软件学报 ISSN 1000-9825, CODEN RUXUEW
Journal of Software,2016,27(4):814−827 [doi: 10.13328/j.cnki.jos.004971]
©中国科学院软件研究所版权所有.
E-mail: jos@iscas.ac.cn
http://www.jos.org.cn
Tel: +86-10-62562563

基于关键点路径的快速测试用例自动生成方法*

丁 蕊[1,2], 董红斌[1], 张 岩[2], 冯宪彬[2]

[1](哈尔滨工程大学 计算机科学与技术学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

[2](牡丹江师范学院 计算机与信息技术学院,黑龙江 牡丹江 157012)

通讯作者: 董红斌, E-mail: donghongbin@hrbeu.edu.cn

摘 要: 测试数据的自动生成,是提高软件测试效率的重要手段.从软件测试工程实践的角度提出快速生成测试数据的完整模型,更有利于提高测试数据生成效率.为此:(1) 提出关键点路径表示法,以得出待测程序的理论路径数,并快速确定已覆盖路径的邻近路径;(2) 用随机生成的数据运行简化后的插装程序,得到部分测试数据;(3) 将理论路径分成易覆盖路径、难覆盖路径和不可行路径;(4) 根据已覆盖路径及其测试数据提供的信息,使用遗传算法生成难覆盖路径的测试数据.仿真实验结果表明了所提方法的有效性.

关键词: 关键点路径;软件测试数据生成模型;覆盖测试;启发式信息;遗传算法

中图法分类号: TP311

中文引用格式: 丁蕊,董红斌,张岩,冯宪彬.基于关键点路径的快速测试用例自动生成方法.软件学报,2016,27(4):814−827. http://www.jos.org.cn/1000-9825/4971.htm

英文引用格式: Ding R, Dong HB, Zhang Y, Feng XB. Fast automatic generation method for software testing data based on key-point path. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2016,27(4):814−827 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/4971.htm

Fast Automatic Generation Method for Software Testing Data Based on Key-Point Path

DING Rui[1,2], DONG Hong-Bing[1], ZHANG Yan[2], FENG Xian-Bin[2]

[1](College of Computer Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

[2](School of Computer and Information Technology, Mudanjiang Normal University, Mudanjiang 157012, China)

Abstract: Automatic generation of testing data is an important means for improving the efficiency of software testing. Focusing on the engineering practice of software testing, a fast automatic method is proposed to improve the efficiency of testing data generation. (1) A key-point path expression method is proposed to calculate the number of theoretical paths, and find the covered paths' neighbors; (2) Brief instrumented program is executed to get some testing data by using the testing data generated from random algorithm; (3) The theoretical paths are divided into three parts: Easy-Cover paths, hard-cover paths and infeasible paths; (4) According to the information of covered paths and their testing data, the data of hard-cover paths will be generated by genetic algorithm. Simulation experimental results show that the proposed method is efficient.

Key words: key-point path; software testing data generation method; coverage testing; heuristic information; genetic algorithm

软件测试是保证软件质量、提高软件可靠性的重要手段[1],测试数据的自动生成,一直是软件测试领域的难

* 基金项目: 国家自然科学基金(61472095, 61573362); 黑龙江省教育厅智能教育与信息工程重点实验室开放基金; 牡丹江师范学院科研基金(QN201603, QY2014003, MNUB201414, FD2014001, SY2014001)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61472095, 61573362); Heilongjiang Provincial Education Depart-ment Key Laboratory of Intelligent Education and Information Engineering; Research Foundation of Mudanjiang Normal University (QN201603, QY2014003, MNUB201414, FD2014001, SY2014001)

收稿时间: 2015-09-01; 修改时间: 2015-10-15; 采用时间: 2015-11-20; jos 在线出版时间: 2016-01-13

CNKI 网络优先出版: 2016-01-14 13:16:13, http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2560.TP.20160114.1316.010.html

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

题之一.将测试数据的生成过程考虑为依据一定的规则对被测试程序的输入空间进行抽样的过程,则该问题就转化为优化问题[2].

近年来,许多学者使用遗传算法、粒子群算法等自动生成测试数据.

- Sthamer[3]尝试使用遗传算法(genetic algorithm,简称 GA)解决全路径覆盖问题,但其设计的目标函数对遗传算法的引导性很差;
- Mansour 和 Salame[4]使用模拟退火和遗传算法生成覆盖特定路径的测试数据,但该算法运行 1 次只能得到覆盖 1 条目标路径的测试数据;
- Aldeida 等人[5]提出基于 Kalman filter 的自适应遗传算法,使用优化过程中的反馈调整遗传算法的参数值,以减小 GA 随机性的噪声因素,但没有解决分支覆盖与个体长度之间同时优化的矛盾;
- Jiang 等人[6]提出基于缩减的粒子群算法自动生成测试数据,一定程度上解决了粒子群算法易陷入局部最优和搜索结果精度低的问题,提高了自动生成测试数据的效率;
- Ahmed 等人[7]将测试数据生成问题转化为使用遗传算法求解多个目标的优化问题,首次使一次运行遗传算法生成覆盖多条目标路径的测试数据,但没有明确给出该问题的数学模型,而且没有考虑覆盖不同目标路径的矛盾关系;
- Gong 等人[8]将多路径覆盖测试数据生成问题建模为一个含有多个目标的优化问题,提高了问题求解效率,但需要对每一条待覆盖路径设计适应度函数;
- Ahmed[9]提出一种使用变长遗传算法自动生成基本测试路径的新技术,进化个体的长度根据待覆盖路径的长度在迭代过程中变化,减少了大量的路径生成工作.

本文借鉴 Gong 等人[8]和 Ahmed[9]的思想,提出一种快速生成软件测试数据的方法:使用基于关键点的路径表示和计算方法,得到待测程序的理论路径数;在快速生成测试数据的完整模型中,使用不可行路径检测模型确定不可行路径,使适应度函数的设计及计算工作量极大地减少;在遗传算法优化过程中,使用已覆盖路径的信息提高生成测试数据的效率;最终,快速得到实现判定覆盖的测试数据及不可行路径.

本文首先介绍相关背景工作,第 1 节给出关键点的定义、路径的表示方法及关键点路径数目的计算.第 2 节说明被测程序的插装及其简化.第 3 节从理论上说明关键点路径表示法的优势.第 4 节给出基于关键点路径覆盖的测试数据自动生成方法的完整模型,并说明使用遗传算法快速生成软件测试数据涉及的内容.第 5 节的实验部分是所提方法在典型基准程序和工业程序上的测试效果,与其他方法对比,说明本方法的有效性.第 6 节从理论上分析本方法的优势.第 7 节总结全文,并提出后续研究工作的设想.

1 关键点路径表示

多路径覆盖测试数据生成问题的数学模型及其基于遗传算法的求解与路径的表示密切相关[10].已有多种表达路径的方式:采用程序的语句编号序列[5]或分支节点序列[6]表示路径,但形成的路径表示序列很长,并且会产生编码冗余;使用赫夫曼编码表示路径[10],最优前缀编码方式缩短了路径长度且避免了编码冗余,但没有考虑计算理论路径数目的问题.本文为得到被测程序的理论路径数目,并能快速确定已知路径的邻近路径,提出一种新的基于关键点的路径表示方法.关键点图由控制流图[11]转化而成.

1.1 基本定义

控制流图[11]:程序结构可以用控制流图 CFG(control-flow graph)表示,$CFG=(V,E,entry,exit)$,其中,V 是节点集,程序中的每个语句都对应图中的一个节点;E 是边集,表示语句间的流向;*entry* 和 *exit* 分别为程序的唯一入口节点和唯一出口节点.

定义 1. 在控制流图的基础上定义关键点,具体描述如下:

(1) 控制流图中的唯一入口节点和唯一出口节点都是关键点,称为入口关键点和出口关键点;

(2) 程序中的分支对应控制流图中有两个直接后继节点的节点,该分支节点为分支关键点;

(3) 控制流图中的循环节点分解为若干分支关键点;

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

(4) 根据控制流图的绘图规则,分支节点在分支之后一定归结于某一节点,这时存在两种情况:一是分支节点的真假分支都有可执行语句,此时,这两个分支中的节点是关键点;二是分支节点的真假分支中只有一个分支有可执行语句.那么在分支节点的没有可执行语句的分支中插入一个新节点,新插入的节点即为关键点.

定义 2. 分支关键点的两个直接后继关键点称为分支子关键点,这两个分支子关键点之间互称为兄弟.

定义 3. 如果某关键点既是分支关键点,也是其他分支关键点的分支子关键点,则该关键点为普通关键点.

为计算关键点路径的数目,本文在借鉴控制流图计算路径数目的思想上[8]提出如下概念.

定义 4. 将关键点图中的分支子关键点用+或*连接起来的表达式,称为关键点路径表达式.

一个关键点的两个分支子关键点 b 和 b'之间是“或”的关系,这两个分支子关键点相加,表示为 $b+b'$.

普通关键点 a 与其分支子关键点 b 和 b'之间是顺序发生的“与”的关系,这两组分支子关键点“相乘”,表示为

$$a(b+b').$$

普通关键点 b'其兄弟分支子关键点 b 与 b'的两个分支子关键点 c 和 c'之间是“或”的关系,表示为

$$b+b'(c+c').$$

两个互为兄弟的普通关键点 b 和 b',b 的两个分支子关键点 c 和 c',与 b'的两个分支子关键点 d 和 d'之间是“或”的关系,这两组分支子关键点的关系表示为

$$b(c+c')+b'(d+d').$$

定义 5. 在关键点路径表达式中,所有关键点均代入数值 1 进行运算,其结果就是满足程序判定覆盖所需的理论路径数.

用图 1 进一步说明.图 1(a)~图 1(d)的关键点 a 以及图 1(d)中的关键点 c,由于并不是分支子关键点,所以并不出现在关键点路径表达式中.显然,如果控制流图中存在 n 个顺序关系的分支关键点,则共有 $2\times n$ 个分支子关键点,这些分支子关键点之间存在着最多 2^n 种组合,即:对于有 n 个顺序关系的分支关键点的关键点图,最多有 $(1+1)\times(1+1)\times\ldots\times(1+1)=2^n$ 条关键点路径.

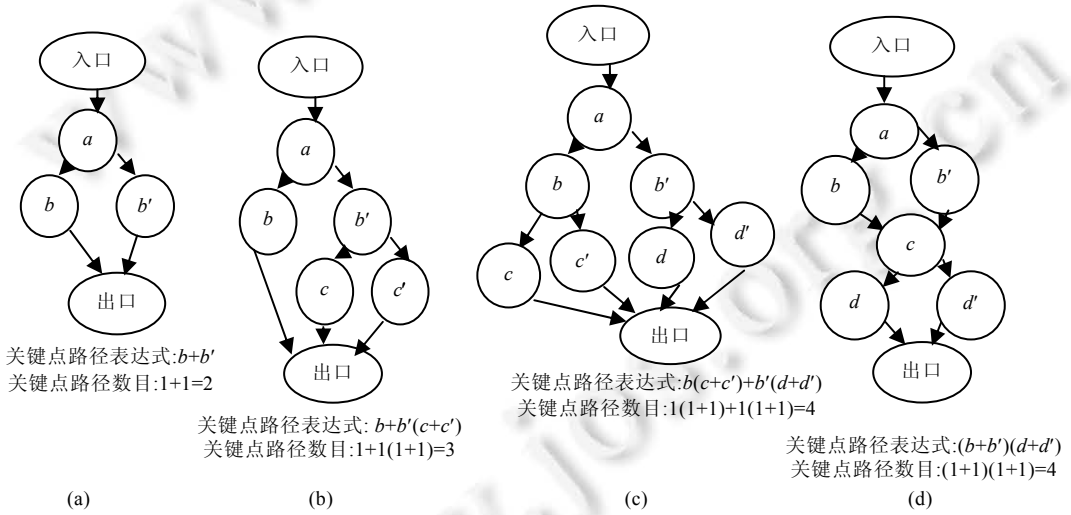


Fig.1 Key-Point graphs, key path expression and number of key-path for 4 basic fundamental cases

图 1 4 种基本情况的关键点图、关键点路径表达式及关键点路径条数

图 2 用 3 个数排序程序说明关键点编码表示路径的过程.该程序共有 3 个分支关键点、2×3 个分支子关键点、2^3 种分支子关键点组合.

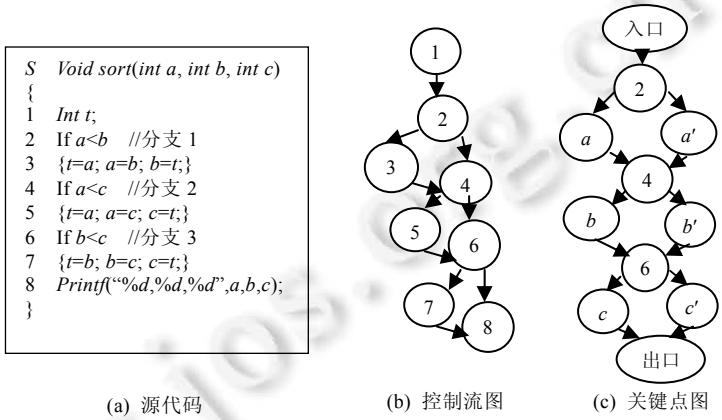
关键点路径表达式为$(a+a')\times(b+b')\times(c+c')$,关键点路径数目为$(1+1)\times(1+1)\times(1+1)=2^3=8$,分别是:

- $P1$: *entry*-2-*a*-4-*b*-6-*c*-*exit*;

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

- *P*2: *entry*-2-*a*-4-*b*-6-*c*′-*exit*;
- *P*3: *entry*-2-*a*-4-*b*′-6-*c*-*exit*;
- *P*4: *entry*-2-*a*-4-*b*′-6-*c*′-*exit*;
- *P*5: *entry*-2-*a*′-4-*b*-6-*c*-*exit*;
- *P*6: *entry*-2-*a*′-4-*b*-6-*c*′-*exit*;
- *P*7: *entry*-2-*a*′-4-*b*′-6-*c*-*exit*;
- *P*8: *entry*-2-*a*′-4-*b*′-6-*c*′-*exit*.

可以看出:覆盖所有关键点及分支关键点组合的测试数据必将覆盖程序中的所有判定,从而实现路径的判定覆盖.



(a) 源代码 (b) 控制流图 (c) 关键点图

Fig.2 Source code, control flow graph and key-point graph of 3-number-sort program

图 2 3 个数排序程序的源代码及其控制流图与关键点图

1.2 关键点图与控制流图的区别

关键点图由控制流图转化而成,其与控制流图的主要区别在于:

(1) 关键点图中,每个分支关键点的分支子关键点必定成对出现.对于每一个分支节点,都有两个子分支节点;

(2) 关键点图处理了控制流图中的循环:用 *Z* 路径覆盖的思想仅考虑循环体执行 1 次的情况,将其转化为双分支选择结构,能够得到满足判定覆盖的全部理论路径;当循环体执行多次时,将其转化成多个选择结构的并列,能够得到满足路径全覆盖的全部理论路径.

2 程序的插装及其简化

为反映测试数据在程序执行中穿越的关键点路径情况,要对被测程序进行插装:首先将程序中的循环结构使用 *Z* 覆盖的思想处理为分支结构,然后,在程序的所有分支子关键点处插入变量作为标识.这些新插入的变量以向量的方式存放,变量的数目是分支子关键点的数目.

图 3(a)是 3 个数排序程序插装后的程序,在各分支子关键点处设置插装变量,下划线部分为插装语句,程序初始时,这些插装变量赋值为 1.当程序执行时,经过某一分支关键点,则该处的插装变量值赋为 0.根据这些插装变量的值确定测试数据经过哪些分支子关键点,进而确定该测试数据执行的关键点路径.3 个数排序程序的 8 条关键点路径对应的插装变量组合分别是 101010,101001,100110,100101,011010,011001,010110,010101.

由于分支子关键点的成对出现,插装程序可以进一步简化,如图 3(b)所示,即,只用 3 个插装变量表示 6 个分支子关键点处的状态.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

```
S   Void sort(int a, int b, int c)
{Int t;
 f[6]=1   //6个标志变量初始赋值为 1
  If a<b
  {f(1)=0   //关键分支 1
     t=a; a=b; b=t;}
  else
     f(2)=0   //关键分支 1′
  If a<c
  {f(3)=0   //关键分支 2
    t=a; a=c; c=t;}
  else
    f(4)=0   //关键分支 2′
  If b<c
  {f(5)=0   //关键分支 3
    t=b; b=c; c=t;}
  else
    f(6)=0}   //关键分支 3′
  Printf("%d,%d,%d",a,b,c);}
```

(a) 插装后的 3 个数排序程序

```
S   Void sort(int a, int b, int c)
{Int t;
  f[3]=1   //3 个标志变量初始赋值为 1
  If a<b
  {
    f(1)=0   //关键分支 1
     t=a; a=b; b=t;
      }
  If a<c
  {
   f(2)=0   //关键分支 2
    t=a; a=c; c=t;
    }
  If b<c
  {
    f(3)=0   //关键分支 3
    t=b; b=c; c=t;
    }
  Printf("%d,%d,%d",a,b,c);}
```

(b) 简化插装后的程序

Fig.3 3-Sort instrumented program and its brief instrumented program

图 3 3 个数排序的插装及简化插装后的程序

3 关键点路径的理论说明及其优势

关键点路径的形式化语言描述如下:

$$P=\{entry,B,C,exit\},$$

其中,B 是分支关键点集合,$B=\{b_1,b_2,\ldots,b_n\}$;C 是分支子关键点集合,$C=\{b_{11},b_{12},b_{21},b_{22},b_{31},b_{32},\ldots,b_{n1},b_{n2}\}$,$b_{i1},b_{i2}$ 是 b_i 分支关键点的两个分支子关键点;$entry$ 是程序的唯一入口节点,即起始关键点;$exit$ 是程序的唯一出口节点,即终止关键点.对于有 n 个分支关键点的一段程序,就有 $n\times2$ 个分支子关键点,当这些分支关键点是顺序结构时,关键点路径最多为 2^n 条.具体的路径数目由关键点路径表达式计算得到.由于分支子关键点成对出现,关键点路径表示方法还能由已知路径快速确定其邻近路径.

3.1 关键点路径的理论说明

与控制流图[12]相比,关键点图对其进行了两个方面的简化:一是顺序结构的节点,二是分支结构补充的汇聚节点.如果能够说明控制流图中这两种节点涉及的语句能够被关键点图覆盖到,则覆盖关键点图路径的测试数据必定能覆盖控制流图中表达的路径.下面分别进行说明.

- 对于顺序结构的节点:如果某测试数据可以覆盖 b_i 和 b_{i+1} 这两个分支关键点,则这两个关键点之间的顺序结构的语句必然被覆盖.同理,如果测试数据可以覆盖连续的多个分支关键点 $b_i,b_{i+1},\ldots,b_j$,则 b_i 到 b_j 之间的顺序结构的语句也一定被覆盖;
- 对于控制流图中分支结构的汇聚节点:在控制流图中,包含条件的节点被称为判定节点(分支节点),由判定节点发出的边必须终止于某一个节点,该节点为汇聚节点.根据对关键点的定义第 3 条,分支节点的两个分支内都有关键点,即使控制流图中的汇聚节点没有体现在关键点图中,分支节点及其两个分支也可以由关键点图表示出来.

由图 4 进一步理解:在控制流图(如图 4(a)所示)中,节点 1 和节点 5 是分支节点,节点 2 和节点 6 分别是分支节点 1 和节点 5 中的一个包含可执行语句的分支,节点 3 和节点 7 是分支节点的汇聚节点,节点 4 是两个分支中间的顺序结构语句.用节点编号表示 4 条路径,分别是:

- …1-2-3-4-5-6-7…;
- …1-2-3-4-5-7…;

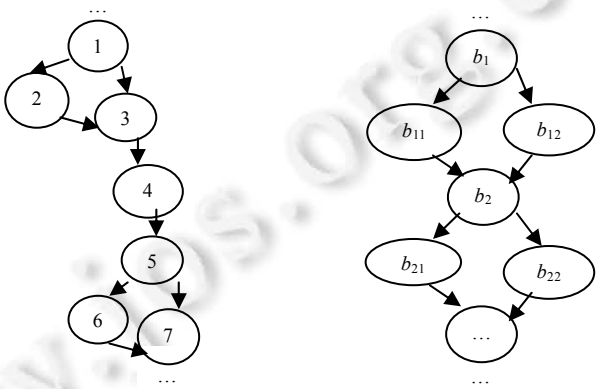
© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

- …1-3-4-5-6-7…;
- …1-3-4-5-7….

在关键点图(如图 4(b)所示)中去掉了汇聚节点 3 和节点 7,省略了顺序节点 4,用 b_1 和 b_2 分别表示两个分支节点 1 和节点 5,并在没有可执行语句的分支中分别添加了 b_{12} 和 b_{22} 这两个分支子关键点;其路径表示为

- …b_1-b_{11}-b_2-b_{21}-…;
- …b_1-b_{11}-b_2-b_{22}-…;
- …b_1-b_{12}-b_2-b_{21}-…;
- …b_1-b_{12}-b_2-b_{22}-….

可以看出:控制流图中的顺序结构语句 4 虽然没有在关键点图中体现,但被关键点路径覆盖的语句必定包含着语句 4;在控制流图中无执行语句的分支由关键点图中后添加的分支子关键点表示,省略的分支汇聚节点并不影响关键点图表达路径的能力.



(a) 控制流图 (b) 关键点图

Fig.4 Control flow graph and its key-point graph

图 4 程序的控制流图与关键点图

综上分析,如果一组测试数据覆盖了被测程序关键点路径表达的所有路径,则该组数据必定能够覆盖控制流图中所表达的所有路径;不能被覆盖的关键点路径是不可行路径.至此,覆盖路径的测试数据生成问题就转化为寻找覆盖关键点路径的测试数据问题.

3.2 关键点路径的优势

本文提出关键点图和关键点路径表示法,目的有三:一是计算待测程序的理论路径数目;二是快速确定已知路径的邻近路径;三是简化测试程序时的插装工作.这里,通过与控制流图方法的对比来说明关键点路径表示法的优势.

(1) 易于计算理论路径的数目

关键点路径表达式和控制流图的路径表达式都能计算程序的理论路径条数,但二者有本质上的不同:在关键点图中,使用 Z 路径覆盖的思想处理原控制流图中的循环,使得满足判定覆盖甚至全覆盖的理论路径数目易于计算;与之对比,在控制流图中是不体现循环次数的,故无法得出程序的所有理论路径数目.通过控制流图得到的理论路径数是使程序满足基本路径覆盖的路径数,通过关键点图得到的理论路径数至少是使程序满足判定覆盖的路径数目(在循环体只执行一次的情况下).满足判定覆盖所需的路径通常比满足基本路径覆盖所需的路径要多.而在考虑循环体执行多次的情况下,使用 Z 路径覆盖的思想将循环转化为多个选择结构的并列,此时可以确定满足全覆盖的所有路径的数目.

(2) 易于确定邻近路径

在控制流图中,任一分支节点的两个分支中是否有执行语句是不确定的,通过其得到的基本路径集中的路

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

径也不唯一,无规律可循,难以通过控制流图确定某条路径的邻近路径;在关键点图中,所有分支节点都确定地存在两个子分支节点,易于确定已知路径的邻近路径,也易于实现关键点路径表达式的自动生成.

(3) 简化的插装

在关键点图中,所有的分支关键点都确定地存在两个分支,且一组测试数据只能经过该分支关键点中两个分支中的一个,则这两个分支可以用一个插装变量标记.这种变量规律性的位置及取值方式,降低了插装的工作量.而且简化的插装方式也有助于确定难覆盖路径的邻近路径及其测试数据.对于控制流图,如果待覆盖的路径无法明确,则插装的位置也难以明确,也就谈不上简化插装.

4 测试数据生成

4.1 基于关键点路径覆盖的测试数据自动生成方法的模型

本文提出一种基于关键点路径的快速生成软件测试数据的方法,该方法的具体思想是:

(1) 对于被测程序,在控制流图的基础上得出关键点图,根据关键点路径表达式计算理论路径数目,明确关键点表示的路径;

(2) 在定义域范围内随机生成测试数据集,结合关键点路径信息分析测试数据对路径的覆盖情况,对每条被覆盖路径至少保留一组测试数据,从而得到待测程序的部分测试数据;

(3) 对那些没有覆盖到的路径,使用不可行路径检测模型检测其是否为不可行路径,对于尚未覆盖到的非不可行路径,称其为难覆盖路径;

(4) 将难覆盖路径看作是优化算法要寻找测试数据以覆盖的目标路径,利用步骤(2)中分析测试数据集时得到的相关启发式信息,借用遗传算法解决多目标[13,14]和多个目标的优化思想[8],确定初始种群、设计适应度函数及操作算子,得到难覆盖路径的测试数据.

至此,实现了软件测试数据的快速自动生成,其中,不可行路径检测模型可以使用,如 Ngoc 和 Tan[15]等人、Gong 等人[16]或 Delahaye 等人[17]提出的任意此类模型.本文的快速软件测试数据自动生成方法模型如图 5 所示.

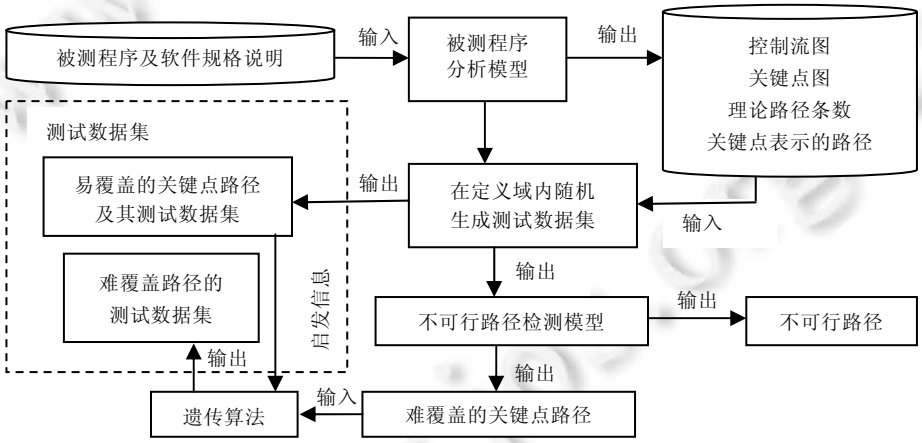


Fig.5 Model of fast automatic software test data generation

图 5 快速的软件测试数据自动生成模型

4.2 难覆盖路径的测试数据生成

对于自动生成测试数据的优化算法来说,在对关键点路径分类之后,其关键在于寻找那些覆盖难覆盖路径的测试数据.本节说明基于遗传算法的难覆盖路径的测试数据生成方法,其思想是:

- 首先,根据此前在定义域内随机生成的测试数据集提供的启发式信息生成初始种群;

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

- 然后,根据每个目标关键点路径与进化个体覆盖的关键点路径之间的距离计算个体针对每一条目标路径的适应度函数值分量;
- 检查个体是否覆盖了某一目标路径:如果是,则保存测试数据及其覆盖的路径,并简化多个目标的优化问题;如果不是,则采用遗传操作以生成新一代种群.不断迭代,直到遗传算法满足终止条件.

这里的适应度函数由若干个基于难覆盖路径的适应度函数分量构成,即,算法对种群中的每条个体,逐个检测其是否满足某个适应度函数分量:如果满足,则保留该个体为测试数据,并删除该目标对应的适应度函数分量,直到所有的适应度函数分量都有个体满足时算法成功.

4.2.1 启发式信息

利用已确定的易覆盖关键点路径及其测试数据提供的信息,生成难覆盖路径的测试数据.可从两方面理解:

(1) 从覆盖所有关键点的角度考虑.将关键点图中的各关键点记为 $K=\{k_1,k_2,k_3,\ldots,k_{i-1},k_i,k_{i+1},\ldots,k_n\}$,其中,已经确定了覆盖关键点 $k_1,k_2,\ldots,k_{i-1},k_{i+1},\ldots,k_n$ 的测试数据,但还未找到覆盖关键点 k_i 的测试数据,则考虑利用覆盖 k_{i-1} 和 k_{i+1} 的两组测试数据的启发式信息进行搜索;

(2) 从覆盖关键点组合路径的角度考虑.例如,难覆盖的关键点路径为 P:*entry*-2-a'-b'-c-*exit*;已找到覆盖关键点路径 Q:*entry*-2-a'-b'-c'-*exit* 的测试数据,则考虑利用覆盖路径 Q 的测试数据提供的启发式信息进行搜索,其中,c 和 c'是兄弟分支子关键点.

容易理解:如果一组测试数据覆盖了路径 Q 而没有覆盖路径 P,且 P 和 Q 这两条路径仅有一个兄弟分支子关键点不同,则覆盖路径 P 的测试数据与覆盖路径 Q 的测试数据之间一定存在某种关系,即,是否覆盖的那个关键点的分支判断中涉及到的变量的取值不同.此时,必定可以在覆盖了路径 Q 的数据基础上发生变化,生成覆盖路径 P 的数据.在最理想的状态下,甚至只需微调覆盖 Q 路径测试数据的某个分量,便能得到理想的数据.

4.2.2 初始种群

初始种群由两部分构成:一是包含了启发式信息的个体,二是随机选择的个体.

- 包含启发式信息的个体:根据图 5 所示的快速软件测试数据自动生成模型,在分析被测程序之后,得到控制流图、关键点图,最终得到关键点表示的路径集 A;
- 随机生成测试数据集:一条编码就是覆盖一条路径的测试数据.待测程序输入参数个数为 n,编码长度为 n.以这些测试数据为输入,运行插装后的被测程序,此时,测试数据覆盖的是容易覆盖的路径,构成易覆盖路径集 E.

由 A~E 得到 H',使用不可行路径检测模型检测 H',将 H'分成两部分:难覆盖路径集 H 和不可行路径集 U,即:

$$H'=H\cup U.$$

H 就是待覆盖的目标路径集.保留一组能够覆盖集合 E 中路径的测试数据作为最终测试数据集的一部分;在被保留的测试数据中,如果其覆盖的路径与难覆盖路径邻近,则保留该测试数据作为遗传算法初始种群中的个体,这些个体通过复制的方式占到初始种群中个体数目的一半.

初始种群中的另一半个体使用轮盘赌的方式,从初始时随机生成的测试数据个体中选定.

4.2.3 适应度函数

本文使用寻找多个目标的遗传算法[8],其适应度函数包含两个层次:底层是个体对多个目标中每一个目标的满足程度;顶层是多个目标逐一被满足,直到所有的多目标都被满足.具体来说:

- 在顶层,适应度函数值由 m 维向量表示,向量中的每个分量代表个体针对某一条待覆盖路径的适应值,m 是待覆盖路径的数目.如果第 i 个个体使第 j 个适应度函数分量为 0,则该个体为覆盖第 j 条路径的测试数据,适应度函数中的第 j 个向量被删去,目标由原来的 m 个变成 $m-1$ 个,直至所有目标都被满足;
- 在底层,以进化个体 x 为例,x 为被测程序 G 的一组输入,计算个体针对第 k 条难覆盖路径 P_k 的适应度函数分量值 $f_k(x)$,$f_k(x)$由层接近度和分支距离这两部分组成[2].

适应度函数的形式化表示如下[7]:

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

$$f(x)=\min(f_1(x),f_2(x),\ldots,f_m(x)) \tag{1}$$

$$f_k(x)=appr_{p_k}(x)+dist_{p_k}(x) \tag{2}$$

$$appr_{p_k}(x)=\frac{b(p_k,p(x))}{|p_k|} \tag{3}$$

$$dist_{p_k}(x)=\begin{cases}0, & \text{满足分支条件}\\ |c_2-c_1|+k, & \text{不满足分支条件}\end{cases} \tag{4}$$

其中,$P(x)$表示个体 x 覆盖的关键点路径;P_k 为待覆盖的第 K 条关键点路径;$b(P_k,P(x))$表示两条路径的层接近度,其值为从第 1 个关键点开始 P_k 与 $P(x)$的不同节点的数目;$|P_k|$是目标路径 P_k 中包含的关键点的数目;C_1 op C_2 为分支节点的表达式;k 是一个常数,用以表达 $C_2\neq C_1$ 的情况.当个体 x 覆盖某条难覆盖的目标路径时,保留该个体,并将与该目标路径对应的目标函数分量删除,此时的适应度函数中的目标数减 1.即:随着难覆盖路径测试数据的逐一确定,目标函数的个数逐个减少,直至算法找到满足最后一个目标路径的测试数据.

4.2.4 算法步骤

使用遗传算法生成难覆盖的关键点路径测试数据的步骤如下.

Step 1. 在定义域内随机生成测试数据集.

Step 2. 使用第 4.2.2 节中的方法初始化种群.

Step 3. 检查是否满足算法终止条件:待覆盖关键点路径为 0 或达到一定迭代次数.若是,则转到 Step 7.

Step 4. 以个体为输入运行插装后的被测程序,计算个体适应度函数值.

Step 5[8]. 判断个体适应度向量值是否有 0 分量:如果有,保存该个体为测试数据,待覆盖目标路径个数减 1;如果该测试数据覆盖的关键点路径与尚未覆盖的关键点路径编号相邻,则保留该个体到下一代种群中.

Step 6. 遗传操作,使用选择、交叉和变异算子,结合第 4.2.2 节中的方法产生新一代种群,转到 Step 3.

Step 7. 停止进化,输出测试数据.

5 仿真实验

选择 3 个基准程序验证所提方法的有效性,将本文方法(*F*-method)与 Ahmed 方法[7]、单目标路径方法(single target method)[4]、多路径覆盖方法(multi-targets method)[8]及 *N* 本文方法(*NF*-method)在同样的被测程序上实验.其中,“*N*-本文方法”是指使用本文快速生成测试数据的方法,但在遗传算法优化过程中不使用启发式信息.所有实验程序均采用 Matlab 语言编写,并在 Matlab 2012 中运行.微机配置为 Windows(Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU E8200,2.66GHz,2.00GBRAM,32 位操作系统.与遗传算法相关的策略及参数设置见表 1.为减少随机因素的影响,针对不同程序每种情况独立运行 100 次,以生成覆盖目标路径的测试数据或达到最大进化代数作为算法运行的终止条件.实验记录中的时间为进化 100 次的总时间.

Table 1 Parameters in the genetic algorithm

表 1 遗传算法中的参数设置

遗传算法策略(参数)	取值
选择策略	精英选择,轮盘赌选择
交叉策略	单点随机交叉
交叉概率	0.9
变异策略	单点变异
变异概率	0.3
最大迭代次数	1 000
种群大小	30

表 2 说明了 3 个基准程序的信息.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

Table 2 Basic information of the programs

表 2 被测程序的基本信息

程序	分支结构	输入分量个数	关键点理论路径数	可行路径数	不可行路径数	定义域
三角形	3 层选择嵌套	3	4	4	0	$[0,100]^3$
3 个数排序	选择并列关系	3	8	7	1	$[0,100]^3$
冒泡程序	2 层循环嵌套,内层嵌套中有 1 个选择	3	8	7	1	$[0,100]^3$

表 3 说明本文方法的两大优势:

(1) 测试数据生成效率;

(2) 启发式信息对遗传算法优化效率的影响.

对于三角形分类程序,*F*-method 仅需对 1 条难覆盖路径构造适应度函数,即:适应度函数中只有一个目标分量,其生成覆盖目标路径测试数据所需的进化代数和时间显著优于 Ahmed 方法和 Single target.由于 *F*-method 需要在 GA 运行前确定易覆盖路径的测试数据,所以在平均运行时间上略优于 Multi-targets.对于 3 个数排序和冒泡程序,本文所提方法也优于对比的方法.事实上,*F*-method 的优势不仅在于算法运行时效率的提高,更在于节省了算法运行前的工作量.从适应度函数设计的工作量来看,其他 3 种方法都需要设计所有待覆盖路径的适应度函数,而 *F*-method 仅需为难覆盖路径设计适应度函数.甚至于,在本文方法初始时随机生成的测试数据中,还有可能一次即随机生成覆盖所有可行路径的测试数据,无需进入遗传算法的迭代过程,并且可以快速判定出不可行路径的数目及具体路径.将“*NF*-method”与 *F*-method 的结果对比,*NF*-method 中由于初始种群中不含启发式信息,其平均进化代数和平均时间都差于 *F*-method,但仍显著优于 Ahmed 和 Single target,略优于 Multi-targets.这是由于,在 Multi-targets 方法中,在算法初期即能生成覆盖易覆盖路径的测试数据,其多出的时间消耗主要在于对各目标路径的适应度函数计算上,寻找难覆盖路径测试数据的时间与 *NF*-method 大致相当,且二者都需要逐个检查种群中的个体是否为所需的测试数据.事实上,*NF*-method 和 *F*-method 显著优于 Multi-targets 方法的优势不在于进化代数和进化时间,而在于适应度函数的设计和计算.

Table 3 Performance index value by using different methods in three benchmark programs

表 3 3 个基准程序不同测试数据生成方法的性能指标值

程序	方法	适应度函数个数	时间(s)	运行时间率(%)	平均迭代次数	迭代率(%)
三角形	Ahmed 方法	4	0.293 6	18.87	63.7	35.47
	单目标路径方法	1×4=4	0.437 8	12.65	373.3	6.05
	多路径覆盖方法	4	0.097 0	57.11	43.1	52.43
	N-本文方法	1	0.090 5	61.21	42.5	53.17
	本文方法	1	0.055 4	100	22.6	100
3 个数排序	Ahmed 方法	7	0.928	30.097	46.9	31.34
	单目标路径方法	1×7=7	4.68	5.97	482.5	3.04
	多路径覆盖方法	7	0.467	59.80	23.8	61.76
	N-本文方法	1	0.452	61.79	21.5	68.37
	本文方法	1	0.279 3	100	14.7	100
冒泡程序	Ahmed 方法	7	0.321	33.95	40.2	25.07
	单目标路径方法	1×7=7	1.764 2	6.18	230.4	4.37
	多路径覆盖方法	7	0.245 4	44.41	32.0	31.5
	N-本文方法	1	0.214 9	50.72	25.6	39.375
	本文方法	1	0.109 0	100	10.08	100

表 4 是对本文所提方法的自身性能分析,着重从工作量角度考虑.随机生成所有可行路径的次数指的是在 100 次的重复实验中,无需遗传算法迭代,在随机生成的测试数据中就能找到覆盖所有可行路径的测试数据的成功次数.可以这样理解:*F*-method 充分利用了随机算法快速生成测试数据的优势,此时,随机生成的测试数据即覆盖了所有可覆盖的路径;或者可以理解为:本次算法的执行没有产生难覆盖的路径,已经随机生成了所有需要的测试数据.*GA* 表示 100 次实验中需要遗传算法优化以生成“难覆盖路径”的测试数据的次数.虽然随机算法

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

难以生成所有的测试数据,如在三角形分类程序中,100 次的程序运行只有 18 次覆盖到全部待测路径,但其找到难覆盖路径的准确率达到了 100%,且一次生成了 75%以上的测试数据,在 3 个数排序和冒泡程序中,一次随机生成了 80%的测试数据,这使得后继的遗传算法优化过程中的适应度函数设计和计算的工作量大为减少,而已获得的测试数据也为算法优化效率的提高提供了启发信息.

Table 4 Performance analysis of the *F*-method

表 4 本文方法(*F*-method)性能指标分析

程序	理论路径数	易覆盖关键点路径			难覆盖关键点路径			不可行路径	
		条数	随机生成所有可行路径的次数	遗传算法	条数	成功率(%)	时间	实际条数	找到
三角形	4	3	18	82	1	100	0.059 8	0	0
3 个数排序	8	6	22	78	1	100	0.041 2	1	1
冒泡程序	8	6	19	81	1	100	0.020 7	1	1

表 4 中的“难覆盖关键点路径时间”指的是运行遗传算法生成难覆盖路径测试数据的时间,而表 3 中的“时间”中还包含随机生成测试数据及确定难覆盖路径的时间.并非所有程序都存在不可行路径,程序的不可行路径也可能不止一条.本文实验中,3 个数排序程序和冒泡排序都存在 1 条不可行路径,使用本文方法能够快速、准确地判断 3 个基准测试程序的不可行路径.

工业程序 Flex 和 Sed 广泛用于验证不同测试数据生成方法的性能.程序的源代码可以从系统“Software-artifact Infrastructure Repository”下载[18].对于每个被测程序,各选取 1 个函数进行实验,该函数的结构、输入向量包含的分量个数、理论路径数、可行路径数和代码行数见表 5.所有程序运行 30 次,取平均值.遗传算法种群大小为 500,算法终止条件为找到全部解或达到指定迭代次数.其他参数见表 1.

Table 5 Basic information of the industry programs

表 5 被测工业程序的基本信息

程序	分支结构	输入变量数	关键点路径数	可行路径数	不可行路径数	代码行数
Flex	1 个 if 选择和 1 个循环,该循环中嵌套 1 个 if-else 选择	22	32	27	5	107
Sed	1 个循环,其中嵌套 1 个 if-else 选择	11	16	16	0	54

如表 5 和表 6 所示:对于 Flex 程序,使用随机方法未能生成覆盖所有可行路径的测试数据,在限定迭代次数为 100 的前提下,找到难覆盖路径测试数据的机率是 76.7%;Sed 程序在初始种群大小为 500 的前提下,每次找到的难覆盖路径不完全相同,平均难覆盖路径数为 1.8.当算法初始种群增大时,难覆盖路径数目相应减少,在 30 次随机生成测试数据的实验中,有 6 次生成了覆盖全部可行路径的测试数据.

Table 6 Performance analysis of the *F*-method in industry programs

表 6 工业程序中本文方法(*F*-method)性能指标分析

程序	理论路径数目	易覆盖的关键点路径			难覆盖的关键点路径			不可行路径	
		条数	随机生成所有可行路径的次数	遗传算法	条数	成功	成功率(%)	实际条数	找到
Flex	32	24	0	30	3	23	76.7	5	5
Sed	16	14	6	24	1.8	30	100	0	0

表 7 中程序以找到所有测试数据为终止条件,Flex 的平均迭代次数为 72.6,平均运行时间为 6.984s;而 Sed 程序仅需 32.5 次迭代和 0.188s.这是由于,Flex 程序的理论目标路径数目和输入变量数都较 Sed 要多,且其分支结构不同,Sed 仅循环体内存在一个选择分支,而 Flex 程序中循环体内外都有选择分支.在生成难覆盖路径测试数据的过程中,两个被测程序优化算法的迭代率相差较大.这是由于,Flex 函数有更多的输入变量,其覆盖不同路径的测试数据间提供的启发式信息的价值相对较小,算法需要更多次的迭代.对比 *NF*-method 与 Multi-targets 算法在两个程序上的优化效果,迭代次数相差仅为 1.57 和 1.3,迭代时间也仅相差 0.648s 和 0.033s.这是由于,对

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

两种算法而言,运行时间主要集中于寻找难覆盖路径的测试数据.*NF*-method 比 Multi-targets 方法的微弱优势仍在于其对适应度函数的设计和计算上.*F*-method 在时间和迭代次数上显著优于 *NF*-method 和 Multi-targets 算法,主要是因为易覆盖路径测试数据对 *F*-method 所提供的启发式信息.除此之外,*NF*-method 和 *F*-method 在算法运行前仅需设计极少的适应度函数,这一部分节省的时间和工作量没有体现在表 6 中.

Table 7 Performance index value by using different methods in industry programs

表 7 工业程序不同测试数据生成方法的性能指标值

程序	方法	适应度函数个数	时间(s)	运行时间率(%)	平均迭代次数	迭代率(%)
Flex	多路径覆盖方法	32	8.961	77.93	93.57	77.58
	N-本文方法	3	8.313	84.01	92	78.91
	本文方法	3	6.984	100	72.6	100
Sed	多路径覆盖方法	16	0.412	45.63	79.5	40.88
	N-本文方法	2	0.379	49.60	78.2	41.56
	本文方法	2	0.188	100	32.5	100

上述实验结果表明,本文方法在得到覆盖目标路径的测试数据方面具有显著优势.与 Ahmed 方法、单目标路径方法、多目标路径生成方法及不使用启发信息的本文方法相比,本文所提方法使用较少的工作量快速地生成了测试数据;同时还确定了待测程序的不可行路径.

6 性能分析

本文的主要贡献在于:(1) 提出一种基于关键点的路径表示法,能够计算出程序的理论路径条数,并能够快速确定已知路径的邻近路径;(2) 建立了软件测试数据快速自动生成方法的完整模型,为使用遗传算法高效地生成路径覆盖的测试数据提供了求解的框架,实现了测试数据和不可行路径的快速确定,极大地减少了算法中适应度函数设计和计算的工作量.其具体优势在于:

1) 具有工程意义:从软件测试工作的整体效率出发,提出测试数据快速生成的完整模型,一次实现测试数据的生成和不可行路径的判断,且减少了算法中适应度函数设计和计算的工作量,极大地提高了测试数据生成的效率;
2) 测试数据生成效率高:
   (1) 优化目标少:在以往的方法中,算法寻找覆盖指定路径的测试数据,被测程序的所有可行路径都是待覆盖的目标.例如在多路径覆盖测试数据进化过程中,有 m 条路径就有 m 个初始目标.本文的测试数据快速生成方法一次确定被测程序的绝大部分测试数据,明确难覆盖路径和不可行路径,优化目标大为减少;
   (2) 启发式信息:利用已有测试数据生成难覆盖路径的测试数据.由于关键点路径表达式只由分支子关键点表示,容易确定难覆盖路径其前和其后的易覆盖关键点路径及其测试数据,将这些测试数据作为优化算法初始种群的一部分,在此基础上进行优化,能够较快地找到覆盖难覆盖路径的测试数据;
3) 工作量的减少:本文方法中使用算法寻找的仅是难覆盖路径的测试数据,算法优化的目标(难覆盖路径)数目大为减少,相应的适应度函数的设计和计算大量减少,也在一定程度上降低了优化难度.而且,判断关键点路径是否被覆盖时使用的程序插装变量和语句,因分支子关键点的成对出现而简化,也减少了一定的工作量;
4) 快速确定不可行路径:使用不可行路径检测模型对未被测试数据覆盖到的路径进行检测,以确定不可行路径,其余的路径是难覆盖路径.不可行路径检测模型检测小部分未被覆盖到的路径所需的工作量明显少于检测全部路径的工作量.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

7 总 结

本文提出一种基于关键点路径表示的软件测试数据快速自动生成方法,所提出的关键点路径表达式能够计算程序的理论路径数目,分支子关键点成对出现的特点能够减少插装工作量,并根据已知路径快速确定其邻近路径;将在被测程序定义域内随机生成的测试数据运行于插装后的程序,确定被覆盖的路径及相应的测试数据;对未被覆盖的路径进行不可行路径的检测,从而将所有的关键点路径分为易覆盖路径、难覆盖路径和不可行路径 3 类;在遗传算法中,利用易覆盖路径及其测试数据提供的启发式信息,仅需设计和计算少量适应度函数,即可生成覆盖难覆盖路径的测试数据;以此给出了基于关键点路径表示的软件测试数据快速自动生成的完整模型.对 3 个基准程序和 2 个工业程序的实验结果表明,采用本方法生成测试数据具有更高的效率.在未来的工作中,将进一步思考易覆盖路径测试数据的生成方法以及如何更好地利用易覆盖路径的信息生成难覆盖路径的测试数据.

References:

[1] Qiu XK, Li XD. A path-oriented tool supporting for testing. Acta Electronica Sinica, 2004,32(12A):231−234 (in Chinese with English abstract).

[2] Gong DW, Yao XJ, Zhang Y. Evolution Theory and Application for Testing Data Generation. Beijing: Science Press, 2014. 8−32 (in Chinese).

[3] Sthamer HH. The automatic generation of software test data using genetic algorithms [Ph.D. Thesis]. Pontyprid: University of Glamorgan, 1995.

[4] Mansour N, Salame M. Data generation for path testing. Software Quality Journal, 2004,12(2):121−136. [doi: 10.1023/B:SQJO.0000024059.72478.4e]

[5] Aldeida A, Lars G. Test data generation with a Kalman filter-based adaptive genetic. The Journal of Systems and Software, 2015, 103:343−352. [doi: 10.1016/j.jss.2014.11.035]

[6] Jiang SJ, Shi JJ, Zhang YM, Han H. Automatic test data generation based on reduced adaptive particle swarm optimization algorithm. Neurocomputing, 2015,158:109−116. [doi: 10.1016/j.neucom.2015.01.062]

[7] Ahmed MA, Hermadi I. GA-Based multiple paths test data generator. Computer & Operations Research, 2008,35(10):3107−3124. [doi: 10.1016/j.cor.2007.01.012]

[8] Gong DW, Zhang WQ, Zhang Y. Evolutionary generation of test data for multiple paths coverage. Chinese Journal of Electronics, 2011,19(2):233−237.

[9] Ghiduk AS. Automatic generation of basis test paths using variable length genetic algorithm. Information Processing Letters, 2014, 114:304−316. [doi: 10.1016/j.ipl.2014.01.009]

[10] Gong DW, Zhang Y. Novel evolutionary generation approach to test data for multiple paths coverage. Acta Electronic Sinica, 2010,38(6):1299−1304 (in Chinese with English abstract).

[11] Paul CJ, Wrote; Han K, Du XT, Trans. Software Testing. 2nd ed., Beijing: Machine Press, 2003. 62−83 (in Chinese).

[12] Genford JM, Wrote; Zhang XM, Huang L, Trans. The Art of Software Testing. 3rd ed., Beijing: Machine Press, 2012. 40−68 (in Chinese).

[13] Long Q, Wu CZ, Huang TW, Wang XY. A genetic algorithm for unconstrained multi-objective optimization. Swarm and Evolutionary Computation, 2015,22:1−14. [doi: 10.1016/j.swevo.2015.01.002]

[14] Zheng JN, Chien CF, Mitsuo G. Multi-Objective multi-population biased random-key genetic algorithm for the 3-D container loading problem. Computers & Industrial Engineering, 2014,89:80−87. [doi: 10.1016/j.cie.2014.07.012]

[15] Ngoc M, Tan HBK. Heuristics-Based infeasible path detection for dynamic test data generation. Information and Software Technology, 2008,50(7-8):641−655. [doi: 10.1016/j.infsof.2007.06.006]

[16] Gong DW, Yao XJ. Automatic detection of infeasible paths in software testing. IET Software, 2010,4(5):361−370. [doi: 10.1049/iet-sen.2009.0092]

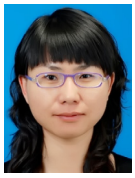
[17] Mickael D, Bernard B, Arnaud G. Infeasible path generalization in dynamic symbolic execution. Information and Software Technology, 2015,58:403−418. [doi: 10.1016/j.infsof.2014.07.012]

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[18] SIR. A repository of software-related artifacts meant to support rigorous controlled experimentation. http//sir.unl.edu/portal/index.php

附中文参考文献:

[1] 邱晓康,李宣东.一个面向路径的软件测试辅助工具.电子学报,2004,32(12A):231−234.
[2] 巩敦卫,姚香娟,张岩.测试数据进化生成理论及应用.北京:科学出版社,2014.8−32.
[10] 巩敦卫,张岩.一种新的多路径覆盖测试数据进化生成方法.电子学报,2010,38(6):1299−1304.
[11] Paul CJ,著;韩柯,杜旭涛,译.软件测试.第 2 版,北京:机械工业出版社,2003.62−83.
[12] Genford JM,著;张晓明,黄琳,译.软件测试的艺术.第 3 版,北京:机械工业出版社,2012.40−68.



丁蕊(1977－),女,辽宁台安人,讲师,CCF 学生会员,主要研究领域为软件测试,演化算法.

张岩(1972－),女,博士,教授,CCF 会员,主要研究领域为基于搜索的软件工程.

董红斌(1963－),男,博士,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为自然计算,机器学习,多 Agent 系统,数据挖掘.

冯宪彬(1972－),男,副教授,主要研究领域为软件测试,演化算法.

www.jos.org.cn
www.jos.org.cn