

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.01.016

用 KM 算法增强测试集的频谱主分量*

邝继顺¹ 周颖波¹ 蔡烁¹ 皮霄林^{1,2}

(1. 湖南大学 信息科学与工程学院 长沙 410082; 2. 广东电网有限责任公司珠海供电局 珠海 519000)

摘要:在集成电路测试领域常常需要对测试集和测试响应进行频谱分析,计算其频谱主分量,用于指导测试产生和进行测试数据压缩等。提出一种用 KM (Kuhn-Munkras) 算法增强测试集频谱主分量的方法,先根据测试集和其频谱主分量矩阵构建二分图模型和权值矩阵,把增强频谱主分量的问题转化为二分图的匹配问题,然后用 KM 算法求解。根据匹配关系调整测试集中测试向量的顺序后,频谱主分量和测试集的相关性增加,频谱主分量得到增强。在 ISCAS-89 基准电路测试集的实验表明,测试集排序后,其频谱主分量的相关性提高了 19.05%,测试集残差 FDR 编码压缩率提高了 4.59%。

关键词: 频谱分析;主分量;二分图匹配;KM 算法;相关性

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

Enhance prominent spectral component of test set by using KM algorithm

Kuang Jishun¹ Zhou Yingbo¹ Cai Shuo¹ Pi Xiaolin^{1,2}

(1. College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Zhuhai Power Supply Bureau, Zhuhai 519000, China)

Abstract: In the field of integrated circuit testing, in order to improve the test data compression ratio and test generation, it is often necessary to do spectral analysis of the test set and test response and calculate their prominent spectral component. A method is proposed to enhance the prominent spectral component of test set by using KM (Kuhn-Munkras) algorithm. Based on the test set and its prominent spectral component, a bipartite graph and a weighting matrix are constructed. The problem of the enhancement of prominent spectral component is transformed into a bipartite graph matching problem, and then be solved by KM algorithm. After the order adjustment of test set according to the matching relationship, the correlation between prominent component and test set is increased, and the prominent spectral component is enhanced. In this paper, the experimental results about the test set of the ISCAS-89 benchmark circuits show that the coefficient of the sorted test can increase by 19.05% on average, and the test set residue compression ratio basis on FDR (frequency-directed run-length) code can increase by 4.59% on average.

Keywords: spectral analysis; prominent component; bipartite graph match; KM algorithm; correlation

1 引言

随着集成电路制造工艺迅速发展,单个片上系统(system-on-a-chip, SOC)上包含的 IP 核数目逐渐增多,且芯片的复杂度也在不断增加,使得测试芯片时所需的数据也越来越多。但是,过大的测试数据量不仅提高了对自动测试仪(ATE)的带宽和容量要求,而且会增加测试

应用时间。因此,如何生成高质量的测试向量以及减少测试数据是目前集成电路测试面临的重要挑战^[1-2]。

近些年,频谱分析被引入到集成电路测试领域用于指导测试向量产生和进行测试数据压缩等,频谱分析指的是在频谱域内分析数字信号的特性。文献[3]提出了通过验证电路输出的 Walsh 谱系数来测试电路的固定型故障。文献[4]提出了通过选择 RW (Rademacher-Walsh) 函数的系数作为电路响应的签名,以达到压缩测

试响应的目的。文献[5]提出了一种新颖的构建 BIST 的方法,先对 ATPG 产生的测试向量进行频谱分析,然后将频谱主分量按照一定的比率构建 BIST。文献[6]提出了一种根据电路 RTL 级故障测试集的频谱特性产生电路门级故障测试集的方法。文献[7]提出一种基于频谱分析的测试集压缩方法,将测试集拆分为频谱主分量和测试集残差两部分,其中频谱主分量由硬件生成,残差进行编码压缩。但是在这些文献中并没有提出一个较好的方法对测试集进行处理,使其在频谱分析的时候能量更集中、主分量更明显。

本文提出了一种用于频谱分析时增强测试集频谱主分量的方法。本方法先求出测试集的频谱主分量,根据测试集和主分量矩阵构建二分图和权值矩阵,把增强频谱主分量的问题转化为二分图的匹配问题,然后用 KM (Kuhn-Munkras)算法求解。测试集根据匹配关系调整顺序后,频谱主分量和测试集的相关性增加,频谱主分量得到增强。

2 频谱分析

2.1 Hadamard 变换和 Walsh 函数

数字信号的频谱分析就是将数字信号分解成一组正交基的组合。类似于用傅里叶变换分析模拟信号一样,数字信号也可以通过映射变换,分解成一组正交函数。不同的变换对应于不同的正交基。目前常用的两种处理数字信号变换有 Hadamard 变换和 Haar 变换。在本文中,使用 Hadamard 变换对数字信号进行分析,其中 Hadamard 变换所对应的正交基称为 Walsh 函数^[8]。对于一个正整数 n ,Hadamard 变换矩阵 $H(n)$ 的大小为 $2^n \times 2^n$,它的每一行就是一个 Walsh 函数,总计有 $N = 2^n$ 个,且相互正交。Walsh 函数中仅含有“ -1 ”和“ $+1$ ”两值,可以和测试集中的逻辑 0 和逻辑 1 相对应。

Hadamard 变换矩阵递归表达式如下:

$$H(n) = \begin{bmatrix} H(n-1) & H(n-1) \\ H(n-1) & -H(n-1) \end{bmatrix}$$

$$n = 1, 2, \dots, k \tag{1}$$

式中: $H(0) = 1$ 。当 $n = 1, 2$ 时,式(1)有:

$$H(1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix},$$

$$H(2) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$H(2)$ 是一个 4×4 的矩阵,它由 4 个 Walsh 函数构成,每一行就是一个 Walsh 函数。

2.2 用 Hadamard 变换进行频谱分析

基于 Hadamard 变换的数字信号频谱分析就是将数字信号分解成一组正交的 Walsh 函数,这组 Walsh 函数反映了数字信号的频谱特性。下面将举例说明如何利用 Hadamard 变换对数字信号进行频谱分析、计算信号谱系数以及提取信号频谱主分量。

对一个 R 位的数字信号进行频谱分析,需要使用 Hadamard 变换矩阵 $H(r)$,其中 $R = 2^r$ 。对应于 $H(r)$ 中含有的“ $+1$ ”和“ -1 ”两种状态,这里需要先对数字信号进行预处理,将其中的逻辑 1 和逻辑 0 分别替换为“ $+1$ ”、“ -1 ”。之后将 $H(r)$ 和预处理后的信号相乘,得到一组系数,这组系数称为信号的谱系数。这组谱系数表示不同 Walsh 函数和数字信号的相关性,谱系数越大说明该系数对应的 Walsh 函数和这个信号的相关性越高。

对一个 8 位的二值数字信号进行预处理的过程如图 1 所示,将信号中的逻辑 1、逻辑 0 分别替换为了“ $+1$ ”和“ -1 ”。对该信号进行频谱分析的过程如图 2 所示,用 $H(3)$ 和预处理后的信号相乘,等号右侧得到的权重就是谱系数。谱系数数值大小为 Hadamard 矩阵对应行 Walsh 函数与二值数字信号中相同位个数减去不同位个数,例如第一个谱系数 2 表示 $H(3)$ 中的第 1 行 ($W1$) 与该信号总共 8 位中有 5 位相同,3 位不同。因此数值越大,对应 Walsh 函数和这个信号的相同位数就越多,相关性就越高。数值最大的谱系数对应的 Walsh 函数称为该信号的频谱主分量^[8],图 2 中 $W6$ 对应的谱系数最高(为 6),所以该信号的频谱主分量是 $W6$ 。

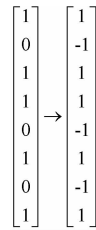


图 1 数字信号的预处理
Fig.1 Digital signal preprocessing

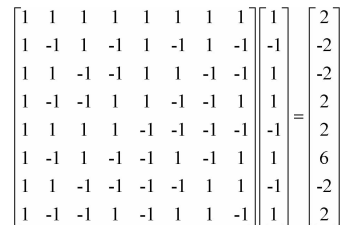


图 2 数字信号的频谱分析
Fig.2 Spectrum analysis of digital signal

与普通二值数字信号不同,除确定位 0 和 1 外,测试集中还含有不确定位 X , X 位可以任意填充为 0 或者 1, 因而对任意 Walsh 函数, X 位与其相关性都是相同的。这里在信号预处理时,将 X 替换为 0, 以消除矩阵相乘计算谱系数时, X 位对 Walsh 函数的影响。对预处理后的测试集中每列分别进行频谱分析,可以得到每一列对应的最大谱系数和频谱主分量,所有列的频谱主分量(行向量)经过转置后(转为列向量)组合在一起就构成了测试集的主分量^[7]矩阵。

图 3 所示的矩阵 A 代表测试集, A 中的每一行分别代表一个测试向量,在第 1 行、第 2 行和第 4 行的向量中含有不确定位 X 。矩阵 B 是预处理后的矩阵,是分别将 A 矩阵中的逻辑 1、逻辑 0、不确定位 X 替换为了“+1”、“-1”和“0”。图 4 所示的矩阵 C 是主分量矩阵,矩阵 C 中的第 1~4 列分别是矩阵 B 中 1~4 列的频谱主分量。测试集中,所有列对应的最大谱系数之和称为测试集的最大谱系数,代表测试集与其频谱主分量之间的相关性,最大谱系数越大,测试集矩阵与主分量矩阵中相同位数就越多。这里测试集 A 的最大谱系数为 $3 + 1 + 1 + 1 = 6$ 。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & X & 0 & X \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ X & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & X & 1 \end{bmatrix} \rightarrow B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

图 3 对测试集 A 进行预处理

Fig. 3 Preprocessing of test set A

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

图 4 主分量矩阵 C

Fig. 4 Prominent component matrix C

文献[6]中,将测试集矩阵拆分为经过反向预处理(即将“+1”、“-1”替换为逻辑 1 和逻辑 0)的主分量矩阵与测试集残差两部分,如图 5 所示。其中主分量矩阵部分可由硬件直接生成^[8],测试集残差存储在 ATE 中,这样对原始测试集的压缩,转换为了对测试集残差的压缩。

$$\begin{bmatrix} 1 & X & 0 & X \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ X & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & X & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 0 & X & 1 & X \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 1 \end{bmatrix}$$

测试集 A 主成分矩阵 D 残差 E

图 5 拆分测试集 A

Fig. 5 Split test set A

分析测试集残差可知,残差由测试集和主分量矩阵两者异或得到,而两者的相关性较高,相同位数较多。因此相较于原始测试集,残差集的确定位中,0 的比例将会提高(不确定位 X 保持不变),这有利于对残差集的压缩^[1-2]。

3 增强测试集频谱主分量算法

3.1 问题描述

实验发现,调整测试集向量顺序后,其对应的主分量矩阵和测试集残差也会发生改变。将图 5 中的矩阵 A 交换第 1 行和第 2 行向量的顺序后,得到矩阵 A' 。其对应的主分量矩阵 D' 和测试集残差 E' 如图 6 所示。此时测试集 A' 的最大谱系数之和变为了 $1 + 3 + 3 + 1 = 8$,较测试集 A 提高了 2;对应的测试集残差 E' 中,1 的个数为 2 个,较残差 E 减少了 1 个。最大谱系数之和增加意味着测试集和主分量矩阵的相关性增强,相同位更多,测试集残差集中 1 的个数更少,更有利于残差的压缩。由此可见测试向量的顺序影响频谱分析的结果。

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & X & 0 & X \\ X & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & X & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \oplus \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & X & 0 & X \\ X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \end{bmatrix}$$

测试集 A' 主成分矩阵 D' 残差 E'

图 6 测试集 A' 及其主分量矩阵和残差集

Fig. 6 Test set A' and its prominent

component matrix and residue set

在集成电路固定型故障测试中,测试集向量的施加顺序并不会影响故障的检测效果^[1-2],所以可以尝试改变测试集向量的顺序来增强其频谱主分量,使主分量和测试集的相关性更高,相同位更多,同时更有利于对测试集残差的压缩。

如果对测试集向量的所有排序情况都进行计算寻找最优解, M 个向量将会有 $M!$ 种排列组合,复杂度非常高,我们这里采取将排序问题建模转换为图论问题来解决。

3.2 建模

对当前已给定排序状态下的测试集 M ,可以求出其对应的主分量矩阵 N 。把 M 和 N 分别抽象成两个点集 X, Y 。 X, Y 中的点 X_i, Y_j 分别代表矩阵 M 中的第 i 行、矩阵 N 中的第 j 行, $v(i, j)$ 表示连接 X_i 和 Y_j 的边。该边上的权值 $w(i, j)$ 是 X_i 和 Y_j 的不相容位(异或值为 1)的数目,它表示将测试集中第 i 行中的向量放到第 j 行需要的“费用”。对测试集排序增加它和主分量矩阵相关性的问题就转化为了二分图^[9]的完备匹配问题,同时要求匹

配的“费用”最小。使用 KM (Kuhn-Munkras) 算法^[10] 寻找完备匹配,并根据匹配蕴含的信息调整测试集的顺序。

以图 5 中的矩阵 A 为例讲解排序过程。图 7 所示为根据图 5 中测试集 A 和主分量矩阵 D 构建的完全二分图,点集 X 代表矩阵 A ,点集 Y 代表矩阵 D 。点 X_1, \dots, X_4 分别代表矩阵 A 的第 1~4 行,点 Y_1, \dots, Y_4 分别代表矩阵 D 的第 1~4 行。图 8 是权重矩阵, $w(i, j)$ 是连接 X_i 和 Y_j 的边 $v(i, j)$ 上的权重, $w(i, j)$ 的数值是 X_i 和 Y_j 不相容位(异或值为 1)的数目。矩阵 A 的第 1 行(1 X 0 X)和矩阵 D 的第 1 行(1 1 1 1)有一位不相容位,所以 $w(1, 1)$ 的值为 1。

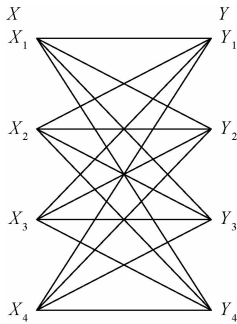


图 7 完全二分图

Fig. 7 Complete bipartite graph

	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
X_1	1	2	1	2
X_2	2	0	3	1
X_3	0	1	1	2
X_4	2	2	1	1

权重 $w(i, j)$

图 8 权重矩阵

Fig. 8 Weight matrix

根据图 7 中的二分图和图 8 中的权重矩阵, KM 算法找到的完备匹配是 $v(1, 4)$ 、 $v(2, 2)$ 、 $v(3, 1)$ 、 $v(4, 3)$, 蕴含的排序信息是原测试集中的第 1 个向量(第 1 行)排序后放在第 4 行,第 2 向量位置不变,第 3 个向量排序后放在第 1 行,第 4 个向量排序后放在第 3 行。排序后的测试集更新对应的主分量矩阵和残差集,结果如图 9 所示。

排序后的测试集 A'' 所有列的最大谱系数之和为 $3 + 3 + 3 + 3 = 12$,较测试集 A 提高了 6;对应的残差集 E'' 中,1 的个数为 0 个,较残差集 E 减少了 3 个。由此可见通过本算法可以为测试集找到一个较好的顺序,使得求到的主分量矩阵和测试集的相关性更高,主分量更强;对应的残差集中 1 的个数更少。

$$\begin{matrix} \begin{bmatrix} X & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & X & 1 \\ 1 & X & 0 & X \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \oplus & \begin{bmatrix} 0 & X & 0 & X \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \end{bmatrix} \\ \text{测试集 } A'' & & \text{主成分矩阵 } D'' & & \text{残差 } E'' \end{matrix}$$

图 9 排序后的测试集 A''

Fig. 9 Test set A'' after sorting

对于向量较多的测试集,调整一次顺序并不就能找到当前最优解,可以通过多次交替迭代更新测试集顺序和主分量矩阵,直到测试集最大谱系数之和不能再提高为止。

4 实验结果及分析

本文用 C 语言实现了上述的算法,并在 ISCAS-89 基准电路上验证其有效性^[11-12]。实验选取了 ISCAS-89 中最大的几个时序电路,它们相应的测试向量由 Mintest ATPG 测试生成工具产生^[13-14]。表 1 是测试集排序前后频谱分析数据对比,表 1 中的第 1 列为电路名称,第 2、3 列为测试集的向量长度和向量数目。第 4~6 列给出了排序前后测试集各列最大谱系数之和以及提高百分比。

表 1 测试集排序前后频谱分析数据对比

Table 1 Comparison of spectrum analysis data before and after test set sorting

电路	向量长度	向量数目	最大谱系数之和		
			排序前	排序后	提高/%
s5378	214	111	3 391	4 529	33.56
s9234	247	159	6 117	7 449	21.78
s13207	700	236	7 429	8 913	19.98
s15850	611	126	8 063	9 443	17.12
s38417	1 664	99	35 420	38 588	8.95
s38584	1 464	136	19 995	22 575	12.90
平均值			-	-	19.05

最大谱系数之和代表测试集和其频谱主分量的相关性。从表 1 中可以看出,经过排序后,每个电路的测试集的最大谱系数之和较排序前均有提高,平均提高了 19.05%。这说明,本文提出的排序方法能有效提高测试集的最大谱系数之和,使其频谱主分量得到增强。

频谱主分量增强,表示测试集残差中确定位 1 的个数得到减少,这有利于对残差的压缩。表 2 中列出了用当前主流编码压缩方法对原始测试集和测试集排序前后对应的残差集进行编码压缩得到的结果,采用的编码压缩方法分别为:基于单游程的 FDR (frequency-directed run-length) 编码^[15]、基于双游程的 EFDR (extended frequency-directed run-length) 编码^[16] 以及基于分块的

OSHC(optimal selective huffman coding) 编码^[17]。表 2 中 1~3 列分别为电路名称、测试集的向量长度和向量数目。4~6 列列出了 3 种编码压缩方法对原始测试集的压缩率;7~9 列为测试集排序前对应残差集的压缩率;10~12 列为测试集排序后对应残差集的压缩率。从表 2 中可以看出,对所有电路,在 FDR、EFDR、OSHC 三种

编码方法中,都是测试集排序后残差集的编码压缩率最高,各自平均值分别为 80.06%、78.23%、79.15%。较原始测试集压缩率平均值分别提高了 22.83%、14.93%、10.63%;较测试集排序前残差集压缩率平均值也分别提高了 4.59%、4.83%、3.35%,效果都比较明显。

表 2 测试集及残差集压缩率

Table 2 The compression ratio in test set and residue set

电路	向量长度	向量数目	原始测试集/%			测试集排序前残差 ^[7] /%			测试集排序后残差/%		
			FDR ^[15]	EFDR ^[16]	OSHC ^[17]	FDR	EFDR	OSHC	FDR	EFDR	OSHC
s5378	214	111	47.98	53.67	59.60	67.59	64.65	66.84	73.28	70.61	72.18
s9234	247	159	43.61	48.66	60.00	66.28	62.74	70.17	73.80	70.72	75.07
s13207	700	236	81.30	82.49	85.30	89.70	88.96	89.61	93.22	92.62	91.52
s15850	611	126	66.21	68.66	72.20	80.77	78.91	80.36	84.94	83.80	83.54
s38417	1664	99	43.37	62.02	64.50	72.39	71.45	71.45	76.67	75.45	74.92
s38584	1464	136	60.93	64.28	69.50	76.10	73.71	75.88	78.46	76.21	77.69
		平均值	57.23	63.30	68.52	75.47	73.40	75.80	80.06	78.23	79.15

在这里 FDR 编码的编码压缩率是提高最多的,由原始测试集的 57.23%,提高到了排序后残差集的 80.06%,提高了 22.83%。这主要是因为 FDR 编码是单游程编码方法,仅针对 0 游程进行编码,而文献[7]中对测试集进行拆分,使测试集残差中确定位 1 的个数相较于原测试集得到有效降低;本文中对测试集进行排序,增强了测试集频谱主分量,则更进一步减少了测试集残差中 1 的个数。而减少 1 的个数就是减少了 0 游程的个数,这有利于 FDR 编码压缩率的提高。

5 结 论

本文提出了一种用于增强测试集频谱主分量的排序方法。该方法通过构建测试集与其频谱主分量矩阵的二分图模型和权重矩阵,把增强测试集频谱主分量的问题转化为二分图的最佳匹配问题。之后用 KM 算法求解匹配关系,并根据匹配关系调整测试集中向量顺序和更新频谱主分量矩阵。实验结果表明,排序后的测试集与其频谱主分量矩阵的最大谱系数之和提高了 19.05%,测试集残差的压缩率比排序前提高了 4.59%(FDR 编码)。本方法在有效增强频谱主分量和提高测试集残差压缩率的同时,并不需要增添额外的硬件开销,因而具有较好的应用前景。

参考文献

[1] MEHTA U S, DASGUPTA K S, EVASHRAYEE N J.

Un-length-based test data compression techniques: How far from entropy and power bounds a survey[J]. VLSI Design, 2010(1): 1-9.

[2] TOUBA N A. Survey of test vector compression techniques[J]. Design & Test of Computers, 2006, 23(4): 294-303.

[3] HSIAO T C, SETH S C. an analysis of the use of walsh spectrum in compact testing[J]. IEEE Transactions on Computers, 1984, 100(10): 934-937.

[4] GIANI A, SHENG S, HSIAO M S. Efficient spectral techniques for sequential ATPG[C]. Design, Automation & Test in Europe, 2001:204-208.

[5] YOGI N, AGRAWAL V D. BIST/test-decompressor design using combinational test spectrum[C]. Proceedings of VLSI Design and Test Symposium, IEEE, 2009:443-454.

[6] YOGI N, AGRAWAL V D. Spectral RTL test generation for gate level stuck-at faults[C]. 15th IEEE Asian Test Symposium, 2006: 83-88.

[7] KUANG J S, ZHANG L, ZHOU Y B. Improve the compression ratios for code-based test vector compressions by decomposing[C]. 20th IEEE European Test Symposium (ETS), 2015: 1-6.

[8] YOGI N. Spectral methods for testing of digital circuits[D]. Montgomery: Auburn University, 2009.

[9] DAVID B H, ZHANG J X. Techniques for constructing biorthogonal bipartite graph filter banks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2015, 63(21): 5772-5783.

- [10] TUFAN K. Revisiting KM algorithms: A linear programming approach [C]. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2015:1-6.
- [11] 程一飞, 詹文法. 长度折半的测试资源编码方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 480-486.
CHENG Y F, ZHAN W F. Test resource encoding method based on length halving[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 480-486.
- [12] 黄庆卿, 汤宝平, 邓蕾. 无线传感器网络子带能量自适应数据压缩方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 1998-2003.
HUANG Q Q, TANG B P, DENG L. Subband energy adaptive data compression method for wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9): 1998-2003.
- [13] 张伟昆. 测试性分析与评估体系的研究[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(5): 38-42.
ZHANG W K. Research on testability analysis and evaluation system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(5): 38-42.
- [14] 田芳宁. 逻辑分析仪自动测试系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 86-88.
TIAN F N. Design and realize of automatic test system of logic analyzer[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(3): 86-88.
- [15] ANSHUMAN C, KRISHNENDU C. Frequency-directed run-length(FDR) codes with application to system-on-a-chip test data compression[C]. Proceedings of the 19th IEEE VLSI Test Symposium, 2001: 42-47.
- [16] EL-MALEH A H. Test data compression for system-on-a-chip using extended frequency-directed run-length code[J]. IET Computers & Digital Techniques, 2008(2): 155-163.

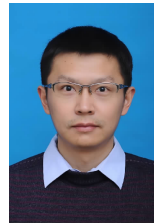
- [17] XRYSOVALANTIS K, EMMANOUIL K, DIMITRIS N. Optimal selective huffman coding for test data compression [J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 56(8): 1146-1152.

作者简介



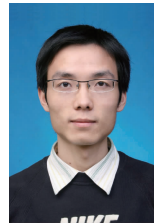
邝继顺, 1959 年出生, 博士研究生, 现为湖南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为 SOC 测试与设计。
E-mail: kjshunendaxue@163.com

Kuang Jishun was born in 1959, professor and Ph. D. supervisor in College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University. His main research field is SOC testing and design.



周颖波, 1984 年出生, 湖南大学信息科学与工程学院博士研究生, 主要研究方向为集成电路测试数据压缩。
E-mail: zhoubo@163.com

Zhou Yingbo was born in 1984, Ph. D. candidate in College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University. His main research field is IC test data compression.



蔡烁, 1982 年出生, 博士研究生、讲师, 主要研究方向为容错设计。
E-mail: caishuolunwen@163.com

Cai Shuo was born in 1982, Ph. D. candidate and Lecturer. His main research field is Fault-tolerant design.



皮霄林, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为集成电路测试数据压缩。
E-mail: pixiaolin1987@163.com

Pi Xiaolin was born in 1987, M. S. candidate. His main research field is IC test data compression.