

一种适用于四代机的多目标威胁评估算法

杨荣^{1,2}, 李长军¹, 龚华军²

(1. 中国电子科技集团第二十八研究所, 南京 210007; 2. 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 针对传统的空战多目标威胁评估不适于第四代战斗机超视距多目标空战威胁评估的问题, 提出了一种新的适合第四代战斗机超视距多目标空战的威胁评估方法。该方法在传统多目标威胁评估的基础上, 考虑空战高度和第四代战斗机隐身性能, 分别运用模糊优选法和区间层次分析(IAHP)法解算主客观权重, 进而得到综合权重区间, 并运用改进的TOPSIS法进行多目标威胁评估研究。仿真结果表明该算法的有效性和合理性, 适合于第四代战斗机超视距多目标空战的威胁评估。

关键词: 威胁评估; 第四代战斗机; 模糊优选; IAHP; TOPSIS

中图分类号: V271.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)10-0005-05

A Multi-Target Threat Assessment Algorithm for the Fourth Generation Fighter

YANG Rong^{1,2}, LI Chang-jun¹, GONG Hua-jun²

(1. The 28th Institute of CETC, Nanjing 210007, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The traditional method is not adaptable for threat assessment of beyond-visual-range multi-target combat of the fourth generation fighter, thus we proposed a new threat assessment method. Based on the traditional multi-target threat assessment method, the new method took combat height and stealth performance of the fourth generation fighter into account, calculated out the objective weight and subjective weight of threat assessment index respectively by fuzzy optimal method and IAHP, and finally gained the comprehensive weight. The improved TOPSIS was used for the multi-target threat assessment. An application example is given and the results show that the method is reasonable, effective, and suitable for the threat assessment of beyond-visual-range multi-target combat of the fourth generation fighter.

Key words: threat assessment; the fourth generation fighter; fuzzy optimum; IAHP; TOPSIS

1 概述

航空技术的发展促使战斗机更新换代, 具有隐身性、超机动性、超音速巡航、超视距多目标攻击能力的第四代战斗机(简称四代机)将成为未来空战的主要力量。四代机空战的突出特点主要表现在超视距、多目标、发射后不管和精确制导能力等方面。针对超视距多目标空战的特点, 四代机要完成多目标攻击, 需要进行多目标攻击逻辑决策、杀伤区解算和对载机的指挥引导, 即根据空战态势, 从已跟踪的多个目标中选择

需要攻击且可以攻击的目标, 给每个选择的攻击目标分配一定的火力单元, 然后根据机载导弹性能(杀伤区性能)确定并指挥引导载机进入攻击位置攻击。空空多目标攻击过程如图1所示。

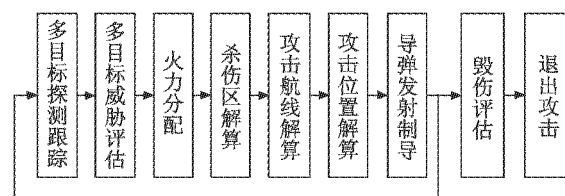


图1 空空多目标攻击过程

Fig. 1 Process of multi-target attacking in air combat

从图1可知, 多目标威胁评估是超视距多目标空战的前提和依据^[1-4], 相应的评估方法有: 线性加权法^[5]、层次分析法(AHP)^[6]和集对分析法^[7]等。文献

收稿日期: 2014-02-19

修回日期: 2014-04-15

基金项目: 航空科学基金(2013-ZA52002)

作者简介: 杨荣(1983—), 男, 安徽临泉人, 博士, 研究方向为航空武器系统总体与仿真。

[8-9]分别利用客观赋权法、主客观相结合的赋权法对TOPSIS法进行了改进,并应用到多目标威胁评估中,但是所得到的威胁指标权重为确定值。文献[10]在AHP的基础上,得到区间数形式的权重(IAHP法),但没有考虑目标的客观权重因素对威胁排序的影响。本文拟利用模糊优选法确定目标属性的客观权重,利用IAHP法确定目标属性的主观权重区间;结合主客观权重影响因子得出组合权重区间;最后将组合权重应用到TOPSIS法中进行多目标威胁排序的求解。

2 威胁评估指标的确定

现代超视距多目标空战中,目标威胁程度取决于战机本身的空战能力和目标机与我机的空间几何关系,即空战态势。战机的空战能力一般用机动能力、探测能力、航程能力、电子对抗能力、生存能力、飞行员操纵效能衡量。影响空战态势的因素很多,传统空战的空战态势主要考虑空战角度,空战距离以及空战速度。针对四代机具有的低可探测性和超机动性,本文考虑角度、速度、距离、高度、隐身等威胁因素和空战能力因素。

2.1 角度威胁因子

由于四代机机载导弹具有较大射程,超视距多目标攻击空战中的四代机适合采用迎头攻击战术。因此,目标进入角和目标前置角越大,其威胁越大。定义角度威胁因子^[1]为

$$T_a = \frac{(|q_B| + |q_R|)}{360} \quad (1)$$

式中: q_B 、 q_R 分别为目标进入角和目标前置角,如图2所示; T_a 为角度威胁值,取值范围为0~1,取值越大威胁越大。

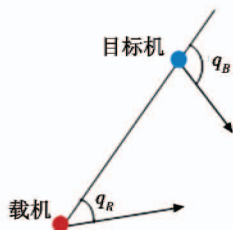


图2 目标角度示意图

Fig.2 Sketch of angle of target

2.2 速度威胁因子

四代机具有超音速巡航能力,目标机速度越大,初始动能越大,机载导弹的发射距离也越远,对载机的威胁也越大。定义速度威胁因子^[2]为

$$T_v = \begin{cases} 0.1, & v_t < 0.6v_r \\ -0.5 + v_t/v_r, & 0.6v_r \leq v_t \leq 1.5v_r \\ 1.0, & v_t > 1.5v_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_t 、 v_r 分别为目标机速度和我机速度; T_v 为速度威胁值,取值范围为0~1,取值越大威胁越大。

2.3 距离威胁因子

由于机载导弹的命中概率与导弹射程和目标机距离有关,不同距离的目标机威胁不同。当 $r_{dt} > r_{dr}$ 、 $r_{mt} > r_{mr}$ 时,定义距离威胁因子^[10]为

$$T_r = \begin{cases} 0, & r \geq r_{dt} \\ 0.4 - 0.4 \frac{r - r_{dr}}{r_{dt} - r_{dr}}, & r_{dr} \leq r < r_{dt} \\ 1 - 0.6 \frac{r - r_{mr}}{r_{dr} - r_{mr}}, & r_{mt} \leq r < r_{dr} \\ 0.5 + 0.5 \frac{r - r_{mr}}{r_{mt} - r_{mr}}, & r_{mr} \leq r < r_{mt} \\ 0.5 + 0.3 \frac{r_{mr} - r}{r_{mr}}, & r < r_{mr} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r 为敌我战机之间的相对距离; r_{dr} 为我机雷达最大探测距离; r_{mr} 为我机导弹最大攻击距离; r_{dt} 为目标机雷达最大探测距离; r_{mt} 为目标机导弹最大攻击距离。假设我机和目标机为同代飞机,即不存在代差,不会出现其中一方的最大攻击距离大于另一方雷达探测距离的情况, T_r 为距离威胁值,取值范围为0~1,取值越大威胁越大。当 $r_{dr} > r_{dt}$ 、 $r_{mt} > r_{mr}$ 、 $r_{dt} > r_{dr}$ 、 $r_{mr} > r_{mt}$ 、 $r_{dr} > r_{dt}$ 、 $r_{mr} > r_{mt}$ 时,距离威胁因子定义类似。

2.4 高度威胁因子

位于不同高度的载机发射导弹时,高度越高,发射导弹的能量越大。因此,目标机与我机的高度差越大,其对载机的威胁越大。定义高度威胁因子^[11]为

$$T_H = \begin{cases} e^{-\left(\frac{H-H_0}{\sigma_{H_0}}\right)^2}, & H \leq H_0 \\ 1, & H > H_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: H 为目标机与我机的高度差,目标在上为正; H_0 为门限高度差; T_H 为高度威胁值,取值范围为0~1,取值越大威胁越大。

2.5 隐身威胁因子

四代机具有较强的低可探测性(隐身性),具体表现在其具有较小的雷达反射面积,即RCS较小。目标机RCS越小,机载探测雷达发现目标的概率越小,则目标机对我机的威胁越大。定义隐身威胁因子^[4]为

$$T_y = \begin{cases} \exp\left(-\left[\frac{S_r - S_t - S_0}{\sigma_{A_0}}\right]^2\right), & S_r - S_t \leq S_0 \\ 1, & S_r - S_t > S_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: S_r 为我机的RCS; S_t 为目标机的RCS; S_0 为门限RCS; T_y 取值范围为0~1,取值越大威胁越大。

2.6 空战能力因子

空战能力受到战机机动能力、探测能力、航程能

力、电子对抗能力、生存能力、飞行员操纵效能等因素影响。空战能力威胁指数^[8]为： $C = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln A_2] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4$ 。其中： 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 为飞行员操纵效能系数； 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。定义空战能力威胁因子^[9]为

$$T_{C_i} = \frac{C_i}{\max C_i} \quad (6)$$

式中， T_{C_i} 取值范围为 0 ~ 1，取值越大威胁越大。

3 威胁评估指标权重的确定

3.1 运用 IAHP 法确定主客观权重

设 $a = [a^L, a^U]$, $0 < a^L \leq a^U$ ，则称 a 为一个区间数。关于区间数的运算定义如下^[11]：1) $a = b \Leftrightarrow a^L = b^L, a^U = b^U$ ；2) $a + b = [a^L + b^L, a^U + b^U]$ ；3) $\lambda a = [\lambda a^L, \lambda a^U]$, $\lambda > 0$ ；4) $1/a = [1/a^U, 1/a^L]$ 。

设 A 为区间数矩阵，即元素 a_{ij} 为区间数 $[a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 。记 $A^L = (a_{ij}^L)_{n \times n}$, $A^U = (a_{ij}^U)_{n \times n}$, $A = [A^L, A^U]$ 。满足 $Ax = \lambda x$ 的 λ 和 x 分别称为矩阵 A 的特征值和相应的特征向量，且有 $A^L x^L = \lambda^L x^L, A^U x^U = \lambda^U x^U$ 。记 A^L 的最大特征值和相应的特征向量分别为 λ^- 和 x^- 。记 A^U 的最大特征值和相应的特征向量分别为 λ^+ 和 x^+ ，则 $[\alpha x^-, \beta x^+]$ 是对应于特征值 $\lambda = [\lambda^-, \lambda^+]$ 的全体特征向量。设矩阵 A 的区间数权重向量为 $\omega_{\pm} = (\omega_1, \dots, \omega_n)$ ，则 $\omega_{\pm} = [\alpha x^L, \beta x^U]$ 满足 $a_{ij} = \omega_i / \omega_j$ 的充要条件为^[12]：

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^U}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^L}} \quad \text{特别地，可取}$$

$$\begin{cases} \alpha = \left[\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^U} \right]^{1/2} \\ \beta = \left[\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^L} \right]^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

因此可利用下述步骤计算区间数主观权重^[12]：

- 1) 分别求区间数矩阵 $A = [A^L, A^U]$ 中 A^L 和 A^U 的最大特征值对应的归一化特征向量 x^L, x^U ；
- 2) 根据上述结果计算主观权重向量 $\omega_{\pm} = [\alpha x^L, \beta x^U]$ 。

3.2 运用模糊优选法确定客观权重

假设超视距多目标空战中的目标机为 $x_j (j = 1, 2, \dots, n)$ ，目标机的威胁度由角度、速度、距离、高度、隐身性、空战能力决定。根据第 1 节中设定的影响因子构造威胁评估矩阵为

$$F = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ T_{a_1} & T_{a_2} & \cdots & T_{a_n} \\ T_{v_1} & T_{v_2} & \cdots & T_{v_n} \\ T_{r_1} & T_{r_2} & \cdots & T_{r_n} \\ T_{h_1} & T_{h_2} & \cdots & T_{h_n} \\ T_{y_1} & T_{y_2} & \cdots & T_{y_n} \\ T_{C_1} & T_{C_2} & \cdots & T_{C_n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 f_{ij} 表示目标机 i 关于属性 j 的威胁度值。由于各属性存在量纲上的差异，为消除属性物理量纲的影响，用式(9)对其进行规范化处理，得到相对威胁度评估矩阵 μ 。

$$\mu_{ij} = \frac{f_{ij}}{f_{i\max} + f_{i\min}}, f_{i\max} = \max_{1 \leq j \leq n} \{f_{ij}\}, f_{i\min} = \min_{1 \leq j \leq n} \{f_{ij}\} \quad (9)$$

设影响威胁程度的客观权重指标为 $\omega_{\ast} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_6)$ ，其中 ω_i 表示第 i 个属性的客观权重。于是目标机 x_j 的相对威胁度为

$$\rho_j(\omega_{\ast}) = \sum_{i=1}^6 \omega_i \mu_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

对于主观权重 $\omega_{\ast}, \rho_j(\omega_{\ast})$ 越大，则目标机 x_j 威胁程度越大。因此，可建立多目标决策模型为

$$\begin{aligned} \max \{ & h(\omega_{\ast}) = \rho_1(\omega_{\ast}), \rho_2(\omega_{\ast}), \dots, \rho_n(\omega_{\ast}) \} \quad (11) \\ \text{s. t. } & \omega_j \geq 0, \sum_{j=1}^6 \omega_j = 1 \end{aligned}$$

由于在目标威胁评估中，各目标机具有相同的地位（各目标机均为战斗机、战略价值相同，不考虑目标机群为战斗机和预警机的组合，因为预警机的战略价值比战斗机高得多），即 $\rho_j(\omega_{\ast})$ 所占权重为 $1/n$ ，则可将上述多目标决策模型划为非线性规划问题，即

$$\begin{aligned} \max \{ & h(\omega_{\ast}) = \sum_{j=1}^n \rho_j(\omega_{\ast}) / n \} \quad (12) \\ \text{s. t. } & \omega_j \geq 0, \sum_{j=1}^6 \omega_j = 1 \end{aligned}$$

构造拉格朗日函数求解得

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}}{\left(\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^n \mu_{ij} \right)}, i = 1, 2, \dots, 6 \quad (13)$$

3.3 主客观权重相结合

将运用 IAHP 求得的威胁评估指标主观权重区间和运用模糊优选法求得的客观权重进行综合计算，得到多目标威胁评估的组合权重区间，即

$$\omega = \eta \omega_{\pm} + (1 - \eta) \omega_{\ast} \quad (14)$$

式中， η 为主观权重影响因子，可根据对专家的信任程度确定：如对专家完全信任，则取 1，即专家系统；如对专家完全不信任，则取 0，即客观系统。这个组合权重区间能够比较全面地反映威胁评估的相对重要

程度。

4 运用 TOPSIS 法求解目标威胁度

得到多目标威胁评估组合权重区间 ω 后,利用基于区间数的改进 TOPSIS 法求解空战多目标威胁的步骤^[13]如下所述。

1) 构造目标机相对威胁度评估矩阵 μ , 并计算加权威胁评估矩阵 $Y: y_{ij} = \omega \mu_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, 6$ 。

2) 计算区间型正负理想解 $y^+ = (y_1^+, \dots, y_6^+)$ 和 $y^- = (y_1^-, \dots, y_6^-)$ 。正理想解为威胁值最大的解, 负理想解为威胁值最小的解, 即: $y_j^+ = [\max_i y_{ij}^L, \max_i y_{ij}^U], j = 1, \dots, 6; y_j^- = [\min_i y_{ij}^L, \min_i y_{ij}^U], j = 1, \dots, 6$ 。

3) 计算每个目标机 x_i 到正负理想解的距离 d_i^+ 和 d_i^- , 其中: $d_i^+ = \sum_{j=1}^6 [|y_{ij}^L - y_j^{+L}| + |y_{ij}^U - y_j^{+U}|], i = 1, \dots, n; d_i^- = \sum_{j=1}^6 [|y_{ij}^L - y_j^{-L}| + |y_{ij}^U - y_j^{-U}|], i = 1, \dots, n$ 。

4) 计算每个目标机 x_i 的威胁程度 s_i 并排序, 其中

$$s_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (15)$$

5 仿真分析

假设我机为一架具有多目标攻击能力的歼击机, 飞行速度为 544 m/s, 飞行高度为 7 km, 机载导弹最大射程为 60 km, 机载雷达最大探测距离为 150 km, RCS 为 1 m²。在超视距多目标空战中遭遇 8 架目标机(此处并不是指单机攻击全部 8 架目标机, 而是对 8 架目标机进行威胁排序, 根据排序结果和载机机载导弹数目选择一定数量的飞机进行攻击), 各目标机性能如表 1 所示。

表 1 目标机性能

Table 1 Performance of the target airplanes

序号	导弹射程/km	最大探测距离/km	空战能力指数	RCS
1	55	130	17.9	0.5
2	55	130	17.9	0.5
3	70	200	19.8	1.2
4	70	200	19.8	1.2
5	50	100	13.5	0.4
6	50	100	13.5	0.4
7	50	120	16.8	0.4
8	50	120	16.8	0.4

目标机群相对于我机的空战态势如图 3 所示, 其中, 虚线表示载机与目标机的连线, 实线表示各战机的速度方向及大小。

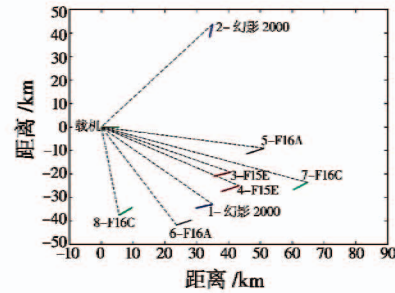


图 3 空战态势示意图

Fig. 3 Air combat situation

根据式(1)~式(6)、式(8)、式(9)可得, 目标机相对我机的威胁评估矩阵为

$$\mu = \begin{bmatrix} 0.524 & 0.403 & 0.345 & 0.424 & 0.218 & 0.782 & 0.377 & 0.709 \\ 0.475 & 0.500 & 0.501 & 0.579 & 0.586 & 0.414 & 0.466 & 0.448 \\ 0.692 & 0.579 & 0.757 & 0.724 & 0.579 & 0.668 & 0.243 & 0.721 \\ 0.400 & 0.568 & 0.566 & 0.504 & 0.675 & 0.645 & 0.325 & 0.436 \\ 0.700 & 0.700 & 0.261 & 0.261 & 0.739 & 0.739 & 0.739 & 0.739 \\ 0.538 & 0.538 & 0.595 & 0.595 & 0.406 & 0.406 & 0.504 & 0.504 \end{bmatrix} \circ$$

根据威胁评估矩阵和式(13)可得: $\omega_{\text{空}} = (0.1466, 0.1539, 0.1924, 0.1597, 0.1891, 0.1584)$ 。设威胁指标的区间数判断矩阵如表 2 所示, 表中的数据表示各属性的相对重要程度。例如角度/速度为 $[1/2, 1]$, 表示角度相对速度的重要程度范围为 $[1/2, 1]$, 则可得速度/角度为 $[1, 2]$, 显然, 角度/角度为 $[1, 1]$ 。

表 2 区间数矩阵

Table 2 Matrix of interval number

威胁度	角度	速度	距离	高度	隐身	空战能力
角度	[1,1]	[1/2,1]	[1/3,1]	[1,2]	[1/5,1/2]	[1/5,1/3]
速度	[1,2]	[1,1]	[1/2,1]	[1,2]	[1/4,1/2]	[1/4,1/3]
距离	[1,3]	[1,2]	[1,1]	[1,3]	[1/2,2/3]	[1/3,1/2]
高度	[1/2,1]	[1/2,1]	[1/3,1]	[1,1]	[1/6,1/3]	[1/6,1/4]
隐身	[2,5]	[2,4]	[3/2,2]	[3,6]	[1,1]	[4/5,1]
空战能力	[3,5]	[3,4]	[2,3]	[4,6]	[1,5/4]	[1,1]

根据表 2 中的数据, 按照区间数特征向量法计算可得, $\omega_{\text{空}} = [\alpha x^L, \beta x^U] = ([0.1416, 0.2167], [0.1820, 0.2440], [0.2470, 0.3523], [0.1183, 0.1738], [0.5116, 0.6501], [0.6595, 0.7149])$ 。

根据式(14)可得, 多目标威胁评估的组合权重为: $\omega = ([0.1466 - 0.005\eta, 0.1466 + 0.0701\eta], [0.1924 + 0.0546\eta, 0.1924 + 0.1599\eta], [0.1924 + 0.0546\eta, 0.1924 + 0.1599\eta], [0.1597 - 0.0414\eta, 0.1597 + 0.0141\eta], [0.1891 + 0.3225\eta, 0.1891 + 0.4611\eta], [0.1584 + 0.5011\eta, 0.1584 + 0.5565\eta])$ 。

在区间 $[0, 1]$ 之间改变主观权重因子 η , 利用基于区间的改进 TOPSIS 法求解多目标威胁程度如图 4 所示。

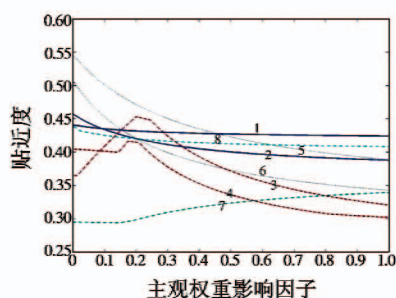


图 4 威胁度仿真图

Fig. 4 Simulation result of threat degree

由图 4 可知,随着主观权重因子的变化,威胁度值变化较大,相应的威胁排序结果变化也较大,这是主观权重和客观权重不一致的结果。当主观权重影响因子为 0.5 时,8 个威胁目标的排序结果为 1、5、8、2、6、3、4、7。其中:目标 5 虽然空战能力相对较弱,但由于其高度上的突出优势,使得其威胁度相对较大;目标 8 的威胁度高是因为其相对我机的距离较近;目标 3 和 4 虽然空战能力很强,但由于其过大的 RCS,其威胁度并不高;目标 7 的威胁度低是因为其相对我机的距离较远。注意到,当主观权重影响因子为 0.4~0.8 时,目标的威胁排序结果基本一致。所以,在威胁评估排序时,考虑到对机载传感器数据信息的完整性、可信度和对专家的信任度,常取主观权重影响因子为 0.5。

6 结束语

传统的空战多目标威胁评估没有考虑空战高度和载机隐身性能对威胁的影响。采用的评估计算方法也忽略了不同属性权重的不确定性,导致威胁排序计算结果具有较大的主观性。为了适应四代机超视距多目标攻击的威胁排序,本文考虑四代机的优异性能,综合运用模糊优选法和 IAHP 法确定目标属性权重区间,并应用 TOPSIS 法对目标威胁进行计算,计算结果准确、客观,适合四代机超视距多目标攻击威胁排序。通过仿真分析可以看出,该方法有效、可行,具有较好的应用前景。

参考文献

[1] 耿涛,张安,郝兴国. 基于组合赋权 TOPSIS 法的空战多目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(3): 16-19.
GENG T, ZHANG A, HAO X G. Multi-target threat assessment in air combat based on combination determining weights TOPSIS[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(3): 16-19.

[2] 谷向东,童中翔,柴世杰,等. 基于 IAHP 和离差最大化 TOPSIS 法目标威胁评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(2): 27-31.

GU X D, TONG Z X, CHAI S J, et al. Target threat assessment based on TOPSIS combined by IAHP and the maximal deviation[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(2): 27-31.

[3] 肖冰松,方洋旺,胡诗国,等. 一种新的超视距空战威胁评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2163-2166.
XIAO B S, FANG Y W, HU S G, et al. New threat assessment method in beyond-the-horizon range air combat[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(9): 2163-2166.

[4] 张涛,周中良,苟新禹,等. 基于信息熵和 TOPSIS 法的目标威胁评估及排序[J]. 电光与控制, 2012, 19(11): 35-38.
ZHANG T, ZHOU Z L, GOU X Y, et al. Threat assessment and sorting of aerial targets based on information entropy and TOPSIS method[J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(11): 35-38.

[5] 张善,李银萍. 一种防空系统目标威胁评估方法[J]. 现代雷达, 2010, 32(9): 6-9.
ZHANG S, LI Y P. Method of target threat evaluation for air defense system[J]. Modern Radar, 2010, 32(9): 6-9.

[6] YIN G Y, ZHOU S L, ZHANG W G. A threat assessment algorithm based on AHP and principal components analysis[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 4590-4596.

[7] 谭乐祖,杨明军. 采用区间数的集对分析目标威胁判断模型[J]. 电光与控制, 2011, 18(2): 73-76.
TAN L Z, YANG M J. A SPA based target threat evaluation model using interval numbers[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18(2): 73-76.

[8] 张堃,周德云. 基于熵的 TOPSIS 法空战多目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9): 1493-1495.
ZHANG K, ZHOU D Y. TOPSIS method based on entropy in evaluating the air multi-target threat[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(9): 1493-1495.

[9] 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.
ZHANG K, ZHOU D Y. Application of TOPSIS based on entropy and GD-AHP in evaluating sequence of air target threat[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(7): 1661-1664.

[10] 郭辉,徐浩军,刘凌. 基于区间数 TOPSIS 法的空战目标威胁评估[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(12): 2914-2917.
GUO H, XU H J, LIU L. Threat assessment for air combat target based on interval TOPSIS[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(12): 2914-2917.

6 结 论

本文设计了纵向平面变结构导引律,首先,为了削弱 VSG 的抖振问题,引入高增益连续函数;其次,分析了导引律参数 ε 和 δ 对制导性能的影响;然后,通过仿真对 ε 和 δ 进行寻优,得到目标不同机动情况下的理想导引律参数 ε 和 δ ,以此为依据制定了模糊规则,设计出 FVSG。仿真结果表明,基于模糊控制理论的变结构导引律有效地削弱了抖振,减小了脱靶量,提高了制导系统的鲁棒性和制导精度。

参 考 文 献

- [1] 顾文锦,赵红超,杨智勇. 变结构控制在导弹制导中的应用综述[J]. 飞行力学,2005,23(1):1-4.
GU W J, ZHAO H C, YANG Z Y. Application of variable structure control in missiles guidance[J]. Flight Dynamics, 2005, 23(1):1-4.
- [2] BRIERLEY S D, LONGCHAMP R. Application of sliding mode control to air-air interception problem [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(2):306-325.
- [3] 周荻. 寻的导弹新型导引规律[M]. 北京:国防工业出版社,2002:8-29.
ZHOU D. New guidance laws for homing missiles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002:8-29.
- [4] 周池军,雷虎民,叶继坤. 一种拦截机动目标的最优中制导律设计[J]. 弹道学报,2012,24(3):49-53.
ZHOU C J, LEI H M, YE J K. Design of an optimal mid-course guidance law for intercepting maneuvering target [J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(3):49-53.
- [5] 任义元,袁建平,方群. 空空导弹变结构末制导律研究[J]. 计算机仿真,2009,29(10):25-29.
REN Y Y, YUAN J P, FANG Q. A study of terminal variable structure guidance law of air-to-air missile[J]. Computer Simulation, 2009, 29(10):25-29.
- [6] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005:44-45.
LIU J K. Matlab simulation for sliding mode control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005:44-45.
- [7] 齐小斌,刁海南,张金鹏,等. 一种适用于拦截高速目标的末段导引律[J]. 指挥控制与仿真,2012,34(2):101-104.
QI X B, DIAO H N, ZHANG J P, et al. A terminal guidance law for intercepting hypersonic target [J]. Command Control & Simulation, 2012, 34(2):101-104.
- [8] 闫斌斌,黄新文,闫杰. 针对目标机动的变结构制导参数设计[J]. 西北工业大学学报,2009,27(4):499-502.
YAN B B, HUANG X W, YAN J. Improving variable structure guidance law to make it effective against highly maneuvering target [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2009, 27(4):499-502.
- [9] 贝茨 C J. 攻击机动目标的最优制导规律[M]. 北京:宇航出版社,1989.
BATES C J. The optimal guidance law against maneuvering targets [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1989.
- [10] 刘永善,刘藻珍,李兰村. 攻击机动目标的被动寻的模糊变结构制导律研究[J]. 系统工程与电子技术,2007,29(2):254-258.
LIU Y S, LIU Z Z, LI L C. Research on fuzzy variable structure guidance law for passive homing missiles against maneuvering targets [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(2):254-258.
- [11] 谷向东,童中翔,郭辉,等. IAHP 和熵权相结合的 TOPSIS 法的空战目标威胁评估[J]. 火力与指挥控制,2012,37(1):69-72.
GU X D, TONG Z X, GUO H, et al. Target threat assessment for air combat based on TOPSIS combining by IAHP and entropy weight [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(1):69-72.
- [12] 徐玖平,吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
XU J P, WU W. Multiple attribute decision making theory and methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [13] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
XU Z S. Uncertain multiple attribute decision making: Methods and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.

(上接第 9 页)

欢 迎 投 稿 欢 迎 刊 登 广 告