

基于导弹攻击区的超视距空战态势评估改进

吴文海¹, 周思羽¹, 高丽¹, 刘锦涛²

(1. 海军航空工程学院青岛分院, 山东 青岛 266041;

2. 中国人民解放军 91599 部队, 山东 莱阳 265200)

摘要: 针对超视距空战态势评估模型中态势优势函数构造缺乏定量分析方法的问题, 提出了基于攻击区分析的超视距空战态势评估方法。利用该方法, 基于某典型空空弹攻击区的仿真计算, 讨论了传统超视距空战评估模型中方位角、进入角、速度和高度优势函数的不足, 分析了能量优势函数的不合理性, 构造了新的角度优势函数、速度优势函数和高度优势函数, 改进了超视距空战态势评估模型。

关键词: 态势评估; 超视距空战; 空空导弹攻击区; 空中优势

中图分类号: V 271.4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.12.20

Improvements of situation assessment for beyond-visual-range air combat based on missile launching envelope analysis

WU Wen-hai¹, ZHOU Si-yu¹, GAO Li¹, LIU Jin-tao²

(1. Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China;

2. Unit 91599 of PLA, Laiyang 265200, China)

Abstract: Aiming at the lack of quantitative analysis in traditional situation assessment for beyond-visual-range air combat, a new situation assessment method based on missile launching envelope analysis is presented. Based on the simulation results of a typical air-to-air missile launching envelope, this paper discusses the shortcomings in traditional superiority functions of azimuth, angle of approach, altitude and velocity, respectively. After that, the invalidation of energy superiority functions in traditional situation assessment model is discussed. And then, new superiority functions are constructed. In the end, the improved situation assessment model for beyond-visual-range air combat is presented.

Keywords: situation assessment; beyond-visual-range air combat; air-to-air missile launching envelope; air combat superiority

0 引言

态势评估是指: 在特定时空环境中的要素感知和评估, 并基于要素理解预测态势在未来一段时间内的发展趋势^[1-3]。态势评估往往与威胁估计联系在一起, 从空战态势评估和威胁估计问题的研究实际来看, 研究者常把态势评估与威胁估计二者合二为一, 即空战态势/威胁评估(以下简称空战态势评估)^[4-5]。空战态势评估及其相关研究受到国内外学者的广泛关注^[6-11], 也有学者基于超视距空战过程的定性分析, 构造超视距空战态势优势函数, 研究了超视距空战态势评估问题^[12-15]。但由于缺乏定量分析的方法, 现有评估模型多体现了研究者对超视距空战的主观判断, 无法完全反映超视距条件下空战态势的真实特征。针对这一情况, 本文提出了基于导弹攻击区分析的超视距空战态势评估改进方法。

1 超视距空战态势评估研究现状

超视距空战态势评估的主要任务是基于敌我双方的超视距空战能力、空间几何位置和运动状态, 判断双方态势优劣, 为预测出未来空战态势发展和飞行员空战决策提供依据。空战态势如图 1 所示, 我机 P 与目标机 T 相对距离为 D 、相对速度 V 、目标机方位角 ϕ 、进入角 q 。其中, 目标线 PT 是指我机 P 到敌机 T 的连线, PT 长度 D 为敌我距离; 目标方位角 ϕ 是指我机航向与目标线的夹角; 目标航向角 θ 是指敌机航向与目标线的夹角; 目标进入角 q 是指敌机航向与目标线延长线的夹角; 方位角与进入角的方向一致规定为右偏为正, 左偏为负, 则有 $0 < |q| < 180^\circ, 0 < |\phi| < 180^\circ$ 。

文献[12]提出了一种超视距空战威胁估计非参量法模型, 该模型考虑到了空战能力、机载武器以及机载雷达性能

收稿日期: 2011-01-25; 修回日期: 2011-09-28。

基金项目: 航空装备预先研究项目(10102020101)资助课题

作者简介: 吴文海(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为精确制导与飞行控制。E-mail: austin@qingdaonews.com.cn

参数等威胁因素,体现了超视距空战的基本特点。文献[13]在文献[12]的基础上,考虑了战术数据链和平台间信息共享的影响,修正了方位角优势函数和距离优势函数,构造了进入角优势函数,使得模型更加适合于现代超视距空战条件。另一方面,基于对速度、距离等威胁要素影响的不同理解,也有研究者也提出了不同的优势函数^[14-15],出现了多种模型框架基本一致,对同一态势评估结果却大相径庭的非参量态势评估模型,所以分析和构造优势函数已成为非参量法态势评估模型的关键。本文提出基于攻击区的定量分析和构造优势函数的方法正是为了解决这一问题。

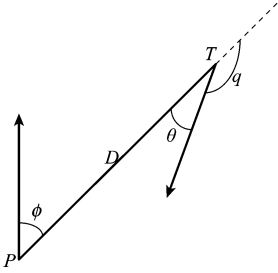


图 1 双机几何态势示意图

不论是超视距还是视距内空战,空战目的都是击毁、破坏敌空中目标,使其失去对我形成威胁的能力。要达到这一目的,我机必须进入一定的武器攻击区(weapons engagement zone, WEZ)^[16],所以空战态势优劣的本质是由敌我双方态势对各自 WEZ 影响决定的。基于 WEZ 建立我机对敌机的态势优势函数体现了我机对敌机攻击的空中优势,而建立敌机对我机的态势优势函数则衡量了敌机对我机威胁的大小。如图 2 所示,尽管 B 的机头已指向 A,但 A 已进入了本机 WEZ,且具备了攻击 B 的条件,所以 A 空战态势优于 B。所以,评估空战因素对态势的影响,也应该从其对 WEZ 的影响角度来定量分析,基于 WEZ 的分析才能从本质上评估空空态势的优劣。由于空空导弹已经成为了现代空战的主要武器,本文以某典型空空导弹攻击区仿真计算结果作为定量分析的依据,评估和构造新的优势函数,改进超视距空战态势评估模型。

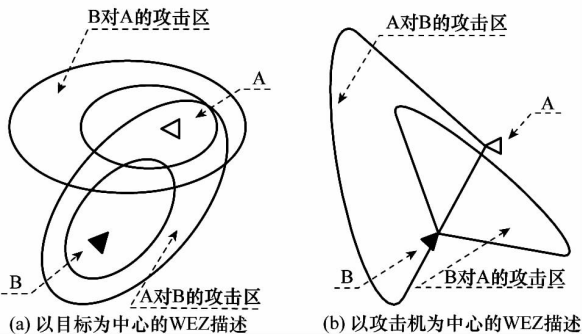


图 2 WEZ 对空战态势影响示意图

2 基于攻击区分析的超视距空战态势评估改进

选取某典型第三代中程空空导弹为分析对象。以空战主要威胁因素:高度(H/km)、方位角($\phi/^\circ$)、进入角($q/^\circ$)、速度(V)、我机与目标距离变化率(\dot{D}) (距离变化

率 \dot{D} 和速度 V 用马赫数 Ma 表示)拟合该型弹攻击区边界 D_{\max} 、近界 D_{\min} ,用以分析态势对导弹攻击区的影响。

2.1 某型导弹攻击区拟合

2.1.1 迎头(全向)攻击时

该型弹满足迎头(全向)攻击条件 $|\phi| \leq \phi_{\max} = 40^\circ$, $-0.293V < \dot{D} < 3V, H \leq 15 \text{ km}, q = 60^\circ \sim 300^\circ, V < 1.8 \text{ Ma}$ 时

$$D_{\max} = a_1 + a_2 H + a_3 V + a_4 \phi + a_5 \dot{D} + a_6 HV + a_7 H\dot{D} + a_8 H^2 + a_9 H^3 + a_{10} H^2 \dot{D} \quad (1)$$

式(1)中, $a_1 = 8\ 416.1, a_2 = 331.82, a_3 = -2\ 595.7, a_4 = -9.9017, a_5 = 1\ 509.7, a_6 = -419.81, a_7 = 480.449, a_8 = 138.63, a_9 = -3.46974, a_{10} = -21.6402$ 。

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

式(2)中, $a_1 = 762.285, a_2 = 23.3245, a_3 = 537.11, a_4 = 42.2298, a_5 = -4.28096, a_6 = 0.40132, a_7 = 0.053711, a_8 = -0.2957697$ 。

2.1.2 尾后攻击时

该型弹满足尾后攻击条件,即 $V < 2.2Ma, |\phi| \leq \phi_{\max} = 40^\circ, q = -60^\circ \sim 60^\circ, H \leq 20 \text{ km}, -0.293V < \dot{D} < 1V$ 时,有

$$D_{\max} = a_1 + a_2 H + a_3 V + a_4 \phi + a_5 \dot{D} + a_6 HV + a_7 H^2 + a_8 H^3 \quad (3)$$

式(3)中, $a_1 = 8\ 889.43, a_2 = 622.138, a_3 = -3\ 525.655, a_4 = -7.48929, a_5 = 3\ 576.7, a_6 = -373.23, a_7 = 99.69147, a_8 = -2.31633$ 。

$$D_{\min} = a_1 + a_2 H_B + a_3 \phi + a_4 \dot{D} + a_5 H_B \dot{D} + a_6 V\dot{D} + a_7 \phi^2 + a_8 H_B \phi^2 + a_9 \phi^2 \dot{D} \quad (4)$$

式(4)中, $a_1 = 768.345, a_2 = 27.2061, a_3 = 2.25251, a_4 = 917.752, a_5 = 74.9165, a_6 = -102.497, a_7 = 0.392312, a_8 = 0.0545163, a_9 = -1.4777$ 。

2.2 角度优势评估

2.2.1 方位角对攻击区影响分析

当 $|\phi| > \phi_{\max} = 40^\circ$ 时,目标位于导弹攻击区外,可视为 $D_{\max} = D_{\min} = 0 \text{ km}$,所以只需仿真 $|\phi| \leq \phi_{\max} = 40^\circ$ 时方位角对攻击区影响。

仿真 1 (迎头态势) 我机速度 V_P 马赫数 $Ma = 1.1$, 目标速度 V_T 马赫数 $Ma = 0.9$, 目标进入角 $q = 180^\circ$, 我机高度 $H = 15 \text{ km}, g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。仿真结果如图 3 所示。

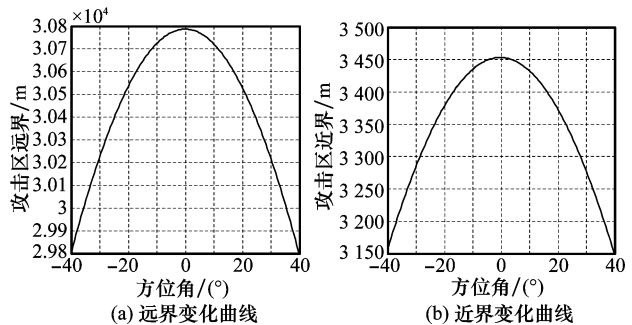


图 3 迎头态势时方位角对攻击区的影响

仿真 2 (尾后态势) 我机速度 V_P 马赫数 $Ma = 1.1$, 目标速度 V_T 马赫数 $Ma = 0.9$, 目标进入角 $q = 0^\circ$, 我机高度 $H = 15 \text{ km}, g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。仿真结果如图 4 所示。

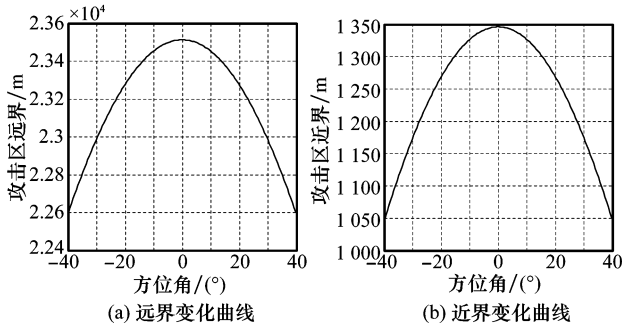


图 4 尾后态势时方位角对攻击区的影响

仿真结果表明:目标方位角相同时,迎头时我机攻击区远界 D_{\max} 和近界 D_{\min} 各自大于尾后时;目标方位角对迎头和尾后态势的攻击区影响类似,即目标方位角与攻击区边界呈二次抛物线关系, ϕ 越趋于 0° , D_{\max} 和 D_{\min} 将越大,在 $\phi=0^\circ$ 时 D_{\max} 、 D_{\min} 取得最大值。所以构造角度优势函数应该在 $\phi=0^\circ$ 处取得最大值,分迎头和尾后两种情况建立态势优势函数,且优势函数值应随着 $|\phi|$ 增大而降低。

2.2.2 进入角对攻击区影响分析

仿真 1 (迎头态势) 我机速度 V_p 马赫数 $Ma=1.1$, 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$, 目标方位角 $\phi=0^\circ$, 我机高度 $H=15\text{ km}$, $g=9.8\text{ m/s}^2$, 目标进入角 $q:60^\circ\sim 180^\circ$ 。仿真结果如图 5 所示。

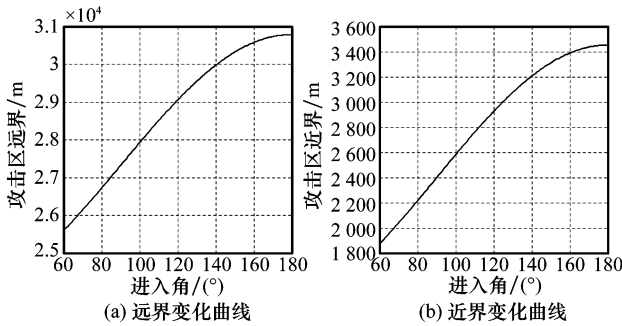


图 5 迎头态势时进入角对攻击区的影响

仿真 2 (尾后态势) 我机速度 V_p 马赫数 $Ma=1.1$, 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$, 目标方位角 $\phi=0^\circ$, 我机高度 $H=15\text{ km}$, $g=9.8\text{ m/s}^2$, 目标进入角 $q:0^\circ\sim 60^\circ$ 。仿真结果如图 6 所示。

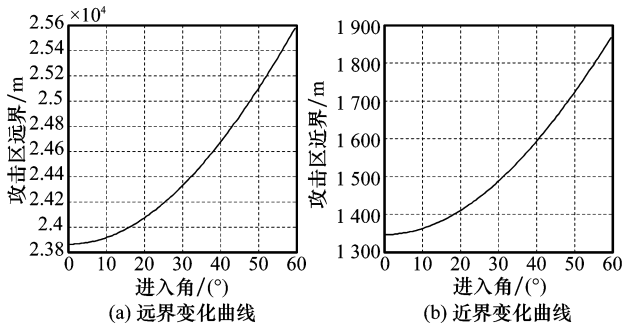


图 6 尾后态势时进入角对攻击区的影响

仿真结果表明:迎头时我机攻击区远界 D_{\max} 和近界 D_{\min} 各自大于尾后时;目标进入角为 $q=180^\circ$ 时, D_{\max} 和 D_{\min} 取得最大值,当 $|q|$ 减小时, D_{\max} 和 D_{\min} 也会随之减小,这也从另一个角度说明了目标的最佳逃匿机动方向就是进入角为 0° 的方向。所以构造的优势函数最大值应取在 $q=180^\circ$, 分迎头和尾后两种情况建立态势优势函数,且优势函数值应随着 $|q|$ 增大而增大。

2.2.3 角度优势函数构造

从第 2.2.1 节及 2.2.2 节分析可知,超视距空战时,目标方位角、进入角对态势优势的影响有极强耦合关系;其他条件一致时,迎头态势比尾后态势的攻击区范围大,优势函数取值相应越大;不论在迎头还是尾后态势时,方位角 $|\phi|$ 减小,意味着离轴角减小,我机对目标攻击区范围扩大,优势函数应增大;不论在迎头还是尾后态势时,进入角 $|q|$ 减小,目标越容易采取逃匿机动,我机对目标攻击区范围缩小,优势函数应减小;在 $|\phi|$ 较小时, $|\phi|$ 对攻击区影响较大,反之则 $|q|$ 对攻击区影响较大;基于以上分析,本文认为分别建立方位角和进入角态势优势函数再加以综合的传统构造方法是不合适的,所以本文提出构造统一的角度优势函数。同时考虑到机载雷达系统性能,以及预警机、地面指挥所提供的信息优势对空战态势的影响,构造的角度优势函数为

$$S_A = \begin{cases} (1 - \frac{|\phi|}{5\varphi_{Mk\max}})^{\frac{2}{3}} (e^{\frac{90^\circ-|q|}{60}})^{\frac{1}{3}}, & 0 \leq |\phi| < \varphi_{Mk\max}, 0^\circ \leq |q| < 60^\circ \\ (1 - \frac{|\phi|}{5\varphi_{Mk\max}})^{\frac{2}{3}} (e^{\frac{|q|-180^\circ}{360}})^{\frac{1}{3}}, & 0 \leq |\phi| < \varphi_{Mk\max}, 60^\circ \leq |q| \leq 180^\circ \\ (0.8 - \frac{|\phi| - \varphi_{Mk\max}}{2(\varphi_{Mk\max} - \varphi_{Mk\max})})^{\frac{2}{3}} (e^{\frac{90^\circ-|q|}{60}})^{\frac{1}{3}}, & \varphi_{Mk\max} \leq |\phi| < \varphi_{M\max}, 0^\circ \leq |q| < 60^\circ \\ (0.8 - \frac{|\phi| - \varphi_{Mk\max}}{2(\varphi_{M\max} - \varphi_{Mk\max})})^{\frac{2}{3}} (e^{\frac{|q|-180^\circ}{360}})^{\frac{1}{3}}, & \varphi_{Mk\max} \leq |\phi| < \varphi_{M\max}, 60^\circ \leq |q| \leq 180^\circ \\ (0.3 - \frac{|\phi| - \varphi_{R\max}}{10(\varphi_{R\max} - \varphi_{M\max})})^{\frac{1}{2}} (e^{\frac{90^\circ-|q|}{60}})^{\frac{1}{2}}, & \varphi_{M\max} \leq |\phi| < \varphi_{R\max}, 0^\circ \leq |q| < 60^\circ \\ (0.3 - \frac{|\phi| - \varphi_{R\max}}{10(\varphi_{R\max} - \varphi_{M\max})})^{\frac{1}{2}} (e^{\frac{|q|-180^\circ}{360}})^{\frac{1}{2}}, & \varphi_{M\max} \leq |\phi| < \varphi_{R\max}, 60^\circ \leq |q| \leq 180^\circ \\ (0.1 - \frac{|\phi| - \varphi_{R\max}}{10(180^\circ - \varphi_{R\max})})^{\frac{2}{3}} (e^{\frac{90^\circ-|q|}{60}})^{\frac{1}{3}}, & \varphi_{R\max} \leq |\phi| \leq 180^\circ, 0^\circ \leq |q| < 60^\circ \\ (0.1 - \frac{|\phi| - \varphi_{R\max}}{10(180^\circ - \varphi_{R\max})})^{\frac{2}{3}} (e^{\frac{|q|-180^\circ}{360}})^{\frac{1}{3}}, & \varphi_{R\max} \leq |\phi| \leq 180^\circ, 60^\circ \leq |q| \leq 180^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\varphi_{R\max}$ 是雷达搜索区最大偏角; $\varphi_{M\max}$ 是导弹最大离轴发射角; $\varphi_{Mk\max}$ 是目标不可逃匿区最大偏角。

2.3 速度优势评估

2.3.1 速度对攻击区影响分析

仿真 1 (迎头态势) 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$, 方位角 $\phi=0^\circ$, 进入角 $q=180^\circ$, 我机高度 $H=15$ km, $g=9.8$ m/s², 接近速度 $\dot{D}=V_P \cos \phi - V_T \cos q$ 。则 \dot{D} 与攻击区关系如图 7 所示。

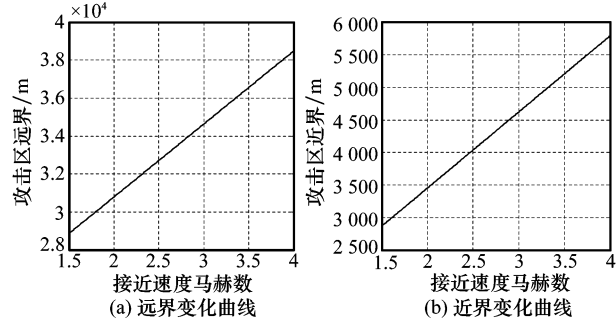


图 7 迎头态势时接近速度对攻击区的影响

仿真 2 (尾后态势) 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$, 方位角 $\phi=0^\circ$, 进入角 $q=0^\circ$, 高度 $H=15$ km, $g=9.8$ m/s², 我机与目标接近速度 $\dot{D}=V_P \cos \phi - V_T \cos q$ 。则 \dot{D} 与攻击区关系如图 8 所示。

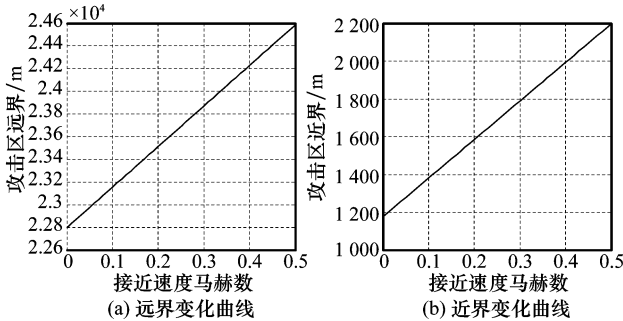


图 8 尾后态势时接近速度对攻击区的影响

仿真结果表明: 当其他条件一致时, \dot{D} 与攻击区远界 D_{max} 、近界 D_{min} 基本呈正比关系, 即我机与目标接近速度越快, 我机对目标的攻击区将越大, 这一特点对迎头和尾后态势都适用; 迎头时, 目标速度一定, 我机速度越快, 则 \dot{D} 越大, 我机对目标的攻击区范围显著增加; 尾后时, 目标速度一定, 我机与敌机的速度正差越大攻击区越大, 负差越大攻击区越小。综上所述速度优势在超视距空战中的作用非常明显, 装备同一水平空空导弹时, 有速度优势的一方能在攻击时获得较大攻击区, 防御时缩小敌方攻击区。

2.3.2 速度优势函数构造

从第 2.3.1 节分析可知, 在超视距条件下, 其他条件一致时, 速度较快一方有更优的空战态势, 传统速度优势函数的构造思想也基本体现了这一特点^[12-15]。可简单认为速度越快优势越大, 也与空战实际不符, 速度过快往往会带来其

他问题, 例如可用占位时间缩短、机动占位能力变差(转弯半径增大)、油耗增多等。基于这种认识, 设我机最佳空战速度为 V_{Pmax} , 构造速度优势函数为

当 $V_{Pmax} > 1.5V_T$ 时

$$S_V = \begin{cases} e^{-\frac{V_P - V_{Pmax}}{V_{Pmax}}}, & V_{Pmax} < V_P \\ 1, & 1.5V_T < V_P \leq V_{Pmax} \\ -\frac{1}{2} + \frac{V_P}{V_T}, & 0.6V_T < V_P \leq 1.5V_T \\ 0.1, & V_P \leq 0.6 \end{cases} \quad (6)$$

当 $V_{Pmax} \leq 1.5V_T$ 时

$$S_V = \begin{cases} e^{-\frac{V_P - V_{Pmax}}{V_{Pmax}}}, & V_{Pmax} \leq V_P \\ \frac{2}{5} \left(\frac{V_P}{V_{Pmax}} + \frac{V_P}{V_T} \right), & 0.6V_T < V_P < V_{Pmax} \\ 0.1, & V_P \leq 0.6 \end{cases} \quad (7)$$

2.4 高度优势评估

2.4.1 高度对攻击区影响分析

仿真 1 (迎头态势) 我机速度 V_P 马赫数 $Ma=1.1$, 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$, 目标方位角 $\phi=0^\circ$, 进入角 $q=180^\circ$, $g=9.8$ m/s², 我机高度 $H: 3 \sim 15$ km, 则高度与攻击区关系如图 9 所示。

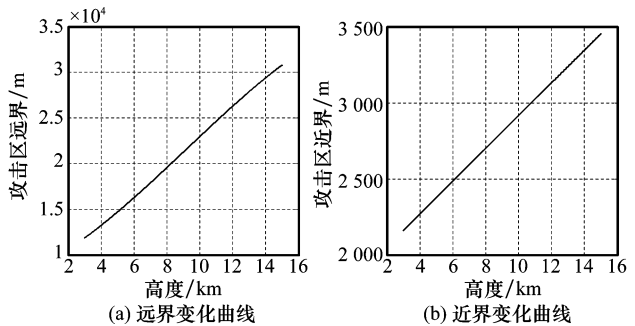


图 9 迎头态势时高度对攻击区的影响

仿真 2 (尾后态势) 我机速度 V_P 马赫数 $Ma=1.1$, 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$, 目标方位角 $\phi=0^\circ$, 进入角 $q=0^\circ$, $g=9.8$ m/s², 我机高度 $H: 3 \sim 15$ km, 则高度与攻击区关系如图 10 所示。

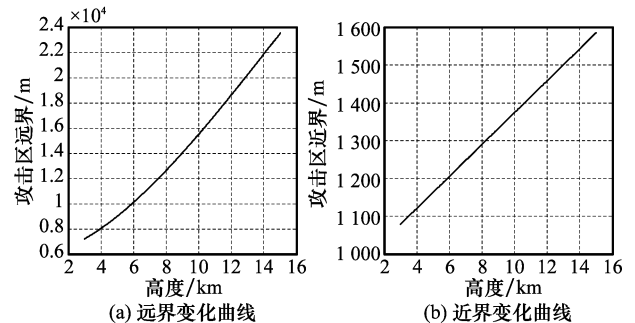


图 10 尾后态势时高度对攻击区的影响

仿真结果表明:当其他条件一致时,高度基本与 D_{\max} 、 D_{\min} 呈正比关系,即我机高度越高,我机对目标的攻击区越大,这一特点对迎头态势和尾后态势都适用。

2.4.2 高度优势函数的构造

从第 2.4.1 节分析可知,超视距空战时,其他条件一致时,具备高度优势将有较大攻击区,有更优的空战态势。但实际上空战中并非与目标高度差越大,优势越大,主要原因包括:飞行高度过高不仅对载机自身性能的影响,也会影响到空空导弹的性能(大气密度的变化会对载机、导弹飞行造成严重影响);与目标高度差过大,使得导弹攻击目标时,需要在垂直面内的机动大幅增加等。基于以上分析,设我机最佳空战高度为 $H_{P_{\max}}$,构造高度优势函数为

$$S_H = \begin{cases} e^{-\frac{H_P - H_{P_{\max}}}{H_{P_{\max}}}}, & H_{P_{\max}} \leq H_P \\ e^{-\frac{H_P - H_{P_{\max}}}{H_T}}, & H_T \leq H_P < H_{P_{\max}} \\ -\frac{1}{2} + \frac{H_P}{H_T}, & H_P < H_T \end{cases} \quad (8)$$

2.5 能量优势评估

2.5.1 能量对攻击区影响分析

载机的能量包括动能和势能,由载机的高度和速度决定,一般用式(9)描述^[13-15]。

$$E = H + \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

为了分析的方便,本文由式(9)计算能量曲面时,速度单位取 m/s,高度单位取 m。

仿真 1 (迎头态势) 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$,目标方位角 $\phi=0^\circ$,目标进入角 $q=180^\circ$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$,我机速度 V_P 变化范围为马赫数 $Ma:0.3 \sim 1.5$,高度 $H:3 \sim 15 \text{ km}$,则我机能量与攻击区关系如图 11 所示。

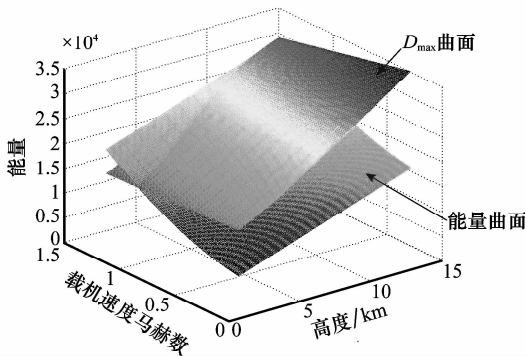


图 11 迎头态势时能量对攻击区的影响

仿真 2 (尾后态势) 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$,方位角 $\phi=0^\circ$,进入角 $q=0^\circ$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$,我机速度 V_P 变化范围为马赫数 $Ma:0.3 \sim 1.5$,高度 $H:3 \sim 15 \text{ km}$,则高度与攻击区关系如图 12 所示。

仿真结果表明:当其他条件一致时,能量对攻击区的影响并非单纯的线性关系,而是具有较强的非线性。为了说明这一点,举下面两个例子。

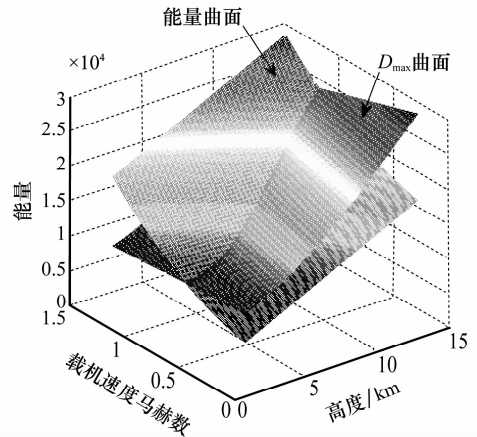


图 12 尾后态势时能量对攻击区的影响

例 1 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$,方位角 $\phi=0^\circ$,进入角 $q=0^\circ$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$,我机在状态 1 ($H_{P1}=9 \text{ km}$,我机速度 V_{P1} 马赫数 $Ma=1.36$) 时与状态 2 ($H_{P2}=11.8 \text{ km}$,我机速度 V_{P2} 马赫数 $Ma=1.18$) 时几乎具有相同的能量,但状态 1 时远界 $D_{\max1}=13.31 \text{ km}$ 却远小于状态 2 时远界 $D_{\max2}=18.19 \text{ km}$,所以尽管能量相同,但我机在状态 2 态势优于状态 1 态势。

例 2 目标速度 V_T 马赫数 $Ma=0.9$,方位角 $\phi=0^\circ$,进入角 $q=0^\circ$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$,我机在状态 3 ($H_{P3}=14 \text{ km}$,我机速度 V_{P3} 马赫数 $Ma=0.6$) 与状态 4 ($H_{P4}=15 \text{ km}$,我机速度 V_{P4} 马赫数 $Ma=0.98$) 时攻击区大小几乎相同,即我机处在状态 3 和状态 4 时的空战态势并无太大差别,但状态 3 时能量 $E_3=1612$ 小于状态 4 时能量 $E_4=2066$ 。

2.5.2 能量优势分析

从相关文献来看,学者们普遍认为:在其他条件一致时,能量 E 大的战机具备更优的空战态势,构造的以式(10)为代表的能量优势函数形式也基本体现了这一认识^[13]。

$$S_E = \begin{cases} 1, & \frac{E}{E_T} \geq 2 \\ 1 + \frac{0.9(E - 2E_T)}{1.5E}, & 2 > \frac{E}{E_T} \geq 0.5 \\ 0.1, & \frac{E}{E_T} < 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

然而本文第 2.5.1 节的分析表明,能量 E 与空战优势并不是简单的对应关系,采用式(10)衡量能量优势是不合适的。从能量 E 的定义式(式(9))可知,能量优势本质上是由速度优势和高度优势组成,对于速度、高度本文已构造专门的优势函数加以评估,再构造能量优势函数不仅冗余,而且能量 E 值并不能真实反映出态势优劣(见第 2.5.1 节例 1、例 2 分析),所以本文认为单独构造能量优势函数不仅没有必要,甚至会对评估结果产生较坏的影响。

2.6 态势优势评估

综上所述,态势优势主要由距离优势、角度优势、速度优势、高度优势和空战能力构成。考虑到实际空战中距离

优势与角度优势具有较强耦合性(双方距离越近角度优势带来的效用越大,反之越小),构造动态态势优势函数为

$$S = C(\beta_1 S_A^{\alpha_1} S_D^{\alpha_2} + \beta_2 S_V + \beta_3 S_H) \quad (11)$$

式中, $\sum_{i=1}^2 \alpha_i = 1; \sum_{i=1}^3 \beta_i = 1$; 空战能力 C 采用综合指数法确定空战能力,具体计算方法见文献[17-18]。距离优势 S_D 采用式(12)解算^[13]

$$S_D = \begin{cases} 0.18e^{-\frac{D-D_{Rmax}}{D_{Rmax}}}, & D \geq D_{Rmax} \\ 0.5e^{-\frac{D-D_{Mmax}}{D_{Rmax}-D_{Mmax}}}, & D_{Mmax} \leq D < D_{Rmax} \\ 2^{-\frac{D-D_{MKmax}}{D_{Mmax}-D_{MKmax}}}, & D_{MKmax} \leq D < D_{Mmax} \\ 1, & D_{Mkmin} \leq D < D_{Mkmax} \end{cases} \quad (12)$$

角度优势 S_A 通过式(5)解算,速度优势 S_V 通过式(6)或式(7)解算,高度优势 S_H 通过式(8)解算。

3 算例

为了说明新算法的有效性和优越性,现将本算法与现有态势评估算法对比仿真分析。设 Su27、F15C 位置如图 13 所示,其中:

Su27:坐标(10 km, 10 km, 4 600 m),速度 $V_{Su27} = 310$ m/s,目标方位角 $\phi_{Su27} = 0^\circ$,航向角 $\theta_{Su27} = -45^\circ$,进入角 $q_{Su27} = 135^\circ$,假设最佳空战速度 $V_{Su27}^{opt} = 320$ m/s,最佳空战高度 $H_{Su27}^{opt} = 4 400$ m。

F15C:坐标(110 km, 110 km, 9 000 m),速度 $V_{Su27} = 420$ m/s,目标方位角 $\phi_{F15C} = -45^\circ$,航向角 $\theta_{F15C} = 0^\circ$,进入角 $q_{F15C} = 180^\circ$,假设最佳空战速度 $V_{F15C}^{opt} = 300$ m/s,最佳空战高度 $H_{Su27}^{opt} = 5 000$ m。

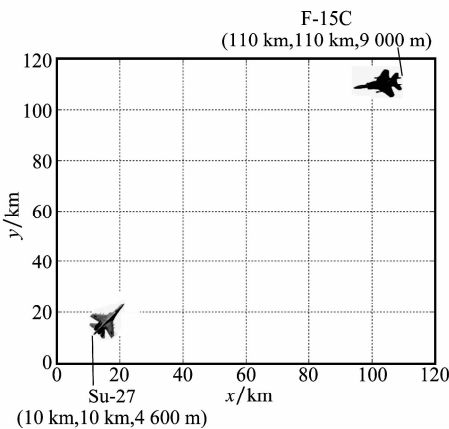


图 13 F15C 与 Su27 态势示意图

取 $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = 0.4, \beta_1 = 0.5, \beta_2 = 0.3, \beta_3 = 0.2$ 。则 Su27 与 F15C 空战态势计算结果见表 1。

表 1 新算法空战态势参数计算结果

机型	C	S_A	S_D	S_V	S_H	S
Su27	0.165	0.969	0.208	0.683	0.956	0.109
F15C	0.163	0.885	0.119	0.670	0.449	0.080

基于文献[13]提出的计算方法(由于本文仅讨论超视距态势评估方法,令文献[13]中态势权重系数 $\beta_c = 1$,其他权重系数 $\beta_M = \beta_L = 0$)计算结果如表 2 所示。

表 2 传统算法空战态势参数计算结果

机型	S_A	S_D	S_E	S
Su27	0.493	0.209	0.117	0.262
F15C	0.313	0.125	0.936	0.270

基于改进超视距空战态势评估方法的计算结果表明(见表 1),在算例想定条件下,与 F15C 相比,Su27 具备一定的角度优势、较大高度优势和距离优势,虽然 Su27 与 F15C 的速度优势和空战能力差别不大,综合而言 Su27 具备较大的态势优势。在本算例中,尽管 F15C 飞行速度较快、高度较高,但其速度和高度都远远偏离空战最优状态,反而不利于超视距空战的实施,而 Su27 则基本在最佳空战高度飞行,速度也基本为最佳空战速度,且有较好的角度和距离优势,所以 Su27 的空战态势大大优于 F15C,本文算法评估结果也与这一实际情况一致。

相反,基于以文献[13]为代表的传统超视距空战态势评估方法计算结果表明(见表 2),Su27 同样具有一定角度优势和距离优势,但是由于飞行速度、高度优势计算方法的线性性,加上能量优势项的不利影响,使得远离最佳空战高度和空战速度的 F15C 反而有更好的空战态势(其他传统超视距空战态势评估算法也会得到类似结论^[12,14-15]),显然这一结论与实际并不一致。

综上所述,与传统超视距评估算法相比,本文提出的新算法更能合理有效的反映超视距空战态势。

4 结束语

为了解决构造态势优势函数时缺乏定量分析手段的问题,本文提出了基于导弹攻击区的超视距空战态势评估改进方法,并利用该方法,分析了当前超视距空战态势优势函数的不足,做出了合理的修正,提出了新的超视距空战态势评估模型,并通过与传统超视距空战态势评估算法的仿真对比,验证了新评估模型更具备有效性和合理性。但新模型仍然存在需要进一步研究的问题,比如权系数的确定还有待深入研究。

参考文献:

[1] Endsley M R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems[J]. *Human Factors*, 1995, 35(1): 32-45.

[2] Gavan L. Introduction to the special issue on cognitive systems[J]. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2011, 21(1): 1-2.

[3] Ketut S, Christopher D W, Yoon P C. Prediction in situation awareness: confidence bias and underlying cognitive abilities[J]. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2011, 21(2): 153-174.

[4] Sandeep M, Gerard R, Christine I, et al. OLIPSA: On-line intelligent processor for situation assessment[C]// *Proc. of the Sec-*

- ond Annual Symposium and Exhibition on Situational Awareness in the Tactical Air Environment, 1997: 440 - 448.
- [5] Narayana R P, Sudesh K K, Girija G. Situation assessment in air-combat: a fuzzy-Bayesian hybrid approach[C]// *Proc. of the International Conference on Aerospace Science and Technology, India Institute of Science, Bangalore*, 2008: 63 - 68.
- [6] Nguyen X T. Threat assessment in tactical airborne environments[C]// *Proc. of the Fifth International Conference on Information Fusion*, 2002: 1300 - 1307.
- [7] Rao G A, Mahulikar S P. New criterion for aircraft susceptibility to infrared guided missiles[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2005(9): 701 - 712.
- [8] 陈晓东. 面向空战威胁估计技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005. (Chen X D. A study of air combat oriented threat assessment technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.)
- [9] Wang L, Wang M Z. Modeling of cognitive framework in time-stressed decision making[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, 20(5): 992 - 1000.
- [10] Wang L, Wang M Z. Modeling of combined Bayesian networks and cognitive framework for decision-making in C2[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010, 21(5): 812 - 820.
- [11] Myers C W, Cooke N J. Developing and validating a synthetic teammate, ADA514316 [R]. Mesa: Cognitive Engineering Research Institute, 2010.
- [12] 高永, 向锦武. 一种新的超视距空战威胁估计非参量法模型[J]. *系统仿真学报*, 2006, 18(9): 2570 - 2573. (Gao Y, Xiang J W. New threat assessment non-parameter model in beyond-visual-range air combat[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18(9): 2570 - 2573.)
- [13] 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.)
- [14] 张洪波, 李国英, 丁全心, 等. 超视距空战下的态势评估技术研究[J]. *电光与控制*, 2010, 17(4): 9 - 13. (Zhang H B, Li G Y, Ding Q X, et al. Research on situation assessment in BVR air combat[J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(4): 9 - 13.)
- [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. (Lei L, Shang L N, Zhang L H. Algorithms for target threat sequencing and target assignment in air combat[J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(4): 38 - 40.)
- [16] James S M. Real-time maneuvering decisions for autonomous air combat[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [17] 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. (Dong Y F, Wang L Y, Zhang H X. Synthesized index model for fighter plane air combat effectiveness assessment[J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*, 2006, 27(6): 1084 - 1087.)
- [18] 傅裕松, 黄长强, 韩统, 等. 飞机空战能力评估综合指数模型[J]. *电光与控制*, 2009, 16(9): 24 - 28. (Fu Y S, Huang C Q, Han T, et al. Synthesized index model for air combat capability assessment of fighter aircrafts[J]. *Electronics Optics & Control*, 2009, 16(9): 24 - 28.)