

一种新的超视距空战威胁评估方法

肖冰松, 方洋旺, 胡诗国, 王磊

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 针对超视距空战以中远距空空导弹为主要武器的特点, 提出了一种新的威胁评估方法。该方法针对现有空战威胁评估的非参量法模型不足之处进行扩展和改进, 根据参战双方飞机火控系统和武器系统性能参数, 分别构造参战双方飞机方位角、进入角、距离、高度、速度等优势函数, 从而得出几何态势优势, 进而综合双方态势优势、飞机空战效能优势和战术事件优势, 聚合为空战优势。通过算例验证了该方法的合理性和有效性。

关键词: 威胁评估; 非参量法模型; 超视距; 空战优势

中图分类号: V 271.4; E 926

文献标志码: A

New threat assessment method in beyond-the-horizon range air combat

XIAO Bing-song, FANG Yang-wang, HU Shi-guo, WANG Lei

(Coll. of Engineering, Air Force Engineering Univ., Xi'an 710038, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of beyond-the-horizon air combat where the main weapon is intermediate-long-range air-to-air missiles, a new threat assessment method is presented. The method extends and improves the non-parameter model in existence for calculating air combat threat assessment. Superiority functions such as azimuth, enter angle, distance, altitude and velocity are constructed based on the capability parameters of the fire control system and weapon system in each side. So the geometry situation superiority is deduced. Then the air combat superiority is deduced by synthesizing situation superiority, air combat efficiency superiority and tactical event superiority. The rationality and effectiveness are verified by an application example.

Keywords: threat assessment; non-parameter model; beyond-the-horizon; air combat superiority

0 引言

威胁评估是对敌杀伤能力及对我方威胁程度的评估^[1], 是在态势评估的基础上, 依据敌我兵力和武器、电子设备性能、敌作战企图、我方重点保卫目标和敌我双方的作战策略, 以定量形式对敌方威胁程度做出估计和分析, 其任务是估计战场事件出现的程度和对我方威胁的严重性。威胁评估受到国内外学者广泛关注^[1-4], 但是以往研究多无法完全反映超视距条件下的真实特征^[4]。本文根据超视距空战的特点, 针对现有的超视距空战威胁评估研究的不足, 在分析战场态势的前提下, 综合考虑敌我双方战机(包括其武器)性能和威胁行为事件, 提出一种新的超视距空战威胁评估方法。

1 超视距空战威胁评估研究现状

空战中, 战斗机与目标机的相对几何态势如图 1 所示。

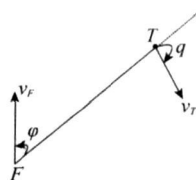


图 1 空战几何态势图

图中, 目标视线(FT): 战斗机(F)到目标机(T)的连线; 目标方位角(φ): 战斗机航向与目标视线的夹角; 目标进入角(q): 目标航向与目标视线延长线的夹角。

规定目标方位角和目标进入角右偏为正, 左偏为负, 则 $0 \leq |q| \leq 180^\circ, 0 \leq |\varphi| \leq 180^\circ$ 。

常用的威胁评估算法有参量法和非参量法, 非参量法模型简单、易用, 便于实时运算, 受到广泛关注。以往由于对超视距空战这一新的作战样式研究不足, 所用的威胁评估模型大多参考了近距空战的威胁评估模型, 并

收稿日期: 2008-07-23; 修回日期: 2008-11-07。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2007AA701405); 航空科学基金(20080196005)资助课题

作者简介: 肖冰松(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为航空武器系统总体、仿真与控制。E-mail: xbs21cn@yahoo.com.cn

以态势透明与实力对等为前提,已经不适于超视距空战的威胁估计^[4-6]。为此文献[4]提出了一种超视距空战威胁估计非参量法模型,针对超视距空战以双机迎头飞行、导弹互射为主的特点,以载机空战能力、机载导弹攻击区、不可逃逸区以及机载雷达的搜索区等性能参数和空战双方瞬时几何态势等作为主要研究对象,建立了态势(角度、距离、速度)、效能的优势指数表达式,大致符合了超视距空战的基本规律。但是该方法所使用的模型较为粗糙,例如其构造的进入角优势函数中,简单认为进入角为 $\pm 50^\circ$ 时最大,这与实际情况不太相符,特别是没有考虑战斗机与目标机的方位角关系,本文将在后面进行分析、修改。

2 超视距空战威胁评估

现代空战中的作战优势以战场态势为背景,需要综合考虑敌我双方战机及其携带武器的性能,并且根据双方做出的威胁行为事件,从整个体系做出分析,其空战优势结构如图2所示^[7]。

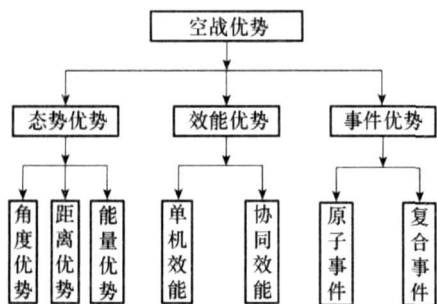


图2 空战优势结构

2.1 态势优势

文献[4]认为态势优势函数的构造要兼顾机载雷达、导弹性能与双方的几何态势。军事大国均在发展战术数据链技术,战场上广泛分布的各级各类传感器使得信息共享具有良好的完整性、准确性和实时性,因此各单元获取目标信息的能力大大增强,包括目标类型、属性、性能、一般挂载武器、速度、位置、航向等。因此,可以假设本文所需的目标信息完全已知。

2.1.1 角度优势函数

文献[4]将目标方位角分为雷达搜索区、导弹攻击区、不可逃逸区和雷达搜索区以外4个区域,但是对于雷达搜索区以外的区域简单认为其优势指数为零,这并不符合实际情况。尽管在该区域优势指数相对较小,但是不能简单的等于零,在此区域不同的方位角度下,其方位角优势不同。根据文献[8]将方位角划分为3个区域,本文给出如下方位角优势函数。

$$T_{\varphi} = \begin{cases} 0.1 - \frac{|\varphi| - 85^\circ}{10(180^\circ - 85^\circ)}, & 85^\circ \leq |\varphi| \\ 0.2 - \frac{|\varphi| - \varphi_{R_{\max}}}{10(85^\circ - \varphi_{R_{\max}})}, & \varphi_{R_{\max}} \leq |\varphi| < 85^\circ \\ 0.3 - \frac{|\varphi| - \varphi_{M_{\min}}}{10(\varphi_{R_{\max}} - \varphi_{M_{\min}})}, & \varphi_{M_{\min}} \leq |\varphi| < \varphi_{R_{\max}} \\ 0.8 - \frac{|\varphi| - \varphi_{M_{K_{\max}}}}{2(\varphi_{M_{\max}} - \varphi_{M_{K_{\max}}})}, & \varphi_{M_{K_{\max}}} \leq |\varphi| < \varphi_{M_{\max}} \\ 1 - \frac{|\varphi|}{5\varphi_{M_{K_{\max}}}}, & 0^\circ \leq |\varphi| < \varphi_{M_{K_{\max}}} \end{cases}$$

式中, $\varphi_{R_{\max}}$ 为雷达最大搜索方位角; $\varphi_{M_{\min}}$ 为空空导弹最大离轴发射角; $\varphi_{M_{K_{\max}}}$ 为不可逃逸区圆锥角。

对于进入角优势函数,文献[4]认为在不同的方位角条件下,其优势一样,二者之间没有必然联系。而事实上一般认为,当双方迎头作战时,由于便于探测目标,且可以在较远距离发射中远距空空导弹,因此优势较大。相反,尾追条件下进入角优势较小。这与近距空战不同。

在图3中,当 $\varphi=0^\circ$, $q=180^\circ$ 时,双方能构成纯粹意义上的迎头关系,但是除此情况外均不能构成此条件。以 FT 为弦,作与 FE 相切的圆弧,在 T 点与该圆弧相切的直线为 TA 。易证明 $\angle EFT = \angle ATF$ 。 $0^\circ \leq \varphi < 90^\circ$ 即 $0^\circ \leq \angle EFT < 90^\circ$ 时,认为当目标速度处于 TA 方向时为最大迎头关系,进入角优势最大, TD 方向为最大尾追关系,进入角优势最小, TB 和 TC 处于二者之间, TB 与 FE 平行同向, TC 与 FE 平行反向。由于是超视距条件下作战,因此本文认为,当 $0^\circ \leq \varphi < 45^\circ$ 时, TC 方向进入角优势大于 TB 方向进入角优势;当 $45^\circ < \varphi < 90^\circ$ 时, TB 方向进入角优势大于 TC 方向进入角优势。当 $\varphi > 90^\circ$ 时,取 $\varphi' = 180^\circ - \varphi$ 对应的情况。

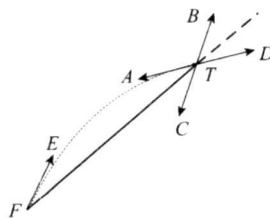


图3 敌我双方角度关系图

根据上述分析,构造进入角优势函数

$$T_q = \begin{cases} e^{-|180^\circ - \varphi - q|/(180^\circ/\pi)}, & \varphi \geq 0 \\ \begin{aligned} & \text{(如果 } q < -\varphi, q \text{ 取 } q + 360^\circ; \\ & \text{如果 } q > 90^\circ, \varphi \text{ 取 } 180^\circ - \varphi) \end{aligned} \\ e^{-|180^\circ + \varphi + q|/(180^\circ/\pi)}, & \varphi < 0 \\ \begin{aligned} & \text{(如果 } q > -\varphi, q \text{ 取 } q - 360^\circ; \\ & \text{如果 } \varphi < -90^\circ, \varphi \text{ 取 } -180^\circ - \varphi) \end{aligned} \end{cases}$$

由于方位角优势和进入角优势中如果有一项为零,则整机的角度优势为零,所以构造整机的角度优势为二者乘积。

$$T_A = T_1^{\gamma_1} T_2^{\gamma_2}$$

式中, $\gamma_1 + \gamma_2 = 1 (0 \leq \gamma_1, \gamma_2 \leq 1)$ 为权重系数, 用以调整二者在乘积中的比例, 该值可由非梯度随机搜索法^[9] 优化确定。

2.1.2 距离优势函数

文献[4] 将战斗机和目标机之间的距离 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 $D_{M_{K_{\max}}}$ 、导弹不可逃逸区最小距离 $D_{M_{K_{\min}}}$ 。当 $D \geq D_{R_{\max}}$ 时, 简单认为距离优势为零。而事实上此时虽然不能依靠自身探测设备发射武器, 但是随着协同作战能力的提高, 可借助其他平台传送的目标信息, 装订目标参数, 发射远程攻击武器。即使该机未携带远程攻击武器, 目标处于雷达探测区域外, 战斗机经过一段时间的运动后, 目标也可能处于探测区内。因此, 不可简单的认为等于零。本文定义如下距离优势函数。

$$T_D = \begin{cases} 0.1839e^{-\frac{D-D_{R_{\max}}}{D_{R_{\max}}}}, & D_{R_{\max}} \leq D \\ 0.5e^{-\frac{D-D_{M_{\max}}}{D_{R_{\max}}-D_{M_{\max}}}}, & D_{M_{\max}} \leq D < D_{R_{\max}} \\ 2^{-\frac{D-D_{M_{K_{\max}}}}{D_{M_{\max}}-D_{M_{K_{\max}}}}}, & D_{M_{K_{\max}}} \leq D < D_{M_{\max}} \\ 1, & D_{M_{K_{\min}}} \leq D < D_{M_{K_{\max}}} \\ 2^{-\frac{D-D_{M_{K_{\min}}}}{10-D_{M_{K_{\min}}}}}, & 10 \leq D < D_{M_{K_{\min}}} \end{cases}$$

2.1.3 能量优势函数

文献[10] 仿真结果表明, 在高空条件下, 由于空空弹的使用速度更大, 攻击的成功概率较高, 载机在较大速度时使用空空弹对敌机具有更大的威胁, 因此, 本文采用能量优势函数。

飞机单位能量表示为

$$E = H + \frac{V^2}{2g}$$

相对能量优势表示为

$$T_E = \begin{cases} 1, & 2E_T \leq E \\ 1 + \frac{0.9(E-2E_T)}{1.5E}, & 0.5E_T \leq E < 2E_T \\ 0.1, & E < 0.5E_T \end{cases}$$

2.1.4 态势优势

综合角度优势、距离优势、能量优势, 即可得到态势优势。由于三者之间并不完全独立, 因此处理为乘法关系。

$$T_G = T_A^{\beta_A} \times T_D^{\beta_D} \times T_E^{\beta_E}$$

式中, β_A 、 β_D 、 β_E 分别为战斗机相对于目标机的角度优势、距离优势、能量优势的权值, 且 $\beta_A + \beta_D + \beta_E = 1 (0 \leq \beta_A, \beta_D, \beta_E \leq 1)$, 该值可由非梯度随机搜索法优化确定。

2.2 空战效能优势

一种作战飞机从研制到投入使用以及对现役飞机的转型升级是一个漫长的过程, 在某一战役的特定时间段内, 双

方的武器装备水平可以看作是“静止”的, 因此可利用静态的空对空作战能力指数评估其空战能力。

本文采用文献[11] 提出的综合指数模型。

空战能力 $C = \text{火力} \times \text{态势感知能力} + \text{生存能力} + \text{机动能力} \times \text{操纵能力} + \text{作战半径系数}$

可以根据该模型计算出一定时期内敌我双方各种类型作战飞机的空战能力指数, 保存在数据库中, 依据敌我双方装备变更情况适时更新。作战或训练时, 数据链成员共享信息中包含由情报侦察系统获取的飞机类型, 由此可以从数据库中查询相应的空战能力指数。

构造空战效能优势如下

$$T_M = (C_A - C_T + 1) / 2$$

式中, C_A 、 C_T 分别为战斗机与目标机的空战能力, 文献[11] 已经对其归一化, 因此 T_M 取值也处于 $[0, 1]$ 内。

2.3 事件优势

空战实体在作战过程中会不断出现加(减)速、拐弯、爬升、辐射源开(关)机、导弹符合发射条件等属性变化行为, 这些行为都可能对对方空战实体产生威胁, 这些产生威胁的行为即事件^[7]。

事件优势涉及面广, 尤其是复合事件, 需要经专家系统确定其优势, 本文简单选取以下几个具备代表性的相关事件, 并定义如下事件优势 T_I 。

(1) 实体雷达辐射: 未辐射时, T_I 取 0; 战斗机对目标机扫描时, T_I 取 0.5; 战斗机对目标机多目标跟踪时, T_I 取 0.8; 战斗机对目标机连续跟踪进, T_I 取 1。

(2) 实体导弹发射: 战斗机对目标机发射导弹时, T_I 取 1。

2.4 空战优势

综上所述, 战斗机对目标机的综合空战优势可以表示为

$$T = \begin{cases} \beta_G \times T_G + \beta_M \times T_M + \beta_I \times T_I, & T_I \neq 1 \\ 1, & T_I = 1 \end{cases}$$

式中, β_G 、 β_M 、 β_I 分别战斗机相对于目标机的态势优势、空战效能优势、事件优势的权值, 且 $\beta_G + \beta_M + \beta_I = 1 (0 \leq \beta_G, \beta_M, \beta_I \leq 1)$ 。需要说明的是, 一般情况下, 如果战斗机对目标机发射导弹, 则目标机宜规避, 对目标机的空战优势应取 1。

以上论述了战斗机相对目标机的空战优势, 将双方参数互换即可得到目标机相对战斗机的空战威胁。

3 算例分析

设 $\varphi_{R_{\max}} = 65^\circ$, $\varphi_{M_{\max}} = 35^\circ$, $\varphi_{M_{K_{\max}}} = 20^\circ$; $D_{R_{\max}} = 140$ km, $D_{M_{\max}} = 80$ km, $D_{M_{K_{\max}}} = 60$ km, $D_{M_{K_{\min}}} = 40$ km。考虑到方位角优势较进入角优势权重高, 本文取 $\gamma_1 = 0.7$, $\gamma_2 = 0.3$; 考虑到角度、距离相比能量重要, 本文取 $\beta_A = \beta_D = 0.4$, $\beta_E = 0.2$; 根据超视距空战的特点, 本文取 $\beta_G = 0.4$, $\beta_M = \beta_I = 0.3$ 。

图 4~图 10 分别为空战优势随不同参数的变化图。从图 4 可以看出,在不同的进入角下,相同的方位角对应的空战优势不一样。从图 5 中可以看出,在不同的方位角下,相同的进入角对应的空战优势也不一样。图 6

反映了目标在导弹不可逃逸区内时空战优势最大。图 7~图 10 分别反映了空战优势随战斗机的高度、速度、效能优势、事件优势的增大而增大。这些图反映了空战的基本特点。

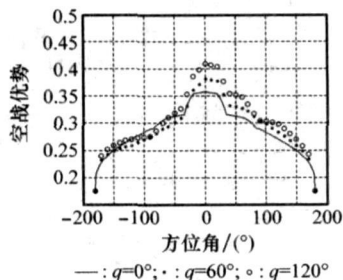


图 4 空战优势随方位角变化图

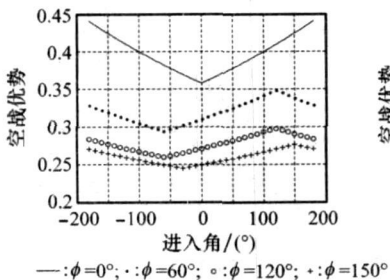


图 5 空战优势随进入角变化图

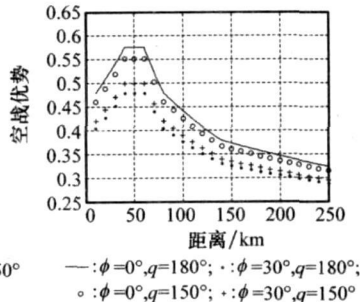


图 6 空战优势随距离变化图

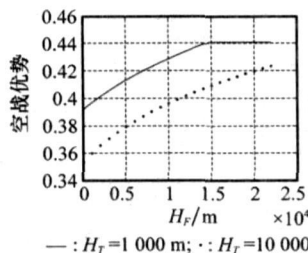


图 7 空战优势随战斗机高度变化图

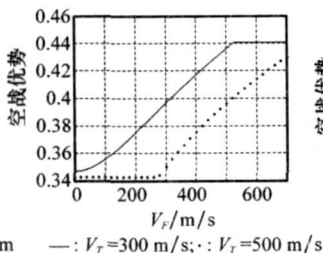


图 8 空战优势随战斗机速度变化图

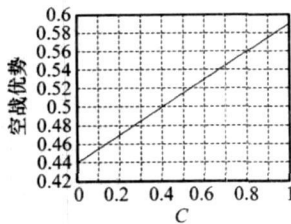


图 9 空战优势随空战效能变化图

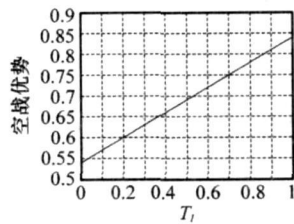


图 10 空战优势随事件变化图

4 结束语

本文根据超视距空战的特点,综合考虑态势优势、效能优势和事件优势,研究了威胁评估方法。针对当前威胁评估模型不足之处,做出符合实际空战的修改。经仿真计算验证,本文所建立的模型合理、可行,符合超视距空战规律,而且计算简便,便于计算能力不是很强的机载系统实现。本文所提方法中仍有不少需要进一步深入研究的地方,尤其是事件优势的计算,考虑得还不够全面。另外优势函数的聚合权重系数需要确定一个标准来选取,还有待继续研究。

参考文献:

- [1] 王小艺,刘载文,侯朝桢,等.基于模糊多属性决策的目标威胁估计方法[J].控制与决策,2007,22(8):859-863.
- [2] Bladon P, Day P S, Hughes T, et al. High-level fusion using bayesian networks: applications in command and control[R]. BAE Systems Advanced Technology Centre Bristol, BS 34 & QWUK, 2006.
- [3] Rao G A, Mahulikar S P. New criterion for aircraft susceptibility to infrared guided missiles[J]. Aerospace Science and Tech-

nology, 2005(9): 701-712.

- [4] 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.
- [5] 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 Kun, Zhou Deyun. TOPSIS method based on entropy in evaluation the air multi-target threat. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(9): 1493-1495.)
- [6] 王佩,李言俊,张科.多机空战多目标威胁评估和分配算法[J].火力与指挥控制,2008,33(5):14-17.
- [7] 陈晓东.面向空战威胁估计技术研究[D].长沙:国防科技大学,2005.
- [8] 蓝伟华,林南粤.单机对单机交战几何态势分析[J].电光与控制,2004,11(4):14-16.
- [9] 方洋旺.随机系统最优控制[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [10] 刘行伟,朱荣昌,向锦武.空对空导弹对战斗机空战效能影响的仿真[J].北京航空航天大学学报,2005,31(9):963-965.
- [11] 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):1084-108.