

信息在决策优势中的效能分析模型

陈彬, 王智学, 何明, 司旭光, 禹明刚

(解放军理工大学指挥信息系统学院, 江苏南京 210007)

摘要: 在基于信息系统的体系对抗中, 将信息优势转化为决策优势是关键问题。其根本在于如何衡量信息在决策优势中的效能。分别从决策信息自身的价值、决策网络对信息流的影响、信息熵与决策知识的关系以及决策周期四个方面对信息在决策过程中所起的作用进行分析, 提出了信息在决策优势中的综合效能分析模型, 可以为分析决策过程中信息对于决策效能的影响提供有效的量化方法。

关键字: 信息; 决策优势; 决策网络; 效能分析;

0 引言

决策优势是指以快于对手的速度, 做出正确决策和实施决策的能力^[1]。在基于信息系统的体系对抗中, 夺取并保持决策优势尤为重要。决策优势是联结信息优势和行动优势的“桥梁”。在占据信息优势的前提下, 要夺取决策优势, 并迅速贯彻决策, 实现“决策—行动”的行动优势, 才能最终促进基于信息系统的体系作战能力的提升。而如何将信息优势转化为决策优势是当今世界各国军事研究的热点和前沿问题。其根本在于如何衡量信息在决策优势中的效能。

决策优势主要体现为决策者的决策效能。本文主要从四个方面对信息在决策优势中的效能进行分析。由于信息优势是决策优势的基础, 首先从信息的完备性、准确性等信息价值指标入手对信息本身对于决策者的决策价值进行度量; 而在网络战环境下, 信息从收集、融合到分发离不开网络。其中决策节点间的有效协作所形成的决策网络是决策优势的综合体现。因此进一步对决策网络所带来的信息冗余和无用信息对于决策造成的影响进行度量; 除了从信息流的角度来衡量信息在决策优势中所起的作用, 决策节点对信息的理解程度也决定了决策网络决策水平的高低; 最后信息在决策优势中的效能还与决策周期有关。

对于决策优势的研究尚处于理论探索阶段。其中文献[1]提出决策优势主要与决策质量和决策循环速度有关。文献[2]通过分析决策优势与信息优势的关系, 提出了决策周期时间、决策质量和决策循环速度三个衡量决策优势的基本度量, 并分析了这些度量的基本构成和量化方法。文献[3][4][5]提出了决策模型, 分析了信息元素的不确定性, 并分别从决策者之间的协作和网络复杂性的角度, 对网络化信息收集和信息共享对决策质量的影响效果进行了评估。本文在研究相关文献的基础上, 针对以上四个方面分别提出了相关模型, 并综合这几个方面模型, 提出了信息在决策优势中的综合效能模型。

1 决策信息的优势模型

理想情况下, 决策者所收集到的信息应当是完备的, 即能全面反映与决策任务相关的战场事实, 决策者就可以全面了解战场态势, 以做出准确的决策。而如果决策者在战场信息不完备的情况下作决策, 则要承担一定的风险。同时, 信息作为反映战场事实的载体, 准确性是信息的价值存在的基础, 信息所反映的事实不仅要是客观的, 而且应当是准确的, 即与战场事实相符合。在现实中, 由于战场环境、设备等主观原因, 决策者所得到的信息带有很大的不确定性, 而只有准确的信息才能帮助决策者拨开“战争迷雾”, 准确掌握战场态势。

1.1 信息完备性

信息完备性, 可以用决策者实际得到的信息元素个数与所需要的信息元素个数的比率来表达。设决策者在某一时刻 t 进行决策所需要的信息元素为 C 个, 而决策者从各信源只得到其中的 n ($n \leq C$)个。则此时

的信息完备性为 $m(t) = \frac{n}{C}$ 。

1.2 信息准确性

信息准确性可以用感知态势中信息元素在 t 时刻的特征向量与客观态势中对应信息的特征向量的平均偏离程度，即偏差来表示。假设信息元素 a 的元素值的概率分布均值是 μ ，在 t 时刻，对均值的测量值是 $\hat{\mu}_t$ ，

则此时信息元素的偏差为 $b = |E(\hat{\mu}_t) - \mu|$ 。对于多元信息元素的偏差，可以利用 n 维 Euclidean 距离表示，

以二维坐标位置为例，目标的真实位置是 (μ_x, μ_y) ，在 t 时刻，对目标位置的估计值是 $(\hat{\mu}_{t,x}, \hat{\mu}_{t,y})$ ，则此时

信息元素的偏差为 $b = \sqrt{(\hat{\mu}_{t,x} - \mu_x)^2 + (\hat{\mu}_{t,y} - \mu_y)^2}$ 。

1.3 决策信息的优势模型

对于决策者所需要的信息元素集 $A = \{a_1, K, a_C\}$ ，如目标的位置、高度、速度等特征，其具体取值用随机向量 $X = [x_1, K, x_C]^T$ 表示。综合考虑信息的完备性、准确性等信息价值指标对决策的影响效果，得到基于信息价值指标的决策信息的优势模型：

$$I(X) = m \left(1 - \frac{b^2}{nb_{\max}^2}\right) = \frac{n}{C} \left(1 - \frac{b^2}{nb_{\max}^2}\right)$$

其中， b_{\max}^2 可由各个信源的系统装备的系统偏差得到。

2 决策网络优势模型

网络中心化条件下的信息作战，其决策优势体现在网络化的知识共享和群决策机制上，通过决策节点协作进行网络化决策，一个由决策节点广泛互联、密切协作的决策网络往往会比单纯提高决策质量的独立节点有更好的表现。

2.1 决策网络

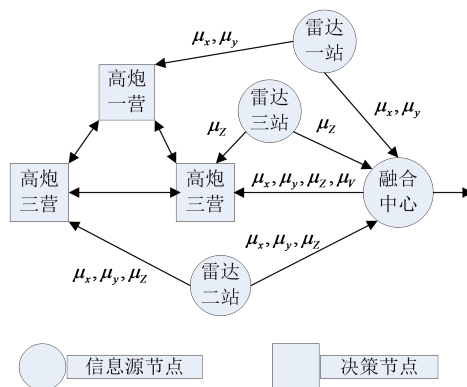


图 1 高炮营决策网络

决策网络由决策节点和信息源节点构成。决策节点代表决策者或决策机构，信息源节点代表雷达站、预警机或信息融合中心等信源实体，决策节点彼此通信通过逻辑连接形成决策网络，决策网络内的决策节点协同决策，从而把单个决策节点的决策变为决策网络内的群决策。信息源节点为决策网络中的决策节点提供信

息元素。

设决策网络由三个高炮营、三个雷达站和一个融合中心构成。其中，雷达站负责完成情报获取任务，分别负责截获战机的位置{经度 μ_x 、纬度 μ_y 、高度 μ_z }和速度信息 μ_v ，并将截获的目标数据提供给高炮营和融合中心；高炮营负责完成指挥决策任务，且各高炮营协同完成决策任务。融合中心负责对情报进行融合上报给指控中心以及高炮营所组成的决策网络。决策网络如图 1 所示。

决策网络会对信息的决策效用产生正面和负面的影响。在信源节点丢失的情况下，决策者仍然可以从其它信源节点得到所需的信息，而且对于多个信源提供的关于同一目标的信息，经过某种方式进行组合（如贝叶斯估计等），可以提高信息的准确性，减少信息的不确定性。因此网络冗余可以为决策带来额外收益。同时冗余的信源，或过度传输信息会导致网络时延，需要额外的时间和资源去处理。因此网络冗余也会带来代价。

2.2 网络冗余收益

设整个决策网络所需要的信息元素个数为 C 。其中，产生信息元素 a_i 的信源共有 p_i 个，每个信源的可靠性分别为 $\theta_{i,j} \in (1, +\infty)$ ，其中 $1 \leq j \leq p_i$ 。假设链路是可靠的，则 $\theta_{i,j}$ 的取值依赖于信源系统装备的可靠性。

记冗余收益为 $r_i(\Theta_i)$ ，其中 $\Theta_i = \sum_{j=1}^{p_i} \theta_{i,j}$ ，为总体可靠性。当至少有一个信源接受信息元素 a_i 时，有

$\Theta_i \geq 1$ ；当所有信息源可靠性都低时，有 $\theta_{i,j} = 1$ ，这样 $r_i(\Theta_i) = r_i(p_i)$ 。如果对冗余收益进行归一化处理，

限定 $r_i(\Theta_i)$ 在 0 到 1 之间取值，得到 p_i 个信源的关于信息元素 a_i 的冗余收益模型：即：

$$r_i(\Theta_i) = \begin{cases} 1 - e^{-\delta_i(\Theta_i - 1)} & p_i \geq 1 \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

其中，参数 δ_i 反映了信息元素 a_i 的相对重要性，即权重， $\sum_{i=1}^C \delta_i = 1$ 。 δ_i 越大，在可靠性相同条件下信息冗余的收益越大，反之则越小。

推广整个决策网络，设实际可得到的信息元素个数为 $n(n \leq C)$ ，用向量 $\Theta = [\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_C]^T$ 表示决策网络中所有信息元素的可靠性，得到决策网络内所有信息元素的总体网络冗余收益模型：

$$R(\Theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^C r_i(\Theta_i) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^C \gamma_i e^{-\delta_i(\Theta_i - 1)}, \quad \gamma_i = \begin{cases} 1 & p_i \geq 1 \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

2.3 网络冗余代价

对于网络冗余所产生的代价，考虑两种情况：网络向决策者提供无用信息和过量信息。

第一种情况，无用信息是一种负担，因而必须被处理。无用信息所产生的代价模型为：

$$U(m) = 1 - e^{-vm}$$

其中， m 是无用信息的信源数，待定参数 v 是比例缩放因子， v 越大，模型越快达到饱和点。同时当 v 一定时， m 越大，其代价 $U(m)$ 越大。

第二种情况, 有用信息的额外信息源过多时, 可能会产生信息超载或互斥。对于信息元素 a_i , 共有 p_i 个信源, 其过量代价模型为:

$$g_i(p_i) = \frac{e^{\chi_i + \varphi_i p_i}}{1 + e^{\chi_i + \varphi_i p_i}}$$

其中, χ_i 和 φ_i 是调节参数, 决定了最小代价区域以及代价急剧增长的区域的大小。

推广整个决策网络, 用向量 $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_C]^T$ 表示整个决策网络中所有关键信息元素的信源数, 得到决策网络内所有关键信息元素的总体信息过量代价模型:

$$G(P) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^C g_i(p_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^C \gamma_i \frac{e^{\chi_i + \varphi_i p_i}}{1 + e^{\chi_i + \varphi_i p_i}}, \quad \gamma_i = \begin{cases} 1 & p_i \geq 1 \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

综合考虑信息过载的代价, 将两个代价模型进行线性加权, 得到整个决策网络信息过载代价模型:

$$O[U(m), G(P)] = \alpha U(m) + (1 - \alpha)G(P)$$

其中, $0 \leq \alpha \leq 1$ 是一个相对权重参数。代价模型中的待定参数 α 、 ν 、 χ_i 和 φ_i 都是经验数据, 需要通过积累一定量的实验数据进行拟和后获得。

2.4 决策网络优势模型

全面考虑网络冗余对信息效能带来的正面和负面影响, 综合网络冗余收益模型和网络冗余代价模型, 得到决策网络的优势模型:

$$C(R, O) = R(\Theta)[1 - O[U(m), G(P)]]$$

3 决策知识模型

决策者从传感器等信源所得到的信息属于信息域, 通过决策者对信息元素值的理解, 将信息转化为认知域的知识, 才能构成决策的基础。这里采用信息熵来表示知识, 从而量化决策者对信息元素值的理解程度。信息熵是随机变量的平均不确定性的度量, 反映了信息的不确定性。信息的不确定性越大, 信息熵就越大, 决策者所得到的知识就越少; 反之, 信息熵就越小, 决策者得到的知识就越多^{[6][7]}。

3.1 信息熵模型

对离散随机变量 X , 信息熵表达式为:

$$H(X) = -\sum_i p(x_i) \log p(x_i) \quad (\text{其中 } p(x_i) \text{ 为取值 } x_i \text{ 的概率})$$

对连续随机变量 X , 信息熵表达式为:

$$H(X) = -\int_{-\infty}^{+\infty} f(X) \log f(X) dX \quad (\text{其中 } f(X) \text{ 为概率密度函数})$$

3.2 决策知识模型

对信息熵进行归一化处理, 进一步得到知识的数学描述:

$$K(X) = \frac{H_{\max}(X) - H(X)}{H_{\max}(X)} = 1 - \frac{H(X)}{H_{\max}(X)}$$

其中, $H_{\max}(X)$ 是最大信息熵, 表示最大的不确定性。

4 信息在决策网络中的综合效能模型

信息的效能不仅与其在决策过程所产生的价值有关, 还与决策过程的效率相关。有效的决策者能够准确抓住有利的态势信息并可靠地选择行动过程, 获得比对手更快的决策速度, 从而在战斗中占有有利位置。

4.1 决策周期模型

在决策过程中, 决策者进行决策的时间 t_D 是由接收战场态势信息 t_R 、对信息进行分析判断形成知识时间 t_K 、制定评估作战方案和作战计划时间 t_P 、作战行动时间 t_A , 以及结果反馈时间 t_B 等一系列时间总和构成:

$$t_D = t_R + t_K + t_P + t_A + t_B$$

4.2 综合效能模型

综合决策信息的优势模型、决策网络的优势模型、决策知识模型以及决策周期模型, 可以得到信息在决策网络中综合效能模型:

$$\Omega(I, C, K) = \frac{I(X)C(R, O)K(X)}{t_D}$$

从该式可以看出, 信息在决策过程中的效能与信息本身的完备性、准确性, 决策网络的冗余性、决策者对决策信息的理解程度成正比, 而与决策周期成反比。

5 算例分析

设决策网络如图 1 所示。则信息在决策网络中综合效能模型计算如下:

(1) 计算决策信息的优势模型。

需要的信息元素集为 {战机的经度, 纬度, 高度和速度}, 因此信息元素个数 $C = 4$, 假设在 t 时刻三个雷达站和一个融合中心的工作状态完好, 决策者可以得到全部信息元素, 即 $n = 4$, 则决策信息完备性为

$$m(t) = \frac{n}{C} = 1。$$

假设在 t 时刻, 战机的经度信息的估计值为 $\mu_{x,t} = 20.75$, 纬度信息为 $\mu_{y,t} = 10.8$, 高度信息为 $\mu_{z,t} = 19.2$, 速度信息为 $\mu_{v,t} = 800.84$ 。并已知战机的真实位置和速度分别为 $\mu_x = 20$, $\mu_y = 10$, $\mu_z = 20$ 和 $\mu_v = 800$ 。利用 n 维 Euclidean 距离可得到这四个关键信息元素联合分布的中值估计值的偏差的平方

$$b^2 = (\mu_{x,t} - \mu_x)^2 + (\mu_{y,t} - \mu_y)^2 + (\mu_{z,t} - \mu_z)^2 + (\mu_{v,t} - \mu_v)^2 = 2.64。$$

中值估计值的偏差平方的最大值出现在四个子项同时取其最大值时, 即每个不确定性中值估计值的偏差都达到最大值, 即系统装备的系统偏差。因为中值估计值是融合来自多个信源的测量值, 而每个信源的系统偏差又不相同, 所以取其中最大的系统偏差作为单个信息元素分布中值估计值的最大偏差, 然后得到联合分布中值估计值的偏差平方的最大值:

$$b_{\max}^2 = (\mu_{x,t} - \mu_x)^2_{\max} + (\mu_{y,t} - \mu_y)^2_{\max} + (\mu_{z,t} - \mu_z)^2_{\max} + (\mu_{v,t} - \mu_v)^2_{\max} = 4。$$

由决策信息的完备性和准确性参数，可以得到决策信息的优势模型： $I(X) = \frac{n}{C} (1 - \frac{b^2}{nb_{\max}^2}) = 0.835。$

(2) 计算决策网络的优势模型。

设三个高炮营所组成的决策网络的网络参数如下表所示。由仿真数据可知，冗余信息包括融合中心提供的敌机类型信息，可得冗余信息的信源数为 $m = 1。$

表 1 高炮营决策网络参数

	信源可靠性				信源个数 p_i	可靠性 Θ_i	权重 δ_i
	雷达一站	雷达二站	雷达三站	融合中心			
	$\theta_{i,1}$	$\theta_{i,2}$	$\theta_{i,3}$	$\theta_{i,4}$			
经度	3	3	—	4	3	10	0.25
纬度	3	3	—	4	3	10	0.25
高度	—	3	—	4	2	7	0.25
速度	—	—	3	4	2	7	0.25

可得到该决策子网内所有关键信息元素的总体网络冗余收益为：

$$R(\Theta) = \frac{1}{4} (4 - 2e^{-2.25} - 2e^{-1.5}) = 0.8357$$

取参数 $\nu = 0.3, \chi_i = -6, \varphi_i = 1, \alpha = 0.3$ ，可得到网络冗余代价为：

$$O[U(1), G(P)] = 0.3 \times (1 - e^{-0.3}) + 0.7 \times \frac{1}{4} \times (\frac{3e^{-4}}{1+e^{-4}} + \frac{e^{-5}}{1+e^{-5}}) = 0.0884$$

根据公式 (4.5) 可得到该决策子网的网络复杂性为：

$$C(R, O) = R(\Theta) [1 - O[U(1), G(P)]] = 0.7619。$$

(3) 计算决策知识模型

设战机的经度，纬度，高度和速度信息相互独立，且其不确定性都符合正态分布 $f(X)$ ，则其信息熵为：

$$\begin{aligned} H(X) &= - \int \int \dots \int_{x_1 x_2 \dots x_c} f(X) \log f(X) dx_c \dots dx_2 dx_1 \\ &= \frac{1}{2} \log(2\pi)^c |\Sigma| + \frac{C}{2} = \frac{1}{2} \log(2\pi)^c |\Sigma| \end{aligned}$$

其中， $|\Sigma|$ 是 $f(X)$ 协方差矩阵 Σ 的行列式。在信息元素值的不确定性服从多元正态分布 $f(X)$ 的情况下，决策者的知识简化为：

$$K(X) = 1 - \frac{|\Sigma|}{|\Sigma|_{\max}}$$

当协方差矩阵的行列式达到最大值时，信息元素值的不确定性最大，决策者的知识最少，反之亦然。假设在 t 时刻，战机的经度信息的方差估计值为 $\sigma_{x,t}^2 = 0.266$ ，纬度信息的方差估计值为 $\sigma_{y,t}^2 = 0.268$ ，高度信息的方差估计值为 $\sigma_{z,t}^2 = 0.296$ ，速度信息的方差估计值为 $\sigma_{v,t}^2 = 0.394$ 。则战机的真实位置和速度的联合分布的协方差的行列式为 $|\Sigma| = \sigma_{x,t}^2 \sigma_{y,t}^2 \sigma_{z,t}^2 \sigma_{v,t}^2 = 0.007$ 。取每个信息元素的最大不确定性程度，则得到联合分布协方差的行列式的最大值为： $|\Sigma|_{\max} = \sigma_{x,t \max}^2 \sigma_{y,t \max}^2 \sigma_{z,t \max}^2 \sigma_{v,t \max}^2 = 0.6561$ 。

则决策者的知识为： $K(X) = 1 - \frac{|\Sigma|}{|\Sigma|_{\max}} = 0.9893$ 。

(4) 计算综合效能模型

假设决策者进行决策需要的时间 t_D 为 1 分钟，则信息在决策网络中综合效能模型为：

$$\Omega(I, C, K) = \frac{I(X)C(R, O)K(X)}{t_D} = 0.6294$$

5 总结

本文分别从决策信息自身的价值、决策网络对于信息流的影响、信息熵与决策知识的关系以及决策周期等方面对信息在决策过程中所起的作用进行分析，总结了相关数学模型，然后对这四个模型进行综合，形成了信息在决策优势中的综合效能模型，为分析决策过程中信息对于决策效率和效果的影响提供了有效量化方法。

参考文献

- [1]. Paul J H. A Model of Command and Control Processes for JWARS: Test Results From Controlled Experiments and Simulation Runs[M]. DISA Technical Integration Services Directorate, 2002.
- [2]. 张义宏、蒋晓原. 基于信息优势的决策能力分析. 火力与指挥控制, 2006.12.
- [3]. Walter L. Perry, James Moffat. Information Sharing Among Military Headquarters; The Effects on Decisionmaking[R]. RAND Corporation, 2004
- [4]. 杨海波, 王智学, 陈国友. 基于能力模型的决策优势评估研究, 火力与指挥控制, 2006.12.
- [5]. 何宝民、沙基昌. 复杂指控网络的决策优势度量研究. 火力与指挥控制, 2008.05.
- [6]. 叶中行. 信息论基础[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2007
- [7]. Walter K. Perry. Measuring the Effects of Knowledge on Combat Operations[R]. RAND Corporation, 2002.