总线互连故障的一种快速诊断算法

钟 波 孟晓风 季 宏 陈晓梅

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 数字总线的互连测试与故障诊断对于电子产品的生产和维护具有重要的意义. 针对现有算法存在冗余测试以及测试时间长等问题, 通过对总线互连故障的特征分析, 提出了一种自适应快速诊断算法. 该算法将测试过程分成两个阶段: 第 1阶段, 诊断各个超网络上的短路和呆滞故障, 按照短路关系将超网络分成若干集合; 第 2阶段, 根据第 1阶段的分组结果, 对各集合中的超网络加载"并行走步 1"向量, 以诊断其开路故障. 仿真结果表明, 该算法可在保证故障诊断最大化的前提下, 减少冗余测试, 有效压缩测试向量长度, 实现故障的快速诊断.

关 键 词: 总线; 互连; 故障诊断; 自适应;

中图分类号: TP 302

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008) 10-1200-04

Fast diagnosis algorithm for interconnect faults on system buses

Zhong Bo Meng Xiaofeng Ji Hong Chen Xiaomei

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100191, China)

Abstract The interconnect test and fault diagnosis for system buses are important to the manufacturing and maintenance of electronic products. The previous test algorithms which are proposed in literatures have some problems, such as existing redundant test vectors and having long test time etc. An adaptive and fast diagnosis algorithm was proposed according to the analysis of the interconnect-fault syndromes on system buses. The test process was divided into two phases. In the first phase, the short and stuck-at faults on supernets were diagnosed and then the supernets were divided into several groups according to the diagnosed short faults. In the second phase, the "parallel walking 1" test vectors were applied to the grouped supernets to diagnose the open faults. The results show that the proposed algorithm can support maximal diagnosis, remove the redundant test vectors, shorten the test time and realize fast diagnosis.

Key words system buses; interconnect; fault diagnosis; adaptive;

数字系统常采用总线将各功能模块连成有机整体, 一旦总线出现故障, 将导致某些模块甚至整个系统都无法正常运行. 同时, 随着先进封装技术的出现, 引脚间距越来越小, 布线越来越密, 使得总线发生互连故障的可能性大大增加. 因此, 研究总线的互连测试与故障诊断具有重要的意义[1-2].

边界扫描技术的出现, 解决了总线测试过程中加载激励和观测响应的问题[3]. 在此基础上, 人们设计了许多总线测试算法, 其中最具代表性的是: A_{AMS}[2], A_{MDA}[4]和 A_{MD+}[5]. 它们都具有较强的故障诊断能力, 但仍存在不足: A_{AMS}对故障数作了限制, 只适用于故障数较少的小型总线系统; 而 A_{MD+}和 A_{MDA}虽然对故障数没有限制, 更具一般性, 但由于大量冗余测试的存在, 使得算法的测试时间长, 测试效率低.

针对上述问题, 本文提出了一种自适应快速诊断算法 A_{AMS+}.

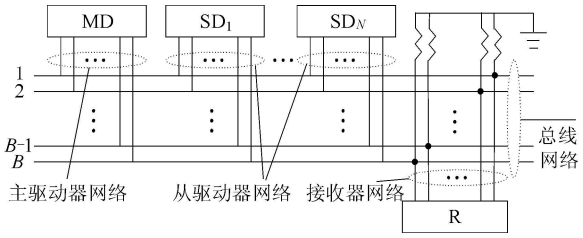
收稿日期: 2007-09-27

作者简介: 钟 波(1980-), 男, 重庆人, 博士生, buaa_zb@aspe.buaa.edu.cn.

1　模型及相关符号

1 1　总线互连模型

模型[4]如图 1所示. 它包含一个主驱动器(MD)、N 个从驱动器(SD_1, …, SD_N)和一个接收器(R). 驱动器负责加载激励; 接收器负责观测响应. 互连网络包括: ①总线网络; ②驱动器网络: 驱动器与总线网络的连线. 根据驱动器的不同, 可分为主驱动器网络和从驱动器网络; ③接收器网络: 接收器与总线网络的连线.



B—总线条数.

图 1　总线互连模型

模型符号解释:

MDN_j: MD与第 j条总线之间的连线.

$SDN_{i,j}$: SD_i与第 j条总线之间的连线.

RN_j: R 与第 j条总线之间的连线.

MN_j: 由第 j条总线、MDN_j和 RN_j组成.

SuN_j: 第 j条超网络, 由第 j条总线、MDN_j, $SDN_{1,j}$, …, $SDN_{N,j}$和 RN_j组成.

1 2　互连故障模型

所有互连故障可抽象成 3种基本模型:

1) 呆滞故障: 可分为呆滞 0和呆滞 1故障.

2) 短路故障: 按短路后的行为特征, 可分为“线与”和“线或”两种类型(本文只讨论“线或”短路, 其结论易推广到“线与”短路).

3) 开路故障: 开路故障的影响根据总线上采用的不同技术而有所差别. 假设在接收器网络上配有上拉电阻, 当发生开路故障时, 将接收响应“ 1”(即“弱呆滞 1”开路故障模型[4]).

2　总线互连故障的特征分析

在总线互连结构中, 虽然基本故障模型只有 3种, 但它们出现数量、位置和顺序的不同, 会产生难以穷举的故障模式, 给诊断带来了困难.

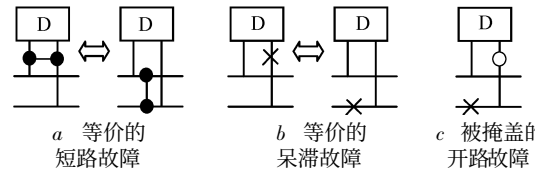
2 1　故障模式的等价关系

在文献[2]中, 对总线互连故障的特征作了初步分析, 在此列出一些主要的结论和定义.

定义 **1**　对于两种故障模式, 无论施加何种激励, 在接收器上观测的响应完全一致, 则称这两种故障模式等价(等价用符号“ ⇔”表示).

结论 **1**　驱动器网络或接收器网络上的短路和呆滞故障, 若无开路故障隔断, 等价于总线网络上的短路和呆滞故障. 如图 2a和 2b所示.

结论 **2**　对于某些故障, 无论施加何种激励, 其特征都无法传递到接收器(或称被其它故障所掩盖), 故无法对其进行检测, 其影响可忽略. 例如图 2c所示的故障模式中, 开路故障必须在呆滞故障修复之后才能被检测.



●—短路故障; ×—呆滞故障; ○—开路故障; D—MD 或 SD_i.

图 2　总线故障特征分析

定义 **2**　若某测试算法能够诊断所有可诊断的故障, 被掩盖的故障除外, 则称该算法可实现故障诊断最大化.

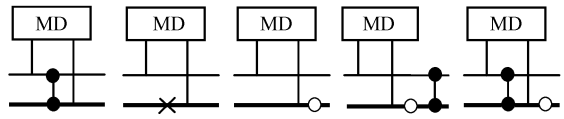
2 2　故障模式的分类

本文提出的诊断算法采取了先诊断主故障, 再诊断从故障的策略. 下面是主、从故障的定义.

定义 **3**　若在主驱动器上加载激励, 在接收器上观测响应就能诊断的故障称为主故障.

定义 **4**　若只能在从驱动器上加载激励, 在接收器上观测响应才能诊断的故障称为从故障.

对于 SuN_j, 尽管无法穷举其上所有可能的主故障, 但可利用故障模式的等价关系, 找出若干基本故障元, 由这些故障元可组合得到所有可能的主故障. 图 3总结了 SuN_j上主故障的基本故障元.



●—短路故障; ○—开路故障; ×—呆滞故障; ——SuN_j

图 3　主故障的基本故障元

通过分析主故障基本故障元的故障特征, 可以得到以下结论.

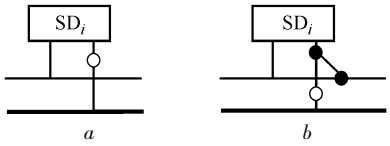
结论 **3**　若 RN_j除了能够接收 MDN_j的激励, 还能接收 MDN_i的激励($i \neq j$), 则有 ①MN_j上不存在开路故障; ②MN_j和 MN_i发生短路故障. 图 3a属于这种情况.

结论 **4**　若 RN_j无法接收 MDN_j的激励, 但能接收 MDN_i的激励($i \neq j$), 则有 ①MN_j上存在开路故障; ②MN_j和 MN_i发生短路故障; ③短路比开路

更接近接收器. 图 3d属于这种情况.

结论 **5** 若 RN_j接收“恒 0”或“恒 1”响应, 但 RN_i能够接收 MDN_j的激励 ($i \neq j$), 则有①MN_j上存在开路故障; ②MN_j和 MN_i发生短路故障; ③开路比短路更接近接收器. 图 3e属于这种情况.

从故障的基本故障元如图 4所示.



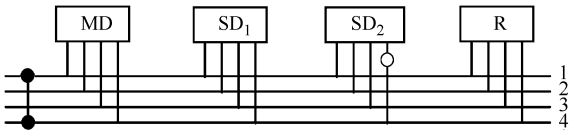
○—开路故障; ●—短路故障; ——SuN_j.

图 4 从故障的基本故障元

2 3 冗余测试分析

前面提到的诊断算法, 如 A_{MDA}和 A_{MD+}, 均将测试过程分成 $N + 1$步 (N 为从驱动器数): 第 1步加载测试向量到 MD, 以检测 MD 与 R 之间的故障; 第 2步加载相同的测试向量到 SD_1, 以检测 SD_1与 R之间的故障; 依此类推. 当完成 $N + 1$步测试之后, 就能够诊断出所有故障. 不同算法的区别在于每一步加载的测试向量有所不同. 这种测试方式虽然过程简单, 但由于没有充分利用每一步的诊断结果, 使得测试过程中存在大量的重复检测, 影响了测试效率.

例如, 图 5所示的故障模式. 第 1步测试就能诊断出短路故障; 后 N 步再检测此短路故障就属于冗余测试. 实际上, 后 N 步测试只需检测是否存在开路故障即可. 此外, 对不存在短路的超网络, 开路的检测可并行执行. 这样就能够最大限度的减少冗余测试, 提高测试的并行度, 从而提高测试效率. 仍以图 5为例, 第 2步测试 SD_1时, 可先并行检测 $SDN_{1,1}$, $SDN_{1,2}$, $SDN_{1,3}$是否存在开路, 然后再单独检测 $SDN_{1,4}$是否存在开路; 第 3步可按与第 2步同样的方式测试 SD_2. 基于上述思想, 本文提出了自适应快速诊断算法.



●—短路故障; ○—开路故障.

图 5 存在冗余测试的实例

3 自适应快速诊断算法

本文提出的 A_{AMS+}算法将测试过程分成 $N + 2$步, 充分利用前两步的诊断结果, 自适应地调整后 N 步的测试向量, 使总的测试向量数得到压缩, 从而加快了测试过程. 算法的主要流程如下.

第 1步 加载“走步 1”向量到 MD, 依据 2 2节中的结论 3~结论 5, 诊断出各超网络上的主故障. 需 B 个测试向量 (B 为总线条数).

第 2步 按如下方式构造测试向量 $\boldsymbol{T}$, 加载到 SD_1, SD_2, …, SD_N, 检测从故障中的短路故障. 需 B 个测试向量, 令

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} SDN_{1,1}, & SDN_{1,2}, & \cdots, & SDN_{1,B} \\ SDN_{2,1}, & SQN_{2,2}, & \cdots, & SDN_{2,B} \\ & \vdots & & \\ SDN_{N,1}, & SDN_{N,2}, & \cdots, & SDN_{N,B} \end{bmatrix}$$

第 1个向量:

$$\boldsymbol{T}_1 = \begin{bmatrix} 1, & 0, & \cdots, & 0 \\ 1, & 0, & \cdots, & 0 \\ & \vdots & & \\ 1, & 0, & \cdots, & 0 \end{bmatrix}$$

⋮

第 B 个向量:

$$\boldsymbol{T}_B = \begin{bmatrix} 0, & 0, & \cdots, & 1 \\ 0, & 0, & \cdots, & 1 \\ & \vdots & & \\ 0, & 0, & \cdots, & 1 \end{bmatrix}$$

第 3步 根据第 1步、第 2步的测试结果, 可知有哪些超网络间发生了短路故障. 对于相互之间存在短路故障的超网络, 需要再加载“走步 1”向量诊断开路故障; 同时, 依据 2 3节的基本思想, 对不存在短路关系的超网络可并行加载“走步 1”向量. 于是, 可按下面的步骤构造“并行走步 1”向量用于后 N 步测试:

1) 将发生短路故障的所有超网络放在一个集合内. 不妨设最后得到 M 个集合, SI_1, …, SI_M ($1 \leqslant M \leqslant B$). 显然, 任何一个超网络必属于其中一个集合, 且集合与集合之间不存在公共元素, 不同集合的元素之间不存在短路关系.

2) 按元素个数从多到少, 对 SI_1, …, SI_M排序, 命名排序后的集合为 SO_1, …, SO_M. SO_1的元素个数最多, 定义为 λ(λ称为最大短路数).

3) 构造第 1个测试向量: 取出 SO_1, …, SO_M中的第 1个元素加载 1; 其余元素加载 0

4) 构造第 2个测试向量: 取出 SO_1, …, SO_M中的第 2个元素加载 1; 其余元素加载 0 若集合中元素个数少于 2, 则不取.

5) 依此类推. 构造第 λ个向量: 取出 SO_1, …, SO_M中的第 λ个元素加载 1; 其余元素加载 0 若集合中元素个数少于 λ, 则不取.

例如, $SO_1 = \{ SuN_1, SuN_4, SuN_6 \}$, $SO_2 =$

$\{SuN_2, SuN_3\}$, $SO_3 = \{SuN_5\}$, 则 $\lambda = 3$, "并行走步 1"向量为

$$\boldsymbol{P} = [SuN_1, SuN_4, SuN_6, SuN_2, SuN_3, SuN_5]$$

第 1个测试向量:

$$\boldsymbol{P}_1 = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 1]$$

第 2个测试向量:

$$\boldsymbol{P}_2 = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]$$

第 3个测试向量:

$$\boldsymbol{P}_3 = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

加载"并行走步 1"向量到 SD_1, 诊断 SD_1上的开路故障. 需 λ个测试向量.

⋮

第 $N+2$步　加载与第 3步相同的向量到 SD_N, 诊断 SD_N上的开路故障. 需 λ个测试向量.

经过上述 $N+2$步测试, 即可诊断所有的主故障和从故障, 从而实现故障诊断最大化. 而需要的总测试向量数为 $B+B+N\times\lambda$

4　算法性能分析

以下主要从两个方面比较算法 A_{AMS+}, A_{MDA}和 A_{MD+}的性能.

1) 故障诊断能力. 这 3种算法的故障诊断能力如表 1所示. A_{MD+}由于对多短路故障存在故障混淆 (confounding syndrome) 的可能, 因此不能实现故障诊断最大化; 而 A_{AMS+} 和 A_{MDA}均排除了故障误判 (aliasing syndrome) 和故障混淆的可能, 可实现故障诊断最大化.

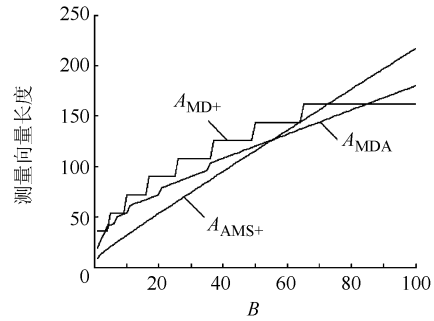
2) 测试向量长度. 测试向量长度直接决定了测试时间长短. 表 1对各种算法的测试向量长度进行了总结. A_{MDA}和 A_{MD+}的测试向量长度会随着驱动器数的增加而线性增加. 而 A_{AMS+}的测试向量长度虽然也会随着 N 的增加而增加, 但增加幅度小于前两种算法.

表 1　各种总线测试算法比较

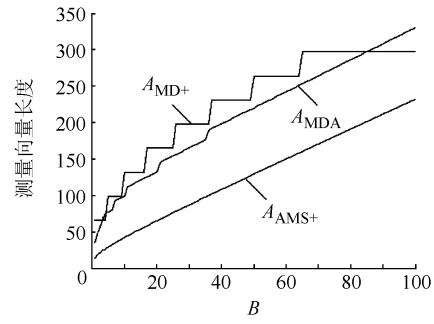
算　法	故障检测	最大化故障诊断	测试向量长度
A_{MD+}	是	否	$3(N+1)\lceil\sqrt{B}\rceil$
A_{MDA}	是	是	$(N+1)(d+G+2)$
A_{AMS+}	是	是	$2B+N\lambda$

注: $\lceil\ \rceil$为上取整数; d 为满足组合数 $C_d^{d/2}\geqslant B$ 的最小 d 值; G 为附加的"走步 1"向量长度.

图 6是在相同故障概率条件下, 即假设单条总线发生单个故障的概率为 10% [4-5], 分别取 $N=5$, 10时, 对 A_{AMS+}, A_{MD+}和 A_{MDA}的测试向量长度进行仿真. 仿真结果表明, 随 N 的增加, A_{AMS+}对测试向量长度的压缩度越大, 算法的快速性越好.



a　N = 5



b　N = 10

图 6　测试向量长度比较的仿真

5　结 束 语

总线互连故障的快速诊断对于保证电子系统的可靠运行具有重要的意义. 本文通过对总线故障特征的深入分析, 采用自适应诊断策略, 提出了一种快速诊断算法 A_{AMS+}. 该算法可在保证故障诊断最大化的前提下, 有效压缩测试向量长度, 实现故障的快速诊断.

参考文献 (References)

[1] Feng W Y, Karimi F, Fabrizio L. Fault detection in tristate system environment[J]. IEEE Micro, 2001, 21(5): 77-85

[2] 钟波, 孟晓风, 陈晓梅, 等. 一种基于故障特征分析的总线测试自适应算法[J]. 电子器件, 2007, 30(3): 1052-1056
Zhong Bo, Meng Xiaofeng, Chen Xiaomei, et al. Adaptive diagnosis algorithm for bus-structured systems based on syndrome analysis[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2007, 30(3): 1052-1056 (in Chinese)

[3] IEEE Std 1149.1-2001, IEEE standard test access port and boundary scan architecture[S]

[4] Zhao J, Fred J M, Fabrizio L. Analyzing and diagnosing interconnect faults in bus-structured systems[J]. IEEE Design & Test of Computers, 2002, 19(1): 54-64

[5] Kim Y J, Song D S, Shin Y S, et al. A new maximal diagnosis algorithm for bus-structured systems[C]//Anthony A. International Test Conference. Washington, DC: IEEE, 2003: 31-39

(责任编辑: 刘登敏)