

三维威力场在空战态势评估模型中的应用

孙庆鹏¹, 李战武^{1,2}, 常一哲¹

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 西北工业大学电子信息学院, 西安, 710072)

摘要 针对现有空战态势评估模型中缺乏对战斗机总体性能分析的问题,借鉴态势优势函数并考虑三维空间特性,改进威力场理论,以战斗机攻击、探测、生存、干扰、告警能力为主要研究对象,根据已有模型装备变化情况,计算攻击能力,改进雷达体制系数,以体现雷达多目标跟踪能力,并考虑雷达下视的影响,突显三维空间特性,借此重新构造威力势函数,进行态势评估与作战引导。仿真算例验证该三维威力场模型可以直观地反映空战态势,并为作战引导提供决策基础。

关键词 态势评估;空战;三维威力场;作战引导;雷达体制系数;雷达下视

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.01.007

中图分类号 V271.4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)01-0037-06

The Air Combat Situation Assessment Model Based on Three-dimensional Combat Power Field

SUN Qingpeng¹, LI Zhanwu^{1,2}, CHANG Yizhe¹

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. College of Electronic Communication, Northwestern Polytechnical University,

Xi'an 710072, China)

Abstract: Aimed at the problems that the existing air combat situation assessment model is lack of the overall performance analysis of fighters, this paper references the superiority function, takes the feature of three-dimensional space into consideration, and improves combat power field model. The model of combat power field is constructed in aspects of attack, detection, maneuverability, countermeasure and alert. Based on the existing model, based on the change of equipment, the attack ability is calculated based on the situational advantage function. Change radar system coefficient, reflect the multi-target tracking ability of modern radar. Increasing the consideration of radar lower visual ability highlights the 3D space characteristics. The paper restructures the function of combat power field based on the existing model and the change of equipment. The combat power field theory is applied in analysis of situation assessment and operations guidance. The paper verifies the effectiveness of the model. The result of research shows that three-dimensional combat power field can reflect the air combat situation visually and bring the basis to maneuvering decision.

Key words: situation assessment; air combat; three-dimensional combat power field; operations guidance; radar system coefficient; radar lower visual

收稿日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61779263)

作者简介: 孙庆鹏(1994—),男,江苏连云港人,硕士生,主要从事火力指挥控制原理与技术研究。E-mail:463345158@qq.com

引用格式: 孙庆鹏,李战武,常一哲. 三维威力场在空战态势评估模型中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(1): 37-42.

SUN Qingpeng, LI Zhanwu, CHANG Yizhe. The Air Combat Situation Assessment Model Based on Three-dimensional Combat Power Field

[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(1): 37-42.

现代战争中,随着科技的进步,装备的发展,战斗机性能得到极大的提升,空中战场态势瞬息万变。空战节奏的加快与信息量不断增大意味着飞行员必须具备更快更强的反应决策能力。如何辅助飞行员实现快速分析与决策,已经成为一个亟需解决的重要问题。

目前,国内外态势评估^[1-2]或者威胁评估的方法主要可分为参量法和非参量法。典型的参量法如贝叶斯法^[3],以平均概率风险最小或完成任务可能性最大为指标,但并不能给飞行员提供直观的画面显示。非参量法^[4-9]主要根据交战时的各类信息进行定量判断,但大多都是基于导弹攻击区来分析,对战斗机的告警、干扰等能力的研究较少。由于这些能力在现代空战中对作战效果的影响越来越大^[9],本文在文献[10]的基础上,提出了一种改进的三维威力场模型,并将其用在空战的态势评估和引导控制中。

1 三维威力场模型构建

在空战场中,战斗机自身及其携带的武器装备均存在一定的作用范围,必然会对周围的空域产生影响,这种影响即可看作战斗机对战场空域产生的威力。威力场借用场的概念,描述作战单元对空间的态势影响能力,但其不是物质,所以在整个威力场中的作战单元并不受到力的作用。

威力场与物理学中场的性质比较相似,它无法直接被观测到,只对放入其中的目标有作用。因此在解算威力场时,是将参考目标放置于需计算点处,计算载机对其的威力势,将空间中所有点的威力势的集合称为威力场。通过建立威力场,可以将战斗机各项装备能力参数融合到一起,更全面地进行态势评估。

文献[10~12]都提出利用威力场进行空战分析,但是它们建立的威力场模型都存在一定局限性,有的参数难以测量,有的没有考虑到三维空间的特性,因此本文对其进行了重新构建。

在飞机坐标系中,设载机所处位置为原点,姿态角均为 0° ,载机机头指向 y 轴正向,借鉴对数法构建载机对点 (x, y, z) 处参考目标的威力势模型:

$$E(x, y, z) = [E_G(x, y, z) + E_D(x, y, z) + E_F(x, y, z) + E_E(x, y, z) + E_W] \epsilon_S \epsilon_J \quad (1)$$

式中: $E_G(\cdot)$ 为全向告警能力; $E_D(\cdot)$ 为探测能力; $E_F(\cdot)$ 为攻击能力; $E_E(\cdot)$ 为有源干扰能力; E_W 、 ϵ_S 、 ϵ_J 分别为无源干扰能力、生存能力和机动能力。

1.1 攻击能力

现有的非参量法^[8]在计算飞机攻击能力时,是将所有挂载武器的能力全部融合到了一起,但态势优势函数的计算却是根据某一型导弹的攻击区而言,这两者相乘是毫无意义的。因此本文将态势优势函数放入攻击能力的计算中,确保挂载的每型导弹对攻击能力的影响都能得到正确体现。

现代空战中,航炮对整体空战态势的影响很小,所以本文只考虑导弹对攻击能力的影响,建立攻击能力模型为:

$$E_F = \ln(1 + \sum A_M) \quad (2)$$

式中: A_M 为攻击能力因子。在总攻击能力因子前加上1的原因是为防止不挂导弹的飞机攻击能力值变为负无穷。所有能力因子可能为0的均要进行此操作。

攻击能力因子模型:

$$A_M = \begin{cases} r_{\max} h_{\max} (m_1 S_a^{n_1} S_d^{n_2} + m_2 S_v + m_3 S_h) \sqrt{n}, \\ r_{\min} \leq r \leq r_{\max}, \psi \leq \psi_{\max} \\ 0, \text{ 其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: n 为同类导弹的数量; h_{\max} 为射高; m_1 、 m_2 、 m_3 、 n_1 、 n_2 为权重函数; S_a 、 S_d 、 S_v 、 S_h 为各项优势函数^[9]; ψ_{\max} 为超前及滞后总离轴角之和; r 为载机与计算点的距离; r_{\max} 为导弹最大发射距离; r_{\min} 为导弹最小发射距离。

1.2 探测能力

探测能力指的不仅是机载探测设备能否发现目标,还包括发现目标的精度与可靠性。

$$E_D = \ln(1 + A_{DR} + A_{DIR}) \quad (4)$$

当前作战环境中,相控阵雷达已经成为战斗机的标配,文献[13]中的模型已经无法满足计算的需要,因此对其进行修改。

雷达探测能力因子 A_{DR} 模型:

$$A_{DR} = \begin{cases} \frac{S_{TR}^2}{4} \frac{\theta_R}{2\pi} \frac{\gamma_R}{2\pi} P_{TR} (m_1 m_2)^{K_1}, \\ 0 \leq R_1 \leq S_{TR}, \theta \leq \theta_R, \gamma \leq \gamma_R \\ 0, R_1 > S_{TR} \text{ 或 } \theta > \theta_R \text{ 或 } \gamma > \gamma_R \end{cases} \quad (5)$$

式中:常数4代表经过有效目视距离2 km的平方; S_{TR} 为雷达最大探测距离; θ_R 为雷达总搜索方位角; γ_R 为雷达总搜索俯仰角; P_{TR} 为雷达发现目标概率; K_1 为多目标处理能力系数,脉冲多普勒雷达 $K_1=0.05$,无源相控阵雷达 $K_1=0.15$,有源相控阵雷达 $K_1=0.45$; m_1 为同时跟踪目标数量; m_2 为同时允许攻击目标数量; R_1 代表载机与计算点的直线距离。

雷达发现目标概率 P_{TR} 为:

$$P_{TR} = \exp\left(\frac{(\sigma_0 R_1^4 / \sigma_1 S_{TR}^4) \ln(P_{d0}) \ln(P_f)}{\ln(P_f) - \ln(P_{d0}) + (\sigma_0 R_1^4 / \sigma_1 S_{TR}^4) \ln(P_{d0})}\right) \quad (6)$$

式中: P_f 为虚警概率,是固定值,一般取 10^{-12} ; σ_0 为目标机头方向的 RCS 值,一般为 5 m^2 ; P_{d0} 是雷达最大探测距离处的探测概率,一般取 50% ; S_{TR} 可以通过 σ_1 和 P_{d0} 计算得到;因此式(6)仅与目标的 RCS (σ_1) 和目标与载机的距离 (R_1) 有关。

原模型中的 K_1 为雷达体制衡量系数,但由于现代雷达的主要区别在于多目标跟踪能力上,因此本文将其转变为多目标处理能力系数。

考虑气象环境影响的雷达作用距离方程表示为:

$$S_{TR} = R_{\max} \cdot \exp(-0.115\mu S_{TR}) \quad (7)$$

式中: μ 为衰减系数 (dB/km), 与环境参数有关。

雷达探测在上平视与下视时的性能是不同的。下视时,与目标回波竞争的除噪声外还有地杂波,尤其是在低空作战时,地杂波的影响是不可忽略的。因此计算最大探测距离时需要公式进行修改:

$$R_{\max} = \left[\frac{(P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma)}{(4\pi)^3 (C + K T_s B_N) (\text{SNR})_{\min} L} \right]^{1/4} \quad (8)$$

式中: C 表示通过多普勒窄带滤波器的杂波功率折合到接收机输入端的等效噪声功率。

红外探测能力因子:

$$A_{DIR} = \begin{cases} \frac{S_{TIR}^2}{4} \frac{\theta_{IR}}{2\pi} \frac{\gamma_{IR}}{2\pi} P_{TIR} K_2 (m_1 m_2)^{0.05}, & r < S_{TIR}, |\theta| < \theta_{IR}/2, |\gamma| < \gamma_{IR}/2 \\ 0, & r > S_{TIR}, \theta > \theta_{IR}, \gamma > \gamma_{IR} \end{cases} \quad (9)$$

参数意义与雷达基本一致,其中 K_2 为红外体制衡量系数,多元固定式探测装置取 0.5,搜索跟踪装置为 0.8,如配有激光测距器再加 0.05。

红外探测的最大探测距离为^[14]:

$$R_{\max} = I_{\lambda_1 \sim \lambda_2}^{0.5} [A_0 \tau_0]^{0.5} [D^*]^{0.5} \left[\frac{K}{\sqrt{\Delta f A_d} \text{SNR}_{\min}} \right]^{0.5} \quad (10)$$

式中: $I_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内目标的红外辐射强度; A_0 为光学系统有效入射孔径面积; τ_0 为光学系统透过率; D^* 为探测器的波段探测率; Δf 为电路等效噪声带宽; A_d 为敏感元件的有效敏感面积; K 为修正因子,用于修正系统由于波形调制等不同而引起的差别; SNR_{\min} 为探测系统门限信噪比。

发现概率计算模型为^[15]:

$$P_d = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{\text{SNR} - \text{SNR}_{\min}}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (11)$$

式中: SNR 为红外探测系统接收到的信噪比。

信噪比计算模型为:

$$\text{SNR} = \frac{I_{\lambda_1 \sim \lambda_2} \tau_a (R_S)}{R_S^2} A_0 \tau_0 \frac{D^*}{\sqrt{f A_d}} \quad (12)$$

在考虑气象粒子时,其探测距离为:

$$S_{TIR} = \sqrt{\exp(-\mu(\lambda) S_{TIR})} R_{\max} \quad (13)$$

式中: $\mu(\lambda)$ 为总的衰减系数, λ 为机载红外搜索跟踪装置波长 (μm)。 $\mu(\lambda)$ 的计算方法可以参考文献[16]。

1.3 全向告警能力

全向告警能力不仅包括对来袭导弹的告警^[17],还包括对敌机雷达的告警,是战斗机在保持无线电静默时的重要探测手段。

$$E_G = \ln(1 + A_{RG} + A_{HG} + A_{ZG}) \quad (14)$$

雷达告警能力因子模型:

$$A_{RG} = \begin{cases} \frac{S_{RG} P_{RG} P_{RF}}{R_1 d_i}, & 0 < R_1 < S_{RG} \\ 0, & R_1 > S_{RG} \end{cases} \quad (15)$$

式中: S_{RG} 为雷达告警器最大告警距离; P_{RG} 为雷达告警器发现目标概率; P_{RF} 为告警器的频率范围对目标雷达的频率范围覆盖率; d_i 为角分辨率; R_1 代表载机与计算点的直线距离。

光电告警技术包括红外、激光等告警。其计算方法与雷达告警基本一致,不再一一介绍。

1.4 有源干扰能力

设雷达压制区的轴线与飞机轴线同方向,构造电子干扰能力参数为:

$$E_E = \ln(1 + A_{DISA}) \quad (16)$$

有源干扰能力因子模型:

$$A_{DISA} = \begin{cases} \frac{P_j G_j \theta \Omega \lambda^2 P_f K}{4\pi^2 r^2}, & \Omega \leq \Omega_{\max} \\ 0, & \Omega > \Omega_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

式中: P_j 为干扰机的发射功率; G_j 为干扰天线增益; θ 为有源干扰的功率发射角方向; Ω 为干扰机的天线波束在空间的最大指向范围; λ 为干扰机发射波束的波长; P_f 为干扰机的频率范围对被干扰雷达的频率范围覆盖率; K 为压制系数。

1.5 附加能力

附加能力不作为一项单独能力,而是叠加到对应的能力上。附加能力包括外挂设备如吊舱对载机威力势的影响。

例如电子有源干扰能力:

$$E_E = \ln(1 + A_{DISA}) \quad (18)$$

在添加电子干扰吊舱后:

$$E_E = \ln(1 + A_{DISA} + A_{bin}) \quad (19)$$

式中: A_{bin} 为电子吊舱所对应的有源干扰因子,其计算方式与机载干扰机一致。

1.6 无源干扰能力:

$$E_W = \ln(1 + A_{DISPIR} + A_{DISPB}) \quad (20)$$

式中: A_{DISPIR} 为红外干扰弹干扰能力因子; A_{DISPB} 为箔条干扰弹干扰能力因子。

这里的无源干扰是指使用干扰弹进行干扰的能力。其干扰能力可以通过比较释放干扰弹前后, 导弹命中概率的降低程度来衡量。

载机被导弹命中概率的计算模型:

$$P_H = \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\delta^2}\right) \right] \exp(-E_b - E_{IR}) \quad (21)$$

式中: r 为被保护圆形目标的半径; δ 为导弹的散布误差; E_b 为箔条干扰弹的抗摧毁因子; E_{IR} 为红外干扰弹的抗摧毁因子。

箔条干扰弹干扰能力因子模型:

$$A_{DISPB} = \frac{\eta(n_1)E_b}{t_b} \quad (22)$$

式中: $\eta(n_1)$ 为一次干扰释放 n_1 枚与 n 枚箔条干扰弹时的效率比值; E_b 为释放 n 枚箔条干扰弹时的抗摧毁因子; t_b 为箔条干扰弹的散开时间。红外干扰弹计算方法与其相同。

抗摧毁因子 E 可以根据实验测得, 效率比值函数 $\eta(n_1)$ 可以根据实验结果拟合得到。

1.7 生存能力

飞机生存力是指飞机躲避或承受人为敌对环境的能力^[18], 其体现了飞机发挥自身装备性能的能力, 因此将其作为系数乘入威力势计算公式中。

由于生存能力的计算没有统一的公式, 因此使用对照法计算。即将参照飞机的生存能力因子设为 1, 用实际的飞机参数与其比较求出结果。

飞机生存力一般分为敏感性和易损性。敏感性涉及飞机面临的非终端威胁, 以飞机被威胁的可能性来度量; 易损性涉及飞机面临的终端威胁, 这里取易损面积作为指标。

生存能力因子模型:

$$\epsilon_s = \left(\frac{10}{W} \frac{15}{L} \frac{5}{RCS} \right) \left(1 - \frac{A_{st}}{A_v} \right) \quad (23)$$

式中: W 为飞机的翼展; L 为飞机的全长; RCS 指迎头或尾后方位 120° 之内对应的 3 cm 波长雷达的平均值; A_{st} 为飞机表面易损部件面积; A_v 为飞机的表面积; 常数 10、15、5 代表某型参照飞机的翼展、机长与 RCS。

机动能力是指在单位时间内改变飞行器状态(飞行速度和高度)的能力^[19]。载机机动能力主要由最大推力、最大过载和极限翼载荷决定。

机动能力因子模型:

$$\epsilon_J = \frac{F_{\max}}{127} \frac{n_{\max}}{9} \frac{\omega_l}{431} \quad (24)$$

式中: F_{\max} 为载机的最大推力; n_{\max} 为能承受的最大

过载; ω_l 为载机的极限翼载荷; 常数 127、9、431 为某型参照飞机的对应值。

2 态势评估及作战引导

三维威力场主要作用是进行多对多空战场态势评估。将敌方飞机的威力势设为负值, 己方飞机威力势设为正值, 在某一点处威力势的正负代表该点处哪一方占优势。

设己方有飞机 i 架, 敌方有 j 架。在点 A 处, 己方飞机的威力势为 U_s , 敌方飞机的威力势为 K_p 。则该点处合势 T 为:

$$T_A = \sum_{s=1}^i U_s + \sum_{p=1}^j K_p \quad (25)$$

若 $T_A > 0$, 则该点处我方处于优势; 若 $T_A < 0$, 则我方处于劣势; 若 $T_A = 0$, 则双方均势。

同时还可利用威力场对战斗机进行引导控制。利用梯度函数可以判断威力势的变化率。考虑一对一空战情况, 目标机威力势在 A 点处的变化率用梯度表示为:

$$\text{grad}(U_A) = \frac{\partial U_A}{\partial x} + \frac{\partial U_A}{\partial y} + \frac{\partial U_A}{\partial z} \quad (26)$$

在标量场中某一点上的梯度指向标量场增长最大的方向。由于目标机威力势为负, 因此向目标机威力势增大的方向运动, 可以降低目标及对载机的威胁度; 借此可以对战斗机进行作战引导, 给机动决策提供支持。

3 仿真分析

以载机构建飞机坐标系, 其所处位置为 $(0, 0, 0)$, 机头指向 y 轴, 速度为 300 m/s , 姿态角均为 0° , 携带 2 枚近距离格斗导弹, 不使用干扰的情况下。其单机三维威力场态势见图 1, 颜色越亮代表威力势越大。从图中可以看出由威力场描绘的载机态势图与实际情况相符, 验证了模型的有效性。

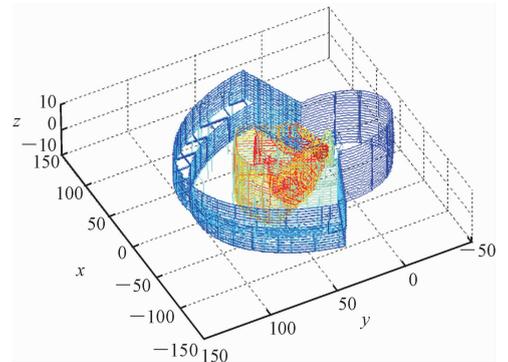


图 1 三维威力场

Fig. 1 Three-dimensional combat power field

设红蓝双方各有 2 架飞机进行超视距空战,其位置信息见表 1,空战态势见图 2。

表 1 红蓝双方位置信息

Tab. 1 The location information of red and blue

编号	x/km	y/km	z/km	航向角/ $(^\circ)$
红 1	0	0	0	0
红 2	10	20	0	0
蓝 1	40	50	1	180
蓝 2	10	80	1	180

可以看到本文构建的威力场模型能够正确体现友方威力势的叠加和敌对威力势的削弱,验证了第 2 节中合势计算的相关内容,同时证明威力场模型用于多对多空战研究的有效性。

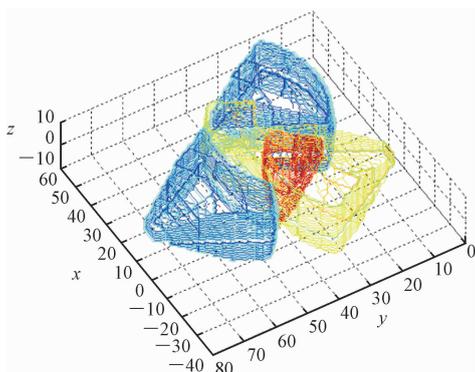


图 2 2v2 空战态势

Fig. 2 The air combat situation of 2v2

图 3~4 是威力场用于作战引导的仿真结果。以载机所处位置为 $(0,0,0)$,速度 300 m/s ,机头指向 y 轴,构建飞机坐标系,其俯仰角为 5° 。目标机在 $(20,30,10)$ 处,速度 250 m/s ,机头方向与 y 轴夹角为 135° ,其偏航角为 135° 。双方机载设备相同,均携带 2 枚近距离格斗导弹。 V_A 为引导载机飞行的方向。其目的是提高载机对目标机的威胁度。更加多样化的引导方法还有待进一步研究。

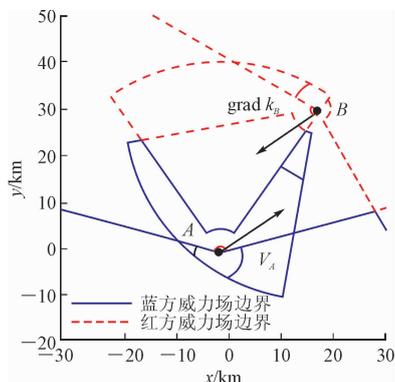


图 3 指挥引导俯视图

Fig. 3 The top view of command guidance

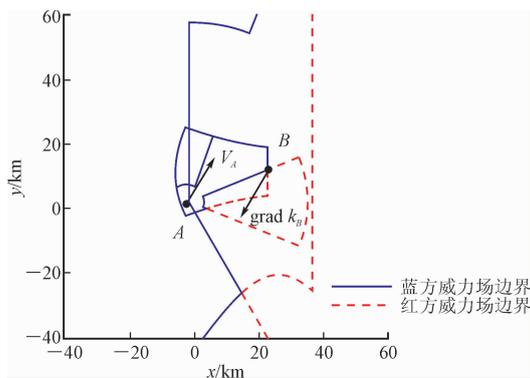


图 4 指挥引导左视图

Fig. 4 The profile plane of command guidance

4 结语

本文从飞机攻击、探测、生存、干扰、告警能力出发,定量计算飞机对周围空域的影响,在此基础上,通过敌我双方威力势的计算,判断双方态势优劣,并根据其梯度值对作战飞机进行简单引导。最后通过仿真对其进行了验证。本模型使用基于攻击区的态势优势函数计算攻击能力,并将设备的更新换代体现在模型中,同时在平面二维威力场的基础上建立了空间三维威力场。考虑到雷达下视问题,使其更符合真实情况,更加满足实战要求。但是这种应用没有对承担的任务进行考虑,其更完善的应用将在下一步工作中进行研究。

参考文献 (References):

[1] 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, BS34 & QWUK, 2006:1-18.

[2] RAO G A, MAHLIKAR S P. New Criterion for Aircraft Susceptibility to Infrared Guided Missiles [J]. Aerospace Science and Technology, 2005 (9): 701-712.

[3] 夏命辉,王小平,林秦颖,等. 复杂环境下基于动态贝叶斯网络的目标识别 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(4): 24-28.
XIA M H, WANG X P, LIN Q Y, et al. Target Recognition Based on Dynamic Bayesian Networks under High Dynamic and Complex Conditions of Environment [J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2016, 17(4): 24-28. (in Chinese)

[4] NGUYEN D, FISHER D C, STEPHENS R L. A

- Graph-Based Approach to Situation Assessment [J]. AIAA 2010-3316.
- [5] PAVLIK R L, GERKEN M J, HOUGHTON C H, et al. Situation Assessment Using Uncertain Data [R]. AIAA 2010-3317.
- [6] GONG Y B, CHEN S F. Multi Attribute Decision-making Based on Subjective and Objective Integrated Eigenvector Method [J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2007, 23(1): 144-147.
- [7] XUAN Y B, HUANG C Q, LI W X. Air Combat Situation Assessment by Gray Fuzzy Bayesian Network, [J] Applied Mechanics and Materials, 2011, 69: 114-119.
- [8] 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): 13-20.
ZHOU S Y, WU W H, QU Z G, et al. Analysis of Air Combat Situation Assessment Based on Nonparametric Methods [J]. Aeronautical Computing Technique, 2011, 41(4): 13-20. (in Chinese)
- [9] 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.
GU J J, LIU W H, JIANG W Z. WVR air Combat Situation Assessment Model Based on Weapon Engagement Zone and Kill Probability [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(6): 1306-1312. (in Chinese)
- [10] 李战武, 常一哲, 杨海燕, 等. 基于威力场的协同空战态势评估模型研究 [J]. 系统仿真学报, 2015, 40(10): 1722-1727.
LI Z W, CHANG Y Z, YANG H Y, et al. Situation Assessment Method for Cooperative Air Combat Based on Dynamic Combat Power Field [J]. Journal of System Simulation, 2015, 40(10): 1722-1727. (in Chinese)
- [11] 周焘, 任波, 于雷. 基于威力场的空战分析建模 [J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 738-745.
ZHOU T, REN B, YU L. Modeling of Air Combat Analysis Based on Combat Power Field [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(2): 738-745. (in Chinese)
- [12] 周焘, 任波, 于雷. 战斗机指挥引导中的威力场模型 [J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(9): 84-91.
ZHOU T, REN B, YU L. The Model of Combat Power Field Applied in Fighter Command Guidance [J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(9): 84-91. (in Chinese)
- [13] 朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.
ZHU B L, ZHU R C, XIONG X F. Operational Aircraft Effectiveness Assessment [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993. (in Chinese)
- [14] 石晓光, 王彬. 红外系统 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2005.
SHI X G, WANG L. Infrared System [M]. Beijing: Weapons Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [15] 孙晓泉, 吕跃广. 激光对抗原理与技术 [M]. 北京: 解放军出版社, 2000.
SUN X Q, LYU Y G. Laser Countermeasures Principle and Technology [M]. Beijing: PLA Press, 2000. (in Chinese)
- [16] 王青, 端木京顺, 甘旭升, 等. 考虑气象因素的飞机空战能力评估模型 [J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(6): 39-43.
WANG Q, DUANMU J S, GAN X S, et al. A Model for Air Combat Capability Assessment with Consideration of Weather Condition [J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(6): 39-43. (in Chinese)
- [17] 常虹. 反辐射导弹对地面噪声干扰机的命中概率分析 [D]. 太原: 中北大学, 2006.
CHANG H. The Probability Analysis of the Anti-radiation Missile on the Ground Noise Jamming Machine [D]. Taiyuan: Zhongbei University, 2006. (in Chinese)
- [18] 杨哲, 李曙林, 周莉, 等. 飞机作战生存力设计参数灵敏度分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(8): 1096-1101.
YANG Z, LI S L, ZHOU L, et al. Design Parameters Sensitivity Analysis of Aircraft Survivability [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(8): 1096-1101. (in Chinese)
- [19] 《中国航空百科全书》编辑部. 中国航空百科全书 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.
Editorial Department of the Chinese Aviation Encyclopedia. The Chinese Aviation Encyclopedia [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)