

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.05.003

基于证据推理的飞行保障安全系统效能评估模型

盛景军, 侯立峰, 朱海洋
(徐州空军学院 后勤指挥系, 江苏 徐州 221000)

摘要: 从飞行保障安全系统的整体与全局出发, 构建飞行保障安全系统指标体系。考虑到系统底层子指标多数为定性指标, 具有不确定性, 将证据推理应用于飞行保障安全效能评估, 建立基于证据推理的飞行保障安全效能评估模型, 并以某场站为例进行实证分析。结果表明, 该方法正确、有效的, 可为飞行保障安全效能评估提供依据。

关键词: 飞行保障安全系统; 指标体系; 效能评估; 证据推理
中图分类号: C934 **文献标志码:** A

Efficiency Evaluation Model on Aviation Support Safe System Based on Evidential Reasoning Method

Sheng Jingjun, Hou Lifeng, Zhu Haiyang
(Dept. of Logistic Command, Xuzhou Air Force College, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Aiming at unitary and whole matter of aviation support safe system, index system of aviation support safe system is established. Considering the bottom sub fixed indexes of aviation support safe system are uncertain index, the mathematics model based on evidential reasoning method is established to evaluate the efficiency of aviation support safe system. A station example is used to prove the validity of the model. The result shows that the method is correct and efficient, and it can support aviation support safe efficiency evaluation with evidence.

Keywords: aviation support safe system; index system; evaluation of efficiency; evidential reasoning

0 引言

飞行保障安全系统效能评估是飞行保障安全系统科学体系的重要组成部分, 是研究飞行保障安全系统效能评估内容、效能评估方法步骤和标准, 指导开展飞行安全效能评估工作的一门学科。做好飞行保障安全系统效能评估工作, 对预防飞行事故、保证飞行安全具有重要意义。

目前, 针对飞行保障安全系统效能的评估大多强调装备技术, 而且大都停留在局部、静态、定性的评估, 甚至依靠经验来判断^[1]。证据推理法是大系统分解协调思想、决策理论及效用函数理论、人工智能原理中的证据组合理论、模糊数学理论等多学科的产物, 适合处理和综合存在未知信息或模糊信息等的多底层指标决策问题。证据推理被广泛应用于战略环境评估^[2], 防空兵火力配系评估^[3], 汽轮机组状态评估^[4], 以及供应商绩效评估与决策^[5]等。笔者首次将证据推理引入飞行保障安全系统效能评估, 应用实例说明证据推理法处理飞行保障安全系统效能评估问题的具体过程。

1 飞行保障安全系统指标体系

系统效能指标度量一个系统在一定条件下达到一组特定任务预期要求的可能程度。飞行保障安全

系统是一个复杂的系统, 通过对影响飞行保障安全因素分析^[6], 从系统整体性与全局性出发, 将飞行保障安全分解为人、机、环、管 4 个子系统, 再逐个分析 4 个子系统, 各子系统又涉及若干个子指标, 则飞行保障安全状况由 17 个子指标构成, 见图 1。

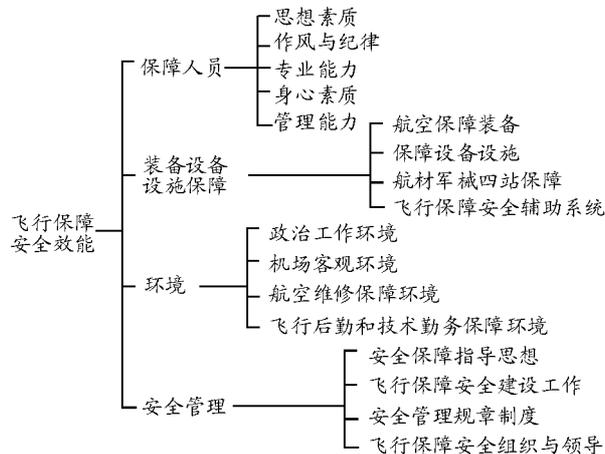


图 1 飞行保障安全系统指标体系

2 证据理论^[7]

证据理论是首先由 Dempster 提出, 并由 Shafer 进一步发展起来的一种不确定推理理论, 被广泛应用于信息融合和不确定推理等领域, 具有坚实的数学基础, 能在不需要先验概率的情况下, 以简单的

收稿日期: 2010-12-29; 修回日期: 2011-03-07

作者简介: 盛景军 (1979—), 男, 山东人, 硕士, 助教, 从事决策方法、作战模拟与仿真研究。

推理形式，获得融合结果。设 Θ 表示 X 所有可能取值的一个论域集合 Θ 为有限集，且所有在 Θ 内的元素之间是互不相容的，称 Θ 为 X 的识别框架。

定义：设 Θ 为一识别框架，则集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$ （ 2^Θ 为 Θ 的幂集）满足：

- 1) $m(\Phi) = 0$
- 2) $\sum_{A \in \Theta} m(A) = 1$

则称 m 为框架 Θ 上的基本可信度分配， $\forall A \subseteq \Theta$ ， $m(A)$ 称为 A 的基本可信度，表示对 A 的支持程度。

如果 $A \subseteq \Theta$ ，且 $m(A) > 0$ ，则称 A 为证据的焦点，所有焦点的集合称为核，证据是由证据体 $(A, m(A))$ 组成的。

利用证据体可以定义上 2^Θ 的信度函数与似真度函数，

$$\begin{aligned} Bel(B) &= \sum_{A \subseteq B} m(A) & \forall B \in 2^\Theta \\ Pl(B) &= \sum_{A \cap B \neq \Phi} m(A) & \forall B \in 2^\Theta \end{aligned}$$

信度函数 $Bel(B)$ 表示全部给予命题 B 的支持程度，似真度函数 $Pl(B)$ 表示不反对命题 B 的程度， $[Bel(B), Pl(B)]$ 构成证据支持命题 B 的不确定区间，可表示证据支持命题 B 的不确定程度。

定理：设 Bel_1 和 Bel_2 是同一识别框架 Θ 上的2个信度函数， m_1 和 m_2 分别是其对应的基本可信度分配，焦点分别为 A_1, A_2, \dots, A_k 和 B_1, B_2, \dots, B_l ，设

$$\begin{aligned} K &= \sum_{A_i \cap B_j = \Phi} m(A_i)m(B_j) < 1 \\ m(A) &= \begin{cases} 0 & , A = \Phi \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m(A_i)m(B_j)}{1 - K} & , A \neq \Phi \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中， K 通常被看作证据冲突程度的衡量标准，描述了证据之间所支持命题的不一致性。 K 越大说明证据间冲突越大；反之说明证据间冲突越小。当 K 接近于1时，据式(1)合成将会得到不合情理的结果。

3 飞行保障安全系统效能评估模型

3.1 底层子指标基本可信度确定

评估知识的获取是飞行保障安全系统评估的基

础，为实现整个评估过程的一致性，也为了方便证据推理评估，定义飞行保障安全系统评估的评估等级集为 $H = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5\} = \{\text{差, 及格, 中, 良, 优}\}$ 。假设来自不同领域的10名专家，评估第 i 个子系统 E_i （假设存在 m 个子系统）底层子指标 e_{ij} 的安全状况，若6名专家认为安全状况为良，4个专家认为安全状况为中，则评判表示为 $S(e_{ij}) = \{(H_4, 0.6), (H_3, 0.4)\}$ 。设 $\beta_{ij}(H_k)$ 表示底层子指标 e_{ij} 被判为 H_k 的初始可信度，例如根据上面评判，此时 $\beta_{ij}(H_4) = 0.6$ ， $\beta_{ij}(H_3) = 0.4$ 。在底层子指标获得初始可信度之后，确定证据融合过程中底层子指标 e_{ij} 的相对可靠度，可按式计算：

$$\alpha_{ij} = \gamma \frac{w_{ij}}{\max_{1 \leq j \leq n} \{w_{ij}\}}, i=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中 γ 是一个反映偏好的系数，一般取为0.9~1； w_{ij} 为第 i 个子系统的 j 个底层子指标的权重。

可利用下列算法计算各个底层子指标的基本可信度分配，设第 i 个子系统 E_i 底层子指标 e_{ij} 的基本可信度分配为 $m_{ij}(H_k)$ ，表示第 i 个子系统 E_i 在底层子指标 e_{ij} 相对于评估等级 H_k 的基本可信度。按下列公式确定：

$$\begin{aligned} m_{ij}(H_k) &= \alpha_{ij} \beta_{ij}(H_k), k=1, 2, \dots, 5 \\ m_{ij}(H) &= 1 - \sum_{k=1}^5 m_{ij}(H_k) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $m_{ij}(H)$ 表示底层指标未知基本可信度分配。

3.2 子系统基本可信度确定

以第 i 个子系统 E_i 在底层子指标 e_{ij} 相对于评估等级 H_k 的基本可信度为基础，将 n 个底层子指标的初始基本可信度分配依据证据算法融合，得到第 i 个子系统 E_i 的基本可信度分配，由式(4)逐步递推得到第 i 个子系统被判为 H_k 的基本可信度 $m_i(H_k)$ ， $k=1, 2, \dots, 5$ ，及未知基本可信度分配 $m_i(H)$ 。

$$\begin{aligned} m_{iJ(j+1)}(A) &= \begin{cases} K_{iJ(j+1)}(m_{iJ(j)}(H_k)m_{ij+1}(H_k) + m_{iJ(j)}(H_k)m_{ij+1}(H) + m_{iJ(j)}(H)m_{ij+1}(H_k), & A = H_k \\ K_{iJ(j+1)}(m_{iJ(j)}(H)m_{ij+1}(H)), & A = H \end{cases} \\ K_{iJ(j+1)} &= [1 - \sum_{t=1}^5 \sum_{t \neq k}^5 m_{iJ(j)}(H_t)m_{ij+1}(H_k)]^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $m_{i,j(1)}(H_k) = m_{i1}(H_k)$, $m_{i,j(1)}(H) = m_{i1}(H)$, $K_{i,j(j+1)}$ 为归一化算子, 反映了各证据相互间冲突程度。当 $j = n - 1$ 时, 就可得到第 i 个子系统基本可信度分配 $m_{i,j(n)}$, 即 $m_i(H_k) = m_{i,j(n)}(H_k)$, $m_i(H) = m_{i,j(n)}(H)$ 。

3.3 系统基本可信度分配

在获得第 i 个子系统的基本可信度分配 $m_i(H_k) = m_{i,j(n)}(H_k)$ 基础上, 重复 3.1 与 3.2 过程可得到整个系统的基本可信度分配:

$$m(H_k), k = 1, 2, \dots, 5, \quad m(H) = 1 - \sum_{k=1}^5 m(H_k)$$

3.4 系统期望效用值确定

设在评估等级集 $H = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5\} = \{\text{差, 及格, 中, 良, 优}\}$ 之下, 各个评估等级的效能值分别为: $u(H_1) = 0.2$, $u(H_2) = 0.4$, $u(H_3) = 0.6$, $u(H_4) = 0.8$, $u(H_5) = 1$ 。若在系统中 $m(H) = 0$, 则 $u(E) = \sum_{k=1}^5 u(H_k)m(H_k)$, 若 $m(H) \neq 0$, 则系统的极大效能 $u^+(E)$ 与极小效能 $u^-(E)$ 分别为:

$$u^+(E) = \sum_{k=1}^4 u(H_k)m(H_k) + u(H_5)(m(H_5) + m(H)) \quad (5)$$

$$u^-(E) = \sum_{k=2}^5 u(H_k)m(H_k) + u(H_1)(m(H_1) + m(H))$$

从而若 $m(H) \neq 0$ 可以得到以区间数 $[u^-(E), u^+(E)]$ 表示的系统效用值, 运用 $u(E) = \frac{u^-(E) + u^+(E)}{2}$, 即可获得精确的系统效用值。若 $m(H) = 0$ 此时 $u(E) = u^-(E) = u^+(E)$ 。以此为依据可对系统进行效能评估, 效能值越大说明系统越好, 反之越差。

4 实证分析

以某场站为例, 邀请不同领域的 10 名专家, 按照评估等级集对底层指标进行评价, 按照由 3.1 提供的可信度确定方法分析整理, 获得底层指标的可信度如表 1, 其中括号里数字表示子系统、底层指标权重。

表 1 底层指标可信度

子系统指标	底层指标	初始可信度				
		H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
$E_1(0.35)$	$e_{11}(0.12)$	0	0.2	0.3	0.5	0
	$e_{12}(0.25)$	0.1	0.4	0.4	0.1	0
	$e_{13}(0.38)$	0	0.2	0.7	0.1	0
	$e_{14}(0.10)$	0	0.3	0.7	0	0
	$e_{15}(0.15)$	0	0.4	0.5	0.1	0
$E_2(0.30)$	$e_{21}(0.30)$	0	0.9	0.1	0	0
	$e_{22}(0.20)$	0.2	0.3	0	0.5	0
	$e_{23}(0.20)$	0	0.2	0.6	0.2	0
	$e_{24}(0.30)$	0.1	0.3	0.4	0.2	0
$E_3(0.20)$	$e_{31}(0.10)$	0	0.2	0.8	0	0
	$e_{32}(0.30)$	0	0.5	0.4	0	0.1
	$e_{33}(0.20)$	0	0.1	0.7	0.2	0
	$e_{34}(0.40)$	0	0.4	0.5	0.1	0
$E_4(0.15)$	$e_{41}(0.20)$	0	0.1	0.6	0.1	0.2
	$e_{42}(0.25)$	0	0.2	0.3	0.5	0
	$e_{43}(0.10)$	0	0.3	0.5	0	0.2
	$e_{44}(0.45)$	0	0.2	0.1	0.4	0.3

在运用式 (2)、式 (3) 得到各个底层子指标的基本可信度分配基础上, 由式 (4) 计算各个子系统基本可信度, 分别如表 2~表 5。

表 2 保障人员可信度分配

保障人员底层指标	基本可信度				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
e_{11}	0	0.056 8	0.085 3	0.142 1	0
e_{12}	0.059 2	0.236 8	0.236 8	0.059 2	0
e_{13}	0	0.180 0	0.630 0	0.090 0	0
e_{14}	0	0.071 1	0.165 8	0	0
e_{15}	0	0.142 1	0.177 6	0.035 5	0
合成的可信度 m_1	0.005 3	0.196 6	0.697 1	0.064 1	0

表 3 装备设备设施保障可信度分配

装备设备设施底层指标	基本可信度				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
e_{21}	0	0.810 0	0.090 0	0	0
e_{22}	0.120 0	0.180 0	0	0.300 0	0
e_{23}	0	0.120 0	0.360 0	0.120 0	0
e_{24}	0.090 0	0.270 0	0.360 0	0.180 0	0
合成的可信度 m_2	0.017 1	0.727 1	0.181 6	0.062 5	0

表 4 环境保障可信度分配

环境底层指标	基本可信度				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
e_{31}	0	0.045 0	0.180 0	0	0
e_{32}	0	0.337 5	0.270 0	0	0.067 5
e_{33}	0	0.045 0	0.315 0	0.090 0	0
e_{34}	0	0.360 0	0.450 0	0.090 0	0
合成的可信度 m_3	0	0.317 4	0.603 7	0.039 5	0.006 8

表 5 安全管理保障可信度分配

安全管理底层指标	基本可信度				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
e_{41}	0	0.022 5	0.135 0	0.022 5	0.045 0
e_{42}	0	0.135 0	0.202 5	0.337 5	0
e_{43}	0	0.135 0	0.225 0	0	0.090 0
e_{44}	0	0.180 0	0.090 0	0.360 0	0.270 0
合成的可信度 m_4	0	0.190 7	0.191 8	0.404 4	0.166 3

重复式 (2)、式 (3)、式 (4), 确定飞行保障安

全系统基本可信度分配，见表 6。

表 6 飞行保障安全系统可信度分配

子系统	基本可信度				
	H_1	H_2	H_3	H_4	H_5
E_1	0.004 8	0.176 9	0.627 4	0.057 7	0
E_2	0.013 2	0.560 9	0.140 1	0.048 2	0
E_3	0	0.163 2	0.310 5	0.020 3	0.003 5
E_4	0	0.073 6	0.074 0	0.156 0	0.064 1
合成的可信度 m	0.003 3	0.372 0	0.542 1	0.043 5	0.003 8

由式 (5) 得飞行保障安全系统效能下限为 $u^-(E)=0.520 4$ ，上限为 $u^+(E)=0.548 5$ ，所以系统效能值为 $u(E)=0.534 4$ ，飞行保障安全系统状况介于及格与中之间趋向于中。

5 结语

笔者将证据推理方法应用于飞行保障安全系统的效能评估，是对复杂保障系统（包括人为指标）进行量化评估的尝试，可作为飞行保障安全系统评估的参考。对于其它涉及管理、组织指挥的系统效

(上接第 6 页)

3) 指挥实体对象模型。描述预警指挥控制系统对预警作战的指挥控制过程。主要包括：① 指挥控制流程，描述整个弹道导弹预警过程中预警指挥控制系统对装备系统的指控过程；② 指挥控制规则，包括目标威胁评估规则、战场态势分析规则、作战方式控制规则等；③ 指挥决策模型，描述预警指挥控制系统对来袭的不同弹道导弹目标所进行最优决策。

4) 实体行动模型。描述弹道导弹预警装备的部署与机动过程以及相应的战术动作。主要包括：① 目标预警模型，包括对弹道导弹预警装备对目标的搜索、判断和监视模型；② 装备部署模型，包括对阵地选择、装备展开、综合部署等行动的描述；③ 弹道导弹突防模型，包括上升段、中段和再入段飞行弹道模型等；④ 情报处理模型，包括数据接收，数据处理，情报分析、情报分发。

5) 交互模型。描述实体对象间的信息交流，反映实体之间的相互感知或影响。主要包括：① 指挥控制模型，描述预警指挥控制系统对弹道导弹预警装备系统的指挥、控制，弹道导弹预警装备系统与指挥控制系统间的信息传递与响应；② 电磁防御模型，是对预警装备受到干扰和采用反干扰措施后探测威力变化情况的描述；③ 毁伤模型，是对预警装备受到各种打击后毁伤程度的描述。

能评估问题，也具有一定的借鉴意义。

参考文献：

[1] 魏军, 胡涛, 罗朝晖, 等. 基于 D-S 证据理论的后勤综合保障能力评估模型[J]. 科技进步与对策, 2003(11): 107-108.

[2] 周美春, 钱新, 钱瑜, 等. 证据推理在战略环境评价中的应用[J]. 中国环境科学, 2008, 28(11): 1042-1046.

[3] 李勇, 王俊涛, 宋辉. 不确定熵证据合成方法在防空兵火力配系评估中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(1): 149-152.

[4] 董玉亮, 顾煜炯, 马履翱. 基于证据推理的汽轮机组状态评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 74-79.

[5] 付艳华, 张化光, 唐加福. 基于证据推理的供应商绩效评估与决策[J]. 东北大学学报, 2009, 30(11): 1546-1549.

[6] 程铭, 陈宇寒. 飞行计划和雷达航迹关联目标识别算法[J]. 四川兵工学报, 2010(5): 107-109.

[7] 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: 13-53.

4 结语

系统的军事总体设计是军事仿真模拟系统进入工程阶段后的第一个重要的问题。军事总体设计是技术总体设计的基础，是作战仿真系统研究和设计的首要任务。笔者就 BMEWOSS 的军事总体需求、系统框架和概念模型体系等关键问题作了深入探讨，为系统技术总体设计和系统的详细设计指明了方向，奠定了基础，同时也为其他作战仿真系统的军事总体设计提供了参考和借鉴。

参考文献：

[1] 孙柏林. 计算机战役战术训练模拟系统军事总体设计原理[M]. 北京: 北京解放军出版社, 1994: 99.

[2] 毕义明, 刘良, 等. 军事建模与仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 50-51.

[3] 王学浩, 岳瑞华, 徐中英, 等. 导弹自动测试系统性能评价指标及体系[J]. 四川兵工学报, 2010(9): 37-39.

[4] 马亚平. 作战模拟系统[M]. 北京: 国防大学出版社, 2005: 110.

[5] 王杏林, 曹晓东. 概念建模[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

[6] 管清波, 罗小明, 等. 军事卫星信息支援下导弹攻防作战仿真系统的研究与实现[J]. 军事运筹与系统工程, 2001, 9(3): 32-37.

[7] Grunlund L, Wright D C, Lewis C N, et al. Technical Realities, An Analysis of the 2004 Deployment of a U.S. National Missile Defense System[R]. UCS, 2004.