

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003139

基于测试集主成分的变换-拆分法提高编码压缩率^{*}

张明和 夏 泽 邝继顺

(湖南大学 信息科学与工程学院 长沙 410082)

摘 要:芯片测试是防止缺陷或故障芯片流入市场的有效手段。在测试应用中,将大规模测试向量通过芯片引脚传输到片上系统。在有限芯片引脚下,测试应用时间主要取决于测试向量传输时间。编码压缩在不提供被测电路信息条件下减少测试向量传输时间,同时节约测试向量存储空间,因而被广泛应用于压缩由测试向量组成的测试集,然而编码压缩未能充分挖掘测试集特征,导致编码压缩效果不佳。针对该问题,提出一种基于测试集主成分的变换-拆分方法,使主流编码压缩效果显著。该方法首先提取能代表测试集特征的主成分,然后利用这些主成分作为向量构造出一个矩阵。该矩阵与位流经过数学中的矩阵变换即可将测试集拆分成主分量集和残差集。相比原测试集,残差集有更好的可压缩性,而主分量集可片上压缩,不占用传输时间。对 ISCAS'89 部分标准电路的实验结果表明,该方法下的最高平均压缩率达到 80.53%,与最先进的变换-拆分法相比,不同编码下的平均压缩率都有提高,且最大提高幅度为 5.27%。

关键词:测试应用时间;测试向量;编码压缩;变换-拆分

中图分类号: TP302 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3010

Improving compression ratios for code-based compressions by test set significant components based transform-decomposing method

Zhang Minghe Xia Ze Kuang Jishun

(College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Chip testing is an effective method to prevent defective or faulty chips from reaching the market. During test application, large-scale test patterns are transmitted to a system-on-chip through chip pins. Test application time mainly depends on the transmission time with the limited chip pins. Code-based compressions can reduce the transmission time with no information for the circuit under test, and save storage space for test patterns. Therefore, it is widely applied to compress the test set composed of test patterns. However, code-based compressions fail to fully exploit the characteristics of the test set, resulting in poor compression efficiency. To solve this problem, this study proposes a transform-decomposing method based on significant components of the test set, which makes the current coding compression effect significant. First, extract the significant components that best represent the characteristics of the test set, and then use them as vectors to construct a matrix. Via performing matrix transform in mathematics between the matrix and the test set, the test set can be decomposed into a primary component set (PCS) and a residual component set (RCS). Compared with the original test set, the RCS has better compressibility. As the PCS can be generated on-chip, it does not occupy the transmission time. The experimental results on ISCAS'89 benchmark circuits show that the highest compression ratio for the proposed method reaches 80.53% on average. Compared with the state-of-the-art transform-composing method, the average compression ratios for different code-based compressions are increased, and that for the most improved code-based compression is increased by 5.27%.

Keywords: test application time; test pattern; code-based compression; transform-decomposing

0 引言

随着芯片集成规模日益增大,芯片测试是防止制造过程中的缺陷或故障芯片流入客户端的重要手段。在芯片测试中,大量测试向量经芯片引脚传输到片上系统中。有限的引脚及其带宽导致传输时间被延长,传输时间已成为芯片测试应用时间缩短的瓶颈^[1-4]。测试应用时间直接与测试效率相关,同时大规模测试向量组成的测试集数据需要占用大量的硬件存储空间。存储空间及测试应用时间是影响测试成本的主要因素^[1-2,5],测试数据压缩是降低测试成本的有效途径。目前测试数据压缩方法主要分3类^[3,5-7]:基于线性解压结构的压缩方法、广播扫描的压缩方法以及基于编码的压缩方法。其中,基于编码的压缩方法将测试数据切分成各种符号,然后通过码字取代符号使形成压缩后的数据量小于原始数据量。编码压缩方法既不需要提供被测电路信息,也不需要故障模拟工具或测试产生,因此更适合集成有IP核的电路测试向量压缩^[3,5-7]。

成熟的编码压缩方法有很多。根据符号长度和码字长度是否固定或可变,可将它们分成4种形式:固定-可变、固定-固定、可变-可变以及可变-固定。前2种形式可归为固定符号长度编码,这类编码方法有Op.SHC编码^[8]、独立测试数据的字典编码^[9]等。后2种形式可归为可变符号编码,属于该类方法有Golomb编码^[10]、FDR编码^[11]、EFDR编码^[12]、ALT-FDR编码^[13]、VIHC编码^[14]、RL-Huffman编码^[15]等。其中,有些方法对高占比且高频符号的压缩非常有效,也有一些方法对含0到1或1到0跳变数少的测试向量压缩更有效。无论选择哪种编码压缩,效果差异主要取决于测试数据中的符号分布。符号分布与测试向量中的0、1以及无关位X三者之间的占比相关^[16],也与X可被0或1填充相关^[8]。此外,较近提出的编码压缩方法有BM-8C^[17]、HBMT^[5]等,但是它们与常用编码压缩方法相比,压缩效率提高并不显著,原因是测试数据具有的最大压缩率决定了编码压缩效率的提升。尽管以上编码方法有好的压缩效果,但编码压缩率的提升空间却很小。

为了进一步提高编码压缩效果,可对测试向量组成的测试集进行编码压缩前的预处理。其中,预处理方法有对扫描单元的分区^[18]或重排序^[19],也有对测试集的2D重排序,即先后执行测试集的行排序和列排序^[3,20]。它们都考虑了测试集列间的相关性,实现了相似列彼此尽量靠近,改变了测试集中的原符号分布,使平均长度较长的符号被平均长度较短的码字取代。但是这种优化符号分布的空间也是有限的,仍然不能满足当前测试数据减少的需要。于是又有新的预处理方法被提出,如针对

测试集的变换-拆分法^[4,6-7],其所谓变换是将测试集中的列或位流看作向量,并与一个矩阵相乘。通过该变换方式,位流可从矩阵中找到与之最相似的向量,相似向量按照对应位流的顺序组合成主分量集,主分量集与原测试集的差分结果可作为残差集,于是测试集可拆分成主分量集和残差集。其中,残差集比原测试集更易采用编码压缩,同时由于主分量集可采用片上压缩,所以它不占用传输时间。因此编码压缩残差集,且它的可压缩性取决于原测试集与主分量集之间的相似度。

当前用于变换与拆分的矩阵不能集中体现测试集数据的主要特征,影响进一步提高测试集与主分量集之间的相似度。本文从主分量集来源矩阵为切入点,提出了基于测试集主成分的变换-拆分方法。在测试集位流的基础上,构造出用于变换的新矩阵,实现拆分后的主分量集与原测试集之间更具有列的相似性,从而有效提高残差集的可压缩性。

1 预备知识

为了增强编码压缩方法下的测试集可压缩性,本节介绍了变换-拆分应用下的测试集处理过程,然后结合熵函数定义,阐述了拆分测试集的目的。

1.1 熵值描述

对于一个无限大小的测试集,0、1和X发生概率分别假定为 p_0 、 p_1 和 p_3 。该测试集中的符号(字符串)长度可用一个变量 s 表示, p_s 表示该长度符号发生的概率。0游程是指由连续0组成的序列,一个长度 L 的0游程可视为一个符号,根据文献[18],熵值定义可描述成下列形式:

$$\begin{aligned} E = & - \sum_{L=1}^{\infty} p_s(s=L) \times \log_2 p_s(s=L) = \\ & - \sum_{L=1}^{\infty} (p_0 + p_3)^{L-1} p_1 \times \log_2 ((p_0 + p_3)^{L-1} p_1) = \\ & - p_1 \sum_{L=1}^{\infty} (p_0 + p_3)^{L-1} \times ((L-1) \log_2 (p_0 + p_3) + \log_2 p_1) \quad (1) \end{aligned}$$

0游程长度期望值可进行如下定义:

$$M(L) = \sum_{L=1}^{\infty} L \times p_s(s=L) = \sum_{L=1}^{\infty} L \times (p_0 + p_3)^{L-1} p_1 \quad (2)$$

若用0填充X,那么0发生概率又可以写成 $p_4 = p_0 + p_3$ 。假定0游程长度期望值为 L_0 ,则式(2)又可表示成如下:

$$\begin{aligned} L_0 = & p_1 \sum_{L=1}^{\infty} L \times p_4^{L-1} = p_1 \sum_{i=0}^{\infty} (i+1) \times p_4^i = \\ & p_1 \sum_{i=0}^{\infty} i \times p_4^i + p_1 \sum_{i=0}^{\infty} p_4^i \quad (3) \end{aligned}$$

根据式(3),则式(2)又可为:

$$L_0 = p_1 \times p_4 \times \sum_{L=1}^{\infty} L \times p_4^{(L-1)} + p_1 \sum_{i=0}^{\infty} p_4^i =$$

$$p_4 \times L_0 + p_1 \sum_{i=0}^{\infty} p_4^i = p_4 \times L_0 + \frac{p_1}{1-p_4} \quad (4)$$

由式(4)可得:

$$(1-p_4)L_0 = 1 \quad (5)$$

根据等式(1)、(5)以及 $p_1 = 1 - p_4$, 熵值也可以表示为如下:

$$E = -p_1 \sum_{L=1}^{\infty} (p_4)^{L-1} \times L \times \log_2 p_4 + p_1 \sum_{L=1}^{\infty} (p_4)^{L-1} \times (\log_2 p_4 - \log_2 p_1) = -L_0 \log_2 p_4 + (\log_2 p_4 - \log_2 p_1) \times \frac{p_1}{1-p_4} =$$

$$\log_2 \left((1-p_1)^{\left(\frac{p_1-1}{p_1}\right)} \times \frac{1}{p_1} \right) \quad (6)$$

1.2 基于变换-拆分的测试集处理

变换-拆分是一种提高编码压缩率的测试集预处理方法。变换是将测试集的列或位流与一个矩阵进行乘积,其中位流看成向量,而矩阵又称为变换矩阵^[6]。于是测试集处理如图1所示,整个流程分3个阶段,测试集预处理、残差集填充与压缩、解码与扫描测试。

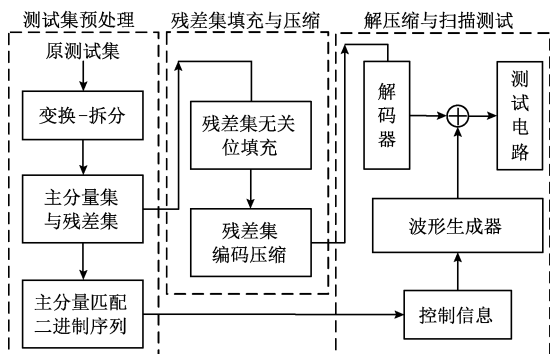


图1 测试集处理流程

Fig. 1 Test set processing flow

测试集预处理阶段:对测试集中的所有位流执行完变换与拆分后,测试集可拆分成一个由主分量组成的主分量集和一个由残分量构成的残差集^[6],其中主分量是从变换矩阵中可重复选取与位流最相似的向量。选取逻辑作为控制信息,在片上完成所有主分量压缩。

残差集填充与压缩阶段:残差集继承了原测试集中所有无关位X和部分确定位1。在相同无关位填充方式下,残差集比原测试集更易采用编码压缩。由于形成压缩后的数据需要存储于自动测试仪中,残差集作为测试期间需要传输的数据,比原测试集更有优势。

解压缩与扫描测试阶段:保存在测试仪上的数据经由测试通道传输到片上解码器后,该解码器能够解码出原残差集,同时片上波形生成器能够解压出主分量集。然后两输入的异或门能够恢复出原测试集,原测试向量连续输入被测电路,直至完成扫描测试。

1.3 拆分的目的

在对0游程进行编码压缩情况下,测试集的最大压缩率可写成如下:

$$CR_{\max} = \frac{L_0 - E}{L_0} \times 100\%$$

根据式(5)和(6),上式又可表示成:

$$CR_{\max} = [1 - \log_2((1-p_1)^{(p_1-1)} \times p_1^{-p_1})] \times 100\% \quad (7)$$

因此最大压缩率曲线如图2所示。

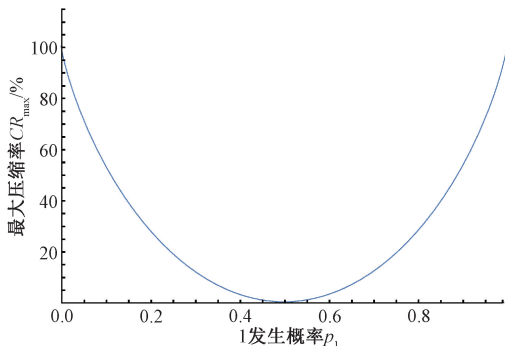


图2 0游程长度编码下的最大压缩率曲线

Fig. 2 Maximum compression ratio curve for 0 run-length codes

若对测试集中的大量X采用0填充方案^[3]填充,测试集中的0数目多于1数目。这意味0发生概率高于1发生概率,且1发生概率低于50%。变换-拆分将测试集中的部分1和全部X转移到残差集中,以至于高 p_1 的测试集转换成低 p_1 的残差集。根据式(7),残差集的最大压缩率高于原测试集,达到拆分目标。对0游程进行编码并讨论其最大压缩率趋势,归因于它代表可变符号编码。而固定符号编码效率取决于测试集的 p_0 和 p_1 之间的差异^[18]。

2 新的变换-拆分方法

对优化残差集的最大可压缩性问题,本文提出新的变换-拆分方法,并将该问题归结于变换矩阵的构造。其中构造的关键在于测试集主成分的提取,提出一个有效算法解决主成分提取。

2.1 变换与拆分

在拆分测试集之前,将每个位流进行变换。本文对变换进行重新定义如下:

$$U = \frac{1}{2^d - 1} H^T \times b \quad (8)$$

式中: H 表示变换矩阵, U 和 b 分别表示系数向量和位流。若测试集由 m 个测试向量组成,位流变换所需的变

变换矩阵大小为 $m \times (2^d - 1)$, 其中:

$$d = \lceil \log_2^m \rceil \quad (9)$$

那么变换矩阵可写成 $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_d, \dots, \mathbf{h}_{2^d-1}]$ 。与文献[4,6-7]类似,在执行变换前,变换矩阵和位流中的1,0及X分别用+1,-1和0代替。若系数向量 $(u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_{2^d-1})$ 中的最大元素是 u_i , 那么 \mathbf{H} 中的 \mathbf{h}_i 就可作为被变换位流的主分量,且相应的残分量为:

$$\mathbf{r} = \mathbf{b} \oplus \mathbf{h}_i \quad (10)$$

所有位流根据式(8)获得相应主分量,并根据式(10)确定它们的残分量,直至完成测试集的变换-拆分。

2.2 问题描述

理论上发现,测试集中1总数目越少,0游程编码的最大压缩率就越高。变换-拆分法之所以能提高编码压缩率,在于它尽可能多地将原测试集中的1转移到主分量集中,相应残差集中1的数量少于原测试集。残差集所含1的数量取决于原测试集与主分量集之间的相似度,该相似度可根据式(11)估算:

$$\mathbf{R} = m \times n - \min_{\mathbf{h}_{a_i} \in \mathbf{H}} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} \mathbf{b}_{ij} \oplus \mathbf{h}_{a_{ij}} \quad (11)$$

其中, \mathbf{b}_i 和 \mathbf{h}_{a_i} 分别表示第 i 个位流以及变换矩阵中的一个可被重复选取的向量。主分量与对应位流之间的相似度越高,残分量所含1的数量越少。根据式(11)可以推断,最大化原测试集与主分量集之间的相似度,主要取决于变换矩阵。因此优化原测试集与主分量集的相似度问题可转化为如何构造变换矩阵的问题。

2.3 变换矩阵构造

\mathbf{H} 若能集中反映出所有位流的主要特征,即所含向量与相应位流之间在数据组成上更接近,则可增强主分量集与原测试集之间的相似度。提出一种基于测试集主成分的变换矩阵构造策略。该策略先提取 d 个能够体现所有位流主要特征的向量,即测试集主成分,然后用这些主成分扩展出一些向量。主成分与扩展向量组成变换矩阵。该过程重点需要解决的问题是主成分提取。

本文用聚类思想^[21]考虑测试集主成分提取。聚类位流之前,需要对其进行分类。若 d 个位流簇组成的测试集为 $T = \{C_1, \dots, C_i, \dots, C_d\}$, 其中第 i 簇 C_i 的主成分定义为 \mathbf{b}_{c_i} , 它的主成分与它所含位流的差异衡量定义如下:

$$S_i = \sum_{\mathbf{b}_x \in C_i} (\mathbf{b}_{c_i} - \mathbf{b}_x)^2 \quad (12)$$

其中, \mathbf{b}_x 属于第 i 簇内的任意位流。位流聚类需要实现簇内位流之间差异小,且簇间位流差异大。不妨将该问题转化为求解所有簇的差异衡量之和 S 的最小值问题,当且仅当满足如下条件:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial} S^2 &= \frac{\partial}{\partial \mathbf{b}_{c_i}} \sum_{i=1}^d \sum_{\mathbf{b}_x \in C_i} (\mathbf{b}_{c_i} - \mathbf{b}_x)^2 = \\ \sum_{i=1}^d \sum_{\mathbf{b}_x \in C_i} \frac{\partial}{\partial \mathbf{b}_{c_i}} (\mathbf{b}_{c_i} - \mathbf{b}_x)^2 &= \sum_{\mathbf{b}_x \in C_i} 2(\mathbf{b}_{c_i} - \mathbf{b}_x) = 0 \end{aligned}$$

即:

$$\mathbf{b}_{c_i} = \frac{1}{e_i} \sum_{\mathbf{b}_x \in C_i} \mathbf{b}_x \quad (13)$$

其中, e_i 为第 i 个簇内的位流数量。从式(13)可观察到,簇内位流的平均即为该簇主成分,它在最大程度上代表了簇内位流的数据特征。

为了完成测试集主成分提取,提出了针对不同位流簇的差异衡量全局最小化算法,具体如算法1所示。

Algorithm 1: The SCEBC algorithm

Input: a test set $T_x = \{\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_n\}$

Output: $\mathbf{b}'_c = \{\mathbf{b}'_{c_1}, \mathbf{b}'_{c_2}, \dots, \mathbf{b}'_{c_d}\}$

1. $T_0 = \{\mathbf{b}'_1, \mathbf{b}'_2, \dots, \mathbf{b}'_n\} \leftarrow \text{FillingWith}_0(T_x)$
2. $\mathbf{b}_c = \{\mathbf{b}_{c_1}, \mathbf{b}_{c_2}, \dots, \mathbf{b}_{c_d}\} \leftarrow 0$
3. $\mathbf{b}_{c_1} \leftarrow \mathbf{b}_1$
4. **for** $i=2$ to d **do**
5. **for** $j=1$ to n **do**
6. $w_j = \min_{1 \leq q < i} (\mathbf{b}_{c_q} - \mathbf{b}_j)^2$
7. **end for**
8. $w_k \leftarrow \max\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$
9. $\mathbf{b}_{c_i} \leftarrow \mathbf{b}_k$
10. **end for**
11. $S_{init} \leftarrow -1$
12. $T_{01} = \{C_1, C_2, \dots, C_d\} \leftarrow \text{ClassToCluster}(T_0, \mathbf{b}_c)$
13. $S_{updt} \leftarrow \text{DifferentSum}(T_{01}, \mathbf{b}_c)$
14. **while** $(S_{updt} - S_{init} \geq 0.5)$ **do**
15. $\mathbf{b}'_c \leftarrow \text{UpdtClusterCentre}(\mathbf{b}_c)$
16. $T_{02} = \{C'_1, C'_2, \dots, C'_d\} \leftarrow \text{ClassToCluster}(T_0, \mathbf{b}'_c)$
17. $S_{init} \leftarrow \text{DifferentSum}(T_{02}, \mathbf{b}_c)$
18. **end while**
19. **return** $\mathbf{b}'_c = \{\mathbf{b}'_{c_1}, \mathbf{b}'_{c_2}, \dots, \mathbf{b}'_{c_d}\}$

该算法的核心思想是通过迭代地聚类和分类所有位流,求解出能集中体现测试集主要特征的主成分。该算法的核心细节解释如下:

1) 第1行根据0填充方案填充所有位流中的无关位X。第2~3行初始化 d 个主成分,并且将测试集第1列已填充位流作为第1个主成分。

2) 第4~10行通过每1个位流与 d 个主成分的欧氏距离更新所有主成分。

3) 以 d 个主成分为基础,第12行将全部位流重新分成不同的位流簇。根据式(12),第13行计算出所有簇的

差异衡量之和。

4) 第 15 行根据式 (13) 改变主成分, 然后第 16 行重新分类所有位流。第 14~18 行在差异衡量之和不增加条件下完成迭代过程。第 19 行获得期望的主成分。

应用算法 1, 可获得代表测试集主要特征的主成分。它们可作为变换矩阵中的 d 个向量, 然后进行不同的组合, 每种组合通过异或关系扩展出变换矩阵中的其他向量, 于是变换矩阵被构造如下形式:

$$H = [b_{c_1}, b_{c_2}, \dots, b_{c_d}, b_{c_1} \oplus b_{c_2}, \dots, b_{c_1} \oplus b_{c_2} \oplus \dots \oplus b_{c_d}]$$

(14)

2.4 测试向量解压

在变换-拆分基础上, 本文设计出如图 3 所示的解压缩架构。它主要由解码器和生成器两部分组成, 其中解码器主要针对编码压缩后的数据, 框图所示的生成器是一种波形产生器。该生成器主要由 d 个二输入与门、 2^d 个异或门构成的异或网络以及用于存储主成分的 RAM 模块。为了满足低硬件解压开销需要, 整个解压缩结构设计成一种针对单扫描链的串行合成输出。

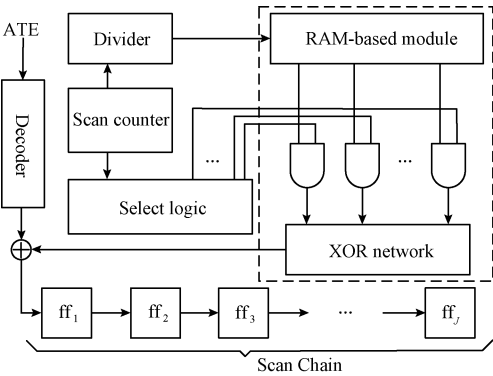


图 3 解压缩架构
Fig. 3 Decompression architecture

测试向量恢复过程: 编码压缩数据从 ATE 中传输到片上系统后, 经解码器输出残差集数据。同时, 基于 RAM 的模块在分频器提供时钟信号下输出由主成分构成的数据集的一行, 行的内部位组合需要在选择逻辑、计数器和 d 个与门电路下完成。其中模块每输出一次, 组合需要进行 n 次。组合数据经过异或网络输出主分量集, 它与残差集经过一个异或门恢复出用于扫描测试的向量。

3 实验结果与分析

为了验证所提方法下的编码压缩效果, 本文以 Mintest 故障测试集为对象, 分别对 ISCAS' 89 标准电路中最大的几个时序电路进行了实验。

本文将测试集拆分成残差集, 然后采用不同编码方法压缩残差集。压缩结果如表 1 所示, 其中第 1 列为测试集电路, 其他列分别为不同主流编码方法下的压缩效果, 最后一行为每一种编码压缩方法下的平均压缩率。

表 2 不仅给出本文方法应用前与应用后在平均压缩率方面的比较, 而且给出本文方法与目前其它变换-拆分方法在平均压缩率方面的比较。其中第 2 列为直接编码压缩原测试集, 第 3 列为基于沃尔斯哈德玛的变换-拆分 (WHT)^[6], 第 4 列为基于伪随机的变换-拆分 (PRTD)^[7], 最后一列为本文提出的基于测试集主成分的变换-拆分方法, 且平均压缩率从表 1 中获得。以上这些方法都选用相同测试集以及采用相同编码压缩方法, 涉及变换矩阵大小都参考式 (9)。

表 1 本方法下的编码压缩率
Table 1 Compression ratios for code-based schemes with our proposed method (%)

电路名称	Golomb	VIHC	FDR	EFDR	ALT-FDR	RL-Huff.	Op. SHC
S5378	68.5	72.81	70.76	67.76	65.17	68.59	68.42
S9234	72	73.25	69.59	66.14	62.72	67.07	70
S13207	89.9	94.2	92.29	91.6	90.88	92.82	87.87
S15850	84.76	84.76	87.47	83.34	81.66	84.34	82.66
S38417	76.34	79.73	77.36	75.9	73.34	76.17	75.98
S38584	76.53	78.42	76.09	73.6	70.82	73.7	74.38
平均	78.01	80.53	78.93	76.39	74.10	77.12	76.55

表 2 本方法下的编码压缩效果与其他方法的比较
Table 2 Comparison of the compression effect of the proposed method with other methods (%)

编码压缩方法	Original ^[6] 平均压缩率	WHT ^[6] 平均压缩率	PRTD ^[7] 平均压缩率	本方法 平均压缩率
Golomb	51.74	74.24	74.76	78.01
VIHC	61.02	77.89	78.08	80.53
FDR	57.23	75.41	75.42	78.93
EFDR	63.3	73.30	73.27	76.39
ALT-FDR	60.58	70.06	69.86	74.10
RL-Huff.	62.96	71.85	71.64	77.12
Op. SHC	68.52	75.72	75.69	76.55

从表 2 可以看出, 与直接采用编码压缩相比, 本方法下的电路测试集的平均压缩率都有显著提高, 其中平均压缩率提高最多的是 Golomb 编码的 26.27%, 提高最少的是 Op. SHC 编码的 8.03%。这表明本文方法在改变符号分布以及数据组成上都是有效的。同时, 与目前其他变换-拆分方法对比, 除了 RL-Huff. 编码的平均压缩率分别比在 WHT 和 PRTD 方法下提高了 5.27% 和 5.48%, 其他编码方法的平均压缩率也都有提高。这也表明本方法优于 WHT 方法和 PRTD 方法, 且进一步验证了本方法的有效性。

在基于主成分的变换-拆分中, 需要提取 d 个测试集

的主成分,其中 d 值越大意味着变换矩阵越大,即矩阵包含越多的向量。本文还尝试不同 d 值下的测试集变换与拆分, d 值按从小到大排列如表 3 所示,每一列的 d 值表示测试集主成分提取个数,同时代表了在该主成分数量上的一次变换-拆分。表 3 所使用测试集与表 1、2 相同,不同编码压缩方法的平均压缩率求解方式与表 1 相同。

表 3 不同 d 值下的编码压缩效果

Table 3 Compression effect for code-based schemes with different d values

编码压缩方法	平均压缩率/%				
	$d=7$	$d=8$	$d=9$	$d=10$	$d=11$
Golomb	76.76	77.87	78.64	79.64	80.66
VIHC	79.95	80.89	81.42	82.45	83.43
FDR	77.35	78.34	78.78	79.83	80.86
EFDR	75.18	76.25	76.76	77.89	79.05
ALT-FDR	72.75	73.93	74.58	75.73	76.96
RL-Huff.	75.79	77.07	77.45	78.7	79.83
Op. SHC	75.47	76.46	77.03	78.04	78.95

从表 3 可以观察出,随着 d 值增大,编码压缩方法的平均压缩率也逐渐增大。这表明随着测试集主成分提出数量的增多,从变换矩阵中选择的向量在数据组成上更接近于变换位流,可获得测试集与主分量集的相似度更高,相应的残差集更具有基于编码的可压缩性。这也再次证明本文方法的有效性。

4 结 论

为了提高测试集数据的编码压缩率,本文提出一种基于测试集主成分的变换-拆分方法。该方法提取最能代表测试集主要特征的主成分作为向量,然后在这些向量基础上构造出变换矩阵,并且利用该矩阵与测试集进行数学上的矩阵相乘,即矩阵变换,依据变换结果将测试集拆分成一个残差集和一个主分量集。与原测试集相比,残差集更易采用编码压缩方法进行数据压缩,而主分量集可片上压缩,不影响测试应用时间。本文所提变换-拆分法提升了常用编码压缩方法的压缩效果,具有很好的应用前景。

参考文献

[1] HUHN S, TILLE D, DRECHSLER R. Hybrid architecture for embedded test compression to process rejected test patterns [C]. European Test Symposium (ETS) 2019 IEEE Europe, 2019: 1-2.

[2] ROOBAN S, MANIMEGALAI R. Prediction of theoretical limit for test data compression [C]. International Conference on Recent Trends in Advance

Computing (ICRTAC), 2018: 41-46.

[3] YUAN H Y, GUO K, SUN X, et al. A power efficient BIST TPG method on don't care bit based 2-D adjusting and hamming distance based 2-D reordering [J]. Journal of Electronic Testing, 2015, 31(1):43-52.

[4] ZHOU Y B, KUANG J S. A sort method to enhance significant spectral components of test set [C]. 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD), 2016:2147-2151.

[5] VOHRA H, SINGH A. Test data compression using hierarchical block merging technique [J]. IET Computers and Digital Techniques, 2018, 12 (4): 175-185.

[6] KUANG J S, ZHANG L, YOU Z Q, et al. Improve the compression ratios for code-based test vector compressions by decomposing [C]. European Test Symposium (ETS), 2015:1-6.

[7] ZHANG M H, KUANG J S, HUANG J, et al. A pseudo-random transform decomposition method for improving the code compression ratio of test data [C]. 21st International Conference on High Performance Computing and Communications; 17th International Conference on Smart City; 5th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS), 2019:1611-1618.

[8] 欧阳一鸣,刘军,梁华国,等. 基于位跳变相容的多扫描链压缩方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(7): 654-660.

OUYANG Y M, LIU J, LIANG H G, et al. Multiple scan chains compression method based on bit-transition compatibility [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(7): 654-660.

[9] 吴海峰,詹文法,程一飞. 独立于测试数据的字典编码方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 638-644.

WU H F, ZHAN W F, CHENG Y F. Dictionary encoding method based on independent of test data [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(4): 638-644.

[10] 欧阳一鸣,黄贵林,梁华国,等. 利用少数相关位的 SoC 测试数据压缩方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(1): 76-82.

OUYANG Y M, HUANG G L, LIANG H G, et al. Test data compression of system-on-chip (SoC) using few relevant bits [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(1): 76-82.

[11] 邝继顺,周颖波,蔡烁,等. 一种用于测试数据压缩的改进型 EFDR 编码方法 [J]. 电子测量与仪器学报,

- 2015, 29(10): 1464-1471.
- KUANG J SH, ZHOU Y B, CAI SH, et al. Improved EFDR code method for test data compression [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(10): 1464-1471.
- [12] 邝继顺, 周颖波, 蔡烁. 一种用于测试数据压缩的自适应 EFDR 编码方法 [J]. 电子与信息学报, 2015, 37(10): 2529-2535.
- KUANG J SH, ZHOU Y B, CAI SH. Adaptive EFDR coding method for test data compression [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2015, 37(10): 2529-2535.
- [13] 詹文法, 梁华国, 程一飞, 等. 利用整数存储无理数的测试数据编码压缩方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(9): 1605-1612.
- ZHAN W F, LIANG H G, CHENG Y F, et al. Test data compression coding-based scheme storing integers represented for irrational numbers [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2016, 28(9): 1605-1612.
- [14] 梁华国, 蒋翠云, 罗强. 应用对称编码的测试数据压缩解压方法 [J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(12): 2391-2399.
- LIANG H G, JIANG C Y, LUO Q. Test data compression and decompression using symmetry-variable codes [J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(12): 2391-2399.
- [15] TSENG W D, LEE L J. Test data compression using multi-dimensional pattern run-length codes [J]. Journal of Electronic Testing, 2010, 26(3): 393-400.
- [16] 詹文法, 赵士钰. 最大近似相容的分组测试向量相容压缩方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1933-1940.
- ZHAN W F, ZHAO SH Y. Compatible compression method for a maximum of approximately compatible grouping test vectors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12): 1933-1940.
- [17] WU T B, LIU H Z, LIU P X. Efficient test compression technique for SoC based on block merging and eight coding [J]. Journal of Electronic Testing, 2013, 29(6): 849-859.
- [18] WANG S J, LI K S M, CHEN S C, et al. Scan-chain partition for high test data compressibility and low shift power under routing constraint [J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2009, 28(5): 716-727.
- [19] ZHANG L, KUANG J S, YOU Z Q. Virtual scan chains reordering using a RAM-based module for high test compression [J]. Microelectronics Journal, 2012, 43: 869-872.
- [20] MEHTA U S, DEVASHRAYEE N M, DASGUPTA K S. Hamming distance based 2-D reordering with power efficient don't care bit filling: optimizing the test data compression method [C]. International Symposium on System on Chip, 2010: 1-7.
- [21] 韦海成, 王生营, 许亚杰, 等. 样本熵融合聚类算法的森林火灾图像识别研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 171-177.
- WEI H CH, WANG SH Y, XU Y J, et al. Forest fire image recognition algorithm of sample entropy fusion and clustering [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 171-177.

作者简介



张明和, 现为湖南大学博士研究生, 主要方向为集成电路测试数据压缩。

E-mail: mhezhang@hotmail.com

Zhang Minghe is a Ph. D. candidate at Hunan University. His main research interests include IC test data compression.

夏泽, 硕士研究生, 主要研究方向为集成电路测试数据压缩。

E-mail: summer_xiaze@foxmail.com

Xia Ze, M. Sc. candidate. His main research interests include IC test data compression.

邝继顺, 博士, 湖南大学教授, 博士生导师, 主要方向为 SOC 测试与设计。

E-mail: jshkuang@hotmail.com

Kuang Jishun, Ph. D. degree, now is a professor and Ph. D. supervisor at Hunan University. His main research interests include

SOC testing and design.

