基于组合赋权方法的多目标威胁排序

李永宾 1, 张凤鸣 2, 李俊涛 2

(1. 空军工程大学科研部，陕西西安 710051；2. 空军工程大学工程学院，陕西西安 710051)

摘 要：判断目标威胁程度是多目标攻击决策的关键。文中选用空战态势和空战能力作为判断目标威胁的指标，综合各种赋权法的特点，以离差平方和为准则建立最优赋权方法，得出各指标的权重；采用线性加权法，计算目标的威胁值，进行目标威胁排序。最后，通过具体仿真算例，对比了3种赋权方法的计算结果，表明组合赋权结果更合理。

关键词：威胁排序；组合赋权；多属性决策

中图分类号：V271 文献标识码：A 文章编号：1009-3516(2007)02-0007-03

随着机载探测技术、武器火控技术及通讯技术的飞速发展,飞机的作战性能大大提高,多目标攻击能力已成为机载武器系统的主要研究方向和衡量飞机作战能力的一个重要指标。多目标威胁排序是多目标战术决策的主要问题之一,以有利于提高我机生存率和对敌机的杀伤率为目的。常用目标的威胁程度来确定目标攻击顺序,关键是确定各决策指标的权重。权重的确定方法大体上可分为主观赋权方法和客观赋权方法两大类。主观赋权受人为因素影响较大,决策准确性和可靠性较差;客观赋权是根据客观标准,通过计算得到,但有时结果无法解释。将不同赋权法得到的权系数按照一定方法进行组合,排序结果将更科学。

1 多目标威胁排序指标的选取

假设,我机为一架具有多目标攻击能力的歼击机,对 m 架敌机进行超视距攻击战术决策。首先要对每架敌机的威胁程度进行评估,然后根据我机的攻击能力制定攻击方案。在复杂的空战环境下,影响目标威胁程度的因素很多[1-3]。根据空战态势和敌机的空战能力来综合评估敌机的威胁程序,将空战态势分为相对角度、距离、速度3个方面。敌机空战能力、角度、距离、速度威胁定义如下:空战能力 $C_i=[\ln B+\ln(\sum A_1+1)+\ln(\sum A_2+1)]\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4$;空战能力威胁 $P_{i1}=C_i/\max(C_i)$;角度威胁 $P_{i2}=(|q_B|+|q_R|)/360°$;

距离威胁:
$$P_{i3}=\begin{cases}0.5 & r_i\leqslant r_m, r_i\leqslant r_{mt_i}\\ 0.5-0.2((r_i-r_{mt_i})/(r_m-r_{mt_i})) & r_{mt_i}<r_i<r_m\\ 1.0 & r_{mt_i}>r_i>r_m\\ 0.8 & \max(r_m,r_{mt_i})<r_i<r_r\end{cases};$$

速度威胁:
$$P_{i4}=\begin{cases}0.1 & v_i<0.6v_z\\ -0.5+v_i/v_z & 0.6v_z\leqslant v_i\leqslant 1.5v_z\text{。}\\ 1.0 & v_i>1.5v_z\end{cases}$$

式中,P_{ij} 表示敌机 i 的第 j 个因素的威胁值,C_i 为敌机 i 的空战能力,B 为机动性参数,A_1 为火力参数,A_2 为探测能力参数,ε_1 为是操纵效能系数,ε_2 为生存力系数,ε_3 为航程系数,ε_4 为电子对抗能力系数,q_R 为目标前置角,q_B 为目标航向与目标线夹角(右偏为正),$-180°\leqslant q_R,q_B\leqslant 180°$,$r_i$ 为我机到敌机 i 距离,r_m

收稿日期:2005-11-22
基金项目:军队科研基金资助项目
作者简介:李永宾(1977-),男,河北赞皇人,讲师、博士生,主要从事武器系统效能评估、智能决策等研究;
张凤鸣(1963-),男,四川梁平人,教授,博士生导师,主要从事系统工程智能决策等研究.

为我机导弹最大射程，r_{mt_i} 为敌机 i 所携带导弹的攻击距离，r_r 为我机雷达最大跟踪距离，v_z 为我机速度，v_i 为敌机 i 速度，其中 $i=1,2,\cdots,m,j=1,2,3,\cdots,4$ 。

采用线性加权法，敌机 i 对我机的综合威胁值 $D_i = \sum_{j=1}^{4} w_j P_j$，其中，$w_j (j = 1,2,\cdots,4)$ 为权重系数。

2 基于离差平方和的最优组合赋权方法

设多目标威胁评估的决策矩阵 $A = (a_{ij})_{m\times n}$，进行无量纲化处理得到矩阵 $B = (b_{ij})_{m\times n}$ 为规范化的决策矩阵，b_{ij} 表示第 i 个目标 S_i 对第 j 个属性 P_j 的规范化属性值，矩阵 B 的第 i 行表示第 i 个目标 S_i 对 n 个属性值的规范值，b_{ij} 愈大愈好。

假设对 n 个属性有 l 种具体的赋权方法对其赋值。设第 k 种赋权方法给出的权向量值为 $W_k = (w_{1k},w_{2k},\cdots,w_{nk})^T$，$k = 1,2,\cdots,l$。其中 $w_{ik} \geqslant 0$，$\sum_{j=1}^{n} w_{jk} = 1$，$k = 1,2,\cdots,l;j = 1,2,\cdots,n$。

综合各种赋权方法的特点，采用如下组合赋权 $W_c = (w_{c1},w_{c2},\cdots,w_{cn})^T$，令

$$W_c = \theta_1 W_1 + \theta_2 W_2 + \cdots + \theta_l W_l \tag{1}$$

称 $W_c = (w_{c1},w_{c2},\cdots,w_{cn})^T$ 为组合赋权系数向量，其中 $\theta_1,\theta_2,\cdots\theta_l$ 为组合权系数向量的线性表示系数。$\theta \geqslant 0,k = 1,2,\cdots,l$，且满足单位化约束条件：$\sum_{k=1}^{l} \theta_k^2 = 1$。

令分块矩阵 $W = (W_1,W_2,W_l)$，$\Theta = (\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_l)^T$ 则称 W 为 l 个权系数向量组成的矩阵。此时式(1)可表为矩阵形式：$W_c = W\Theta$。

根据简单线性加权法，由组合赋权系数向量 W_c 计算而得的第 i 个目标 S_i 的多属性综合评价值可表示为

$$D_i(W_c) = \sum_{j=1}^{n} b_{ij} w_{cj}, i = 1,2,\cdots,m \tag{2}$$

$D_i(W_c)$ 愈大表示第 i 个目标 S_i 威胁越大。如果各属性的权系数确定不当，各目标的多属性综合评价值 $D_i(W_c)$ $(i = 1,2,\cdots,m)$ 互相差别很小，不利于决策方案的排序。所以选择组合赋权系数向量 W_c 的一个基本思想是使各决策方案的多属性综合评价值 $D_i(W_c)$ 尽可能分散，越分散越有利于方案的决策与排序[4-5]。把各目标多属性综合评价值的离差平方和作为其分散程度的度量，定义第 i_l 个目标综合评价值 $D_{i_1}(W_c)$ 和第 i 个目标综合评价值 $D_{i_2}(W_c)$ 的离差为

$$v_{i_1}i_2(W_c) = D_{i_1}(W_c) - D_{i_2}(W_c) = \sum_{j=1}^{n} (b_{i_1j} - b_{i_2j}) w_{cj}, i_1,i_2 = 1,2,\cdots m \tag{3}$$

我们设 $v_i(W_c)$ 表示第 i 个目标与其它各个目标综合评价值的离差平方和，则得到 $v_i(W_c) = \sum_{i_1=1}^{m} v_{ii_1}^2(W_c) = \sum_{i_1=1}^{m} [\sum_{j=1}^{n} (b_{ij} - b_{i_1j}) w_{cj}]^2, i = 1,2,\cdots,m$。根据前述的选择组合赋权系数向量 W_c 的基本思想，应该使 m 个目标总的离差平方和达到最大。

$$\begin{aligned} J(W_c) &= \sum_{i=1}^{m} v_i(W_c) = \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} [\sum_{j=1}^{n} (b_{ij} - b_{i_1j}) w_{cj}]^2 = \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} [\sum_{j_1=1}^{n}\sum_{j_2=1}^{n} (b_{ij_1} - b_{i_1j_1}) w_{cj_1} (b_{ij_2} - b_{i_2j_2}) w_{cj_2}] \\ &= \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} [\sum_{j_1=1}^{n}\sum_{j_2=1}^{n} (b_{ij_1} - b_{i_1j_1})(b_{ij_2} - b_{i_2j_2}) w_{cj_2}] w_{cj_1} w_{cj_2} \end{aligned}$$

若令 $n \times n$ 阶矩阵 B_1 为

$$B_1 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} (b_{i1} - b_{i_11})(b_{i1} - b_{i_11}) & \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} (b_{i1} - b_{i_11})(b_{i2} - b_{i_12}) & \cdots & \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} (b_{i1} - b_{i_11})(b_{in} - b_{i_1n}) \\ \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} (b_{i2} - b_{i_21})(b_{i1} - b_{i_11}) & \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} (b_{i2} - b_{i_21})(b_{i2} - b_{i_12}) & \cdots & \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} (b_{i2} - b_{i_21})(b_{in} - b_{i_1n}) \\ & \cdots\cdots\cdots\cdots & & \\ \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} (b_{in} - b_{i_n1})(b_{i1} - b_{i_11}) & \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} (b_{in} - b_{i_n1})(b_{i2} - b_{i_12}) & \cdots & \sum_{i=1}^{m}\sum_{i_1=1}^{m} (b_{in} - b_{i_n1})(b_{in} - b_{i_1n}) \end{bmatrix}$$

显然 B_1 为 n 阶对称方阵, B_1 为非负定矩阵。目标函数 $J(W_c)$ 可表为

$$J(W_c)=W_c^T B_1 W_c \tag{4}$$

W_c 为 Θ 的函数,从而式(4)表明目标函数 $J(W_c)$ 也为 Θ 的函数, $J(W_c)$ 可记为 $F(\Theta)$ 。于是基于 m 个目标总的离差平方和的最优组合赋权方法即为如下最优化问题:

$$\max F(\Theta)=\Theta^T W^T B_1 W\Theta$$

$$\text{s. t.}\begin{cases}\Theta^T\Theta=1\\ \Theta\geqslant 0\end{cases}$$

求解矩阵 $W^T B_1 W$ 的最大特征根 $\lambda_{\max}$,所对应的单位化特征向量 Θ^* 即为上式的最优解。

把 Θ^* 代入式(2)即得最优组合赋权系数向量 $W_c^*=W\Theta^*$ 。把 W_c^* 归一化处理得到 W_c^{**},把它代入式(4)计算第 i 个目标 S_i 的多属性综合评价值 $D_i(W_c^{**})$,$i=1,2,\cdots,m$。根据各目标的多属性综合评价值 $D_i(W_c^{**})$ 的大小进行多目标威胁排序,作出科学的分析。

3　实例分析

我机为1架具有多目标攻击能力的歼击机;有4架三种机型的敌机,在我机攻击范围之内。我机速度为 $v=320$ m/s ,导弹最大射程为 $r_m=60$ km ,雷达最大跟踪距离 $r_r=120$ km。我机与敌机的空战态势见表1。

表1　空战态势表

目标	目标机型	q_B(°)	q_R(°)	r_i/km	v_i/(m·s^{-1})
1	F-16C	80	-45	50	300
2	F-16C	45	-45	70	325
3	F-5E	-60	80	60	320
4	F-15E	-45	15	60	330

$$A=\begin{bmatrix}0.848 & 0.347 & 0.5 & 0.096\\ 0.848 & 0.250 & 0.8 & 0.043\\ 0.414 & 0.389 & 0.3 & 0.098\\ 1.000 & 0.167 & 0.3 & 0.055\end{bmatrix},\text{由 } A \text{ 求得 } B_1,B_1=\begin{bmatrix}4.463 & -3.822 & 6.347 & -3.372\\ -3.822 & 4.832 & -0.532 & 4.717\\ 1.347 & -0.532 & 5.360 & -3.025\\ -3.372 & 4.717 & -3.025 & 6.289\end{bmatrix}。$$

采用主观赋权法由专家给出权系数向量 $w_1=(0.45,0.27,0.20,0.04)^T$,由客观赋权法[6]得出另一组权系数向量 $w_2=(0.301,0.269,0.236,0.118)^T$,两个权系数向量组成的分块矩阵 $W=(w_1,w_2)$ 。由 W 和 B_1 计算对称矩阵 $W^T B_1 W=\begin{bmatrix}0.6688 & 0.5079\\ 0.5079 & 0.5364\end{bmatrix}$,最大特征根对应的特征向量 $\Theta=(0.7514\quad 0.6598)^T$,算出 $W_c^*=W\Theta^*=(0.5637,0.3804,0.3060,0.1079)^T$,归一化处理后的 $W_c^{**}=(0.403,0.286,0.23,0.081)^T$,将 W_c^* 代入式(4)计算4个目标的综合威胁值为:$D_1(W_c^{**})=0.564,D_2(W_c^{**})=0.613,D_3(W_c^{**})=0.359,D_4(W_c^{**})=0.524$

将 w_1、w_2 分别代入式(3)计算4个目标的综合威胁值为

$D_1(w_1)=0.583,D_2(w_1)=0.613,D_3(w_1)=0.359,D_4(w_1)=0.559$;

$D_1(w_2)=0.457,D_2(w_2)=0.469,D_3(w_2)=0.304,D_4(w_2)=0.411$。

3种赋权法得出的目标的威胁排序结果为(由大到小):(2,1,4,3)。从综合威胁值上可看出,组合赋权法的威胁值对主观、客观两种赋权法的威胁值进行了折中。通过对文献[2]的实例计算得出,组合赋权法得的威胁值是对主观和客观两种赋权法的威胁值的折中,主观赋权法得出的排序为(6,2,1,5,7,8,3,4),客观赋权法的排序为(2,6,1,7,5,8,3,4),组合赋权法的排序为(6,2,1,7,5,8,3,4)。

可知,采用离差平方和组合赋权法得出的结果即体现了主观结果,又体现了客观结果,使多目标威胁排序结果更科学。

4　结束语

多目标攻击是今后空战的主要发展模式,通过态势评估,按敌机对我机的威胁程度进行多个敌机进行排序,对多目标攻击战术决策具有十分重要的意义。本文采用离差平方和准则的最优组合赋权方法求解目标

(下转第32页)