

D-S理论在装备使用质量评价中的应用*

周成伟,陈春良

(装甲兵工程学院 技术保障工程系,北京 100072)

摘要:针对装备使用质量评价的模糊性及不确定性,采用D-S证据理论构建了装备使用质量评价模型.实例表明该方法能有效避免评价对象模糊性及不确定性带来的评判误差,取得符合实际而又准确的评价结果.

关键词:装备;使用质量;评价;D-S证据理论

中图分类号: T1202

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2009)01-0044-03

装备使用质量是指使用阶段装备的性能、可靠性、维修性、保障性、测试性、经济性等质量特性满足部队训练和作战要求的程度,即装备在使用过程中所表现出来的实际质量水平.近年来,国内外对装备的使用质量评价做了大量研究,提出了许多装备使用质量评价方法,如层次分析、模糊综合评判、人工神经网络等,其评价结果也都有了一定的合理性.但是,装备的使用质量因素繁多,评价过程复杂,而且各因素指标之间的关系存在极强的不确定性,对传统评价方法的结果有很大影响.D-S证据理论是一种可以解决不确定信息的表达与合成问题的强有力的方法,它能够通过证据的融合增强置信度,改善评判等级的可区分性,对于水平相近,等级难以确定的评估具有较好的效果^[2].

1 证据理论的基本定义和定理

证据理论的基本定义及定理是证据理论的理论基础^[2-3].

定义1 设 Ω 为识别框架,若集函数 $m:2^{\Omega} \rightarrow [0,1]$ 满足:

$$\begin{aligned} m(\emptyset) &= 0 \\ \sum_{A \subseteq \Omega} m(A) &= 1 \end{aligned}$$

则称 m 为 Ω 上的基本可信度分配,称 $m(A)$ 为基本可信数,对于 $\forall A \subseteq \Omega$. 当 $\forall A \subset \Omega$, $m(A)$ 表示证据支持命题 A 且由于证据不足不支持 A 的任何真子集的程度,当 $A = \Omega$ 时, $m(A)$ 表示不知如何分配.

定义2 若子集 $A \subseteq \Omega$ 且 $A \neq \Omega$, 有 $m(A) > 0$, 则称 A

为 m 的一个焦元(Focal Element).

定理 设 m_1, m_2, \dots, m_n 为识别框架 Ω 上的 n 个基本可信度分配函数,则其正交和 $m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$ 定义为:

$$\begin{aligned} m(\emptyset) &= 0 \\ m(A) &= K^{-1} \prod_{A_i \subseteq A} m_i(A_i), A \neq \emptyset \end{aligned} \quad (1)$$

其中: K 为证据冲突因子,由 $\prod_{A_i \subseteq \Omega} m_i(A_i)$ 决定;合成结果 $m(A)$ 反映了 m_1, m_2, \dots, m_n 对应的 n 个基本证据对命题 A 的联合支持程度.

2 基于证据理论的装备使用质量评价模型

在评价过程中:首先应用系统工程理论和层次分析法确定评价因素及权重,并对底层各因素相对于模糊评语集的确信度赋值;然后确定各层指标因素的基本概率分配(集函数值);最后通过D-S准则合成为总的概率分配得到装备使用质量的量化值.

2.1 评价指标体系

装备是为满足作战需要而生产的特殊工业产品,装备质量是装备满足规定要求的特征和特性的总和.在质量特性上,装备除具有一般产品的特性外,同时还具有民用产品所不具备的特性.归结起来装备质量可由性能、可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性、经济性等特性构成.

在上述质量特性中,有些特性是装备在设计时予以保证的,属于“先天”固有的特性,有些则是在装备使用阶段经常随时间变化的特性,属于装备使用特性.装备的使用特性主要有性能、可靠性和安全性,这3个特性是评价装备

* 收稿日期:2008-10-29

作者简介:周成伟(1982—),男,河南郑州人,硕士研究生,主要从事装备质量的研究;陈春良(1963—),男,河北保定人,博士生导师,主要从事装备保障理论及建模研究、装备质量及测试性理论的教学与科研工作.

使用阶段质量的主要依据.因此,本文中构建的装备使用质量评价指标系统如图 1 所示.

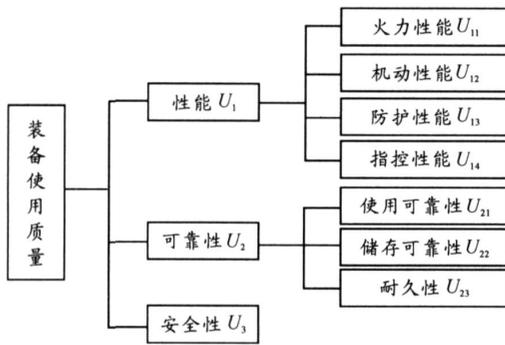


图 1 装备使用质量评价指标体系

2.2 评语集及指标权重

评价目标 (U):装备使用质量

设一级指标集合 $U = \{U_i | i = 1, 2, \dots, m\}$, $U_i = U_j = (i, j)$. 由图 1 可以看出一级指标有 3 个. 指标之间的相对权重设为 $w_i (i = 1, 2, \dots, m)$. 此处采用层次分析法得出各指标的相对权重值:

$$w_1 = 0.4, w_2 = 0.4, w_3 = 0.2$$

一级指标 U_i 有 j 个二级指标, 记作 $U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{ij}\}$, 其中 u_{ij} 表示 U_i 的第 j 个二级指标. 二级指标相对权重设为 w_{ij} , 同样由层次分析法可得:

$$w_{1j} = \{w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}\} = \{0.25, 0.25, 0.25, 0.25\}$$

$$w_{2j} = \{w_{21}, w_{22}, w_{23}\} = \{0.5, 0.3, 0.2\}$$

设待评价的装备集合为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$; 设专家的评语集为 $E = \{E_l | l = 1, 2, 3, 4\} = \{优, 良, 中, 差\}$. E 作为识别框架, 评语的评价价值用比率标尺法确定. 不失一般性, 此处取评价价值为

$$P(E) = \left\{ p(E_1), p(E_2), p(E_3), p(E_4) \right\} = \{0.9, 0.8, 0.7, 0.6\}$$

对装备使用阶段质量水平评价指标体系的二级指标在评语等级 E 上分别给出置信度

$$ijl \left(i = 1, 2, \dots, m, l = 1, 2, \dots, 4 \right), \text{ 满足 } 0 \leq ij_l \leq 1,$$

$$E \left(\begin{matrix} ij_l \\ ij_l \end{matrix} \right) \text{ 表示指标 } u_{ij} \text{ 关于评语 } E_l \text{ 的置信度为 } ij_l,$$

$$E \left(\begin{matrix} ij_l \\ ij_l \end{matrix} \right) \text{ 表示对指标 } u_{ij} \text{ 的未知程度为 } ij_l.$$

2.3 评价算法和步骤

评价算法主要采用证据组合算法, 使用中首先要根据专家提供的二级指标的置信度, 建立指标的基本可信度分配函数, 即 Mass 函数, 然后由 D. S 证据合成规则公式对二级指标的 Mass 函数进行合成运算, 得到其所属的一级指标的 Mass 函数. 在此基础上, 再次运用证据合成公式, 计算得到对目标的评价价值. 具体算法步骤:

步骤 1 确定各二级指标的 Mass 函数, 根据专家给出的二级指标在评语等级 E 上的置信度 ij_l 和各二级指标的相对权重 w_{ij} , 计算各指标的 Mass 函数 $m^{Tij}(E_l | u_{ij}), T = 1, 2, \dots, r,$

$l = 1, 2, \dots, g, i = 1, 2, \dots, h$. 设指标中权重最大的为关键指标, 其他为非关键指标.

设关键指标为 u_{iq} , 构造 Mass 函数: $m^{Tij}(E_l | u_{iq}) = ij_l^l,$
 $m^{Tij}(E | u_{iq}) = 1 - \prod_{l=1}^h m^{Tij}(E_l | u_{iq})$, 式中 $(0, 1]$ 为折扣系数, 反映了作为证据的关键指标在多大程度上以置信度 ij_l 支持上一级指标. 这里取 $ij_l = 0.9$. $m^{Tij}(E | u_{iq})$ 表示该关键指标对上一级指标支持度的未知程度.

设非关键指标为 u_{jf} , 计算其 Mass 函数: $m^{Tij}(E_l | u_{jf}) = \left(\frac{w_{ij}^l}{w_{iq}^l} \right) ij_l^l, m^{Tij}(E | u_{jf}) = 1 - \prod_{l=1}^h m^{Tij}(E_l | u_{jf})$, 式中 w_{iq} 和 w_{jf} 分别为关键指标和非关键指标的权重.

步骤 2 利用 D. S 证据合成公式(1), 对二级指标的 Mass 函数进行合成, 得到专家关于上一级指标 U_i 的 Mass 函数 $m^T(E_l | u_i), m^T(E | u_i)$. 利用公式(1)对专家关于 U_i 的 Mass 函数进行第 2 次证据合成, 即对专家的意见进行集结, 得到关于 U_i 新的 Mass 函数 $m(E_l | u_i), m(E | u_i)$.

步骤 3 再次运用证据合成公式, 对关于 U_i 的 Mass 函数进行合成运算, 得到关于 U 目标的 Mass 函数 $m(E_l | u), m(E | u)$.

步骤 4 计算出关于评价对象的综合评价价值

$$S_i = \prod_{l=1}^h p(H_l) m(H_l | U) \quad (2)$$

3 算例

以某型装备的使用质量评价为例, 来说明如何使用证据理论来解决评价问题. 表 1 为专家根据对该型装备相关资料的调查、分析, 并结合自己的知识、经验给出的二级指标在评价等级上的置信度.

表 1 底层指标确信度分配

一级指标	二级指标	确信度 ij_l			
		E_1	E_2	E_3	E_4
U_1	U_{11}	0	0.1	0.9	0
	U_{12}	0	0.2	0.8	0
	U_{13}	0	0.6	0.4	0
	U_{14}	0	0.5	0.5	0
U_2	U_{21}	0	0.5	0.5	0
	U_{22}	0	0.4	0.6	0
	U_{23}	0	0.3	0.7	0
U_3		0	0.2	0.8	0

按照证据组合算法中步骤 1 的方法, 将各层指标的权重规范化后得到结果: 一级指标权重规范化值 $w_1 = (0.9, 0.9, 0.45)$, 性能指标权重规范化值 $w_{1j} = (0.9, 0.9, 0.9, 0.9)$, 可靠性 $w_2 = (0.9, 0.54, 0.36)$, 安全指标权重规范化值 $w_3 = 0.9$.

根据证据组合算法步骤 2 中基本可信度合成的方法得到一级指标和总目标的合成可信度值,如表 2~4 所示.

表 2 性能可信度分配

性能因素 指标	基本可信度分配 m_{ijl}			
	E_1	E_2	E_3	E_4
U_{11}	0	0.09	0.81	0
U_{12}	0	0.18	0.72	0
U_{13}	0	0.54	0.36	0
U_{14}	0	0.45	0.45	0
合成的可信度 m_1	0	0.0269	0.888 2	0

表 3 可靠性可信度分配

可靠性 因素指标	基本基本可信度分配 m_{2ijl}			
	E_1	E_2	E_3	E_4
U_{21}	0	0.45	0.45	0
U_{22}	0	0.22	0.32	0
U_{23}	0	0.11	0.25	0
合成的可信度 m_2	0	0.043 5	0.734 1	0

表 4 某型装备使用质量可信度分配

某型装备 使用质量	基本可信度分配 m_i			
	E_1	E_2	E_3	E_4
U_1	0	0.026 9	0.888 2	0
U_2	0	0.013 5	0.934 1	0
U_3	0	0.18	0.81	0
合成的可信度 m_3	0	0.087 9	0.909 4	0

由 $S_i = \prod_{l=1}^4 P(H_l) m(H_l | U)$ 得出某型装备使用质量 $S = 0 \times 0.9 + 0.087 9 \times 0.8 + 0.909 4 \times 0.6 + 0 \times 0.3 = 0.616, 0.6 < 0.616 < 0.7$, 所以某型装备的使用质量水平介于中(0.7)和差(0.6)之间,且偏向于差.

4 结论

1) 算例得出的评价结果与装备实际使用中的情况比较符合,证明了 D. S 证据理论的有效性.

2) 由表 4 可知该型装备的可靠性(U_2)较为薄弱,而其安全性(U_3)相对较好,这为今后的装备改型提供了参考意见,证明了 D. S 证据理论的实用性.

3) 性能、可靠性、安全 3 因素各自合成的可信度属于 E_2 与属于 E_3 的值之比分别是 $0.026 9/0.888 2$ 、 $0.043 5/0.734 1$ 、 $0.18/0.81$, 而表 4 中最终合成的可信度属于 E_2 与属于 E_3 的值之比为 $0.087 9/0.909 4$, 由此可以看出证据理论的合成效果,它将专家的经验知识辨别的更加明显.

参考文献:

- [1] 赵庆全. 火炮系统质量综合评价研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 1999.
- [2] 段新生. 证据理论与决策. 人工智能[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1993.
- [3] Shafer GA. Mathematical theory of evidence[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1976.
- [4] 丁勇, 梁昌勇, 朱俊红. 一种供应链中的知识管理绩效评价方法研究[J]. 运筹与管理, 2006(4): 149 - 153.
- [5] 文邦伟, 胥泽奇. 外军装备环境适应性典型案例[J]. 信息与资讯, 2005(2): 83 - 87.
- [6] 丁勇, 梁昌勇, 朱俊红. 一种供应链中的知识管理绩效评价方法研究[J]. 运筹与管理, 2006(4): 149 - 153.
- [7] John H. Holland. Adaptation in natural and artificial system: An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence[M]. MA: The MIT Press, 1992.