通用 ATE 开关资源测试路径模型及应用

赵瑞贤 孟晓风 王国华

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对自动测试设备(ATE)测试程序开发中的开关资源测试路径搜索复杂、冲突判断困难、管理难度大等问题,提出了通用 ATE 开关资源测试路径模型,给出了模型的构造方法和多开关资源级联的级联算法,介绍了模型的具体应用. 模型实现了 ATE 测试过程中开关资源测试路径冲突判断、最佳测试路径自动搜索、测试路径故障隔离、测试程序与具体测试路径硬件资源无关. 提高了测试程序(TP)的通用性和可移植性,降低了 TP 开发的工作量.

关 键 词: 自动测试设备; 测试路径; 开关; 优化; 路径冲突

中图分类号: TP 216^{+}. 1

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0181-05

General-utility testing path model of switches for ATE and application

Zhao Ruixian Meng Xiaofeng Wang Guohua

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the questions such as searching testing path, judging testing path conflict and managing testing path of switches during the course of programming testing programs (TP) of automation testing equipment (ATE), a general-utility testing path model of switches was brought forward, the model general description and interlink algorithm for much more switches connecting were presented, and the material application methods of the model was introduced. The automated searching of optimum testing path and judging of testing path conflict are realized, the fault of testing path can be isolated well and TP are not related to the material path hardware by the model means. Accordingly the general-utility and replantability of TP are improved, and the workload of programming TP is reduced.

Key words: automation testing equipment; testing path; switches; optimization; path conflict

随着电子技术和信息技术的发展,自动测试设备(ATE)在军用和民用方面广泛使用,ATE 通用平台的发展趋势越来越明显[1~4]. 实现 ATE 通用平台的一个核心问题是开关资源测试路径的管理问题,即如何根据测试路径需求,对路径的可达性、匹配性和冲突性进行分析,实现测试路径的自动化管理. 以往测试程序(TP)开发人员不仅仅要关心测试流程,还要时时刻刻关注 ATE 内部开关资源的管理、测试路径匹配和冲突问题. 这些问题贯穿开发过程的始终,管理不善不仅影响 TP 开发的质量,甚至会造成设备的不必要损坏,严重困扰着 TP 开发人员的精力,降低了开发效率. 随着 ATE 的发展,ATE 内部开关资源越来越复杂,测试路径管理难度越来越大,在 TP 开发过程中再考虑 ATE 内部路径管理问题已不现实. 如何对开关资源进行规划,建立通用的测试路径管理模型,解决 ATE 内部的测试路径可达性、匹配性和冲突分析难题,实现最佳测试路径自动搜索是 ATE 工作者目前首要解决的一个核心问题.

文献[5]给出了开放式 ATE 硬件平台的通用测试接口定义方法,文献[3]给出了面向信号的资源管理接口定义,但是都没有涉及通用测试路径管理的实现问题. 通用测试路径管理模型的核心问题是如何建立测试路径与开关的对应关系模型,在此基础上实现测试路径上节点开关的查询与操作. 本文首先提出了通用 ATE 开关资源的测

收稿日期: 2004-12-03

作者简介: 赵瑞贤(1974-),男,河北清河人,博士生, zzhaoruixian@sohu.com.

试路径模型,然后给出通用 ATE 开关资源测试路径模型的具体应用.

1 通用 ATE 开关资源测试路径模型

通用 ATE 测试路径模型在于建立测试路径的起点、终点和中间节点的模型,方便对测试路径的调度和管理. 开关资源测试路径可用以下公式表示:

测试路径 =

起点 → 节点 1 → … → 节点 n → 终点 (1)

其它仪器直接引出的测试路径没有中间节点,管理比较简单,这里不再做进一步的说明. 本节首先给出单一开关资源的测试路径模型,然后给出多个开关资源的测试路径模型,考虑多个开关资源级联情况,最后给出多个开关资源级联的级联算法.

1.1 单一开关资源的测试路径模型

ATE 上应用较多的开关资源有四种:①用于测试射频信号的射频开关;②用于测试一般模拟信号(通频带宽小于 50 MHz,电压小于 300 V,电流小于 2 A)的多路复用开关;③用于提供电源资源和电源转换的(大功率,大电流)功率开关;④为了辅助信号激励、采集和调理的继电器开关. 从实现方式来看,可规划为单刀单掷、单刀双掷、双刀单掷、双刀双掷、单刀多掷开关和总线形式的开关矩阵等.

对一个单一开关资源来说,测试路径的起点和终点就是开关引出的行(入端)和列(出端)端口,中间节点就是对应的开关. 其测试路径可以用统一测试路径模型,三个矩阵 $\boldsymbol{S}(s_{i,j})_{M\times N}$、$\boldsymbol{R}(r_{i,j})_{M\times 2}$和 $\boldsymbol{C}(c_{i,j})_{2\times N}$表示. 以图 1a 的开关矩阵为例,该开关资源的测试路径模型为

$$\boldsymbol{S}_{4\times 4}=\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & s_{14}\\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & s_{24}\\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & s_{34}\\ s_{41} & s_{42} & s_{43} & s_{44}\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{R}_{4\times 2}=\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & r_4\\ 01 & 02 & 03 & 04\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{C}_{2\times 4}=\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 & c_4\\ 01 & 02 & 03 & 04\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

其中 $\boldsymbol{S}_{4\times 4}$存储对交叉节点开关进行操作的信息编码,交叉节点有开关的用一个非"0"编码(编码=开关母板编码+板编码+模块编码+开关操作编码)表示,交叉节点处没有开关的编码为"0",表示该节点不存在;$\boldsymbol{R}_{4\times 2}$给定矩阵资源的行通道的信息,其中 $r_{m,1}(m=1,2,\cdots,4)$是开关资源行通道的命名编码(编码=测试通道编号+行列属性编码+行列导通属性编码+信号属性编码),$r_{m,2}(m=1,2,\cdots,4)$是开关资源行通道的编码对应于 $\boldsymbol{S}_{4\times 4}$的行号;$\boldsymbol{C}_{2\times 4}$给定开关资源的列通道的信息,其中 $c_{1,n}(n=1,2,\cdots,4)$是开关资源列通道的命名编码(编码=测试通道编号+行列属性编码+行列导通属性编码+信号属性编码);$c_{2,n}(n=1,2,\cdots,4)$是开关资源列通道的编码对应于 $\boldsymbol{S}_{4\times 4}$的列号. 其它单一开关资源(图 1)的测试路径模型如以下各公式.

单刀单掷、双刀单掷开关测试路径模型:

$$\boldsymbol{S}_{1\times 1}=[S_{11}] \tag{5}$$

$$\boldsymbol{R}_{1\times 2}=[A\quad 01] \tag{6}$$

$$\boldsymbol{C}_{2\times 1}=[B\quad 01]^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

单刀双掷、双刀双掷开关测试路径模型:

$$\boldsymbol{S}_{1\times 2}=[S_{11}\quad S_{12}] \tag{8}$$

$$\boldsymbol{R}_{1\times 2}=[A\quad 01] \tag{9}$$

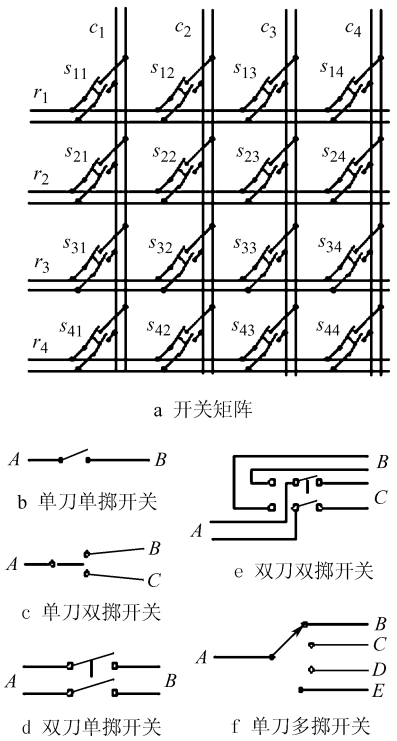
$$\boldsymbol{C}_{2\times 2}=\begin{bmatrix} B & C\\ 01 & 02\end{bmatrix} \tag{10}$$

单刀多掷、双刀双掷开关测试路径模型:

$$\boldsymbol{S}_{1\times 4}=[S_{11}\quad S_{12}\quad S_{13}\quad S_{14}] \tag{11}$$

$$\boldsymbol{R}_{1\times 2}=[A\quad 01] \tag{12}$$

$$\boldsymbol{C}_{2\times 4}=\begin{bmatrix} B & C & D & E\\ 01 & 02 & 03 & 04\end{bmatrix} \tag{13}$$



a 开关矩阵

b 单刀单掷开关

e 双刀双掷开关

c 单刀双掷开关

d 双刀单掷开关

f 单刀多掷开关

图 1 开关资源模型

1.2　多个开关资源的通用 ATE 测试路径模型

多个开关资源的通用 ATE 测试路径模型是单一开关资源模型的叠加,同样用三个矩阵 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$、$\boldsymbol{R}_{M\times 2}$和 $\boldsymbol{C}_{2\times N}$表示. 其中矩阵 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$存储测试路径节点开关信息,多个开关资源的矩阵模型 $\boldsymbol{S}_{M_i\times N_j}$以块矩阵的形式存储到 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$的对角线上,如式(14).

$$\boldsymbol{S}_{M\times N}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{4\times 4} & 0 & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{S}_{2\times 4} & 0 & 0\\ 0 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & 0 & 0 & \boldsymbol{S}_{3\times 3}\end{bmatrix} \tag{14}$$

$\boldsymbol{R}_{M\times 2}$存储所有开关资源行通道信息,包括开关资源行通道的命名编号(存储在 1 列),通用测试接口的命名编号对应于 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$的行编号(存储在 2 列,叠加过程中要和 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$行号一致).

$$\boldsymbol{R}_{M\times 2}=[\boldsymbol{R}_{4\times 2}\quad \boldsymbol{R}_{2\times 2}\quad \cdots\quad \boldsymbol{R}_{3\times 2}]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

$\boldsymbol{C}_{2\times N}$存储所有开关资源列通道信息,包括开关资源列通道的命名编号(存储在 1 行),通用测试接口的命名编号对应于 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$的列编号(存储在第 2 行,叠加过程中要和 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$列号一致).

$$\boldsymbol{C}_{2\times N}=[\boldsymbol{C}_{2\times 4}\quad \boldsymbol{C}_{2\times 4}\quad \cdots\quad \boldsymbol{C}_{2\times 3}] \tag{16}$$

1.3　多个开关资源级联的级联算法

如果没有开关资源的级联情况,式(14)、(15)、(16)的数学模型就完全可以进行测试路径的通用管理. 开关资源很少独立使用,经常多个开关资源并联或串联,实现资源的合理扩展配置. 一般开关资源的扩展体现在开关资源间行行互连扩展列资源,或列列互连扩展行资源. 这就要求对多个开关资源的通用测试路径模型进行级联处理,得到多个开关资源级联的通用测试路径模型. 这里给出多个开关资源级联的级联算法.

不失一般性,假设存在开关资源 A 的 a 行同开关资源 B 的 b 行互连,a 行的通用测试接口编码为 x_a,b 行的通用测试接口编码为 x_b.

处理步骤如下:

1) 搜索 a 行和 b 行开关资源对应于 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$中的行位置.

比较得 $r_{m,1}=x_a$ 和 $r_{n,1}=x_b$,读取 $x=r_{m,2}$和 $y=r_{n,2}$,并假设 x 值小于 y 值.

2) 对矩阵 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$作如下运算

$$s_{x,j}=\begin{cases}s_{x,j} & (s_{x,j}\neq 0, s_{y,j}=0)\\ s_{y,j} & (s_{x,j}=0, s_{y,j}\neq 0)\\ 0 & (s_{x,j}=0, s_{y,j}=0)\end{cases}$$
$$(j=0,1,\cdots,N) \tag{17}$$

从 y 行开始

$$s_{i,j}=s_{i+1,j}$$
$$(i=y,y+1,\cdots,M; j=0,1,\cdots,N) \tag{18}$$
$$r_{j,2}=r_{j,2}-1\quad (j=y,y+1,\cdots,M) \tag{19}$$

3) 结束该处理流程.

如果还有其它行互连,则重复以上计算. 对列的级联处理同上,只是将行改为列. 全部互连关系处理完后,就得到多个开关资源级联的通用测试路径模型.

1.4　多个开关资源级联的级联算法举例

如图 2 所示的开关级联组合模块,用级联算法建立该模块的测试路径模型.

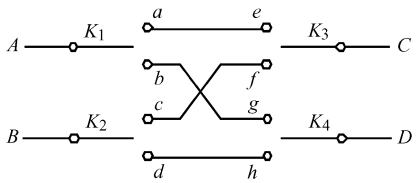


图 2　4 个双掷开关组合成复合开关资源

1) 建立 4 个独立双掷开关测试路径模型

$\boldsymbol{S}_{K1}=[k_{11}\quad k_{12}]$,$\boldsymbol{R}_{K1}=[A\quad 01]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{C}_{K1}=\begin{bmatrix}a & b\\ 01 & 02\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{S}_{K2}=[k_{21}\quad k_{22}]$,$\boldsymbol{R}_{K2}=[B\quad 01]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{C}_{K2}=\begin{bmatrix}c & d\\ 01 & 02\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{S}_{K3}=[k_{31}\quad k_{32}]$,$\boldsymbol{R}_{K3}=[C\quad 01]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{C}_{K3}=\begin{bmatrix}e & f\\ 01 & 02\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{S}_{K4}=[k_{41}\quad k_{42}]$,$\boldsymbol{R}_{K4}=[D\quad 01]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{C}_{K4}=\begin{bmatrix}g & h\\ 01 & 02\end{bmatrix}$

2) 模型组合

$$\boldsymbol{S}_{4\times 8}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{S}_{K1} & & & \\ & \boldsymbol{S}_{K2} & & \\ & & \boldsymbol{S}_{K3} & \\ & & & \boldsymbol{S}_{K4}\end{bmatrix}=$$
$$\begin{bmatrix}k_{11} & k_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & k_{21} & k_{22} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{31} & k_{32} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{41} & k_{42}\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{C}_{2\times 8}=[\boldsymbol{C}_{k1}\quad \boldsymbol{C}_{k2}\quad \boldsymbol{C}_{k3}\quad \boldsymbol{C}_{k4}]=$$
$$\begin{bmatrix}a & b & c & d & e & f & g & h\\ 01 & 02 & 03 & 04 & 05 & 06 & 07 & 08\end{bmatrix}$$
$$\boldsymbol{R}_{4\times 2}=[\boldsymbol{R}_{K1}\quad \boldsymbol{R}_{K2}\quad \boldsymbol{R}_{K3}\quad \boldsymbol{R}_{K4}]^{\mathrm{T}}=$$
$$\begin{bmatrix}A & B & C & D\\ 01 & 02 & 03 & 04\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

3) 级联运算

a 和 e、b 和 g、c 和 f、d 和 h 级联后的模型如式(19)、(20)、(21)所示.

$$\boldsymbol{S}_{4\times 8}=\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & k_{21} & k_{22} & 0 & 0 & 0 & 0\\ k_{31} & 0 & k_{32} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & k_{41} & 0 & k_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{C}_{2\times 8}=\begin{bmatrix} a & b & c & d & e & f & g & h\\ 01 & 02 & 03 & 04 & 01 & 03 & 02 & 04 \end{bmatrix} \tag{21}$$

$$\boldsymbol{R}_{4\times 2}=\begin{bmatrix} A & B & C & D\\ 01 & 02 & 03 & 04 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{22}$$

根据式(20)~(22)可以看出,使用从 A 到 C 的路径要对 K_1、K_3 进行 k_{11} 和 k_{31} 操作;使用从 A 到 D 的路径要对 K_1、K_4 进行 k_{12} 和 k_{41} 的操作;使用从 B 到 C 的路径要对 K_2、K_3 进行 k_{21} 和 k_{32} 的操作;使用从 B 到 D 的路径要对 K_2、K_4 进行 k_{22} 和 k_{42} 的操作. 其它路径是不可达的.

2 模型的应用

建立通用 ATE 开关资源测试路径模型的目的是实现最佳测试路径搜索及测试路径的故障屏蔽. 其中最佳路径搜索包括路径匹配分析、路径的可达性、冲突性分析和中间节点查询.

2.1 测试路径匹配、可达、冲突分析

1) 测试路径匹配

测试路径匹配主要分析测试路径的起点和终点信号属性是否匹配. 对于通用 ATE 的测试路径模型来说,主要检查矩阵 $\boldsymbol{R}_{M\times 2}$、$\boldsymbol{C}_{2\times N}$ 中作为测试路径起点和终点的信号属性编码是否匹配.

2) 测试路径可达

测试路径可达性是指测试路径的起点和终点之间是否存在导通的可能性. 判断的依据是起点和终点之间是否存在这样的节点,实现起点和终点的联接. 对于通用 ATE 的测试路径模型来说,主要检查矩阵 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$ 中是否存在从起点到终点的开关节点.

3) 测试路径冲突

ATE 测试过程中主要的测试路径冲突是测试路径的多资源占用,导致信号串扰. 具体体现在一个测量资源同多个激励资源互连;或一个激励资源连接了多个测量资源,导致阻抗不匹配,影响测量质量,还有可能多个激励资源互连. 对于通用 ATE 的测试路径模型来说,路径冲突存在 2 种情况.

① 通用 ATE 测试路径模型中行 x、列 y 路径导通的冲突体现在对应矩阵 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$ 行 x 或列 y 的开关多于 1 个处于导通状态;

② 通用 ATE 测试路径模型中行 x_1、行 x_2 或列 y_1、列 y_2 导通的冲突体现使用中的列(行)资源有多于 2 个的开关闭合.

2.2 最佳路径搜索

2.2.1 模型中的最佳测试路径判据

最佳测试路径的约束条件是在能够查询到测试路径的情况下,路径经历的开关数最少. 对于 ATE 通用测试路径模型,最佳测试路径是这样 2 种情况,如图 3 所示.

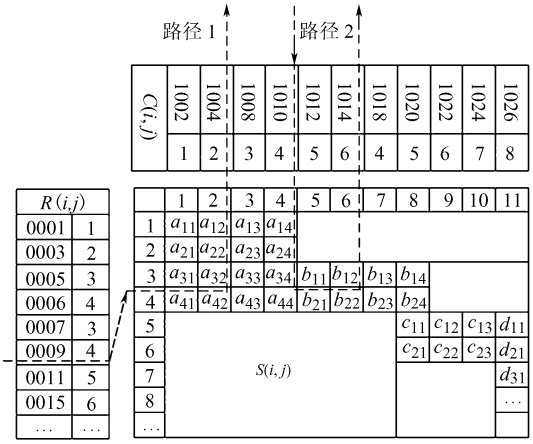


图 3 多个开关资源级联后通用测试路径模型

1) 行列导通的最佳测试路径是行列交叉点的开关导通;

2) 列列(行行)导通的最佳路径是选取某一行(列)与对应两列(行)的两个交叉点的开关导通.

2.2.2 最佳测试路径搜索

在最佳测试路径查询过程中同时进行测试路径的可达性和冲突性分析. 利用通用 ATE 测试路径模型实现最佳测试路径查询和测试路径可达性及冲突性分析要经历以下步骤.

1) 测试路径起点和终点位置查询

根据路径起点 a 和终点 b 的命名编码 x_a 和 x_b,在矩阵 $\boldsymbol{R}_{M\times 2}$、$\boldsymbol{C}_{2\times N}$ 中查出 x_a 和 x_b 对应于 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$ 的行列编号 m 和 n. 有 3 种情况:

① 如果命名编码 x_a 和 x_b 都是行通道资源,则有 $x_a=c_{m,1}$ 和 $x_b=c_{n,1}$,令 $x_1=c_{m,2}$ 和 $x_2=c_{n,2}$,x_1 和 x_2 为矩阵 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$ 的行号;

② 如果命名编码 x_a 和 x_b 都是列通道资源,则有 $x_a=r_{1,m}$ 和 $x_b=r_{1,n}$,令 $y_1=r_{2,m}$ 和 $y_2=r_{2,n}$,y_1 和 y_2 为矩阵 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$ 的列号;

③ 如果命名编码 x_a 和 x_b 一个是行通道资源,一个是列通道资源,则有 $x_a=c_{m,1}$ 和 $x_b=r_{1,n}$,令 $x=c_{m,2}$ 和 $y=r_{2,n}$,行号 x 和列号 y 为矩阵 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$ 的行列号.

2) 最佳测试路径搜索和测试路径冲突判断

根据 1) 的查询结果,如果 x_a 和 x_b 都是测试路径模型的行通道资源.

查询步骤:

① 路经初步占用情况分析

查询 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$ 矩阵中 $s_{x_1,i}$ 和 $s_{x_2,i}(i=1,2,\cdots,N)$ 对应的开关状态是否为非导通状态,为非导通状态说明 x_1 和 x_2 两行没有被占用,进入下一步查询.

② 最佳测试路径搜索($j=1,2,\cdots,M$)

③ j 列路径可达性分析

查询 $s_{x_1,j}$ 和 $s_{x_2,j}$ 的值是否为"0",为"0"说明该处开关节点不存在,该列路径不可达;如果开关存在,检查开关状态编码是否为"故障"状态,"故障"状态,说明该列路径不可达,取消该列查询,$j=j+1$,转到③步. 否则,进入下步检查.

④ 查询 j 列测试路径占用情况

令 $i=1,2,\cdots,N$,查询 $s_{i,j}$ 的开关是否都处于非导通状态,为非导通状态,说明该列没有被占用,$s_{x_1,i}$ 和 $s_{x_2,i}$ 为最佳路径的节点,如图 3 的导通路径 2. 如果开关为导通状态,说明该列被占用,$j=j+1$,转到③步.

⑤ 查询完毕,找到路径节点,记录路径节点,搜索完毕. 没有查到路径节点,给出错误信息.

对于 x_a 和 x_b 同为列的情况,则查询方式同上,只是行列互换.

对于 x_a 和 x_b 分别为行资源和列资源的情况,进行以下步骤:

① 路经初步占用情况分析

检查 $s_{x,y}$ 的值是否为"0",为"0"说明该处开关节点不存在,该列路径不可达;如果 $s_{x,y}$ 的值是非"0",检查开关状态编码是否为"故障"状态,"故障"状态,说明该列路径不可达,取消该列查询,给出错误信息. 否则,进入下步检查.

② 最佳测试路径搜索

检查 $s_{x,i}(i=1,2,\cdots,N)$ 和 $s_{j,y}(j=1,2,\cdots,M)$ 对应行和列的开关是否全为非导通状态,如果为非导通状态则说明这行和列没有被占用,$s_{x,y}$ 就是路径的节点;如果有导通状态的开关存在,则路径冲突,给出冲突信息.

2.3 路径的多资源共享

在实际测试过程中,可能存在这种情况,为了实现多种信息测量,一个源同时连接了多个测量资源. 这种情况下,测试路径查询步骤同 2.2,只是选取有冲突的测试路径,自动利用路径冲突模型实现测试路径的多资源共享.

2.4 测试路径的故障屏蔽

实际使用过程中,ATE 的测试路径为多余度,当出现某一测试路径节点的开关故障时,如果能绕开该节点开关,系统硬件仍能使用. 该模型的屏蔽措施是:将 $\boldsymbol{S}_{M\times N}$ 对应节点的开关状态设置为故障状态,则在路径查询过程中,自动绕开该节点,而选取其它测试路径,实现了测试路径的容错控制和故障隔离,而不用修改软件和硬件的结构,大大提高了硬件和软件的使用效率.

3 结 束 语

本文提出的通用 ATE 测试路径管理模型,有效地解决了开关资源管理、最佳路径搜索和路径冲突判断难题,软件模型直接判断路径冲突问题,同时实现最佳路径搜索,实现了测试路径的通用化管理,大大简化 ATE 测试软件的开发,提高了软件的可移植性,方便通用软件测试平台开发. 该方案已经在某通用软件测试平台上使用,编程简单,使用方便,效果良好.

参考文献 (**References**)

[1] Orlet J L, Murdock G L. NxTest augments legacy military ATE [J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE ,2002, 17:17 ~ 20

[2] Ramachandran N, Oblad R P, Neag I A, *et al*. The role of a signal interface in supporting instrument interchangeability [A]. In:Autotestcon Proceedings [C]. Anaheim, 2000. 403 ~ 416

[3] Gal S, Neag I A. A unified interface for signal-oriented control of instruments and switches[A]. In:Autotestcon Proceedings[C]. Huntsville,2002. 337 ~ 350

[4] Fertitta K, Eriksson D. The state of interchangeability in ATE [A]. In:Autotestcon Proceedings[C]. Anaheim,2000. 417 ~ 424

[5] Stora M J, Droste D. "ATE open system platform" IEEE-P1552 structured architecture for test systems[A]. In: IEEE Systems Readiness Technology Conference[C]. Anaheim,2003. 85 ~ 94