

# 维修保障系统效能多级可拓综合评估研究

杨懿<sup>1</sup>, 武昌<sup>1</sup>, 刘涵<sup>2</sup>, 齐胜利<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 西安理工大学 水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**在构建维修保障系统效能评估指标体系的基础上,提出了维修保障系统效能的多级可拓综合评估模型,并与层次分析法、突变评价法的结果进行了比较,结论基本一致,为维修保障系统效能评估寻求出一种新的方法,其评估结果可为决策提供定量依据。

**关键词:**维修保障系统;多级可拓评估;AHP;GEM

**中图分类号:** TN07 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)06-0076-05

通信装备维修保障系统效能评估具有重要的现实意义,曾先后出现了 AHP 与加权综合法<sup>[1]</sup>、变权综合法<sup>[2]</sup>、突变评价法<sup>[3]</sup>等评估方法。通过对上述方法的分析和研究,可以发现这些方法往往不能根据实际需要动态调整所划分的等级范围,实现维修保障系统效能的细化分级,以至于评估结果难以有明确的物理意义,难以使用,装备管理和工作人员难以客观准确地掌握维修保障系统的实际状况。

可拓工程方法<sup>[4]</sup>中的优度评价法利用可拓集合和关联函数,在对各衡量条件加权的情况下,评价一个对象的优劣程度。在衡量条件中,加入“非满足不可的条件”,使评价更为切合实际;同时,由于关联函数值可正可负,从而能够正确反映一个被评对象的优劣程度<sup>[5]</sup>。用这种方法表示维修保障系统的效能有较好的效果和广泛的应用前景,鉴于此,本文构建了维修保障系统效能评估指标体系,运用 AHP-GEM 综合算法得到一系列的指标权重集合,并采用多级可拓评估方法对维修保障系统效能进行了综合评估,以定量的结果客观军用地反映维修保障能力的实际水平,为解决军事领域的类似效能评估问题提供了一种新思路。

## 1 多级可拓评估方法

可拓评估方法的基本形式是一级可拓综合评估,对于比较简单的问题,可得出较科学的结果;但对于复杂系统的评估,由于要考虑的评估指标较多,应将众多指标分类,从而建立多级可拓评估方法。图1是本文构建的装备维修保障系统多级评估体系,对于多级模型,虽然级数有多少之分,但求解方法是一致的。为简明起见,以二级综合评估为例来描述多级可拓评估方法的具体步骤。

### 1.1 指标分类

根据构建的指标体系将众多的评估要素分为  $n$  类,即  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ ; 每类评估要素子集  $C_i (i = 1, 2, \dots, n)$  有  $n_i$  个子指标,即  $C_i = \{C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{in_i}\}$ , 其中,  $C_{ik}$  表示第  $i$  类要素子集的第  $k$  个子指标。

### 1.2 确定经典域与节域

将维修保障系统效能划分为  $J$  个等级,则对于要素子集  $C_i$  的同征物元体<sup>[4]</sup>表示为

$$R_0 = \begin{bmatrix} N & N_1 & N_2 & \dots & N_J \\ C_i & V_1 & V_2 & \dots & V_J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & N_1 & \dots & N_J \\ C_{i1} & \langle a_{i11}, b_{i11} \rangle & \dots & \langle a_{i1J}, b_{i1J} \rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{in_i} & \langle a_{in_i1}, b_{in_i1} \rangle & \dots & \langle a_{in_iJ}, b_{in_iJ} \rangle \end{bmatrix}$$

收稿日期:2006-03-09

作者简介:杨懿(1978-),男,陕西西安人,博士生,主要从事军事系统工程研究;

武昌(1944-),男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,主要从事军事装备学研究。

其中:  $N_j$  表示所划分的第  $j$  个评估等级,  $C_i$  表示第  $i$  类评估要素子集,  $C_{ik}$  表示  $C_i$  的第  $k$  个评估子指标,  $V_{ikj} = \langle a_{ikj}, b_{ikj} \rangle$  表示  $N_j$  关于子指标  $C_{ik}$  所规定的量值范围, 即各类别关于对应的子指标所取得数据范围(经典域)。

$$R_p = (P, C_i, V_p) = \begin{bmatrix} P & C_{i1} & V_{i1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{in_i} & V_{in_i p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P & C_{i1} & \langle a_{i1p}, b_{i1p} \rangle \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{in_i} & \langle a_{in_i p}, b_{in_i p} \rangle \end{bmatrix}$$

其中:  $P$  表示要素子集  $C_i$  评估等级的全体;  $V_{ikp} = \langle a_{ikp}, b_{ikp} \rangle$  为  $P$  关于子指标  $C_{ik}$  所取量值的范围, 即  $P$  的节域, 且  $V_{ikj} \subset V_{ikp} (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, n_i; j = 1, 2, \dots, J)$ 。

1.3 确定待评物元

待评的维修保障系统  $Q$ , 对于子集  $C_i$  所检测所得的数据或分析结果用物元  $R_Q$  表示:

$$R_Q = (Q, C_i, V_Q) = \begin{bmatrix} Q & C_{i1} & V_{i1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{in_i} & V_{in_i} \end{bmatrix}$$

其中:  $V_{ik}$  为  $Q$  关于子指标  $C_{ik}$  的量值, 即待评系统  $Q$  检测所得的具体数据。

1.4 确定指标权重

指标权重是指某个上层指标的多个子指标权重, 权重的大小刻划了各子指标的重要程度, 权重越大表明该子指标对其上层指标影响越大, 指标的权重需进行归一化处理。

确定第  $i$  类评估要素子集  $C_i$  的权重为  $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 且  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ ;

确定要素子集  $C_i$  的第  $k$  个子指标  $C_{ik}$  权重为  $\alpha_{ik}$ , 且  $\sum_{k=1}^{n_i} \alpha_{ik} = 1 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

1.5 一级综合评估

关联函数是一个统一的、反映维修保障系统效能各评估指标特性的特征函数, 表示待评物元  $R_Q$  的某一指标数据取值为实轴上一点时, 符合所划分等级取值范围的程度。通过关联函数的计算, 确定待评系统  $Q$  对于子指标  $C_{ik}$  关于各评估等级  $j$  的关联度:

$$K_j(V_{ik}) = \begin{cases} \frac{\rho(V_{ik}, V_{ikj})}{\rho(V_{ik}, V_{ikp}) - \rho(V_{ik}, V_{ikj})}, & V_{ik} \notin [a_{ikj}, b_{ikj}] \\ -\rho(V_{ik}, V_{ikj}), & V_{ik} \in [a_{ikj}, b_{ikj}] \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\rho(x, \langle a, b \rangle) = |x - (a + b)/2| - (b - a)/2 \quad (2)$

关联度  $K_j(V_{ik})$  表示维修保障系统效能的某一评估子指标特性符合所划分等级取值范围的程度。对于子集  $C_i$  进行综合评估, 计算  $Q$  对于  $C_i$  关于等级  $j$  的关联度:

$$K_{ij}(Q) = \sum_{k=1}^{n_i} \alpha_{ik} K_j(V_{ik}) \quad (3)$$

1.6 多级综合评估及等级评定

计算待评的维修保障系统  $Q$  关于等级  $j$  的综合关联度:

$$K_j(Q) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_{ij}(Q) \quad (4)$$

比较各等级综合关联度的大小以确定评估结果。等级  $j$  的关联度越大, 表明维修保障系统与该等级集合的符合程度越佳。即: 若  $K_{j_0}(Q) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, J\}} K_j(Q)$ , 则评定  $Q$  属于等级  $j_0$ 。

计算待评的维修保障系统  $Q$  的级别变量特征值  $j^*$ :

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^J j K_j(Q)}{\sum_{j=1}^J K_j(Q)} \quad (5); \quad \bar{K}_j(Q) = (\bar{K}_j(Q) - \min_j K_j(Q)) / (\max_j K_j(Q) - \min_j K_j(Q)) \quad (6)$$

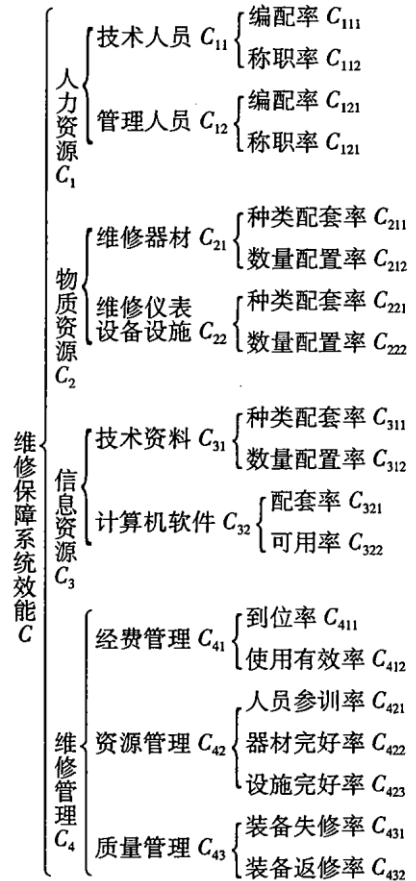


图1 装备维修保障系统效能评估指标体系

级别变量特征值 $j^*$ 反映系统 $Q$ 的等级 $j_0$ 偏向另一类别的程度。例如, $j_0 = 2, j^* = 2.7$ 表示维修保障系统 $Q$ 属于第2类偏向第3类(严格说应属于2.7类)。

## 2 指标权重的确定

### 2.1 AHP、GEM 法概述

AHP<sup>[6]</sup>的本质是将人的经验对复杂系统的处理过程数学化,强调思维判断在决策过程中的作用,体现了决策思维的基本特征:分解、判断、综合。其基本步骤:通过把复杂系统概念化,分析系统中包含的各种因素及其互相影响或支配关系,从而分解为一些组成元素基本相同的子系统,并按一定的准则,运用两两比较判断的方式确定子系统的相对重要性和各子系统中元素的相对重要性,进而运算合成为各决策元素对系统的重要性排序。

群组决策特征根法(GEM)<sup>[7-8]</sup>的本质是寻找评分向量与群组专家( $S_1, S_2, \dots, S_m$ )夹角之和最小的理想专家 $S^*$ ,以 $S^*$ 的评分作为被评对象的排序。GEM的基本步骤:第 $i$ 个专家 $S_i$ 对第 $j$ 个被评目标 $B_j$ 的评分值为 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ , $x_{ij}$ 越大, $B_j$ 越优。 $S_i$ 及群组的评分组成 $n$ 维列向量 $x_i$ 和 $m \times n$ 阶评分矩阵 $X$ :

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in E^n \quad ; \quad X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

将评分矩阵 $X$ 转置自乘记为矩阵 $F$ ,即 $F = X^T X$ 。 $F$ 的最大特征根 $\rho_{\max}$ 对应的正特征向量即为理想专家 $S^*$ 的评分向量 $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)^T \in E^n$ ,表示群组专家的最优决策。

### 2.2 AHP - GEM 综合算法

AHP与GEM都是将定性与定量因素结合起来,用一种统一的方式处理决策问题。AHP具有系统性和实用性等优点,但存在判断矩阵不一致、比较标度法不足等缺点;GEM具有简洁性、群体决策、标度具有较大灵活性等优点,但存在过分依赖专家意见、考虑问题过于笼统等缺点。按综合集成的方式将AHP和GEM相结合,可以做到扬长避短、兴利除弊。其综合步骤如下:①按照AHP的首要步骤建立层次结构模型;②确定专家评分矩阵。假定以上层元素 $O$ 为准则,请专家对准则 $O$ 支配的下层元素 $C_1, C_2, \dots, C_n$ 直接打分,得到专家评分矩阵 $X$ ;③运用GEM法计算专家评分矩阵 $X$ 的元素排序,归一化作为元素的权重;④根据层次结构模型自上而下重复步骤2-4,求得各层元素的权重。

## 3 应用示例

多级可拓评估方法可以实现维修保障系统效能评估的细化分级,是由定性到定量评估的一次飞跃。本文以5个拟进行评估的维修保障系统为对象,运用多级可拓评估方法对其进行效能评估。5个维修保障系统的基本数据如表1所示。

将图1中的评估指标逐级分类,运用AHP - GEM综合算法求出指标权重。由于篇幅有限,仅以第一层为例定出权重,各专家对第1层4个因素的评分如表2所示。

表2 专家评分表

评估指标	专家1	专家2	专家3	专家4
$C_1$	5	5	4	3
$C_2$	3	1	5	4
$C_3$	2	4	2	2
$C_4$	4	3	3	5

表1 维修保障系统效能评估原始数据

评估指标	系统1	系统2	系统3	系统4	系统5	指标节域
$C_{111}$	0.85	0.85	0.9	0.95	0.70	[0.6, 1]
$C_{112}$	0.50	0.95	0.6	0.90	0.70	[0.4, 1]
$C_{121}$	0.90	0.90	0.7	0.90	0.80	[0.6, 1]
$C_{122}$	0.90	0.90	0.5	0.90	0.60	[0.4, 1]
$C_{211}$	0.90	0.90	0.6	0.80	0.70	[0.5, 1]
$C_{212}$	0.85	0.85	0.8	0.95	0.90	[0.5, 1]
$C_{221}$	0.85	0.85	0.7	0.80	0.80	[0.5, 1]
$C_{222}$	0.85	0.85	0.6	0.90	0.70	[0.5, 1]
$C_{311}$	0.85	0.85	0.7	0.90	0.70	[0.6, 1]
$C_{312}$	0.85	0.85	0.7	0.80	0.90	[0.6, 1]
$C_{321}$	0.50	0.95	0.5	0.95	0.80	[0.4, 1]
$C_{322}$	0.70	0.7	0.8	0.90	0.80	[0.5, 1]
$C_{411}$	0.70	0.07	0.7	0.80	0.90	[0.6, 1]
$C_{412}$	0.75	0.75	0.7	0.90	0.80	[0.6, 1]
$C_{421}$	0.75	0.75	0.7	0.90	0.80	[0.6, 1]
$C_{422}$	0.75	0.75	0.9	0.80	0.70	[0.6, 1]
$C_{423}$	0.80	0.80	0.7	0.90	0.80	[0.6, 1]
$C_{431}$	0.25	0.25	0.4	0.15	0.35	[0.1, 0.5]
$C_{432}$	0.25	0.25	0.4	0.20	0.30	[0.1, 0.5]

根据专家评分确定矩阵  $X$ , 计算  $S^*$  评分向量为  $(0.605, 0.47, 0.352, 0.538)$ , 归一化即得第一层各指标权重分别为  $C_1 = 0.31, C_2 = 0.24, C_3 = 0.18, C_4 = 0.27$ 。相类似, 逐层向下可得指标体系中各指标的权重如表3所示。

将评估指标量值的范围(指标节域, 见表1)从优至劣均分为  $N_j (j=1, 2, \dots, 5)$  等5个等级, 按表3中所确定的权重, 根据式(1)-(6)计算出5个拟进行评估的维修保障系统关于各等级  $N_j$  的综合关联度和评定等级, 具体评估结果如表4所示。

分析表4中的数据可知, 系统1的效能属2级( $j_0 = 2$ ) 偏3级( $j^* = 2.447\ 906$ ), 同理, 系统2的效能属2级( $j_0 = 2, j^* = 2.217\ 392$ )、系统3的效能属4级( $j_0 = 4, j^* = 3.832\ 693$ )、系统4的效能属1级( $j_0 = 1, j^* = 1.931\ 929$ )、系统5的效能属3级( $j_0 = 3, j^* = 3.152\ 011$ )。根据级别变量特征值  $J^*$  可知, 系统效能排序名次为: 系统<sub>4</sub> > 系统<sub>2</sub> > 系统<sub>1</sub> > 系统<sub>5</sub> > 系统<sub>3</sub>。

表3 用 AHP - GEM 综合算法得出的指标权重

一层指标 权 重	二层指标 权 重	三层指标 权 重
$C_1 = 0.31$	$C_{11} = 0.56$	$C_{111} = 0.44$
	$C_{12} = 0.44$	$C_{112} = 0.56$
$C_2 = 0.24$	$C_{21} = 0.56$	$C_{121} = 0.44$
		$C_{122} = 0.56$
	$C_{22} = 0.44$	$C_{211} = 0.44$
		$C_{212} = 0.56$
$C_3 = 0.18$	$C_{221} = 0.56$	$C_{221} = 0.56$
	$C_{222} = 0.44$	$C_{222} = 0.44$
$C_4 = 0.27$	$C_{31} = 0.60$	$C_{311} = 0.60$
	$C_{32} = 0.40$	$C_{312} = 0.40$
$C_4 = 0.27$	$C_{41} = 0.264$	$C_{321} = 0.40$
		$C_{322} = 0.60$
	$C_{42} = 0.344$	$C_{411} = 0.44$
		$C_{412} = 0.56$
		$C_{421} = 0.36$
$C_{43} = 0.392$	$C_{422} = 0.36$	$C_{422} = 0.36$
	$C_{423} = 0.28$	$C_{423} = 0.28$
		$C_{431} = 0.60$
		$C_{432} = 0.40$

表4 维修保障系统效能多级可拓评估结果

$K_j(Q)$	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	max	$j_0$	$j^*$
系统1	-0.355 445	-0.161 171	-0.250 891	-0.352 508	-0.474 143	-0.161 171	2	2.447 906
系统2	-0.249 381	-0.143 669	-0.277 144	-0.440 019	-0.589 553	-0.143 669	2	2.217 392
系统3	-0.584 688	-0.443 094	-0.323 260	-0.084 757	-0.247 548	-0.084 757	4	3.832 693
系统4	-0.111 471	-0.138 756	-0.417 142	-0.596 308	-0.697 231	-0.111 471	1	1.931 929
系统5	-0.418 012	-0.242 003	-0.129 784	-0.179 321	-0.394 110	-0.129 784	3	3.152 011

作为一种新的综合评估方法, 人们普遍关心的问题是这种评估方法的结果是否可靠, 是否具有实用价值。为验证多级可拓评估方法在维修保障系统效能评估问题的可行性和可靠性, 分别采用 AHP 与加权综合法、突变评价法<sup>[3]</sup>对上述对象进行计算, 并将所得的评估结果进行比较。AHP 和突变评价法的具体步骤和过程参见参考文献[1, 3],

具体评估结果如表5所示。从表5中可知, 两种方法得到的系统排名均为: 系统<sub>4</sub> > 系统<sub>2</sub> > 系统<sub>1</sub> > 系统<sub>5</sub> > 系统<sub>3</sub>, 与多级可拓评估方法的结果一致, 有理由认为本文所建模型是可靠的。

表5 维修保障系统效能 AHP 与突变评价法结果

系统	结合 AHP 与加权综合法		突变评价法	
	效能评估值	名次	效能评估值	名次
系统1	0.844 554 0	3	0.990 206 3	3
系统2	0.904 238 2	2	0.993 676 6	2
系统3	0.722 936 6	5	0.980 742 3	5
系统4	0.972 741 1	1	0.998 233 4	1
系统5	0.798 587 6	4	0.988 001 9	4

#### 4 结束语

本文构建了维修保障系统效能评估指标体系, 运用 AHP - GEM 算法得到一系列的指标权重集合, 并采用多级可拓评估方法对维修保障系统效能进行了综合评估, 以定量的结果对系统效能进行评估分级。示例表明, 多级可拓评估方法具有明确的物理意义, 能够客观地确定待评系统隶属于特定等级(或水平)的程度, 并可根据实际需要动态调整所划分的等级, 从而准确掌握评估对象的实际状况, 较之 AHP 和突变评价法等

方法具有更大的优越性;同时,计算公式和步骤简便,结果合理、客观,为解决军事领域类似效能评估问题提供一种新思路。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张所新. 空军通信装备维修保障系统效能评估研究[D]. 西安:空军工程大学,2001.
- [ 2 ] 穆富岭,武 昌. 维修保障系统效能评估中的变权综合法初探[J]. 系统工程与电子技术,2003,25(6):693-696.
- [ 3 ] 杨 懿,武 昌,齐胜利. 基于突变理论的维修保障系统效能评估研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2005,6(5):10-15.
- [ 4 ] 蔡 文,杨春燕,林伟初. 可拓工程方法[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [ 5 ] 杨春燕,蔡 文. 可拓工程研究[J]. 中国工程科学,2000,2(12):90-96.
- [ 6 ] 姜启源. 数学模型(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社. 1998.
- [ 7 ] 邱菀华. 群组决策特征根法[J]. 应用数学和力学,1997,18(11):1027-1031.
- [ 8 ] 洪源源,邱菀华. AHP、GEM 及其综合算法[J]. 中国管理科学,2000,8(4):36-42.

(编辑:门向生)

## Study of Effectiveness Evaluation of Maintenance Support System Based on Multi-level Extension Method

YANG Yi<sup>1</sup>, WU Chang<sup>1</sup>, LIU Han<sup>2</sup>, QI Sheng-li<sup>1</sup>

(1. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, Shaanxi, China; 2. Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

**Abstract:** The effectiveness evaluation index system of maintenance support system is established. The multi-level extension evaluation method is used to study the effective evaluation of maintenance support system, by comparison with the results of AHP and the catastrophe evaluation method, the conclusions obtained are on the whole the same. This provides a new method for effective evaluation of maintenance support system and also provides a quantitative basis for decision-making.

**Key words:** maintenance support system; multi-level extension evaluation; AHP; GEM