

基于火力支援关系网的作战目标威胁度评估方法

贺毅辉, 徐伟, 潘明聪

(解放军理工大学指挥信息系统学院, 江苏南京 210007)

摘要: 真实战场环境中, 有效的作战目标威胁度评估与排序方法能够很好地向作战指挥员提供决策信息, 有利于决策者了解战场态势信息。针对传统的目标威胁评估方法中仅仅单独考虑作战目标能力, 而没有涉及目标之间联系的特点, 从目标之间的火力支援关系出发, 根据探知的目标信息构建当前战场环境下目标之间的火力支援关系网, 综合多属性决策方法和图论关键节点计算方法, 提出一种新的目标威胁度评估指标。实例验证提出的评估指标能够有效解决目标威胁的评估与排序问题。

关键词: 目标威胁评估; 多属性决策; 关键节点

0 引言

传统的作战单元作战能力和威胁评估的方法主要有 MADM 排序法^[1]、线性加权法、灰色关联分析法、模糊评估法、贝叶斯网络分析法、区间数评估法、变权理论法、属性分析的神经网络法等。这些方法在特定背景下能够很好地实现作战能力和目标威胁的评估。但存在一些不足, 如神经网络分析法计算量复杂、贝叶斯网络分析法中先验概率的确定需要依赖专家的经验。同时这些方法在评估目标威胁时仅仅考虑目标自身的各项能力指标, 并没有考虑到评估目标之间的联系。针对传统的方法仅考虑单个目标能力的特点, 本文提出一种新的目标威胁评价指标, 主要思想是结合层次分析法(Analytical Hierarchy Process, AHP)与逼近理想解的排序方法(Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)确定作战单元作战能力评价指数, 在此基础上, 考虑作战单元之间的火力支援关系, 构建火力关系网络, 运用图论中节点重要度理论知识, 综合评估目标威胁度对目标进行排序^[3], 从而为辅助决策提供态势信息。

1 相关定义与说明

本文涉及的连通有向图用 $G = (V, E)$ 来表示, 假设 G 为无自环有向连通图, 有 m 个顶点, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$, $E = \{e_{ij} | \text{顶点 } v_i \text{ 有指向顶点 } v_j \text{ 的边}, 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq m\}$ 。

定义 1: 集合 $Set(i)$ 表示图 G 中顶点 v_i 相连顶点 v_j 下标 j 的集合, 其数学定义式为 $Set(i) = \{j | e_{ji} \in E\}$

定义 2: 在加权有向图中点联系度 s 表示顶点与周围节点联系的紧密程度, 其定义式为 $s_i = \sum_{j \in Set(i)} T_{ij}$

式中 T_{ij} 表示边 e_{ij} 的权值, 且 $s_i \in (0, \infty)$, 也即点强度值越大, 所代表的顶点与周围的顶点联系越紧密, 反之则联系越小。

定义 3: 加权有向网络图中, 网络图的平均距离大小表示网络规模大小程度, 其数学定义式为

$$l = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} T_{ij}$$

式中 N 表示网络的顶点数。

定义 4: 加权网络的联系紧密程度数学定义式如下

$$\partial(G) = s * l = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\text{Num}(\text{Set}(i))} \sum_{j \in \text{Set}(i)} T_{ij} * \frac{\sum T_{ij}}{m(m-1)}$$

式中, $\text{Num}(\text{Set}(i))$ 表示结合 $\text{Set}(i)$ 中元素的个数, s 表示平均点强度之和。当 $m=1$ 时, 令 $\partial=1$ 。显然 $0 < \partial \leq 1$ 。在此基础上, 定义加权节点重要度

$$\text{IMC}(v_i) = \frac{\partial(G * v_i)}{\partial(G)}$$

式中, $G * v_i$ 表示将节点 v_i 收缩后所得到的网络图, 有向图的节点收缩法可以参考文献[1], 具体计算时按无向无权网络进行。节点 IMC 值越大意味着节点在整个拓扑图 G 中地位越重要。

定义 5: 称 $\bar{a} = [a^L, a^R]$ 为闭区间数, 其中 $a^L, a^R \in R$, 且 $a^L \leq a^R$ 。

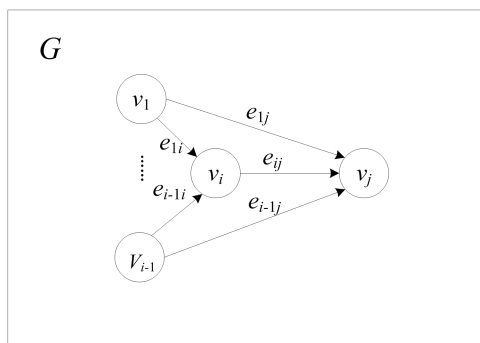


图 1 连通图 G 和部分定义量示意图

2 作战能力评估建模模型

2.1 模型的建立

设目标集 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$, 目标因素集 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, 属性的权重向量 $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^t$ 。对于目标 G_i , 按属性 $U_j (j=1, 2, \dots, n)$ 进行测度, 得到目标 G_i 关于属性 U_j 的属性值 $a_{ij} (i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n)$ 。在测度过程中, 属性值有两种表示形式[2]: 精确数与区间数。由 a_{ij} 构成决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times n}$ 后对目标集进行作战能力的评估和排序。

本文研究的问题背景是战场条件下探知敌方局部特征信息, 为简化计算各属性语言性描述如下。

目标类型 f_1 : 由于不同作战背景下, 相同目标类型的威胁值不同, 因此目标类型的隶属度值由决策者根据具体情况给出。

目标干扰能力 f_2 : 分类为很强、强、中、弱、无等五档, 依据既有的数据, 依次量化为 1、0.8、0.5、0.2、0;

目标杀伤力 f_3 : 大[0.8, 1], 较大[0.6, 0.8], 一般[0.4, 0.6], 较小[0.2, 0.4], 小[0, 0.2]。

目标防护能力 f_4 : 分类为很强、强、中、弱、无等五档, 依据既有的数据, 依次量化为 1、0.8、0.5、0.2、0;

目标机动能力 $F_i (i=1, 2, \dots, m)$: 目标的机动能力则为具体数值, 在实际战场环境中由探测设备获得。

目标距离矩阵 $D = (d_{ij})_{m \times m}$: 由已有的探测手段探知。

2.2 决策方法

(1) 决策矩阵的规范化

为消除决策矩阵中不同物理量纲对评估结果带来的误差, 首先将决策矩阵 A 进行归一化, 然后将归一

化后的结果用向量规范化的方法求得规范决策矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 。规范化过程中需将精确数与区间数、效益型属性与成本型属性分开处理。记目标下标集 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ ，精确数下标集 M_1 ，区间数下标集 M_2 ，效益型属性下标集 I_1 ，成本型属性下标集 I_2 。具体步骤如下。

$$b_{ij} = \begin{cases} b_{ij} & i \in M, j \in M_1 \\ [b_{ij}^L, b_{ij}^R] & i \in M, j \in M_2 \end{cases}$$

其中

①精确数的规范化:

$$\begin{cases} b_{ij} = a_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij})^2}, j \in I_1 \\ b_{ij} = (1/a_{ij}) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/a_{ij})^2}, j \in I_2 \end{cases}$$

②区间数的规范化^[4]:

$$\begin{cases} b_{ij}^L = a_{ij}^L / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^R)^2} \text{ 其中 } j \in I_1 \\ b_{ij}^R = a_{ij}^R / \sqrt{\sum_{i=1}^m (a_{ij}^L)^2} \\ b_{ij}^L = (1/a_{ij}^R) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/a_{ij}^L)^2} \text{ 其中 } j \in I_2 \\ b_{ij}^R = (1/a_{ij}^L) / \sqrt{\sum_{i=1}^m (1/a_{ij}^R)^2} \end{cases}$$

(2) 构造加权规范化矩阵

在构造加权规范化矩阵前需要确定属性的权重向量 W ，可以根据 AHP 方法确定。计算得到权重向量 W 后，求加权矩阵 Z ，具体步骤如下。

$$Z = (z_{ij})_{m \times n}, z_{ij} = [\omega_j \cdot b_{ij}]$$

其中

$$i \in M, j \in N, N = \{1, 2, \dots, n\}; 0 \leq \omega_j \leq 1, \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$$

(3) 确定理想解和负理想解

精确数:

$$c_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} z_{ij}, c_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} z_{ij}$$

区间数:

$$h_j^- = \max_{1 \leq i \leq m} z_{ij}^L, h_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} z_{ij}^R, j \in I_1$$

$$e_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} z_{ij}^L, e_j^+ = \min_{1 \leq i \leq m} z_{ij}^R, j \in I_2$$

得出理想解为:

$$G^+ = (c_{j_1}^+, [h_{j_2}^-, h_{j_2}^+]), j_1 \in M_1$$

得出负理想解为:

$$G^- = (c_{j_1}^-, [e_{j_2}^-, e_{j_2}^+]), j_2 \in M_2$$

(4) 计算距离和作战能力评价指数

计算到理想解的距离:

$$S_i^+ = S(G_i, G^+) = \sqrt{(S_{i1}^+)^2 + (S_{i2}^+)^2 + \dots + (S_{in}^+)^2}$$

到负理想解的距离:

$$S_i^- = S(G_i, G^-) = \sqrt{(S_{i1}^-)^2 + (S_{i2}^-)^2 + \dots + (S_{in}^-)^2}$$

其中:

$$S_{ij}^- = \begin{cases} (c_j^+ - z_{ij}), & i \in M; j \in M_1 \\ |z_{ij}^L - h_j^-| + |z_{ij}^R - h_j^+|, & i \in M; j \in M_2 \cap I_1 \end{cases}$$

$$S_{ij}^- = \begin{cases} (z_{ij} - c_j^-), & i \in M; j \in M_1 \\ |z_{ij}^L - e_j^-| + |z_{ij}^R - e_j^+|, & i \in M; j \in M_2 \cap I_2 \end{cases}$$

作战能力评价指数值: $S_i^* = S_i^- / (S_i^- + S_i^+), i \in M$

4) 综合作战能力并排序

根据已知的信息, 构建作战单元之间的关系拓扑图 G , 如图 1, 作战单元 O_i 为图 G 中节点 v_i , 目标 O_i 对目标 O_j 的火力支援为图 G 中有向边 e_{ij} , 边 e_{ij} 的权值则为目标 O_i 的机动能力与目标 O_i 与目标 O_j 之间距离的比值, 具体数学表达式如下

$$T_{ij} = \frac{F_i}{d_{ij}}$$

式中 F_i 为目标 O_i 的机动能力值, d_{ij} 为目标 O_i 与目标 O_j 之间的物理距离。

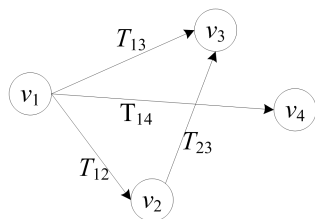


图 2 构建作战单元的火力支援关系网

根据定义 4 计算得到节点 v_i 的重要度 $IMC(v_i)$ 。

文中讨论的节点 v_i 的作战能力评价指数值 S_i^* 与节点重要度 $IMC(v_i)$ 是相互独立。同时目标威胁程度与目标作战能力和对应的节点重要度成正比。因此得到目标 O_i 的威胁度为

$$P_i = S_i^* \cdot IMC(v_i)$$

根据上面得到的综合作战能力 P_i 值对目标进行排序, 为分配火力打击提供辅助决策。

3 实例验证

在战场环境中, 根据已有的探知手段, 获得敌方部分能力信息, 根据本文提出的建模方法将敌方目标作战能力列出, 具体见表 1。

表 1 探测到的作战单元能力信息表

目标	探测的目标信息				
	f_1	f_2	f_3	f_4	F_i
O_1	0.65	很强	大	中	0.73
O_2	0.43	中	较大	中	0.45
O_3	0.55	中	大	强	0.68
O_4	0.34	强	一般	中	0.15
O_5	0.12	弱	一般	中	0.32
O_6	0.04	很强	小	无	0.79
O_7	0.24	无	一般	强	0.23

距离矩阵经归一化后得到:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0.0625 & 0 & 0.1875 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.125 & 0 \\ 0 & 0.125 & 0 & 0 & 0.1875 & 0 & 0.1875 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

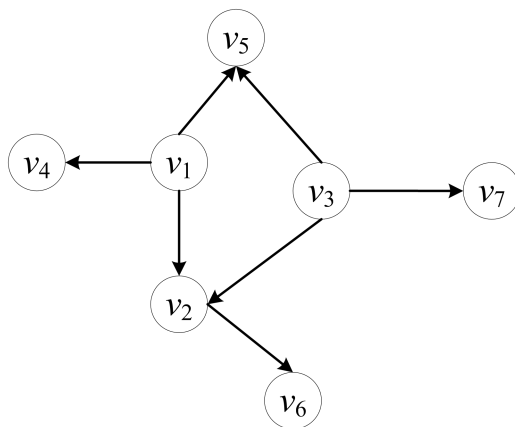


图3 作战单元支援关系网

根据表 1 构造决策矩阵 A

$$A = \begin{bmatrix} 0.65 & 1 & [0.8,1] & 0.5 & 0.73 \\ 0.43 & 0.5 & [0.6,0.8] & 0.5 & 0.45 \\ 0.55 & 0.5 & [0.8,1] & 0.8 & 0.68 \\ 0.34 & 0.8 & [0.4,0.6] & 0.5 & 0.15 \\ 0.12 & 0.2 & [0.4,0.6] & 0.5 & 0.32 \\ 0.04 & 1 & [0,0.2] & 0 & 0.79 \\ 0.24 & 0 & [0.4,0.6] & 0.8 & 0.23 \end{bmatrix}$$

根据 2.2 中决策矩阵的规范化过程得到规范化矩阵 B

$$B = \begin{bmatrix} 0.6200 & 0.5608 & [0.5157,0.5494] & 0.3311 & 0.5162 \\ 0.4102 & 0.2804 & [0.4121,0.4126] & 0.3311 & 0.3182 \\ 0.5246 & 0.2804 & [0.5157,0.5494] & 0.5298 & 0.4809 \\ 0.3243 & 0.4486 & [0.2747,0.3094] & 0.3311 & 0.1031 \\ 0.1145 & 0.1122 & [0.2747,0.3094] & 0.3311 & 0.2263 \\ 0.0382 & 0.5608 & [0,0.1031] & 0 & 0.5587 \\ 0.2289 & 0 & [0.2747,0.3094] & 0.5298 & 0.1626 \end{bmatrix}$$

计算加权规范化矩阵 Z

根据 AHP 方法^[5], 确定属性权重向量 W 。

$$W = (0.1304, 0.0728, 0.4229, 0.1566, 0.2443)$$

由权重向量 W 计算加权规范矩阵 Z 。

$$Z = \begin{bmatrix} 0.0808 & 0.0408 & [0.2181,0.2324] & 0.0519 & 0.1261 \\ 0.0535 & 0.0204 & [0.1743,0.1745] & 0.0519 & 0.0777 \\ 0.0684 & 0.0204 & [0.2181,0.2324] & 0.0830 & 0.1175 \\ 0.0423 & 0.0327 & [0.1162,0.1309] & 0.0519 & 0.0259 \\ 0.0149 & 0.0082 & [0.1162,0.1309] & 0.0519 & 0.0553 \\ 0.0050 & 0.0408 & [0,0.0436] & 0 & 0.1364 \\ 0.0299 & 0 & [0.1162,0.1309] & 0.0830 & 0.0397 \end{bmatrix}$$

确定理想解与负理想解

根据前面介绍的方法确定理想解为: $G^+ = (0.0808 \quad 0.0408 \quad [0.2181, 0.2324] \quad 0.0830 \quad 0.1365)$

负理想解为: $G^- = (0.0050 \quad 0 \quad [0, 0.0436] \quad 0 \quad 0.0259)$

计算各目标作战能力评价指数 S_i^*

根据作战能力评价指数的计算公式计算每个目标 O_i 的作战能力评价指数: $S_1^* = 0.9913$, $S_2^* = 0.8360$, $S_3^* = 0.9930$, $S_4^* = 0.4610$, $S_5^* = 0.4616$, $S_6^* = 0.0993$, $S_7^* = 0.5548$ 。

计算每个节点的重要度 $IMC(v_i)$

由节点收缩法确定节点的重要度为: $IMC(v_1)=1.5326, IMC(v_2)=1.5326, IMC(v_3)=1.5326$, $IMC(v_4)=1, IMC(v_5)=1, IMC(v_6)=1, IMC(v_7)=1$ 。

计算威胁度 P_i 并排序

由 P_i 的定义可得: $P_1=1.5192, P_2=1.5110, P_3=1.2274, P_4=0.4610, P_5=0.4616, P_6=0.0993, P_7=0.5548$ 。

根据得到的 P_i 值对目标进行威胁度排序为 $O_1 > O_2 > O_3 > O_5 > O_4 > O_7 > O_6$ 。决策者可以根据得到目标威胁度排序进行对敌关键目标的打击, 合理分配活力, 提高作战效能。

由实例可以看出, 目标威胁评估的计算方法简单、高效, 能够有效地计算作战目标的威胁度评估值, 并给出了目标威胁的排序。

4 结束语

本文提出的在真实战场环境下目标威胁度评估指标的计算方法, 根据已有的目标信息构建决策矩阵, 同时结合目标之间的火力支援关系构建火力支援关系网计算目标节点的重要度, 得到目标威胁评估指标, 根据目标威胁评估值对目标进行排序。

在作战背景下, 决策者可以通过本文提出的方法, 实时快速地评估当前敌方作战单元作战能力信息, 判断敌方关键作战单元并进行有效打击, 破坏敌方作战效能, 达到作战目的。

参考文献

- [1] 周林, 娄寿春, 赵杰. 基于 MADM 的威胁评估排序模型[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(1): 18 - 19.
- [2] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络中节点重要度评估的节点收缩方法[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(11): 79 - 13.
- [3] 程明, 周德云. 基于混合多属性决策方法的目标威胁评估[J]. 电光与控制, 2010, 17(1).
- [4] 韩朝超, 黄树彩, 王凤朝. 基于区间数熵权分析的空中目标威胁评估方法[J]. 战术导弹技术, 2010, (1): 32.
- [5] 张堃, 周德云. 熵权与群组 AHP 相结合的 TOPSIS 法多目标威胁评估[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(7): 1661 - 1664.