

# 维修保障系统效能评估的灰色—证据理论模型

艾宝利, 武昌

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

**摘要:**对装备维修保障系统效能作出科学、准确的评估是发现、改进系统不足,提高装备保障效能的一项重要依据。实际评估过程中由于各种不确定性因素的存在,通常不易得出准确的评估结论。针对当前评估方法在处理不确定信息方面的不足,提出一种基于灰色—证据理论的维修保障系统效能评估模型。在建立系统效能评估指标体系的基础上,首先通过专家法、实地调研法和仿真分析法获取系统效能的评估指标值,并通过计算评估指标值与系统评估等级之间的灰色关联度,构建不同方法下系统效能评估等级的基本概率分配,最后利用证据理论的合成规则对不同方法下系统的评估等级进行合成,从而获得系统效能的评估结论。实例验证表明,模型是有效的。

**关键词:**维修保障;效能评估;灰色关联度;证据理论

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2009.04.018

**中图分类号:** N945.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)04-0081-04

当前针对维修保障系统效能评估的研究考虑不确定性因素较少,实际中由于评估主体的主观偏好性、系统本身的复杂性、评估指标信息源的多样性以及评估信息的融合等方面都存在一定程度的不确定性,其必然影响最终结论的可靠性。灰色系统理论<sup>[1-2]</sup>是处理这类问题的有力工具,它是由我国著名学者邓聚龙教授1982年创立的用于处理贫信息和不确定信息的方法,其原理是通过已知信息来确定系统的未知信息,从而使系统由“灰”变“白”。证据理论<sup>[3-4]</sup>是由美国的 Dempster A P 于1967年提出并由其学生 G.Shafer 加以改进和发展而来的,能较好地处理具有模糊性和不确定性信息的合成问题。因此本文结合两者的特点,提出一种基于灰色—证据理论的维修保障系统效能评估模型。

## 1 灰色关联度与证据理论

### 1.1 灰色关联度与证据

设  $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k), \dots, x_0(n))$  为系统的参考序列,  $x_0(k)$  为  $k$  点的参考值。  $X = (X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_m)$  为系统的因素序列, 其中  $X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k), \dots, x_i(n))$  为第  $i$  个因素的观测序列,  $x_i(k)$  为第  $i$  个因素在  $k$  点的观测值。则称:

$$r(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k)) \quad (1)$$

为  $X_i$  与  $X_0$  的灰色关联度<sup>[5-6]</sup>, 其中:

$$r(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \xi \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (2)$$

为  $X_i$  与  $X_0$  在  $k$  点的关联系数,  $\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$ ,  $\xi \in (0, 1)$  称为分辨系数, 通常取 0.5。

\* 收稿日期: 2008-12-22

作者简介: 艾宝利(1980-), 男, 辽宁锦州人, 博士, 主要从事空军通信导航系统建模与评估研究;

E-mail: aibaoli.na@gmail.com

武昌(1944-), 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 主要从事空军装备技术保障。

### 1.2 证据理论

定义1 设辨识框  $\Omega$  是变量的所有可能集合,  $2^\Omega$  是  $\Omega$  的幂集, 若函数  $m: 2^\Omega \rightarrow [0, 1]$  满足

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1 \end{cases} \quad (3)$$

则称  $m$  为  $\Omega$  上的基本概率分配函数,  $m(A)$  为  $A$  的基本概率数。 $A$  的信任区间为  $(B_{el}(A), P(A))$ , 其中  $B_{el}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B)$ ,  $P(A) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B)$

定义2 设辨识框为  $\Omega$ ,  $m_1, m_2, \dots, m_n$  为  $\Omega$  的  $n$  个基本概率分配函数, 则它们的组合规则<sup>[7]</sup> 是  $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$ , 可表示为:

$$m(A) = \begin{cases} \frac{1}{1-k} \sum_{A_i=A} \prod_{j=1}^n m_j(A_i), & A \neq \emptyset \\ 0, & A = \emptyset \end{cases} \quad (4)$$

式中  $k = \sum_{\bigcap_{i=1}^n A_i = \emptyset} \prod_{j=1}^n m_j(A_i)$ ,  $k \in (0, 1)$ , 表示证据间的冲突程度<sup>[8-9]</sup>。

## 2 评估模型

### 2.1 评估指标体系

装备维修保障系统具有结构流程复杂、对象种类及组成要素多等特点, 要对其进行科学、准确的评估, 必须建立合理的、可信用高的评估指标体系。通过对系统的分析及广泛征求专家意见, 建立图1所示的装备维修保障系统效能评估指标体系<sup>[10]</sup>。其中人力资源反映了系统在各类人员配置、人员素质及技术水平等方面的能力, 物资器材反映了系统在装备备件、维修用设施等方面的配置及配套情况, 信息资源反映了系统在信息化建设及维修信息传递等方面的能力, 组织管理反映了系统在任务分配、资源管理及调度等方面的组织协调能力。



图1 装备维修保障系统效能评估指标体系  
Fig.1 Effectiveness evaluation index of equipment maintenance support system

### 2.2 评估模型

模型的核心思想是通过考察当前系统运行状态与系统评估等级的关联程度来衡量系统效能所处的水平。为提高评估结论的可靠性, 需要通过不同的信息源获得当前系统的运行状态, 以2.1节建立的评估指标作为衡量系统运行状态的准则, 以各信息源获得的指标值序列作为参考序列, 以系统的评估等级序列作为因素序列, 计算两者的灰色关联度, 并将此关联度序列作为证据理论的基本概率分配, 最后运用证据理论的合成规则将不同信息源下系统评估等级进行组合, 得出系统效能的评估结论。

假设采用专家法、实地调研法和仿真分析法共获得3组评估指标值, 记为  $X_0^{(n)} = (x_0^{(n)}(1), \dots, x_0^{(n)}(k), \dots, x_0^{(n)}(4))$ ,  $k = 1, 2, 3, 4$ ,  $n = 1, 2, 3$ ,  $x_0^{(n)}(k)$  表示通过  $n$  方法获得的指标  $k$  的值。分析可知, 4个指标均属于“效益”型指标, 可用概率形式来描述, 即  $x_0^{(n)}(k) \in [0, 1]$ 。

为实现对系统的评估, 需要设定评估等级。假设将系统效能分为优、良、中、差4个等级, 即  $\Omega = \{\text{优}(a), \text{良}(a), \text{中}(a), \text{差}(a)\}$ , 用序列表示为  $X_i = (x_i(1), \dots, x_i(k), \dots, x_i(4))$ ,  $i = a, a, a, a$ ,  $x_i(k)$  为等级  $i$  中  $k$  指标的值。

由于各评估指标对系统效能的影响程度不同, 因此在计算灰色关联度时需要通过指标权重进行修正。设指标权重为  $(\omega_1, \dots, \omega_4, \dots, \omega_4)$ , 为了突出各指标的重要性差异, 引入指标相对重要度为:  $\omega'_k = \omega_k / \max_{1 \leq k \leq 4} \omega_k$ , 则式(1)可修正为:

$$r'(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r(x_0(k), x_i(k)) \omega'_k \quad (5)$$

通过公式(2)和(5)可以计算出经指标权重修正后不同方法获得的指标值序列与各评估等级的灰色关联度  $r'(X_0^{(n)}, X_i)$ ,对每组关联度序列进行归一化处理  $r^*(X_0^{(n)}, X_i) = \frac{r'(X_0^{(n)}, X_i)}{\sum_{i=a_1} r'(X_0^{(n)}, X_i)}$ ,因此基于灰色关联度

的系统评估等级概率分配为:

$$m_n = (r^*(X_0^{(n)}, X_{a_1}), \dots, r^*(X_0^{(n)}, X_i), \dots, r^*(X_0^{(n)}, X_{a_i}))$$

$$= (m_n(a), \dots, m_n(i), \dots, m_n(a_i)) \tag{6}$$

由于系统本身的复杂性,不管采用何种方法,所得的评估指标数据均具有一定的不确定性,同时由于各方法采集数据的原理不同,其数据可信度也有所不同。设方法的不确定度为  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ ,则方法  $n$  对应系统评估等级的概率分配可修正为:

$$m'_n = ((1 - \beta_1)m_n(a), \dots, (1 - \beta_i)m_n(i), \dots, (1 - \beta_n)m_n(a_i), m_n(\Omega)) \tag{7}$$

其中  $m_n(\Omega) = 1 - (1 - \beta_i) \sum_{i=a_1}^{a_i} m_n(i)$ ,表示不确定性信息的概率分配。由于  $m'_n$  满足 mass 函数性质,因此可通过公式(4)将不同方法下系统等级概率分配函数进行合成,得出最终评估结论。为了验证结论的有效性,需设定差别门限  $\epsilon$ ,当最大评估值与次大评估值的差大于  $\epsilon$  时,结论是有效的。

### 3 应用举例

通过专家法、实地调研法、仿真分析法共获得 3 组评估指标值,  $X_0^{(1)} = (0.89, 0.93, 0.88, 0.96)$ ,  $X_0^{(2)} = (0.96, 0.83, 0.93, 0.78)$ ,  $X_0^{(3)} = (0.91, 0.87, 0.98, 0.89)$ ,各等级对应的评估指标值(为方便计算,将不同等级下的指标值区间转化为固定值表示)见表 1,指标权重为  $(0.31, 0.24, 0.18, 0.27)$ ,3 种方法的不确定度为  $\beta = (0.10, 0.05, 0.15)$ ,关联系数  $\xi = 0.5$ ,差别门限  $\epsilon = 0.05$ 。

表 1 不同等级的指标值

Tab.1 Index value of each grade

	$x_i(1)$	$x_i(2)$	$x_i(3)$	$x_i(4)$
优	0.90	0.95	0.95	0.90
良	0.85	0.80	0.85	0.80
中	0.70	0.75	0.77	0.70
差	0.60	0.55	0.50	0.60

通过公式(2)和(5)计算出经指标权重修正后不同方法的指标值序列与系统评估等级的灰色关联度,并进行归一化处理后结果如下:  $m_1 = (0.3518, 0.2906, 0.2099, 0.1476)$ ;  $m_2 = (0.2857, 0.3088, 0.2393, 0.1662)$ ;  $m_3 = (0.3779, 0.2671, 0.2046, 0.1503)$ 。

通过公式(7)进行不确定性修正后的评估等级概率分配为:  $m'_1 = (0.3166, 0.2615, 0.1889, 0.1328, 0.1002)$ ;  $m'_2 = (0.2714, 0.2934, 0.2273, 0.1579, 0.0500)$ ;  $m'_3 = (0.3212, 0.2270, 0.1739, 0.1278, 0.1501)$

最后通过公式(4)对  $m'_1, m'_2, m'_3$  进行合成,结果为:  $m = (0.4239, 0.3130, 0.1713, 0.0866, 0.0052)$ 。

由此可知,通过 3 种方法的综合评估,系统效能处于各评估等级的概率为优=0.4239,良=0.3130,中=0.1713,差=0.0866,不确定信息=0.0052,其中优与良的概率差为 0.1109,大于 0.05,因此最后可确定目前系统效能为优。该结论与层次分析法得到的评估结果  $E = 0.90$ (说明系统处于“优”状态)是一致的,从而验证了模型及评估结论是可靠的。

### 4 结束语

评估过程中对系统不确定因素的处理程度直接影响结论的可靠性。模型通过不同方法获得系统状态信息,避免了采用单一方法的片面性,同时利用灰色关联理论处理不确定性的优势及证据理论的合成规则,一定程度上提高了评估结论的可靠性。将实例与层次分析法得出的评估结论进行对比,结果验证了模型的有效性。

## 参考文献:

- [ 1 ] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1996.  
DENG Julong. Essential Methods of Grey System[M]. Wuhan:Huazhong University Press of Science and Technology, 1996. (in Chinese)
- [ 2 ] 邓聚龙.灰色控制系统[M].武汉:华中理工大学出版社,1999.  
DENG Julong. Grey Control System[M]. Wuhan:Huazhong University Press of Science and Technology, 1999. (in Chinese)
- [ 3 ] DEMPSTER A P. Upper and Lower Probabilities Induced by A Multivalued Mapping[J]. The Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(4):325—339.
- [ 4 ] SHAFER G A. Mathematical Theory of Evidence[M]. Princeton NJ: Princeton University Press, 1976.
- [ 5 ] 邓鹏华,毕义明,刘卫东,等.改进的证据理论在目标识别中的应用[J].系统工程与电子技术,2008,30(7):1295—1297.  
DENG Penghua, BI Yiming, LIU Weidong, et al. Applications of A Modified Evidence Theory in Target Recognition [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(7):1295—1297. (in Chinese)
- [ 6 ] 胡方,黄建国,褚福照.基于粗糙集的武器系统灰色关联评估模型[J].兵工学报,2008,29(2):253—256.  
HU Fang, HUANG Jianguo, CHU Fuzhao. Grey Relation Evaluation Model of Weapon System Based on Rough Set [J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(2):253—256. (in Chinese)
- [ 7 ] Yager R R. On the D—S Framework and New Combination Rules[J]. Information Sciences, 1987, 41(2):93—138.
- [ 8 ] SMETS P. The Combination of Evidence in the Transferable Belief Method[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(5):447—458.
- [ 9 ] Zadeh L A. Review of Shafer's Mathematical Theory of Evidence[J]. AI Magazine, 1984, 5(3):81—83.
- [ 10 ] 穆富岭,武昌,吴德伟.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.  
MU Fuling, WU Chang, WU Dewei. Study on the Synthetic Method of Variable Weight of Effectiveness Evaluation of Maintenance Support System[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(6):693—696. (in Chinese)

(编辑:姚树峰,徐敏)

## Grey—Evidence Theory Model of Effectiveness Evaluation for Maintenance Support System

AI Bao—li, WU Chang

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Scientific and exact evaluation for equipment maintenance support system is important for improving the shortage of system and enhancing support effectiveness. In fact, because of the uncertain information in evaluation, it is difficult to obtain exact conclusion. To counter the shortage about the uncertainty in current evaluation methods, an evaluation model based on degree of grey incidence and evidence theory is proposed. Through establishing the evaluation index system and calculating degree of grey incidence between the system condition gained with different methods and the evaluation grade of system, the basic probability assignments for evaluation grade are derived, and then the combination rule of evidence theory is used to fuse the evaluation grade in different methods for evaluation conclusion. The practical calculation result shows that the model is effective.

**Key words:** maintenance support; effectiveness evaluation; degree of grey incidence; evidence theory