

数字电路自动测试生成实用化软件

白玉媛, 杨士元, 王 红
(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 介绍了针对 ATE 应用和 TPS 开发的需要首次在 Windows NT 平台上研制的一套数字电路诊断测试数据自动生成的实用化软件系统 OCTOPUS100。该软件与已有的 ATPG 软件相比具有成本低, 有利于推广等优点。该软件具有灵活性、实用性和通用性, 经实验与试用表明有很高的实用价值。

关键词: 自动生成; 测试向量; 故障诊断

中图法分类号: TP311.52 文献标识码: A 文章编号: 1001-3695(2006)01-0174-03

Practical Automatic Test Generation Software for Digital Circuits

BAI Yu-yuan, YANG Shi-yuan, WANG Hong
(Dept. of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: An automatic test generation software for digital circuits that named OCTOPUS100 has been introduced. For the sake of application of ATE and development of TPS, an ATPG system that can automatically generate fault diagnostic data for digital circuit on the Windows NT has been developed. This system is cheaper and easier to spread than earlier ATPG software. This software has the characteristics of flexibility, practicality and generality and its high practical value for the fault diagnostic has been validated by the experiments and probation.

Key words: Automatic Generation; Test Vectors; Fault Diagnostic

自 1959 年 R. D. Eldred 首先提出逻辑电路的计算机自动推导测试理论以来, 随着 VLSI 的大规模应用, 对于电路易维护性和易检测性的要求使得数字电路的测试自动化问题越来越重要^[1]。

早期数字系统的故障诊断依靠工程技术人员的丰富经验和理论知识, 并借助一些常规的工具(如万用表、示波器等)来完成。这对技术人员的素质提出了很高的要求。由于设备、经验等条件的限制使得故障诊断周期长, 质量也无法保证^[2]。计算机技术的迅速发展和测试生成的理论算法的研究的深入, 测试算法在国内外不断涌现、改进, 早期人们对集成电路的人工诊断逐渐为机器诊断所替代。然而现有的商用测试生成 ATPG 软件主要是针对芯片设计开发, 并且其昂贵的价格使得自动故障诊断无法得到普及, 国内很多领域仍然使用人工编写故障诊断激励的方法, 测试生成问题成为电路维护的瓶颈。针对这一情况, 研制低成本、实用化的 ATPG 软件成为当务之急。

1 实用化测试生成软件

测试生成的核心算法经过改进日趋成熟, 但实际的应用需要解决多方面问题。首先测试生成算法对电路的格式有特定的要求, 这对测试生成的推广制造了不必要的麻烦。第二, 实际电路中存在带时钟控制的 D 触发器、三态总线结构, 及双向输入/输出问题, 在已有理论算法的基础上需要解决这些难题。第三, 生成的数据需要标准化, 可以直接应用于 ATE 设备。

为了解决实用化问题, 研制了软件 OCTOPUS100。它针对数字电路板固定型故障自动生成测试向量, 并输出与各种 ATE

设备兼容的数据。

该软件的核心测试生成算法分别针对组合电路和时序电路进行生成。在组合逻辑电路中, 任意时刻的输出仅仅取决于该时刻的输入, 与电路原来的状态无关, 在现有的成熟算法中采用了 FAN 算法并进行了必要的改进。而时序电路由于内部有存储元件, 它的输出不仅决定于当前的输入信号, 而且决定于存储元件的状态, 因此对它进行测试生成要比组合电路困难得多^[2]。由于组合电路的测试生成算法不仅在理论上比较成熟, 而且有具体的方法可提供使用, 因此大多数同步时序电路测试生成算法的基本思路是: 将时序电路先转换成组合电路的重复阵列, 即采用了时间帧的展开方法, 然后应用改进的组合电路的测试生成方法和理论进行测试生成^[3,4]。

OCTOPUS100 在现有的理论算法的基础上进行了必要的改进, 解决了实际提出的问题并且在 Windows NT 平台上研制, 降低了成本。其特点如下:

- (1) 输入电路信息的灵活性, 具有自己的器件库。
- (2) 针对工业电路与标准电路。
- (3) 具有通用性。输出格式标准化。

OCTOPUS100 的基本流程如图 1 所示。针对一块被测电路板, 首先获取该电路的结构信息, 在电路信息的基础上对该电路所有可能存在的固定型故障进行测试生成, 生成的测试向量数据将以标准格式输出, 应用于 ATE 设备。

1.1 灵活性

在算法的测试生成过程中, 电路的结构信息获取是算法的第一步, 见图 1。电路结构信息将由用户提供。电路信息输入方式的灵活性将会给用户很大的方便性。

OCTOPUS100 软件支持几种方式的电路信息输入。首先

用户可以在 OCTOPUS100 中绘制电路原理图, 软件平台提供了灵活友好的操作界面, 并且能够初步检测待测电路中的连接关系。用原理图方式可以直观地表示出各个元件之间的关系。这种输入方式的优点为简单, 方便。

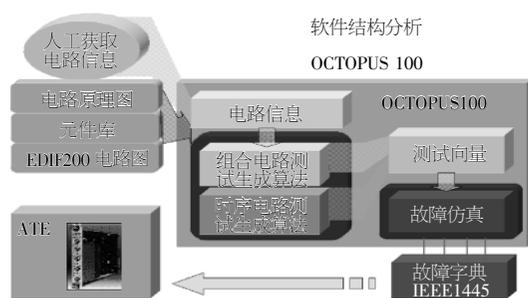


图 1 OCTOPUS100 的基本流程

然而对于有成千上万个门组成的芯片来说, 用原理图方式来描述是不现实的, 因此第二种获取电路信息的方式为该软件支持符合 EDIF200^[5] 格式的电路信息。由于不同应用领域、厂商专用电路格式、版本兼容等因素的影响, 现存在各种电路标准格式。EDIF200(Electronic Design Interchange Format) 是硬件描述语言, 一般的 EDA 软件支持该格式的电路描述语言。现有的大多数专业 CAD 软件, 如 Protel(Altium Limited), ORCAD (Cadence Design System, Inc.), Multisim, Active-HDL 支持这种格式的电路信息。

由此, 该输入方式提供了 OCTOPUS100 与其他 EDA 软件绘制的电路图的兼容性。获取了电路信息, OCTOPUS100 将自动去除电路中没有用的电路节点, 辨别组合电路和时序电路, 自动调用相应的 ATPG 算法来进行测试生成。ATPG 算法对电路信息内容和表达方式有着特殊要求, 这也是商用 EDA 软件不能满足要求的主要原因。

此外 OCTOPUS100 最大的特色便是拥有自己的元器件库。库中现有 4 000 多个元件。元器件库中的元件会在多个地方被调用。

正是由于库的存在用户可以完成直接从商用的 EDA 软件上导入电路原理图, 完成电路绘制, 进行测试生成。用户也可以将自己需要的电路原理图存储到库当中, 扩充库元件。前面提到的手工绘制的电路原理图和符合 EDIF200 格式的电, 都可以存储到库当中, 因此该软件具有相当大的灵活性。

1.2 实用性

现有的绝大多数时序电路测试生成算法, 如 HITEC^[6], GENTEST^[7] 及 ESSENTIAL^[8] 等, 虽然有较高的故障覆盖率和测试生成效率, 但这些算法仅仅考虑了二值逻辑元件, 如 AND, NAND, OR, NOR, NOT, BUFFER 及 D 触发器元件等, 仅对只包含这些元件的国际标准 ISCAS '89 这一类的电路生成测试。虽然有一些商用的 ATPG 软件, 如 Synopsys 的 TeraMAX ATPG, 但它们绝大多数是针对芯片设计的, 对待测的电路有严格的要求, 即必须满足一定的可测性设计要求, 否则无法进行测试生成。

相对现有的商用软件, OCTOPUS100 不仅适用于国际标准电路, 对于工业电路也同样适用。工业电路与标准电路是实际与理论的差别, 主要有:

(1) 工业电路中, 常常出现带时钟的边沿 D 触发器。而在

绝大多数的固定型故障测试理论分析中, 假设电路模型为零时延, 电路中所有的转换, 包括原始输入在内, 在一个时帧中值发生一次变化。算法中的 D 触发器元件只起到延时一个时帧的作用, 而与实际带时钟的边沿 D 触发器的动作特点是有差异的^[6,9]。一般算法中采用基本 D 触发器的动作特点, 即时钟默认为是严格的起到延时一个时帧的作用, 输入信号直接加到输出门上, 所以输入信号在全部作用时间里, 都能直接改变输出端 Q 的状态。而实际工业电路中的时钟不是严格的遵守理论动作特点, 受电路控制, 等到时钟沿才有动作, 加大了测试生成的难度。

(2) 随着计算机技术的发展, 特别是总线技术的发展, 现代工业电路设计通常包含三态逻辑元器件。这些元件除了 0 和 1 状态外, 还有一个高阻状态 Z, 如三态总线、三态总线驱动器等元件, 它们经常出现在微处理器、微控制器和各种外围设备中。在实际电路中, 就常常会遇到带总线结构的 PCB。因此 OCTOPUS100 的测试生成和故障仿真算法中相应地增加了高阻态 Z。

(3) 工业电路中存在双向输入、输出问题。上面解决的三态总线问题应用到双向输入/输出问题上, 解决了这一点。

针对上面提到的三种情况, 为了能处理实际电路, OCTOPUS100 在原有理论算法本身不支持工业电路某些结构的前提下, 对算法进行了改进, 使得 OCTOPUS100 具有很高的实用价值。

1.3 通用性

若输出数据只对应特定的 ATE 设备, 将大大减少软件数据的利用率。针对这一情况, 国际上提出了数据格式的标准化。数字测试交换格式 DTIF(Digital Test Interchange Format) 是为了让不同的数字自动测试生成系统(DATPGs) 和测试系统有相同的数字测试数据交换格式而制定的一个国际标准, 称为 IEEE-1445-1998(DTIF)^[10], 它的目的是为自动测试生成系统 DATPG 的测试数据提供一个标准数据接口, 使得测试数据与测试程序和测试系统无关, 如图 2 所示。

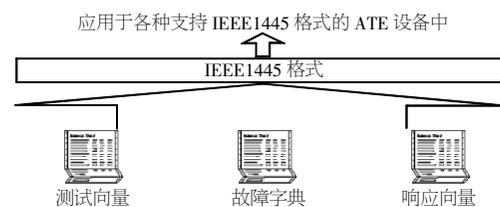


图 2 IEEE1445 标准为数据提供平台

OCTOPUS100 将生成符合 IEEE1445 标准的故障诊断字典, 数据可以直接应用到相应的支持 IEEE1445 标准的 ATE 设备上。

经过 ATPG 算法生成的标准格式数据应用到 ATE 设备便可进行故障定位。OCTOPUS100 的数据标准化, 有利于它的可扩展性、兼容性与规范化。

DTIF 标准定义了交换的数据格式, 包含的信息数据可以归纳为下面的几种:

- (1) UUT 模型;
- (2) 激励与响应;
- (3) 故障字典;
- (4) 探针。

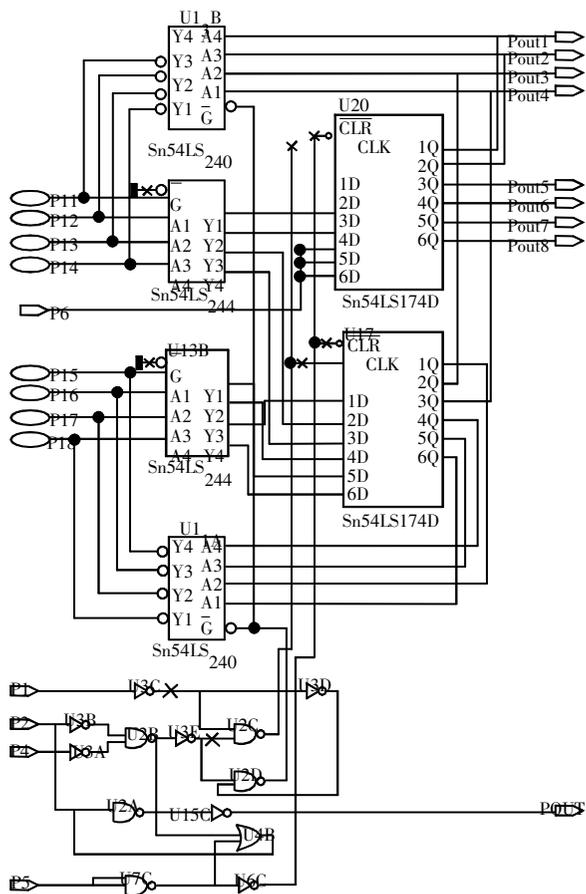
每一组都为相应的数据需要提供了标准格式, 共有 38 个文件。由于 OCTOPUS100 是针对静态的数字电路生成测向量, 因此从中选择所需要的文件格式标准。

电路板模型 (UUT) 组包括 15 个文件, 从中我们选择了 PI_NAMES, PO_NAMES 两个文件来描述电路原始输入/输出信息。激励与响应组 (Stimulus and Response) 包括九个文件, 从中选择了 Stimulus 与 PO_RESPONSE 文件来描述电路的激励与相应向量。故障字典组 (Fault Dictionary) 的信息主要包括了六个文件, 从中我们选择 F. D. _POPATS, F. D. _FAULT_SIGNATURES, F. D. _PRINT_STRINGS, F. D. _CROSS_REFERENCE 分别提供故障诊断所需要的统计信息。

OCTOPUS100 的标准输出格式, 让它具备了通用性和扩展性。经验证 OCTOPUS100 生成的数据可直接应用到 BDS9000 系统, 并具有很好的故障定位性能。

2 实验结果

经过对大量工业电路板的测试生成表明, 该软件具有很好的覆盖率。OCTOPUS100 与其他 EDA 软件绘制的 EDIF200 格式的图具有兼容性。如有一个 Protel 绘制的电路图, 图 3 中所示电路为一个工业电路, 分别有 SN54LS174(触发器, 时钟由电路控制), SN54LS140 及 SN54LS244(三态门, 构成了三态总线) 及 P11 ~P18(双向输入/输出)。



Protel 绘制的电路图导成 EDIF200 的格式。OCTOPUS100 读取该 EDIF200 格式的电路信息进行测试生成, 也可以直接在 OCTOPUS100 中绘制该电路, 进行测试生成。

该电路由 229 个节点构成。

OCTOPUS100 针对该电路的固定型故障生成了 196 个测试向量, 软件统计出生成的测试向量的基元故障覆盖率达到 94.01%, 顶层故障覆盖率达到 97.16%。这里需要说明的是, 基元故障覆盖率特指到门级管脚的故障覆盖率, 顶层故障覆盖率特指芯片管脚的故障覆盖率。

通过成熟的商用软件 LASAR 对 OCTOPUS100 生成的测试向量进行了验证。由于 LASAR 的故障模型与 OCTOPUS100 的故障模型在扇出分支的处理上有差异, 因此故障覆盖率的统计结果不会非常一致。

LASAR 针对测试向量给出的故障覆盖率如表 1 所示。

表 1 LASAR 验证的故障覆盖率结果

Fault Detection Summary		
Fault Category	Fault Analyzed	Total Coverage
Stuck-at-0	167	98.80%
Stuck-at-1	149	93.95%
TOTAL	316	96.51%

表 1 中可以看出, 对该工业电路 LASAR 生成了 167 个固定为 0 的故障模型, 149 个固定为 1 的故障模型。对于固定为 0 的故障模型生成的测试向量有两个故障模型测不到, 对这类故障覆盖率达到 98.8%; 对于固定为 1 的故障模型这组测试向量有九个故障测不到, 对这类故障覆盖率达到 93.95%。综合固定型故障覆盖率达到 96.51%。经分析不可测故障分别为接地端的 0 故障、触发器的时钟、清零端不可测, 均为理论不可测故障。

对于国际标准电路, OCTOPUS100 的实验结果如表 2、表 3 所示, 已有的 HITEC 测试生成算法针对 ISCAS '89 电路生成的测试结果如表 4 所示^[6]。结果表明, OCTOPUS 针对标准电路也具有较好的测试生成结果。由于 OCTOPUS100 主要针对工业电路进行测试生成, 一些算法处理使得它对标准电路的覆盖率稍低。

表 2 OCTOPUS100 针对 ISCAS '85 电路测试生成结果

电路名	节点数	插入故障数	等效故障组数	测试向量数	覆盖率 (%)
c181	277	554	301	50	97.11
c432nx	619	1239	668	84	96.28
c880	906	1812	968	224	100
c499	1571	3142	1590	116	98.85
c1355	1387	2774	1606	144	98.63
c1908	1933	3866	2041	179	99.61
c2670	2810	5620	2943	499	96.57
c3540	3562	7124	3651	394	96.29

表 3 OCTOPUS100 针对 ISCAS '89 电路测试生成结果

电路名	节点数	等效故障组数	测试向量数	覆盖率 (%)
s27	18	32	16	100
s298	142	308	330	85.71
s344	195	342	311	91.81
s349	196	350	282	91.71
s386	179	384	444	80.21
s641	457	467	615	86.3
s713	470	581	656	81.24
s820	331	850	1639	95.29
s832	329	870	1739	93.33
s1196	575	1242	988	99.6
s1238	554	1355	1011	94.69
s1488	686	1486	2695	96.57
s1494	680	1506	2580	96.08