

文章编号: 1001- 2486(2008) 01- 0099- 05

基于非独立测试的诊断策略优化生成*

杨 鹏, 邱 静, 刘冠军

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 诊断策略优化设计是测试性设计中的一项重要内容。实际中的测试彼此间并非独立, 即测试费用依赖于测试的先后顺序, 针对这一问题, 提出将测试划分成不同的测试模式, 规定当一个测试序列中存在模式变换时必须考虑附加的转换费用。建立了同时考虑测试费用和模式转换费用启发式评估函数, 并基于该启发式评估函数设计了近似最优的搜索算法, 应用案例验证了本算法。试验表明该方法有效地解决了非独立测试的诊断策略优化生成问题。

关键词: 诊断策略; 测试性设计; 非独立测试; 启发式算法

中图分类号: TP39 **文献标识码:** A

Efficient Diagnostic Strategy Generation with Non-independent Tests

YANG Peng, QIU Jing, LIU Guan-jun

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Diagnostic strategy design is an important task in the design for testability (DFT). In light of the fact that the practical tests are non-independency or costs of the tests are precedence-dependent, tests were considered to be distributed among multiple modes, and additional transition costs were considered if a test sequence involved mode changes. Then test costs and mode transition costs were combined to establish a heuristic evaluation function (HEF). Based on this HEF, a suboptimal diagnostic strategy searching algorithm was presented. Several cases were used to verify this method, and the experimental results show that this method efficiently solves the problem of diagnostic strategy generation with non-independent tests.

Key words: diagnostic strategy; design for testability; non-independent test; heuristic algorithm

系统级测试和诊断策略设计又称为测试顺序优化生成, 它是测试性设计与分析的重要研究内容之一。其目的是设计一组测试序列, 使其在保证足够的故障隔离精度的前提下消耗尽可能少的期望测试代价(测试费用或故障隔离时间)。如果在产品研发阶段就制订出完善的测试与诊断策略, 则可以极大地降低产品维修保障费用, 尤其是故障检测和隔离费用^[1]。该问题引起了国内外学者的广泛关注^[2-8], 目前已有的研究是建立在测试独立假设基础上的, 即认为每个测试的费用与测试的先后顺序无关, 是常数, 而实际中的测试并非如此。根据 Turney 的条件测试费用理论^[9], 某项测试的执行将会影响到其后续测试的费用。例如检测车辆变速器和检测离合器均要求拆卸引擎以便实施检测, 则先被执行的检测必须计算拆卸费用, 而后一项检测不需计算拆卸费用, 可见这两项测试是非独立测试。针对这一问题, 提出把系统测试按照附加费用的不同划分为不同的模式, 将依赖于顺序的附加费用视为模式转换费用, 规定隶属同一模式的测试彼此相互独立, 在测试排序时不用考虑额外费用, 而不属于同一模式的测试在排序时就必须考虑模式之间的转换费用。例如可以把要求拆卸引擎的检测划入一种模式, 把不要求拆卸引擎的检测划入另一种模式, 再把拆卸和安装费用作为模式间的转换费用而从测试费用中分解出来, 这样划入同一模式的测试均成为相互独立的测试, 进而将涉及非独立测试的诊断策略问题转变为考虑模式转换费用的诊断策略问题。

* 收稿日期: 2007- 06- 10

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 杨鹏(1978-), 男, 博士生。

1 问题的数学描述

该问题可描述为一个五元组 $\langle F, T, P, M, D \rangle$, 具体定义如下:

(1) $F = \{f_0, f_1, \dots, f_l\}$ 表示单故障假设条件下系统的状态集, 其中 f_0 表示系统无故障的状态, f_i ($\forall i \neq 0$) 表示仅有第 i 故障发生的状态。

(2) $P = \{p_0, p_1, \dots, p_l\}$ 表示状态概率集合, 满足 $\sum_{i=0}^l p_i = 1$ 。

(3) $M = \{m_1, m_2, \dots, m_q\}$ 表示测试模式集合, C_{ij} 表示由模式 m_i 转换为 m_j 的费用。

(4) $T^k = \{t_1^k, t_2^k, \dots, t_{n_k}^k\}$ 表示模式 m_k 下可用的测试集, C_j^k 表示测试 t_j^k 的执行费用(或时间)。

(5) $D^k = [d_{ij}^k]$ 表示模式 m_k 下状态-测试相关矩阵, d_{ij}^k 表示模式 m_k 下测试 t_j^k 同状态 f_i 的因果关系, 规定若 t_j^k 可以检测 f_i , 则 $d_{ij}^k = 1$, 否则 $d_{ij}^k = 0$ 。

假设所有的测试均为二值测试, 若 t_j 执行前系统状态集为 X , 根据 t_j 的 Pass 和 Fail 两种输出, 将状态集分解为 X_p 和 X_f ($X_p \cup X_f = X$), 分别对应于两种输出情况下系统可能的状态集:

$$\begin{cases} X_p = \{f_i \mid d_{ij}^k = 0, \forall f_i \in X\} \\ X_f = \{f_i \mid d_{ij}^k = 1, \forall f_i \in X\} \end{cases} \quad (1)$$

随着测试序列的执行, 系统状态集不断被分解直至单个状态。不同的测试序列对应的诊断树的大小不同, 因此诊断策略优化问题等价于最优与或树的搜索问题, 用数学式描述为:

$$S_{opt} = \min_S \left\{ \sum_{i=0}^l p_i \left[\sum_{m_k \in M_i} \sum_{t_j^k \in T_i^k} C_j^k + \sum_{j=1}^{|M_i|-1} C_{M_i[j], M_i[j+1]} \right] \right\} \quad (2)$$

式中, $M_i (\subseteq M)$ 是诊断树 S 中隔离出状态 f_i 所使用的测试模式集, $|M_i|$ 表示模式数目; $T_i^k (\subseteq T^k)$ 表示在模式 $m_k (\in M_i)$ 下隔离状态 f_i 所使用的测试集, C_j^k 表示执行测试 $t_j^k (\in T_i^k)$ 的费用; $C_{M_i[j], M_i[j+1]}$ 表示序列中第 j 个测试模式转换为第 $j+1$ 个模式的费用。

2 搜索算法

2.1 启发式函数

Johnson 最早提出采用信息量作为测试选择的启发式函数^[2], 我们对该启发函数作改进得到如下启发式函数:

$$(k^*, j^*) = \arg \max_{m_k \in M, t_j^k \in T^k} \left\{ \frac{IG(X; t_j^k)}{C_j^k + C_{sk}} \right\} \quad (3)$$

式中, (k^*, j^*) 表示状态集为 X 时最佳测试为模式 m_k 下的测试 t_j^k ; x 表示前一个测试的模式为 m_x ; $IG(X; t_j^k)$ 表示测试与状态集的平均互信息, 根据互信息的对称性有:

$$IG(X; t_j^k) = H(X) - H(X \mid t_j^k) = H(t_j^k) - H(t_j^k \mid X) = H(t_j^k) \quad (4)$$

式中, $H(X)$ 和 $H(X \mid t_j^k)$ 分别为 t_j^k 执行前后系统状态熵; $H(t_j^k)$ 和 $H(t_j^k \mid X)$ 分别为给定系统状态前后测试熵。显然当给定系统状态时有 $H(t_j^k \mid X) = 0$ 。测试熵由下式计算:

$$H(t_j^k) = - \left\{ P(t_{jp}^k) \log_2 P(t_{jp}^k) + P(t_{jf}^k) \log_2 P(t_{jf}^k) \right\} \quad (5)$$

式中, $P(t_{jp}^k)$ 和 $P(t_{jf}^k)$ 分别表示 t_j^k 输出为 Fail 和 Pass 的概率:

$$P(t_{jf}^k) = \frac{\sum_{f_i \in X_f} p_i}{\sum_{f_i \in X} p_i} = \frac{\sum_{f_i \in X} (d_{ij}^k \cdot p_i)}{\sum_{f_i \in X} p_i} \quad (6)$$

$$P(t_{jp}^k) = 1 - P(t_{jf}^k)$$

此外, 根据文献[2]中所述的分辨启发式函数, 提出适合非独立测试的分辨启发函数:

$$(k^*, j^*) = \arg \max_{m_j \in M, t_j \in T^k} \left\{ \frac{P(t_{j'}^k) \cdot P(t_{j''}^k)}{C_{j'}^k + C_{xk}} \right\} \quad (7)$$

由(3)式和(7)式选择的最优测试是相同的,后者因为不用计算对数,因此更适合于复杂系统的计算。

2.2 诊断树的生成

启发式函数只能帮助选择一个测试,要完成全面的故障隔离,还需构造一个完整的诊断树。诊断树的形成过程是一个按照特定的顺序由根节点不断向下扩展的过程,算法步骤设计如下:

Step 1 创建一个集合 Ψ , 令 $\Psi = \{F\}$, 该集合用以存放待处理的临时状态集;再创建一个空的诊断树 S , 用以存放已生成节点,重复执行 Step 2, 直到 $\Psi = \phi$, 运算结束, 输出 S 。

Step 2 从 Ψ 中选择一个概率最大的集合, 如 X , 判断其是否可分解。

Step 2.1 若 X 不可分解, 则直接将 X 从 Ψ 移到 S 中, 再转 Step 2。

Step 2.2 若 X 可分解, 则根据(3)式从候选测试集中选择一个测试, 如 t_j 。

Step 2.3 根据(1)式得到由 t_j 产生的两个子集 $X_{j'}$ 和 $X_{j''}$, 将其存入 Ψ ; 再将 X 从 Ψ 中移出, 并与 t_j 一起存入 S 中。再转 Step 2。

算法中将多次判断当前状态集是否可分解,事实上,不可分集有这样一个特点,即任何测试与该集合的互信息为零。若对 $\forall t_j \in T$, 都有 $IG(X; t_j) = 0$, 则 X 为不可分集。

3 应用分析

下面用一个测试案例进行说明。图 1 所示组合电路由三个与门 g_1, g_2, g_3 和两个或门 g_4, g_5 级联构成。 $\underline{x} = (x_1 x_2 x_3 x_4 x_5)$ 、 $\underline{z} = (z_1 z_2 z_3)$ 和 $\underline{y} = (y_1 y_2)$ 是电路中可用的观测点。

首先对每个元件定义两种故障模式(元件输出端 $s - a - 0$ 或 $s - a - 1$), 因此在单故障条件下系统可能的状态有 11 种(包括无故障状态 f_0), f_1, \dots, f_5 依次为门 g_1, \dots, g_5 的 $s - a - 0$ 故障, f'_1, \dots, f'_5 依次为门 g_1, \dots, g_5 的 $s - a - 1$ 故障。

可观可控的输入包括: \underline{x} 和 \underline{z} , 这两组输入位置不同, 相互切换时必须计算转移费用, 因此把这两个输入位置定义为两种测试模式, 测试激励与响应如表 1 所示。规定模式间的转换费用分别为 $C_{12} = C_{21} = 5$ 。

表 1 各模式下测试的定义

Tab. 1 Test definition under certain test mode

模式	测试	费用	可控输入		可观输出
			\underline{x}	\underline{z}	\underline{y}
m_1	t_1^1	5	(1, 1, 1, 1, 1)		(1, 1)
	t_2^1	5	(0, 1, 1, 1, 1)		(1, 1)
	t_3^1	5	(x, 0, 1, 1, x)		(1, 1)
	t_4^1	5	(1, 1, 0, x, 1)	(1, 1, x, 0, 1)	(1, 1)
	t_5^1	5	(1, 1, 1, 1, 0)		(1, 1)
	t_6^1	5	(0, 1, 0, x, 1)	(0, 1, x, 0, 1)	(0, 1)
	t_7^1	5	(1, 1, 0, x, 0)	(1, 1, x, 0, 0)	(1, 0)
	t_8^1	5	(x, 0, 0, x, x)	(x, 0, x, 0, x)	(0, 0)
m_2	t_1^2	3		(1, 0, 0)	(1, 0)
	t_2^2	3		(x, 1, x)	(1, 1)
	t_3^2	3		(0, 0, 1)	(0, 1)
	t_4^2	3		(1, 0, 1)	(1, 1)
	t_5^2	3		(0, 0, 0)	(0, 0)

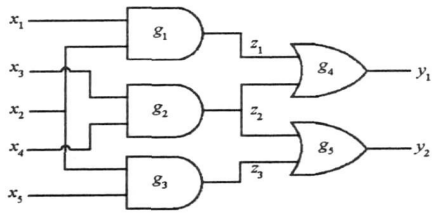


图 1 组合电路

Fig. 1 Combinational circuit

可观测的输出为 \underline{y} , 一种激励矢量加上观测输出构成为一个测试。例如在 (z_1, z_2) 输入(1, 1) 并且在

(y_1, y_2) 观测视为一个测试, 若观测值为 $(1, 1)$, 则测试结果为 (P) ass, 否则为 (F) ail, 可检测 f_4 (g_4 输出为 $s-a-0$ 的故障)。

表 1 中 x 取值为 1 或 0。当只考虑测试输出为 Fail 时可能发生的故障, 并假设系统任意时刻最多只有一个故障发生, 则得到状态-测试相关性矩阵如表 2 所示。在不考虑具体输出值时, 测试 t_2 和 t_5 、 t_1 和 t_3 、 t_2 和 t_4 分别为冗余测试。为了简化分析, 可以将上述冗余测试分别合并为一个测试, 运算中暂不考虑 t_5 、 t_3 、 t_4 。

表 2 系统状态-测试相关性矩阵

Tab. 2 System state and test dependency matrix

状态	m_1								m_2					状态概率
	t_1^1	t_2^1	t_3^1	t_4^1	t_5^1	t_6^1	t_7^1	t_8^1	t_1^2	t_2^2	t_3^2	t_4^2	t_5^2	
	测试费用								测试费用					
	5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	
f_0														0.9
f_1				1				1						0.01
f_2		1				1								0.01
f_3				1		1								0.01
f_4	1	1	1	1	1			1	1	1		1		0.01
f_5	1	1	1	1	1	1				1	1	1		0.01
f'_1								1						0.01
f'_2								1	1	1				0.01
f'_3								1						0.01
f'_4								1			1		1	0.01
f'_5								1	1				1	0.01

应用本算法得到诊断树如图 2 所示。按照 (2) 式计算可知这 2 棵诊断树的平均费用均为 15.34。最优解不唯一, 是因为在构建模型的时候, 故障概率都相等, 而且同一模式下各测试费用相等。

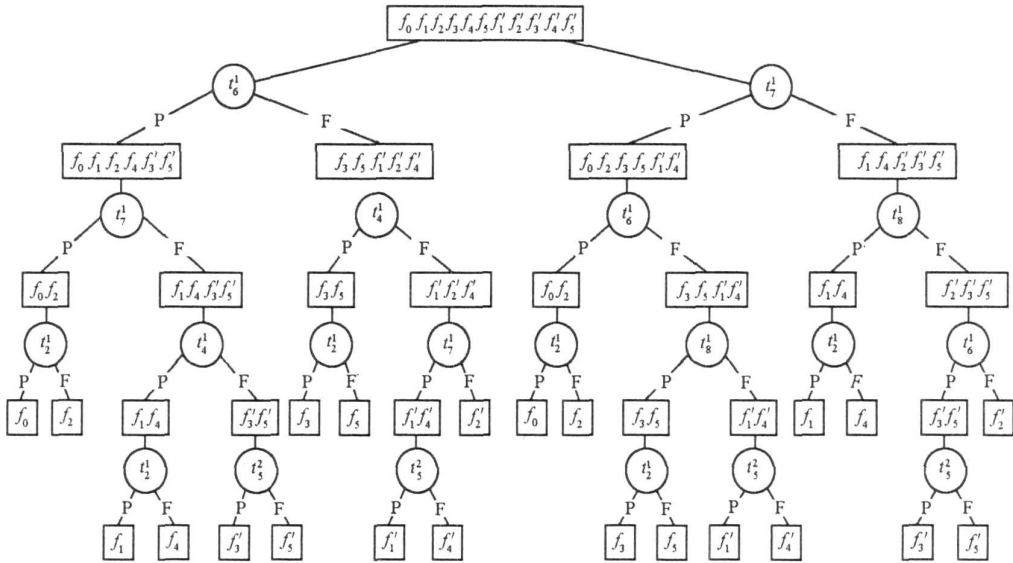


图 2 最优诊断策略

Fig. 2 Optimal diagnostic strategy

为了进一步验证本文算法, 应用文献中的实例进行了仿真计算。表 3 中列出了各系统主要统计数据, 包括被测系统的状态数、候选的测试数以及模式数目。应用本文的优化搜索算法得到诊断策略的平均测试费用如表 3 所示, 这些实例有效地验证了本算法对于非独立测试下的诊断策略优化问题的有效性。

表 3 测试实例的主要参数及计算结果

Tab.3 Real-world test cases and computation results

编号	系统名称	状态数	测试数	模式数	平均测试费用
1	汽车刹车系统 ^[9]	8	9	2	3 164
2	阿波罗检测系统 ^[2]	10	15	2	3 559
3	超外差接收机 ^[2]	22	36	3	4 953
4	反坦克导弹发射系统 ^[10]	25	22	4	6 035

4 结 论

在复杂的系统中,通常只需将故障隔离到设备或组件等可更换单元,因此研究系统级的故障诊断策略在机内测试设计和测试性初步设计应用中具有非常重要的意义。本文针对测试费用依赖于测试先后顺序,即非独立测试下的诊断策略优化问题,提出将模式转换费用从测试费用中独立出来单独考虑,制订了考虑模式转换费用的启发式函数,并构造了近似最优的启发式搜索算法,仿真计算表明该方法有效地解决了这一问题。

参 考 文 献:

- [1] 田仲,石君友.系统测试性设计分析与验证[M].北京:北京航空航天大学出版社,2003:171-213.
- [2] Pattipati K R, Alexandridis M. Application of Heuristic Search and Information Theory to Sequential Fault Diagnosis[J]. IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics, 1990, 20(4): 872-887.
- [3] Tu Fang, Pattipati K R. Robust Strategy for Sequential Fault Diagnosis[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2003, 33(1): 86-99.
- [4] Pietersma J, Gemund A V, et al. A Model-based Approach to Sequential Fault Diagnosis[C]//Proceedings of Autotestcon, 2004: 621-627.
- [5] Žužec A, Biasizzo A, Novak F. Sequential Diagnosis tool[J]. Microprocessors and Microsystems, 2000, 24: 191-197.
- [6] Ruan S, Tu F, Pattipati K R. On Multi-mode Test Sequencing Problem[C]//Proceedings of Autotestcon, 2004: 194-201.
- [7] 石君友,田仲.故障诊断策略的优化方法[J].航空学报,2003,24(3):212-215.
- [8] 景小宁,李全通,等.基于信息熵的最少测试费用故障诊断策略[J].计算机应用,2005,25(2):417-419.
- [9] Turney A. Types of Cost in Inductive Concept Learning[C]//Workshop on Cost-sensitive Learning at ICML, 2000: 15-21.
- [10] Simpson W R, Sheppard J W. System Test and Diagnosis[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1994: 91-138.