

基于二次线性插值的测试性分配方法研究

王红霞, 刘倩倩

(海军工程大学, 武汉 430033)

摘要: 为了实现对测试性指标的合理高效分配, 考虑当前测试性发展的主流技术, 以及分析测试性分配影响因素的基础上, 提出了基于二次线性插值的测试性分配方法; 运用测试性建模的理念, 首先对系统进行横向划分和纵向划分, 实现 LRU 与功能属性之间的映射关系, 并对 LRU 进行聚类, 根据聚类结果对指标进行第一次分配, 即把指标分配给功能属性; 然后, 在功能属性的要求下, 考虑各 LRU 的故障率、测试和故障扩散强度等特性参数, 进行第二次插值分配; 最后用实例进行了验证, 结果表明: 分配过程简单, 结果可信无需修正, 更符合实际要求; 提出的方法打破了传统级级分配测试性指标的理念, 采用两次分配即可实现系统级指标到 LRU 级指标的分配。

关键词: 指标分配; 二次线性插值; 测试性

Research on Testability Allocation Based on Secondary Linear Interpolation Method

Wang Hongxia, Liu Qianqian

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to achieve the rational allocation of testability index, the secondary linear interpolation method for testability allocation was proposed, considering the mainstream technology of the testability, and analyzing the main factors affecting the testability allocation. Using the testability modeling concept, firstly, the mapping relationship between the LRU and function attributes can be obtained by using the system partition transverse and longitudinal, and the LRU was clustered, the testability index was distributed for the first time according to the clustering results, namely the index was assigned to function attributes; And then, at the range of the function attributes, considering the characteristic parameters, such as the LRU failure rate, test, and fault diffusion intensity, on the second distribution of interpolation. Finally, the method has been verified with a practical example, the results show that the allocation process is simple and believable, results without correction, conforms to the actual requirements. the proposed method has break the traditional indicators, which can realized the testability allocation of the system level to the LRU level using secondary linear interpolation.

Keywords: testability allocation; secondary linear interpolation method; testability

0 引言

测试性分配^[1]是将要求的系统测试性诊断指标逐级分配给子系统、设备、部件或组件, 作为它们各自的测试性指标提供给设计人员, 产品的设计必须满足这些要求。

现有的测试性分配方法有等值分配法^[2]、经验分配法^[2]、故障率分配法^[2]、加权分配法^[2]、综合加权分配法^[3]、优化分配方法^[4-6]和基于 AHP 分配法^[7-8]等。其中等值分配法直接令各组成单元指标等于系统指标, 实际上未做分配; 经验分配法依赖于设计者的经验, 主观性强, 故障率分配法考虑因素单一, 需人为调整分配值; 加权分配法需人为调整分配值; 综合加权法需主观确定个别参量, 优化分配法考虑目标单一, 获得单个目标下的最优解; 基于 AHP 的方法将决策理论引入指标分配, 计算过程繁琐。故障率分配法、加权分配法、基于 AHP 的方法均可能使分配值大于 1。

针对当前测试性发展的主流技术和现有测试性分配方法的不足, 将测试性建模中的一些理念, 如系统划分, 故障与测试之间的相关矩阵, 故障扩散强度等, 带入到测试性分配方法中, 使其指标分配与测试性设计、分析和验证紧密结合。

故障隔离率的计算涉及模糊度, 即隔离故障到 L 个模糊组, 隔离率的分配与检测率的分配方法不同, 文中的测试性指标分配主要是指故障检测率的分配。

1 测试性分配

1.1 测试性分配的数学模型^[1]为

$$P_{ia} = f_1(P_{sr}, K_i), i = 1, 2, \dots, N$$

$$P_s = f_2(P_1, P_2, \dots, P_N)$$

$$P_s \geq P_{sr}$$

式中, P_{sr} 为给定系统测试性要求指标; P_{ia} 为系统第 i 个组成单元的分配值; K_i 为第 i 个 LRU 特性参数; N 为系统组成单元个数; P_s 为根据各单元指标计算得出的系统指标。

1.2 测试性分配原理

测试性设计的最终目的是要实现 LRU 故障时能被快速、有效地检测和隔离, 而测试性指标分配的目的是要在设计时就

收稿日期: 2014-02-24; 修回日期: 2014-03-29。

基金项目: 总装预研基金项目(9140A27020113JB11393)。

作者简介: 王红霞(1978-), 女, 博士, 主要从事测试性与综合诊断方向的研究。

要明确 LRU 故障时能被检测的可能概率。分配是从整体到局部，由大到小的分解过程，要使整体和部分协调一致。按照 GJB2547—1995，和目前现有的维修性指标、测试性指标分配方法，都是按照相同的方法一级一级分配指标，对于大系统，从系统级到 LRU 级有 5 级则至少要进行 4 次分配。因此借鉴于测试性信号流建模方法，采用两次分配即可实现系统级到 LRU 级的指标分配。第一次分配是横向分配，把指标先分配给功能属性，第二次分配是在功能属性范围之内纵向分配，把指标分配给 LRU。两次分配都采用线性插值法，关键在每次的特性参数不同。

1.3 线性插值法

如果系统 LRU 分配的测试性指标与其特性参数为成正比关系，把对应最大特性参数 k_{max} 分配的指标用 P_{max} 表示，则测试性分配的线性插值公式为：

$$\frac{P_{max} - P_{sr}}{K_{max} - K_s} = \frac{P_{ia} - P_{sr}}{K_i - K_s}$$

即：

$$P_{ia} = P_{sr} + \frac{P_{max} - P_{sr}}{K_{max} - K_s} (K_i - K_s)$$

式中， K_s 为特性参数的均值。

测试性指标范围为 $[0, 1]$ 之间，最大为 1，因此在计算时， P_{max} 可取值 1。

2 特性参数

2.1 第一次分配特性参数

当前测试性领域最有效的建模方式是信号流（多信号模型或混合诊断模型），在建模之前首先要确定系统的结构、功能属性和测试属性，建模人员要清楚系统结构与功能属性、功能属性与测试之间的映射关系，才能采用信号流建模。所谓系统结构与功能属性、功能属性与测试之间的映射关系，实质就是 LRU 与测试之间的关系。因此在测试性分配时也考虑 LRU 与测试的关系，即能减少测试性分配级间的次数。

在建立结构与功能属性之间的映射时，要对系统进行结构分解和功能分解，一般来说，在粗粒度上，多采用结构分解，在细粒度上多采用功能分解，采用模糊聚类的目的是建立结构分解与功能分解之间的映射，在此基础上对结构分解的底层 LRU 进行划分。关于采用模糊聚类对系统划分的方法详见文献 [9]。

第一次分配的特性参数可通过构造各子功能两两之间的布尔矩阵计算获取。

布尔矩阵 F 定义为：如果子功能 F_i 为子功能 F_j 的前提或者相关，则 $f_{ij} = 1$ ；如果子功能 F_i 与子功能 F_j 无关或不为其前提，则 $f_{ij} = 0$ 。布尔矩阵不具有传递性，通过两两之间计算矩阵中的元素。则 f_{ij} 可表示为：

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, \text{子功能 } f_i \text{ 是子功能 } f_j \text{ 的前提} \\ 0, \text{子功能 } f_i \text{ 与子功能 } f_j \text{ 不相关} \end{cases}$$

则特性参数

$$K_i^1 = \sum_j f_{ij}$$

如果布尔矩阵中的元素都为 0，即各个子功能均不相关，

则线性插值法退化为等值分配法，各子功能的测试性指标等于系统指标。

2.2 第二次分配特性参数

现有测试性分配方法考虑的影响因素有：故障率、重要度、复杂度、MTTR、故障检测难易程度等。

故障率，是考虑故障率大的单元，其分配的测试性指标应越高。

重要度，是考虑重要单元对于系统性能和功能影响较大，发生故障时造成的损失就较大，应分配较高的指标。

复杂度，是考虑系统组成的复杂程度，越复杂越易发生故障，应分配较高的指标。

MTTR，是维修性指标，旨在降低故障诊断时间，要求 MTTR 较小的 LRU，分配指标时应取较大的值。

故障检测难易程度，是考虑单元发生故障是否可检测，对于不可测的故障分为两种，检测这些故障比较困难或是根本不能实现检测。对于前一种，若要检测这些故障并进行测试性设计，需要付出高昂的代价；对于后一种，只能降低检测率。

故障率、重要度和复杂度是从单元的角度，即单元正常与否，发生故障的可能性考虑；MTTR 和故障检测难易程度是从检测单元发生故障的难易程度考虑。因此文中考虑的因素包括两方面，故障率和测试；从两个角度刻画故障率，一个角度刻画测试。

故障率大的单元应该分配大的指标。而实际系统中，有一种传播型故障^[10]，对系统危害极大，这种故障是指一种故障模式的故障率低，但一旦发生则会传播扩散到其它元件，造成影响的规模较大。若对这种传播型故障的测试性设计不完备，一旦发生而没有正确检测和隔离，给使用方造成的风险将与常见故障风险总和相提并论。因此对这种故障率小的单元也应该分配大的指标。

对于故障率大的单元用故障率来刻画，故障率小的单元用故障传播强度^[10]（是指故障传播的能力。扩散强度越大，则表示故障通过此线路越容易进行扩散，同时波及的范围也就越大。）来刻画。测试用代价来刻画，包括时间、费用等。

则第二次分配的特性参数可用下式计算：

$$K_i^2 = P_i \cdot I_i \cdot T_i$$

其中： P_i 表示第 i 个 LRU 的故障概率，故障率可从可靠性数据获取，或者通过蒙特卡罗分析获取；

I_i ：表示第 i 个 LRU 发生故障时的故障传播强度， I_i 的计算方法详见文献 [10]；

T_i ：表示测试第 i 个 LRU 故障时的测试代价，包括时间、费用等， $T_i = T_i (BIT) + T_i (ATE)$ ；当某 LRU 仅仅选用 BIT 测试时， $T_i (BIT) = 2$ ，当某 LRU 仅选用 ATE 测试时， $T_i (ATE) = 1$ ；当某 LRU 选用 BIT 和 ATE 测试时， $T_i = T_i (BIT) + T_i (ATE) = 3$ ，当某 LRU 没有设置测试方式或者不可测时， $T_i = 0$ 。 T_i 也可取其他值，但要反映 BIT 和 ATE 之间的关系。

3 测试性分配方法及实例

3.1 测试性分配步骤

(1) 系统划分，使用模糊聚类方法对系统进行划分，包括

结构划分和功能划分, 结构划分即划分为定义清楚的 LRU, 目标是要明确 LRU 的层次; 功能划分, 即信息流分析, 在定义清楚的 LRU 上分配详细的子功能; 在此基础上, 能实现结构划分底层 LRU 的聚类。

(2) 构造各子功能两两之间的布尔矩阵;

(3) 根据布尔矩阵, 计算各子功能特性值, 并根据线性插值给各子功能分配测试性指标。

(4) 确定组成每个子功能的 LRU 的特性参数。

(5) 计算第 i 个 LRU 分配的测试性指标 P_{ia} , 其中 P_{\max} 可取值为 1。

3.2 实例

电路由一级放大电路 (R_1 、 R_2 、 R_3 与 A_1)、低通滤波器 (R_4 与 C_1) 和二级跟随放大电路 (A_2) 3 个子电路组成, 如图 1 所示, 系统级指标为 0.98。

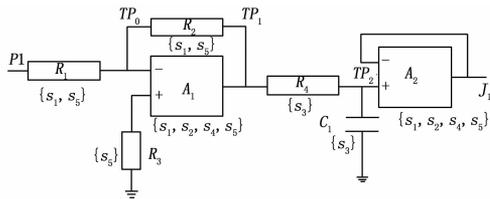


图 1 电路示例

通过电路功能原理分析, 影响放大电路完好的功能属性主要有: s_1 ——放大增益、 s_2 ——信号线性度、 s_3 ——低通截止频率、 s_4 ——信号失真度和 s_5 ——放大器直流偏移 5 个指标。对电路来说, 任何一个参数出现问题, 电路都属于不正常 (即故障)。

R_1 、 R_2 与 R_3 状态影响参数 s_5 , R_1 和 C_1 状态影响参数 s_3 ; A_1 、 A_2 、 R_1 和 R_2 状态影响参数 s_1 等。根据多信号模型的建模原理, 电路元件与测试点、测试之间的关系如表 1 所示。

根据测试性分配方法步骤计算各 LRU 分配的指标。

Step 1: 系统划分, 根据模糊聚类的系统划分方法, 划分的结果为 $\{A_1$ 、 $A_2\}$ 、 $\{R_4$ 、 $C_1\}$ 和 $\{R_1$ 、 R_2 、 $R_3\}$ 。

Step 2: 构造 s_1 、 s_3 和 s_5 两两之间的布尔矩阵,

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Step 3: 计算第一次分配的特性参数,

$$K_{s_1}^1 = 2, K_{s_3}^1 = 1, K_{s_5}^1 = 1$$

则 s_1 、 s_3 、 s_5 分配的指标分别为: 1, 0.97, 0.97。

Step 4: 根据 LRU 的概率, 故障传播强度和测试代价, 计算特性参数如表 1 所示, 为简化计算, 故障传播强度为 LRU 影响的功能个数。本示例中只有预设的测试点, 测试功能时需要外部的测试设备, 为简化计算测试代价为测试点的个数。

Step 5: 根据插值公式计算的 LRU 指标如表 1 所示。

计算结果分析: 分配结果中有的 LRU 分配的指标为 1, 是由于插值公式的 P_{\max} 取值为 1 导致, 使其稍微偏大, 但不影响整个系统中各个 LRU 分配指标之间的关系, 如果能准确知道 P_{\max} 值, 分配的结果则符合实际要求; 分配结果最大值为 1, 所以结果不用人为再调整。

表 1 LRU 与测试点、测试、概率、特性参数、故障检测率

	TP ₁				TP ₂	J ₁				P (* 10 ⁻⁶)	(* 10 ⁻⁶)	FDR
	S ₁	S ₂	S ₄	S ₅	S ₃	S ₁	S ₂	S ₄	S ₅			
R1	1			1		1			1	80	320	1
R2	1			1		1			1	80	320	1
R3				1					1	30	60	0.903
A1	1	1	1	1		1	1	1	1	150	1200	1
R4					1					80	80	0.94
C1					1					120	120	1
A2						1	1	1	1	150	600	1

4 结论

从测试性建模评估测试性指标的角度考虑测试性分配, 系统划分、多信号模型中的测试与故障之间的相关矩阵等与合理分配测试性指标有重要的关系。文中提出的方法打破传统级级分配测试性指标的理念, 采用两次分配即可实现系统级指标到 LRU 级指标的分配。实例证明, 分配过程简单, 结果可信, 更符合测试性实际要求。

参考文献:

- [1] 田 仲. 系统级测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2009.
- [2] 田 仲. 测试性分配方法研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25 (5): 607-610.
- [3] 李景熹, 刘 刚, 狄 鹏, 等. 舰船装备测试性指标综合加权分配方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32 (6): 108-109.
- [4] 王宝龙, 黄考利, 苏 林, 等. 基于遗传算法的复杂电子装备测试性优化分配 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (7): 925-928.
- [5] 冉红亮, 张 琦, 朱春生, 等. 一种基于多目标优化的测试性分配方法 [J]. 中国机械工程, 2011, 22 (15): 1775-1779.
- [6] 张 琦, 朱春生, 冉红亮, 等. 基于 NSGA-2 的测试性指标分配方法 [J]. 南京理工大学学报, 2012, 36 (4): 650-655.
- [7] 李金龙, 陶凤和, 贾长治, 等. 基于 AHP 的测试性分配方法研究 [J]. 中国测试, 2010, 36 (2): 30-33.
- [8] 沈宗林. 装备系统级测试性分配技术研究及应用 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [9] 王红霞, 叶晓慧, 刘双双. 测试性分析中基于模糊聚类的系统划分方法研究 [J]. 微电子学与计算机, 2010, 27 (7): 177-180.
- [10] 李天梅, 邱 静, 刘冠军. 基于故障扩散强度的故障样本选取方法 [J]. 兵工学报, 2008, 28 (7): 829-833.