

※※※※※※※※※※※※※※※※※※
※※※※※※※※※※※※※※※※※※
※※※※※※※※※※※※※※※※※※
※※※※※※※※※※※※※※※※※※
※※※※※※※※※※※※※※※※※※
※※※※※※※※※※※※※※※※※※

全国第一次容错计算会议资料

- 1、P L A 统一故障模型的讨论
- 2、用树形逻辑通路图对组合电路进行故障模拟
- 3、几种测试生成算法的比较

北 京 计 算 机 学 院

1 9 8 5 . 1 0

目 录

1. 全国第一次容错计算会议资料 ·····	1-33
2. 大型数字电路的一种功能测试方法 ·····	1-17
3. 专题技术报告 TY84T01S-1 ·····	65
4. 一种分布式通讯进程系统的容错复原技术 ·····	1-18
5. 一种分布式系统的多环容错动态网络 ·····	1-15
6. RAM 测试模式的生成 ·····	1-10
7. 异步操作的软件TMR 系统 ·····	1-14
8. 微处理器功能与结构兼测法 ·····	1-23
9. 一种新型计算机容错方式的研究 ·····	1-9

~ P L A 统一故障模型 ~

~ 的讨论 ~

金伟

大部份的固定故障可包含在 *Crosspoint* 故障之中，本文通过对交叉点描述公式的分析得出这一结论，并指出并不是全体固定故障都包含于 *Crosspoint* 故障之中。*Crosspoint* 故障不能包含全体桥接故障，由此得固定故障和桥接故障很难统一于 *Crosspoint* 故障。

一、引言

众所周知, PLA中最常见的三种故障模型是: 1、固定型故障, 2、Crosspoint 故障, 3、桥接故障。一般认为检测不同类型的故障要用不同的测试组。但是是否有可能检测某类故障的测试也能检测其他类的故障, 本文想就此问题做个简单的讨论。

几个名词:

字线: 积项线, 用 W 表示。

位线: 反相器(或译码器)的输出线, 用 B 表示。

输出线: 略, 用 Z 表示。

本文所讨论的线固定故障和线桥接故障主要是指以上三种线的固定故障和桥接故障。

本文所讨论的故障模型假定:

- <1>: Crosspoint 多故障只限于 AOE, AOM[1] 两种。
- <2>: 一个 PLA 中最多发生一个线固定故障或线桥接故障。
- <3> 允许 PLA 中同时发生 Crosspoint 多故障和单固定故障或单桥接故障。

二、对PLA中交叉点的公式描述

对于一个PLA的线和交叉点可类似于 Poage 公式得出统一的公式描述^[3]。以下是对PLA中交叉点的描述。

I、“与”阵中(熔丝)连结点

	$x(rb)$	在此点不发生故障时 $an(irb)$ $=1$, 否则 $am(irb) = 1$ 。 有 $am(irb) = \overline{an(irb)}$ 此交叉点的描述公式为:
$P_{in}(irb)$	$P_{out}(irb)$	$P_{out}(irb) = [an(irb) \cdot$ $x(rb) + am(irb)] \cdot P_{in}(irb)$ $= [x(rb) + am(irb)] \cdot$ $P_{in}(irb) \quad <1>$

Fig. 1

又将 $x(rb) = \overline{x^0(rb)} \cdot x(rb) + x^1(rb)$

$$P_{in}(irb) = \overline{P_{in}^0(irb)} \cdot P_{in}(irb) + P_{in}^1(irb)$$

代入 <1>得:

$$P_{out}(irb) = \frac{[\overline{x^0(rb)} \cdot x(rb) + x^1(rb) + am(irb)] \cdot [P_{in}^0(irb) \cdot P_{in}(irb) + P_{in}^1(irb)]}{A} \quad <2>$$

其非式为:

$$P_{out}(irb) = am(irb) \cdot [x^1(rb) \cdot x(rb) + x^0(rb)] + [P_{in}^1(irb) \cdot P_{in}(irb) + P_{in}^0(irb)] \quad <3>$$

“与”阵中（熔丝）断开点同理得到交叉点描述公式，

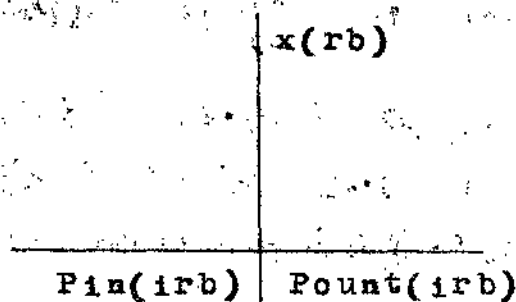


Fig. 2

$$Pount(irb) = \frac{[ae(irb) + x^0(rb) \cdot x(rb) + x^1(rb)] \cdot A}{[Pin^0(irb) \cdot Pin(irb) + Pin^1(irb)] \cdot C} \quad \langle 4 \rangle$$

$$Pout(irb) = ae(irb) \cdot [x^1(rb) \cdot (rb) + x^0(rb)] + [Pin^1(irb) \cdot Pin(irb) + Pin^0(irb)] \quad \langle 5 \rangle$$

“或”阵中的交叉点：

Yount(1j)

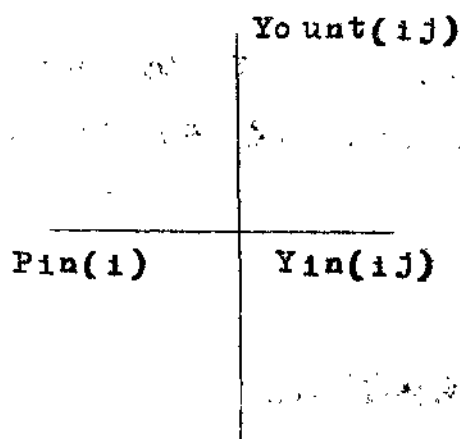


Fig. 3

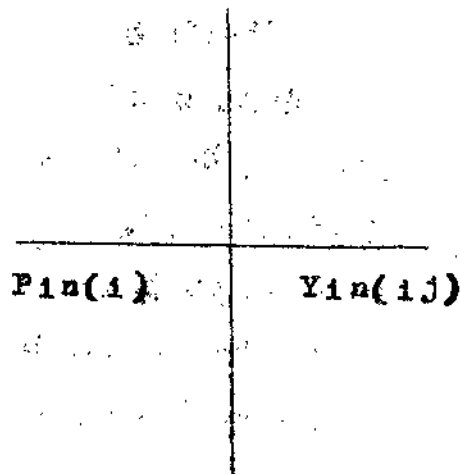


Fig. 4

$$Y_{out}(ij) = \frac{om(ij) \cdot [\overline{Pin^0(i)} \cdot Pin(i) + \overline{Pin^1(i)} + \overline{Yin(ij)} \cdot Yin(ij) + \overline{Yin^1(ij)}]}{0} \quad \langle 6 \rangle$$

$$Y_{out}(ij) = [om(ij) + \overline{Pin^1(i)} \cdot Pin(i) + \overline{Pin^0(i)}] \cdot [\overline{Yin^1(ij)} \cdot Yin(ij) + \overline{Yin^0(ij)}] \quad \langle 7 \rangle$$

$$Y_{out}(ij) = oe(ij) \cdot \frac{[\overline{Pin^0(i)} \cdot Pin(i) + \overline{Pin^1(i)} + \overline{Yin^0(ij)} \cdot Yin(ij) + \overline{Yin^1(ij)}]}{0} \quad \langle 8 \rangle$$

$$Y_{out}(ij) = [oe(ij) + \overline{Pin^1(i)} \cdot Pin(i) + \overline{Pin^0(i)}] \cdot [\overline{Yin^1(ij)} \cdot Yin(ij) + \overline{Yin^0(ij)}] \quad \langle 9 \rangle$$

三、对PLA中固定型故障的讨论

本节主要讨论PLA中的固定型故障。

定义：设检测一个（或一组）交叉点故障F的测试

是 $T = t_1, \dots, t_l$ 若对每一个 t_i , ($t_i \in T$)

会可检测某一个固定故障S，则称故障F支配故障S，记

为 $F \Rightarrow S$ 。

若PLA中发生线固定故障S，可用检测支配S的 *Crosspoint* 故障F的测试来检测它，下面就分类讨论PLA全部固定故障与支配它的故障。

1. 位线固定于高电平的故障

“与”阵中熔丝连接的交叉点。

公式和图如 $\langle 2 \rangle$, $\langle 3 \rangle$, Fig. 1所示。

若 $x^1(rb)$ 故障出现，在原式中它使得 $A=1$ ，这与 $a_m(i rb) = 1$ 的效果一样，而检测 $a_m(i rb)$ 故障时它要求 $x(rb) = 0$ ，所以此测试可同样检测 $x^1(rb)$ 故障。又一个位线至少与一条字线连接，所以纵观整个 $x(rb)$ 所连接的字线交叉点有结论如下：

结论1：一条位线上的 a_m 故障支配该位线的：

B: $S \rightarrow a \rightarrow 1$ 故障。

a_m 故障可支配 B: $S \rightarrow a \rightarrow 1$ 故障，又 o_m 故障可屏蔽 a_m 故障，也就是 o_m 故障可屏蔽 B: $S \rightarrow a \rightarrow 1$ 故障。又 B: $S \rightarrow a \rightarrow 1$ 故障只可对本位线中的 A 故障产生屏蔽即: $o_m \rightarrow B: S \rightarrow a \rightarrow 1 \rightarrow A$ ，由此得出在两类 *Crosspoint* 多故障假定下，B: $S \rightarrow a \rightarrow 1$ 不可能参与形成屏蔽环，故它可被 *Crosspoint* 多故障测试组所检测。

“与”阵中的（熔丝）不连接交叉点。

公式和图由 $\langle 4 \rangle$, $\langle 5 \rangle$, Fig. 2 所示。

从公式可得出：此交叉点与 B: $S \rightarrow a \rightarrow 1$ 故障无关。

II. 位线固定于低电平故障。

熔丝连接的交叉点。

公式如 $\langle 2 \rangle$, $\langle 3 \rangle$ 所示。

假若 $x^0(rb)$ 出现即 $x^0(rb) = 1$ ，原式中使得 $A = 0$ ，这样也就是 $Pout(i rb) = 0$ ，又此 $Pout$ 为 $(i rb + 1)$ 的 Pin 。

下一个交叉点无非是连接或不连接点，由公式 $\langle 2 \rangle$, $\langle 3 \rangle$ 知这样点的 $Pout$ 也一定为 0，依次类推得出整个积项的输出为 0，

所以位线 $B, S-a-0$ 使得字线 $w, S-a-0$, 也就是字线 $w, S-a-0$ 支配位线 $B, S-a-0$ 对非式的讨论也得到相同的结
果。

(熔丝)不连接交叉点。

公式如 $\langle 4 \rangle, \langle 5 \rangle$ 所示。

从公式容易看出 $B, S-a-0$ 故障 $x_0^0 (r b)$ 的出现与输出 $P_{out}(i r b)$ 无关。

关于字线 $w, S-a-0$ 故障的讨论将在后面进行讨论。

w , 输出线固定于高电平的故障

熔丝连接的交叉点。

图和公式如 Fig. 3 $\langle 6 \rangle, \langle 7 \rangle$ 所示。

对公式 $\langle 6 \rangle$ 来说假若 $Y_{in}^1(ij)$ 故障发生亦即 $Y_{in}^1(ij) = 1$, 它使得 $C = 1$ 亦即使得 $Y_{out}(ij) = 1$, 此交叉点看 $Y_{in}^1(ij) = 1$ 的效果与 $P_{in}^1(i)$ 一样, 对于非式的讨论也得到同样的结果。

熔丝不连接交叉点

图和公式如 Fig. 4, $\langle 8 \rangle, \langle 9 \rangle$ 所示。

对公式 $\langle 8 \rangle$ 来说 $Z, S-a-1$ 即 $Y_{in}^1(ij) = 1$ 在原式中使得 $C = 1$, 亦即 $Y_{out}(ij) = 1$, 这样其效果相应于 $oe(i, j)$ 与 $[P_{in}^0(i) \cdot P_{in}^1(i) + P_{in}^1(i)]$ 全都为 1, 检测 $oe(i, j)$ 要使 $P_{in}(i) = 1$, 这样检测 $oe(i, j)$ 就可同时检测 $Y_{in}^1(ij)$, 对于非式的讨论可得到相同的结果。

结论 2: 对于一个输出线 Z , 它对应的 oe 故障支配此 Z, S

—a—1故障。

又 $Y_{in}^1(ij)$ 是使输出线固定于1，它不能被其他 *Cross-point* 故障所屏蔽，此输出线与全部积项全连接的情况将在后面第四部份讨论。

VI. 输出线固定于低电平的故障

熔丝连接的交叉点。

公式与<6>，<7>相同。

假若输出线固定于“0”，亦即使 $Y_{out}(ij) = 0$ 。而在<6>式中检测故障 $OM(ij)$ 是要求 $Y_{in}(ij) = 0$ 而 $P_{in}(i) = 1$ ，这样若 $OM(ij)$ 出现则 $Y_{out}(ij) = 0$ ，它不出现则 $Y_{out}(ij) = 1$ 这样检测 $OM(ij)$ 故障就可发现输出 $Z: S$ —a—0故障，对非式的讨论亦有同样的结论。

熔丝不连接的交叉点。

公式和图与<8>，<9>，Fig. 4 相同。

从公式可显然得出结果：或阵中熔丝不连接的交叉点与输出线 $Z: S$ —a—0故障无关。

结论3：一条输出线 Z 上对应的 OM 故障支配此输出线 $Z: S$ —a—0故障。

又每个输出线至少与一个积项连接这就保证了这样的 OM 故障可检测，又输出线的故障不可为 *Crosspoint* 故障所屏蔽，所以它一定可被检测。

IV. 字线固定于高电平和低电平的故障

对于字线固定故障不易单独对一个交叉点进行讨论，而要对一个部份 (Portion) 整体进行讨论，而现行 PLA 大部份用反相器和译码器，下面只对反相器 PLA 进行讨论 (译码器的也同样)。

反相器 PLA 的一个部份只有下面三种情况以下是三种情况的公式表示。

	$x(j1)$	$x(j2)$
	$P_{in}(ij2)$	$P_{out}(ij2)$
$P_{in}(ij1)$	$P_{out}(ij1)$	

I

	$x(j1)$	$x(j2)$
	$P_{in}(ij2)$	$P_{out}(ij2)$
$P_{in}(ij1)$	$P_{out}(ij1)$	

II

	$x(j1)$	$x(j2)$
	$P_{in}(ij2)$	$P_{out}(ij2)$
$P_{in}(ij1)$	$P_{out}(ij1)$	

Fig. 5

第 I 种情况:

$$P_{out}(ij2) = \frac{[a_m(ij2) + x^0(ij2) \cdot x(j2) + x^1(j2)] \cdot [P_{in}^0(ij2) \cdot \{a_e(ij1) + x^0(j1) \cdot x(j1) + x^1(j1)\} \cdot \{P_{in}^0(ij1) \cdot P_{in}(ij1) + P_{in}^1(ij1)\} + P_{in}^1(ij2)]}{<10>}$$

$$P_{out}(ij2) = \frac{a_m(ij2) \cdot [x^1(j2) \cdot x(j2) + x^0(j2)] + \{P_{in}^1(ij2) \cdot \{a_e(ij1) \cdot [x^1(j1) \cdot x(j1) + x^0(j1)] + [P_{in}^1(ij1) \cdot P_{in}(ij1) + P_{in}^0(ij1)]\} + P_{in}^0(ij2)\}}{<11>}$$

第 II 种情况:

$$P_{out}(ij2) = \frac{[a_e(ij2) + x^0(j2) \cdot x(j2) + x^1(j2)] \cdot P_{in}^0(ij2) \cdot [a_m(ij1) + x^0(j1) \cdot x(j1) + x^1(j1)] \cdot [P_{in}^0(ij1) \cdot P_{in}(ij1) + P_{in}^1(ij1)] + P_{in}^1(ij2)}{<12>}$$

$$P_{out}(ij2) = \frac{a_e(ij2) \cdot [x^1(j2) \cdot x(j2) + x^0(j2)] + \{P_{in}^1(ij2) \cdot [a_m(ij1) \cdot [x^1(j1) \cdot x(j1) + x^0(j1)] + [P_{in}^1(ij1) \cdot P_{in}(ij1) + P_{in}^0(ij1)]\} + P_{in}^0(ij2)\}}{<13>}$$

第 III 种情况:

$$P_{out}(ij2) = \frac{[a_e(ij2) + x^0(j2) \cdot x(j2) + x^1(j2)] \cdot \{P_{in}^0(ij2) \cdot [a_e(ij1) + x^0(j1) \cdot x(j1) + x^1(j1)] \cdot [P_{in}^0(ij1) \cdot P_{in}(ij1) + P_{in}^1(ij1)] + P_{in}^1(ij2)\}}{<14>}$$

$$P_{out}(ij2) = e(ij2) \cdot [x^1(j2) \cdot x(j2) + x^0(j2)] + \\ \{P_{in}^1(ij2) \cdot [e(ij1) \cdot [x^1(j1) \cdot x(j1) + x^0(j1)] + (P_{in}^1(ij1) + P_{in}(ij1) + P_{in}^0(ij1))] + P_{in}^0(ij2)\} <15>$$

第Ⅰ种情况，若字线W：S—e—1故障出现则 P_{in} 、 P_{out} 均为1，而公式<10>中检测 $a_m(ij2)$ 要求 $x(j2) = 0$ ， $x(j1) = 1$ ，若 $a_m(ij2) = 1$ ，则 $P_{out}(ij2) = 1$ ，若 $a_m(ij2) = 0$ 则 $P_{out}(ij2) = 0$ ，这样对e故障的检测可发现W：S—e—1故障。第Ⅱ种情况看公式<12>，在W：S—e—1故障出现时 $P_{out}(ij2) = 1$ ，又在检测 $a_m(ij1)$ 时要求 $x(j1) = 0$ ， $x(j2) = 1$ ， $P_{in}(ij1) = 1$ ，这样在 $a_m(ij1) = 1$ 时 $P_{out}(ij2) = 1$ ， $a_m(ij1) = 0$ ，时 $P_{out}(ij2) = 0$ ，所以检测 $a_m(ij1)$ 的测试就可发现W：S—e—1故障，第Ⅲ种情况明显此部份与积项不连接，所以它与字线W：S—e—1无关。又因为每个积项至少与位线有一个连接点这样保证此字线上有AM故障可检测，从而W：S—e—1故障亦可被检测。

结论4：一字线上的AM故障支配该字线的W：S—e—1故障。

又OM故障可屏蔽AM故障。也就是说OM故障可屏蔽W：S—e—1故障，但W：S—e—1故障只可屏蔽AM与OM故障，所以在两种多故障假定下W：S—e—1故障不可能与Crosspoint构成屏蔽环。

下面分情况讨论字线 $W: S-a-0$ 故障。第 I 种情况:

如果 $W: S-a-0$ 故障出现在 $\langle 10 \rangle$ 式中它使得 $P_{out}(ij2)$, $P_{in}(ij1) \dots$ 等于“0”, 又检测 $ae(ij1)$ 故障是要求 $x(j2) = 1$, $P_{in}(ij1) = 1$, $x(j1) = 0$, 在 $am(ij1) = 1$ 时, $P_{out}(ij2) = 0$, 在 $ae(ij1) = 0$ 时 $P_{out}(ij2) = 1$, 这样对 $ae(ij1)$ 的检测即可发现故障。对 $\langle 11 \rangle$ 的讨论也可得到相同的结果。

第 II 种情况

看 $\langle 12 \rangle$ 式 $W: S-a-0$ 故障使得 P_{out}, P_{in} 全都为 0, 与第 I 种情况相同 $ae(ij2)$ 的检测可发现字线 $W: S-a-0$ 故障。对 $\langle 13 \rangle$ 的分析得到相同的结果。

第 III 种情况:

与第 I, II 种情况类似, 对 ae 故障的检测即可发现 $W: S-a-0$ 故障。

由以上讨论可发现这样一种情况, 即对一个字线 W 来说, 如果某个部分由于 ae 故障出现使此部分的全部位线都与该字线连接, 这样的效果与 $W: S-a-0$ 故障一样, 所以有结论:

结论 5: 对于一个字线来说其上的全部 ae 故障均支配该字线 $W: S-a-0$ 故障。

又字线 W_1 的 $W: S-a-0$ 故障只可屏蔽 $OE(i\pi)$ 故障 (即本字线上的 OE 故障), 又 $OE(i\pi)$ 不可对该字线上的 AE 故障形成屏蔽, 所以 $W: S-a-0$ 故障在两种多 *Crosspoint* 故障假定下不可形成屏蔽环。又一个字线上的每个部份至少有一个

与该字线的不连接点，这样就保证了字线 W_2 $S=0$ 可被检测。

四、一类不可被 *Crosspoint* 故障包含的固定故障

先看一个例子

PLA的 $0 \sim 1$ - ARRAY 如下:

x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2	z_3	z_4
1 0	1 1	0 1	1 1	1	0	1	0
1 1	1 0	1 1	1 0	1	1	0	0
1 0	1 0	1 1	1 1	1	0	0	1

六个测试如下:

x_1	x_2	x_3	x_4
0	1	1	0
1	0	1	0
0	0	0	1
0	0	1	1
1	0	1	0
0	0	1	0

此测试组可检测上述 PLA 中全部单故障，并且能够检测 PLA 中的 AOE 类型多故障，但是 z_1 输出线固定于“1”（ z_1 $S=1$ ）故障由此测试组并不能得到检测。

这就是第三部分所留下来的一种情况，即某个输出线与全部积项都连接。这个例子也说明了：*Crosspoint* 多故障不能包含全部固定故障，甚至单固定故障。

定理：只有输出 z_1 $S=1$ 故障在上述情况下不能被

Crosspoint 故障所包括。

证明：对于 PLA 中的其他固定故障由第三部份的讨论可得知

它们可被 Crosspoint 故障所包含， $Z: S-a-1$

1 故障在上述情况也已由例子给出它不能被 Crosspoint

故障所包含，所以定理成立

由于只有 $Z: S-a-1$ 故障在特殊情况下不能被 Crosspoint 故障所包含，但在此情况下只要取所有积项全不通的测试即可检测此故障。

五、桥接故障

桥接故障 (bridge faults) 也是 PLA 中要考虑的故障，它的种类比较多所以相应的也比较复杂，对于 Crosspoint 故障生成的一个测试组一般来说可以检测大多数的桥接故障但也还是有些桥接故障不能为这样的测试组所检测，请看下例：

PLA 的 0~1 ARRAY 如下：

x_1	x_2	x_3	x_4	z_1	z_2	z_3
1 1	0 1	1 0	1 1	1	1	0
1 1	0 1	1 1	1 0	0	1	1
0 1	1 0	1 0	1 1	1	0	1

它的一个单故障测试组包含 8 个测试如下：

x_1	x_2	x_3	x_4
1	1	0	1
0	1	1	0