

基于证据推理算法的联合作战效能评估方法研究

李业军¹, 李文元¹, 方向东²

(1 西安通信学院, 陕西 西安 710106; 2 沈阳军区 65042 部队, 辽宁 沈阳 110001)

摘 要: 研究了一体化联合作战效能评估方法, 给出了基于证据推理进行不确定多属性决策的数学模型及其在一体化联合作战效能评估中的应用方法. 评估实例说明了所给出方法的有效性和合理性.

关键词: 一体化联合作战; 效能评估; 证据推理; 评估分析模型

中图分类号: E211; N945

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)12-0188-05

Effectiveness Evaluation of Joint Operations Based on Evidential Reasoning Algorithm

LI Ye-jun¹, LI Wen-yuan¹, FANG Xiang-dong²

(1 Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China; 2 Troop 65042, Shenyang 110001, China)

Abstract: An approach for the effectiveness evaluation of Integrated Joint Operations is investigated in this paper, and then a mathematical model of applying the Evidential Reasoning approach to multiple attribute decision making under uncertainty and the process of applying the Evidential Reasoning approach for the effectiveness evaluation of Integrated Joint Operations is given. The evaluation example shows that the approach is effective and reasonable.

Key words: integrated joint operations; effectiveness evaluation; Evidential Reasoning (ER); evaluation analysis model

1 引言

随着部队信息化和数字化建设的深入发展, 未来战争将是在陆、海、空、天、电、磁等多维空间进行的信息化条件下的一体化联合作战. 一体化联合作战, 是多军种力量在信息网络支撑下, 为达成统一的目的, 按照统一的企图和计划, 所实施的在时间、空间和行动上无缝连接的联合作战, 是作战行动整体化的整体联动作战^[1]. 目前, 我军一体化联合作战的体系结构还不够完善, 作战行动还不够协调, 作战样式还不够科学. 为了科学稳妥地推进一体化联合作战进程, 必须不断地科学评估和论证我军一体化联合作战效能.

近年来, 一体化联合作战效能评估正逐渐成为研究的热点. 文献[2]中建立了比较合理的一体化联合作战能力总体评估模型, 确定了指标因素评估标

准, 应用模糊综合评判法对实例进行了计算和分析, 对一体化联合作战效能评估的研究具有一定的参考价值; 文献[3-5]中分别研究了一体化联合作战体系结构中的部分组成模块的效能评估, 为一体化联合作战总体效能评估模型的建立和完善开拓了思路. 本文研究了一体化联合作战效能评估方法, 给出了基于证据推理进行不确定多属性决策的数学模型; 基于一体化联合作战效能评估本质上是同时具有大量定量和定性属性的混合多属性决策问题的特点, 提出了在一体化联合作战效能评估中应用证据推理的方法. 本文给出的效能评估实例表明了方法的有效性和合理性.

2 证据推理方法

证据推理方法是基于评估分析模型和 D-S 理论证据组合规则的一种不确定性推理方法, 由 Yang

等首先提出^[6],并逐渐改进和完善^[7,8].由于在处理具有不确定信息多属性决策问题中表现出的优越性,证据推理方法在诸多领域得到了广泛的应用^[6-8].

一体化联合作战效能评估本质上是同时具有大量定量和定性属性的混合多属性决策问题.在评估过程中要考虑指挥能力、侦查能力、进攻能力、防御能力和保障能力等总体评估指标因素以及与各总体指标因素相关的基本评估指标因素,这些指标因素在证据推理中表现为总体属性和基本属性,在此基础上建立合理的评估分析模型,并给出基本评估信息,然后应用一定的方法合理的聚集评估信息,得出较准确的决策结果.

2.1 评估分析模型

首先假设一个简单的两个层次的属性层次结构,在顶层有一个总体属性 y ,在底层有 L 个与此相关的基本属性 $e_i (i=1, \dots, L)$, 定义 L 个基本属性的集合如下:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_i, e_L\} \quad (1)$$

假设基本属性的权重为 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_L\}$, 其中 ω_i 是第 i 个基本属性 e_i 的相对权重, $0 \leq \omega_i \leq 1, \sum_{i=1}^L \omega_i = 1$. 假设定义 N 个不同的评估等级能够提供对属性的完整的评估标准, 可以表示为

$$H = \{H_1, H_2, \dots, H_n, \dots, H_N\} \quad (2)$$

式中, H_n 是第 n 个评估等级, 不失一般性, 假设 H_{n+1} 优于 H_n .

对于一个方案在属性 e_i 上给定的评估可以用数学公式表示为分布式的形式:

$$S(e_i) = \{(H_n, \beta_{n,i}), n = 1, \dots, N\} \quad i = 1, \dots, L \quad (3)$$

式中, $\beta_{n,i} \geq 0, \sum_{n=1}^N \beta_{n,i} \leq 1, \beta_{n,i}$ 表示信度. 上面的分布式评估表示属性 e_i 以 $\beta_{n,i} (n = 1, \dots, N)$ 的信度被评估为等级 H_n . 如果 $\sum_{n=1}^N \beta_{n,i} = 1$, 则称评估 $S(e_i)$ 是完全的; 如果 $\sum_{n=1}^N \beta_{n,i} < 1$, 则称评估 $S(e_i)$ 是不完全的; 特别是, 如果 $\sum_{n=1}^N \beta_{n,i} = 0$, 则表示在属性 e_i 的评估信息完全未知; 上述评估信息为完全的、不完全的、完全未知的情况在许多多属性决策问题中出现, 证据推理方法能够有效地解决此类问题. 基于分布式评估方法表示的具有多级层次结构的数学模型即为评估分析模型, 又称为评估分析框架.

2.2 证据理论

证据理论是由 Dempster 在 1967 年最初提出

的^[9], 后来由 Shafer 加以扩充和推广, 逐渐形成完善的理论^[10], 因此又称为 D-S 理论. D-S 理论^[8-11] 具有处理不确定信息的能力, 而且易于理解和使用, 逐渐发展为一类重要的不确定推理方法.

2.3 证据推理算法

根据 Yang 等的研究, 可将证据推理算法归纳为: 原始 ER 算法、递归式 ER 算法 (改进的 ER 算法)、解析式 ER 算法等. 由于递归式 ER 算法容易理解、使用方便、更好地处理了由属性的相对权重及信息的不完全性等引起的不确定性, 因此本研究主要使用此算法.

令 $m_{n,i}$ 是基本可信度分配, 表示基本属性 e_i 支持总体属性 y 被评估为评估等级 H_n 的假设的信度; 令 $m_{H,i}$ 是剩余的可信度分配, 表示考虑基本属性 e_i 对总体属性 y 的评估的影响时, 在考虑了所有独立的 N 个评估等级之后, 仍没有被评估为任何等级的信度.

$$m_{n,i} = \omega_i \beta_{n,i}, n = 1, \dots, N \quad (4a)$$

$$m_{H,i} = 1 - \sum_{n=1}^N m_{n,i} = 1 - \omega_i \sum_{n=1}^N \beta_{n,i} \quad (4b)$$

其中, $m_{H,i} = \tilde{m}_{H,i} + \bar{m}_{H,i}, \bar{m}_{H,i} = 1 - \omega_i, \tilde{m}_{H,i} = \omega_i (1 - \sum_{n=1}^N \beta_{n,i})$.

令 $m_{n,I(i)} (n = 1, 2, \dots, N), \tilde{m}_{H,I(i)}$ 和 $\bar{m}_{H,I(i)}$ 表示通过聚集前 i 个基本属性的评估产生的组合可信度分配, 下面的递归式 ER 算法以递归的方式组合前 i 个基本属性与第 $i+1$ 个属性的评估, 产生新的组合评估:

$$\{H_n\} : m_{n,I(i+1)} = K_{I(i+1)} [m_{n,I(i)} m_{n,i+1} + m_{n,I(i)} \bar{m}_{H,i+1} + \bar{m}_{H,I(i)} m_{n,i+1}] \quad (5a)$$

$$m_{H,I(i)} = \tilde{m}_{H,I(i)} + \bar{m}_{H,I(i)}, n = 1, 2, \dots, N \quad (5b)$$

$$\{H\} : \tilde{m}_{H,I(i+1)} = K_{I(i+1)} [\tilde{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1} + \tilde{m}_{H,I(i)} \bar{m}_{H,i+1} + \bar{m}_{H,I(i)} \tilde{m}_{H,i+1}] \quad (5c)$$

$$\{H\} : \bar{m}_{H,I(i+1)} = K_{I(i+1)} [\bar{m}_{H,I(i)} \bar{m}_{H,i+1}] \quad (5d)$$

$$K_{I(i+1)} = [1 - \sum_{t=1}^N \sum_{j=t, j \neq i}^N m_{t,I(i)} m_{j,i+1}]^{-1}, i = 1, 2, \dots, L-1. \quad (5e)$$

在所有 L 个基本属性的评估都被聚集以后, 使用标准化过程产生对总体属性 y 的评估的组合信度:

$$\{H_n\} : \beta_n = \frac{m_{n,I(L)}}{1 - \bar{m}_{H,I(L)}}, n = 1, 2, \dots, N \quad (6a)$$

$$\{H\} : \beta_H = \frac{\tilde{m}_{H,I(L)}}{1 - \bar{m}_{H,I(L)}} \quad (6b)$$

通过聚集所有相关基本属性的评估信息, 对总体属性 y 产生的总体评估可以使用分布式形式表示为

$S(y) = \{(H_n, \beta_n), n = 1, 2, \dots, N\}$ (7)

此分布式评估表示总体属性 y 以 $\beta_n (n = 1, \dots, N)$ 的信度被评估为等级 H_n .

2.4 据推理方法数学模型

基于上述的评估分析模型和证据推理算法, 证据推理方法数学模型可以归纳为以下步骤^[12]:

步骤 1: 建立评估分析模型, 定义并表示一个多属性决策问题.

使用式(1) ~ (3), 定义多属性决策问题的属性集、确定属性的相对权重、定义评估等级集、使用分布式形式表示评估信息.

步骤 2: 计算方案的每个基本属性的基本可信度分配.

使用式(4a)、(4b) 计算方案的每个基本属性的基本可信度分配.

步骤 3: 计算方案的总体属性的组合可信度分配.

使用式(5a) ~ (5e) 聚集所有相关基本属性的可信度分配, 计算方案的总体属性的组合可信度分配.

步骤 4: 计算方案的总体属性的组合信度.

使用式(6a)、(6b) 计算方案的总体属性的组合信度.

步骤 5: 表示对方案的分布式的总体评估.

使用式(7) 表示对方案的分布式的总体评估.

步骤 6: 计算方案的期望效用、效用区间或近似效用.

假设 $u(H_n)$ 表示评估等级 H_n 的效用, 此效用可使用一些经典的方法估算, 其中, 如果 H_{n+1} 优于 H_n , 则 $u(H_{n+1}) > u(H_n)$.

如果总体评估是完全的, 则使用式(8) 计算方案 $a_l (l = 1, 2, \dots, M)$ 关于属性 y 的期望效用:

$u(a_l) = \sum_{n=1}^N \beta_n(a_l) u(H_n).$ (8)

如果总体评估是不完全的, 则可以使用式(9a) ~ (9c) 计算方案 a_l 的最大、最小和平均效用:

$u_{\max}(a_l) = \sum_{n=1}^N \beta_n(a_l) u(H_n) + (\beta_N(a_l) + \beta_H(a_l)) u(H_N)$ (9a)

$u_{\min}(a_l) = (\beta_1(a_l) + \beta_H(a_l)) u(H_1) + \sum_{n=2}^N \beta_n(a_l) u(H_n)$ (9b)

$u_{\text{avg}}(a_l) = \frac{u_{\max}(a_l) + u_{\min}(a_l)}{2}.$ (9c)

如果总体评估是不完全的, 则还可以使用式(10) 计算方案 a_l 的近似效用, 求近似效用的基本思想是将未分配到任何评估等级的信度平均分配到各评估等级, 由于未分配到任何评估等级的信度分配到各评估等级的概率相同, 故近似效用既求解简单又较符合客观情况:

$u_{\text{app}}(a_l) = \sum_{n=1}^N (\beta_H(a_l) + \frac{1}{n} \beta_H(a_l)) u(H_n)$ (10)

步骤 7: 方案排序.

使用式(8) ~ (10) 计算得出的期望效用、效用区间、平均效用或近似效用对方案进行排序, 其中, 效用值越大, 方案越优.

3 一体化联合作战效能评估计算实例

某军队要对几个军团的一体化联合作战效能进行评估, 经过对几次军事演习数据资料的积累, 以有效的方法对这几个军团的一体化联合作战效能进行评估. 本实例以其中某个军团 $a_l (l = 1)$ 为例进行效能评估.

3.1 作战效能评估分析模型

建立如图 1 所示的一体化联合作战效能评估分析模型, 模型中的数据分别表示相关属性的相对权重.

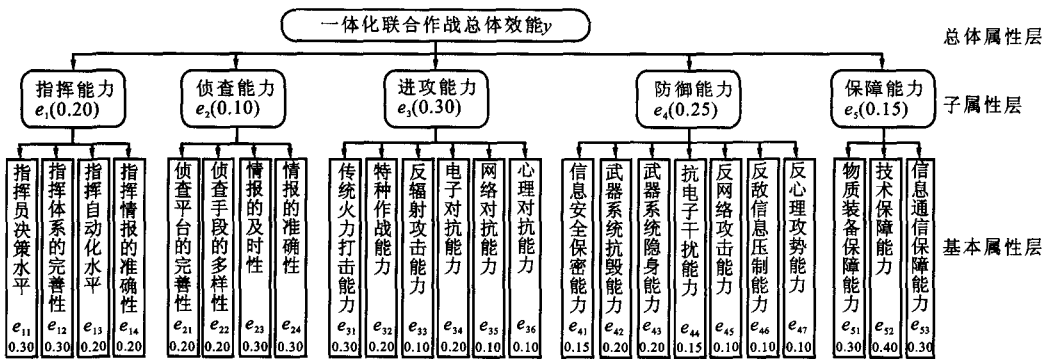


图 1 一体化联合作战效能评估分析模型

邀请多名相关专家根据其专业、知识、经验等对这个军团的一体化联合作战效能进行评估,其中定量属性和定性属性统一转化为分布式评估分析框架^[7],评估信息如表1所示,其中 $H_n(n=1,2\cdots,5)$ 表示评估等级,计算实例中评估等级如下:

$$H=\{H_1,H_2,H_3,H_4,H_5\}=\{\text{很差,差,一般,好,很好}\}$$

(11)

表1 一体化联合作战效能基本属性评估信息

总体属性	子属性	基本属性	一体化联合作战方案 军团1(a_1)
一体化联合作战效能y	$e_1(0.20)$	$e_{11}(0.30)$	$\{(H_4,0.2),(H_5,0.8)\}$
		$e_{12}(0.30)$	$\{(H_3,0.3),(H_4,0.7)\}$
		$e_{13}(0.20)$	$\{(H_4,0.5),(H_5,0.4)\}$
		$e_{14}(0.20)$	$\{(H_3,0.4),(H_4,0.4),(H_5,0.2)\}$
	$e_2(0.10)$	$e_{21}(0.20)$	$\{(H_4,0.6),(H_5,0.4)\}$
		$e_{22}(0.20)$	$\{(H_4,0.3),(H_5,0.7)\}$
		$e_{23}(0.30)$	$\{(H_3,0.5),(H_4,0.3),(H_5,0.2)\}$
		$e_{24}(0.30)$	$\{(H_4,0.8),(H_5,0.1)\}$
	$e_3(0.30)$	$e_{31}(0.30)$	$\{(H_4,0.8),(H_5,0.2)\}$
		$e_{32}(0.20)$	$\{(H_4,1.0)\}$
		$e_{33}(0.10)$	$\{(H_3,0.6),(H_4,0.4)\}$
		$e_{34}(0.20)$	$\{(H_3,0.2),(H_4,0.8)\}$
		$e_{35}(0.10)$	$\{(H_4,0.4),(H_5,0.4)\}$
		$e_{36}(0.10)$	$\{(H_4,1.0)\}$
	$e_4(0.25)$	$e_{41}(0.15)$	$\{(H_3,0.6),(H_4,0.4)\}$
		$e_{42}(0.20)$	$\{(H_4,0.9),(H_5,0.1)\}$
		$e_{43}(0.20)$	$\{(H_3,0.4),(H_4,0.5),(H_5,0.1)\}$
		$e_{44}(0.15)$	$\{(H_3,0.6),(H_4,0.4)\}$
		$e_{45}(0.10)$	$\{(H_3,0.2),(H_4,0.8)\}$
		$e_{46}(0.10)$	$\{(H_2,0.3),(H_3,0.3),(H_4,0.4)\}$
		$e_{47}(0.10)$	$\{(H_4,0.5),(H_5,0.5)\}$
	$e_5(0.15)$	$e_{51}(0.30)$	$\{(H_3,0.5),(H_4,0.5)\}$
		$e_{52}(0.40)$	$\{(H_3,1.0)\}$
		$e_{53}(0.30)$	$\{(H_3,0.2),(H_4,0.8)\}$

3.2 计算过程

经过步骤1建立如图1所示的评估分析模型和如表1所示的分布式基本评估信息;重复经过步骤2、3、4分别计算得如表2、表3所示的方案子属性和总体

属性的组合信度;经过步骤5计算得对此军团一体化联合作战效能分布式的总体评估为: $S(y)=\{(H_2,0.0049),(H_3,0.2055),(H_4,0.6635),(H_5,0.1185)\}$;经过步骤6计算得如表4所示的方案的最大、最小、平均和近似效用值,其中,使用概率方法对各评估等级效用估算^[7]为: $u(H_1)=0,u(H_2)=0.35,u(H_3)=0.55,u(H_4)=0.85,u(H_5)=1$;若对多个军团的一体化联合作战效能进行评估,则可以通过计算得出的效用值经过步骤7对多个方案进行排序、择优.

3.3 结果分析

通过一体化联合作战效能评估实例的计算过程可以看到,证据推理方法能够有效地聚集不确定评估信息、合理地处理评估过程中的不完全信息、充分地考虑相对权重对信息聚集的影响.通过表3中的总体评估和表4中的效用值,可以得出,此军团一体化联合作战效能趋向于评定为等级“好”;通过对表2中的组合评估信息分析得到子属性防御能力和保障能力为一体化联合作战方案中的弱项,可以继续对表1进行分析,找出相关的弱项,及时对弱项进行研究、整改,从而提高一体化联合作战的总体效能.应用证据推理方法对多个军团的一体化联合作战效能进行评估,通过计算效用值,可以对多个方案进行有效的排序、择优.

4 结束语

效能评估结果的准确与否直接影响一体化联合作战的科学发展和逐步完善,具有重要的意义.论文研究了一体化联合作战效能评估方法,给出了基于证据推理进行不确定多属性决策的数学模型及其在一体化联合作战效能评估中的应用方法;评估实例说明了所给出方法的有效性和合理性.应用证据推理方法能够方便、系统地对同一部队不同时期的一体化联合作战能力进行动态评估,也可以对不同部队的一体化联合作战能力进行效能评估并对预案进行排序、择优和改进,从而辅助完善我军的一体化联合作战体系、提高我军的一体化联合作战能力.

表2 一体化联合作战效能子属性组合评估信息

总体属性	子属性	一体化联合作战方案军团1(a_1)
y	$e_1(0.20)$	$\{(H_3,0.155\ 1),(H_4,0.477\ 0),(H_5,0.352\ 2),(H_H,0.015\ 7)\}$
	$e_2(0.10)$	$\{(H_3,0.136\ 7),(H_4,0.543\ 7),(H_5,0.293\ 4),(H_H,0.026\ 2)\}$
	$e_3(0.30)$	$\{(H_3,0.070\ 2,(H_4,0.839\ 6),(H_5,0.077\ 6),(H_H,0.012\ 6)\}$
	$e_4(0.25)$	$\{(H_2,0.022\ 9),(H_3,0.288\ 5),(H_4,0.613\ 8),(H_5,0.074\ 8)\}$
	$e_5(0.15)$	$\{(H_3,0.655\ 1),(H_4,0.344\ 9)\}$

表 3 一体化联合作战效能总体属性组合评估信息

总体属性	一体化联合作战方案军团 1(α_1)
y	$\{(H_2, 0.004\ 9), (H_3, 0.205\ 5), (H_4, 0.663\ 5), (H_5, 0.118\ 5), (H_H, 0.007\ 6)\}$

表 4 一体化联合作战效能评估效用值

总体属性	一体化联合作战效能效用值			
	$u_{\max}(\alpha_1)$	$u_{\min}(\alpha_1)$	$u_{\text{avg}}(\alpha_1)$	$u_{\text{app}}(\alpha_1)$
y	0.804 8	0.799 9	0.802 4	0.801 4

参考文献:

[1] 白松卫,龚传信,古平. “一体化联合作战”的概念辨析[J]. 装甲兵工程学院学报,2006,20(4):15-18.

[2] 陈芳莉,张明智,邵勇. 基于模糊综合评判的一体化联合作战能力评估模型研究[J]. 系统仿真技术及其应,2007(8):780-783.

[3] 魏华实,徐建,姚炳辉,等. 一体化联合作战战役级通信网效能评估[J]. 兵工自动化,2008,27(3):50-53.

[4] 江汉,张义宏,蒋晓原,等. 基于体系对抗仿真的指挥自动化系统效能评估[J]. 军事运筹与系统工程,2005,19(4):54-57.

[5] 王梦麟,鲁云军. 一体化联合作战仿真通信兵模型体系研究与实践[J]. 系统仿真学报,2006,18(2):66-68.

[6] Yang J B, Singh M G. An evidential reasoning approach for multiple-attribute decision making with uncertainty[J]. IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics, 1994,24(1):1-18.

[7] Yang J B. Rule and utility based evidential reasoning approach for multi-attribute decision analysis under uncertainties[J]. European Journal of Operational Research,2001(131):31-61.

[8] Yang JB, Wang Y M, Xu DL. The evidential reasoning ap-

proach for MADA under both probabilistic and fuzzy uncertainties[J]. European Journal of Operational Research,2006(171):309-343.

[9] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping[J]. Annual of mathematical statistics,1967(38):325-339.

[10] Shafer G. A mathematical theory of evidence[M]. princeton, NJ: Princeton University Press,1976.

[11] 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.

[12] Yang J B, Xu D L. Nonlinear information aggregation via evidential reasoning in multi-attribute decision analysis under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,2002,32(3):376-393.

作者简介:

李业军 男,(1983-),助教,硕士生. 研究方向为移动通信、优化理论及其应用和效能评估.

李文元 男,(1964-),副教授,硕士生导师. 研究方向为移动通信和通信信号处理.

方向东 男,(1967-),工程师. 研究方向为通信工程、网络工程及移动通信.

(上接第 187 页)

[6] Zhang Q, Ma L M, Chelberg D M. A novel machine vision application for analysis and visualization of confocal microscopic images[J]. Machine Vision and Applications, 2005(16):96-104.

[7] 杨少荣,吴迪靖,段德山. 机器视觉算法与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.

[8] 冯宇平,戴明. 一种基于角点特征的图像拼接融合算法[J]. 微电子与计算机,2009,26(7):21-28.

作者简介:

谭 杰 男,(1986-),硕士研究生. 研究方向为机器视觉.

王殊轶 女,(1972-),副教授. 研究方向为机器视觉、人因工程、医疗器械工程.

王慧芳 女,(1986-),硕士研究生. 研究方向为医疗器械工程.

郑加宽 男,(1988-),硕士研究生. 研究方向为人因工程.