

文章编号：1008 - 2956 (2002) 01 - 0047 - 05

武器系统维修性设计综合评估方法研究

冯兵¹，于永利¹，张静平²

(1. 军械工程学院装备指挥与管理系 2. 训练部，河北 石家庄 050003)

摘要：在武器设计阶段，定性地从维修性设计因素入手，以各因素间的交互作用为出发点，先提出维修性设计属性和促进度的概念，然后通过有向图和矩阵理论对武器系统维修性设计综合评估模型进行探讨，最后给出维修性综合评估的方法和步骤。

关键词：维修性设计评估；维修性设计属性；促进度

中图分类号：E917

文献标识码：A

维修性是产品的一种设计属性。如果在武器设计阶段，能够从多种方案中选择最优维修性设计方案；或从维修性出发，改进设计中的薄弱环节，将有效地提高武器的维修性，大大减少武器寿命周期内的维修工作。

选取最优设计方案，就要对每种备择方案进行维修性设计评估。通常的做法是，首先预计各备择方案中的平均修复时间和平均维修时间等参数，然后比较预计结果，最后确定最优方案。虽然这是一条很好的思路，也是我国国家军用标准^[1]推荐的方法，但它的实现却依赖于原型实例或相似产品的历史数据，工作量很大。尤其需要指出的是，现有方法只能预计维修性的定量参数，而不能明确表达设计因素与维修性之间的关系，也没有考虑设计因素之间的交互作用。显然，想通过比较维修性预计结果来发现设计因素的薄弱环节，是很困难的。

我们知道，各设计因素的变化，对武器维修性的影响是不同的。由于它们之间存在交互作用，常常会“牵一发而动全身”，很难判断哪些因素是影响武器维修性的主要原因。于是，会出现这种情况，维修性设计人员想对方案中的某个或几个设计因素加以改善，却又难以预料武器的维修性会提高到什么程度。这就迫切需要找到一种有效的方法，能够在武器设计阶段，充分考虑维修性设计因素的交互作用对维修性的影响，定性地从这里入手，定量地对武器维修性设计方案进行综合评估。

1 武器系统维修性设计综合评估模型

1.1 维修性设计属性和促进度

为反映武器系统维修性的本质和特征，把影响维修性的主要设计因素定义为维修性设计属性。参照我国国家军用标准^[2]和美军标准手册^[3]，根据武器系统的特点，将表 1 中的 12 种维修性设计的定性要求，作为维修性设计属性。

表 1 武器系统的维修性设计属性

设计方面								人员		支援	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
可达性	拆装性	标准化	简易性	识别标志	诊断性	模块化	耐久性	人素工程	安全性	测试仪器和工具	技术文档

这些属性之间不是独立的，而是互相影响、互相促进的。若对某一属性进行优化，其他属性也会得到或多或少的改善。例如，将不易拆装的系统设计方案改为容易拆装，系统部件的可达性也必然会提高。同样，系统部件可达性提高，零部件必然易于分解，系统的拆装性也会提高。可见，可达性和拆装性是互相促进的。但是，并非所有属性间的促进关系都是对称的，例如，识别标志的完善会大大提高拆装性；但改善了拆装性并不能促进识别标志的完善。显然，这种促进关系是“有方向”的。

维修性设计属性间的促进关系称为“促进度^[4]”，并分为强、中、弱、无4个等级。根据维修性特征及大量实例和文献资料，得到武器系统维修性设计属性的促进度（表2）。

表2 武器系统维修性设计属性的促进度

序号	维修性 设计属性	属性之间的促进度 (f_{ij})			
		强 ($f_{ij} = 4$)	中 ($f_{ij} = 3$)	弱 ($f_{ij} = 2$)	无 ($f_{ij} = 0$)
1	可达性	2	9	6, 11	3~5, 7, 8, 10, 12
2	拆装性	1	9, 11	—	3~8, 10, 12
3	标准化	2, 11	1, 8	9, 12	4~7, 10
4	简易性	1, 2, 6, 11	5, 8	9, 12	3, 7, 10
5	识别标志	2	9	12	1, 3, 4, 6~8, 10, 11
6	诊断性	9	7	11, 12	1~5, 8, 10
7	模块化	1, 2	3, 11	4~6	8~10, 12
8	耐久性	2, 6	10, 11	9	1, 3~5, 7, 12
9	人素工程	—	11	1, 2, 6	3~5, 7, 8, 10, 12
10	安全性	1, 2, 6, 8, 9	5, 11	12	3, 4, 7
11	工具和 测试仪器	1, 2	—	9	3~8, 10, 12
12	技术文档	2, 5	6	—	1, 3, 4, 7~11

表2明确表示出各属性间促进关系的范围和强度。例如，可达性（1）对拆装性（2）的促进度为强，对人素工程（9）为中，对诊断性（6）、工具和测试仪器（11）为弱，对其它8种属性（3~5, 7, 8, 10, 12）则没有促进作用。

需要指出的是，属性间促进关系的范围和强度是至关重要的，因为它直接影响维修性综合评估模型和计算结果的可信度。所以，要根据系统实际情况得出表2的内容。

1.2 维修性设计属性有向图

维修性设计属性有向图，是属性间促进度的图解。它可直观地表示各属性间的促进关系，有助于设计人员从维修性出发，深入理解待开发系统的维修性设计属性。

将系统的维修性设计属性有向图定义为 $G' = (N', E)$ 其中， $N' = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_N\}$ 是一系列节点，代表维修性设计属性； $E = \{e_{12}, e_{13}, \dots, e_{ij}, \dots\}$ 是各节点之间的有向弧，代表各属性间的促进度，没有促进关系 ($f_{ij} = 0$) 时不画有向弧。只有5个维修性设计属性的有向图如图1所示。

1.3 维修性设计属性有向图的矩阵表达

为简便起见，用矩阵对有向图进行研究。现研究一种只包含5种维修性设计属性的简单模型（图1），它只考虑可达性、拆装性、标准化、简易性和识别标志。为得到通用的维修性设计综合权值表达式，不管促进度是否为0，都用有向弧表示出来。图1中的5个节点，可以表示为5阶二进制矩阵 $[f_{ij}]$ 。下面分三步

将图 1 转为矩阵表达。

首先，只考虑维修性设计属性间的促进度，则图 1 的矩阵表达可初步写为：

$$F = \begin{bmatrix} 0 & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} \\ f_{21} & 0 & f_{23} & f_{24} & f_{25} \\ f_{31} & f_{32} & 0 & f_{34} & f_{35} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & 0 & f_{45} \\ f_{51} & f_{52} & f_{53} & f_{54} & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

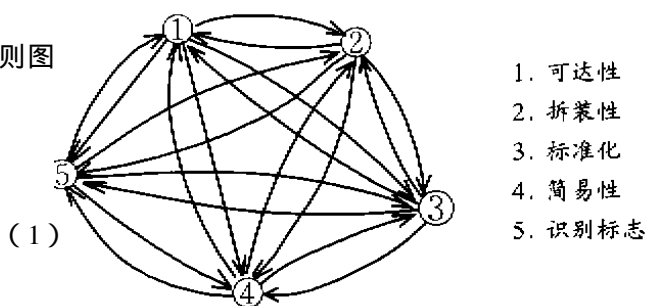


图 1 只有 5 种属性的有向图

矩阵 F 称为促进度矩阵。其中，非主对角线上的元素是属性 i 对属性 j 的促进度的值；由于此矩阵中不考虑维修性设计属性自身的促进度，故主对角线上元素为 0。系统的类型一旦确定，矩阵 F 也就固定了下来，它不随系统设计方案的变化而改变。

其次，只考虑维修性设计属性自身的优劣程度，得到以下矩阵：

$$H = \begin{bmatrix} V_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & V_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & V_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

对角矩阵 H 称为维修性设计属性权值矩阵。主对角元素 V_i 代表第 i 个属性的优劣程度，叫做维修性设计属性权值。可参考文献 [3] 或 [1] 中“203 抽样评分预计法”，按其评分核对表的形式，确定权值的取值范围，建立权值分配标准。这里 V_i 为 0~4 之间的整数，如表 3 所示。

表 3 耐久性权值分配标准（示例）

序号	评分标准	得分 (V_i)
摩擦组件同时符合以下两个条件：		
1	①由抗磨损材料或表面涂层材料组成； ②采取全寿命周期润滑或长效润滑方案。	4
2	摩擦组件符合上述两个条件中的一个时	2
3	摩擦组件与上述两个条件均不符合时	0

对角矩阵 H 和系统设计方案密切相关，设计方案的变化可以通过矩阵的变化来体现。

最后，综合考虑维修性设计属性及其促进度，得到以下矩阵：

$$M = [H + F] = \begin{bmatrix} V_1 & f_{12} & f_{13} & f_{14} & f_{15} \\ f_{21} & V_2 & f_{23} & f_{24} & f_{25} \\ f_{31} & f_{32} & V_3 & f_{34} & f_{35} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & V_4 & f_{45} \\ f_{51} & f_{52} & f_{53} & f_{54} & V_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵 M 称为维修性设计综合权值矩阵。 M 中的元素，称为综合权值常数，它反映了系统的维修性设计特征。对给定的任意一个设计方案，各属性对系统维修性的影响程度、属性间的促进关系，都可以用矩阵 M 定量地表达出来。

1.4 维修性设计综合评估模型

矩阵 M 是一个方阵，可用 $Per(M)$ 表示它的正方矩阵的积和式。正方矩阵的积和式是组合数学

中的概念^[5]，类似于方阵的行列式，但展开表达式中都是正号，说明任一促进度或属性权值的增长，都会引起 $Per(M)$ 值的增长，这与维修性设计属性间的促进关系是一致的。 $Per(M)$ 展开表达式为：

$$\begin{aligned} Per(M) = & \prod_{i=1}^5 V_i + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m (f_{ij}f_{jl})V_kV_lV_m + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m (f_{ij}f_{jk}f_{kl} + f_{ik}f_{kj}f_{ji})V_lV_m \\ & + (\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m (f_{ij}f_{ji})(f_{kl}f_{ml}f_{mk} + f_{km}f_{ml}f_{lk}) + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m (f_{ij}f_{jk}f_{kl}f_{lm}f_{mi} + f_{im}f_{ml}f_{lk}f_{kj}f_{ji})) \\ & + (\sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m (f_{ij}f_{ji})(f_{kl}f_{lk})V_m + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l \sum_m (f_{ij}f_{jk}f_{kl}f_{li} + f_{il}f_{lk}f_{kj}f_{ji})V_m) \end{aligned} \quad (4)$$

$Per(M)$ 叫做维修性设计综合权值表达式，其值用 I_m 表示，是衡量系统维修性水平的一个尺度。综合权 I_m 值越大，系统的维修性就越好，反之亦然。因此，可用 $Per(M)$ 的值进行维修性设计综合评估。则 $Per(M)$ 就是所要研究的综合评估模型。

对给定的系统，在属性之间的促进度保持不变的条件下，设计方案不同，属性权值也不同。反映在 (3) 式中，就是 $\{V_i\}$ 序列不同。这说明每种设计方案都对应一个 $\{V_i\}$ 序列。将不同方案的 $\{V_i\}$ 代入矩阵 (3) 式，可导出各方案的表达式 $Per(M)$ ，进而计算出各方案的维修性设计综合权值 I_m 。比较各 I_m ，最大者即是最佳设计方案。

当所有属性的权值都是最优 ($V_i = 4$) 时，维修性设计综合权值为理想值，用 I_{mi} 表示。设维修性设计相对权值 $I_r = I_m / I_{mi}$ ，则 I_r 不仅能反映各设计方案的差距，而且也能直接反映出设计方案与理想值之间的差距。

2 维修性设计综合评估的方法步骤

建模之后，结合实例说明维修性设计综合评估的方法步骤。现举某兵器中一铰接的例子 (图 2)。三种备择设计方案是：采用内部轴衬见图 2 (a)、外部轴衬和长效润滑的抗磨损材料制成的外部轴衬，见图 2 (b)。

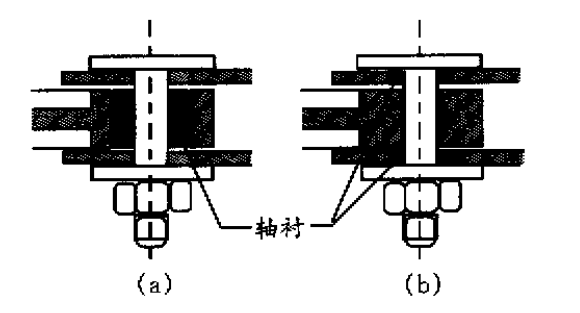


图 2 铰接系统

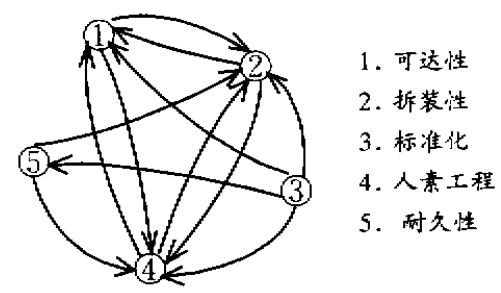


图 3 铰接系统有向图

第 1 步，从维修性出发，对给定的系统及备择方案进行研究，特别是功能和结构等设计因素，确定每种备择方案中的关键零部件。本例中显然是轴衬，因它对磨损的灵敏度较高，使用中需要更多的维修，所以应提高其维修性。

第 2 步，研究第一个备择方案，确定要考虑的维修性设计属性 A_i ，并参照文献 [3] 和表 3 得到各属性的权值 V_i 。本例第一方案在更换轴衬时，要涉及到多种维修活动 (拧下、上紧、分解等)，因此就要考虑可达性、拆装性、标准化、人素工程和耐久性。按文献 [3] 规定，可达性得分 $V_1 = 0$ ，因它不满足可视和操作要求。显然，拆卸该结构少于 3 分钟，所以拆装性得分 $V_2 = 2$ 。同理， $V_3 = 0$ ， $V_4 = 0$ 。根据表 3 得到 $V_5 = 0$ 。

第 3 步，确定各属性间的促进度 f_{ij} ，并参照表 2 对 f_{ij} 赋值。对本例第一方案，查表 2 得： $f_{12} = 4$ ， $f_{14} = 3$ ， $f_{21} = 4$ ， $f_{24} = 3$ ， $f_{31} = 3$ ， $f_{32} = 4$ ， $f_{34} = 4$ ， $f_{35} = 3$ ， $f_{41} = 2$ ， $f_{42} = 2$ ， $f_{52} = 4$ ， $f_{54} = 2$ 。

第 4 步，画出备择方案的维修性设计属性有向图。本例第一方案的有向图如图 3 所示。

第 5 步，写出维修性设计综合权值矩阵 M_1 。对本例第一方案有：

$$M_1 = \begin{bmatrix} V_1 & f_{12} & 0 & f_{14} & 0 \\ f_{21} & V_2 & 0 & f_{24} & 0 \\ f_{31} & f_{32} & V_3 & f_{34} & f_{35} \\ f_{41} & f_{42} & 0 & V_4 & 0 \\ 0 & f_{52} & 0 & f_{54} & V_5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

第 6 步, 导出维修性设计综合权值表达式 $Per(M_1)$ 。对本例第一方案有:

$$Per(M_1) = V_1 V_2 V_3 V_4 V_5 + (f_{12} f_{21} V_3 V_4 V_5 + f_{14} f_{41} V_2 V_3 V_5 + f_{24} f_{42} V_1 V_3 V_5) + f_{12} f_{24} f_{41} V_3 V_5 + f_{14} f_{42} f_{21} V_3 V_5 \quad (6)$$

第 7 步, 由 $V_2 = 4$ 代入 $Per(M_1)$, 计算维修性设计综合权值的理想值 I_{mi} 。对本例, 由 (6) 式得 $I_{mi} = 3584$ 。

第 8 步, 将第 2 步得到的 V_i 代入 $Per(M_1)$, 计算出所选方案的维修性设计综合权值 I_m 和相对权值 I_r 。对本例第一方案, 将 V_i 和 f_{ij} 的值代入 (5) 式, 可计算出综合权值 $I_{m1} = 992$, 相对权值 $I_{r1} = 27\%$ 。

第 9 步, 对下一个备择方案重复第 2~6 及第 8 步。对本例第二方案, 因采用外部轴衬, 满足可视和操作要求, 所以 $V_2 = 2$, 其它值与第一方案相同。通过计算得到 M_2 , 进而得到 $I_{m2} = 1216$, $I_{r2} = 34\%$ 。

第 10 步, 重复第 9 步, 直到对所有备择方案都进行了研究。对本例第三方案, 因采用长效润滑的抗磨损材料制成的外部轴衬, 所以 $V_1 = 2$, $V_5 = 4$ (查表 3), 其它值与第一方案相同。通过计算得到 M_3 , 进而得到 $I_{m3} = 2432$, $I_{r3} = 68\%$ 。

第 11 步, 比较各备择方案的综合权值 I_m 和相对权值 I_r , 确定最优维修性设计方案。对于本例, 显然是第三方案为最佳方案。

参考文献:

- [1] GJB/Z57-1994, 维修性分配与预计手册 [S].
- [2] GJB/Z91-1997, 维修性设计技术手册 [S].
- [3] MIL-HDBK-472-1996, Maintainability Prediction [S].
- [4] Wani M F, Gandhi O P. Development of Maintainability Index for Mechanical Systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, (65): 259-270.

(责任编辑: 欧阳晓黎)

Research on Integrated Evaluation Method in Maintainability Design of Weapon System

FENG Bing¹, YU Yong-li¹, ZHANG Jing-ping²

(1. Department of Equipment Command & Management, 2. Training Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: In the phase of weapon design, proceeded qualitatively from factors of maintainability design, and started from the interaction of factors, the thesis firstly puts forward two conceptions: attribution of the maintainability design and degree of facilitation. Then, through the directed graph and theory of matrix, it discusses the maintainability design of weapon system of the integrated evaluation model. At last, it gives out the methods and processes of maintainability integrated evaluation.

Key words: evaluation of maintainability design; attribution of maintainability design; degree of facilitation