

基于模型诊断的一种新编码方法

周慧思 欧阳丹彤 田新亮 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)

(zhouhsi@163.com)

A Novel Encoding for Model-Based Diagnosis

Zhou Huisi, Ouyang Dantong, Tian Xinliang, 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 (MBD), a well-known approach in the AI field, aims at identifying the root cause of a diagnosis problem. Since computing diagnosis is computationally challenging, some MBD algorithms by modifying the model encode are presented successively, such as Dominator-Oriented Encoding (DOE) approach. In this study, we propose a new encoding process, Observation-Oriented Encoding (OOE), which uses two ideas to simplify MBD model. Firstly, we consider more filtered edges based on observation of system and output of dominated components. This idea can reduce the number of encoded clauses for diagnosis system and observations. Secondly, more components are filtered by finding out observation-based filtered nodes. This approach reduces the number of encoded clauses for components. All of them can reduce the number of encoded clauses efficiently. Furthermore, experiment evaluations on ISCAS85 and ITC99 benchmarks, which contain well-known combinational circuits used for MBD algorithms, show that OOE approach generates less weighted conjunctive normal forms (WCNF) and makes diagnosis easier with maximum satisfiability (MaxSAT) solver, compared with DOE, the latest encoding algorithms for MBD, and Basic Encoding (BE), which is the traditional encoding approach for MBD. In addition, OOE approach returns a solution in a shorter time than DOE and BE approaches.

Key words model-based diagnosis (MBD); maximum satisfiability (MaxSAT); dominator-oriented encoding (DOE); top-level diagnosis (TLD); cardinality-minimal diagnosis

摘要 基于模型诊断 (model-based diagnosis, MBD) 是人工智能诊断领域中著名的诊断求解方法之一, 旨在识别诊断问题的根本原因。由于求解诊断解在计算上具有挑战性, 一些 MBD 算法提出通过修改模型的编码来提高诊断效率, 如面向统治者的编码 (dominator-oriented encoding, DOE) 方法。面向观察的编码 (observation-oriented encoding, OOE) 方法使用 2 种方法对 MBD 模型进行约简。首先, 利用系统观测和统治组件输出的一些过滤边来约简系统描述和观测。其次, 通过查找基于观测的过滤节点来过滤更多的组件, 进而有效约简组件的编码规模。此外, 在 ISCAS85 和 ITC99 基准测试用例上的实验结果表明, 与目前最新的 MBD 编码方法 DOE 和传统的基础编码 (basic encoding, BE) 相比, 上述 2 种约简方法有效减少了 MBD 实例的编码子句数量比, 降低 MaxSAT 求解器求解诊断的难度, 进而能在更短的时间内返回一个诊断解。

收稿日期: 2021-08-02; 修回日期: 2022-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62076108, 61872159, 61672261)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (62076108, 61872159, 61672261).

通信作者: 张立明 (limingzhang@jlu.edu.cn)

关键词 基于模型诊断;最大可满足性问题;基于统治关系的编码;顶层诊断;极小势诊断

中图法分类号 TP391

当预期的系统观测和真实的系统观测不一致时,这时系统就存在故障,需要对故障进行诊断.基于模型诊断(model-based diagnosis, MBD)^[1]是根据系统的描述利用基于推理的方法解释系统观测不一致的过程.几十年来,MBD问题已经广泛应用于各个领域,包括调试关系规范^[2]、诊断系统调试^[3]、电子表格调试^[4]和软件故障定位^[5]等领域.

文章的主要贡献包括3个方面:

1) 提出利用观测的扇入过滤边和扇出过滤边对边进行过滤的约简方法.这2种边都是冗余的,因为它们的值在进行诊断求解过程中是必须进行传播的值.

2) 提出利用观测的过滤节点来进行过滤的约简方法.对于基于观察的过滤节点而言,它所有的扇入和扇出都是固定的,即它的扇入和扇出之间不存在冲突.

3) 在ISCAS85和ITC99基准测试实例上的实验结果表明,提出的方法可以有效缩减MBD问题编码时生成的子句规模,进而降低最大可满足性问题(maximum satisfiability, MaxSAT)求解诊断问题的难度,有效地提高了诊断求解效率.

1 相关工作

近几十年来,越来越多的研究者投入到MBD问题的研究中,提出了许多求解算法,其中包括单个观测的MBD算法^[6-11]和多观测的MBD算法^[12-15].目前用于解决单个观测下的MBD问题算法为:随机搜索算法^[6,16]、基于编译的算法^[7]、基于广度优先搜索的算法^[8]、基于可满足性问题(satisfiability, SAT)的算法^[9-10]、基于冲突导向的算法^[11]等^[17-21].在这些算法中,基于广度优先搜索的算法及其改进算法利用了树结构.此类算法检查树的每个节点是否表示最小诊断解,这类方法是完备的.显然,只要有足够的时间,这类方法可以得到所有的诊断解.然而,这类方法是相当耗时的,它们在解决大型现实实例问题时是不太现实的.随着计算机处理器的快速发展,一些并行化技术也被用于MBD求解问题中,Jannach等人^[8]通过并行地构造碰集树(hitting set-tree, HS-Tree)返回所有诊断.基于编译的方法通过利用给定的系统层次结构和DNF编码的方式^[7]计算候选解的方法也显示出它们的优势.SAFARI算法^[6]证明了在MBD问题上随机搜

索算法的有效性.SAFARI随机删除一个组件,然后判断候选解是否仍然是一个诊断,直到没有组件可以删除.显然,SAFARI不能保证返回的诊断解是极小势诊断.近年来,随着SAT及MaxSAT求解器性能的大幅提升,使得基于SAT的诊断方法引起了广泛的关注.Feldman等人^[6]提出将诊断的电路编码成MaxSAT问题,该方法比SAFARI运行时间更长.相比之下,Metodi等人^[20]提出的SATbD考虑电路的直接统治者,并找出所有极小势诊断.2015年,Marques-Silva等人^[22]提出一种面向统治者的编码(dominator oriented encoding, DOE)方法,通过过滤掉一些节点和一些边的方法将MBD编码为MaxSAT.作为一种先进的编码方法,DOE利用了系统的结构属性,有效地缩减了MBD问题编码后子句集的规模.虽然DOE保证返回基数最小的诊断,但它没有考虑与观察有关的多余带权重的合取范式(weighted conjunctive normal form, WCNF).本文提出一种面向观察的编码(observation-oriented encoding, OOE)方法,该方法在将MBD编码到MaxSAT时能有效减少子句集规模.此外,本文在调用相同的MaxSAT求解器情况下,将OOE方法与基础编码(basic encoding, BE)和DOE进行了比较.实验结果表明,OOE方法有效提高了MBD问题的求解效率.

2 基于模型的诊断问题

本节主要介绍MBD问题的相关定义及概念.

2.1 基本定义

诊断问题可以被定义为一个三元组 $\langle SD, Comps, Obs \rangle$,其中, SD 表示诊断问题的系统描述, $Comps$ 代表组件的集合, Obs 代表一个观测.假定所有组件的状态是正常的情况下,当系统的模型描述和观测出现不一致时,我们称存在一个诊断问题.也就是:

$$SD \wedge Obs \wedge \{\neg AB(c) | c \in Comps\} \models \perp, \quad (1)$$

其中, $AB(c)=1$ 代表组件 c 是故障的,相反, $AB(c)=0$ 代表组件 c 是正常的.下面我们给出诊断的定义.

定义 1. 诊断^[1].给定一个诊断问题 $D=\langle SD, Comps, Obs \rangle$.一个诊断被定义为一组组件 Δ 的集合,其中 $\Delta \subseteq Comps$,当

$$SD \wedge Obs \wedge \{AB(c) | c \in \Delta\} \wedge \{\neg AB(c) | c \in Comps - \Delta\} \models \perp.$$

其中 Δ 是一个极小子集诊断当且仅当不存在当前诊

断的一个子集 $\Delta' \subseteq \Delta$ 是一个诊断. 诊断解的长度称为诊断的势, Δ 是一个极小势诊断当且仅当不存在另外一个诊断解 Δ' 满足 $|\Delta| > |\Delta'|$.

2.2 将诊断问题编码为 MaxSAT

许多 MBD 问题在求解时先被编码为 MaxSAT 问题^[14-15,22], 下面本文介绍编码过程. 当一个 MBD 问题被编码为一系列 WCNF 子句集时, 诊断系统中的组件和电路线分别用变量表示, 它们的值用文字表示. 下面我们分别表示有 2 个输入的与非门 (nand2)、与门 (and2)、与或门 (nor2)、或门 (or2) 的公式:

$$F_{\text{nand2}_c} \triangleq \text{Clauses}(o_{\text{nand2}_c} \leftrightarrow \neg(i_{\text{nand2}_c1} \wedge i_{\text{nand2}_c2})),$$

$$F_{\text{and2}_c} \triangleq \text{Clauses}(o_{\text{and2}_c} \leftrightarrow (i_{\text{and2}_c1} \wedge i_{\text{and2}_c2})),$$

$$F_{\text{nor2}_c} \triangleq \text{Clauses}(o_{\text{nor2}_c} \leftrightarrow \neg(i_{\text{nor2}_c1} \vee i_{\text{nor2}_c2})),$$

$$F_{\text{or2}_c} \triangleq \text{Clauses}(o_{\text{or2}_c} \leftrightarrow (i_{\text{or2}_c1} \vee i_{\text{or2}_c2})).$$

例如, 对于一个 NAND 组件 c 而言, i_{nand_c1} 和 i_{nand_c2} 分别代表组件 c 的输入, o_{nand_c} 是组件 c 的输出. 由一组组件组成的系统 SD 的表示公式为

$$SD \triangleq \bigwedge_{c \in \text{Comps}} (AB(c) \vee F_{\text{nandand}_c}),$$

此处, 代表组件 c 的编码. 在一个观测中, 观测可以表示为

$\text{Obs} \triangleq v.v$ 和一个电路的逻辑值相关, 当 $v=1$ 代表电路逻辑值为正, 当 $v=0$ 代表电路逻辑值为负.

WCNF 中的子句 cl 的权重用 $\omega(cl)$ 表示, 我们分别设置 SD , Comps , Obs 相关的子句为:

1) 对于 SD 和 Comps 中的子句被设置为硬子句, $\omega(cl) := \text{num}(\text{Obs}) + 1$, 其中 $\text{num}(\text{Obs})$ 代表观测的数量;

2) Obs 中的子句被设置为软子句, $\omega(cl) := 1$.

在基于 SAT 的方法中, MBD 问题被编码为一组子句, 然后通过迭代调用 SAT 或 MaxSAT 求解器来计算诊断. 通过添加阻塞子句可以避免相同的诊断解被多次计算. 利用诊断系统的结构属性是一种可行的方法, 这种方法在许多基于 SAT 的诊断算法中得到了应用^[23-24]. 相应地, 诊断中的统治节点和顶层诊断 (top-level diagnosis, TLD) 也是重要的概念.

定义 2. 统治节点^[20]. 给定一个组件 G_1 和 G_2 , 如果从 G_1 到电路的输出的所有路径都包含 G_2 , 则称 G_2 是 G_1 的统治节点. 换句话说, G_1 是被 G_2 统治的节点.

定义 3. 顶层诊断解^[20]. 称 Δ 为一个顶层诊断解, 如果它是一个极小势诊断且不包含任何统治组件.

以图 1 为例, 由于 N_1 到达系统输出的路径是唯一的, 且包括 N_5 , 所以 N_1 被 N_5 统治. 假定有观测 $i_1 = i_2 = i_3 = i_5 = o_1 = o_2 = 1$, $i_4 = 0$, N_6 是一个 TLD, 因为 N_6 不被任何组件统治. 通过将统治组件编码到硬子句中 (即

申明这些组件是健康的), 就可以计算 TLD.

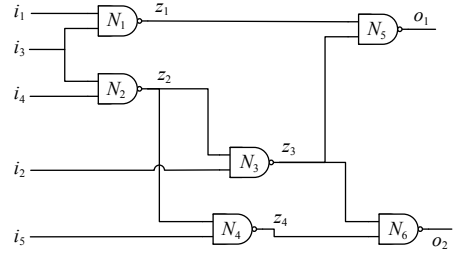


Fig. 1 C17 circuit

图 1 C17 电路

3 求解基于模型的诊断问题的 DOE 方法

为了简化 MBD 到 MaxSAT 的编码过程, 缩减被编码的“门”生成的子句规模. DOE 方法利用“门控制关系”, 同时计算 TLD. 除此之外, 一些曾在 DOE 方法中被提出的概念如阻塞连接及骨干组件, 将在本节定义中给出解释.

定义 4. 骨架节点 (backbone node, B-Node)^[22]. 我们称一个组件为骨架节点当且仅当其是一个被统治的组件且它的扇出对于任何一个 TLD 有固定的值.

考虑图 1 中组件 N_1 , N_1 被 N_5 统治, 当给定一个观测时, N_1 的所有输入是固定的, 也就是说, i_1 和 i_3 有固定的值, 当求解一个 TLD 时, N_1 的扇出就有固定的值, 所以 N_1 是一个 B-Node.

定义 5. 阻塞边 (blocked edge, B-Edge)^[22]. 我们称组件的一个扇入边 E 是一个阻塞边, 如果边的值不会对该组件的扇出起作用.

考虑图 1 中的 N_2 , 当给定一个观测 $\text{Obs} = \{i_4=0\}$, N_2 的输出被确定为 1, 无论 i_2 的值是什么, 因此 i_2 边是一个阻塞边.

定义 6. 过滤节点^[22]. 我们称组件 B 为一个过滤节点, 如果它的所有扇出边都是过滤边.

定义 7. 过滤边^[22]. 我们称边 E 为一个过滤边, 如果它是一个 B-Node 或者它的扇出组件是一个过滤节点.

由于 N_1 是一个被统治组件, 给定一个观测 $\text{Obs} = \{i_1=1\}$, 当 z_1 的值 ($z_1=0$) 被传播后, z_3 的值将不会对 N_5 的输出起作用. 也就是说, N_5 的输出值是固定的. 因此, $\langle N_1, N_5 \rangle$ 是一个 B-Edge, 因此, $\langle N_1, N_5 \rangle$ 是一个过滤边. 假定 $\langle N_3, N_6 \rangle$ 也是一个过滤边, 这时 N_3 的所有输入边都是过滤边, 那么组件 N_3 是一个过滤节点. 具体的 DOE 方法如算法 1 所示:

算法 1. 编码 MBD 到 MaxSAT 的 DOE 方法^[22].

输入: SD , Comps , Obs ;

输出: 编译后的模型.

- ① repeat
- ② $Dominators \leftarrow$ 所有统治节点;
- ③ $BackboneComps \leftarrow$ 所有骨架组件;
- ④ $BlockedConnections \leftarrow$ 所有阻塞连接;
- ⑤ if 到达最大迭代次数 then
- ⑥ break;
- ⑦ end if
- ⑧ until $NoMoreChanges$;
- ⑨ $M \leftarrow$ 产生 MaxSAT 模型.

4 OOE 方法

文献 [22] 中的实验表明了 DOE 方法在求解 MBD 问题上的有效性. 在本节中, 我们将介绍 OOE 方法及该方法中为了改进基于 MaxSAT 的 MBD 编译过程用到的其他过滤节点和过滤边的概念.

定义 8. 基于观测的扇入过滤边. 我们称边 E 为一个基于观测的扇入过滤边, 如果它是一个系统的输入或者它是一个统治组件的一个固定输出边.

此处继续讨论观测 $Obs = \{i_1 = 1, i_2 = 1, i_3 = 1, i_4 = 1, i_5 = 1, o_1 = 1, o_2 = 1\}$, 在第 1 次迭代中, i_1, i_2, i_3, i_4, i_5 是基于观测的扇入过滤边. 在 DOE 方法过滤了一些节点和边之后, 因为 N_1, N_4, N_3, N_2 依次成为统治节点之后, $\langle N_1, N_5 \rangle, \langle N_3, N_6 \rangle, \langle N_2, N_4 \rangle, \langle N_4, N_6 \rangle$ 变成了基于观测的扇入过滤边.

定义 9. 基于观测的扇出过滤边. 我们称边 E 为一个基于观测的扇出过滤边, 如果它是一个系统的输出.

给定观测 $Obs = \{i_1 = 1, i_2 = 1, i_3 = 1, i_4 = 1, i_5 = 1, o_1 = 1, o_2 = 1\}$, o_1 和 o_2 均为基于观测的扇出过滤边.

定义 10. 基于观测的过滤边. 我们称边 E 为一个基于观测的过滤边, 如果它是一个基于观测的扇出过滤边或者它是一个基于观测的扇入过滤边.

初始状态下, 系统的输入输出是固定的. 因此, 任何基于观测的边缘边都是固定的.

定义 11. 基于观测的过滤节点. 我们称一个组件 B 为基于观测的过滤节点, 如果该组件的扇入和扇出都是固定的, 并且扇出值与扇入值在逻辑上一致, 或者该组件是一个 B-Node.

给定一个观测 $Obs = \{i_1 = 1, i_2 = 1, i_3 = 1, i_4 = 1, i_5 = 1, o_1 = 1, o_2 = 1\}$, 在 DOE 编译过程中, 因为 N_1, N_2, N_3, N_4 都是 B-Node, 所以它们都是基于观测的过滤节点. 此外, N_5 也是一个基于观测的过滤节点因为它有一个输入值为 0, 这与它的输出值 1 是一致的.

在 OOE 方法中, 被统治的组件编码为硬子句, 这种设置与 DOE 方法中的设置是相同的.

在 OOE 编译方法的预处理过程中, 不仅过滤边和过滤节点不被编码为 WCNF, 而且基于观测的过滤边和基于观测的过滤节点也不被编码为 WCNF.

命题 1. 假定 ζ 为使用 DOE 方法求解出的一个 TLD, 那么使用 OOE 方法可以求解出一个和 ζ 具有相同势的 TLD, ζ' .

考虑观测 $Obs = \{i_1 = 1, i_2 = 1, i_3 = 1, i_4 = 1, i_5 = 1, o_1 = 1, o_2 = 1\}$, 我们详细解释 DOE 方法和 OOE 方法在进行编码时的约简子句的细节. 在第 1 次迭代中, 被统治节点为 $\{N_1, N_4\}$. N_1 被 N_5 统治, N_4 被 N_6 统治. 之后 N_1 的输出值 0 被传播, N_5 的输出值是固定的, 所以 $\langle N_5, N_5 \rangle$ 是一个 B-Edge. 在第 2 次迭代时, 因为过滤边 $\langle N_3, N_5 \rangle$, 所以 N_3 被 N_6 统治. 随后, N_2 由 N_6 统治. 除此之外, i_2, i_3 被过滤, 成为过滤边. 这就是所有的 DOE 方法的约简过程及贡献. 剩余的组件 $\{N_5, N_6\}$ 以及边 $\langle N_1, N_5 \rangle, \langle N_3, N_6 \rangle, \langle N_4, N_6 \rangle$ 均在 DOE 方法中没有被考虑到.

在 OOE 方法中, 为了考虑将更多的节点和边进行约简, 基于观测的过滤边和基于观测的过滤节点被提出用于减少生成的 WCNF 子句的数量. 算法 2 概述了 OOE 方法的伪代码.

算法 2. 编码 MBD 到 MaxSAT 的 OOE 方法.

输入: $SD, Comps, Obs$;

输出: 编译后的 WCNF 子句.

- ① repeat
- ② $Dominators \leftarrow$ 所有统治节点;
- ③ $BackboneComps \leftarrow$ 所有骨架组件;
- ④ $BlockedConnections \leftarrow$ 所有阻塞连接;
- ⑤ if 到达最大迭代次数 then
- ⑥ break;
- ⑦ end if
- ⑧ until $NoMoreChanges$;
- ⑨ $edgeStack \leftarrow$ 所有基于观测的过滤边;
- ⑩ $nodeStack \leftarrow$ 所有基于观测的过滤节点;
- ⑪ while $edgeStack \neq \text{NULL}$ do
- ⑫ $e \leftarrow edgeStack$ 中的栈顶元素;
- ⑬ $Propagation(e)$;
- ⑭ $node \leftarrow nodeStack$ 中的栈顶元素;
- ⑮ $Propagation(node)$;
- ⑯ if 获得一个新的基于观测的过滤 then
- ⑰ $edgeStack \leftarrow Push(E)$;
- ⑱ end if

- ⑰ if 获得一个新的基于观测的过滤节点
node then
⑱ nodeStack \leftarrow Push(node);
⑳ end if
㉑ end while

算法 2 一直迭代至没有发现新的基于观测的过滤边和过滤节点.其中,算法 2 的行①~⑧和文献 [22] 中提出的 DOE 方法的预处理部分相同,经过 DOE 预处理后,初步地,我们找到基于观测的过滤边和基于观测的过滤节点.算法 2 在行⑨~⑩分别将初步得到的基于观测的过滤边和基于观测的过滤节点压入栈中.在行⑪~⑫,算法 2 找出所有的基于观测的过滤边和基于观测的过滤节点,旨在减少生成的 WCNF 子句的数量.在行⑬ 和行⑮ 中,函数 *Propagation* 是

一种单元传播技术用于传播行⑫ 和行⑬ 中的 *e* 和 *node* 变量的赋值.

给定观测 $Obs = \{i_1 = 1, i_2 = 1, i_3 = 1, i_4 = 1, i_5 = 1, o_1 = 1, o_2 = 1\}$, 图 2 分别为算法 1 和算法 2 的编译结果.在图 2 中,虚线表示过滤边(如图 2(a)的 $\langle N_3, N_5 \rangle$)或基于观测的过滤边(如图 2(b)的 $\langle N_1, N_5 \rangle$).同样地,虚线点表示的组件代表过滤节点或基于观测的过滤节点(如图 2(a)的 N_1).过滤边、过滤节点、基于观测的过滤边和基于观测的过滤节点均将不会被编译成 WCNF 子句.如图 2 所示,仅有实线表示的元件和电路线被编码为 WCNF 子句,虚线表示的元件和电路线不被编码为 WCNF 子句.在这个例子中,在 OOE 方法之后,只有 1 个组件和 3 条电路线最终被编码为 WCNF 子句,图 2(b)中用椭圆表示.

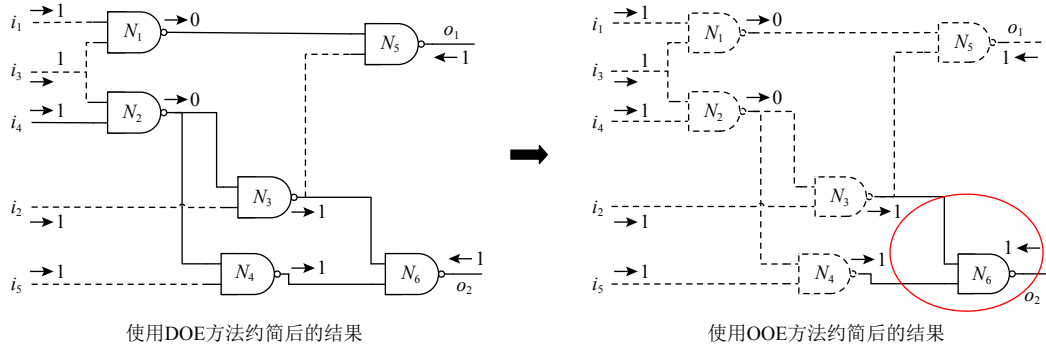


Fig. 2 Comparison between DOE and OOE in reduction detail

图 2 DOE 方法和 OOE 方法在约简细节的比较

5 实验结果

在本节中,我们将在 MBD 中提出的预处理方法与目前最好的预处理方法 DOE^[22] 及不用预处理过程的编码方法 BE 进行了对比.在编码为 MaxSAT 问题后求解诊断问题时,我们选择了一种 MaxSAT 求解器——UwrMaxSAT^[19] 进行求解,UwrMaxSAT 在 2020 年 MaxSAT 评估中的加权组中表现最好.实验分别在 ISCAS85 和 ITC99 这 2 组测试实例上执行,这 2 组测试实例均在文献 [22] 中使用.其中,第 1 组测试实例包含 9 998 个测试用例,第 2 个测试实例包含 7 822 个测试用例.本文提出的 OOE 方法用 C++ 实现并使用 G++ 编译.我们的实验是在 Ubuntu 16.04 Linux 和 Intel Xeon E5-1607@3.00 GHz, 16 GB RAM 上进行.

图 3 和图 4 分别给出 OOE 方法与 BE 方法和 DOE 方法在求解 ISCAS85 实例时,MaxSAT 求解器

求得一个诊断解的运行时间.在实验中,我们设置 MaxSAT 求解的时间上限为 0.1 s.如图 3 和图 4 所示,

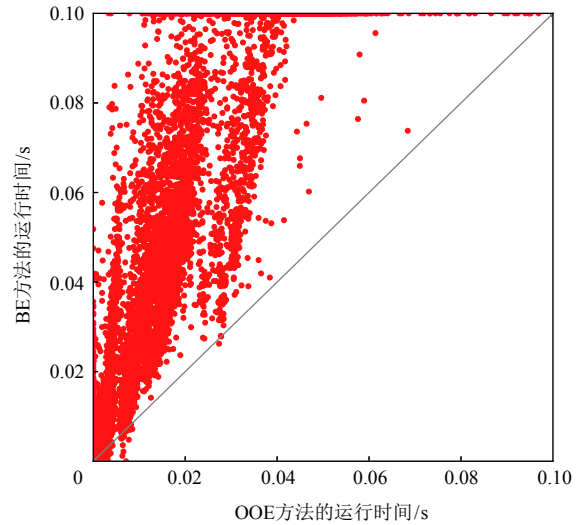


Fig. 3 Comparison of the run time of BE and OOE approaches on ISCAS85 benchmark

图 3 BE 和 OOE 方法在 ISCAS85 实例上的运行时间比较

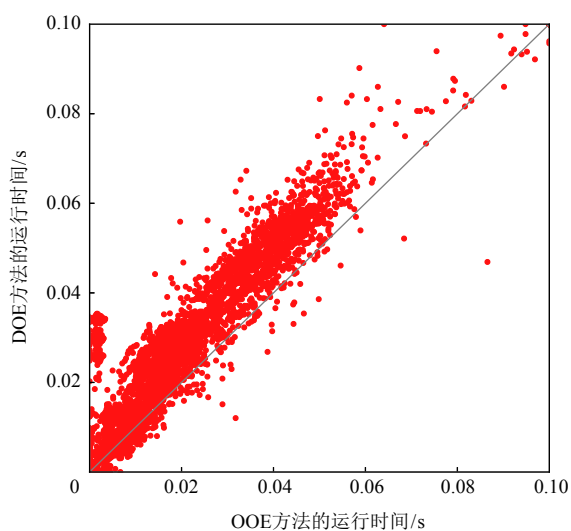


Fig. 4 Comparison of the run time of DOE and OOE approaches on ISCAS85 benchmark

图4 DOE和OOE方法在ISCAS85实例上的运行时间比较

对于大多数测试实例, OOE和DOE方法可以在0.1 s内通过MaxSAT求解器返回诊断结果. 用BE方法求解时, 有1 431个测试实例不能在时间限制内得到一个诊断解; 但是对于OOE和DOE方法, 只有350个实例不能在0.1 s内得到一个诊断解. 此外, 如图4中所示, 对于大多数测试实例, OOE方法要明显优于DOE方法.

图5和图6分别显示了在ITC99实例上OOE方法与BE及DOE方法在求解诊断问题时MaxSAT求解器运行时间方面的比较. 我们设置MaxSAT求解器的时间限制为1 s. 坐标轴上的点表示在给定时间内

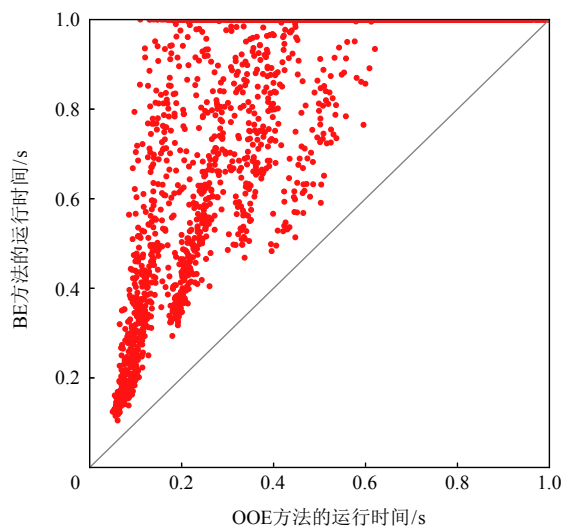


Fig. 5 The run time of BE and OOE approaches on ITC99 benchmark

图5 BE和OOE方法在ITC99实例上的运行时间比较

无法求解的一些测试实例. 使用OOE, DOE, BE方法不能得到一个解的测试实例的个数分别为4 939, 5 197, 6 669. 在求解实例个数上OOE方法明显优于BE和DOE方法, 除此之外, 在大多数情况下, 相比于BE和DOE方法, 使用OOE方法能在更短的时间内得到一个诊断解.

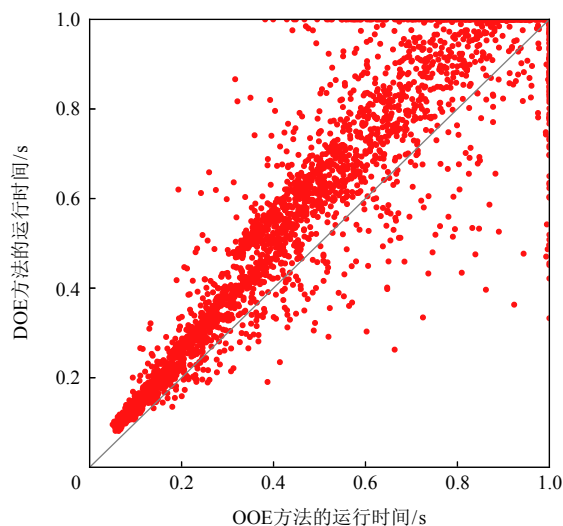


Fig. 6 The run time of DOE and OOE approaches on ITC99 benchmark

图6 DOE和OOE方法在ITC99实例上的运行时间比较

在ITC99实例和ISCAS85实例上的详细实验结果分别如表1和表2所示:

Table 1 Solved Results for ITC99 Benchmark

表1 在ITC99实例上的求解结果

电路名称	观测个数	所用时间比竞争对手短的实例个数		所用时间比竞争对手短的实例个数	
		OOE	BE	OOE	DOE ^[21]
b14	919	433	164	569	2
b15	995	663	188	819	2
b17	1 000	946	54	1 000	0
b18	1 000	884	46	917	2
b19	1 000	823	56	833	42
b20	997	596	222	782	0
b21	919	636	166	780	0
b22	992	722	223	932	0

在2组表中, 我们分别列出了4组数据. 第1列显示电路名称, 第2列显示测试实例的数量. 第3~6列显示OOE方法求解诊断时所用时间比竞争对手短的实例个数. 从表1和表2可以看出, 对每一个电路进行诊断问题求解时, OOE方法都是可行的, 且求解结

果显示,相比于 DOE 及 BE 方法,OOE 方法都有明显的优势.特别是在 c880 电路上,OOE 方法在所有 1 182 个测试实例中的实验结果均优于 BE 方法,有 97.8% 的实例的实验结果优于 DOE 方法.

Table 2 Solved Results for ISCAS85 Benchmark

表 2 在 ISCAS85 实例上的求解结果

电路名称	观测个数	所用时间比竞争 对手短的实例个数		所用时间比竞争 对手短的实例个数	
		OOE	BE	OOE	DOE ^[22]
c17	63	48	14	56	7
c432	301	280	17	278	23
c499	835	734	96	760	71
c880	1 182	1 182	0	1 157	20
c1355	836	719	113	832	4
c1908	864	664	182	834	12
c2670	1 162	1 128	34	1 158	4
c3540	756	705	51	756	0
c5315	2 038	2 028	10	2 038	0
c6288	404	246	158	398	6
c7552	1 557	1 536	21	1 557	0

6 总 结

目前,很多基于 SAT 的 MBD 方法把 MaxSAT 编码作为分析 MBD 问题的一个基本步骤.本文在面向支配者编码的方法研究基础之上,提出一种 OOE 的面向观测的编码方法,显著减少了 MBD 编码后子句的数量,进而降低了 MaxSAT 求解诊断的难度,提高了求解诊断的效率.本文提出了 2 种方法用于提高 OOE 的效率.首先,根据诊断系统的输入观测和输出观测对过滤边进行约简.其次,利用基于观测的过滤节点,在编码时对一些组件进行约简,进而不被编码到 MBD 问题的子句中.实验结果表明,通过找到更多的基于观测的过滤节点和基于观测的过滤边,能有效减少编码后子句集规模,进而提高基于 MaxSAT 计算诊断解的效率.OOE 方法在 ISCAS85 系统和 ITC99 系统的基准测试实例上求解诊断是高效的.在未来的研究中,将探索多观测下 OOE 方法的扩展算法.

作者贡献声明:周慧思负责文章主体撰写和修订,文献资料的分析、整理及文章写作;欧阳丹彤负责确定综述选题,指导和督促完成相关文献资料的收集整理;田新亮负责文献资料的收集以及部分图

表数据的绘制;张立明负责提出文章修改意见,指导文章写作.

参 考 文 献

- [1] Reiter R. A theory of diagnosis from first principles[J]. *Artificial Intelligence*, 1987, 32(1): 57–95
- [2] Torlak E, Chang F S H, Jackson D. Finding minimal unsatisfiable cores of declarative specifications[C] //Proc of the 13th Int Symp on Formal Methods. Berlin: Springer, 2008: 326–341
- [3] Safarpour S, Mangassarian H, Veneris A, et al. Improved design debugging using maximum satisfiability[C] //Proc of the 7th Formal Methods in Computer Aided Design. Piscataway, NJ: IEEE, 2007: 13–19
- [4] Jannach D, Schmitz T. Model-based diagnosis of spreadsheet programs: A constraint-based debugging approach[J]. *Automated Software Engineering*, 2016, 23(1): 105–144
- [5] Jose M, Majumdar R. Cause clue clauses: Error localization using maximum satisfiability[J]. *ACM SIGPLAN Notices*, 2011, 46(6): 437–446
- [6] Feldman A, Provan G M, Van Gemund A J C. Computing minimal diagnoses by greedy stochastic search[C] //Proc of the 23rd AAAI Conf on Artificial Intelligence. Palo Alto, CA: AAAI, 2008: 911–918
- [7] Siddiqi S A, 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
- [8] Jannach D, Schmitz T, Shchekotykhin K M. Parallelized hitting set computation for model-based diagnosis[C] //Proc of the 29th AAAI Conf on Artificial Intelligence. Palo Alto, CA: AAAI, 2015: 1503–1510
- [9] Ansótegui C, Bonet M L, Levy J. SAT-based MaxSAT algorithms[J]. *Artificial Intelligence*, 2013, 196: 77–105
- [10] Feldman A, Provan G, de Kleer J. Solving model-based diagnosis problems with Max-SAT solvers and vice versa[C] //Proc of the 21st Int Workshop on Principles of Diagnosis. New York: PHM Society, 2010: 185–192
- [11] Stern R T, Kalech M, Feldman A. Exploring the duality in conflict-directed model-based diagnosis[C] //Proc of the 26th AAAI Conf on Artificial Intelligence. Palo Alto, CA: AAAI, 2012: 828–834
- [12] Lamraoui S M, Nakajima S. A formula-based approach for automatic fault localization of imperative programs[C] //Proc of the 19th Int Conf on Formal Engineering Methods. Berlin: Springer, 2014: 251–266
- [13] Lamraoui S M, Nakajima S. A formula-based approach for automatic fault localization of multi-fault programs[J]. *Journal of Information Processing*, 2016, 24(1): 88–98
- [14] Ignatiev A, Morgado A, Weissenbacher G. Model-based diagnosis with multiple observations[C] //Proc of the 28th Int Joint Conf on Artificial Intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2019: 1108–1115
- [15] Ignatiev A, Morgado A, Marques-Silva J. Model based diagnosis of multiple observations with implicit hitting sets[J]. *arXiv preprint, arXiv: 1707.01972*, 2017

- [16] Feldman A, Provan G, Van Gemund A. Approximate model-based diagnosis using greedy stochastic search[J]. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 2010, 38: 371–413
- [17] Williams B C, Ragno R J. Conflict-directed A^* and its role in model-based embedded systems[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2007, 155(12): 1562–159
- [18] Darwiche A. Decomposable negation normal form[J]. *Journal of the ACM*, 2001, 48(4): 608–647
- [19] Piotrów M. UwrMaxSAT: Efficient solver for MaxSAT and Pseudo-Boolean problems[C] //Proc of the 32nd Int Conf on Tools with Artificial Intelligence. Piscataway, NJ: IEEE, 2020: 132–136
- [20] 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
- [21] De Kleer J. Hitting set algorithms for model-based diagnosis[C] //Proc of the 22nd Int Workshop on Principles of Diagnosis. New York: PHM Society, 2011: 100–105
- [22] Marques-Silva J, Janota M, Ignatiev A, et al. Efficient model based diagnosis with maximum satisfiability[C] //Proc of the 24th Int Joint Conf on Artificial Intelligence. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann, 2015: 1966–1972
- [23] 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, 刘博文, 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)
- [24] 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): 1571–1577 (in Chinese)
(欧阳丹彤, 刘博文, 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): 1571–1577)



Zhou Huisi, born in 1995. PhD candidate. Her main research interests include MaxSAT problem and model-based diagnosis.

周慧思, 1995 年生. 博士研究生. 主要研究方向为最大可满足性问题和基于模型诊断.



Ouyang Dantong, born in 1968. PhD, professor. Senior member of CCF. Her main research interests include the model-based diagnosis, SAT problem and model checking.

欧阳丹彤, 1968 年生. 博士, 教授. CCF 高级会员. 主要研究方向为基于模型诊断、可满足性问题和模型检测.



Tian Xinliang, born in 1991. PhD candidate. His main research interests include model-based diagnosis and combinatorial optimization problem.

田新亮, 1991 年生. 博士研究生. 主要研究方向为基于模型诊断和组合优化问题.



Zhang Liming, born in 1980. PhD, senior engineer. Senior member of CCF. His main research interests include model-based diagnosis and SAT problem.

张立明, 1980 年生. 博士, 正高级工程师. CCF 高级会员. 主要研究方向为基于模型诊断和可满足性问题.