

# 基于战术攻击区的超视距空战态势评估方法

徐 安, 陈 星, 李战武, 胡晓东  
(空军工程大学航空工程学院, 西安 710038)

**摘 要:**针对传统的基于导弹攻击区的超视距空战态势评估方法不能完全反映导弹的作战能力,无法完全体现超视距空战的真实态势特征等问题,提出了结合空空导弹战术攻击区的超视距空战态势评估方法。该方法基于空空导弹的战术攻击区讨论了空战评估模型中的角度、相对距离、高度优势函数的不足,并对优势函数进行了相应的改进,从而改进了超视距空战态势评估模型,并通过与传统方法的仿真比较分析,验证了新方法的有效性。

**关键词:**超视距空战, 态势评估, 空空导弹, 战术攻击区

**中图分类号:** TJ013; TP762.2

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1002-0640.2020.09.018

**引用格式:** 徐安, 陈星, 李战武, 等. 基于战术攻击区的超视距空战态势评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(9): 97-102.

## A Method of Situation Assessment for Beyond-visual-range Air Combat Based on Tactical Attack Area

XU An, CHEN Xing, LI Zhan-wu, HU Xiao-dong

(School of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the traditional BVR method based on missile attack zone cannot fully reflect the combat capability of missile and the real situation characteristics of BVR, the BVR situation assessment method combined with air-to-air missile tactical attack area is proposed. Based on the tactical attack area of air-to-air missile, this paper discusses the shortcomings of the dominant function of Angle, relative distance and height in the evaluation model of air-to-air combat, and improves the dominant function correspondingly, so as to improve the situation evaluation model of BVR air-to-air combat. By comparing with the traditional methods of simulation analysis, validate the new method is effective.

**Key words:** beyond-visual-range, situation assessment, air-to-air missile, tactical attack area

**Citation format:** XU A, CHEN X, LI Z W, et al. A method of situation assessment for beyond-visual-range air combat based on tactical attack area [J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(9): 97-102.

### 0 引言

态势评估是对空战博弈中的要素进行感知和评价,并预测下一阶段空战的发展趋势,是超视距空战战术决策的首要环节。近年来,众多学者也对该问题进行了相关研究并提出了许多值得借鉴的理论和方法。滕鹏等<sup>[1]</sup>在前人的研究基础上,分析研究了以超视距空战条件为背景的态势评估方法,

分别从载机的超视距作战能力、战术战法、飞行高度、作战时间等4个方面设定了威胁函数,从而得到整体空战态势。肖冰松等<sup>[2]</sup>针对超视距空战态势评估的非参量法模型研究不足,充分考虑双方战机火控系统和武器系统性能参数,提出了一种基于几何态势、空战效能和战术事件的综合态势评估方法。吴文海团队<sup>[3-4]</sup>在前人研究的基础上,描述了空战态势评估基本问题,分析了传统超视距态势函数

收稿日期:2019-05-08

修回日期:2019-08-26

作者简介:徐 安(1982-),男,甘肃庆阳人,讲师。研究方向:兵器科学与技术。

中缺乏定量分析方法的问题(如角度对态势影响的耦合关系、速度对态势影响的非线性等),构造了基于空空导弹攻击区的态势函数,提出了一种新的超视距空战态势评估方法。张媛等<sup>[5]</sup>考虑了超视距对抗中空战信息的客观模糊性与作战指挥员的主观决策性,以超视距空战中计算机生成兵力(Computer Generated Forces, CGF)态势评估行为产生机制的分析为基础,以模糊多属性决策方法为工具,提出了一种基于主客观综合赋权的 CGF 态势评估建模方法。顾佼佼等<sup>[6]</sup>利用集对分析理论(Set Pair Analysis, SPA)解决超视距空战中信息不精准、不完备的问题,并在现有方法中融入了战机机动对态势的影响,最终验证了新方法在一定程度上提高了态势评估的真实性。

但是大多数对超视距空战态势评估的研究主要以定性分析为主,仅考虑了研究者对超视距空战的主观判断。虽然已有学者从定量分析的角度出发<sup>[7-8]</sup>,利用传统空空导弹攻击区构造态势优势函数。但是传统空空导弹攻击区主要依据导弹的设计参数计算得出,仅能反映诸多假设条件下空空导弹所能达到的最远边界。而实际空战环境十分复杂,加之对抗过程本身所具有的动态性,因而这种理想条件下的攻击区不能完全反映空空导弹的作战能力,依据其发射的空空导弹往往命中概率很低,因此,无法完全体现超视距空战的真实态势特征。针对上述问题,本文提出了一种改进的超视距空战态势评估方法。

## 1 基于空空导弹战术攻击区的态势评估模型

本节针对传统模型不足构建了更符合真实战场环境的态势模型。此外,以空空导弹为主战武器的现代空战,只有当敌机进入我方导弹攻击区内才能构成有效态势优势。如图 1 所示,虽然两个图中的 B 机均指向 A 机,但 A 机并未处于 B 机的攻击区范围内,而 B 机已处于 A 机的攻击区范围内,即

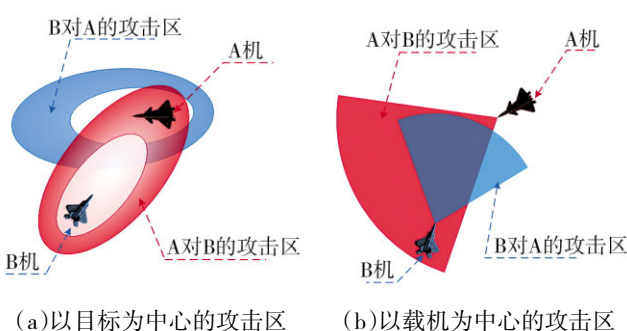


图 1 不同类型攻击区判别空战态势关系

A 机具备了攻击 B 机的初始条件,所以 A 机态势优于 B 机。如果单从角度优势考虑,B 机的优势应大于 A 机,而通过上述基于攻击区综合分析的结果却恰恰相反,因此,只有在研究战术攻击区基础上建立态势函数模型,才能真实反映战场真实情况。

## 2 战术攻击区模型

本文以空空导弹战术攻击区作为定量分析的依据,从而对超视距空战影响因素进行分析,构建新的态势函数模型,其中部分数据源自文献[3]。超视距空战主要威胁因素如表 1 所示。

表 1 超视距空战主要威胁因素

	高度	方位角	进入角
符号	$H/\text{km}$	$\phi/\text{rad}$	$q/\text{rad}$
	速度	相对距离变化率	导弹离轴发射角
符号	$V/\text{Ma}$	$\dot{D}/\text{Ma}$	$\varphi_M/\text{rad}$

迎头态势 战术攻击区远界与近界满足条件:  
 $|\varphi_M| \leq \pi/4$ 、 $-1 < \dot{D} < 3$ 、 $H \leq 15 \text{ km}$ 、 $q \in [\pi/2, 2\pi]$  和  $V \leq 1.8$ 。则由式(1)和式(2)计算可得攻击区远界与近界。

$$D_{\max} = a_1 + a_2\Delta H + a_3V + a_4\phi + a_5\dot{D} + a_6\Delta HV + a_7\Delta H\dot{D} + a_8\Delta H^2 + a_9\Delta H^3 + a_{10}\Delta H^2\dot{D} \quad (1)$$

$$D_{\min} = a_1 + a_2\Delta H + a_3\dot{D} + a_4\Delta H\dot{D} + a_5\varphi_M\dot{D} + a_6\phi^2 + a_7\Delta H\phi^2 + a_8\phi^2\dot{D} \quad (2)$$

尾追态势 战术攻击区远界与近界满足条件:  
 $V \leq 2.2$ 、 $|\varphi_M| \leq \pi/4$ 、 $q \in [-\pi/2, \pi/2]$ 、 $H \leq 15 \text{ km}$  和  $-1 < \dot{D} < 1$ 。

$$D_{\max} = a_1 + a_2\Delta H + a_3V + a_4\phi + a_5\dot{D} + a_6\Delta HV + a_7\Delta H^2 + a_8\Delta H^3 \quad (3)$$

$$D_{\min} = a_1 + a_2\Delta H + a_3\phi + a_4\dot{D} + a_5\Delta H\dot{D} + a_6V\dot{D} + a_7\phi^2 + a_8\Delta H\phi^2 + a_9\phi^2\dot{D} \quad (4)$$

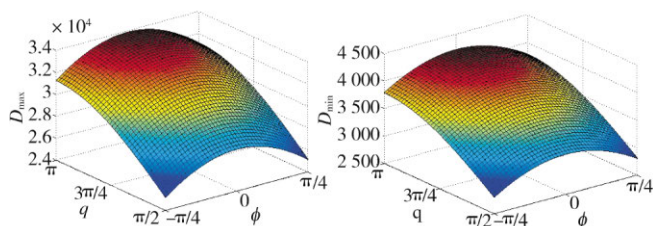
## 3 态势函数构建

### 3.1 角度态势函数构建

由于载机装备的导弹满足迎头(全向)攻击条件(即  $|\varphi_M| \leq \pi/4$ ),因此,当  $|\phi| > \pi/4$  时,敌机位于战术攻击区外,从而可以认为  $D_{\max} = D_{\min} = 0 \text{ km}$ 。所以仅需对  $|\phi| \leq \pi/4$  情况下的方位角对攻击区的影响进

行仿真分析。本节对方位角和进入角对战术攻击区范围影响进行了如下分析。

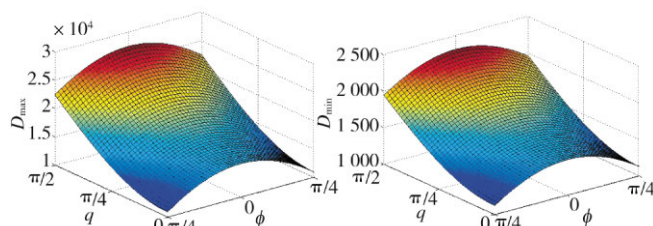
**迎头态势:** 假设该时刻载机速度  $V_p$  为  $Ma=1.2$ , 目标机速度  $V_T$  为  $Ma=0.8$ , 进入角和方位角的取值范围分别为  $\phi \in [-\pi/4, +\pi/4]$  和  $q \in [\pi/2, \pi]$ , 双方相对高度差为  $\Delta H=0$  km, 重力加速度值取  $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>。其仿真结果如图 2 所示。



(a) 角度对攻击区远界的影响 (b) 角度对攻击区近界的影响

图 2 迎头态势下角度对远(近)界的影响

**尾追态势:** 假设该时刻载机速度  $V_p$  为  $Ma=1.2$ , 目标机速度  $V_T$  为  $Ma=0.8$ , 进入角和方位角的取值范围分别为  $\phi \in [-\pi/4, +\pi/4]$  和  $q \in [0, \pi/2]$ , 双方相对高度差为  $\Delta H=0$  km, 重力加速度值取  $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>。其仿真结果如图 3 所示。



(a) 角度对攻击区远界的影响 (b) 角度对攻击区近界的影响

图 3 尾追态势下角度对远(近)界的影响

本文分别建立了方位角和进入角的态势函数, 并取它们的乘积作为总的角度态势函数。

### 3.1.1 方位角态势函数

本文建立的方位角态势函数如式(5)所示。

$$S_\phi = \begin{cases} 0.1 - \frac{|\phi| - \varphi_{R\max}}{10(\pi - \varphi_{R\max})}, & \varphi_{R\max} < |\phi| \leq \pi \\ 0.3 - \frac{|\phi| - \varphi_{M\max}}{10(\varphi_{R\max} - \varphi_{M\max})}, & \varphi_{M\max} < |\phi| \leq \varphi_{R\max} \\ 0.8 - \frac{|\phi| - \varphi_{K\max}}{2(\varphi_{M\max} - \varphi_{K\max})}, & \varphi_{K\max} < |\phi| \leq \varphi_{M\max} \\ 1 - \frac{|\phi|}{5\varphi_{K\max}}, & |\phi| \leq \varphi_{K\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\varphi_{R\max}$  表示雷达最大搜索方位角,  $\varphi_{M\max}$  表示导弹最大离轴发射角,  $\varphi_{K\max}$  表示最大不可逃逸圆锥角。

### 3.1.2 进入角态势函数

结合文献[2], 本文建立的方位角态势函数为:

$$S_q = \begin{cases} e^{-|\pi - \phi - q|}, & \phi > 0 \\ (\text{如果 } q < -\phi, q \text{ 取 } q+2\pi) \\ e^{-|\pi + \phi + q|}, & \phi \leq 0 \\ (\text{如果 } q > -\phi, q \text{ 取 } q-2\pi) \end{cases} \quad (6)$$

### 3.1.3 角度态势函数

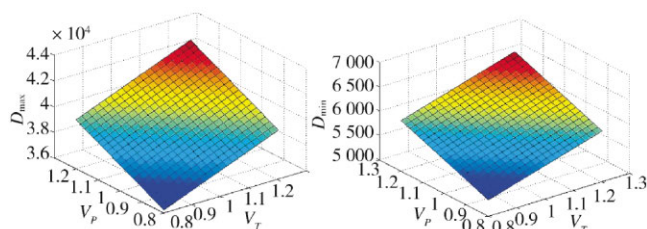
本文建立的角度态势函数为:

$$S_A = S_\phi^{\gamma_1} S_q^{\gamma_2} \quad (7)$$

式中,  $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$  且  $(0 \leq \gamma_{1,2} \leq 1)$ 。可通过非梯度随机搜索法<sup>[9]</sup>确定其取值大小。

## 3.2 相对距离变化率态势构建

**迎头态势:** 假设该时刻双方相对高度差为  $\Delta H=0$  km, 相对距离变化率为  $\dot{D} = V_p \cos \phi - V_T \cos q$ , 方位角和进入角分别为  $\phi = 0$  和  $q = \pi$ , 载机和目标机的速度取值范围为  $V_p, V_T \in [0.8, 1.2]$ , 重力加速度值取  $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>。结果如图 4 所示。

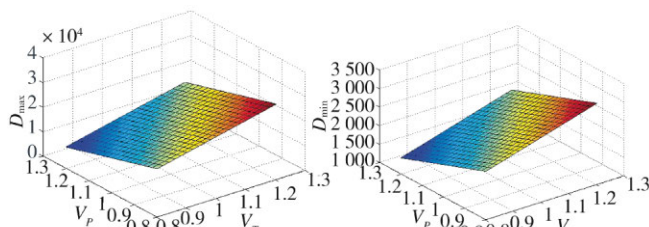


(a) 距离变化率对攻击区远界的影响

(b) 距离变化率对攻击区近界的影响

图 4 迎头态势下相对距离变化率对远(近)界的影响

**尾追态势:** 假设该时刻双方相对高度差为  $\Delta H=0$  km, 相对距离变化率为  $\dot{D} = V_p \cos \phi - V_T \cos q$ , 方位角和进入角分别为  $\phi = q = 0$ , 载机和目标机的速度取值范围为  $V_p, V_T \in [0.8, 1.2]$ , 重力加速度值取  $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>。其仿真结果如图 5 所示。



(a) 距离变化率对攻击区远界的影响

(b) 距离变化率对攻击区近界的影响

图 5 尾追态势下相对距离变化率对远(近)界的影响

从图 4 和图 5 可以看出,  $\dot{D}$  不仅与双方速度大小有关, 还与进入角和方位角大小方向有关, 两种态



势下远(近)界均随着 $\dot{D}$ 的增加而增加。因此,可知目标机速度一定时,载机与目标的相对接近速度越快越有利于载机发动攻击,且不利于目标机逃匿。近年来,随着我国军工科技的发展,自产空空导弹的性能并不输于欧美列强,因此,载机的速度优势将会严重影响整个超视距空战态势走势<sup>[10]</sup>。

因此,综合考虑到载机和目标机在相对方向上的速度变化快慢,建立了相对距离变化率态势函数,如式(8)所示。

$$S_{\dot{D}} = \begin{cases} e^{-\frac{\dot{D}}{\dot{D}_{p\max}}+1.5}, & \frac{\dot{D}}{\dot{D}_{p\max}} > 1.5 \\ 1, & 1 < \frac{\dot{D}}{\dot{D}_{p\max}} \leq 1.5 \\ -\frac{1}{2} + \frac{\dot{D}}{\dot{D}_{p\max}}, & 0.6 < \frac{\dot{D}}{\dot{D}_{p\max}} \leq 1 \\ 0.1, & \frac{\dot{D}}{\dot{D}_{p\max}} \leq 0.6 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\dot{D}_{p\max} = V_{p\max} \cos \phi - V_T \cos q$  是综合因素下载机的空战最佳相对距离变化率。

### 3.3 高差态势函数建立

迎头态势:假设该时刻目标机速度  $V_T$  为  $Ma=0.8$ , 载机速度  $V_p$  为  $Ma=1.2$ , 方位角和进入角分别为  $\phi=0$  和  $q=\pi$ , 载机和目标机的高度取值范围为  $H_p, H_T \in [5, 15]$ , 重力加速度值取  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。其仿真结果如图 6 所示。

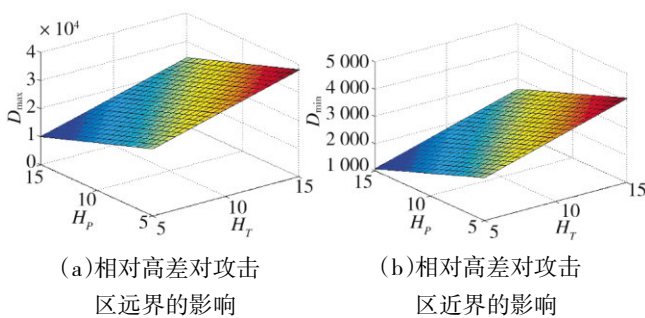


图 6 迎头态势下相对高度差对远(近)界的影响

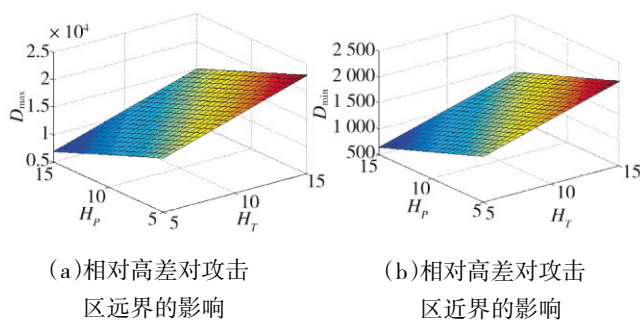


图 7 尾追态势下高度差对远(近)界的影响

尾追态势:假设该时刻目标机速度  $V_T$  为  $Ma=0.8$ , 载机速度  $V_p$  为  $Ma=1.2$ , 方位角和进入角分别为  $\phi=q=0$ , 载机和目标机的高度取值范围为  $H_p, H_T \in [5, 15]$ , 重力加速度值取  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。其仿真结果如图 7 所示。

本文建立的高度差态势函数如式(9)所示。

$$S_{\Delta H} = \begin{cases} e^{-\frac{\Delta H}{H_{p\max}}}, & \frac{H_p}{H_{p\max}} > 1 \\ e^{-\frac{\Delta H}{H_T}}, & \frac{H_T}{H_{p\max}} < \frac{H_p}{H_{p\max}} \leq 1 \\ \frac{1}{2} - \frac{\Delta H}{H_T}, & \frac{H_p}{H_T} \leq 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $H_{p\max}$  是综合因素下载机的最佳空战高度,  $\Delta H = H_p - H_T$  是两机相对高度差。

### 3.4 能量态势函数建立

在超视距空战中,战机的能量态势由动能和势能两部分构成,一般用式(10)表示<sup>[11-12]</sup>。

$$E = H + \frac{V^2}{2g} \quad (10)$$

式中,  $V$  的单位为  $\text{m/s}$ ;  $H$  的单位为  $\text{m}$ 。

迎头态势:假设该时刻方位角和进入角分别为  $\phi=0$  和  $q=\pi$ , 目标机速度  $V_T$  为  $Ma=0.8$  和高度为  $H_T=10 \text{ km}$ , 载机速度取值范围为  $V_p \in [0.8, 1.2]$ , 载机高度取值范围为  $H_p \in [5, 15]$ , 重力加速度值取  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。其仿真结果如图 8 所示。

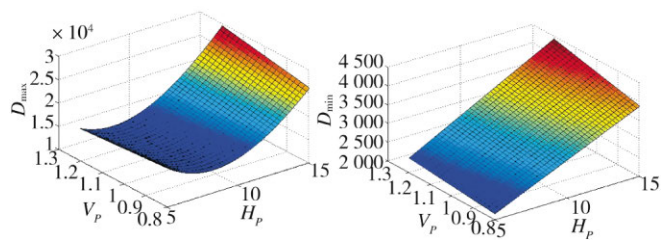
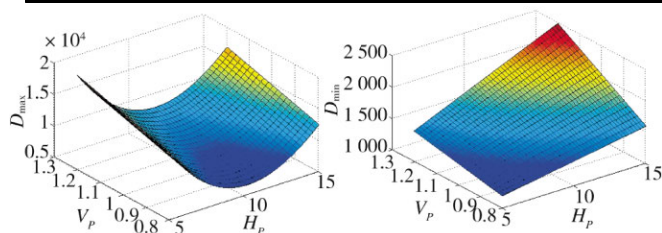


图 8 迎头态势下能量对远(近)界的影响

尾追态势:假设该时刻方位角和进入角分别为  $\phi=q=0$ , 目标机速度  $V_T$  为  $Ma=0.8$  和高度为  $H_T=10 \text{ km}$ , 载机速度取值范围为  $V_p \in [0.8, 1.2]$ , 载机高度取值范围为  $H_p \in [5, 15]$ , 重力加速度值取  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。其仿真结果如下页图 9 所示。

综合考虑能量对战术攻击区范围的影响,本文建立的能量态势函数如式(11)所示。



(a)能量对攻击区远界的影响 (b)能量对攻击区近界的影响

图9 尾追态势下能量对远(近)界的影响

$$S_E = \begin{cases} 1, & \frac{E_p}{E_T} \geq 2 \\ 1 + \frac{0.9(E_p - 2E_T)}{1.5E_p}, & \frac{1}{2} \leq \frac{E_p}{E_T} < 2 \\ 0.1, & \frac{E_p}{E_T} < \frac{1}{2} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $E_p$  和  $E_T$  分别表示载机和目标机能量值。

### 3.5 综合态势评估函数构建

综上所述可知, 态势优势主要由角度因素、相对距离变化率因素、高差因素和能量因素构成。此外, 距离因素也是判断目标机是否在我方战术攻击区内的重要指标之一, 因此, 在构建的综合态势评估函数中应有所体现。距离态势函数  $S_D$  的解算过程如式(12)所示。

$$S_D = \begin{cases} 0.1839e^{-\frac{D-D_{R\max}}{D_{R\max}}}, & D_{R\max} < D \\ 0.5e^{-\frac{D-D_{M\max}}{D_{M\max}-D_{Mk\max}}}, & D_{M\max} < D \leq D_{R\max} \\ 2^{-\frac{D-D_{Mk\max}}{D_{M\max}-D_{Mk\max}}}, & D_{Mk\max} < D \leq D_{M\max} \\ 1, & D_{Mk\min} < D \leq D_{Mk\max} \\ 2^{\frac{D-D_{Mk\min}}{12-D_{Mk\min}}}, & 12 < D \leq D_{Mk\min} \end{cases} \quad (12)$$

式中, 我机与敌机之间的距离  $D$  分为雷达最大搜索距离  $D_{R\max}$ 、导弹最大攻击距离  $D_{M\max}$ 、导弹不可逃逸区最大距离  $D_{Mk\max}$ 、导弹不可逃逸区最小距离  $D_{Mk\min}$ 。

目标机不仅可以采用单一对抗策略, 还可以采用复合对抗策略。这就需要经专家系统确定其态势优势, 本节选取以下几种典型对抗策略, 并定义对抗策略态势  $S_Q$ 。

1) 机动策略: 目标机采取加(减)速时,  $S_Q$  取 0.1; 目标机采取大过载转弯时,  $S_Q$  取 0.4; 目标机采取爬升或俯冲时,  $S_Q$  取 0.2。

2) 干扰策略: 载机发射导弹前, 目标机采取电子干扰策略, 则  $S_Q$  取 0.5; 载机发射导弹后, 目标机采取干扰策略, 则  $S_Q$  取 0。

因此, 本文构建的综合态势评估函数为:

$$S = C \left( \alpha_1 S_A S_D S_{\bar{D}} + \alpha_2 S_{\Delta H} + \alpha_3 S_E + \alpha_4 \prod_{j=1}^n (1 - S_{Qn}) \right) \quad (13)$$

式中,  $\sum_{i=1}^4 \alpha_i = 1$  且  $0 \leq \alpha_i \leq 1$ ,  $n$  表示目标机采取的对抗策略种类, 空战能力  $C$  的计算方法参见文献[15-16]。

## 4 仿真分析

为了验证本文所建立的态势评估函数的可行性和有效性, 现就具体算例与原态势评估函数进行比对分析。假定载机 A 和目标机 B 的位置如图 10 所示。此外, 由于新态势函数中考虑两机采取的对抗策略, 因此, 假定机型 A 采取电子干扰策略, 而机型 B 采取大过载转弯和爬升的机动策略。两机相关态势参数如表 2 所示。

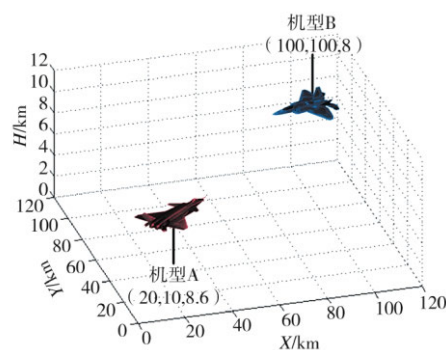


图10 机型A与机型B的位置关系示意图

表2 两机空战态势参数

机型	$V/\text{m/s}$	$\phi/^\circ$	$\theta/^\circ$
A	350	0	-45
B	380	-45	0
	$q/^\circ$	$V_{\max}/\text{m/s}$	$H_{\max}/\text{m}$
A	135	360	8 500
B	180	400	9 300

本节选取文献[3]建立的态势函数进行比较分析, 两种态势函数计算过程中用到的权重系数取值如表 3 所示。下页表 4 和表 5 给出了两种态势函数的计算结果。

表3 态势函数权重系数

	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
新态势函数	0.6	0.4	0.4	0.15	0.3	0.15
原态势函数	0.6	0.4	0.5	0.3	0.2	

根据表 4 给出的计算结果可以看出, 在该案例中, 虽然机型 B 的空战能力指标略高于机型 A 且在

表 4 新态势函数计算结果(最大值加粗)

机型	$C$	$S_A$	$S_D$	$S_{\Delta H}$	$S_E$	$S_D$	$S$
A	0.182	<b>0.905</b>	<b>0.483</b>	<b>0.932</b>	0.358	0.255	<b>0.067</b>
B	<b>0.194</b>	0.409	0.478	0.428	<b>0.440</b>	<b>0.356</b>	0.058

表 5 原态势函数计算结果(最大值加粗)

机型	$C$	$S_A$	$S_D$	$S_V$	$S_H$	$S$
A	0.182	<b>0.969</b>	<b>0.218</b>	0.757	<b>0.988</b>	<b>0.126</b>
B	<b>0.194</b>	0.885	0.129	<b>0.814</b>	0.430	0.104

能量和距离态势上具有一定优势,但机型 A 在角度和高差态势上具有压制性优势。此外,本文所建立的新态势函数中考虑到了双方的对抗策略: 机型 A 在雷达和电子干扰设备上具有一定优势,其在超视距空战中发现目标时,由于已经接近最佳空战速度和高度,因此,机型 A 采取电子干扰策略;机型 B 在机动性能方面要好于机型 A,由于其低于最佳空战高度且角度上处于劣势,因此,采取大过载转弯和爬升的复合机动策略,力求攀升到最佳空战高度和占据角度优势。从侧面反映出在超视距空战中,飞机的雷达和电抗设备对空战态势影响要大于飞机的机动性能。总体而言,机型 A 的综合态势要大于机型 B,与真实超视距空战情况基本相符。

结合表 4 和表 5 分析可知,两种态势函数计算结果趋势基本一致,验证了本文提出态势函数的有效性。在新态势函数中加入了能量态势,并用相对距离变化率态势和高差态势取代了原有的速度态势和高度态势,使得模型更加精确。在相对距离变化率态势函数中考虑到双方角度关系,反而机型 A 的态势要略优于机型 B,与真实情况相符。在两种态势函数中,机型 A 的角度态势均优于机型 B,但新的态势函数中的两机角度差值更大,这是由于机型 B 的初始方位角已达到  $45^\circ$ , 使得其很难发起导弹攻击,因此,原有线性的角度计算方法并不能充分考虑其影响。在考虑双方对抗策略的条件下,机型 A 的综合态势优势略高于机型 B,可见对抗策略的选取能够严重影响空战态势。

综上所述可知,本文提出的超视距空战态势评估方法与传统方法相比,能够更加合理有效地反映双方真实态势优劣关系。

## 5 结论

本文提出了一种改进的超视距空战态势评估方法。结合空空导弹战术攻击区分析了超视距空战主要因素对空战态势的影响,并对其中的不足作出了合理改进,通过仿真分析比较,该方法的有效性

得到了验证。由于在实际空战中,双方的态势信息并不完全透明,如何在敌方信息不确定的情况进行空战态势的评估还需进一步进行研究。

## 参考文献:

- [1] 滕鹏,刘栋,张斌,等. 超视距协同空战态势评估方法研究[J]. 电光与控制,2008,15(10): 47-50.
- [2] 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.
- [3] 吴文海,周思羽,高丽,等. 基于导弹攻击区的超视距空战态势评估改进[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(12): 2679-2685.
- [4] 周思羽,吴文海,曲志刚,等. 基于非参量法的空战态势评估分析[J]. 航空计算技术,2011,41(4): 13-16.
- [5] 张媛,刘文彪,张立民. 基于主客观综合赋权的 CGF 态势评估建模研究[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(1): 85-90.
- [6] 顾佼佼,赵建军,徐海峰,等. 基于 SPA 及 PSO 的超视距空战态势评估[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(4): 691-696.
- [7] 顾佼佼,刘卫华,姜文志. 基于攻击区和杀伤概率的视距内空战态势评估[J]. 系统工程与电子技术,2015,37(6): 1306-1312.
- [8] 刘栋,谷志勇,任波,等. 电子对抗环境下的多机协同空战态势评估方法[J]. 电光与控制,2008,15(7): 30-33.
- [9] 肖亮,黄俊,徐钟书. 基于空域划分的超视距空战态势威胁评估[J]. 北京航空航天大学学报,2013,39(10): 1309-1313.
- [10] RAI R N, BOLIA N. Optimal decision support for air power potential[J]. IEEE Transactions on Engineering Management,2014,61(2): 310-322.
- [11] BOGDANOWICZ Z R, TOLANO A, PATEL K, et al. Optimization of weapon-target pairing based on kill probabilities[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013,43(6): 1835-1844.
- [12] TOKGÖZ A, BULKAN S. Weapon target assignment with combinatorial optimization techniques[J]. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, 2013,2(7): 39-50.
- [13] ZHOU Y L, LI X B, ZHU Y F, et al. A discrete particle swarm optimization algorithm applied in constrained static weapon-target assignment problem[C]// 12th World Congress on Intelligent Control and Automation, Guilin: IEEE, 2016: 3118-3123.
- [14] YONG B C, SUK H J, KYUNG S K. Deterministic and robust optimization approach for single artillery unit fire scheduling problem[J]. Applied Sciences, 2017,7(10): 1038-1049.
- [15] 雷蕾,尚丽娜,张列航. 空战目标威胁排序与目标分配算法[J]. 电光与控制,2010,17(4): 38-40.
- [16] 董彦非,王礼沅,张恒喜. 战斗机空战效能评估的综合指数模型[J]. 航空学报,2006,27(6): 1084-1087.