

结合电路结构基于分块的诊断方法

欧阳丹彤^{1,2}, 刘伯文^{1,2}, 刘 梦^{1,2}, 张立明^{1,2}, 张永刚^{1,2}

(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: 基于模型的诊断问题在人工智能领域内一直备受关注, 将诊断问题转换成 SAT (Satisfiable) 问题成为解决基于模型诊断问题的一个重要方法. 基于目前高效诊断方法 LLBRS-Tree (Last-Level Based on Reverse Search-Tree) 的研究, 本文提出电路分块诊断方法 ACDIAG (Abstract Circuit Diagnosis) 方法, 对电路进行分块来缩减电路规模, 利用 LLBRS-Tree 方法对分块后抽象电路求得极小块诊断解; 提出诊断解拓展方法, 结合分块后电路结构特征对每个极小块诊断解进行直接扩展得到极小诊断解, 避免对抽象电路还原后才能得到所有解的问题.

关键词: 基于模型诊断; SAT 问题; 枚举树; 抽象

中图分类号: TP306 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)07-1571-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.07.005

A Block-Based Diagnostic Method Combining with the Circuit Structure

OUYANG Dan-tong^{1,2}, LIU Bo-wen^{1,2}, LIU Meng^{1,2}, ZHANG Li-ming^{1,2}, ZHANG Yong-gang^{1,2}

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

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

Abstract: Model-based diagnosis problem has been attracting much attention in the field of artificial intelligence. It is an important technique for solving model-based diagnosis problem by converting diagnosis problem to SAT. Based on the research of LLBRS-Tree, this paper proposes an ACDIAG method. Firstly, the circuit blocking method is used to block the circuit via circuit structure so as to downscale circuit. Then, minimal block diagnoses are acquired on the abstract circuit after blocking via LLBRS-Tree. Secondly, diagnosis extending method is given to extend minimal block diagnoses to obtain other diagnoses directly via circuit structure. It avoids the drawback that extending diagnoses need to restore the abstract circuit.

Key words: model-based diagnosis; SAT problem; enumeration tree; abstract

1 引言

基于模型的诊断 (Model-Based Diagnosis, MBD) 问题是人工智能领域内的一个重要问题, 推动着人工智能的发展^[1]. 早期由于 MBD 直接求解难度较大, 著名学者 Reiter 结合 de Kleer 提出的冲突集^[2]概念, 设计了一个高效的诊断求解方法^[3], 首先求解电路的所有极小冲突集, 然后对这些极小冲突集求解极小碰集, 并证明了这些极小碰集是整个电路的所有极小诊断解. 国内外许多学者对求解极小冲突集与极小碰集的算法进行了研究. 早期学者提出使用定理证明器的方法^[4]与归结方法^[5]求解极小冲突集, 但是效率较低. 随后国内学者提出了结合枚举树与电路逻辑关系的利用 SAT 求解

的方法^[6]. 完备的极小碰集求解方法随问题规模上升, 复杂度会以指数级增长. 目前效率较高的方法主要包括姜云飞等学者提出的布尔代数方法^[7]、基于并行的碰集算法^[8]、结合特征学习的粒子群求解极小碰集方法^[9]、基于连接关系的分布式求解方法^[10]等.

求解极小冲突集以及求解极小碰集都是 NP 问题, 随着对 MBD 问题更深入的研究与计算机硬件的发展, 许多学者为避免这两步求解过程, 对直接求解 MBD 方法进行了研究^[11], 其中将诊断问题转换为 SAT 问题是直接求解 MBD 问题的重要方法之一^[12]. SAT 问题是第一个被证明的 NP 完全问题^[13], 也是人工智能领域内的一个重要研究问题之一. 近年来, 在 SAT 竞赛的鼓励下, SAT 求解技术的发展引人注目, 现在的 SAT 求解器

已经可以较快地处理更大规模的实例^[14,15]. 将 MBD 问题转换为 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^[16].

近年来, 国内外学者开始研究结合结构信息对基于 SAT 求解诊断的方法进行优化. 起初, Smith 等学者将诊断问题转换成 SAT 问题, 结合电路中自由输入变量的结构信息压缩 SAT 的搜索空间, 提高诊断效率. 随后, Siddiqi^[17] 等学者提出结合统治关系进行抽象的方法求解 MBD, 对抽象后的电路进行诊断, 得到诊断解后对每一个抽象电路还原后分别求解. 赵相福等学者提出了基于枚举树并利用 SAT 求解器的 CSSE-Tree^[18] 方法求解诊断问题. Amit Metodi^[19] 提出 Section 概念并结合 Cone 的作用, 从电路结构的角度对基于 SAT 的诊断进行了优化, 缩减了诊断问题的求解时间.

周建华等对问题结构特征进行了研究, 对 CSSE-Tree 方法进行改进, 提出了有解空间与无解空间剪枝方法(LLBRS-Tree^[20]方法), 既结合了枚举树和诊断问题的特征, 又利用了 SAT 求解器的特点, 是一种求解效率较高的方法. 该文提出了两个优化策略: 第一, 利用反向搜索的思想, 对部分集合枚举树从底层结点到根结点进行深度优先搜索; 第二, 结合非诊断解结点的祖先结点(真子集)不是解的思想, 进行无解剪枝.

本文在对 LLBRS-Tree 方法充分研究基础上, 借鉴现有电路抽象方法, 结合电路结构提出一种新的分块抽象策略. 将电路进行分块后利用 LLBRS-Tree 方法先求解抽象电路的极小块诊断解, 并提出了一种由极小块诊断解快速拓展得到原电路所有极小诊断解的方法. 结合电路结构与电路信号的传递关系, 快速拓展得到极小诊断解, 避免了对抽象电路还原后才能得到所有极小诊断解的问题.

2 基于反向搜索的有解无解剪枝方法

2.1 MBD 问题

定义 1^[3] 诊断系统被定义为三元组 $DS = (SD, COMPS, OBS)$, 其中: SD 表示系统描述, $COMPS$ 表示系统元件集, OBS 表示系统观测集.

定义 2^[3] 设元件集的一个子集 $\Delta \subseteq COMPS$, $AB(c)$ 为真表示元件 c 故障, 如果: $SD \cup OBS \cup \{-AB(c) | c \in COMPS - \Delta\} \cup \{AB(c) | c \in \Delta\}$ 是可满足的, 则 Δ 是关于 $(SD, COMPS, OBS)$ 的基于一致性诊断.

称 Δ 是极小一致性诊断, 当任意 $\Delta' \subsetneq \Delta$ 不是基于一致性诊断.

2.2 结合枚举树调用 SAT 的诊断方法

使用 SAT 求解器和枚举树来求解极小诊断的基本步骤:

(1) 检测集合枚举树^[21] (Set-Enumeration-Tree, SE-

Tree) 中的每个结点, 结点中的元件假设为故障并将其余元件都置为正常.

(2) 把步骤 1 中的对应单元子句加入到电路的 CNF 中, 调用 SAT 求解器对电路 CNF 进行一致性检测. 若可满足, 则该结点是一个诊断解, 把此诊断解保存. 检测完 SE-Tree 中所有结点后, 最后得到所有极小诊断解.

2.3 LLBRS-Tree 方法

在基于反向搜索的有解无解剪枝 LLBRS-Tree 方法中, 不仅剪掉是诊断解的结点, 而且还对不是诊断解的冗余结点也进行剪枝. 在下面介绍有解剪枝与无解剪枝及反向搜索遍历的相关定义.

定义 3^[20] **反向搜索** 针对一棵枚举树, 当枚举树的层数已经给定的情况下, 称从枚举树的最后一层向枚举树的根结点搜索的过程为反向搜索.

在调用 SAT 求解器来判断当前元件集合是否为诊断解的时候, LLBRS-Tree 方法结合反向搜索遍历方法先对比较长的组件集合进行求解, 使得求解的 CNF 问题的规模较小, 进而减少 SAT 求解时所耗费的时间.

LLBRS-tree 算法步骤如算法 1 所示.

算法 1 LLBRS-tree 算法

-
- step 1. 生成集合枚举树.
- step 2. 寻找当前未判断的最左结点, 若未找到, 跳转 step 6.
- step 3. 调用 SAT 求解器检查结点的一致性.
- step 4. 若可满足
- step 4a. 该候选解判断其极小性, 若极小则删去原诊断解集中该候选解的所有超集, 然后该候选解加入诊断解集合.
- step 4b. 使用有解剪枝策略, 找到其父结点, 跳转 step 3.
- step 5. 若不可满足, 使用无解剪枝策略, 跳过祖先结点, 找到下一个要访问的结点, 跳转 step 3.
- step 6. 返回诊断解集合.
-

3 电路分块诊断方法

上一部分介绍了 LLBRS-Tree 方法求解极小诊断基本思想, 本章在 LLBRS-Tree 算法基础上提出了电路分块诊断方法 ACDIAG, 此方法在 LLBRS-Tree 方法基础上加入了电路规模缩减方法和诊断解扩展方法. 下面给出 ACDIAG 方法的基本思想, 相关定义、定理及其证明和分析.

3.1 电路分块方法

电路分块方法结合电路结构特征对电路进行分块, 从而实现缩减求解电路的规模. 下面介绍该方法相关概念和思想.

定义 4 基本元件 如果元件输入端个数小于等于 2, 称此元件为基本元件.

定义 5 多输入元件 如果元件输入端个数大于 2, 称此元件为多输入元件.

定义 6 起始元件 起始元件是满足下列条件之一的元件: ①元件为系统输出元件; ②元件的输出是两个或两个以上元件的输入; ③元件是多输入元件.

结合电路结构特征, 按如下规则对电路进行分块:

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

(2) 对每个起始元件 a_i 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.

重复上述两步, 最终将电路按起始元件分块. 分块后每块子电路可能有多个输入, 但是只有一个输出. 且每个分块电路都由该块电路的输出元件表示, 进而实现电路分块抽象.

3.2 诊断解拓展方法

ACDIAG 方法通过电路分块方法缩减电路规模, 对于缩减规模后抽象电路利用 LLBRS-Tree 方法获得极小块诊断解, 将其进行拓展从而得到所有极小诊断解. 下面介绍诊断解拓展方法的相关概念和思想.

定义 7 预计输出 在所有元件都正常情况下, 若输入确定则电路能够得到一组输出, 称这组输出为电路的预计输出.

定理 1 在诊断电路中, 若元件 a 为极小诊断解中的元件, 则元件 a 的实际观测一定与其预计输出相反.

证明 (反证法) 假设元件 a 为极小诊断解中的一个元件, 且 a 的实际观测与预计输出相同. 因为元件 a 正常时实际观测与预计输出一定相同, 同时 a 故障时的实际观测与预计输出也相同, 则元件 a 是否故障不影响整个电路的输出, 因此元件 a 可以从极小诊断解中删除, 与极小诊断解的定义矛盾. 证毕.

定理 2 设集合 S 为一个极小诊断, 则 S 中的元件分布在分块的子电路中. 假设 S 在每个分块中出现的元件集合为 $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, 若 S_i 不为空, 则 S_i 是能够导致其所对应的分块子电路实际观测与预计输出相反的极小组合之一.

证明

首先证明 S_i 是能够导致其所在的第 i 块子电路的实际观测与预计输出相反的组合: 已知集合 S 是极小诊断, 且 S_i 不为空, 因此 S_i 中的元件故障必然能够影响到最后电路的输出. 又因为第 i 块子电路只有一个输出, 故 S_i 中的元件故障必然是通过改变了第 i 块子电路的输出进而改变整个电路最后的输出.

接下来证明其极小性(反证法). 若 S_i 的某一真子集 S_k 能够导致其所在的第 i 块电路的实际观测与预计输出相反, 则 S_i 故障对观测的影响与 S_k 相同. 因此把集

合 S 中的 S_i 用 S_k 替换后仍然为诊断解, 与极小诊断解的定义矛盾.

证毕.

定义 8 子(父)元件 在分块后的电路中, 如果元件 a 的输出作为元件 b 的输入, 称元件 a 为元件 b 的子元件, 称元件 b 为元件 a 的父元件.

定义 9 左(右)子元件 若元件 a 有两个子元件 b 与 c , 并且在元件 a 的 CNF 中元件 b 的输出在元件 c 的输出前面, 称元件 b 为元件 a 的左子元件, 元件 c 为元件 a 的右子元件.

定义 10 (非)敏感元件 若子元件 a 的输出改变, 则父元件 b 的输出也发生改变, 则称元件 a 为敏感元件, 否则称为非敏感元件.

定义 11 故障掩盖元件 在固定观测下, 如果某元件 a 为非敏感元件, 若元件 a 或其子元件发生故障时, 而元件 a 的父元件 b 的输出未发生改变, 称元件 a 为故障掩盖元件.

定义 12 极小块诊断解 对整个电路分块后, 将每一块电路抽象成一个大元件, 对抽象后的电路进行求解, 称抽象后电路的诊断解为极小块诊断解.

定义 13 (非)诊断块元件 称极小块诊断中包含的元件为诊断块元件, 称未包含在极小块诊断中的分块元件为非诊断块元件.

由极小块诊断扩展得到原电路所有极小诊断过程如下:

(1) 极小块诊断扩展. 在极小块诊断解基础下, 结合翻转规则, 扩展得到与此极小块诊断相关原电路的极小诊断解.

(2) 发生故障掩盖时极小块诊断扩展. 将故障掩盖对应的非诊断块元件加入到与其有输入关系的极小块诊断中, 检查其是否为极小诊断解. 如果是极小诊断解, 按(1)继续扩展; 否则, 表明是故障掩盖对应非诊断块元件未发生故障掩盖现象, 退出.

定理 3 由极小块诊断扩展规则(1)和(2)扩展可得到原电路的所有极小诊断解.

证明 (反证法) 若存在极小诊断解 (c_1, c_2, \dots, c_k) 不能由上述规则(1)和(2)扩展得到, 则此极小诊断解中存在元件不在上述规则的(1)的诊断块分区内, 也不在规则(2)的发生故障掩盖的极小块诊断分区内, 即元件 c_i 是不属于诊断块分区和发生故障掩盖的非诊断块分区. 此时, 根据极小诊断解性质, 元件 c_i 能使得原电路的某个系统输出与预计输出相反, 即此元件属于诊断块分区内或发生故障掩盖的非诊断块分区, 与元件 c_i 不属于诊断块分区和发生故障掩盖的非诊断块分区矛盾.

结合以上给出关于分块电路极小块诊断的定义和定理, 下面给出极小块诊断拓展得到所有极小诊断解

算法(如算法 2 所示).

算法 2 所有极小诊断解算法

```
Function Compute (input int comp) void ;
Begin
1  thiscompnf[ ][ ] = getthiscnf(comp) ;
2  if 元件 comp 存在左子元件 then
3      改变元件 comp 的左子元件的输出的值;
4      if 得到与预计输出相反的输出 then
5          compute(comp 的左子元件);
6          comp_add(comset[comp], comset[左子元件]);
7  if 元件 comp 存在右子元件 then
8      改变元件 comp 的右子元件的输出的值;
9      if 得到与预计输出相反的输出 then
10         compute(comp 的右子元件);
11         comp_add(comset[comp], comset[右子元件]);
12  if 元件 comp 既存在左子元件又存在右子元件 then
13         compute(comp 的左子元件);
14         compute(comp 的右子元件);
15         combin_add(comset[comp], comset[左子元件], comset
            [右子元件]);
16  comset[comp].add(comp);
End
```

算法 2 第 1 步提取此元件的 CNF 子句,第 2~6 步判断其左子元件单独故障是否可以得到与原件 comp 故障相同的输出,若是则其为解,并递归计算以左子元件为起始元件子树下对应的解;第 7~11 步以相同方法对右子元件进行判断求解;第 12~15 步在左子元件和右子元件都存在且单独都不是解情况下,判断其组合是否为解,若是则分别递归求解并进行组合;算法 2 在第 16 步将此元件本身加入到解集中.

3.3 ACDIAG 算法

ACDIAG 方法首先利用电路分块方法对电路进行抽象划分,再结合 LLBRS-Tree 诊断方法进行诊断求解.在求解出所有极小块诊断解后,利用诊断解拓展方法对所有极小块诊断解进行拓展,进而得到原电路的所有极小诊断解.下面给出 ACDIAG 方法的伪代码(如算法 3 所示).

算法 3 ACDIAG 方法的伪代码

```
Function ACDIAG (input filename, obs[ ], len) void ;
Begin
1  scancnf(filename) ;
2  initialize() ;
3  diveruit() ;
4  solve[ ][ ] = LLBRS-Tree() ;
5  i = 0 ;
6  while solve[i][0]! = 0 do
```

```
7  j = 0 ;
8  while solve[i][j]! = 0 do
9  if solve[i][j]是基本元件 then
10     compute(solve[i][j]) ;
11     combin(comset[solve[i][0]], comset[solve[i][j]]);
12 else
13     多输入元件问题转换为基本元件问题;
14     调用 compute 算法求解;
15     combin(comset[solve[i][0]], comset[solve[i][j]]);
16     j + + ;
17     comp_add(finalsolve, comset[solve[i][0]]);
18     if 敏感元件存在故障掩盖
19         combin_add(finalsolve, com_fal[非诊断块], comset[solve[i][0]]);
20     i + + ;
21     print(finalsolve) ;
22     return ;
End
```

$comset[solve[i][j]]$ 是以 $solve[i][j]$ 为起始元件所求的极小组合. $combin(a[][], b[][])$ 是将 b 与 a 做组合并且赋值给 a . $comp_add(a[][], b[][])$ 是将 b 追加到 a 后面.

算法 3 第 1~3 步进行些数据输入与分块与其他初始化操作;第 4 步依据诊断长度,调用 LLBRS-Tree 方法求解抽象后电路的极小块诊断解;接下来进入对诊断解的扩展的循环,直到所有解扩展结束后退出循环;第 8~16 步对每个极小块诊断解进行扩展,对于极小块诊断解中的每个元件,调用 compute 函数求解其对应的部分电路实际输出与预计输出相反的极小组合,然后将这些极小组合整体进行组合得到一组整个电路的极小诊断解,其中若某些元件不是基本元件,将其转为基本元件来解决.第 18~19 步,判断敏感元件是否存在故障掩盖,若存在,求解被掩盖的非诊断块和极小诊断块元件对应的极小诊断解,并加入到 $finalsolve$ 中.第 21 步输出长度满足条件的所有极小诊断解.

分块后抽象电路的极小块诊断求解和由极小块诊断解扩展得到原电路的所有极小诊断解两个过程,现分别对其完备性进行分析.

(1)分块后抽象电路的极小块诊断求解是利用 LLBRS-Tree 方法遍历求解,LLBRS-Tree 方法是完备的诊断求解方法,因此能求解得到分块后电路的所有极小块诊断解.

(2)在扩展得到所有极小诊断解时,按极小块诊断扩展规则(1)和(2)进行扩展,依据定理 3 可知,扩展得到极小诊断解是原电路的所有极小诊断解.

4 实验结果

本部分对 ACDIAG 方法进行实验测试,并且与目前诊断求解效率较高的 LLBRS-Tree 方法进行对比,进而

对 ACDIAG 方法的结果实验数据进行分析. 实验环境为 Ubuntu 32 位, G++ 编译器, Intel core CPU E7400 2.80G 双核, 2GB RAM 内存. 下面将从以下两个方面来测评 ACDIAG 方法.

规模缩减:将 ACDIAG 方法与目前最好的缩减规模方法^[17,19](利用 cone 等概念)进行比较, 对比其规模缩减能力.

算法效率:由于文献[17,19]源码或可执行文件还未公开, 选择目前诊断求解效率较高的 LLBRS-Tree 方法和 CSSE-Tree 方法与提出的 ACDIAG 方法进行效率

对比.

对于 CSSE-Tree 方法、LLBRS-Tree 与 ACDIAG 方法都调用开源 SAT 求解器 Picosat^[22]进行诊断解判断, 对于每个诊断解采用数组的数据结构进行存储.

本文对算法的测试用例来源于国际标准测试电路 ISCAS-85, 并且直接对电路的 CNF 进行求解, 测试用例包括电路 c17, c432, c499, c880, c1355, c1908. 运行时间限制为 3600s, 超过此时间记为 TO. 算法时间如表 1 所示.

表 1 算法求解时间(s)对比

测试用例	总解个数	极小诊断长度 ≤ 1			总解个数	极小诊断长度 ≤ 2			总解个数	极小诊断长度 ≤ 3		
		CSSE-Tree	LLBRS-Tree	ACDIAG		CSSE-Tree	LLBRS-Tree	ACDIAG		CSSE-Tree	LLBRS-Tree	ACDIAG
c17	3	0.00	0.00	0.00	6	0.00	0.00	0.00	7	0.00	0.00	0.00
c432	1	0.01	0.01	0.00	7	0.71	0.69	0.15	15	38.12	36.52	2.73
c499	2	0.02	0.02	0.01	30	1.59	1.54	0.20	553	121.46	109.31	3.71
c880	0	0.07	0.07	0.02	78	11.84	11.04	1.43	78	1442.67	1393.60	57.74
c1355	5	0.13	0.13	0.17	195	35.12	33.90	9.69	10564	TO	TO	755.76
c1908	5	0.29	0.30	0.42	9	133.24	129.40	27.04	79	TO	TO	3459.43

从表 1 中, 可以看出在极小诊断解长度为 1 时, ACDIAG 方法比 LLBRS-Tree 方法与 CSSE-Tree 方法的求解效率高. 在第 1 层枚举树结点个数较少, 所以两个方法的计算数量基本相同, 所以 ACDIAG 方法效率提升较小; 随着极小诊断最大长度增加到 2 时, ACDIAG 方法相比于 LLBRS-Tree 方法与 CSSE-Tree 方法的效率平均提升 7 倍; 而当极小诊断最大长度为 3 的时候, 效率提升 1 个数量级以上. 因为随着诊断长度的增长, 枚举树对应的求解空间不断增加. 在这个情况下, ACDIAG 方法采用电路进行了分块抽象的方法, 缩减了电路元件的规模, 减小了枚举树在向下扩展时的求解耗时, 进而减小了搜索求解空间的规模, 缩短了求解时间.

表 2 对求解问题规模较大的问题进行了测试, 即极小诊断的长度为 2 和 3 时 ACDIAG 方法相关的主要

数据. 对于极小诊断长度为 2 时, 由极小块诊断扩展得到的极小诊断解是极小块诊断解数量的 6 倍左右, 即扩展解的个数占有极小诊断解的较大部分; 在求解时间方面, 扩展求解耗时远小于极小块诊断耗时, 近似可以忽略. 在求解极小诊断长度为 3 时, 由极小块诊断扩展得到的极小诊断解是极小块诊断解数量的 15 倍左右, 即全部诊断解基本都由扩展得到. 而扩展求解时间并没有明显增加, 与长度为 2 的扩展耗时基本相同. 从表 2 的数据可以发现, 扩展求出的极小诊断解个数占全部诊断解比例较大, 而在扩展极小块诊断解所用的耗时远小于求解极小块诊断解的耗时. 因此, ACDIAG 方法能够在短时间内高效的求出整个电路的所有极小诊断解.

表 2 极小块诊断解与扩展诊断耗时(s)

测试用例	极小诊断长度 ≤ 2					极小诊断长度 ≤ 3				
	全部解	极小块解	诊断耗时	扩展解	扩展耗时	全部解	极小块解	诊断耗时	扩展解	扩展耗时
c17	6	4	0.00	2	0.00	7	4	0.00	3	0.00
c432	7	5	0.12	2	0.03	15	11	2.67	4	0.06
c499	30	3	0.17	27	0.03	553	10	3.62	543	0.09
c880	78	4	1.34	74	0.09	78	4	57.68	74	0.09
c1355	195	30	8.43	165	1.26	10564	631	730.40	9933	25.36
c1908	9	7	26.38	2	0.66	79	49	3154.84	30	4.59

在表 3 中给出了 ACDIAG 方法与目前最好的 Cone 缩减规模方法^[17,19]在电路缩减规模方面的对比. 从表 3 中可以发现,ACDIAG 方法与 Cone 方法相比,部分实例缩减的规模较小,部分实例缩减后规模较大,即其缩减能力基本相同. 缩减规模求解是在离线状态下进行的预处理,其求解时间也是线性时间下完成,其求解不占用在线诊断时间,所以文献[17,19]没有给出求解时间. 本文提出的缩减方法有利于 ACDIAG 方法中诊断解的拓展,解决了 Cone 方法求解所有诊断时还需对抽象电路进行还原的问题,而且还避免了 Cone 方法中在判断诊断解时的一致性检测问题.

表 3 抽象后电路规模缩减情况

测试用例	原规模	Cone 等抽象规模	缩减比例	ACDIAG 抽象规模	缩减比例
c17	6	4	33.3%	4	33.3%
c432	160	64	60.0%	65	57.6%
c499	202	90	55.4%	66	67.3%
c880	383	177	53.8%	132	67.5%
c1355	546	162	70.3%	266	51.3%
c1908	880	374	57.5%	392	55.5%

5 结束语

MBD 是人工智能领域内的重要研究问题之一,很多学者一直在探索能够提高求解效率的方法. LLBRS-Tree 方法结合枚举树采用反向搜索的策略,并且对枚举树进行了有解剪枝与无解剪枝,提高了求解诊断的效率. ACDIAG 方法结合电路结构首先给出电路分块方法减小电路规模,再用 LLBRS-Tree 方法对分块缩减后电路进行求解,最后提出了诊断解拓展方法对所有极小块诊断解进行扩展从而获取所有极小诊断解. 诊断解拓展方法避免了将抽象电路复原后再进行求解的问题,进而使扩展求解耗时较少,进一步明显提高算法的求解效率.

参考文献

- [1] Console L, Dressler O. Model-based diagnosis in the real world: lessons learned and challenges remaining [A]. Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence [C]. Stockholm, Sweden, 1999. 1393 - 1400.
- [2] DeKleer J. Local Methods for Localizing Faults in Electronic Circuits [D]. Cambridge, MA, MIT AI Memo 394, 1976.
- [3] Raymond Reiter R. A theory of diagnosis from first principles [J]. Artificial Intelligence, 1987, 32(1): 57 - 95.
- [4] Genesereth M R. The use of design descriptions in automated diagnosis [J]. Artificial Intelligence, 1984, 24(1 - 3): 411 - 436.
- [5] Haenni R. A query driven anytime algorithm for argumentative and abduction [A]. Proceedings of the 17th National Conference on Artificial Intelligence [C]. Texas, 2000. 337 - 342.
- [6] 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)
- [7] 姜云飞, 林笠. 用布尔代数方法计算最小碰集 [J]. 计算机学报, 2003, 26(8): 919 - 924.
JIANG Yun-fei, LIN Li. The computation of hitting sets with boolean formulas [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(8): 919 - 924. (in Chinese)
- [8] Jannach D, Schmitz T, Shechekotkhin K M. Parallelized hitting set computation for model-based diagnosis [A]. Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence [C]. Austin Texas, USA, 2015, 15: 1503 - 1510.
- [9] 刘娟, 欧阳丹彤, 王艺源, 张立明. 结合特征学习的粒子群求解极小碰集方法 [J]. 电子学报, 2015, 43(5): 841 - 845.
LIU Juan, OUYANG Dan-tong, WANG Yi-yuan, ZHANG Li-ming. Computing minimal hitting sets with particle swarm optimization combined characteristics learning [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(5): 841 - 845. (in Chinese)
- [10] Zhao X F, Ouyang D T. Deriving all minimal hitting sets based on join relation [J]. IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics-Systems, 2015, 45(7): 1063 - 1076.
- [11] Smith A, Veneris A, Ali MF, 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.
- [12] 严晓浪, 郑飞君, 葛海通, 杨军. 结合二叉判决图和布尔可满足性的等价性验证算法 [J]. 电子学报, 2004, 32(8): 1233 - 1235.
YAN Xiao-lang, ZHENG Fei-jun, GE Hai-tong, Yang Jun. Combining binary decision diagrams and boolean satisfiability for equivalence checking [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(8): 1233 - 1235. (in Chinese)
- [13] Cook S A. The complexity of theorem-proving procedures [A]. Proceedings of the 3rd Annual ACM Symposium on Theory of Computing [C]. New York, 1971. 151 - 158.
- [14] Zhang J, Ma F, Zhang Z. Faulty interaction identification via constraint solving and optimization [A]. Theory and

- Applications of Satisfiability Testing-SAT 2012[M]. Berlin Heidelberg; Springer, 2012. 186 – 199.
- [15] Luo C, Cai S, Wu W, et al. Double configuration checking in stochastic local search for satisfiability [A]. Proceedings of the Twenty-Eighth AAAI Conference on Artificial Intelligence [C]. Québec, Canada, 2014. 2623 – 2629.
- [16] Feldman A, Provan G, de Kleer J, et al. Solving model-based diagnosis problems with max-sat solvers and vice versa [A]. Proceedings of the International Workshop on the Principles of Diagnosis [C]. Artificial Intelligence, 2010. 185 – 192.
- [17] Siddiqi S A, Huang J. Hierarchical diagnosis of multiple faults [A]. Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence [C]. Hyderabad, India, 2007. 581 – 586.
- [18] ZHAO Xiangfu, ZHANG Liming, et al. Deriving all minimal consistency-based diagnosis sets using SAT solvers [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19 (4): 489 – 494.
- [19] 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.
- [20] 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 – 513.
- ZHOU Jianhua, OUYANG Dantong, LIU Bowen, ZHANG Liming. A new algorithm combining with the characteristic of the problem for model-based diagnosis [J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54 (3): 502 – 513. (in Chinese)
- [21] Rymon R. Search through systematic set enumeration [A]. Proceedings of the 3rd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning [C]. San Francisco; Morgan Kaufmann, 1992. 539 – 550.
- [22] Biere A. PicoSAT essentials [J]. Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation, 2008, 4: 75 – 97.

作者简介



欧阳丹彤 女. 1968 年生于吉林长春, 吉林大学教授, 博士生导师, 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



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



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