测试性分配方法研究

田 仲
(北京航空航天大学 工程系统工程系)

摘 要 研究了系统测试性指标与系统组成单元指标之间的关系,分析了确定测试性指标的各主要影响因素,进而导出了测试性分配的基本要求、数学模型和工作程序. 在此基础上,文章给出了 4 种用于不同情况下的测试性分配方法:前 2 种是基于系统单元的复杂度(故障率)或重要度(故障影响)的分配方法;第 3 种是综合考虑各影响因素的加权分配方法;第 4 种是系统中有老成品时的分配方法. 这些分配方法都可以实际应用于工程设计.

关键词 故障检测; 故障诊断; 分配额
分类号 V 448.151

在新系统设计要求中规定有机内测试(BIT)、测试性和故障诊断的定量指标,如故障检测率、隔离率和虚警率等. 测试性分配就是把系统要求指标按一定方法合理地分配给其各级组成产品,如子系统、设备、外场可更换单元或组件等,并写入相应的设计任务书或技术合同,以便各级设计人员明确测试性设计要求,研究实现这个要求的可能性及方法,开展相应的设计工作. 测试性分配是重要的系统设计工作之一[1],本文研究了在不同条件下使用的测试性、诊断指标分配方法,目的是希望能够解决进行测试性或诊断指标分配的技术方法问题.

1 基本要求和主要影响因素

系统测试性指标与其组成单元指标之间是函数关系. 测试性分配的基本要求是:在使用要求和系统特性等约束条件下,由系统要求指标求得各组成单元的指标,并保证由各组成单元分配指标综合得到的系统指标等于或大于原要求指标. 在数学上可表示为

$$P_i = f_1(P_r, K_i) \qquad i = 1, 2, \cdots, n \tag{1}$$

$$P_s = f_2(P_1, P_2, \cdots, P_i, \cdots, P_n) \tag{2}$$

$$P_s \geqslant P_r \tag{3}$$

式中 P_r 是系统测试性要求指标; P_i 和 K_i 是系统第 i 个组成单元的分配额及约束条件; n 为系统组成单元个数; P_s 是根据各单元指标计算得出的系统指标.

当各组成单元指标已知,计算系统指标时,主要考虑诊断能力问题,即发生和诊断的故障次数或相关故障率. 对于电子系统很容易找出 P_s 与 P_i 函数关系的具体表达式. 以故障检测率为例,根据其定义有

$$P_s = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{Di} \Big\backslash \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \qquad P_i = \lambda_{Di} / \lambda_i$$

所以

$$P_s = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i P_i \Big\backslash \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{4}$$

式中 λ_i 为第 i 个组成单元的故障率; λ_{Di} 为第 i 个组成单元检测的故障率. 综合式(3)和式(4)可知,测试性指标分配结果必须满足以下关系:

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i P_i \Big\backslash \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \geqslant P_r \tag{5}$$

如不考虑任何约束条件,(5)式有无数个解. 其中之一是取 $P_i = P_r$ ($i = 1, 2, \cdots, n$),即等值分配法,而其他解还没有简便的方法可以求出. 因为系统的各组成单元的重要性、可靠性和维修性要求等不会完全相同,等值分配法明显是不合理的,所以还必须分析影响测试性分配的有关因素,找出函数 f_1 的具体表达式,建立测试性分配的数学模型. 进行测试性分配时要考虑的主要因素是系统使用要求和各组成单元的特性,其中主要是重要性、可靠性和维修性要求、设计和实现费用等. 它们与确定各组成单元测试性指标直接有关,是分配时应尽可能考虑的约束条件.

2 测试性分配模型和工作程序

为了能简单方便地考虑影响测试性分配的主

收稿日期: 1998-06-04 作者 男 63 岁 研究员 100083 北京

要因素, 定义一个影响系数 K 作为分配的基础参数. 每个系统组成单元有其对应的基础参数, 其值大小由考虑的影响因素确定, 其函数关系如下:

$$K_i = f_3(\lambda, F, M, C) \tag{6}$$

式中 K_i 是第 i 个组成单元的基础参数; λ 是代表复杂度或可靠性要求影响的参数; F 是代表重要度或故障影响的参数; M 和 C 分别是表示维修性要求和设计实现费用的影响参数. 确定 K_i 值时, 应保证它与测试性指标分配值成正比关系, K_i 值的具体确定方法见后面 3, 4 节.

与各组成单元类似, 系统也有对应的作为其指标基础的参数 K_s, 它与各组成单元基础参数 K_i 的关系为

$$K_s = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i K_i \Big\backslash \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{7}$$

(7) 式与公式(4) 具有相同的函数形式, 这样可以保证以 K_i 为基础参数求得的各组成单元的分配值 P_i 满足公式(5) 的要求.

一般系统的要求指标均小于 1, 而很少等于 1. 各组成单元的指标小于或大于系统指标, 当然也可能等于系统指标, 其量值范围是 0~ 1. 根据前面的分析, 各组成单元测试性指标分配值与其基础参数为正比关系, 如果把对应最大基础参数 K_{max} 的组成单元指标分配值用 P_{max} 表示, 则可得出如下关系式:

$$\frac{P_{max} - P_r}{K_{max} - K_s} = \frac{P_i - P_r}{K_i - K_s}$$

$$P_i = \frac{P_{max} - P_r}{K_{max} - K_s}(K_i - K_s) + P_r \tag{8}$$

这样, 知道有关基础参数 K_i 并选取 P_{max} 为大于 P_r 的最大可能实现值后, 就可以按公式(7) 和公式(8) 求得各组成单元的分配值. 由于分配时的具体情况不同, 确定 K_i 时考虑的影响因素和方法不同, 因而就产生了不同的具体分配方法.

不管是把系统指标分配给各组成单元, 还是把组成单元指标分配给其下一级的组件, 分配工作过程都是一样的. 以系统级为例, 测试性指标分配工作程序如图 1 所示.

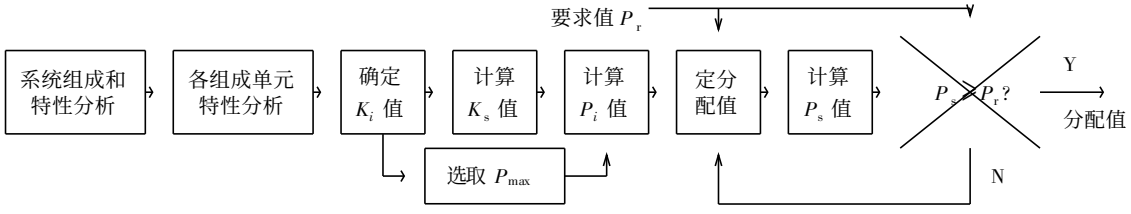


图 1 测试性分配工作程序

系统的测试性指标要求值 P_r 是订购方规定的, 或者从上一级大系统分配而来的. 根据系统组成分析确定要把指标分配给哪几个组成单元. 通过对系统特性和组成单元特性进行分析, 了解各组成单元的相对复杂度、重要度、故障修复时间要求和有关费用情况, 依据当时掌握的有关数据确定分配基础参数 K_i 值. 在此基础上, 可用公式(7) 计算出 K_s 值, 选取 P_{max} 值, 进而可用公式(8) 计算出各组成单元的 P_i 值. 根据 P_i 值初定各单元的分配值时, 一般取 2 位小数即可. 再用公式(4) 由初定分配值计算 P_s 值, 应保证 $P_s \geqslant P_r$, 否则应稍增加初定分配值. 如果确定分配值时, 对于 P_i 的第 3 位小数不用四舍五入的办法而是非零就进位, 这样得到的分配值可保证 $P_s \geqslant P_r$, 可省去验算 P_s 值的麻烦.

3 按复杂度分配方法

一般情况下, 系统各组成单元的基本构成部件越多就越复杂, 其故障率也越高, 发生了故障也较难诊断. 所以进行测试性分配时, 复杂程度或可靠性是首先要考虑的影响因素. 应保证复杂度高的组成单元分配较高的测试性指标, 以便能够用尽可能少的测试资源达到较高故障诊断能力. 系统组成单元的复杂度可用其基本构成部件数与系统构成部件总数之比来表示, 仅考虑复杂度时,

$$K_i = m_i \Big\backslash \sum_{i=1}^{n} m_i \tag{9}$$

式中 m_i 为第 i 个组成单元的基本构成部件数. 当只考虑复杂度这一影响因素(即按复杂度分配方法) 时, 为简化计算, 可以直接按构成部件数确定 K_i 值, 即取 $K_i = m_i$.

因为测试性设计的目的主要用于故障检测和隔离, 而构成部件数并不能完全代表发生故障数, 发生故障多少与可靠性水平有关, 所以用故障率 λ_i 代替构成部件数更合理. 这时

$$K_i = \lambda_i \tag{10}$$

$$K_s = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i^2 \Big\backslash \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{11}$$

如果进行测试性分配时得不到 m_i 或 λ_i 数据, 也可用评分方法确定 K_i 值. 最简单的系统组成单元评 1 分, 最复杂的组成单元评 5 分, 其余评分为 1~ 5 之间. 确定 K_i 之后, 就可用前述模型求出各组成单元的分配值.

例 **1**　某系统由 U_1~ U_5 5 个单元组成, 其故障率数据为已知, 要求的系统故障检测率 P_r = 0. 95, 求各组成单元的分配值.

解　取 K_i = λ_i, P_{max} = 0. 98, 根据式(11) 和式(8) , 分配结果如表 1 所示.

表 **1**　按复杂度分配示例

组成	$\lambda_i = K_i$	K_s	P_i	P_s
U_1	30		0.9047	
U_2	30		0.9047	
U_3	100	102.22	0.9486	0.9500
U_4	150		0.9800	
U_5	50		0.9172	

4　按重要度分配方法

按重要度分配方法是指仅考虑系统组成单元的重要程度这一个影响因素的测试性分配方法. 有几种不同的表示重要度的方法, 如概率重要度、结构重要度、相对比重要度等. 因为对保证安全和完成系统规定任务越重要的组成单元, 其故障影响越大, 故障越多, 影响越严重. 所以这里用故障影响来表示重要度, 故障影响严重的组成单元应分配高的测试性指标, 以便能实时监测其工作状态, 提高任务可靠性.

用系统组成单元的相对重要度表示 K_i.

$$K_i = F_i \Big\backslash \sum_{i=1}^{n} F_i \tag{12}$$

式中　F_i 为第 i 个组成单元的影响安全和任务的故障数, 无此数据时, 可用相应的故障模式数或故障率代替. 在只考虑重要度这单一因素时, 可令 K_i = F_i. 如无有关 F_i 的具体数据, 也可用评分方法确定 K_i 值. 这里需要说明的是当组成单元有余度时, 仍应对各个单元进行重要度分析, 不考虑余度的容错作用.

除确定 K_i 方法不同之外, 按重要度分配方法的分配过程与按复杂度分配方法相同.

5　加权分配方法

按复杂度或按重要度分配方法适用于系统设计的开始阶段, 即在尚未获得更多数据情况下用于初步的测试性分配. 随着设计工作的进展, 当可获得较多数据时, 可用综合考虑各主要影响因素的加权分配方法, 这时需要对系统的每一个组成单元的各项影响因素进行归一化处理得出相应的影响参数, 经综合最后得到作为分配依据的基础参数 K_i.

1)　复杂度影响参数 k_λ

该参数代表组成单元的复杂度或可靠性特性对分配的影响, 用故障率(或构成部件数) 来表示. 分配值应正比于故障率 λ_i(或部件数) .

$$k_\lambda = \beta_1 \lambda_i \tag{13}$$

2)　重要度影响参数 k_F

该参数代表组成单元的重要度或故障影响对测试性分配的影响, 用影响安全和任务的故障模式数 F_i 来表示, 它与分配值成正比.

$$k_F = \beta_2 F_i \tag{14}$$

3)　平均故障修复时间影响参数 k_M

该参数代表基本维修性要求对测试性分配的影响, 用平均故障修复时间 M_i 来表示, 它与分配值成反比.

$$k_M = \beta_3 / M_i \tag{15}$$

4)　费用影响参数 k_C

该项参数代表研究开发与设计实现费用对测试性分配的影响, 此费用用 C 表示, 与分配值比成反比.

$$k_C = \beta_4 / C_i \tag{16}$$

上面各式中的 β_1、β_2、β_3 和 β_4 分别是对应影响参数的归一化系数. 另外, 还可以被赋予不同的权值, 综合为第 i 个系统组成单元的基础参数 K_i.

$$K_i = \alpha_\lambda k_\lambda + \alpha_F k_F + \alpha_M k_M + \alpha_C k_C \tag{17}$$

式中　α_λ、α_F、α_M 和 α_C 分别是复杂度、重要度、平均故障修复时间和费用的加权系数, 其量值由测试性分配者确定. 若同等看待这 4 种影响因素时, 可都取值为 1.

各组成单元的 K_i 值确定以后, 即可利用式(7) 和式(8) 给出的模型进行分配. 仍以前面用过的由 5 个单元组成的系统为例, 各加权系数定为 1, 取 P_{max} = 0. 98, 有关数据和分配结果如表 2 所示.

如果分配时没有 λ_i、F_i、M_i 和 C_i 数据, 又想用加权分配法, 可以用评分方法确定各影响参数, 待有数据时再修正分配结果.

表 2 加权分配法示例(K_s= 0.8719, P_s= 0.9500)

组成	λ_i	F_i	M_i	C_i	K_i	P_i
U_1	30	3	15	200	0.6914	0.9147
U_2	30	2	15	200	0.6414	0.9047
U_3	100	5	25	250	0.8023	0.9364
U_4	150	6	30	220	1.0252	0.9800
U_5	50	4	20	150	0.7980	0.9355

6 有部分老产品时的分配方法

新设计研制一个系统时,往往选用部分已有的老产品,其测试性指标为已知数据,只有新设计的部分新产品需要分配指标. 这时,应首先根据系统要求指标,求出新品部分总的指标,并把它视为新品组成的子系统的要求指标,然后选用前述测试性分配方法进行分配即可.

假设系统由 n 个单元组成,其中有 r 个是新品,则老品数量为 $n-r$ 个. 新品部分总指标用 P_N 表示,依据公式(4)可得到如下关系式:

$$P_r\sum_{i=1}^{n}\lambda_i=\sum_{i=1}^{r}\lambda_iP_i+\sum_{j=1}^{n-r}\lambda_jP_j \tag{18}$$

$$P_N\sum_{i=1}^{r}\lambda_i=\sum_{i=1}^{r}\lambda_iP_i \tag{19}$$

所以 $$P_N=\left(P_r\sum_{i=1}^{n}\lambda_i-\sum_{j=1}^{n-r}\lambda_jP_j\right)\Big\backslash\sum_{i=1}^{r}\lambda_i \tag{20}$$

式中 λ_j 和 P_j 分别是老成品的故障率和测试性指标; P_N 为新品部分总的要求指标. 根据 P_N 值用前述分配方法求得新品各单元分配值,可保证满足整个系统(包括老产品)的指标要求.

仍用例1,并假设其中 U_2 和 U_3 为老产品,指标分别为 P_2= 0.85, P_3= 0.95,其他数据不变. 选用按复杂度分配方法,新品部分要求指标和分配结果列于表3中.

表 3 系统中有老品时的分配示例

组成		λ_i= K_i	K_s	P_N	P_i	P_s
老品	U_2	30			0.85	
	U_3	100			0.95	
新品	U_1	30			0.9254	
	U_4	150	112.61	0.9630	0.9800	0.9500
	U_5	50			0.9345	

7 结束语

本文讨论的测试性分配方法特别注重工程实用性,按复杂度分配法的目标是用尽可能少的BIT等测试资源达到系统的要求指标;按重要度分配法的目标是在规定指标下保证把有限的测试资源优先用于重要单元的性能监控和故障诊断;加权分配法除考虑上面2种因素外,还要支持维修性要求和降低设计与实现费用. 这些方法主要是用于故障检测率和隔离率的分配,如果需要分配虚警率,应首先将其变为正确报警率,再参考此法分配.

参考文献

1 林典伦, 田 仲, 贾培盈, 等. GJB 2547-95 装备测试性大纲. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1996

2 章国栋, 陆廷孝, 屠庆慈, 等. 系统可靠性与维修性的分析与设计. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990. 169~180

3 田 仲. 测试性分配和预计. 北京航空航天大学学报, 1995, 21(4): 13~17

Research on Testability Allocation Method

Tian Zhong

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Dept. of System Engineering of Engineering Technology)

Abstract The relationship is studied between system testability index and the system element testability indexes, and the factors are analysed, which have influence on determining testability indexes. Then, the fundamental requirements, mathematical models and working procedure for testability allocation are derived. The paper presents four testability allocation methods that are applied to different conditions. The first two methods are based on system's complexity (failure rate) and importance (fault affection). The third one is named weight allocation method in which some factors are considered carefully. The last allocation method is specially for those systems which contain some old units (products). These testability allocation methods are useful in practical system and equipment development process.

Key words fault detection; fault diagnosis; allocations