间剪枝方法

该算法采用反向搜索方法遍历并利用无解剪枝、有解剪枝策略,算法思想如下:

---

#### 算法 1 LLBRS-tree

---

输入: SD. cnf: 系统描述, OBS. cnf: 系统观测

输出: solve: 诊断解

1.  $T = \text{partial SE-Tree}$
  2. WHILE ( $T$  has the leftmost node)
  3.   node = the leftmost node in  $T$
  4.   isSAT = check consistency (node)
  5.   IF (isSAT = SAT)
  6.     solve.add (node)
  7.     solve.delete (super\_set (node))
  8.     有解剪枝
  9.     node = parent\_node (node)
  10.    go to 4.
  11.   END IF
  12.   IF (isSAT = UNSAT)
  13.     无解剪枝
  14.     node = next\_node (node)
  15.     go to 4.
  16.   END IF
  17. END WHILE
  18. RETURN solve
-

## 4 结合元件分组的诊断方法

本节首先介绍分组式诊断方法的相关概念,然后介绍元件分组方法,最后给出非诊断解定理及分组式诊断方法伪代码.

### 4.1 相关概念

**定义 12 系统输出元件集** MBD 问题中,若元件  $c \in O$  的输出是该诊断电路的输出,称  $O \subseteq \text{COMPS}$  是系统输出元件集.

**定义 13 故障输出元件集** MBD 问题中,  $\text{ABCompS} \subseteq O$  是系统输出元件集,若任意  $c \in \text{ABCompS}$  的输出是故障输出,则称  $\text{ABCompS}$  为故障输出元件集合.

**定义 14 可达通路** MBD 问题中,若  $\text{path}(c_1, c_2)$  为真,则称元件  $c_1$  到元件  $c_2$  有可达通路,即元件  $c_1$  到电路输出的路径上经过元件  $c_2$ .

**定义 15 故障输出子电路元件集** MBD 问题中,元件  $c$  满足  $\{c \mid c \in \text{ABCompS} \vee \text{path}(c, c_0)\}$ ,  $c_0 \in \text{ABCompS}$ , 则称所有这样的元件  $c$  构成的集合是一个故障输出子电路元件集  $\text{ABSCCS}$ .

### 4.2 元件分组方法

结合结构特征的元件分组方法如下:

#### 算法 2 元件分组方法

输入:SD. cnf; 系统描述的 CNF 文件, OBS. cnf; 系统观测的 CNF 文件  
输出:ABSCCS; 故障输出子电路(元件集)  
局部变量:COMPS; 电路元件集, OBS\_IN; 观测输入集, OBS\_OUT; 观测输出集, Expect\_OUT; 预期输出集, OBS\_out; 观测输出, expect\_out; 预期输出, ABCompS; 故障输出元件集, out; 故障输出元件

1.  $\text{ABSCCS} = \phi$
2.  $\text{Comp\_Num} = \text{SD. cnf}$  首行信息
3.  $\text{OBS\_IN} = \text{OBS. cnf}$  中获取
4.  $\text{OBS\_OUT} = \text{OBS. cnf}$  中获取
5.  $\text{Expect\_OUT} = \text{SD. cnf}$  与  $\text{OBS\_IN}$  通过单元传播规则获取
6. WHILE ( $\text{OBS\_OUT}$  有未判断元件  $\text{OBS\_out}$ )  
    IF ( $\text{OBS\_out} \neq \text{对应 expect\_out}$ )
7.      $\text{ABCompS.add}(\text{OBS\_out})$
8.     END IF
9. END WHILE
10. WHILE ( $\text{ABCompS}$  有未判断元素  $\text{out}$ )
11.      $\text{ABSCCS.add}(\text{与 out 相连的电路组件})$
12. END WHILE
13. RETURN  $\text{ABSCCS}$

6~9 步中根据预期与观测不一致得到故障输出元件集  $\text{ABCompS}$ , 10~12 步中得到故障输出子电路元件集  $\text{ABSCCS}$ .

为更好地理解分组方法,下面用  $c17$  电路来说明.

由图 1 知,该电路输出元件集  $O = \{o_1, o_2\}$ , 假设元

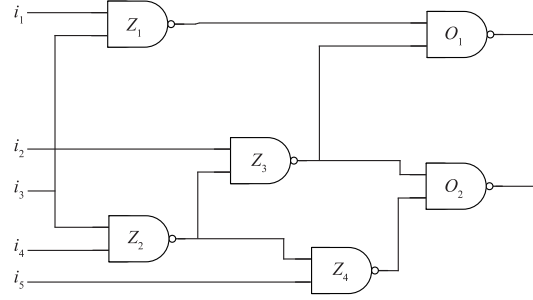


图1 c17电路

件  $o_1$  输出故障.

则该电路故障输出元件集  $\text{ABCompS} = \{o_1\}$ , 故障输出子电路元件集  $\text{ABSCCS} = \{z_1, z_2, z_3, o_1\}$ .

### 4.3 结合元件分组的诊断方法

首先,给出非诊断解定理和分组式诊断方法.

**定理 1 非诊断解定理** 对于 MBD 问题  $\langle \text{SD}, \text{COMPS}, \text{OBS} \rangle$ ,  $\text{ABCompS}$  是故障元件集,  $\text{ABSCCS}$  是其故障输出子电路元件集,则  $(\text{COMPS} - \text{ABSCCS})$  及其子集不是诊断解.

**证明(反证法)** 假设  $(\text{COMPS} - \text{ABSCCS})$  或其任意一个子集是一个诊断解,即得到  $\text{ABSCCS}$  中元件均正常,则  $\text{ABSCCS}$  相应输出为正常输出,与  $\text{ABSCCS}$  是故障输出子电路元件集矛盾,故而  $(\text{COMPS} - \text{ABSCCS})$  及其子集不是诊断解.

**定义 16 分组式诊断方法** 在部分集合枚举树中,将故障子电路集中元件放在待枚举元素的前半部分,进行正常的枚举树求解过程;非故障子电路集中元件放在待枚举元素的后半部分,依据定理 1,将非故障输出子电路元件对应的子树剪掉.这一过程称为分组式诊断方法.

分组式诊断方法的伪代码如下:

#### 算法 3 分组式诊断方法

输入:SD. cnf; 系统描述的 CNF 文件, OBS. cnf; 系统观测的 CNF 文件, DigMaxSize; 极小诊断解的最大诊断长度, ABSCCS; 故障输出子电路(元件集)  
输出:DigSols; 极小诊断解集合  
局部变量:Comp\_Num; 诊断系统元件的个数, node; 要访问的结点, EumTree\_Level; 枚举树总层数, Sub\_tree; 待判断的第一层的某个结点及其子树, COMPS; 电路元件集, isSAT; 判断是否满足一致性

1.  $\text{DigSols} = \phi$
2.  $\text{Comp\_Num} = 0$
3.  $\text{EumTree\_Level} = 0$
4.  $\text{Comp\_Num} = \text{SD. cnf}$  首行信息
5.  $\text{EumTree\_Level} = \text{DigMaxSize}$
6. 依据  $\text{ABSCCS}$  和  $\text{Comp\_Num}$  动态生成局部集合枚举树  $\text{PSE\_Tree}$
7.  $\text{Sub\_tree} = \text{PSE\_Tree}$  的第一层最左边结点及其子树
8. WHILE ( $\text{PSE\_Tree}$  has the first-level node not judged)

```

9.   IF( Sub_tree.root ∈ ( COMPS-ABSCCS )
10.     go to 27.
11.   END IF
12.   node = the leftmost node in Sub-tree
13.   WHILE( Sub-tree has node not judged )
14.     isSAT = check consistency( node )
15.     IF ( isSAT = SAT )
16.       DigSols. add( node )
17.       DigSols. delete( super_set( node ) )
18.       对该结点进行有解剪枝
19.       node = parent_node( node )
20.     ELSE
21.       对该结点进行无解剪枝
22.       node = next_node( node )
23.     END IF
24.   END WHILE
25.   Sub_tree = 第一层下一个结点及其子树
26. END WHILE
27. RETURN DigSols

```

第 1~5 步,根据 SD.cnf 中电路元件个数及定义的极小诊断最大长度 DigMaxSize 可知,PSE\_Tree 中最多拓展层数为 DigMaxSize.

第 6 步中,利用元件分组方法得到 ABSCCS 故障输出子电路,将枚举树中待枚举元素分为故障输出子电路元件和非故障输出子电路元件.

第 9、10 步中,对非故障输出子电路元件间集合及其子集进行判断并剪枝对应子树.

GD 算法是完备算法.根据命题 1,剪掉部分无解空间,所有可能解仍在枚举树中,可得到所有极小诊断解.

其次,结合问题特征对第二节的 LLBRS-tree 算法进行分析,在该算法生成枚举树时生成所有可能的结点后利用无解有解剪枝策略剪枝.然而其中有部分不需要生成,因为其不可能是诊断解,依据命题 1,非故障输出子电路元件间组合形成的结点就是这样的结点.针对此,GD 算法利用故障输出子电路将待枚举元素分组,从而对非故障输出子电路元件间组合进行大量剪

枝.所以,诊断系统利用 GD 算法求解基于一致性诊断的极小诊断时,求解时间将会得到提高.

最后,第二节的 LLBRS-tree 算法在求解单诊断时优化策略失效,而 GD 算法仍然能够利用分组方法提高求解效率.

## 5 实验结果

本文实现在第三节提出的 GD 算法,同时实现 LLBRS-tree 算法和 CSSE-tree<sup>[17,18]</sup> 算法并进行多方面的比较.本文采用的测试环境为:MacBook Pro Intel(R) Core(TM) i5-4278U CPU @ 2.60GHz,VMware10 下 Ubuntu 64 位系统,使用 Picosat 求解器(<http://fmv.jku.at/picosat>).

测试用例来自 ISCAS85 基准电路.本文将离线构造电路的故障输出子电路元件集文件,分别采用 LLBRS-tree 算法和 GD 算法对基准电路进行多次求解,诊断长度定义为 1、2、3 时,电路求解时间记录如表 1,“-”代表求解时间超过 3600s.

由于本文根据问题特征进行分组,存在着最好和最差情况:最好情况原因在于问题特征很好,即依据电路特征通过分组方法得到的故障子电路规模较小,与 LLBRS-tree 算法相比,GD 算法求解效率提高较大;最差情况原因在于问题特征不明显,依据电路特征通过分组方法得到的故障子电路规模较大,与 LLBRS-tree 算法相比,GD 算法求解效率提高较小.由于最好与最差情况都是极少数,因此本文在表 1 中所列出都是去除最好与最差情况后平均情况下的求解时间,更具有代表性.

由表 1,LLBRS-tree 算法与 CSSE-tree 算法在求解单诊断时间基本持平的时候,GD 算法仍然在单诊断求解效率仍有较大提升,平均情况下提高 30%.原因是求解单诊断时,LLBRS-tree 算法和 CSSE-tree 算法对所有结点都进行一致性检测,然而 GD 算法通过分组方法仅对部分结点进行一致性检测,从而减少求解时间.GD 算法求解效率优于 LLBRS-tree 算法,求解效率平均提高了 1.5 倍,最多提高了 3 倍.

表 1 求解时间(s)

测试用例	极小诊断长度 < = 1			极小诊断长度 < = 2		极小诊断长度 < = 3	
	CSSE-tree	LLBRS-tree	GD	LLBRS-tree	GD	LLBRS-tree	GD
c17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
c432	0.01	0.01	0.00	0.15	0.13	8.51	8.19
c499	0.03	0.02	0.01	0.36	0.27	22.46	18.45
c880	0.05	0.05	0.03	2.15	1.00	624.57	161.65
c1355	0.07	0.07	0.06	5.58	4.72	1609.81	1020.83
c1908	0.10	0.09	0.05	37.99	21.14	-	-
c3540	0.25	0.27	0.11	200.38	99.46	-	-

表 2 调用 SAT 求解器次数

测试用例	调用 SAT 求解器次数 $\leq 1$ (单诊断)			调用 SAT 求解器次数 $\leq 2$ (双诊断)			调用 SAT 求解器次数 $\leq 3$ (三诊断)		
	LLBRS-tree	GD	$\Delta$	LLBRS-tree	GD	$\Delta$	LLBRS-tree	GD	$\Delta$
c17	6	4	33%	16	9	43%	22	14	36%
c432	160	105	34%	12628	11078	12%	656430	629701	4%
c499	202	102	49%	20193	14954	25%	1334533	1150680	13%
c880	383	108	72%	70970	31156	56%	8719940	4970676	42%
c1355	546	322	41%	147642	121425	18%	26571725	24394667	8%
c1908	880	501	43%	383616	308371	19%	-	-	-
c3540	1669	501	70%	1372044	678619	50%	-	-	-

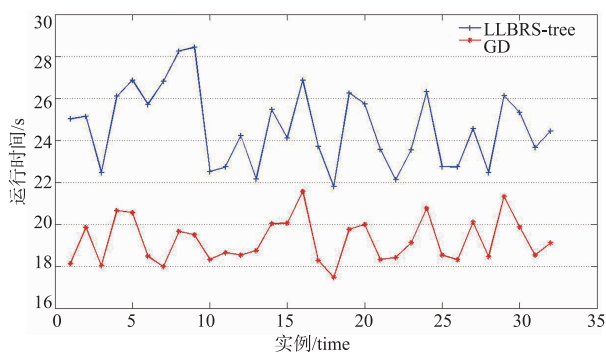


图2 c499电路3诊断求解时间对比图

调用 SAT 求解器是算法的主要耗时,因此列出调用 SAT 求解器次数如表 2,其中所列出都是去除最好与最差情况后平均情况下的调用 SAT 求解器次数,更具代表性.由表 2,LLBRS-tree 算法在求解单诊断时需要判断所有结点,然而 GD 算法仍然可以利用分组方法减少了调用 SAT 求解器的次数.同时从  $\Delta$  这里一列可以看到,GD 算法所需要调用 SAT 求解器的次数相比 LLBRS-tree 算法减少较多.对于不同电路,GD 算法优化效果不同.

本文将 c499 电路 3 诊断的求解时间进行了对比如图 2,可以直观地看到,GD 算法明显提高了诊断求解的效率.

## 6 结论

随着 MBD 方法研究的日益成熟,其成果被广泛应用于其它领域,如航天器自主诊断、卫星决策系统诊断、车载自动化诊断系统、Spreadsheet 故障诊断.将分组式诊断方法应用于电路故障诊断,目前提高算法性能主要是从缩减问题规模和减少无解空间搜索两方面考虑.为此本文结合 LLBRS-tree 算法给出分组式诊断方法 GD.首先提出元件分组方法,结合问题特征并利用单元传播规则和电路逻辑、故障输出等对电路元件分组,减少无解空间的搜索;然后给出非诊断解定理,利用非故障输出子电路元件间组合形成的结点肯定不是

解的特性缩减问题规模,使得求解过程中调用 SAT 求解器次数得到减少,进而提高诊断求解效率.实验表明,GD 算法能够快速检测到故障,求解效率优于 LLBRS-tree 算法,求解效率平均提高了 1.5 倍,最多提高了 3 倍.本文提出的算法可应用于大规模诊断问题,更具有实际意义.

## 参考文献

- [1] de Kleer J, Kurien J. Fundamentals of model-based diagnosis [A]. Proceedings of the 5th IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety of Technical Processes (SafeProcess) [C]. Portugal: Elsevier, 2004. 25 - 36.
- [2] Wang Y, Cai S, Yin M. Two efficient local search algorithms for maximum weight clique problem [A]. Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence [C]. USA: AAAI Press, 2016. 805 - 811.
- [3] Wang Y, Ouyang D T, Zhang L, et al. A novel local search for unicast set covering problem using hyperedge configuration checking and weight diversity [J]. Sci China Inf Sci, 2017, 60(6): 062103.
- [4] Reiter R. A theory of diagnosis from first principles [J]. Artificial Intelligence, 1987, 32(1): 57 - 95.
- [5] 姜云飞, 林笠. 用对分 HS-树计算最小碰集 [J]. 软件学报, 2002, 13(12): 2267 - 2274.  
Jiang Yun-fei, Lin Li. Computing the minimal hitting sets with binary HS-tree [J]. Journal of Software, 2002, 13(12): 2267 - 2274. (in Chinese)
- [6] 王肖, 赵相福. 用 CHS-tree 基于集合势的方法计算极小碰集 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(2): 401 - 406.  
Wang Xiao, Zhao Xiang-fu. Computing minimal hitting set with CHS-tree method [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(2): 401 - 406. (in Chinese)
- [7] 张立明, 欧阳丹彤, 曾海林. 基于动态极大度的极小碰集求解方法 [J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(2): 209 - 215.  
Zhang Li-ming, Ouyang Dan-tong, Zeng Hai-lin. Compu-

- ting the minimal hitting set based on dynamic maximum degree[J]. Journal of Computer Reach and Development, 2011, 48(2):209–215. (in Chinese)
- [8] Nica I, Pill I, Quaritsch T, et al. The route to success—a performance comparison of diagnosis algorithms [A]. Proceedings of the 23rd International Joint Conference on Artificial Intelligence [C]. China: AAAI Press, 2013. 1039–1045.
- [9] Smith A, Veneris A, Ali M F, et al. Fault diagnosis and logic debugging using boolean satisfiability[J]. IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2005, 24(10):1606–1621.
- [10] Siddiqi S A, Huang J. Hierarchical diagnosis of multiple faults [A]. Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence [C]. India: Morgan Kaufmann Publisher, 2007. 581–586.
- [11] Kirkland T, Mercer M R. A topological search algorithm for ATPG[A]. Proceedings of the 24th ACM/IEEE Design Automation Conference [C]. USA: ACM, 1987. 502–508.
- [12] Metodi A, Stern R, Kalech M, et al. Compiling model-based diagnosis to boolean satisfaction [A]. Proceedings of the 26th Conference on Artificial Intelligence [C]. Canada: AAAI Press, 2012. 793–799.
- [13] Metodi A, Stern R, Kalech M, et al. A novel sat-based approach to model based diagnosis[J]. Journal of Artificial Intelligence Research, 2014, 51:377–411.
- [14] Marques-Silva J, Janota M, Ignatiev A, et al. Efficient model based diagnosis with maximum satisfiability [A]. Proceedings of the 24th International Joint Conference on Artificial Intelligence [C]. Argentina: AAAI Press, 2015. 1966–1972.
- [15] 周建华, 欧阳丹彤, 刘博文, 张立明. 基于模型诊断中结合问题特征的新方法[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(3):502–213.  
Zhou Jian-hua, Ouyang Dan-tong, Liu Bo-wen, Zhang Li-ming. A new algorithm combining with the characteristic of the problem for model-based diagnosis[J]. Computer Research and Development, 2017, 54(3):502–213. (in Chinese)
- [16] Nieuwenhuis R, Oliveras A, Tinelli C. Solving SAT and SAT modulo theories: from an abstract davis-putnam-lovemann-loveland procedure to DPLL (T) [J]. Journal of the ACM (JACM), 2006, 53(6):937–977.
- [17] Xiang-fu, Zhao, Zhang, et al. Deriving all minimal consistency-based diagnosis sets using SAT solvers[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2009, 19(4):489-494.

- [18] 赵相福, 欧阳丹彤. 使用 SAT 求解器产生所有极小冲突部件集[J]. 电子学报, 2009, 37(4):804–810.  
Zhao Xiang-fu, Ouyang Dan-tong. Deriving all minimal conflict sets using satisfiability algorithms[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4):804–810. (in Chinese)

#### 作者简介



刘梦女, 1993 年生于河南洛阳, 吉林大学硕士研究生, 研究方向为基于模型诊断、SAT 问题。

E-mail: 2238356051@qq.com



欧阳丹彤女, 1968 年生于吉林长春, 吉林大学教授, 主要研究方向为基于模型的诊断、自动推理和模型检测。

E-mail: ouyangdantong@163.com



刘博文男, 1993 年生于吉林延边, 吉林大学硕士研究生, 研究方向为基于模型诊断。

E-mail: 1591365445@qq.com



张立明男 1980 年生于吉林长春, 吉林大学博士, 主要研究方向为基于模型诊断。

E-mail: limingzhang@jlu.edu.cn



张永刚(通信作者)男, 1975 年生于辽宁沈阳, 吉林大学副教授, 主要研究方向为约束可满足问题和模型诊断问题。

E-mail: zhangyg@jlu.edu.cn