ATE开关矩阵动态路径搜索算法

王国华 杨中亮 陈妮亚

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 自动测试设备(ATE, Automatic Test Equipment)中的开关矩阵由于使用不均衡, 有些开关因频繁使用发生故障而有些开关却很少使用. 开关故障会导致开关矩阵的拓扑结构发生改变, 使路径的搜索变得复杂化. 为了解决开关使用均衡的问题以及复杂开关拓扑结构下的路径搜索问题, 定义了路径节点矩阵、开关状态矩阵以及可达矩阵, 统一了开关矩阵的数学描述, 并提出了基于可达矩阵的路径搜索算法; 定义了开关及路径的可靠度, 提出了基于可靠性的路径选择标准, 解决了开关矩阵使用不均衡的问题; 通过实例进行了算法验证. 结果表明: 该算法能够实现开关故障情况下的路径搜索、路径选择的优化和开关使用的均衡.

关 键 词: 自动测试设备; 开关矩阵; 可靠性; 可达矩阵; 拓扑结构

中图分类号: TP 216+. 1

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2010)01-0120-04

Dynamic path searching method for ATE switch matrix

Wang Guohua Yang Zhongliang Chen Niya

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Due to the imbalance use of switches, some switches of switch matrix in ATE (automatic test equipment) fault early while others not. Switches fault destroys the topology of switch matrix and makes path searching more complicatedly. To achieve switch load equalization and path searching with a complicated matrix topology, the path matrix, the switch state matrix and the reachability matrix were defined to unify the mathematic model of switch matrix. And then a path searching algorithm based on reachability matrix was proposed. The switch reliability and path reliability were defined, a path selection method based on path reliability was proposed to resolve the imbalance use problem of switches. An example based on an open fault switch matrix shows that this method can be competent for path searching while the switch matrix is fault, and the path selection is optimized which can help promoting the switch matrix life.

Key words: automatic test equipment; switches; reliability; reachability matrix; topology

为了提高军用、民用和航空等电子系统维护的自动化水平, 自动测试系统(ATS, Automatic Test System)已经成为电子设备支持保障领域的核心要素[1]. 开关矩阵是 ATS的信号枢纽, 负责将被测设备的测试点连接到自动测试设备(ATE, Automatic Test Equipment)的仪器上, 起到连接桥梁和资源分配的作用. 操纵管理开关矩阵的软件是路径管理器, 它实现开关矩阵的故障隔离、重构、路径搜索和切换. 为了实现开关矩阵的管理, 美国国防部定义开关矩阵功能与参数模型已经成为 ATS框架的重要组成[2]. 开关矩阵路径的动态搜索能力和通用性对 ATS的通用性、测试程序的可移植性和重主具有重要影响[3].

针对开关矩阵的建模及路径搜索问题, 文献[4]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; 文献[5]从数学的角度对各类开关模块进行了统一描述, 提出了统一的数学模型, 解决了开关矩阵的级联重构问题. 但是目前的方法都没有解决开关故障情况下的路径搜索问题, 以及多选择

收稿日期: 2008-12-25

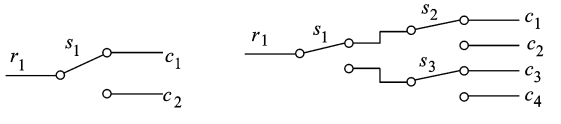
作者简介: 王国华(1976-), 男, 天津蓟县人, 讲师, wgh@buaa.edu.cn.

路径情况下路径的优化选择问题. 本文基于以上需求, 对开关矩阵的建模进行了研究, 并提出了开关矩阵的路径搜索算法和基于开关路径可靠度的路径选择方法.

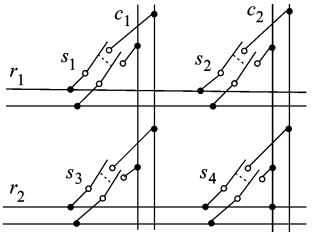
1 开关矩阵

开关矩阵是 ATS中信号传输的中枢, 是一种灵活的开关拓扑结构, 可以将任意输入、输出端口相连. 在被测设备 (UUT, Unit Under Test)测试过程中, 需要不断改变激励信号的类型和激励点位置, 还可能需要在多个 UUT输出点提取响应信号, 而借助于 ATE中开关系统的不同组态, 充分利用有限的 ATE资源, 就能够满足 UUT测试所需信号完备性的要求[6]. 由于开关系统在 ATE中的重要作用, 增强开关系统的容错能力及路径搜索能力是保证整个测试系统可靠运行的关键.

ATE上常用的开关资源有多种分类方法, 按功能分有射频开关、多路复用开关、功率开关和继电器开关; 按实现方式来分, 又可分为单刀单掷、单刀双掷、双刀单掷、双刀双掷、单刀多掷和总线形式的开关矩阵. 常见开的关矩阵形式如图 1.



a 单输入多输出 b 树形开关



c 开关矩阵

r_1, r_2) 开关矩阵的行顶点; c_1, c_2, c_3, c_4) 开关矩阵的列顶点; s_1, s_2, s_3, s_4) 开关.

图 1 开关矩阵物理模型

2 开关矩阵数学模型

2 1 开关矩阵的输入输出

虽然开关矩阵的种类很多, 但是总可以将其描述为一个 m 输入 n输出的系统, 本文后面提到的开关矩阵均是指级联后的开关矩阵. 一般将 m和 n较小的称为开关矩阵的行, 较大的称为开关矩阵的列, 将开关矩阵的输入和输出统称为顶点, 表示为

$$V = [v_1, v_2, , , v_m, v_{m+1}, v_{m+2}, , , v_{m+n}] \quad (1)$$

其中, $v_1 \sim v_m$与开关矩阵的行对应; $v_{m+1} \sim v_{m+n}$与开关矩阵的列对应.

2 2 开关矩阵路径模型

定义了开关矩阵的输入和输出之后, 还要描述开关矩阵内部的连接. 定义开关矩阵行、列之间的交点为路径节点. 由图 1可知, 每个路径节点可以包含多个开关. 对于 m @n 的开关矩阵, 共有 m @n 个路径节点, 路径节点矩阵为

$$P = (p_{ij})_{m@n} \quad (2)$$

其中, p_{ij}为一维不定长数组, $p_{ij}[0]$保存路径 p_{ij}的开关个数, $p_{ij}[k]$保存 p_{ij}中第 k个开关的开关号, 用来实现对该开关的打开和闭合操作. 定义开关矩阵的路径开关状态矩阵为

$$S = (s_{ij})_{m@n} \quad (3)$$

其中, s_{ij}为一维不定长数组, $s_{ij}[0]$保存 p_{ij}的接通或断开状态, $s_{ij}[k]$保存 p_{ij}中第 k个开关的打开或闭合状态. S又分为初始状态矩阵 S_d和当前状态矩阵 S_c. S_d用来保存初始状态下该路径的开关状态, $s_{dij}[0]$保存 p_{ij}是否存在短路或开路故障; S_c用来保存当前状态下该路径的开关状态, $s_{cij}[0]$保存当前状态下 p_{ij}的状态. 开关的状态可以分为以下几种, 如表 1.

表 1 开关状态取值

$s_{ij}[k]$取值	说 明
- 1	无连接关系
0	该开关为闭合状态
1	该开关为断开状态
2	该开关故障, 为常开状态
3	该开关故障, 为常闭状态

表 1中, 0和 1表示开关的正常断开与闭合状态; 2和 3表示开关的故障状态. P阵的每一个元素 p_{ij}路径长度定义为 1, 即若通过 p_{ij}能够实现从开关矩阵顶点 v_i到 v_j的通路, 则称从顶点 v_i到 v_j之间的路径长度为 1; 若由于路径节点的占用或故障, 从顶点 v_i到 v_j需要经过 q个路径节点, 则称顶点之间的路径长度为 q.

2 3 开关的故障模式

开关故障是导致开关矩阵拓扑结构发生改变的一个重要原因. 开关的故障模式分为开路故障和短路故障, 开关的故障会导致开关矩阵的可达性发生相应的变化.

在开路故障情况下, 该路径节点不能实现其所对应的行与列之间的连接, 要实现该行与列的连接必须通过其他路径节点进行中转.

在短路故障情况下, 开关拓扑结构发生变化. 因此, 短路故障存在一定的危险性. 在确认故障路径节点没有连接到设备或不会造成危险的情况下, 故障开关矩阵可以继续使用, 否则一定要进行

更换.

2.4　开关路径的可靠性

定义开关的可靠度为: 在规定的使用条件下, 在规定的时间内, 开关完成信号切换功能的概率.

定义第 i个开关当前切换的可靠度为

$$R_i(t) = \frac{n_i - r_i(t)}{n_i} \qquad (4)$$

其中, n_i为开关 i的额定闭合次数; $r_i(t)$为开关 i已经闭合的次数.

在利用 ATE对 UUT进行测试时, UUT的被测信号需要多个开关切换才能到达 ATE, 将其定义为信号路径, 则信号路径的可靠度为

$$R_p(t) = \prod_{k=1}^{l} R_k(t) \qquad (5)$$

其中, R_k为信号路径中第 k个路径节点的可靠度.

由信号路径的可靠度定义可知, 选择可靠度最大的路径, 可以实现开关切换的负载均衡. 为了实现开关可靠度的计算, 定义开关的切换次数矩阵为

$$C = (c_{ij})_{m\times n} \qquad (6)$$

其中, c_{ij}为不定长数组, $c_{ij}[k]$用来记录 p_{ij}中第 k个开关的切换次数. C又分为额定切换次数矩阵 C_d和实际切换次数矩阵 C_c, 分别用来记录该开关的额定切换次数和当前开关已经切换的次数. 利用 C_d和 C_c的计算可以得到可靠度矩阵为

$$R = (r_{ij})_{m\times n} \qquad (7)$$

其中, r_{ij}为一维不定长数组, $r_{ij}[0]$保存 p_{ij}的路径可靠度, $r_{ij}[k]$保存 p_{ij}中第 k个开关的可靠度.

3　路径搜索算法

3.1　无故障规则开关矩阵的路径搜索

规则开关矩阵是指开关矩阵的每一行都可以通过一个路径节点到达所有列.

开关矩阵的路径连接包括行行连接 (或列列)和行列连接. 对于无故障规则开关矩阵, 第 i行与第 j列的连接不需要路径搜索工作, 只需要查询行与列之间所对应的路径节点状态 $p_{ij}[0]$, 并根据路径状态和路径中开关的状态, 对开关进行闭合或打开操作即可.

对于 m×n的开关矩阵, 从第 i行到第 j列有 n个备选路径. 这时查询所有 $p_{ik}[0]$和 $p_{jk}[0]$ (k= 1~ n)都为断开状态的路径节点, 得 p个备选路径. 最后在 p个备选路径中, 分别计算由 $p_{ik}[0]$和 $p_{jk}[0]$构成的新的路径的可靠度, 并选择可靠度最大的路径作为最优路径. 列列之间的路径连接与行行连接相同.

3.2　不规则开关矩阵的路径搜索

在开关矩阵的拓扑结构不为规则矩形的情况下, 仅利用 P和 S不能满足路径查询的需求. 为了利用图论中的数学方法进行开关矩阵的路径搜索, 定义可达矩阵 A表示开关矩阵顶点之间的连接关系:

$$A = (a_{ij})_{k\times k} \qquad k = m + n \qquad (8)$$

其中, a_{ij}可以取值为 0或 1, 取 0时表示从顶点 v_i到 v_j无直接的通路相连, 取 1时表示从顶点 v_i到 v_j有一个路径节点相连.

由图论可知, 搜索 v_i到 v_j的路径, 只需 A进行自乘运算, 直到 A^k中 a_{ij}不为零. k即为从 v_i到 v_j所经历的路径节点数, a_{ij}即为从 v_i到 v_j的可选路径数, 记录 A^k的运算过程可得每一条路径所经历的路径节点, 并将结果保存在 E中. E为二维数组, 每一行代表一个可选择的路径, 行中的元素保存着路径节点.

由于在开关矩阵中搜索经过 k步所能到达的端点需要计算 A^k, 这样的计算量是非常大的, 不能满足 ATS运行时快速、动态路径搜索的要求. 用 A_i^k表示 A^k的第 i行行向量, 用 A_j^k表示 A^k的第 j列列向量. 由于计算从 v_i出发经过 k步所能到达的顶点, 只需求 A^k的第 i行元素即可. 由于 $A_i^k = A_i^{k-1} \otimes A = (a_{ij}^k)_{1\times n}$, 因此求 A_i^k只需求 A_i^{k-1}, 依此类推, 可大大减少计算量.

综上所述, 总结开关矩阵路径的搜索流程如图 2所示.

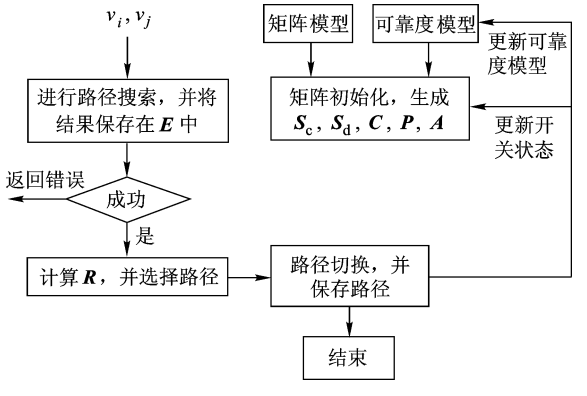


图 2　开关矩阵路径搜索算法

1) 构造开关矩阵模型. 若存在开关矩阵级联的情况, 则将级联开关矩阵虚拟成一个开关矩阵, 并生成 P和 S_d, 初始化 S_c等于 S_d, 根据可靠度模型生成 C.

2) 根据 P生成 A. 根据路径搜索需求 v_i, v_j, 对 A进行路径搜索运算. 若存在路径, 则将结果保存在 E中; 否则返回错误.

3) 计算 E中候选路径的可靠度, 并选择可靠

度最大的路径. 进行路径切换, 并将路径保存, 以便在路径断开的时候使用.

4) 更新开关矩阵可靠度模型、开关当前状态矩阵; 重新生成 A, 准备下一次路径搜索.

3.3 最大搜索次数

最大搜索次数 (即最长的路径)根据输入、输出为行 /行、列 /列、行 /列而异.

根据开关矩阵行、列的定义, 由开关矩阵的性质可知, 当输入、输出为行 /行时, 最长的路径要经过所有的行 (m 个), 而从行到行需要经过 2个开关节点, 因此最大路径长度为 2@(m - 1); 当输入、输出为列 /列时, 最长的路径要经过 m+ 1个, 而从列到列也需要经过 2个开关节点, 因此最大路径长度为 2@m; 当输入、输出为行 /列时, 最长的路径要经过所有的行 (m 个), 并在最后一行上选择一个路径节点输出信号, 因此最大路径长度为 2@(m - 1) + 1.

4 实例分析

设 2@3的开关矩阵, 如图 3. 其中开关 s_6 开路故障, 求 r_2到 c_3的最佳路径. 根据开关的额定切换次数和已知切换次数, 计算得各开关的 R 值如表 2所示.

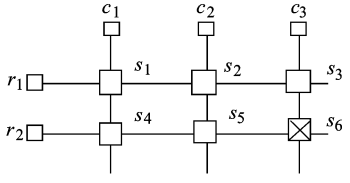


图 3 2@3故障开关矩阵

表 2 计算 R 值

开 关	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6
$R_i(t)$	0.654	0.651	0.650	0.652	0.653	0.651

根据图 3, 运算得到 A 值如表 3所示.

表 3 A值

顶 点	r_1	r_2	c_1	c_2	c_3
r_1	0	0	1	1	1
r_2	0	0	1	1	0
c_1	1	1	0	0	0
c_2	1	1	0	0	0
c_3	1	0	0	0	0

该开关矩阵为 2@3矩阵, 因此从 r_2到 c_3的最长路径为 3. 对表 1进行运算, 直到 r_2与 c_3相交处的值不为零为止. 经过计算得 A^3不为零, 如表 4所示. 结果表明从 r_2经过 3次开关切换, 有 2条路径可以到达 c_3.

表 4 A^3 运算结果

顶 点	r_1	r_2	c_1	c_2	c_3
r_1	0	0	5	5	3
r_2	0	0	4	4	2
c_1	5	4	0	0	0
c_2	5	4	0	0	0
c_3	3	2	0	0	0

记录 r_2到 c_3的路径得

$$E = \{\{s_4 \quad s_1 \quad s_3\}\{s_5 \quad s_2 \quad s_3\}\}$$

计算 2条路径所对应的可靠度如表 5所示.

表 5 候选路径的可靠度

路 径	$\{s_4 \quad s_1 \quad s_3\}$	$\{s_5 \quad s_2 \quad s_3\}$
可靠度	0.2771652	0.2763695

由表 5可知, 路径 $\{s_4 \quad s_1 \quad s_3\}$的可靠度高, 因此选择该路径实现信号连接.

5 结 论

针对 ATE开关矩阵中开关的使用均衡问题及开关故障情况下的路径搜索问题进行了研究. 结果表明: 本文提出的开关矩阵路径管理方法能够实现开关拓扑结构异常情况下的路径搜索, 解决了开关的使用均衡问题, 有助于提高开关矩阵的使用寿命和容错能力.

参考文献 (References)

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

[2] Malesich M. Advances in DoDps ATS framework [J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2008, 23(2): 11 - 16

[3] Krayewsky M, OpDonnell S. An alternative TPS rehost approach [C] //IEEE. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Orlando: IEEE, 2005: 277 - 282

[4] 赵瑞贤, 孟晓风, 王国华. 通用 ATE开关资源路径模型及应用 [J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(2): 181- 185
Zhao Ruixian, Meng Xiaofeng, Wang Guohua. General2utility testing path model of switches for ATE and application [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(2): 181- 185(in Chinese)

[5] 张玮, 沈士团, 陈星. 自动测试设备多开关模型的构造方法及其实现 [J]. 遥测遥控, 2003, 24(1): 25- 29
Zhang Wei, Shen Shituan, Chen Xing. A kind of modeling method and implementation for multiple switch modules in ATE [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2003, 24(1): 25 - 29(in Chinese)

[6] 李行善, 左毅, 孙杰. 自动测试系统集成技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 216- 217
Li Xingshan, Zuo Yi, Sun Jie. Integration technology of automatic test system [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 216- 217(in Chinese)

(编 辑: 刘登敏)