

文章编号 1004-924X(2009)07-1678-08

环境参数与状态参数融合的测试用例集约简方法

王俊杰^{1,2}, 沈湘衡¹, 张波^{1,2}, 权巍^{1,2}, 陈磊³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 中国人民解放军理工大学 理学院, 江苏 南京 211101)

摘要:为提高软件测试的效率和覆盖率,对测试用例的生成方法进行了研究。以等价类划分等测试用例生成方法为基础,提出把接口参数分成环境参数和状态参数,针对这两种不同性质的参数分析测试用例生成的影响,并分别建立测试用例生成算法模型,据此在实际应用中将两者的作用融合起来生成简约测试用例集。在覆盖率相同的条件下,生成的平均测试用例数量是传统生成测试用例方法的 $\frac{1}{5}$,达到了用更少的测试用例覆盖更多测试需求的目的。

关键词:软件测试;测试用例;参数融合;配置项;约简

中图分类号:TP311 **文献标识码:**A

Optimal test suite generation methods based on fusion of environment and state parameters

WANG Jun-jie^{1,2}, SHEN Xiang-heng¹, ZHANG Bo^{1,2}, QUAN Wei^{1,2}, CHEN Lei³

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Institute of Sciences, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)*

Abstract: With the aim to improve the efficiency and the coverage rate of the software testing, the generation methods of the test cases are researched. On the basis of the test methods such as equivalence classifications, this paper presents a technique to divide the interface parameters into two types, environment parameters and state parameters. Then, the effect of two different parameters with different characters on the generation of testing cases is analyzed and their algorithm models are established respectively. According to all of these, the reducible test cases are generated by fusing their functions in practice. Experimental results show that the test cases generated by the proposed method is one fifth as high as those of traditional generation methods at the same coverage rate, which reaches the purpose of covering more test demands with fewer test cases.

Key words: software testing; test case; parameter fusion; configuration item; reduction

收稿日期:2008-08-18;修订日期:2008-10-09.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA703112)

1 引言

软件测试是软件开发过程中的重要环节,费时、费力且成本高。测试用例的优化约简是指在所有的测试用例中选择更有代表性的测试用例,避免因贪心穷举测试用例带来时间和成本的浪费。

1985年Mandl首先提出两两参数组合覆盖思想,利用正交拉丁方法产生测试用例集,应用于Ada编译器的测试^[1]。20世纪90年代,贝尔实验室将组合测试方法进行了更深入的研究,提出基于贪心策略的组合测试用例的生成方法^[2];2001年,Schroeder在博士论文中提出利用软件附加信息对组合测试用例集进行优化的方法^[3];2002年,William在博士论文中提出生成两两组合测试数据的代数方法,深入研究了组合测试的应用场合^[4];2004年,Kuhn通过研究规模比较大的分布式系统,发现系统中的故障多数由4~6个参数的相互作用引发^[5];2007年,Najla研究出一种由CTS生成测试路径的方法^[6];章晓芳研究了基于需求的测试用例约简方法^[7];王子元博士采用两两组合覆盖表的方法,对相邻因素组合测试用例的生成进行了研究^[8]。

上述研究结果表明:测试用例的生成算法主要依据两种情况,一种是基于参数组合,另一种是基于路径分析,而且上述研究都是把这两种基本方法孤立地分析并应用的。在实际的软件系统中,不是所有的参数之间都有耦合作用,也不是只有两个参数之间存在耦合现象。研究表明,在软件系统中2~6个参数之间存在耦合性的概率更大一些。系统的参数与测试用例生成之间的关系也不能一概而论,需要对它们进行分组,区分不同类型,划分不同的分组来综合研究其对测试用例生成的影响。

2 接口参数分析

按照软件接口参数对整个系统的影响不同可分为两种,一种是参数只在系统广度范围上产生影响,这种影响只产生中间结果,不会造成系统状态的改变,称为环境参数;而另一种是参数在系统的深度范围上产生影响,这类参数的变化使系统

的状态发生改变,称为状态参数^[9]。系统中这两种参数又是交互作用的,分析研究它们的相互作用对测试用例生成的影响有很重要的实用意义。

为便于对本文的理解,给定如下定义及推论。

定义1 设参数 p_s 的取值空间为 $p_s \in \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$,如果 p_s 的变化会导致系统状态的转移,则称 p_s 为状态参数。

推论1 所有状态参数的集合 $P_s = \{p_{s_i} | i = 1, 2, \dots, n\}$ 称为状态参数集。则所有状态参数乘积的集合 $P_{s_d} = p_{s_1} \times p_{s_2} \times \dots \times p_{s_n}$ 为状态参数笛卡尔积。系统的实际状态集合称为 $S = \{s_i | i = 1, 2, \dots, n\}$,显然 $S \subseteq P_{s_d}$ 。

定义2 设参数 p_c 的取值空间为 $p_c \in \{x_i | i = 1, 2, \dots, n\}$,如果 p_c 的变化会导致系统输出发生变化却不改变系统的状态,则称 p_c 为环境参数。所有环境参数的集合 $P_c = \{p_{c_i} | i = 1, 2, \dots, n\}$ 称为环境参数集。

定义3 设 $C = \{C_i | i = 1, 2, \dots, n\}$,此处 n 为系统中环境参数分组数,称 $C_i = \{p_{c_j} | j \subseteq \{1, n\}\}$ 为系统分组环境集,显然 $C_i \subseteq P_c, (i \in [1, n])$ 。

定义4 当且仅当存在正常数 c 和 n_0 ,使对所有的 n 都有:当 $n \geq n_0$ 时, $T(n) \leq cg(n)$ 成立,则称 $T(n) = Dim(g(n))$ 为规模复杂度,即 $Dim(g(n))$ 给出了函数 $T(n)$ 的上界。 $T(n) = Dim(g(n))$ 表示随着问题规模 n 的增大,测试用例的数量增长率和 $g(n)$ 的增长率相同,或者说两者具有相同的数量级。

2.1 环境参数及数据生成

2.1.1 参数分析

进行配置项测试时,按照系统对外部的接口确定参数, P_c 中每个参数都有其指定的取值范围,在取值范围内按等价类划分成有效值、无效值、边界值等,可为每个参数 $p_{c_1}, p_{c_2}, \dots, p_{c_n}$ 分别对应地选取出一组特定的离散值 K_1, K_2, \dots, K_n ,设参数 $p_{c_1}, p_{c_2}, \dots, p_{c_n}$ 所对应选取数值的数量分别为 k_1, k_2, \dots, k_n 。例如在上述三组元素中分别取第一个元素的含义可表述为:参数 p_{c_1} 经过划分,形成一组含有 k_1 个元素的离散值 K_1 。经过这样的等价类划分,单一参数可以产生的测试用例规模复杂度为 $Dim(n)$ 。如果 P_c 各元素之间存在耦合关系,采用贪心策略穷举测试用例,会产生测试用例 $k_1 \times k_2 \times \dots \times k_n$ 个,其规模复杂度为 $Dim(n^n)$ 。可想而知,在参数很多的情况下,无论

怎样都难以承受这样海量的测试用例,而这些也只是系统中微不足道的一小部分。

导致系统出现问题的参数值有如下几种:某一个参数的特定取值;某两个参数的特定组合取值;多个参数的特定组合取值。要使所有参数的各个取值至少出现一次,需要 $\max_{1 \leq i \leq n} k_i$ 个测试用例;要对任意两个参数的所有组合进行覆盖,使它们的所有组合值都至少出现一次,则需要 $\max_{1 \leq i \neq j \leq n} k_i \times k_j$ 个测试用例。依此类推,随着耦合参数数量的增加,测试用例数量以更快的速度增加。为了便于分析把参数数量与测试用例数量之间的关系用矩阵表示。

定义 5 设 $\mathbf{A}=(a_{ij})_{m \times n}$ 为 $m \times n$ 阶矩阵,使用 n 表示参数的数量,使用 m 表示测试用例的数量,每一行的取值为一个测试用例的参数取值。称矩阵 \mathbf{A} 为与参数相关的测试用例矩阵,在这里简称测试用例矩阵。

一般情况,如果 \mathbf{A} 中任意 $N(2 \leq N \leq n)$ 列均满足 $K_{*1}, K_{*2}, \dots, K_{*N}$ 中所有值的 N 维组合至少都出现一次,则称 \mathbf{A} 为 N 维组合覆盖矩阵。倘若 $K_{*1}, K_{*2}, \dots, K_{*N}$ 中的所有值的 N 维组合只出现一次,则称 \mathbf{A} 为 N 维最小组合覆盖矩阵,记为 \mathbf{A}_{\min} 。若 $K_{*1}, K_{*2}, \dots, K_{*N}$ 中的所有值的 N 维组合都等概率出现,则称 \mathbf{A} 为 N 维正交覆盖矩阵,记为 \mathbf{A}_O 。

2.1.2 数据生成实例

设 $n=2, N=4$, 即系统的 4 个参数 $p_{c_1}, p_{c_2}, p_{c_3}, p_{c_4}$ 中有两个有耦合关系,为便于分析,假设 p_{c_1}, p_{c_2} 之间存在耦合关系。同时设 $K_1=\{a, b, c\}, K_2=\{d, e\}, K_3=\{f, g, h, q, l\}, K_4=\{m, n\}, k_1=3, k_2=2, k_3=5, k_4=2$ 。因为不需要穷举测试用例,在此只要把有耦合关系的参数 p_{c_1}, p_{c_2} 可能的取值数量 k_1, k_2 作笛卡尔积 $k=k_1 \times k_2=3 \times 2$,即为覆盖两耦合关系参数组合测试用例的数目。没有耦合关系的参数 p_{c_3}, p_{c_4} 只要对其可能的取值都进行最少一次取值即可。

如果其他参数的可能取值数目大于有耦合关系参数的笛卡尔积数目,要进行增强补充测试用例,确保参数中的每个值至少取到一次。

2.1.3 多参数组合算法描述

多参数组合算法:

(1) 设有 N 个参数,其中的 $n(n \leq N)$ 个之间

$p_{c_1} p_{c_2} p_{c_3} p_{c_4}$	$p_{c_1} p_{c_2} p_{c_3} p_{c_4}$	$p_{c_1} p_{c_2} p_{c_3} p_{c_4}$
$\begin{bmatrix} a & d & - & - \\ a & e & - & - \\ b & d & - & - \\ b & e & - & - \\ c & d & - & - \\ c & e & - & - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a & d & f & - \\ a & e & g & - \\ b & d & h & - \\ b & e & q & - \\ c & d & l & - \\ c & e & - & - \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} a & d & f & x \\ a & e & g & y \\ b & d & h & - \\ b & e & q & - \\ c & d & l & - \\ c & e & - & - \end{bmatrix}$
(a)	(b)	(c)

图 1 环境参数测试用例生成

Fig. 1 Generation of test cases for environment parameters

存在耦合关系, N 个参数可取值数目分别为 k_1, k_2, \dots, k_N ;

(2) 找出有耦合关系的参数;

(3) 采用递归算法对步骤(1)中的参数两两之间求笛卡尔积;

(4) 计算组合覆盖矩阵。

如果步骤(1)中的参数数目乘积不小于 k_1, k_2, \dots, k_N 中任一数值,组合覆盖矩阵中的行数为步骤(1)中的参数数目之积。反之,组合覆盖矩阵中的行数为 k_1, k_2, \dots, k_N 中最大值。组合覆盖矩阵的元素由两部分组成,一部分为有耦合关系参数的笛卡尔积,另一部分为其余参数的任意取值,但要保证至少取到一次。

2.1.4 方法对比

在完全是黑盒的情况下,应根据测试时间、测试覆盖指标等不同要求,采用相邻参数两两组合或者相邻参数 $2 \sim n$ 组合生成测试用例^[10]。这样可以减少测试用例的数量并达到一定的测试覆盖率,但是由于不知道参数之间的关系,不能对重要数据进行充分覆盖,这种方法不适合于参数之间关系复杂的系统。

采用参数两两组合,而不是相邻参数两两组合的方法,若要把任意两参数的不同组合都取到至少一次,与把所有参数的任意组合取值都取到所生成的测试用例效果是一样的。

在灰盒测试的情况下,因为对参数之间的关系有一定的了解,或者根据分析能够确定有耦合关系参数的范围,则可以采用耦合关系生成测试用例实现用较少的测试用例完成较高效率的测试覆盖。但在实际工作中,往往一个系统中有多数(一般为 $2 \sim 6$ 个)参数存在耦合关系,另外在分析

的时候常常要适当地扩大耦合范围,这种方法产生的测试用例的数目比相邻参数两两组合的方法产生的测试用例数目还要多。

这几种方法产生的测试用例数量对照关系如表 1。

表 1 环境参数测试用例对照表

Tab.1 Contrast of test cases of environment parameters

测试需求	耦合关系	两两相邻	完全覆盖
$3 \times 3 \times 3 \times 3^{注1}$	9	9	81
$4 \times 3 \times 2$	12	12	24
$2^7 \times 2 \times 2 \times 2$	8	10	2 048
$5^2 \times 5 \times 4^2 \times 4 \times 3 \times 2$	40	30	48 000
$3^{11} \times 3 \times 3$	9	19	1.6×10^7
$3^{12} \times 4^5$	4	28	5.4×10^8
$17^{16} \times 2 \times 2$	17	289	1.9×10^{20}
$2^{122} \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$	16	86	8.5×10^{37}

注 1:有“·”标示的数字代表的参数之间有耦合关系。

2.2 状态参数及数据生成

2.2.1 状态参数及其表示

状态参数决定着系统的状态转换,如果与状态参数相关的测试用例也用上述的方法产生,同时还要覆盖所有的状态路径,就要采用所有状态参数的笛卡尔积作为测试用例集,显然这种做法耗时又费力。

为此,有必要针对状态参数研究出另一种测试用例的生成方法,以达到使用尽量少的测试用例覆盖更多的状态路径之目的。

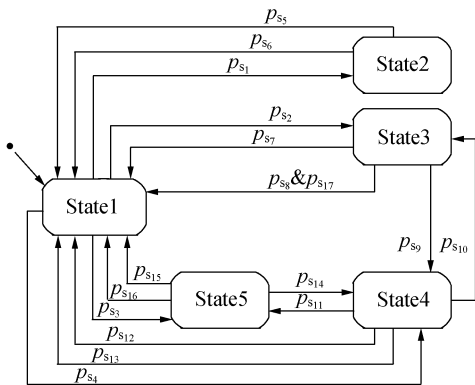


图 2 状态参数图

Fig.2 Graph of state parameters

定义 6 设 $G_s = \{S_{node}(P_s), E\}$, 其中, S_{node} 是

结点的非空有穷集合,表示系统中的各个状态。 E 是边的有穷集合,表示系统中状态之间的交互关系。 P_s 是状态参数的非空有穷集合,表示状态转换的决定因素,其中,逻辑或关系的参数单独表示一条边,逻辑与关系的参数共同表示一条边。称 G_s 为参数状态图,在此简称状态图。

典型状态图如图 2。状态图中状态转换由状态参数的逻辑关系决定,这样状态图能很好地表示出状态参数与状态之间的关系。但因为结点间可能会有多条边,使测试用例生成不够方便,为此需要对状态图进行简化。

定义 7 设 $G_d = \{S_{node}, E\}$, 其中, S_{node} 是结点的非空有穷集合,表示系统中的各个状态。 E 是边的有穷集合,表示系统中状态之间的交互关系。称 G_d 为有向图,按照定义可知 $G_d \subseteq G_s$ 。

这样图 2 可简化成有向图,如图 3 所示。

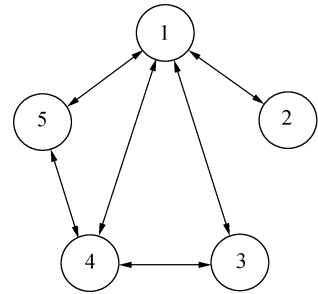


图 3 有向图

Fig.3 Diagram created by state graph

经过状态图简化成有向图,就把求解系统中状态转换的路径问题简化为计算有向图中的路径问题。图 3 中,结点之间存在着环路,并且没有单纯的入口结点和出口结点,这是因为系统中的程序是循环工作。为遍历路径上的简便,需要做一

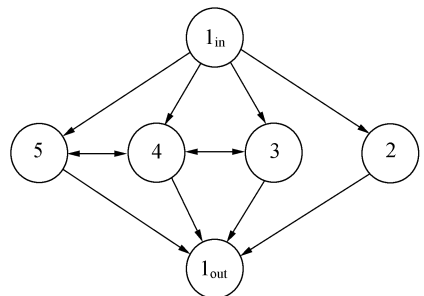


图 4 分解有向图

Fig.4 Changed diagram

3 参数融合实例

3.1 融合分析

在实际的软件测试工作中,系统的状态参数和环境参数并不是孤立的,多数情况下是互相渗透、交错融合的。比如一组环境参数通过选择不同值进行计算得到不同的结果,而这个结果可能会成为临时的状态参数,这可视为环境参数的一种转换。同样,在系统的状态转换中,也会有环境参数参与运算。特别是在软件配置项测试时,存在着更为广泛的融合现象。

在软件配置项测试时,测试评价的标准是软件需求规格说明,测试输入的依据主要是各个配置项之间的接口协议。也就是说,系统的接口参数由接口协议提供,这样,按照协议每注入一组参数即生成一测试用例。

按照上面的分析,由接口协议对系统进行软件测试,恰好会涉及到状态参数与环境参数的融合技术,这种融合的过程就是对软件需求规格说明以及接口协议的分析过程。在实际工作中有如下几个步骤:

- (1) 确定接口协议中的数据与软件需求规格说明中部分功能的关系;
- (2) 确定状态参数和环境参数;
- (3) 确定状态转换关系;
- (4) 确定状态的入口与出口;
- (5) 确定环境参数之间的关系;
- (6) 确定状态参数与环境参数之间的关系;
- (7) 生成一约简的测试用例集。

重复上述的步骤完成测试用例的生成过程。很明显在这种测试用例生成方法中,人工参与了某些重要关系的确定,剩下的工作都由计算机根据算法自动完成。

3.2 实例

实例描述的是以嵌入式软件实现一种相机的工作过程^[10]。经分析可知这一过程涉及 6 种不同的相机状态:待机,摄像准备,摄像,摄像暂停,定准备,定标。与此相关的一组接口参数包括 11 个数据,其名称、意义及取值情况见表 4。参数 com, cf, lg t 为单纯的状态参数;参数 tem, v, pos, lg t 既是状态参数又是环境参数,且 tem 与 pos 之间存在耦合关系。它们是按照公式进行运算得

出的,其结果正确与否作为状态转换的判定条件,结果的具体值作为环境参数供后继状态使用;参数 num, T, T₁, T₂, T₃ 为单纯的环境参数,lg t 与 num 之间存在耦合关系。这 6 种状态之间的转换关系及其 11 个参数与状态转换之间的制约关系见图 5。

表 4 接口参数

Tab. 4 Interface parameters

参数	参数意义	参数取值
com	摄像、定标两种命令类型	Command=0xA5,0xA
tem	环境温度	Temperature=0xAA,0x30,0x1E
v	运行速度	0x00~0xB9
pos	位置模式	Position=0x05,0x18
lg t	定标灯状态	Light=0,1
num	定标灯序号	Number=0x04,0x08
T	命令执行时刻	0x00~0xFF
T ₁	命令执行时刻	0x00~0xFF
T ₂	命令执行时刻	0x00~0xFF
T ₃	命令执行时刻	0x00~0xFF
cf	开关机有效标志	Closeflag=0,1

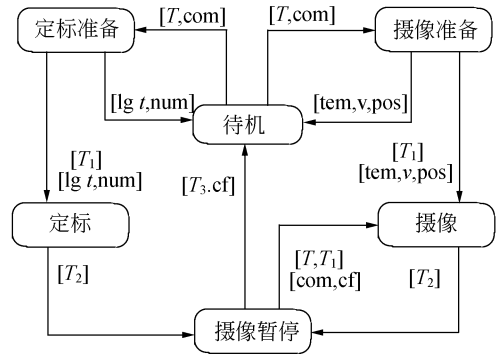


图 5 实例状态图

Fig. 5 State graph of the instance

系统的状态转换与其接口参数之间的关系分析清楚以后,即可按照步骤生成约简的测试用例集,结果见表 5。表 5 中的 11 个测试用例覆盖了 6 条状态路径,序号分别为 1、3、7、8、9、10;同时覆盖了二组有耦合关系环境参数的组合,序号 1、2、3、4、5、6 覆盖 tem, pos 的组合,序号 8、9、10、11 覆盖 lg t, num 的组合。

为方便观察,将参数 tem, v, pos 运算结果的真和假分别用 $x=0$ 和 $x=1$ 表示,列于表 5 的状

态参数中,同时“-”表示生成的正常范围内的随机数据用。

表 5 实例测试用例集

Tab. 5 Test case suite of the instance

序号	状态参数							环境参数				
	com	cf	lg t	x	tem	v	pos	num	T	T ₁	T ₂	T ₃
1	0xA5	0	-	1	0xAA	-	0x05	-	-	-	-	-
2	0xA5	0	-	1	0xAA	-	0x18	-	-	-	-	-
3	0xA5	1	-	1	0x30	-	0x05	-	-	-	-	-
4	0xA5	0	-	1	0x30	-	0x18	-	-	-	-	-
5	0x A5	0	-	1	0x1E	-	0x05	-	-	-	-	-
6	0x A5	1	-	1	0x1E	-	0x18	-	-	-	-	-
7	0xA5	-	-	0	-	0xFF	-	-	-	-	-	-
8	0x5A	0	1	-	-	-	-	0x04	-	-	-	-
9	0x5A	1	1	-	-	-	-	0x08	-	-	-	-
10	0x5A	0	0	-	-	-	-	0x04	-	-	-	-
11	0x5A	1	0	-	-	-	-	0x08	-	-	-	-

4 结 论

环境参数与状态参数融合的测试用例集生成方法是将系统中的接口参数按照性质的不同分别进行研究,在实际应用中把两者的影响融合起来。该方法生成的测试用例数量平均是普通测试用例

生成方法的 $\frac{1}{5}$, 达到使用更少的测试用例覆盖更多的测试需求的目的,同时理论与实际应用相结合取得了很好的效果。但是此方法在路径算法中处理状态间回环问题时不能达到理想的要求,有时需要人为干预。下一步工作将继续解决融合过程中出现的回环、精简、智能化等问题。

参考文献:

- [1] MANDL R. Orthogonal latin squares: an application of experimental design to compiler testing [J]. *Communications of the ACM*, 1985, 28(10): 1054-1058.
- [2] COHEN D M, DALAL S R, FREDMAN M L. The AETG system: An approach to testing based on combinatorial design [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1997, 23(7): 437-444.
- [3] SCHOEDER P J, KOREL B. Black-box test reduction using input-output analysis [J]. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2000, 25(5): 173-177.
- [4] WILLIAMS A W. *Software component interaction testing: Coverage measurement and generation of configurations* [D]. Canada: Ottawa-Carleton Institute for Computer Science, School of Information Technology and Engineering, University of Otta-

wa, 2002.

- [5] KUHN D R, WALLACE D R, GALLO A M. Software fault interaction and implication for software testing [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2004, 30(6): 418-421.
- [6] NAJLA R, AAMER N, MUHAMMAD Z Z. An automated approach to system testing based on scenarios and operations contracts [C]. *Seventh International Conference on Quality Software (QSIC'07)*, Oct. 11-12, 2007, Portland, Oregon, USA.
- [7] 章晓芳, 徐宝文, 聂长海, 等. 一种基于测试需求约简的测试用例集优化方法 [J]. *软件学报*, 2007, 18(4): 821-831.
ZHANG X F, XU B W, NIE CH H, et al.. An approach for optimizing test suite based on testing requirement reduction [J]. *Journal of Software*, 2007, 18(4): 821-831. (in Chinese)
- [8] 王子元, 聂长海, 徐宝文, 等. 相邻因素组合测试用例集的最优生成方法 [J]. *计算机学报*, 2007, 30(2):

201-210.

WANG Z Y, NIE CH H, XU B W, *et al.*. Optimal test suite generation methods for neighbor factors combinatorial testing[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2007, 30(2): 201-210. (in Chinese)

- [9] 韩峰岩, 覃征, 王昕. 基于测试剖面的软件可靠性测试数据生成技术[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(10): 1073-1077.

HAN F Y, QIN ZH, WANG X. Generating tech-

nique for software reliability test data based on test profile[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, 40(10): 1073-1077. (in Chinese)

- [10] 张雷, 黄廉卿, 赵唯佳. 一种超光谱图像分层压缩方法[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 478-484.
ZHANG L, HUANG L Q, ZHAO W J. A multi-layered decomposition of hyper-spectral image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 478-484. (in Chinese)

作者简介:



王俊杰(1979—),男,吉林人,博士研究生,2002年于长春工业大学获得学士学位,主要从事软件测试及测试环境搭建方面的研究。E-mail: junjiwear@yahoo.com.cn



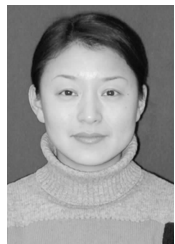
权巍(1982—),女,吉林人,博士研究生,2004年于东北师范大学获得学士学位,研究领域为软件可靠性及软件测试技术。E-mail: b_wei@163.com



沈湘衡(1952—),男,吉林人,博士生导师,研究员,1977年于吉林工业大学获得学士学位,研究领域为检测及计算机应用技术。E-mail: shenxiangheng@yahoo.com.cn



陈磊(1982—),男,山东人,助教,硕士,2006年于中国科学院研究生院获得硕士学位,主要从事应用光学方面的研究。E-mail: ciompchenlei@163.com



张波(1974—),女,吉林人,博士研究生,2003年于中国科学院研究生院获得硕士学位,研究领域为软件测试及系统检测。E-mail: zhanghui_net@tom.com