

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.12.005

一种基于物元分析的保障系统效能评估方法

宋永军^{1,2}, 陈春良²

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 装甲兵工程学院技术保障系, 北京 100072)

摘要: 为了准确地描述自主式保障系统的效能因素, 构建一种自主式保障系统的评估指标体系, 并给出权重分析方法。在分析系统效能评估过程的基础上, 采用 P-FHW 方法, 进行系统效能评估建模, 并通过算例进行验证。算例结果表明: 该方法具有实用性, 可对自主式保障系统效能进行有效评估。

关键词: 自主式保障; 指标; 效能评估; P-FHW

中图分类号: TJ07 **文献标志码:** A

Effectiveness Evaluation for Support System Based on Matter Element Analysis

Song Yongjun^{1,2}, Chen Chunliang²

(1. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Dept. of Technical Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: In order to describe the efficiency factor of autonomic logistics (AL) system accurately, an AL evaluation index system was established. The weight analysis was introduced, on the basis of the process of system effectiveness evaluation was analyzed, adopt P-FHW method progress system evaluation modeling. The demonstration results verify the effectiveness and practicability of the method.

Keywords: AL; index; effectiveness evaluation; P-FHW

0 引言

自主式保障 (autonomic logistics) 是美军首先于 JSF 项目中提出的一种创新型保障方案, 是一种能自己管理其相关的军事器材、设施和人员的采购、维修和运输的军事实体或系统^[1]。由于自主式保障系统的多维性和复杂性, 很多影响效能的因素具有模糊性、不确定性, 其运作过程和各因素之间的关系难以利用数学模型来描述, 其系统效能的量化分析难度很大。

P-FHW 分析法是将概率 (probability)、模糊 (fuzzy) 方法、灰色关联 (H-grey-correlative) 和物元分析 (W-metter-element) 结合形成的一种效能评估方法, 它能有效地对复杂大系统进行论证评价^[2]。因此, 笔者采用物元分析方法, 对保障系统的效能评估进行研究。

1 系统效能评估过程

无论采用何种评估思路, 以及何种评估方法, 自主式保障系统的效能评估都要遵循基本的评估过程。这个基本评估过程一般包括 6 个主要环节, 如图 1。

指标体系的构建与权重分析、效能评估模型的

建立是关键步骤。效能指标体系是利用多个指标对“效能”的层次化分解, 它是效能评估思想的具体体现, 也是效能评估的基本依据^[3]。

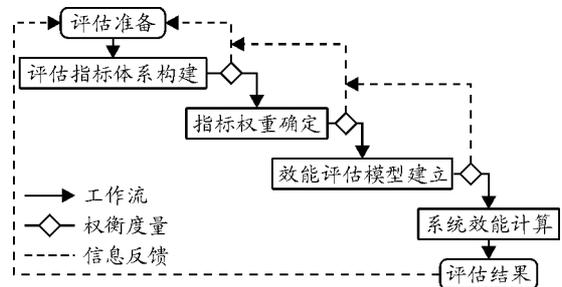


图 1 自主式保障系统效能评估过程

自主式保障系统效能评估结果可以采用定性和定量 2 种表现形式, 即以评语或数值表述评估结果, 也可将二者统一起来。通过分析报告可以发现自主式保障系统存在的缺陷和瓶颈问题, 可以找到改进自主式保障系统效能的方法和途径, 为下一次更好地进行自主式保障系统效能评估提供支持。

2 系统评估指标体系构建

自主式保障系统指标体系是反映自主式保障系统内部结构、外在状态及其发展变化趋势指标和部分反映自主式保障状态指标的集合。建立完善的

收稿日期: 2011-08-28; 修回日期: 2011-09-23

作者简介: 宋永军(1980—), 男, 山西人, 在读博士生, 工程师, 从事装备保障研究。

自主式保障系统, 必须有与之相应的管理与评估体系, 系统评估指标的确定、量化是开展系统开发和论证评估的一个关键基础环节^[4]。笔者试图从“能力分解”的角度构建完整的指标体系, 探索自主式保障系统效能指标体系构建的方法。

2.1 指标体系构建原则

自主式保障系统指标体系应能全面、真实地反映自主式保障系统的特征及主要目标的实现程度, 应尽可能地选择重要度高的参量, 同时降低参量缺失与冗余情况的发生^[5]。由于自主式保障系统自身的特点, 在其指标体系的构建过程中, 除了要遵循指标体系构建的一般原则(如系统性、科学性、可测性和完备性等)之外, 还应遵循一些特定的原则:

1) 目标性。由于自主式保障系统的建设过程中有很多“利益攸关者”(如, 论证单位、研制单位、使用单位等), 笔者构建的指标体系的限定条件为: 关心人群为装备保障人员, 所处阶段为需求论证阶段。

2) 对象性。自主式保障系统效能指标体系构建要针对保障系统的所处层次、军兵种区别分析, 笔者以陆军机械化部队为对象进行分析。

3) 贴近我军实际。我军信息化建设与外军尚有一定差距, 自主式保障系统作为信息化建设的重点工程, 还有很长的发展完善时期。

2.2 自主式保障系统指标体系构建

自主式保障系统指标体系的构建过程包括资料分析、指标初选、指标分析、方案优选 4 个阶段。根据自主式保障模式的特点, 采用专家调查法和主成分分析方法建立了如表 1 的指标体系。此指标体系不是针对某一类型装备保障, 而是从一般概念意义上, 对自主式保障需求进行总结提炼, 抽取某些共性的内容组成评估指标体系。

指标体系分 3 层, 第 1 层(顶层)是目标层; 第 2 层是能力层, 即实现自主式保障所需的各种能力; 第 3 层是指标层, 即各要素所涉及的具体性能指标。

自主式保障系统是一个复杂而庞大的系统, 效能影响要素繁多, 涉及的专业领域甚广。指标体系的建立要考虑到效能评估过程中其他环节的影响, 指标体系的确定需要根据整个评估过程的需要不断地进行修正, 而且保障系统在不断发展, 改进和完善指标体系是一个长期的过程。

表 1 自主式保障系统评估指标体系

目标层	能力层	权重	指标层	权重
自主式保障系统评估的总目标 A	信息能力 A ₁	W ₁	传感器性能 b ₁	e ₁
			信息传输性能 b ₂	e ₂
			信息处理容量 b ₃	e ₃
			信息融合能力 b ₄	e ₄
			复杂电磁对抗 b ₅	e ₅
	PHM 能力 A ₂	W ₂	安全保密性 b ₆	e ₆
			故障虚警率 b ₇	e ₇
			状态评估性能 b ₈	e ₈
			趋势预测 b ₉	e ₉
			寿命预测准确率 b ₁₀	e ₁₀
	信息系 统能力 A ₃	W ₃	指挥控制范围 b ₁₁	e ₁₁
			系统反应时间 b ₁₂	e ₁₂
			辅助决策能力 b ₁₃	e ₁₃
			互操作能力 b ₁₄	e ₁₄
			态势评估 b ₁₅	e ₁₅
保障资 源能力 A ₄	W ₄	备件可用度 b ₁₆	e ₁₆	
		保障设备可用度 b ₁₇	e ₁₇	
		器材补给效率 b ₁₈	e ₁₈	
		保障资源调度 b ₁₉	e ₁₉	
		数据交付准确率 b ₂₀	e ₂₀	
保障人 员能力 A ₅	W ₅	维修人员数量 b ₂₁	e ₂₁	
		人员知识水平 b ₂₂	e ₂₂	
		经验和熟练程度 b ₂₃	e ₂₃	
综合保 障能力 A ₆	W ₆	装备可用性 b ₂₄	e ₂₄	
		维修完好率 b ₂₅	e ₂₅	
		保障规模 b ₂₆	e ₂₆	
		维修保障度 b ₂₇	e ₂₇	
		使用保障度 b ₂₈	e ₂₈	

2.3 指标权重分析方法

目前确定指标权重的方法较多, 但一般可以分为主观赋权法、客观赋权法, 以及主客观结合法 3 类。主观赋权主要包括: 主观经验法、Delphi 法等^[6]。自主式保障系统效能评估指标需要专家对其进行半定性、半定量的分析、评价, 这种评价包含着许多不确定、模糊、随机的部分。因此在评估过程中, 给出一个指标评估值的一个区间是较为合理的方式, 集值统计方法是一种非常好的分析工具。

集值统计是经典统计和模糊统计的一种推广^[7], 每次实验所得到的不是一个确定的点, 而是相空间的一个子集。假设有 m 个指标 b_1, b_2, \dots, b_m , n 个专家 I, II, \dots, N , 则第 j 个专家对第 i 个指标给出的以区间估计值来表示的权重为 $[x_{ij}, y_{ij}]$ 。

将指标 b_i 的权重区间 $[x_{i\min}, y_{i\max}]$ 分为 w 等份 (w 为大于 1 的正整数, 取值可视精度而定), 则每等份的长度为 $w = \frac{y_{i\max} - x_{i\min}}{w}$ 。这样, 可以得到考

考虑各专家权重的指标 b_i 权重区间值:

$$[x_{i\min} + p_i \times W, x_{i\min} + q_i \times W]$$

其中 $i=1,2,\dots,m$, p_i 、 q_i 为正整数。

对于这些区间数据的处理, 包括 p_i 、 q_i 的选择, 分乐观、悲观、平均 3 种评判准则, 分别将区间投影到最大值、最小值、平均值。

假设采取平均准则, 则指标 b_i 的权重为:

$$e_i = \frac{[(x_{i\min} + p_i \times W) + (x_{i\min} + q_i \times W)]}{2} = x_{i\min} + \frac{(p_i + q_i) \times W}{2}$$

归一化处理, 得到指标 b_i 的权重为: $e'_i = \frac{e_i}{\sum_{i=1}^m e_i}$

$$R = \begin{bmatrix} [0.13,0.22] & [0.10,0.14] & [0.07,0.10] & [0.06,0.09] & [0.10,0.13] & [0.08,0.12] & [0.11,0.15] & [0.06,0.08] \\ [0.15,0.25] & [0.10,0.15] & [0.05,0.09] & [0.07,0.10] & [0.11,0.13] & [0.05,0.09] & [0.12,0.15] & [0.05,0.10] \\ [0.17,0.24] & [0.12,0.16] & [0.05,0.10] & [0.07,0.09] & [0.10,0.12] & [0.07,0.10] & [0.10,0.14] & [0.06,0.09] \\ [0.14,0.23] & [0.11,0.14] & [0.06,0.08] & [0.06,0.08] & [0.11,0.12] & [0.07,0.11] & [0.12,0.14] & [0.07,0.09] \end{bmatrix}$$

由矩阵可得 8 个指标的权重区间值为 $[0.17,0.22]$, $[0.12,0.14]$, $[0.07,0.08]$, $[0.07,0.08]$, $[0.11,0.12]$, $[0.08,0.09]$, $[0.12,0.14]$, $[0.07,0.08]$ 。

采用平均准则, 各指标 b_i 的归一化权重为:

$$e'_i = (0.20, 0.13, 0.07, 0.13, 0.11, 0.08, 0.21, 0.07)$$

8 个指标的集中度 Z_i 向量为:

$$Z = (0.088, 0.040, 0.035, 0.025, 0.020, 0.038, 0.032, 0.030)$$

可以看出, 最大值为 $Z_1=0.088$, 最小值为 $Z_5=0.020$ 。说明专家在评价时, 对指标 b_5 把握较大, 而对指标 b_1 把握较小。

3 系统效能评估

3.1 基于 P-FHW 的效能评估建模

P-FHW 方法将灰色系统、模糊数学、概率统计与物元分析有机结合起来, 可对系统进行量化计算。

1) PFG 物元的概念

所谓 PFG 物元, 就是以有序三元组“事物、特征、确定的概率值或模糊数白化值”作为描述事物的基本元^[8], 记为 PR 。若用 M 表示事物, c 表示事物的特征, P 表示事物特征相应的概率、模糊数白化值, 有:

$$PR = \begin{bmatrix} M \\ c \quad P \end{bmatrix}$$

可以用函数 $Z_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_{ij} - x_{ij})$ 来衡量专家评价

区间的集中度, Z_i 越小, 说明各专家对于指标权重的评价区间越集中, 即专家对指标的把握性越大; 否则把握性越小。

以自主式保障系统为例进行分析。从表 1 中取出 8 个指标, 分别为故障虚警率 b_1 、信息处理容量 b_2 、寿命预测准确率 b_3 、辅助决策能力 b_4 、维修人员数量 b_5 、保障设备可用度 b_6 、保障资源调度能力 b_7 、维修完好率 b_8 。另请 4 位专家进行评价, 专家权重值分别为 0.3, 0.3, 0.2, 0.2。对 8 个指标, 专家评价矩阵为:

2) 关联分析

通常以各指标参数的期望值构造“理想模式”, 选定各项指标相应得优化值, 构成新的 n 维 PFG 物元, 即为 PR_0 。

经数据变换后, 第 j 个方案第 i 个指标对应的关联系数值 $P\xi_{ji}$ ($j=1,2,\dots,m; i=1,2,\dots,n$) 经分析可用下式计算:

$$P\xi_{ji} = \frac{1}{\rho_{ji} + 1}, \quad (j=1,2,\dots,m; i=1,2,\dots,n)$$

式中, $\rho_{ji} = |P_{0i} - P_{ji}|$ 。

若以 PR_ξ 表示 m 个方案的 n 维关联系数 PFG 物元, 则有:

$$PR_\xi = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ c_1 & P\xi_{11} & P\xi_{21} & \dots & P\xi_{m1} \\ c_2 & P\xi_{12} & P\xi_{22} & \dots & P\xi_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_n & P\xi_{1n} & P\xi_{2n} & \dots & P\xi_{mn} \end{bmatrix}$$

3) 计算加权关联度

把分散的各关联系数的值集中为一个值, 以利于在整体上进行比较, 对各关联系数按加权平均进行处理可得关联度:

$$PR_k = R_w P_\xi$$

式中, R_w 表示事物各指标权重复合灰元, 若以 W_i

表示各特征的权重, 则有:

$$PR_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \dots & M_m \\ K_1 & K_1 & K_2 & \dots & K_m \end{bmatrix}$$

式中, $K_j = \sum_{i=1}^n W_{ji} P \xi_{ji}$ 。

由于对关联系数的计算方法进行了改进, 这样所计算出的加权关联度就成为一种绝对评价的指标, 它不受其它评估方案的影响, 其值只代表了与理想方案的趋近程度。

3.2 计算示例

1) 系统性能指标赋值

表 2 6 种情况下的系统性能指标值

指标	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8
X_1	0.23	522	0.85	良	22	0.76	良	0.98
X_2	0.14	437	0.76	中	24	0.76	中	0.99
X_3	0.09	47	0.88	中	8	0.85	良	0.75
X_4	0.09	38	0.80	良	9	0.73	良	0.72
X_5	0.08	38	0.80	优	9	0.71	优	0.78
X_6	0.09	123	0.71	优	12	0.71	优	0.96

首先构建评估对象集, 还以上述 8 个自主式保障系统性能指标 $b_1 \sim b_8$ 为例进行分析, 每个指标分

$$PR_k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 \\ K_1 & K_1=0.7941 & K_2=0.7427 & K_3=0.6724 & K_4=0.6439 & K_5=0.6889 & K_6=0.7229 \end{bmatrix}$$

可以看出在 6 种指标取值情况下, 系统效能评估排序为: $M_1 > M_2 > M_6 > M_5 > M_3 > M_4$, 即 8 个指标选取第 1 组值的情况下自主式保障系统的效能评估值最优, 取第 4 组值效能评估值最差。

4 结束语

算例验证结果证明, 利用物元分析方法对自主式保障系统的效能进行评估是切实可行的。

参考文献:

[1] 张宝珍. 自主式保障——信息时代武器装备保障新模式[C]. 第十八届全国测试与故障诊断技术研讨会暨武器装备综合保障信息化技术研讨会论文集, 2009: 1-7.
 [2] 彭飞, 胡光正. SPA 及其在模糊、灰色物元空间决策支

别选取 6 组赋值 $X_1 \sim X_6$, 如表 2, 对这 6 种取值下的系统性能进行评估。

2) 系统效能评估

隶属函数的建立要反映评估因素的分布特性, 尽量使函数形式简单易算。通过对自主式保障系统上述指标的分析, 建立隶属函数如下, 在此不一一详述。

$$\mu_{i2} = 0.7 \times \left(\frac{b_2 - 30}{600 - 30} \right) + 0.3, \quad 30 \leq b_2 \leq 600$$

$$\mu_{i4} = \begin{cases} 0.9, & \text{优} \\ 0.8, & \text{良} \\ 0.6, & \text{中} \\ 0.4, & \text{差} \end{cases}$$

可构建 6 种情况下系统的 8 维复合 PFG 物元:

$$PR_{\xi} = \begin{bmatrix} 0.6458 & 0.8333 & 0.9375 & 0.9375 & 0.9583 & 0.9375 \\ 0.9042 & 0.7998 & 0.3209 & 0.3098 & 0.3098 & 0.4142 \\ 0.7429 & 0.5885 & 0.7943 & 0.6571 & 0.6571 & 0.5029 \\ 0.8333 & 0.8750 & 0.5417 & 0.5625 & 0.5625 & 0.6250 \\ 0.8 & 0.6 & 0.6 & 0.8 & 0.9 & 0.9 \\ 0.6622 & 0.6622 & 0.8222 & 0.5733 & 0.6089 & 0.5733 \\ 0.8 & 0.6 & 0.8 & 0.8 & 0.9 & 0.9 \\ 0.9650 & 0.9825 & 0.5625 & 0.5100 & 0.6150 & 0.9300 \end{bmatrix}$$

由公式计算可得关联度为:

持系统中的应用[J]. 系统理论工程与实践, 1998(11): 103-106.
 [3] 孟庆均, 郭齐胜, 邴志刚. C⁴ISR 系统效能评估中的数据聚合方法[C]. 2006 年军事运筹学会学术年会——体系对抗与军事运筹研究, 2006: 452-455.
 [4] 王青海, 常颖, 王晓峰. C⁴ISR 系统效能评估指标体系构建[J]. 兵器试验, 2001(2): 50-53.
 [5] 陈淑红, 刘政波, 李智, 等. 导弹装备维修性指标体系构建方法研究[J]. 战术导弹技术, 2010(1): 57-62.
 [6] 吴洁敏. 临港工业区规划环境影响评价指标体系构建[D]. 桂林: 广西大学, 2008.
 [7] 闫皓, 贺仲雄. 权重分析系统[J]. 系统工程与电子技术, 1992(4): 41-45.
 [8] 姚奕, 冯林平, 唐震. 基于 P-FHW 分析法的潜射导弹武器系统作战效能评估[J]. 战术导弹技术, 2009(3): 13-16.