计算机研究与发展
Journal of Computer Research and Development
DOI:10.7544/issn1000-1239.2019.20180192
56(7):1396-1407,2019

基于子集一致性检测的诊断解极小性判定方法

田乃予　欧阳丹彤　刘　梦　张立明
(吉林大学计算机科学与技术学院　长春　130012)
(符号计算与知识工程教育部重点实验室(吉林大学)　长春　130012)
(naiyutian@126.com)

A Method of Minimality-Checking of Diagnosis Based on Subset Consistency Detection

Tian Naiyu, Ouyang Dantong, Liu Meng, and Zhang Liming
(*College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun* 130012)
(*Key Laboratory of Symbol Computation and Knowledge Engineering (Jilin University), Ministry of Education, Changchun* 130012)

Abstract　Model-based diagnosis is an intelligent inference technology in order to overcome the serious defects of the first generation of diagnostic system. With the consistent development of relevant work, it is a significant branch of AI at present. However, most of the researches focus on the process of finding out the diagnosis. The process of detecting the diagnosis ensures the minimality of the final solution. It is also a crucial step in the problem. The traditional process of minimality-checking of diagnosis is to compare the new diagnosis with the ones in the existing diagnosis set, checking whether there is a superset or subset of the new diagnosis. The disadvantage of the traditional process is that as the number of diagnosis increases, the difficulty of detection increases gradually, and the time-consuming increases. To solve the problem, we propose a new method of minimality-checking of diagnosis based on subset consistency detection: subset consistency detection (SCD) method. Avoiding the influence of increasing the diagnosis set size, we determine the minimality of diagnosis through the consistency detection of a few subsets of the diagnosis. Our method can be applied to many efficient diagnostic algorithms such as grouped diagnosis (GD) and abstract circuit diagnosis (ACDIAG), and the efficiency of the algorithms is improved by SCD method.

Key words　model-based diagnosis; subset consistency; minimal diagnosis; SAT; conjunctive normal form

摘　要　基于模型诊断作为克服第1代诊断系统的缺陷而出现的智能诊断推理技术,现已成为十分活跃的人工智能研究分支,随着相关技术的不断发展,应用愈加广泛.其中,大多数研究集中于诊断求解过程,而诊断解的极小性检测方法保证了最终求得诊断解的极小性,也是问题求解过程中至关重要的一步.传统诊断解的极小性判定过程是将新求得的诊断解与已有诊断集合中的诊断解依次比较,检查是否有新得诊断解的超集或子集来判定极小性,这种方法随着求解过程中得到的诊断解数量增多,检测难度逐渐提高,耗时也随之增大.为解决此问题,提出了一种基于子集一致性检测的诊断解极小性判定的新方法:子集一致性(subset consistency detection, SCD)方法.通过对诊断解少数几个子集的一致性检测

收稿日期:2018-03-28;**修回日期**:2018-09-26
基金项目:国家自然科学基金项目(61672261,61502199,61402196,61373052)
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61672261, 61502199, 61402196, 61373052).
通信作者:张立明(limingzhang@jlu.edu.cn)

来给出该诊断解的极小性判定,避免了求解过程中诊断解集合增大对效率的影响.SCD 方法可应用于许多高效的诊断方法,如 GD(grouped diagnosis)和 ACDIAG(abstract circuit diagnosis)方法,算法效率均有所提高.

关键词 基于模型诊断;子集一致性;诊断解极小性;可满足性;合取范式

中图法分类号 TP18

基于模型诊断(model-based diagnosis, MBD)是人工智能(artificial intelligence, AI)领域中一个十分活跃的研究分支,对整个 AI 领域的研究起着重要推动作用[1].其是为克服第 1 代诊断专家系统的严重缺陷而提出的智能推理方法,广泛应用于通信、网络、交通、电子设备、航天等诸多领域.

一方面,AI 领域的其他分支(如知识表示、机器学习、约束求解等)中许多研究成果可以在 MBD 问题中得到应用,促进了 MBD 的发展.例如 MBD 问题与数据挖掘中的频繁项集挖掘和子句模式挖掘[2-3]中解的部分特征具有一定的相似性,许多方法策略可以互相应用,相互促进发展.另一方面,MBD 的研究暴露了许多 AI 技术中存在的问题,激发了研究者的研究热情.例如可以利用 MBD 改进软件测试[4].

20 世纪 60 年代,源自航天、军工等高可靠性工程的迫切需要,在 AI 领域逐渐形成了诊断推理这一研究热点.诊断一直是人工智能的一个挑战,在过去的 20 年中,研究主要集中于基于模型的诊断,通过利用模型代表物理系统的结构和行为来进行诊断.该方法通过建立真实系统对应的模型,利用系统输入得到系统的预期行为,然后以预期行为与观测行为的差异作为诊断算法的输入,进而计算能够解释这种差异的诊断解.

1987 年首个 MBD 方法 HS-tree (hitting-set-tree)方法由 Reiter[5]提出.其结合 Dekleer[6]提出的冲突集概念,通过求解电路所有极小冲突集的极小碰集得到整个电路的所有极小诊断解.虽然该方法保证了解的正确性,但却存在因剪枝而丢失正确解的可能.1989 年 Greiner 等人[7]对此方法进行改进,提出了 HS-DAG(hitting-set directed acyclicgraph)方法.之后国内外学者对间接求诊断方法,即基于冲突的诊断方法进行了大量研究,由于极小碰集求解是基于冲突的诊断方法的关键步骤,因此许多研究都集中于极小碰集算法.姜云飞等人[8]提出 BHS-tree(binary-hitting-set-tree)方法,该方法基于 HS-tree 方法,利用枚举树结构求解极小碰集,即极小诊断解,解决了 HS-tree 算法剪枝丢解的情况,并且可以增量求解;赵相福等人[9]提出基于集合势的 CHS-tree(cardinality-based hitting-set-tree)方法,每次选择当前集合簇中势最小的集合扩展,并结合集合簇中元素出现的频率,将大问题分解成子问题,进而得到不包含该扩展集合中各元素的集合簇的所有极小碰集;欧阳丹彤等人[10]提出基于动态极大度的极小碰集求解方法,提出未扩展元素度和结点度的概念,尽早生成集合簇的碰集,减少枚举树生成结点的个数,提高了求解效率.Jannach 等人[11]通过并行化枚举树的结构计算碰集,更好地利用计算资源而不会丢失任何诊断解.

间接求解的诊断方法由于求解过程分为求极小冲突集和求极小碰集 2 个步骤,求解效率受到 2 部分所使用算法的共同制约.随着对 MBD 问题研究的深入与计算机硬件的发展,许多学者对直接求解 MBD 的方法进行了研究[12].其中,基于 SAT (satisfiability)的诊断方法吸引了大量研究者的关注.

SAT 问题是首批被证明的 NP-完全问题[13],具有重要的理论和实用价值,长久以来吸引着国内外学者的关注,其求解过程的研究一直是人工智能领域的核心难题之一.近些年来对 SAT 问题的研究取得了很大的进步,很多已有算法得到了有效地优化改进,同时许多创新方法不断被提出.将 MBD 问题转化为 SAT 问题进行求解,能够克服诊断问题复杂性不断增加的难题,因而得到众多学者的广泛关注[14].

Smith 等人[15]首次提出了基于 SAT 求解的多故障诊断与定位算法,为之后基于 SAT 的模型诊断研究提供了基础.Metodi 等人[16]提出把复杂的 MBD 预处理问题和 SAT 编译技术结合在一起的编译方法,进而达到简化合取范式(conjunctive normal form, CNF)的目的.之后,Metodi 等人[17]提出基于求极小势诊断的新编译方法,该方法进一步对 CNF 进行了简化.Koitz 等人[18]提出将故障信息转化为用于溯因模型诊断中的 Horn 子句,利用一个映射函数自动化建模过程.一些直接求解诊断方法和求

极小碰集问题相似,都是元素对应超图中集合遍历问题.而由于超图数据结构复杂,在求解时多采用集合枚举树(set-enumerations-tree, SE-tree)[19]形式化方法遍历超图中的集合.赵相福等学者提出了基于枚举树的 CSSE-tree(conflict-set based on set-enumerations-tree)[20]方法,将被诊断系统的模型和观测结果用 CNF 描述并利用 SAT 求解器求取诊断解.欧阳丹彤等人[21]基于问题的结构特征,对 CSSE-tree 方法进行改进,有效地实现了对诊断的无解空间进行剪枝,并对部分集合枚举树从底层结点到根结点进行反向搜索,构建了 LLBRS-tree (last-level based on reverse search-tree)方法.该方法减少了 SAT 求解次数,缩减了求解问题规模,是一种求解效率较高的方法.刘梦等人[22]在 LLBRS-tree 方法的基础上,使用电路分解并利用非故障输出子电路组件间组合形成的结点肯定不是诊断解的特性,缩减了问题规模,提出结合问题特征的分解式方法 GD(grouped diagnosis)方法.刘伯文等人[23]提出电路分块诊断方法 ACDIAG(abstract circuit diagnosis)方法,通过对电路分块缩减了电路规模,并利用 LLBRS-tree 方法对分块后的电路求解得到极小块诊断解;结合抽象电路的结构特征,利用诊断解拓展方法对极小块诊断解扩展得到原电路全部极小诊断解.

为保证最终得到诊断解是极小的,诊断解的极小性检测是求解基于模型诊断问题的关键步骤.之前的研究多集中于碰集极小性的研究,刘思光等人[24]提出基于元素独立覆盖度检测的碰集极小性判定方法 ICC(independent coverage checking)方法并通过深入分析增量求解过程中非极小碰集的产生原因,给出 ICC 方法的增量判定形式 IICC(incremental independent-coverage-checking)方法,提高了碰集求解的效率.王荣全等人[25]提出将碰集求解问题转换成 SAT 问题进行迭代求解,并给出结合元素覆盖集合度的极小化策略的高效极小碰集求解方法.碰集的极小化策略可应用于基于冲突的诊断方法.但目前研究多集中于更为高效的直接求解诊断方法.本文在对 LLBRS-tree, GD, ACDIAG 这 3 种方法充分研究的基础上,发现其使用的诊断解极小性检测方法存在的不足:原有极小性检测方法随着求解过程中得到的诊断解数量增多,检测难度逐渐提高,耗时也随之增大.若能对此进行优化,减小诊断解极小性检测过程的耗时,将对现有算法效率有所提高.针对此问题,本文提出一种基于子集一致性检测的诊断解极小性判定方法.该方法无需同已得到的诊断解进行比较,通过对得到的诊断解自身进行检测来判断其真子集中是否含有诊断解,进而进行极小性判定,避免了传统诊断解极小性检测方法的不足.该方法避免了求解过程中诊断解集合增大对效率的影响,进而提高了诊断算法的整体求解效率.

1 预备知识

本节将介绍基于模型诊断和 SAT 问题的相关概念及定义,同时给出使用 SAT 方法求解模型诊断问题过程中将问题对应的电路模型转化成 CNF 文件的方法.

1.1 基于模型的诊断

下面给出基于模型的诊断问题的相关定义.

定义 1. 诊断系统[5]. 一个 MBD 系统定义为一个三元组$\langle SD, COMPS, OBS\rangle$,其中:

1) SD(system description)为系统描述,是一阶谓词公式的集合;

2) $COMPS$(system components)为系统的组成部件集合,是 1 个有限的常量集;

3) OBS(system observation)为观测集,是一阶谓词公式的有限集.

定义 2. 诊断问题[5]. 基于一个待诊断系统$\langle SD, COMPS, OBS\rangle$,产生一个诊断问题,当 $SD\cup\{\neg AB(c)\mid c\in COMPS\}\cup OBS$ 不一致时.

定义 3. 诊断[5]. 基于一个 MBD 系统$\langle SD, COMPS, OBS\rangle$,$\Delta\subseteq COMPS$ 是一个诊断,当 $SD\cup\{AB(c)\mid c\in\Delta\}\cup\{\neg AB(c)\mid c\in COMPS-\Delta\}\cup OBS$ 一致时.

定义 4. 极小诊断[5]. 基于一个 MBD 系统$\langle SD, COMPS, OBS\rangle$,$\Delta\subseteq COMPS$ 是一个极小诊断当且仅当不存在子集$\Delta'\subset\Delta$ 是一个诊断.

在系统的 SD,$COMPS$,OBS 所组成的观测行为与预期行为发生冲突之时诊断问题产生.基于模型诊断问题的目的是找到可以解释这种差异的诊断解.

1.2 SAT 问题

SAT 问题,一直以来都是理论计算机科学和人工智能领域的著名问题.给定一个布尔公式,求解 SAT 问题的目的是,确定是否存在一组变量赋值使得公式真值为真,若存在,需要返回一组满足条件的变量赋值.SAT 问题在模型检验、逻辑电路优化等应用方面有着非常重要的作用.着眼于 SAT 问题的

理论意义和实际应用价值,其相关研究已成为国内外热点之一.下面给出 SAT 问题的相关定义.

定义 5. 文字[16]. 给定 n 个布尔变量 $l_1, l_2, \cdots, l_n$, $0 \leqslant i \leqslant n$,其中 l_i 或 l_i 的否定称为文字.

定义 6. 子句[16]. 称文字用析取符号连接而成的公式为子句.

定义 7. 合取范式[16]. 将子句用合取符号连接而成的公式称为合取范式.

定义 8. 可满足/不可满足[16]. 对某一 CNF 公式,如果存在使其公式计算值为真的变量赋值,则称该 CNF 公式是可满足的;反之,如果不存在这样的赋值,则称该 CNF 公式是不可满足的.

例 1. 给出 CNF 范式:

$C=\{1:(a), 2:(\neg a), 3:(\neg a \vee b), 4:(\neg b)\}$, C 是不可满足的,因为子句 1 和子句 2 无法同时为真,同样也找不到一组赋值使子句 1,3,4 同时为真.

1.3 集成电路转化为 CNF

由于 SAT 求解器的输入为 CNF 文件,因此需要将诊断系统$\langle SD, COMPS, OBS\rangle$的系统描述 SD 和系统观测 OBS 转换为 CNF 文件的形式,再利用 SAT 求解器进行求解.在这之中至关重要的一步是集成电路转化成 CNF 范式的形式,即对门电路的转化.以图 1 中与门为例,与门电路可以通过转化过程转化成 CNF 范式的形式:

$$3=1\wedge 2,$$
$$3\Leftrightarrow 1\wedge 2,$$
$$(3\rightarrow 1\wedge 2)(1\wedge 2\rightarrow 3),$$
$$(\bar{3}\vee 1\wedge 2)(\overline{1\wedge 2}\vee 3),$$
$$(\bar{3}\vee 1)(\bar{3}\vee 2)(\bar{1}\vee\bar{2}\vee 3),$$

最终化简后的结果即是:

$$(1\vee\bar{3})\wedge(2\vee\bar{3})\wedge(\bar{1}\vee\bar{2}\vee 3).$$

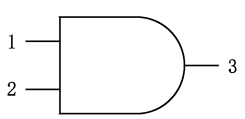

Fig. 1 Symbol of AND gate

图 1 与门符号

将系统的相应描述以 CNF 文件的形式表示.主要包含电路逻辑和电路观测 2 部分.

CNF 文件的格式为:CNF 文件中每行为 1 个对应系统相关描述的子句,最后以 0 结尾.

以图 2 中国际标准测试电路 ISCAS-85 中的 c17 电路为例,电路逻辑对应的相关 CNF 文件如图 3 所示.

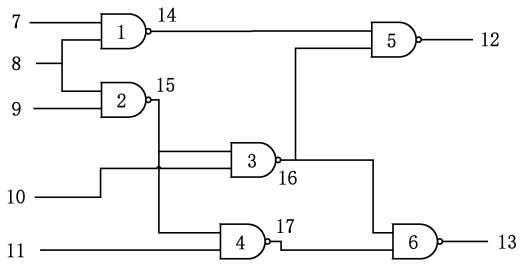

Fig. 2 Logic circuit of c17

图 2 c17 逻辑电路

```
p cnf 17 18
-7 -8 -14 1 0
7 14 1 0
8 14 1 0
-8 -9 -15 2 0
8 15 2 0
9 15 2 0
-15 -10 -16 3 0
15 16 3 0
10 16 3 0
-15 -11 -17 4 0
15 17 4 0
11 17 4 0
-14 -16 -12 5 0
14 12 5 0
16 12 5 0
-16 -17 -13 6 0
16 13 6 0
17 13 6 0
```

Fig. 3 CNF file of c17

图 3 c17 逻辑电路对应的 CNF 文件

图 3 中第 1 行 p cnf 17 18 表示该电路系统转化为 CNF 文件格式后有 17 个变量、18 条子句,p cnf 为关键字.

将系统描述 SD 和系统观测 OBS 转换为 CNF 文件后,就可以作为 SAT 求解器的输入对待诊断系统进行求解.

2 MBD 相关算法

本节将介绍基于模型诊断的相关算法,主要介绍 LLBRS-tree 方法以及基于该方法的优化:分解式 GD 方法和电路分块 ACDIAG 方法.这些方法都是目前效率较高的诊断求解方法,同时,它们都采用了相同的诊断解极小性检测方法.

2.1 基于 SE-tree 调用 SAT 的诊断方法

基于 SE-tree 调用 SAT 的诊断方法是将集合枚举树应用于 MBD 问题上,这种树模型可以以一种有结构的方式枚举出给定集合的幂集.

该方法对待诊断系统组件集 $COMPS$ 对应的 SE-tree 进行遍历,同时对所遍历到的结点是否为诊断解进行判定,当遍历完成时,便可得到待诊断系统的所有诊断解.结点判定的基本思想是假设结点中的元件为故障并将其余元件都置为正常,将结点对应的单元子句加入到之前由系统描述 SD 和系统观测 OBS 转换而来的 CNF 文件中,作为 SAT 求解器的输入,进行一致性检测.若可满足,则该结点是一个诊断解,将此诊断解保存.

2.2 LLBRS-tree 方法

LLBRS-tree 方法对诊断的无解空间进行剪枝,并对部分集合枚举树从底层结点到根结点进行反向搜索.该方法减少了 SAT 求解次数,缩减了求解问题规模,是一种求解效率较高的方法.下面给出相关定义.

定义 9. 有解剪枝[21].在遍历某一待诊断系统组件集对应的集合枚举树时,对于树中的某一结点,其父结点或祖先结点如果是可满足的,即是诊断解.那么该结点一定不是极小诊断解,可以跳过对枚举树中此类结点的判断,称这一操作为有解剪枝.

定义 10. 无解剪枝[21].遍历一棵集合枚举树,对于树中的某一结点,其子结点或者子孙结点如果是不可满足的,即不是诊断解,那么该结点一定不是诊断解,跳过对枚举树中此类结点的判断过程,这叫做无解剪枝.

定义 11. 反向搜索[21].针对一棵集合枚举树,当已知枚举树的层数时,称从枚举树的最后一层向枚举树的根结点搜索的过程为树的反向搜索.

LLBRS-Tree 方法主要是基于定义 9～11,对集合枚举树以反向搜索的过程遍历,同时调用 SAT 求解器对树上的结点是否为诊断解进行判定:

1) 如果结点可满足,则对结点进行极小性检测,并根据检测结果对诊断解集进行相应操作.根据定义 9,可以将该结点未访问的子孙结点减掉,即有解剪枝.第 2 步将判断该结点的父结点.

2) 如果结点不可满足.根据定义 10,可以将该结点的父结点减掉,即无解剪枝.下一步判断该结点右边的结点.

LLBRS-tree 方法利用有解剪枝和无解剪枝的策略,减小求解问题规模从而提高诊断求解效率.

2.3 GD 方法

GD 方法通过对电路进行分解并利用非故障输出子电路组件间组合形成的结点肯定不是诊断解的特性,缩减诊断问题规模,从而提高求解效率.

定义 12. 输出组件集[22]. 设某个待诊断系统可表示为$\langle SD,COMPS,OBS\rangle$,称 $O\subseteq COMPS$ 为输出组件集,当对于所有组件 $c\in O$,其输出为该待诊断系统的输出.

定义 13. 故障输出组件集[22]. 设某个待诊断系统可表示为$\langle SD,COMPS,OBS\rangle$,称 $ABCompS\subseteq O$ 是故障输出组件集,当组件 $c\in ABCompS$ 的输出是该待诊断系统的故障输出.

定义 14. 可达通路[22]. 诊断问题中,组件 c_1 到组件 c_2 有可达通路表示组件 c_1 到电路输出的路径上经过组件 c_2,此时 $path(c_1,c_2)$为真.

定义 15. 故障输出子电路组件集[22]. 设某个待诊断系统可表示为$\langle SD,COMPS,OBS\rangle$,其中故障输出组件集 $ABSubCircuitCompS\subseteq COMPS$ 是一个故障输出子电路组件集,当$\{c\mid c\in ABCompS\vee path(c,c_0)\}$,其中,$c_0\in ABCompS$.即子电路中组件 c 是 $ABCompS$ 中组件或者到 $ABCompS$ 中某一组件有可达通路.

GD 方法根据输出观测与预期的差异,将输出分为故障输出与非故障输出.以此为条件对电路进行分解,分为故障输出子电路和非故障输出子电路.

对于非故障输出子电路组件,由于非故障输出子电路组件集中的任意元素组成的集合不可能是诊断解,因此 GD 方法将非故障子电路集中的组件放在待枚举元素的后半部分,并将其对应的子树剪掉.而故障输出子电路组件则使用枚举树并利用 LLBRS-tree 算法进行求解.

GD 方法结合问题特征和电路逻辑电路组件进行分解,缩减问题规模,进而减少求解过程中调用 SAT 求解器的次数,提高诊断求解效率.

2.4 ACDIAG 方法

ACDIAG 方法是对电路进行抽象分块来缩减电路规模的高效诊断算法.

定义 16. 起始元件[23]. 对于一个待诊断系统,称满足 3 个条件之一的元件为起始元件:

1) 元件为系统输出元件;

2) 元件的输出是 2 个或 2 个以上元件的输入;

3) 元件是多输入元件,即元件输入端个数大于 2.

结合电路结构特征,给出对电路的分块规则[23]:

1) 找出电路中所有起始元件 $a_1,a_2,\cdots,a_k$ 即将电路划分为 k 块;

2) 对每个起始元件 $a_i(1\leqslant i\leqslant k)$进行拓展,若元件 b 的输出作为元件 a_i 的输入,并且元件 b 不是起始元件,则将元件 b 扩展到 a_i 所代表的分块中.

以此分块规则得到的抽象电路,每个子电路块有且仅有一个输出,并且由该输出元件代表.

ACDIAG 方法利用 LLBRS-tree 方法对分块后的抽象电路求得极小诊断解,称作极小块诊断解.再利用诊断解拓展方法,对极小块诊断解进行拓展,从而得到原电路的全部极小诊断解.

ACDIAG 方法前期通过缩减电路规模减少了利用 LLBRS-tree 方法求取诊断解的时间,再利用拓展方法得到全部解,实验表明其拓展所需时间远小于极小块解求解时间,因此大大提高了求解效率.

3 诊断解极小性判定过程

3.1 原有诊断解极小性判定过程

判定诊断解的极小性是 MBD 相关算法中至关重要的一步.根据定义 4 可知,Δ 是一个极小诊断当且仅当不存在子集 $\Delta' \subset \Delta$ 是一个诊断,即不存在 Δ 的任何真子集也是待诊断 MBD 系统的一个基于一致性诊断.极小性判定过程必须基于此定义.下面给出 LLBRS-tree 方法极小性判定过程的具体方法,GD 方法和 ACDIAG 方法是基于 LLBRS-tree 方法的,其极小性判定过程也应用了相同的方法.

算法 1. 诊断解极小性检测算法.

函数:$MinialDiag_Checking(Diag, DigRes)$

输入:诊断解 $Diag$、极小诊断解集合 $DigRes = \{Diag_1, Diag_2, \cdots, Diag_n\}$;

输出:极小诊断解集合 $DigRes$.

Begin

① for ($i=1; i \leqslant n; i++$)

② if $Diag \subset Diag_i$

③ $DigRes.Remove(Diag_i)$;

④ end if

⑤ else if $Diag_i \subseteq Diag$

⑥ return;

⑦ end if

⑧ end for

⑨ $DigRes \leftarrow DigRes \cup \{Diag\}$;

End

在这一过程中,被检测为诊断解的组件集作为输入,若在已有诊断解集中发现新得到诊断解的真超集,则说明该超集必不为待诊断系统的极小诊断解将其从极小诊断集中删去(行③);若发现新得到诊断解的子集,则新得到诊断解必不是极小诊断,将该解丢弃,结束比较过程(行⑥);若比较过程结束时都未发现新得到诊断解的真子集,则将该诊断解暂时加入极小诊断解集中(行⑨).

当对集合枚举树的遍历结束时,即诊断求解算法终止时,极小诊断解集中保留的诊断解即是待诊断系统的全部极小诊断解.需要注意的是,在算法运行的过程中,极小诊断解集中保留的诊断解并不一定是极小的,即可能保留了大量冗余解.

这种方法存在的主要问题是,极小诊断解集的规模会随着诊断求解算法的进行而不断变大,新得到诊断解的极小性判定时间也会随之增加.因为每当得到一个新的诊断解,都需要将它与极小诊断解集中部分甚至全部诊断解进行比较.由于此方法的耗时往往与诊断解集的大小正相关,当问题后期诊断解集规模较大时,使用此极小性判定方法逐一比较会带来较多的时间开销,影响求解效率.而下面提出的基于子集一致性检测的诊断解极小性判定方法则避免了此问题.

3.2 基于子集一致性检测的诊断解极小性判定方法

本文提出的基于子集一致性检测的诊断解极小性判定方法完全遵循定义 4,即如果一个诊断解的所有真子集都不是诊断解,那么这个诊断解就是关于 MBD 系统的一个极小诊断解.为避免 3.1 节所给出的传统诊断解极小性判定过程存在的不足,基于子集一致性检测的诊断解极小性判定方法在求得诊断解之后仅针对诊断解自身进行检测,即检测其真子集中是否含有诊断解,按照此方法加入诊断解集合中的诊断解全部是极小的,避免了比较的过程.

对已求得诊断解的所有真子集进行判断,可以检查其真子集中是否含有诊断解,但如果对每个子集进行检测,则调用 SAT 求解器次数过多,会消耗较多的时间,而我们可以利用 SAT 求解器判定某一状态下系统逻辑和观测行为的一致性来达到同样的目的.下面首先给出算法 2 来介绍如何利用 SAT 求解器来判断一个组件集合是否是待诊断系统的诊断解.

算法 2. 诊断解判断算法.

函数:$Is_Sol\ (ps[])$

输入:待判定组件集 ps、系统描述文件 $SD.cnf$、系统观测文件 $OBS.cnf$;

输出:bool 类型值(如果组件集 ps 是系统的诊断解,则返回 1;否则返回 0).

① $SD.cnf.add(clause \in OBS.cnf)$;

② $SD.cnf.add(ps$ 中每个组件对应的反常单元子句);

③ $SD.cnf.add(COMPS-ps$ 中每个组件对应的正常单元子句);

④ $isSAT \leftarrow SATsolver(SD.cnf)$;

⑤ if $isSAT=$SAT

⑥ return 1;

⑦ else

⑧ return 0;

⑨ end if

算法 2 首先将系统观测文件 $OBS.cnf$ 中的子句加入到表示系统描述的 $SD.cnf$ 文件中(行①).对于待判定的组件集合 ps 中的组件,将其对应的反常单元子句即用正文字描述,加入到 $SD.cnf$ 文件中(行②),以此假设这些组件均是故障组件.对于系统组件集中除去待判定组件集的剩余元素,使用负文字描述,即将 $COMPS-ps$ 中每个组件对应的正常单元子句加入到 $SD.cnf$ 文件中(行③),以此假设这些组件均是非故障组件.例如假设系统总共有 7 个组件 $COMPS=\{C_1,C_2,C_3,C_4,C_5,C_6,C_7\}$,待判定组件集 $ps=\{C_1,C_2,C_3,C_4\}$时,那么加入系统描述 $SD.cnf$ 文件中的子句应为:

1 0

2 0

3 0

4 0

−5 0

−6 0

−7 0

然后调用 SAT 求解器对 $SD.cnf$ 文件进行可满足性判断.如果可满足,则表明在组件集 ps 中的组件均为故障组件而 $COMPS-ps$ 中的组件均为正常组件的情况下,系统当前的观测行为是可以解释的.根据诊断解的定义可知,组件集 ps 是诊断解,返回 1;否则,组件集 ps 不是诊断解,返回 0.

以此为基础,我们发现可以利用 SAT 求解器检查组件集 ps 是否存在为诊断解的真子集.

定理 1. 设某个待诊断系统可表示为$\langle SD,COMPS,OBS\rangle$,$Sub\subseteq COMPS$ 为该 MBD 的一个诊断解,如果$\exists S\in Sub$,且 $SD\cup OBS\cup\{\neg AB(c)|c\in\{S\}\cup(COMPS-Sub)\}$是一致的,则$\exists Sub'\subseteq Sub-\{S\}$为待诊断系统的诊断解.

证明.

反证法.假设:

$SD\cup OBS\cup\{\neg AB(c)|c\in\{S\}\cup(COMPS-Sub)\}$是一致的;且不存在 $Sub'\subseteq Sub-\{S\}$为待诊断系统的诊断解.

Sub 为已知为诊断解,如果不存在 $Sub'\subseteq Sub-\{S\}$为诊断解,则说明若存在为 Sub 真子集的诊断解,该诊断解中必包含 S,那么:

$SD\cup OBS\cup\{\neg AB(c)|c\in\{S\}\cup(COMPS-Sub)\}$不能推出一致,即假设 S 组件为正常同时限定诊断解为 Sub 真子集的情况下是无法解释当前系统的行为.此时:

$SD\cup OBS\cup\{\neg AB(c)|c\in\{S\}\cup(COMPS-Sub)\}$是不可满足的.与上述条件矛盾,因此假设不成立. 证毕.

定理 2. 设某个待诊断系统可表示为$\langle SD,COMPS,OBS\rangle$,$Sub\subseteq COMPS$ 为该 MBD 的一个诊断解,如果对$\forall S\in Sub$,$SD\cup OBS\cup\{\neg AB(c)|c\in\{S\}\cup(COMPS-Sub)\}$是不一致的,则 Sub 为待诊断系统的极小诊断解.

证明.

因为对于 $S\in Sub$,如果:

$SD\cup OBS\cup\{\neg AB(c)|c\in\{S\}\cup(COMPS-Sub)\}$是不一致的,根据定理 1 可以得到不存在 $Sub'\subseteq Sub-\{S\}$.所以如果对于:

$\forall S\in Sub$,$SD\cup OBS\cup\{\neg AB(c)|c\in\{S\}\cup(COMPS-Sub)\}$都是不一致的,则可说明不存在 $Sub'\subset Sub$ 为诊断解,根据极小诊断的定义可证得 Sub 为待诊断系统的极小诊断解. 证毕.

基于定理 1 与定理 2,给出利用 SAT 求解器进行基于子集一致性检测的诊断解极小性判定的算法 3.

算法 3. 基于子集一致性检测的诊断解极小性判定算法.

函数:$Is_MinimalSol\ (diag[])$

输入:诊断解 $diag=\{D_1,D_2,\cdots,D_n\}$、系统描述文件 $SD.cnf$、系统观测文件 $OBS.cnf$;

输出:bool 类型值(如果诊断解 $diag$ 是系统的极小诊断解,则返回 1;否则返回 0).

① $SD.cnf.add(clause\in OBS.cnf)$;

② $SD.cnf.add(COMPS-diag$ 中每个组件对应的正常单元子句);

③ for ($j=1;j\leqslant n;j++$)

④ $CNF\leftarrow SD.cnf$;

⑤ $CNF.add(D_j$ 对应的正常单元子句);

⑥ $isSAT\leftarrow SATsolver(CNF)$;

⑦ if ($isSAT=$SAT)

⑧ return 1;

/* $diag$ 不是系统极小诊断解 */

⑨ end if

⑩ end for

⑪ return 0;

/* *diag* 是系统极小诊断解 */

算法 3 可针对已知诊断解进行子集一致性检查,输入是通过算法 2 判定为诊断解的组件集.同算法 2 一样,需将系统的观测文件 *OBS.cnf* 中的子句添加到系统描述文件 *SD.cnf* 中(行①).依据定理 1,对于已知诊断解 *diag* 中的每个组件,依次将它们与 $COMPS-diag$ 中所有组件对应的正常单元子句加入到表示系统描述和观测的 CNF 文件中,以此假设它们都是非故障组件.之后,调用 SAT 求解器判定 CNF 文件的可满足性,对应定理 1 中判定:

$SD\cup OBS\cup\{\neg AB(c)|c\in\{S\}\cup(COMPS-Sub)\}$是否一致,从而判断这种假设能否解释当前系统的行为,即检查子集的一致性(行②~⑥).如果可满足,则说明存在 $diag'\subseteq diag-D_j$ 为诊断解,即诊断解 *diag* 的真子集中存在诊断解,根据定义 3 可知诊断解 *diag* 不是待诊断系统的极小诊断解,跳出循环,算法结束(行⑦~⑩).依据定理 2 可知,如果循环结束没有找到 *diag* 的真子集为诊断解,即对应定理 2 中对于 $\forall S\in Sub$, $SD\cup OBS\cup\{\neg AB(c)|c\in\{S\}\cup(COMPS-Sub)\}$都是不一致的,则可以判定 *diag* 为待诊断系统的极小诊断解(行⑪).

例 2. 假设系统总共有 7 个组件 $COMPS=\{C_1,C_2,C_3,C_4,C_5,C_6,C_7\}$,已知组件集 $diag=\{C_1,C_2,C_3,C_4\}$是诊断解时,我们需要加入到表示系统描述和观测的 CNF 文件中的子句为:

1) −1 0
   −5 0
   −6 0
   −7 0

以此假定组件 C_1,C_5,C_6,C_7 为非故障组件.之后调用 SAT 求解器,判断一致性,如果是可满足的,则表明$\{C_2,C_3,C_4\}$的子集中有诊断解,那么组件集$\{C_1,C_2,C_3,C_4\}$必不是极小诊断解,算法结束.否则,继续将子句依次加入到 CNF 文件中并依次检查 CNF 文件的可满足性:

2) −2 0
   −5 0
   −6 0
   −7 0
3) −3 0
   −5 0
   −6 0
   −7 0
4) −4 0
   −5 0
   −6 0
   −7 0

如果依次调用 SAT 求解器检测加入以上子句的 CNF 文件,均为不可满足,则表明组件集$\{C_1,C_2,C_3,C_4\}$的真子集中没有诊断解,诊断解$\{C_1,C_2,C_3,C_4\}$是待诊断系统的极小诊断解.

下面给出一个实例来阐述算法 3 的执行过程.

例 3. 以图 2 中国际标准测试电路 ISCAS-85 中的 c17 电路为例,该电路有 6 个组件 $COMPS=\{1,2,3,4,5,6\}$均为与非门,假设当前输入观测点"7","8","9","10","11"的观测值分别为高电平、高电平、低电平、高电平、低电平.输出观测点"12","13"的观测值为低电平、高电平.则系统观测的 CNF 文件描述如下:

7 0
8 0
−9 0
10 0
−11 0
−12 0
13 0

因观测行为与预期行为冲突,产生诊断问题.设已得到诊断解 $diag=\{1,3,6\}$,需检测其极小性.根据算法 3,依次加入 3 组子句到表示系统描述和观测的 CNF 文件中:

1) −1 0
   −2 0
   −4 0
   −5 0
2) −3 0
   −2 0
   −4 0
   −5 0
3) −6 0
   −2 0
   −4 0
   −5 0

分别调用 SAT 求解器依次检测加入以上子句的 CNF 文件,均为不可满足,则根据定理 2,可知组件集$\{1,3,6\}$的真子集中没有诊断解,即组件集$\{1\}$,

{3},{6},{1,3},{1,6},{3,6}均不是诊断解,诊断解 $diag=\{1,3,6\}$是该系统的极小诊断解.

算法 3 避免了算法 1 随着极小诊断解集规模的增大而导致诊断解极小性检查耗时大幅增加的问题.通过针对已知诊断解子集一致性进行判断,检测其真子集中是否含有诊断解来进行极小性判定.同时,该方法调用 SAT 求解器的次数与待检测诊断解中包含组件的个数线性相关,比对该诊断解全部真子集进行检测要少得多.

复杂性.假设待检测诊断解包含组件个数为 n,当前已有诊断解个数为 m. 算法 3,即 SCD(subset consistency detection)方法在最坏情况下最多需调用 n 次一致性检查.而传统极小性判定方法则需将此诊断解与 m 个诊断解判定子集关系,其复杂度为 nm.

当 m 较大时,SCD 方法复杂性明显低于传统极小性判定方法.而 MBD 问题随着求解过程的进行,m 必不断增大,因此 SCD 方法的求解效率优于传统方法.

完备性.本文提出的子集检测方法针对的是求得的诊断解的极小性判定,不影响求解过程,因此不会存在丢解的情况,最终得到的是待诊断系统的全部极小诊断解.

因此,我们给出的方法不仅避免了原有方法的不足,同时也尽最大可能地减少了判定过程中 SAT 求解器的调用次数,最大程度上降低了诊断解极小性判定过程的耗时.

4 实验结果

本部分对 SCD 方法的有效性进行实验测试.将 SCD 方法应用于目前求解效率较高的 GD 方法和 ACDIAG 方法,并分别与应用原有诊断解极小性检测方法的 GD 和 ACDIAG 方法进行对比,进而对 SCD 方法的实验数据进行分析.采用的实验环境为 Intel® Core™ i5-3470 CPU@3.20 GHz,Ubuntu 64 位系统.

对于 GD 方法和 ACDIAG 方法以及 SCD 方法的诊断解极小性判定过程,调用开源 SAT 求解器 Picosat[26]进行可满足性检测.

本文的测试用例来源于国际标准测试电路 ISCAS-85,包含了电路 c17,c432,c499,c880,c1355,c1908.时间限制为 172 800 s(48 h),超出此时间记为 TO.

表 1 给出 SCD 方法应用于 GD 方法的实验结果对比,表格第 1 行的 l 表示所求诊断解的长度;第 1 列表示测试所用电路实例;num 表示求得诊断解个数.SCD 与 GD 列分别表示将 SCD 方法应用于 GD 方法与原始 GD 方法求解耗时.可以看出对于较简单电路如 c432,c499,c880,当极小诊断长度小于等于 3 时,应用原有诊断解极小性检测方法的 GD 方法与应用 SCD 方法的所用时间并无明显差别.但当所求诊断长度达到 4 时,应用 SCD 方法的 GD 方法求解效率开始有明显提高,以 c432 电路表现尤为明显,求解时间缩短近 50%,对 c499 和 c880 电路的求解效率也均有不同程度的提高.当所求诊断长度达到 5 时,应用 SCD 方法的优势更为明显,在原有算法无法在限制时间内得到结果的情况下,应用 SCD 方法可以求得诊断解.而对于较复杂的 c1355 和 c1908 电路,当诊断解长度达到 3 时,算法效率就已有一定提高.当所求诊断解长度较小时,诊断解个数较少,应用原有极小性检测方法逐一比较的次数也较少,耗时不多,因此 2 个方法求解效率基本相同.当所求诊断长度较大时,随着算法运行生成的诊断解个数逐渐增多,极小诊断解集规模不断增大.此时,采用原有极小性检测方法,每当得到一个诊断解,都需要将它与极小诊断解集中部分甚至全部诊断解进行比较,使得极小性检测过程较为耗时.而应用 SCD 方法则可避免此问题,只需调用 SAT 求解器对新求得的诊断解子集一致性进行判定,在保证了每个加入极小诊断解集中的诊断解都是极小的同时,不用增加额外比较耗时,因此算法效率得到了提高.

我们也将 SCD 方法应用于 ACDIAG 方法进行了实验,实验结果对比如表 2 所示,SCD 与 ACD 列分别表示将 SCD 方法应用于 ACDIAG 方法与原始 ACDIAG 方法求解耗时.可以看出 SCD 方法应用于 ACDIAG 方法同样是有效果的.ACDIAG 方法是将复杂电路抽象为较简单电路进行求解,得到抽象电路的极小诊断后拓展得到全部诊断解,而 SCD 方法应用于抽象电路求得极小诊断解这一过程.因为是已简化的抽象电路,前期求得诊断解个数较少,所以当极小诊断长度≤4 时,应用 SCD 方法的 ACDIAG 方法与原始 ACDIAG 方法的效率基本无明显差别,但对于较复杂电路 c1355,当诊断长度达到 4 时,算法效率已提高 40%;对于较简单电路如 c432,c499 电路当诊断长度达到 5 时,算法效率提高了 50%左

右.这反映出传统诊断解极小性检测方法存在的问题:对极小诊断解集规模较为敏感,而 SCD 方法避免了这点不足.因此,随着诊断解数量不断增多,本文提出的 SCD 方法的优势逐渐显现.

Table 1 The Running Time of SCD Method Based GD

表 1 基于 SCD 方法的 GD 方法运行时间对比

Test	$l\leqslant1$			$l\leqslant2$			$l\leqslant3$			$l\leqslant4$			$l\leqslant5$		
	num	Running Time/s		*num*	Running Time/s		*num*	Running Time/s		*num*	Running Time/s		*num*	Running Time/s	
		SCD	GD		SCD	GD		SCD	GD		SCD	GD		SCD	GD
c17	2	0.00	0.00	4	0.00	0.00	4	0.00	0.00	4	0.00	0.00	4	0.00	0.00
c432	1	0.00	0.00	31	0.07	0.08	313	5.24	5.21	1160	258.18	449.15	2 756	9 826.54	TO
c499	2	0.00	0.00	11	0.21	0.21	374	16.49	16.52	8 082	923.51	939.49	76 757	39 356.24	TO
c880	13	0.01	0.01	13	0.73	0.72	121	115.55	114.47	121	13 155.72	13 581.17		TO	TO
c1355	5	0.03	0.02	452	4.35	4.38	17 672	931.98	946.58	388 454	154 692.82	TO		TO	TO
c1908	10	0.04	0.04	97	13.39	13.38	1 682	4 804.12	5 540.51		TO	TO		TO	TO

Note: The time limit is 172800s (48 h). Timeout is denoted as TO.

Table 2 The Running Time of SCD Method Based ACDIAG

表 2 基于 SCD 方法的 ACDIAG 方法运行时间对比

Test	$l\leqslant1$			$l\leqslant2$			$l\leqslant3$			$l\leqslant4$			$l\leqslant5$		
	num	Running Time/s		*num*	Running Time/s		*num*	Running Time/s		*num*	Running Time/s		*num*	Running Time/s	
		SCD	ACD		SCD	ACD		SCD	ACD		SCD	ACD		SCD	ACD
c17	3	0.00	0.00	6	0.00	0.00	6	0.00	0.00	6	0.00	0.00	6	0.00	0.00
c432	1	0.01	0.01	7	0.14	0.14	15	1.83	1.66	19	32.42	30.19	19	577.66	1 440.01
c499	2	0.01	0.02	30	0.17	0.17	553	2.38	2.18	5 650	37.32	34.78	41 059	507.47	911.78
c880	0	0.01	0.01	78	0.85	0.83	78	34.43	34.11	726	1 118.14	1 108.68	726	29 034.08	30 521.54
c1355	5	0.13	0.13	195	5.41	5.38	10 564	442.73	428.44	308 599	29 628.28	51 779.89		TO	TO
c1908	5	0.29	0.29	9	15.64	15.41	79	2 000.45	1 943.38		TO	TO		TO	TO

Note: The time limit is 172 800 s (48 h). Timeout is denoted as TO.

表 1、表 2 的实验对比结果可以体现出 SCD 方法的有效性.本文以 GD 和 ACDIAG 方法为例,将 SCD 方法应用于这 2 个目前较高效的方法,算法效率均得到了一定的提高.实验结果也与我们提出的改进思想吻合,当所求诊断长度越长时,应用 SCD 方法对算法效率的提升也就越大.

5 结束语

在人工智能领域,基于模型诊断问题的研究一直备受中外学者的关注.本文通过对诊断解的极小性与该诊断解子集关系的研究,提出基于子集一致性检测的诊断解极小性判定方法——SCD 方法.该方法通过对已知诊断解的部分子集进行一致性检测,从而给出诊断解的极小性判定,避免了原有方法诊断解之间的比较过程,减少了诊断解极小性检查过程的耗时.且 SCD 方法可应用于多个目前效率较高的基于模型诊断求解算法,如 GD 和 ACDIAG 方法.通过实验对比,针对不同电路,应用 SCD 方法的诊断方法求解效率均有明显提高,最高可提高约 50%,并且由于传统诊断解极小性检测方法存在对诊断解集规模较为敏感的问题,随着所求诊断解长度的增加,SCD 方法带来的优势将更加显著.

参 考 文 献

[1] Console L, Dressler O. Model-based diagnosis in the real world: Lessons learned and challenges remaining [C] //Proc of the 16th Int Joint Conf on Artificial Intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 1999: 1393-1400

[2] Zhang Changsheng, Ruan Jing, Xia Haijiang, et al. A frequent pattern mining algorithm based on concept lattice [J]. Sensors & Transducers, 2013, 156(9): 351-359

[3] Giannella C，Han Jiawei，Pei Jian，et al. Mining frequent patterns in data streams at multiple time granularities [J]. Data Mining Next Generation Challenges & Future Directions，2003，212：191-212

[4] Zamir T，Stern R T，Kalech M. Using model-based diagnosis to improve software testing [C] //Proc of the 28th AAAI Conf on Artificial Intelligence. Menlo Park，CA：AAAI，2014：1135-1141

[5] Reiter R. A theory of diagnosis from first principles [J]. Artificial Intelligence，1987，32(1)：57-95

[6] Dekleer J. Local methods for localizing faults in electronic circuits [D]. Cambridge，MA：Cambridge Artificial Intelligence Laboratory，Massachusetts Institute of Technology，1976

[7] Greiner R，Smith B A，Wilkerson R W. A correction to the algorithm in Reiter's theory of diagnosis [J]. Artificial Intelligence，1989，41(1)：79-88

[8] Jiang Yunfei，Lin Li. Computing the minimal hitting sets with binary HS-tree [J]. Journal of Software，2002，13(12)：2267-2274 (in Chinese)
(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)

[9] Wang Xiao，Zhao Xiangfu. Computing minimal hitting set with CHS-tree method [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems，2014，20(2)：401-406 (in Chinese)
(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)

[10] Zhang Liming，Ouyang Dantong，Zeng Hailin. Computing the minimal hitting set based on dynamic maximum degree [J]. Journal of Computer Rearch and Development，2011，48(2)：209-215 (in Chinese)
(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)

[11] Jannach D，Schmitz T，Shchekotykhin K. Parallelized hitting set computation for model-based diagnosis [C] //Proc of the 29th AAAI Conf on Artificial Intelligence. Menlo Park，CA：AAAI，2015：1503-1510

[12] 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

[13] Cook S A. The complexity of theorem-proving procedures [C] //Proc of ACM Symp on Theory of Computing. New York：ACM，1971：151-158

[14] Siddiqi S，Huang Jinbo. Hierarchical diagnosis of multiple faults [C] //Proc of the 20th Int Joint Conf on Artificial Intelligence. San Francisco，CA：Morgan Kaufmann，2007：581-586

[15] Smith A，Veneris A，Viglas A. Design diagnosis using boolean satisfiability [C] //Proc of the 9th Asia and South Pacific Design Automation Conf. Piscataway，NJ：IEEE，2004：218-223

[16] Metodi A，Stern R，Kalech M，et al. Compiling model-based diagnosis to Boolean satisfaction [C] //Proc of the 26th AAAI Conf on Artificial Intelligence. Menlo Park，CA：AAAI Press，2012：793-799

[17] 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(1)：377-411

[18] Koitz R，Wotawa F. SAT-based abductive diagnosis [C/OL] //Proc of the 26th Int Workshop on Principles of Diagnosis. 2015：167-176 [2018-01-18]. http://ceur-ws.org/Vol-1507/dx15paper22.pdf

[19] Rymon R. Search through systematic set enumeration [C] //Proc of the 3rd Int Conf on Principles of Knowledge Representation and Reasoning. San Francisco，CA：Morgan Kaufmann，1992：539-550

[20] Zhao Xiangfu，Zhang Liming，Ouyang Dantong，et al. Deriving all minimal consistency-based diagnosis sets using SAT solvers [J]. Progress in Natural Science，2009，19(4)：489-494

[21] Ouyang Dantong，Zhou Jianhua，Liu Bowen，et al. A new algorithm combining with the characteristic of the problem for model-based diagnosis [J]. Journal of Computer Rearch and Development，2017，54(3)：502-513 (in Chinese)
(欧阳丹彤，周建华，刘伯文，等. 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)：502-513)

[22] Liu Meng，Ouyang Dantong，Liu Bowen，et al. Grouped diagnosis approach using the feature of problem [J]. Acta Electronica Sinica，2018，46(3)：589-594 (in Chinese)
(刘梦，欧阳丹彤，刘伯文，等. 结合问题特征的分组式诊断方法[J]. 电子学报，2018，46(3)：589-594)

[23] Ouyang Dantong，Liu Bowen，Liu Meng，et al. A block-based diagnostic method combining with the circuit structure [J]. Acta Electronica Sinica，2018，46(7)：38-44 (in Chinese)
(欧阳丹彤，刘伯文，刘梦，等. 结合电路结构基于分块的诊断方法[J]. 电子学报，2018，46(7)：38-44)

[24] Liu Siguang，Ouyang Dantong，Zhang Liming，et al. A method of minimality-checking of candidate solution for minimal hitting set algorithm [J]. Journal of Software，2018，29(12)：3733-3746 (in Chinese)
(刘思光，欧阳丹彤，张立明，等. 一种极小碰集求解中候选解极小性判定方法[J]. 软件学报，2018，29(12)：3733-3746)

[25] Wang Rongquan，Ouyang Dantong，Wang Yiyuan，et al. Solving minimal hitting sets method with SAT based on DOEC minimization [J]. Journal of Computer Rearch and Development，2018，55(6)：1273-1281 (in Chinese)
(王荣全，欧阳丹彤，王艺源，等. 结合 DOEC 极小化策略的 SAT 求解极小碰集方法[J]. 计算机研究与发展，2018，55(6)：1273-1281)

[26] Biere A. PicoSAT essentials [J]. Journal on Satisfiability Boolean Modeling & Computation，2008，4(2/3/4)：75-97

Tian Naiyu, born in 1993. PhD candidate in the College of Computer Science and Technology of Jilin University. Her main research interests include model-based diagnosis, SAT and #SAT.

Ouyang Dantong, born in 1968. Professor and PhD supervisor of Jilin University. Senior member of CCF. Her main research interests include model-based diagnosis and automated reasoning. (ouyangdantong@163.com)

Liu Meng, born in 1993. PhD candidate in the College of Computer Science and Technology of Jilin University. Her main research interests include model-based diagnosis, SAT and MaxSAT. (2238356050@qq.com)

Zhang Liming, born in 1980. PhD, Post-doctor in Jilin University. His main research interests include hitting set problem, model-based diagnosis and SAT.

《计算机研究与发展》征订启事

《计算机研究与发展》(Journal of Computer Research and Development)是中国科学院计算技术研究所和中国计算机学会联合主办、科学出版社出版的学术性刊物,中国计算机学会会刊.主要刊登计算机科学技术领域高水平的学术论文、最新科研成果和重大应用成果.读者对象为从事计算机研究与开发的研究人员、工程技术人员、各大专院校计算机相关专业的师生以及高新企业研发人员等.

《计算机研究与发展》于1958年创刊,是我国第一个计算机刊物,现已成为我国计算机领域权威性的学术期刊之一.并历次被评为我国计算机类核心期刊,多次被评为“中国百种杰出学术期刊”.此外,还被《中国学术期刊文摘》、《中国科学引文索引》、“中国科学引文数据库”、“中国科技论文统计源数据库”、美国工程索引(Ei)检索系统、日本《科学技术文献速报》、俄罗斯《文摘杂志》、英国《科学文摘》(SA)等国内外重要检索机构收录.

国内邮发代号:2-654;国外发行代号:M603

国内统一连续出版物号:CN11-1777/TP

国际标准连续出版物号:ISSN1000-1239

联系方式:

100190 北京中关村科学院南路6号《计算机研究与发展》编辑部

电话:+86(10)62620696(兼传真);+86(10)62600350

Email:crad@ict.ac.cn

http://crad.ict.ac.cn