

基于可拓层次分析法的测试性分配方法研究

汤文超¹, 李文海², 郑博³, 黄权欣⁴

(海军航空工程学院, 1. 研究生四队; 2. 飞行器检测与应用研究所; 山东 烟台 264001;

3. 96427 部队, 陕西 宝鸡 721006; 4. 91055 部队, 浙江 台州 318500)

摘要: 针对传统层次分析 (APH) 方法在进行测试性分配时没有考虑人判断的模糊性, 以及在构造判断矩阵时需要进行一致性检验这两个问题, 建立了测试性分配层次结构模型, 采用可拓层次分析法对测试性指标进行分配, 将符合一致性要求的判断矩阵权重向量的方法有机地融合到可拓层次分析法中; 最后结合实例对本文进行应用研究, 求得了合适的分配指标, 应用结果验证了此方法的可行性。

关键词: 测试性; 测试性分配; 可拓层次分析法; 故障检测率

Study on Testability Allocation Method Based on Extension AHP Method

Tang Wenchao¹, Li Wenhai², Zheng Bo³, Huang Quanxin⁴

(1. Third Graduate Student team; 2. Research Institute of Aircraft Detection and Application, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 3. Unit 96427, Baoji 721006, China;

4. Unit 91055, Taizhou 318500, China)

Abstract: Establishing testability allocation hierarchy structure model, in order to solve the two problems that traditional hierarchical analysis method for testability allocation without considering fuzzy judgment and when construct judgment matrix need to check the consistency, the extension analytic hierarchy process is adopted to test indicators, organically mix the method which not only comply with the requirement of consistency but also can judge matrix weighting vector to the extension analytic hierarchy process. Finally, examples are analyzed to verify the feasibility of this method.

Keywords: testability; testability allocation; extension AHP; fault isolation rate

0 引言

测试性分配是将系统的测试性定量要求根据给定的原则和方法, 按系统层次自上而下逐级分配给系统的各组成部分。其主要工作在方案论证和初步设计时间进行^[1]。测试性分配是测试性设计时间的重要内容, 对分系统的测试性指针确定有着指导意义^[2]。

20 世纪 90 年代美国学术界对测试性分配做了大量研究, 其中文献 [3] 提出了基于拒识率、马尔可夫、经验等测试性分配模型, 文献 [4] 首次提出基于优化模型的测试性分配方法。我国对此研究起步较晚, 现有的测试性分配方法主要有经验分配法、故障率分配法、加权分配法、有部分老产品时的分配法及优化分配法等^[1,5]。这些方法主观性强, 考虑因素单一, 尤其是在对产品进行创新设计时, 上述方法的分配结果往往不能满足要求。近年来国内学术界对测试性分配技术展开新的研究, 都取得了一定的成果。文献 [6] 考虑在方案论证及初步设计时间, 影响测试性分配的参数具有一定的模糊性, 且各个因素对测试性分配的影响程度不同, 提出将模糊综合评判法应用到测试性分配中; 文献 [7] 提出了基于遗传算法的测试性优化分配方法; 文献 [8] 针对新研装备测试性资料缺乏这一问题, 提出基于 AHP 的测试性分配方法, 通过对层与层

以及层内元素之间相互影响关系的分析, 获得影响分系统测试性分配因素的重要性影响权重系数, 并通过对分析结果的修正, 求得了分配指标。

本文考虑进行 FDR、FIR 指标分配时的有关影响因素, 建立复杂度、重要度、平均故障修复时间 (MTTR)、实现费用、环境条件综合评价指标体系, 并在此基础上采用可拓层次分析法对 FDR 进行测试性分配。

1 测试性分配层次结构模型

测试性分配是从整体到局部, 从上到下的指标分解过程, 使整体和部分协调一致^[1]。系统分为多个层次, 如系统、分系统、LRU、SRU 等, 各层次之间的指针分配过程相同, 分配工作可能需要有个修正和迭代的过程。根据测试性分配原则, 进行 FDR、FIR 指标分配时应考虑有关影响因素, 为了能简单方便地考虑影响测试性分配的主要因素, 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, 函数关系为 $K_i = f_3(\lambda, F, M, C, E)$, 其中:

K_i 为第 i 个组成单元的基础参数;

λ 为代表复杂度影响的参数, 根据组成分系统的元部件数量以及它们组装的难易程度来评定。复杂度越高, 评定指数越大;

F 为代表重要度影响的参数, 根据分系统的重要度来评定。重要度越大, 评定指数越大;

M 为代表维修性要求影响参数, 根据发生故障后修复时间的多少来评定。要求的 $MTTR$ 值越小, 评定指数越大;

收稿日期: 2013-11-02; 修回日期: 2014-01-16。

基金项目: 总装武器装备预研基金项目 (9140A27020212JB14311)。

作者简介: 汤文超 (1989-), 男, 江苏省丹阳市人, 硕士生, 主要从事电子装备测试性方面研究。

C 为代表实现费用影响参数, 根据实现故障检测与故障隔离的成本高低来评定。要求的成本越低, 评定系数越大:

E 为代表环境条件的影响参数, 根据系统所处的环境来评定。环境越恶劣, 评定系数越大。

将上述 5 项因素作为评判标准, 对 5 个 LRU 进行测试性分配, 建立测试性分配层次结构模型如图 1 所示。

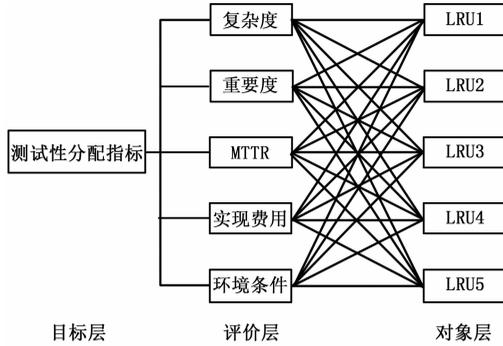


图 1 测试性分配层次结构模型

2 基于可拓层次分析法的测试性分配

2.1 层次单排序

可拓学是由我国学者蔡文创立的一门新学科^[9]。可拓层次分析法 (extension analytic hierarchy process, EAPH) 是在可拓集合理论和方法的基础上建立的一种层次权重决策分析方法。该方法在构造判断矩阵时考虑了人判断的模糊性, 将无弹性的硬指标转化成模糊的软指标, 并克服了以往 APH 应用中判断矩阵构造时的一致性检验问题。该方法降低了专家判断数据的不准确性, 更切合实际, 是一种比较成熟的指标权重确定方法, 本文将采用该方法进行指标权重的确定。

在建立了测试性分配层次结构模型之后, 采用可拓层次分析法确定指针权重, 首先构造可拓判断矩阵。第 1 层为目标层, 第 2 层为评价层, 第 3 层为对象层, 设第 k 层的评价或对象数为 n_k 。针对第 $k-1$ 层的某一个评价或物件, 将第 k 层与之有关的全部 n_k 个因素进行两两比较, 得出两者之间的相对优劣程度, 并用可拓区间数定量表示之, 从而构造一个可拓区间数判断矩阵 \mathbf{R} 。 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times n}$ 中元素 $r_{ij} = \langle r_{ij}^-, r_{ij}^+ \rangle (i, j = 1, 2, \dots, n_k)$ 是一个可拓区间数, $(r_{ij}^- + r_{ij}^+)/2$ 为 AHP 方法中比较判断所采用的 1-9 标度中的整数, 并且 $1/9 \leq r_{ij}^- \leq r_{ij}^+ \leq 9, r_{ij} = 1/r_{ji}$, 选取 T 位专家分别对评价或对象 i 和 j 的相对优劣程度进行判断, 其中第 t 个专家给出的可拓区间数为 $r_{ij}^t = \langle r_{ij}^{t-}, r_{ij}^{t+} \rangle, r_{ij}^{t-} >, t = 1, 2, \dots, T$ 。由 $r_{ij}^k = (a_{ij}^1 + a_{ij}^2 + \dots + a_{ij}^T)/T$, 得到第 k 层评价或对象对第 $k-1$ 层评价或对象 h 的综合可拓区间数矩阵 $\mathbf{R} = \langle R^-, R^+ \rangle$, 求得 R^-, R^+ 的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量 x^-, x^+ ; 由 $k, R^+ = (r_{ij}^+)_{n_k \times n_k}$ 计算

$$k = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_k} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_k} r_{ij}^+}}{\sum_{i=1}^{n_k} r_{ij}^+}}, m = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_k} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_k} r_{ij}^-}}{\sum_{i=1}^{n_k} r_{ij}^-}}$$

从而求出满足一致性条件的权重向量 $\mathbf{S}^k = (S_1^k, S_2^k, \dots, S_{n_k}^k)^T = \langle kx^-, mx^+ \rangle$, 若 $V(S_i^k \geq S_j^k) = \frac{2(S_i^{k+} - S_j^{k+})}{(S_i^{k+} - S_j^{k+}) - (S_i^{k-} - S_j^{k-})} \geq 0$ 且 $i \neq j$, 则 $Q_{ih}^k = 1, Q_{jh}^k = V(S_i^k \geq S_j^k)$, 式中, Q_{ih}^k 表示第 k 层上第 i 个

评价或对象对第 $k-1$ 层上的第 h 个评价或对象的单排序, 经归一化后得到 $\mathbf{Q}_h^k = (Q_{1h}^k, Q_{2h}^k, \dots, Q_{n_k h}^k)^T$ 表示第 k 层上各评价或对象对第 $k-1$ 层上的第 h 个评价或对象的单排序权重向量。

利用可拓层次分析法确定评价层对目标层的单排序权重向量 $\mathbf{Q}_1^2 = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$, 以及对象层对评价层的单排序权重向量分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_1^3 &= (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5), \mathbf{Q}_2^3 = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5), \\ \mathbf{Q}_3^3 &= (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5), \mathbf{Q}_4^3 = (e_1, e_2, e_3, e_4, e_5), \\ \mathbf{Q}_5^3 &= (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5). \end{aligned}$$

2.2 层次总排序

设第 k 层包含 n_k 个因素 D_1, D_2, \dots, D_{n_k} , 它们关于 $k-1$ 层中某一因素 G 的权重向量为 $\mathbf{Q}_G^k = (\omega_1^D, \omega_2^D, \dots, \omega_{n_k}^D)$; 其下一层 $k+1$ 包含 n_{k+1} 个因素 $(D+1)_1, (D+1)_2, \dots, (D+1)_{n_{k+1}}$, 它们关于第 k 层中因素 D_i 的权重向量为 $\mathbf{Q}_{D_i}^{k+1} = (\omega_{i1}^{D+1}, \omega_{i2}^{D+1}, \dots, \omega_{i n_{k+1}}^{D+1})$; 那么 $(D+1)_1, (D+1)_2, \dots, (D+1)_{n_{k+1}}$ 关于 G 的综合权重也即各组成单元的基础参数为:

$$K_j = \sum_{i=1}^{n_k} \omega_i^D \omega_{ij}^{D+1}, j = 1, 2, \dots, n_{k+1}$$

2.3 计算分配额

考虑到系统也具有与各组成单元类似的作为其指针的基础参数 K_s , 它与各组成单元基础参数 K_i 的关系为: $K_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i K_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$, 式中: λ_i 为第 i 个组成单元的故障率。由于各组成单元的测试性指针分配值与其基础参数成正比关系, 当知道有关基础参数 K_i , 并选取 P_{\max} 为大于系统测试性要求指针 P_r 的最大可能实现值后, 就可求出各组成单元的分配值 $P^{[11]}$: $P_i = \frac{P_{\max} - P_r}{K_{\max} - K_s} (K_i - K_s) + P_r$, 式中: K_{\max} 为 P_{\max} 对应的最大基础参数。根据 P_i 值初定各单元分配值时, 一般取 2 位小数, 计算所得 P_i 值可能会过大或过小, 需要调整和修正, 过大的可取最大可实现值, 过小的可适当提高。再利用 $P_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i P_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$ 求得系统指针 P_s , 应保证 P_s 大于等于系统测试性要求指针 P_r , 即 $P_s \geq P_r$, 否则应调整初定分配值。

3 实例分析

以某新研机载通信系统为研究对象, 利用上述方法对其进行测试性分配。该通信系统由 5 个 LRU 组成, 故障率分别为: $\lambda_1 = 3.5 \times 10^{-5}, \lambda_2 = 4 \times 10^{-5}, \lambda_3 = 5.5 \times 10^{-5}, \lambda_4 = 1 \times 10^{-4}, \lambda_5 = 4.5 \times 10^{-5}$ 。要求的系统测试性指针 (故障检测率) $P_r = 0.95$ 。

首先, 按照图 1 的层次结构, 聘请 10 位专家组成专家小组, 进行调查问卷。专家根据经验和主观判断, 在表格中填写可拓区间数。在得到 10 位专家的可拓区间数判断矩阵后, 计算综合可拓区间数判断矩阵。限于篇幅, 表 1 只给出了评价层对目标层的可拓区间数判断矩阵。

表 1 评价层对目标层的可拓区间数判断矩阵

目标层	评价层				
	复杂度	重要度	MTTR	实现费用	环境条件
复杂度	<1,1>	<0.31,0.35>	<1.83,2.17>	<2.86,3.23>	<0.46,0.55>
重要度	<2.86,3.23>	<1,1>	<3.56,4.44>	<5.37,6.63>	<1.83,2.17>
MTTR	<0.46,0.55>	<0.23,0.28>	<1,1>	<1.83,2.17>	<0.31,0.35>
实现费用	<0.31,0.35>	<0.15,0.19>	<0.46,0.55>	<1,1>	<0.23,0.28>
环境条件	<1.83,2.17>	<0.46,0.55>	<2.86,3.23>	<3.56,4.44>	<1,1>

由表 1 中的矩阵, 可得到判断矩阵如下:

$$R_1^- = \begin{bmatrix} 1 & 0.31 & 1.83 & 2.86 & 0.46 \\ 2.86 & 1 & 3.56 & 5.37 & 1.83 \\ 0.46 & 0.23 & 1 & 1.83 & 0.31 \\ 0.31 & 0.15 & 0.46 & 1 & 0.23 \\ 1.83 & 0.46 & 2.86 & 3.56 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_1^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0.35 & 2.17 & 3.23 & 0.55 \\ 3.23 & 1 & 4.44 & 6.63 & 2.17 \\ 0.55 & 0.28 & 1 & 2.17 & 0.35 \\ 0.35 & 0.19 & 0.55 & 1 & 0.28 \\ 2.17 & 0.55 & 3.23 & 4.44 & 1 \end{bmatrix}$$

由 MATLAB 分别计算出 R_1^- 和 R_1^+ 的具有正分量的归一化特征向量:

$$\begin{aligned} x^- &= (0.159\ 4, 0.425\ 8, 0.096\ 2, 0.058\ 3, 0.260\ 2), \\ x^+ &= (0.156\ 8, 0.427\ 7, 0.096\ 3, 0.059\ 2, 0.26), \\ k &= 0.966\ 4, m = 1.025\ 9, \end{aligned}$$

从而可得 $S_1 = \langle 0.154\ 1, 0.160\ 8 \rangle, S_2 = \langle 0.411\ 5, 0.438\ 8 \rangle, S_3 = \langle 0.093, 0.098\ 8 \rangle, S_4 = \langle 0.056\ 3, 0.060\ 8 \rangle, S_5 = \langle 0.251\ 5, 0.266\ 7 \rangle$, 于是 $V(S_1 \geq S_4) = 18.709\ 5, V(S_2 \geq S_1) = 24.120\ 2, V(S_3 \geq S_4) = 8.290\ 1, V(S_5 \geq S_4) = 21.374\ 8$, 于是 $Q_{21}^0 = 18.709\ 5, Q_{21}^1 = 24.120\ 2, Q_{31}^0 = 8.290\ 1, Q_{31}^1 = 1, Q_{51}^0 = 21.374\ 8$, 从而得到评价层的 5 个评价指标对目标层的单排序: $Q_i^0 = (0.254\ 6, 0.328\ 3, 0.112\ 8, 0.013\ 6, 0.290\ 8)$ 。采用同样的方法可以求得对象层对评价层的单排序分别为: $Q_1^0 = (0.233\ 6, 0.359\ 1, 0.306\ 5, 0.087\ 4, 0.013\ 4), Q_2^0 = (0.230\ 1, 0.221\ 2, 0.366\ 9, 0.166\ 2, 0.015\ 5), Q_3^0 = (0.193\ 9, 0.023\ 9, 0.495\ 1, 0.165\ 1, 0.122), Q_4^0 = (0.041\ 9, 0.025\ 3, 0.060\ 7, 0.384\ 1, 0.488\ 1), Q_5^0 = (0.030\ 7, 0.023\ 8, 0.437\ 5, 0.475, 0.032\ 9)$ 。

利用公式 $K_j = \sum_{i=1}^{n_k} \omega_i^D \omega_{ij}^{D+1}$ 可计算出各组成单元的基础参数, 同样也只给出计算结果: $K_1 = 0.166\ 4, K_2 = 0.174, K_3 = 0.382\ 4, K_4 = 0.114\ 5, K_5 = 0.038\ 5$ 。

由 $K_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i K_i / \sum_{i=1}^n \lambda_i$ 可以得到系统基础参数 $K_s = 0.170\ 9$, 选取大于系统测试性要求指针 P_r 的最大可能实现值 $P_{\max} = 0.98$, 由测试性指标分配值与其基础参数成正比可知 $K_{\max} = 0.176\ 3$, 再由 $P_i = \frac{P_{\max} - P_r}{K_{\max} - K_s} (K_i - K_s) + P_r$ 可求出

各组成单元的分配值: $P_1 = 0.93, P_2 = 0.97, P_3 = 2.12, P_4 = 0.64, P_5 = 0.21$ 。修正为: $P_1 = 0.93, P_2 = 0.97, P_3 = 0.98, P_4 = 0.95, P_5 = 0.92$ 。由 $P_i = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i P_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$ 计算得到 $P_i = 0.951\ 5$, 大于 P_r , 无需再调整分配值, 至此, 各 LRU 得到了合适的分配指标。

4 结论

本文建立了测试性分配层次结构模型, 该模型考虑了影响测试性分配的 5 个因素包括: 复杂度、重要度、MTTR、实现费用、环境条件, 采用可拓层次分析法对该模型进行分析, 实现了定性与定量的有效转换, 获得了影响系统测试性分配的权重系数。同时对某新研机载通信系统进行实例验证, 针对故障检测率这一指标进行了测试性分配, 通过对分析结果的修正, 求得了合适的分配指标, 结果表明此方法是可行的。

参考文献:

- [1] 田 仲, 石君友. 系统测试性设计与验证 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [2] US Department of Defense. MIL-HDBK-2165. Military Standard Testability Program for Systems and Equipments [S]. 1995.
- [3] 沈采沐. 装备系统级测试性分配技术研究及应用 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.
- [4] McNamer M G, Weber W W. Chip to system testability. Final report. ADA342380 [R]. 1997.
- [5] Bellehsen D M, Kelly B A. Automated testability decision tool. ADA241865 [R]. 1991.
- [6] 雷昭霞, 刘红伟. 模糊综合评判法在测试性指标分配中的应用 [J]. 中国高新技术企业, 2013, (10): 35-36.
- [7] 李金龙, 陶凤和, 贾长治. 基于 APH 的测试性分配方法研究 [J]. 中国测试, 2010, 36 (2): 30-33.
- [8] 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.
- [9] 蔡 文, 杨春燕, 林伟初. 可拓工程方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [10] 高 洁, 盛昭瀚. 可拓层次分析法研究 [J]. 系统工程, 2002, 20 (5): 6-11.
- [11] 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.
- [12] 王爱亮, 郑玉航, 王爱丽. 复杂武器系统健康管理指标体系构建方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (10): 2744-2746.