MC/DC 最小测试用例集递归分块矩阵生成算法①

葛汉强

(重庆信息技术职业学院 软件学院 重庆 404000)

摘 要：测试用例个数可以影响软件测试的成本与效率，因此最小测试用例集的生成算法具有重要的实用价值。对布尔表达式语法树采用递归分块矩阵处理，得到了 MC/DC 最小测试用例集生成算法。并证明了该算法的正确性，给出其成立的前提条件。

关键词：MC/DC；最小测试用例集；递归分块矩阵；生成算法

Generating Algorithm of Recursive Blocks Matrix for Minimum Test Case Set on MC/DC

GE Han-Qiang

(College of Software, Chongqing Information Technology College, Chongqing 404000, China)

Abstract: The quantity of the test suite affects the cost and efficiency of software testing, so it is important to generate an algorithm of minimum test case set. According to studying syntactic tree of Boolean expressions on recursive blocks matrix, an algorithm for minimum test case set on MC/DC is proposed. Its correctness is proved in theory and its premise is considered.

Key words: MC/DC; minimum test case set; recursive blocks matrix; generating algorithm

1 引言

软件测试的一个核心主题就是构造精简高效的测试用例集。MC/DC 即修正条件判定覆盖是白盒测试逻辑覆盖法中的一种，是由欧美的航空/航天制造厂商和使用单位联合制定的“航空运输和装备系统软件认证标准”，与白盒测试其他逻辑覆盖相比，MC/DC 覆盖强度高于语句、判定和条件覆盖，覆盖范围大于条件判定组合覆盖，测试性能接近多条件覆盖，但测试用例数却是线性增加远小于多条件覆盖的指数级增加，符合精简高效的原则，在国防、航空航天领域应用广泛[1]。

目前，国内对生成 MC/DC 最小测试用例集的算法讨论并不多，主要有最小真值表法[2]和快速生成算法[3]。这两种算法都是通过对待测布尔表达式的相关处理，最终得到满足 MC/DC 定义的最小测试用例集。本文采用递归分块矩阵法来处理布尔表达式语法树，先生成一个递归测试集真值表矩阵,然后根据 Chilenski 原则，对真值表矩阵中的“确定项”反转得到 MC/DC 最小测试用例集。

2 生成算法

2.1 算法相关概念

定义 1. 设 B 是一布尔表达式，p_1，p_2，…，p_n 为 B 中 n 个分量记为 $p_i(1 \le i \le n)$称为 B 的条件，当 p_i 每个只出现一次则称 B 为非平凡布尔表达式[4]。

定义 2. 在 B 中各条件分量仅由 OR，AND，NOT 布尔运算符连接记为$d(pi)\ (1 \le i \le n)$称为 B 的判定。

定义 3. MC/DC 要求满足两个条件：首先，每一个程序模块的入口和出口点都要考虑至少要被调用一次，每个程序的判定到所有可能的结果值至少转换一次；其次，程序的判定被分解为通过逻辑操作符（AND 、OR）连接的 bool 条件，每个条件对于判定的结果值是独立的[1]。

MC/DC 的定义要求每个条件分量 p_i 值与 B 的结

① 收稿时间:2010-11-02;收到修改稿时间:2010-11-28

果值在其他条件分量值不变的情况下，反转一次。满足反转要求的两个测试用例称为结对测试用例。

定义 4. 判定式(p_1)AND(p_2)用分块矩阵 $R_\wedge=\begin{pmatrix}1&1&1\\1&0&0\\0&1&0\end{pmatrix}$表示。同样，判定式$(p_1)OR(p_2)$用分块矩阵 $R_\vee=\begin{pmatrix}0&0&0\\0&1&1\\1&0&1\end{pmatrix}$表示。$R_\wedge$和 $R_\vee$称为测试集真值表矩阵，其中矩阵第一列表示 p_1 的取值，第二列表示 p_2 的取值，第三列表示 B 结果的取值。

结合定义 3、4 很容易得出 $R_\wedge$和 $R_\vee$的第一行与第二行为结对测试用例，第一行与第三行为结对测试用例。

Chilenski 原则 对于使用 MC/DC 方法的任何表达式当具有 N 个条件时，一个测试集合最少含有 N+1 组元素[5,6]。

定义 5. 满足 Chilenski 原则的测试用例集为 MC/DC 最小测试用例集。

定义 6. 判定式$(d(pi))$AND$(d(p_j))$用如下矩阵 $R_\wedge^n=\begin{pmatrix}L_1&R_1&1\\L_2&R_2&0\\L_3&R_3&0\end{pmatrix}$表示，其中 $L_m(1\le m\le 3)$表示第 m 行左分块，$R_m(1\le m\le 3)$表示第 m 行右分块。同样，判定式$(d(pi))$OR$(d(p_j))$可用 $R_\vee^n=\begin{pmatrix}L_1&R_1&0\\L_2&R_2&1\\L_3&R_3&1\end{pmatrix}$表示，矩阵 $R_\wedge^n$ 和 $R_\vee^n$ 称为递归测试集真值表矩阵。

替换规则　由 B 生成的布尔表达式语法树中，逻辑操作符 AND 、OR 表示树中的分支节点，p_i 或者 NOTp_i 表示叶子节点。其中当节点为 AND 时，(1)用$(1\ \vdots\ 1)$替换，而(0)用$\begin{pmatrix}1&0\\0&1\end{pmatrix}$替换；节点为 OR 时，$(1)$用$\begin{pmatrix}0&1\\1&0\end{pmatrix}$替换，$(0)$用$(0\ \vdots\ 0)$替换；遇到 NOT 时，$(1)$用$(0)$替换，$(0)$用$(1)$替换。

容易看出节点 AND 的 1 分块为$(1\ \vdots\ 1)$时，由 0 替换的矩阵$\begin{pmatrix}1&0\\0&1\end{pmatrix}$分块为$(1\ \vdots\ 0)$与$(0\ \vdots\ 1)$两行与$(1\ \vdots\ 1)$满足结对关系；节点 OR 结论一致。

定义 7. 在矩阵 $R_\wedge^n$ 和 $R_\vee^n$ 中，节点为 AND 时的(1)和$(1\ \vdots\ 1)$，节点为 OR 时的(0)和$(0\ \vdots\ 0)$称为确定项。当布尔表达式语法树中的叶子节点由确定项代替，该语法树称为确定项语法树。

命题 1. 确定项语法树根节点是 AND 时，左分支带叶子的节点是 OR 则确定项在矩阵 $R_\wedge^n$ 第三行，是 AND 则确定项在第一行；右分支带叶子的节点是 OR 则确定项在矩阵 $R_\wedge^n$ 第二行，是 AND 则确定项在第一行。当根节点为 OR 时，结论呈现对偶性。

证明：只证明根节点为 AND 时的结论，OR 的结论由对偶性原理可得。

当 n=1 时 $R_\wedge$矩阵左右确定项都在第一行结论成立。

假设为 n 时成立，则矩阵 $R_\wedge^n$ 左分块第 i 个条件分量的节点为 AND 时，确定项在第一行，L_1 的 i 分块为(1)与 L_3 的 i 分块互反；节点为 OR 时，确定项在第三行，L_1 的 i 分块为(0)与 L_3 的 i 分块互反。

假定第 i 个条件分量裂变为判定式(k_1)AND(k_2)，由替换规则，分块(1)替换为$(1\ \vdots\ 1)$，根据定义 7 确定项在第一行，判定式为 OR，分块(0)替换为$(0\ \vdots\ 0)$，确定项在第三行；右分块同理可证。即 n+1 时结论成立。由归纳法可知结论成立。证毕。

命题 2 递归测试集真值表矩阵可生成 MC/DC 最小测试用例集。

证明：证明分为两步，第一步证明递归测试集真值表矩阵的三行排列组合成的测试用例集是满足 MC/DC 定义的测试用例集；第二步证明该测试用例集可以筛选出满足 Chilenski 原则的最小测试用例集。

先证步骤一：由定义 3、4，当 n=1 时 $R_\wedge$和 $R_\vee$矩阵中第一行和第二行、第一行和第三行分别构成结对测试用例结论成立。

假设为 n 时成立，矩阵 $R_\wedge^n$ 和 $R_\vee^n$ 的左边 L_1 与 L_3 互反，右边 R_1 与 R_2 互反，即左边 i 个条件分量的结对测试用例在第一行和第三行，右边 j 个条件分量的结对测试用例在第一行和第二行。

当 n+1 时，矩阵 $R_\wedge^n$ 和 $R_\vee^n$ 的左边 i 个分量裂变为 i+1 个，假定裂变分量是 k 裂变为 k_1 和 k_2，由替换规则可知，k_1 和 k_2 分量在 L_1 与 L_3 的分块矩阵中满足结对关系。右边同理可证裂变分量在 R_1 与 R_2 的分块矩阵中满足结对关系，故 n+1 时结论成立。由归纳法可知第一步结论成立，步骤一证毕。

步骤二证明：矩阵 $R_\wedge^n$ 由判定式$(d(pi))$AND$(d(p_j))$

生成，假定判定式左边 $d(pi)$ 为 i 个分量，右边 $(d(p_j))$ 为 j 个分量。

情况一：假定左边确定项全在第三行，则由确定项反转的个数为 i 个，包括一项确定项，共计 i+1；同理右边共计 j+1 个。由参考文献[5,6]证明 Chilenski 原则的方法可以得出，两边测试集共计 i+ j+1=N+1, 由定义 5，该测试集是 MC/DC 最小测试用例集。

情况二：假定左边确定项第三行有 k 个，则第一行有 i-k 个。由第三行确定项生成的测试集为 k+1,第一行确定项生成的测试集为 i-k+1，由情况一的证明方法可知左边的测试集数为 i+1 个，右边同理可得。所以，由情况二生成的测试集也是 MC/DC 最小测试用例集。矩阵 $R_{\vee}^{n}$ 同理可证，步骤二得证。

由步骤一、二得证，原命题成立。证毕。

2.2 生成算法描述

基于上节中的定义、规则和命题 1、2，MC/CD 最小测试用例集递归分块矩阵生成算法描述如下：

Step1. 由非平凡布尔表达式生成确定项语法树。

Step2. 先序遍历确定项语法树，根节点为 AND 时生成矩阵 $R_{\wedge}$，为 OR 时生成矩阵 $R_{\vee}$。分支节点根据替换规则递归生成递归测试集真值表矩阵。

Step3. 根据确定项语法树的叶子节点扫描递归测试集真值表矩阵对应行得到左右分块确定项。

Step4. 判定式左边 i 个分量进行 i 次循环，左分块确定项依次反转生成结对测试用例；判定式右边 j 个分量进行 j 次循环，右分块确定项依次反转生成结对测试用例。循环完成，算法结束。

3 实例验证

本节用一个实例对生成算法进行验证。假定某判定式是（p_1OR p_2）AND（p_3AND p_4）类型。

Step1.判定式生成的确定项语法树用下面图 1 表示。

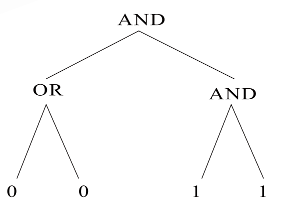

图 1 判定式确定项语法树

Step2. (1)先序遍历确定项语法树，遇到根节点 AND 生成 $R_{\wedge}=\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$。

(2) 向左遍历遇到 OR，L_1 和 L_2 用 $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 替换，L_3 用 $(0 \ \vdots \ 0)$ 替换。向右遍历遇到 AND，R_1 和 R_3 用 $(1 \ \vdots \ 1)$ 替换，R_2 用 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 替换。最后生成递归测试集真值表矩阵 $R_{\wedge}^{n}=\left(\begin{array}{cc|cc|c} 0 & 1 & & & \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 1 & 1 & 0 & \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{array}\right)$。

Step3.向左遍历到叶子节点 $(0 \ \vdots \ 0)$,在 $R_{\wedge}^{n}$ 第三行扫描生成确定项 $(00 \ \vdots \ 11 \ \vdots \ 0)$，向右遍历到叶子节点 $(1 \ \vdots \ 1)$,在 $R_{\wedge}^{n}$ 第一行扫描生成两个确定项 $(01 \ \vdots \ 11 \ \vdots \ 1)$ 和 $(10 \ \vdots \ 11 \ \vdots \ 1)$。

Step4. (1)左确定项 $(00 \ \vdots \ 11 \ \vdots \ 0)$ 进行 2 次循环，依次反转生成 $(10 \ \vdots \ 11 \ \vdots \ 1)$、$(01 \ \vdots \ 11 \ \vdots \ 1)$。

(2) 右确定项任选一个如 $(10 \ \vdots \ 11 \ \vdots \ 1)$ 进行 2 次循环，依次反转生成 $(10 \ \vdots \ 01 \ \vdots \ 0)$、$(10 \ \vdots \ 10 \ \vdots \ 0)$。

(3) 测试用例 $(10 \ \vdots \ 11 \ \vdots \ 1)$ 重合了，去掉一个得到 MC/DC 最小测试用例集 {0011、1011、0111、1001、1010}。若用另一确定项 $(01 \ \vdots \ 11 \ \vdots \ 1)$ 可以得到另一个 MC/DC 最小测试用例集 {0011、1011、0111、0101、0110}。

通过判定(p_1OR p_2)AND(p_3AND p_4)真值表生成的结对序号对上述结果验证。

表 1 (p_1OR p_2)AND(p_3AND p_4)真值表

序号	条件分项				结果	结对序号			
	p_1	p_2	p_3	p_4	S	p_1	p_2	p_3	p_4
1	0	0	0	0	0				
2	0	0	0	1	0				
3	0	0	1	0	0				
4	0	0	1	1	0	12	8		
5	0	1	0	0	0				
6	0	1	0	1	0			8	
7	0	1	1	0	0				8
8	0	1	1	1	1		4	6	7
9	1	0	0	0	0				
10	1	0	0	1	0			12	
11	1	0	1	0	0				12
12	1	0	1	1	1	4		10	11

13	1 1 0 0	0	
14	1 1 0 1	0	16
15	1 1 1 0	0	16
16	1 1 1 1	1	14 15

MC/DC 最小测试用例集的结对序号为 $\{4,6,7,8,12\}$ 和 $\{4,8,10,11,12\}$，对比条件分项值和算法生成结果一致。

4 算法分析和结束语

对比最小真值表法[2]和快速生成算法[3]，MC/DC 最小测试用例递归分块矩阵生成算法更简洁直观，当判定式 OR、AND 较少时，可以手工运行算法得到最小测试用例集。如果生成的递归测试集真值矩阵第一或第二行中存在唯一确定项，那么生成的最小测试用例集是完备的。

例如上述实例中，生成了两项最小测试用例集，可以证明该判定式有且仅有这两项最小测试用例集，即生成了全部最小测试用例集。而运用最小真值表法或快速生成算法只能得到一个最小测试用例集，其余的最小测试用例集无法得到。

另外，MC/DC 最小测试用例递归分块矩阵生成算法应用的前提条件是非平凡布尔表达式，目前其他的生成算法并没有指出算法的成立范围。例如判定式（NOTp_1OR p_2）AND（p_1AND p_3）就不是一个非平凡布尔表达式，判定式有条件关联，实际是三个条件分量。对于这种类型的判定式的生成算法还需要做进一步的研究。

参考文献

1 柳纯录.软件评测师教程.北京:清华大学出版社，2005. 180–185.

2 朱晓波,杨伟民,叶芯.更改条件/判定最小真值表生成算法及其应用.上海理工大学学报, 2007,29(1):84–88.

3 段飞雷,吴晓,张凡,董云卫.MC/DC 最小测试用例集快速生成算法.计算机工程, 2009,35(17):40–45.

4 Pressman RS.软件工程实践者的研究方法,梅宏译.第 5 版.北京:机械工业出版社, 2002.330.

5 Chilenski JJ. An Investigation of three forms of the Modified Condition Decision Coverage(MCDC) Criterion. Computer Programming and Software 2002. 2001,18(4):214–219.

6 赵瑾,高建华.对修正条件/判定覆盖方法测试集个数的分析.微机发展, 2005,15(10):110–112.

(上接第 183 页)

实验结果证明，在 MATLAB GUI 设计中使用 WebBrowser 控件的方法，相对于借助 VB\VC\C++方法实现窗体大量内容显示问题，该方法具有简单，易掌握、易扩展的特点，在图像分类研究中得到良好的应用。

参考文献

1 吴宪传,张向文.MATLAB 和 VC＋＋联合编程的 COM 研究.计算机系统应用, 2009,18(7):175–178,194.

2 李芳,徐丽.基于 COM 组件的 MATLAB7. X 与 VC＋＋6. 0 接口技术及实际应用.计算机应用与软件，2009,26(2): 131–134.

3 彭博栋,魏福利.VC6．0 与 MATLAB7．X 混合编程方法研究.计算机与数字工程, 2008,36(9):174–178.

4 谭代明,漆泰岳.VB 调用 MATLAB 在瞬变电磁法反演中的应用.计算机工程与设计, 2009,30(21):5039–5041.

5 李亚军,赵刚,王华,等.在 MATLAB 图形用户界面设计中使用 ActiveX 控件.计算机与数字工程, 2006,34(12):135–137.

6 闫学昆,曾发贵,金仁喜,曹珍山,陈英.基于 MATLAB 和 HTML 混合编程的多幅图像显示与校验.中国体视学与图像分析, 2010,5(2):226–230.

7 Sungmoon C, Sang HO, Soo-Young L. Support vector Machines with binary tree architecture for multi-class classification. Neural Information Processing letters and Reviews, 2004,2(3):47–51.

8 Jiang SQ, Du J, Huang QM, Huang TJ, Gao W. Visual Ontology Construction for Digitized Art Image Retrieval. Journal of Computer Science and Technology, 2005,20(6): 855–860.