

# 针对可观测性语句覆盖准则的 RTL 激励生成

鲁 巍<sup>1,2</sup> 吕 涛<sup>1,2</sup> 杨修涛<sup>1,2</sup> 李晓维<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(中国科学院计算技术研究所信息网络研究室 北京 100080)

<sup>2</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

(luwei@ict.ac.cn)

## An RT-Level Vector Generation Method for Observability-Based Statement Coverage

Lu Wei<sup>1,2</sup>, Lü Tao<sup>1,2</sup>, Yang Xiutao<sup>1,2</sup>, and Li Xiaowei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Information Network Laboratory, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

<sup>2</sup>(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** Traditional statement coverage metric based on the activation of statements, without taking observability into account, can result in an artificially high reading of coverage and a false sense of confidence. So the observability-based statement coverage metric is proposed. This metric computes observability information to determine whether the effects of errors activated by the program stimuli can be observed. With the density and complexity of circuits extended, this metric plays a more and more important role during verification. Introduced in this paper is a method of vector generation for the observability-based statement coverage metric. The contribution of the work includes two aspects. Firstly, precise and concise abstract representations are presented from HDL descriptions to model observability information. Secondly, a novel simulation-based algorithm is presented to generate vectors for the observability-based statement coverage. During this procedure, the proposed algorithm always tries to cover all unobserved statements, and reduce unnecessary backtracking, so it is efficient. Finally, the method proposed has been implemented as a prototype tool for VHDL designs, and the results on benchmarks show the significant benefits.

**Key words** observability-based statement coverage; vector generation; simulation

**摘 要** 传统的语句覆盖准则只考虑语句的可控制性,忽略其可观测性,这可能导致表面上很高的覆盖率数据所蕴含的可信度不高.鉴于此,可观测性覆盖评估准则被提了出来.随着设计规模不断加大,该准则变得越来越重要.首先提出一种可观测性信息的表征方式以及可观测性判定规则,在此基础上,提出一种针对可观测性语句覆盖准则的 RTL 激励生成方法.这是一种基于模拟的方法,它以所有未观测语句的分布作为启发式信息,指导激励生成.实验结果显示,提出的方法是高效的.

**关键词** 可观测性语句覆盖准则;激励生成;模拟

中图法分类号 TP302

## 1 引言

针对大规模集成电路设计,模拟是最重要的验证方法.在模拟验证中,为了量化地度量激励集的完备性,人们引入覆盖评估准则.覆盖评估准则可分为两大类:一类是从行为的角度来度量<sup>[1~3]</sup>,主要包括代码覆盖准则、电路结构覆盖准则、有限状态机覆盖准则等.另一类覆盖准则是从设计错误的角度来度量,其关键在于错误模型的建立<sup>[4,5]</sup>.

可观测性覆盖准则是一种从行为角度对模拟激励集进行评估的准则,是对传统覆盖准则的增强.传统的覆盖准则只考虑代码的可控制性,忽略其可观测性,即这些准则保证了代码会执行,但其执行错误并不一定可以反映到验证者所选定的观测点上.这可能导致表面上很高的覆盖率数据所蕴含的可信度不高.本文首先对可观测性信息进行抽象和组织,在此基础上,提出针对可观测性语句覆盖准则的激励生成方法.

## 2 相关工作

### 2.1 可观测性覆盖准则

在模拟验证中,硬件设计是在软件模拟器上运行的,在各时刻的变量取值实际上是可知的.但随着设计规模扩大,了解设计中所有变量的正确行为,其数据量之大,对于验证工程师来说几乎是不现实的.所以,在模拟验证中考虑可观测性就非常必要了.鉴于此,可观测性覆盖评估准则被提了出来<sup>[6]</sup>,它通过对可观测性信息的分析与评估来确定在激励作用下,设计错误是否可以反映到观测点上.文献[7]提出了一种计算可观测性代码覆盖率的有效方法,比文献[6]中的方法在计算效率上有大幅提高.文献[8]采用线性规划与布尔可满足性的方法,针对可观测性语句覆盖准则提出一种激励生成方法.文献[9]提出一种基于 FUD 链的可观测性信息表征方式,在此基础上提出了一种可观测性代码评估算法.文献[10]针对可观测性信息,提出 3 种近似模型并在基于遗传算法的激励生成系统中,采用了该模型.

### 2.2 RTL 描述的抽象

寄存器传输级(RTL)描述是目前应用最广泛的电路设计描述形式.文献[11]采用进程控制树(PCT)、数据流向图(DDG)以及定义行为图(DBG)

抽象 RTL 描述.其中 PCT 反映进程的控制结构,DDG 反映数据之间的流动关系,DBG 体现控制流与数据流的结合关系.

## 3 可观测性信息模型

### 3.1 可观测性相关概念

定义 1. 被设计验证者选来观察程序行为的变量,称为观测点,其他变量称为非观测点.

定义 2. 针对一个变量,如果它本身是观测点,或者它的取值可以传播到,或者说可以影响到观测点的取值,那么我们说这个变量是可以被观测的,其他的变量我们称之为不可观测的.

定义 3. 针对一条赋值语句,如果其执行错误可以传播到,或者说可以影响到观测点的取值,那么我们说这条语句是可以被观测的,其他的赋值语句我们称之为不可被观测的.

### 3.2 增强型进程控制树与数据流向图

为表征可观测性信息,我们对 PCT 进行扩充,提出增强型进程控制树(EPCT).简单而言,EPCT 就是在 PCT 的每一个节点中,增加 4 个域,用来表征可观测性信息.它们是:

*tag*, 可观测性标签,其只针对于赋值语句,在执行过程中,认为只有 *tag* = 1 的语句,其执行错误,才可以反映到设计者所选定的观测点上;

*active*, 执行标记,其只针对于赋值语句,用来标记在某一帧的执行过程中,该语句是否被执行到;

*t\_max*, 针对条件分支语句,记录 then 分支下未观测到语句的数目;

*e\_max*, 针对条件分支语句,记录 else 分支下未观测到语句的数目;

EPCT 有如下的递归表示形式:

$$EPCT = C, EPCT_{then}, EPCT_{else}, EPCT_{next};$$

其中, *C* 表示当前语句.一段 VHDL 代码与对应的 EPCT, DDG 如图 1 所示.

### 3.3 控制链(CC)

定义 4. 我们把 RTL 代码中对变量的一次赋值,叫做一次数据迁移,每个数据迁移在 DDG 中都有其对应的边.

定义 5. 在 DDG 中,针对一个变量,可能有多条指向该变量的边,但在某一时间帧,这些边所表示的赋值关系中,最多只有一个执行的,我们将该数据迁移称为活动的数据迁移,其他数据迁移,称为非活动的数据迁移.

定义 6. 在时间帧  $t$  ,针对 RTL 设计中的某一变量  $v$  ,所有对其产生影响的赋值关系所形成的活动的数据迁移的集合 ,称为变量  $v$  在时间帧  $t$  的控制链 ,表示为  $CC(v, t)$  .

如图 2 所示 ,在时间帧  $t$  ,假设(  $rst \neq 1$  ) ,则  $\{T_1, T_2\}$  为非活动的数据迁移( 即在该时间帧 ,语句

( 1 )( 2 )未执行 ) ,  $\{T_3, T_4, T_{5\_l}, T_{5\_r}, T_6, T_7, T_8\}$  为活动的数据迁移( 即在该时间帧 ,语句( 3 )~( 8 )被执行 ) . 假设观测点为  $\{O_1, O_2\}$  , 则  $CC(buf3, t) = \{T_3, T_4, T_{5\_l}, T_{5\_r}\}$  . 需要注意的是针对 RTL 代码中的非阻塞性赋值 ,其控制链涉及前一帧的值( 如图 中 2 中的  $T_6$  ) .

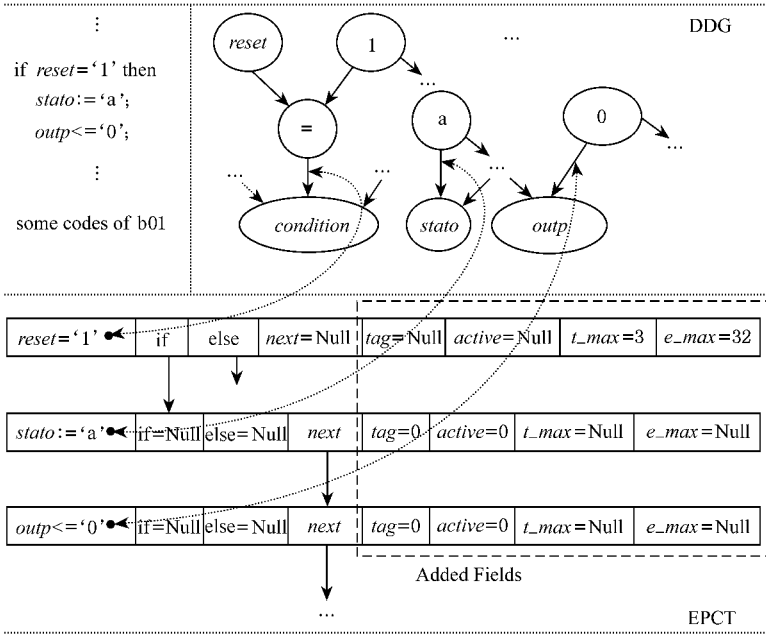


Fig. 1 VHDL codes and the corresponding EPCT & DDG.  
图 1 VHDL 代码与对应的 EPCT 与 DDG

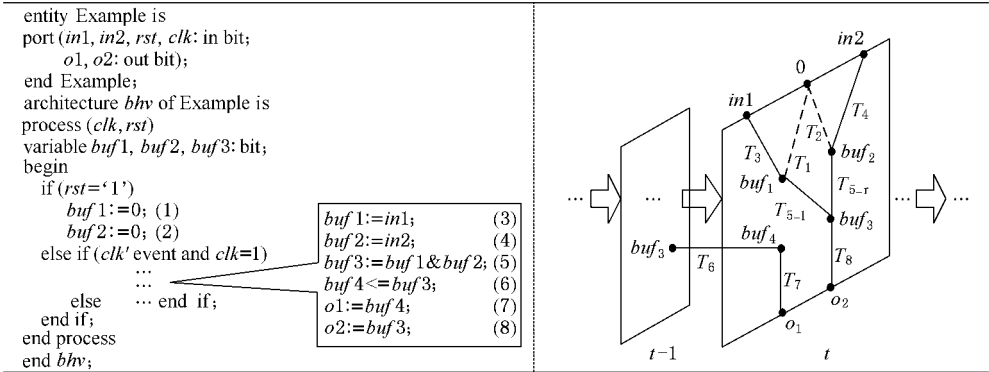


Fig. 2 VHDL codes and control Chains.  
图 2 VHDL 代码与对应的控制链

3.4 可观测变量表

定义 7. 在任一时间帧  $t$  ,由所有在该时间帧可以被观测到的变量所形成的链表叫做该时间帧的可观测变量表 ,表示为  $ovl(t)$  .

下面给出两条规则 ,用来判断在某一时间帧语句以及变量的可观测性.

规则 1. 在时间帧  $t$  ,设一条单元赋值语句  $F$  具

有如下形式 : $y = f(x)$  ,如果  $y \in ovl(t)$  ,我们称语句  $F$  在时间帧  $t$  是可以被观测的 ;如果该语句为阻塞性赋值语句 ,我们称变量  $x$  在时间帧  $t$  是可以被观测的 ,并将  $x$  加入  $ovl(t)$  ;如果该语句为非阻塞性赋值语句 ,我们称变量  $x$  在时间帧  $t - 1$  是可以被观测的 ,并将  $x$  加入  $ovl(t - 1)$  .

规则 2. 在时间帧  $t$  ,设一条多元赋值语句  $F$  具

有如下形式:  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 如果

① 存在  $x_m \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ;

②  $y \in \text{ovl}(t)$ ;

③ 语句  $F$  可表示为  $y = x_m \Delta f_1(x_1, x_2, \dots, x_{m-1}, x_{m+1}, \dots, x_n)$ , 其中  $\Delta$  代表任意二元操作;

④ 在时间帧  $t$ ,  $f_1(x_1, x_2, \dots, x_{m-1}, x_{m+1}, \dots, x_n)$  取非控制值。

我们称语句  $F$  在时间帧  $t$  是可以被观测的, 如果该语句为阻塞性赋值语句, 我们称变量  $x_m$  在时间帧  $t$  是可以被观测的, 并将  $x_m$  加入  $\text{ovl}(t)$ ; 如果该语句为非阻塞性赋值语句, 我们称变量  $x_m$  在时间帧  $t-1$  是可以被观测的, 并将  $x_m$  加入  $\text{ovl}(t-1)$ 。

如果一条赋值语句存在错误, 则其错误的取值, 将决定该错误是否可以传播到赋值目标。本文采用文献[6]中的假设: 假设所有赋值语句的错误, 其取值可以传播到赋值目标。在该条件下, 我们可以采用规则1与规则2来判断语句以及变量的可观测性。

## 4 算法实现

下面介绍一种针对具有复位功能的同步时序电路的, 基于可观测性语句覆盖准则的 RTL 激励生成方法。

### 4.1 整体框架

该方法整体框架包括4个阶段:

阶段1. 结构建立, 在该阶段生成 EPCT 与 DDG, 并将系统复位, 令  $S_0 = \text{reset}$ ,  $t = 0$ ,  $T = \emptyset$ ; 其中  $S_0$  表示初始状态,  $t$  为时间帧标志,  $T$  为模拟激励集;

阶段2. 帧内初始化, 对于条件分支语句, 计算  $t\_max$  与  $e\_max$ ; 并初始化当前帧的可观测变量表  $\text{ovl}(t)$ , 将验证者所选定的观测点加入其中;

阶段3. 产生与评估, 根据当前状态  $S_t$ , 以可观测性语句覆盖率为驱动的请求响应, 得到输入激励  $I_t$ , 并将该输入加入到模拟激励集  $T$ ; 在已有的时间帧序列上, 进行覆盖评估;

阶段4. 结束判断, 如果算法继续, 则以阶段3所得到的  $I_t$  为输入, 进行时间帧扩展, 并转到阶段2; 否则算法结束,  $T$  为最终产生的模拟激励集。

### 4.2 激励生成算法

这是一种基于模拟的, 以未观测语句的分布为驱动的激励生成算法。在模拟的开始阶段, 不指定模拟激励的值, 其输入的所有位均置为  $X$ 。当执行

到一条语句时, 对其类型进行判断。如果遇到赋值语句, 则执行赋值操作。如果遇到条件分支语句, 则判断不同分支下未观测语句的分布情况, 进而决定该算法下一步的执行方向。(编译后的 EPCT 与 DDG 中, 只有这两类语句。其他的语句, 如循环语句已被展开, case 语句已被转换为 if-else 语句<sup>[11]</sup>。)

假设  $EPCT_{\text{then}}$  分支下未观测到的语句的数目 ( $t\_max$ ) 大于  $EPCT_{\text{else}}$  分支下未观测到的语句的数目 ( $e\_max$ ), 我们认为沿  $EPCT_{\text{then}}$  分支执行, 很可能会覆盖到更多的未观测语句。这时, 我们提出沿该分支执行的请求, 进行请求响应处理。在请求响应过程中, 指定部分或全部输入位的值, 即对输入位的值进行填充。激励生成算法描述如图3所示。

```

Engine( EPCT ) /* EPCT = C, EPCTthen, EPCTelse, EPCTnext */
① {
② if ( EPCT == ∅ ) return ;
③ if ( C is an assignment ) Execute the assignment and C.active = 1 ;
④ else {
⑤   if ( C.t_max > C.e_max )
⑥     { temp = Request( t, c, v ) / * t : time frame ; c : request node ;
        v : request value ; [11] * /
⑦     if ( temp == v ) Engine ( EPCTthen );
⑧     else Engine ( EPCTelse ); }
⑨   else
⑩     { temp = Request( t, c, v ) / * t : time frame ; c : request node ;
        v : request value ; [11] * /
⑪     if ( temp == v ) Engine ( EPCTelse );
⑫     else Engine ( EPCTthen ); }
⑬ }
⑭ Engine ( EPCTnext );
⑮ }

```

Fig. 3 Vector generation algorithm.

图3 激励生成算法

该算法中, 涉及一个请求响应过程。当算法试图沿着一条选择分支执行时, 将对某些变量提出值的请求。该请求响应过程是沿该变量控制链回退并将响应值返回的过程, 其操作如下:

① 当对一个输入进行请求, 如果该输入的值尚未确定, 则将请求值赋给该输入, 并将该请求值返回; 如果该输入的值已确定, 则将该确定值返回;

② 当对一个中间变量进行请求, 则沿控制链找到对其赋值的变量, 进行请求递归;

③ 当对其他二元操作进行请求, 则进行请求的分配。

对于经过以上操作, 没有被赋值的输入位, 指派一个随机值。这样, 在每一时间帧, 产生一个模拟激励。

4.3 覆盖分析算法

在每一时间帧,激励生成以后,要进行可观测性语句分布的再计算.这一方面可以统计在目前的模拟激励集的作用下,有多少语句的执行错误是可以被观测的,另一方面还可以指导后续激励的产生.覆盖分析的过程是一个沿控制链回退,刷新 *tag* 标签的过程.在时间帧  $t$ ,产生激励  $I_t$  以后,在  $I_t$  的作用下,得到输出.这时沿所有观测点的控制链回退,应用规则 1 与规则 2(见第 3.4 节),来判断在当前激励的作用下,哪些语句是可观测的.

5 实验结果及分析

遵循上文介绍的方法,我们实现了原型系统 Obv-ATPG. 本文采用 ITC99 基准电路作为实验对象.表 1 列出了电路基本特征以及实验结果.其中 # *Line*, # *Gates*, # *OdPs*, *Cons\_time*, *Run\_time*, # *Vector*, *SC*, *OESC* 分别代表设计的行数、对应逻辑门数目、观测点数目、数据结构建立时间、激励生

成时间、生成激励数目、语句覆盖率以及可观测性语句覆盖率.该系统运行在 P IV 1.7GHz,256MB RAM 的 PC 上.

文献 [8] 介绍了一种采用线性规划与布尔满足性方法来完成基于可观测性语句覆盖准则的激励生成方法.其实验结果如表 2 所示.其中 # *Lines*, # *Vector*, *OESC* 分别代表设计的行数、生成激励数目以及可观测性语句覆盖率. *CPU\_Time* 中的不同栏表示在算法的实现过程中,采用不同的子句顺序,所消耗的不同的时间.文献 [8] 中的系统运行在 256MB RAM 的 Sun Ultra 30/300 上.

通过表 1 与表 2 的对比可以看出,虽然两个系统的实验电路与运行环境不同,但 Obv-ATPG 的平均可观测性语句覆盖率为 93.78%,而文献 [8] 中的平均可观测性语句覆盖率为 68.83%,同时针对同等规模的电路,Obv-ATPG 的运行时间比文献 [8] 中的运行时间大大降低,所以可以说本文介绍的方法是高效的.

Table 1 Characteristics of Benchmarks and Experimental Results  
表 1 电路特性与实验结果

Circuit	# Lines	# Gates	# OdPs	Cons_time( s )	Run_time( s )	# Vector	SC( % )	OESC( % )
b01	110	46	3	0.03	0.03	17	100	100
b02	70	28	2	0.01	0.007	13	100	100
b03	141	149	5	0.03	0.02	83	100	91.07
b04	102	597	6	0.02	0.04	12	100	90
b06	128	60	5	0.03	0.01	14	100	94
b10	167	189	7	0.03	0.01	13	95.95	86.49
b11	118	481	3	0.03	0.05	141	100	94.87
Average	119	221	4	0.026	0.024	42	99.42	93.78

Table 2 Experimental Results of Reference[ 8 ]  
表 2 文献 [8] 中的实验结果

Circuit	# Lines	# Vector	OESC( % )	CPU_Time( s )			
				Random	Topological	Depth-first	Topological and depth-first
FIFOctrl	146	15	84	160	159	218	160
DMActrl	443	19	16	188	142	149	143
Port	73	13	100	1	1	1.1	1.1
Counter	100	10	59	3	2.9	3.2	3
Arbiter	180	54	100	216	114	190	113
Crd	191	21	54	486	408	490	444
Average	189	22	68.83	175.7	137.8	175.2	144

本文介绍的方法不是针对某个未观测的语句来产生模拟激励,而是将所有未观测的语句看成一个整体,争取一次覆盖尽量多的未观测语句,同时本文采用的数据模型简洁合理,所以它有很高的执行效率.

## 6 结 论

本文首先为可观测性信息建模,在此基础上,提出了一种针对可观测性语句覆盖准则的激励生成方法,并实现了原型系统.该方法以未观测语句的分布为启发式信息,产生模拟激励,并在每一时间帧沿控制链回退,进行未观测语句分布的再计算,指导后续激励的产生.实验结果显示,本文介绍的方法是有效的.

## 参 考 文 献

- X. J. Ma. Code coverage analysis for behavioral Verilog models: [Master dissertation], Illinois: University of Illinois, Urbana-Champaign, 2000
- Serdar Tasiran, Kurt Keutzer. Coverage metrics for functional validation of hardware designs. *IEEE Design and Test of Computers*, 2001, 18(4): 36~45
- J. Shen, J. A. Abraham. An RTL abstraction technique for processor microarchitecture validation and test generation. *Journal of Electronic Testing: Theory and Application*, 2000, 16(1/2): 67~81
- H. AL-Asaad, J. P. Hayes. Design verification via simulation and automatic test pattern generation. In: *Proc. Int'l Conf. Computer-Aided Design*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1995. 174~180
- D. V. Campenhout, H. Al-Asaad, J. P. Hayes, *et al.* High-level design verification of microprocessors via error modeling. *ACM Trans. Design Automation of Electronic System*, 1998, 3(4): 581~599
- S. Devadas, A. Ghosh, K. Keutzer. An observability-based code coverage metric for functional simulation. In: *Proc. Int'l Conf. Computer-Aided Design*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1996. 418~425
- F. Fallah, S. Devadas, K. Keutzer. OCCOM—Efficient computation of observability-based code coverage metrics for functional verification. *IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2001, 20(8): 1003~1015
- Farzan Fallah, Pranav Ashar, Srinivas Devadas. Simulation vector generation from HDL descriptions for observability-enhanced statement coverage. In: *Proc. Design Automation Conf.*, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1999. 666~671
- Tao Lü, Jianping Fan, Xiaowei Li. An efficient observability evaluation algorithm based on factored use-def chains. In: *Proc. Asian Test Symposium*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2003. 161~166
- F. Corno, M. S. Reorda, G. Squillero. High-level observability for effective high-level ATPG. In: *Proc. IEEE VLSI Test Symposium*. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 2000. 411~416
- Yin Zhigang, Min Yinghua, Li Xiaowei, *et al.* A novel RTL behavioral description based ATPG method. *Journal of Computer Science and Technology*, 2003, 18(3): 308~317



**Lu Wei**, born in 1977. Received his B. Eng. degree from Harbin University of Science and Technology, and his M. Eng. degree from Harbin Institute of Technology in 2000 and 2002 respectively, all in computer science. He is now a Ph. D. candidate at the Institute of Computing Technology, the Chinese Academy of Sciences. His research interests focus on VLSI verification.

鲁巍, 1977年生, 2000年于哈尔滨理工大学获得工学学士学位, 2002年于哈尔滨工业大学获得工学硕士学位, 现为中国科学院计算技术研究所博士研究生, 主要研究方向为 VLSI/SOC 设计验证.



**Lü Tao**, born in 1978. She received her B. Eng. degree from Harbin Engineering University, and her M. Eng. degree from the Institute of Computing Technology, CAS, in 2000 and 2003 respectively, all in computer science. Currently, she is a Ph. D. candidate and assistant professor in the Institute of Computing Technology, CAS. Her research interests include VLSI/SOC design verification and wireless sensor network.

吕涛, 1978年生, 2000年于哈尔滨工程大学获得工学学士学位, 2003年于中国科学院计算技术研究所获得工学硕士学位, 现为中国科学院计算技术研究所博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为 VLSI/SOC 设计验证、无线传感网络 (lvtao@ict.ac.cn).



**Yang Xiutao**, born in 1978. Received his B. S. degree and his M. Eng. degrees from Shandong University of Science and Technology in 1999 and 2002 respectively. He is now a Ph. D. candidate at the

Institute of Computing Technology, the Chinese Academy of Sciences. His research interests focus on high level test generation.

杨修涛, 1978年生, 分别于 1999 年和 2002 年于山东科技大学获得理学学士学位和工学硕士学位, 现为中国科学院计算技术研究所博士研究生, 主要研究方向为高层次测试产生 (xiutaoyang@ict.ac.cn).



**Li Xiaowei** , born in 1964. Received his B. Eng. and M.Eng. degrees in computer science from Hefei University of Technology in 1985 and 1988 respectively , and his Ph. D. degree in computer science from the Institute of Computing Technology , the Chinese Academy of Sciences in 1991. He Joined the Institute of Computing Technology , the Chinese Academy of Sciences as a professor in 2000. His research interests include VLSI/SOC design verification and test generation , and design for testability , low-power design , dependable computing. He is a senior member of IEEE, and an associate editor-in-chief of the Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics ( in Chinese ).

李晓维 ,1964 年生 ,研究员 ,博士生导师 ,学位评定委员会副主任 ,信息网络研究室副主任 ,中国计算机学会理事 ,IEEE 高级会员 《计算机辅助设计与图形学学报》副主编. 曾获中国科学院自然科学奖和杰出科技成就奖. 主要研究方向为 VLSI/SOC 设计验证与测试生成、可测试性设计、低功耗设计、嵌入式系统、无线传感网络、可信计算( lxw@ict.ac.cn ).

Research Background

This paper is supported in part by the National Natural Science Foundation of China ( NSFC ) under grant No. 90207002 and 60576031 , and in part by the Sci. & Tech. Project of Beijing under grant No.H02012014130. Coverage evaluation is indispensable for verification via simulation. As the functional complexity of modern design is increasing at a breathtaking pace , it is requisite to take observability into account. Unfortunately , nowadays coverage metrics taking observability into account are not very satisfactory. On one hand , the traditional coverage metric is represented by counting the number of activation of such structures as statements , branches , and so on , which does not address observability. On the other hand , the vector generation methods targeting the metrics taking observability into account are not very efficient , and there exists a disconnect between these metrics and the vector generation process. In order to solve these problems , an observability model is presented in this paper , along with a novel simulation-based algorithm to generate vectors targeting the observability-based statement coverage. Our future work would focus on : ① Employ more heuristic information to enhance the efficiency of our system , and ② Integrate our algorithm with other controllability evaluation metrics , such as branch coverage metric , expression coverage metric , and so on.