双机编队的对地攻击效能分析

孙康文 黄 俊 武 哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 双机编队是空防体系对抗中一种主要的作战模式,其目的是为了更有效地打击敌战略目标. 通过采用概率论中常用于效能评估的马尔柯夫随机过程理论,建立了双机编队条件下对敌对战略目标进行攻击的战场想定和数学模型,推导出任务成功率、目标被毁率和飞机损失率等作战效能指标的计算公式. 最后,通过生存力扩展因子的引入,在比较双机独立和双机编队相关效能指标的基础上指出了双机编队的作战优势.

关 键 词: 双机编队; 作战效能; 概率论; 马尔柯夫随机过程; 生存力扩展因子

中图分类号: V 271.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)06-0625-05

Operational effectiveness analyses of air-to-ground strike for two-plane formation

Sun Kangwen Huang Jun Wu Zhe

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Two-plane formation is a main organization of the battle mode in the rivalry of air defense, which can fight the enemy's strategic target more effectively. By using Markov random processes, a method of probability, which usually can be used in the evaluation of system's effectiveness, the prediction of battle field and the mathematics model under the condition of two-plane formation which attacked the enemy strategic target in a threat environment were built. The operational effectiveness measures of the two-plane formation, including the probability of mission success, the probability that the target was killed and the probability that the aircraft was killed for an air-to-ground target attacking operation were deduced. Finally, by introducing viability enhanced quotient in an instance, the superiority of two-plane formation in attacking the enemy strategic surface target in a dangerous environment was validated by means of the comparison between two-plane interindependence and two-plane formation in their relative effectiveness measures.

Key words: two-plane formation; operational effectiveness; probability; Markov random processes; viability enhanced quotient

飞机的作战效能是指其在确定的作战环境中完成具体战斗任务的能力. 对作战效能进行评估不仅可以评价飞机本体方案、机载设备系统方案的优劣以及飞机作战能力的高低,而且是飞机综合概念设计及机群综合理论的基础[1]. 通过近几十年的发展,它已成为现代飞机设计中不可缺少的重要步骤之一.

双机编队是空防对抗中一种主要的编队作战模式. 在对抗条件下,针对单机作战效能的评估方法很多[1-6],而对双机编队空-地作战效能的评估仍处在发展阶段[7]. 双机编队空-地作战效能评估是单机空-地作战效能评估方法的拓展,也是航空综合体作战效能评估的基础.

本文对双机编队对地攻击效能的分析,以马尔柯夫随机过程理论为基础,通过建立双机编队的攻击机在指定的威胁环境条件下对一地面重要

收稿日期: 2005-07-14

作者简介: 孙康文(1980-),男,安徽合肥人,博士生,sunkw100@ase.buaa.edu.cn.

战略目标实施攻击的动态数学模型,将对任务的成功率、目标的被毁率和飞机损失率等作战效能指标进行分析.

1 对地攻击数学模型的建立

在此建立一个不含非常规武器和空中拦截的常规战场想定,即两架对地攻击飞机以计划好的飞行作战剖面和战术对一地面目标进行战略打击.假定地面目标自身没有防卫能力,但它拥有包括早期预警雷达、炮瞄雷达、地空导弹搜索和跟踪雷达在内的地空导弹和防空高炮防御系统,并假定地面目标与其防卫火力之间相互独立,同时假定两架飞机型号相同且在对地攻击时可相互支援(信息共享、战斗救援).攻击机起飞后经过一段时间进入作战区域,即被敌雷达探测到且地面目标的防空武器系统进入启动状态;然后攻击机搜索、识别、定位和攻击目标,作战过程以攻击机脱离威胁区域结束,不考虑攻击机在飞抵战区过程中由于非战斗原因终止任务的情况.

将双机编队的攻击机飞抵作战区域并开始受到敌方威胁的时刻 t_0 作为时间起始点.设攻击过程中对目标的搜索、识别、定位和攻击的时间服从参数为 μ 的负指数分布,并假定攻击机捕获到目标后即开火,则在 $(t,t+\Delta t)$ 间隔内目标被捕获并被攻击的概率为 $\mu\Delta t$.令 $P_{目}$ 为目标受一次攻击后被击毁的概率,从而一次打击后目标存活的概率为 $(1-P_{目})$.另一方面,一旦攻击机进入战区即暴露在敌防空系统的威胁之中,设敌人的威胁为一个强度为 λ 的泊松过程,略去时间微量 Δt 内发生攻击机遭遇一次以上威胁的事件,则在 $(t,t+\Delta t)$ 间隔内单架攻击机攻击时受到一次威胁的概率为 $\lambda\Delta t$.设 $P_{机}$ 为攻击机遭遇一次威胁后被击毁的概率,则受到威胁后攻击机仍然生存的概率为 $(1-P_{机})$.并假定在进入战斗区域后两架攻击机在任意时刻 t 对目标的攻击概率是相同的、敌防空武器在任意时刻对两架攻击机的威胁概率也是相同的.

下面用 $m(m=0,1)$ 和 $n(n=0,1,2)$ 分别表示地面目标和攻击机的状态:"0"表示"击毁",而"1"表示"一架攻击机或目标生存","2"表示"两架攻击机均生存",参数为连续的战斗时间 t.用 $P(m,n,t)$ 表示在 t 时刻目标和攻击机处于规定状态的概率,则

$$P(0,0,t)+P(0,1,t)+P(0,2,t)+P(1,0,t)+P(1,1,t)+P(1,2,t)=1 \quad (1)$$

在 $t=0$ 时刻,有

$$\left.\begin{aligned} P(1,1,0)&=2A(1-A)\\ P(1,2,0)&=A^2\\ P(0,2,0)&=0\\ P(1,0,0)&=(1-A)^2\\ P(0,0,0)&=0\\ P(0,1,0)&=0 \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

式中 A 为作战飞机的战备良好率.

假定在任意 $t>0$ 的时刻战斗仍进行,则在 $t+\Delta t$ 时目标和两架攻击机均生存的概率为

$$\begin{aligned} P(1,2,t+\Delta t)=&P(1,2,t)(1-\mu\Delta t)\cdot(1-\lambda\Delta t)^2+2P(1,2,t)(1-\mu\Delta t)\cdot\\ &\lambda\Delta t(1-P_{机})(1-\lambda\Delta t)+P(1,2,t)(1-\mu\Delta t)\cdot[\lambda\Delta t(1-P_{机})]^2+P(1,2,t)\mu\Delta t\cdot\\ &(1-P_{目})(1-\lambda\Delta t)^2+2P(1,2,t)\mu\Delta t\cdot(1-P_{目})\lambda\Delta t(1-P_{机})(1-\lambda\Delta t)+\\ &P(1,2,t)\mu\Delta t(1-P_{目})\cdot[\lambda\Delta t(1-P_{机})]^2+o(\Delta t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $o(\Delta t)$ 表明战斗是一连续的过程.在式(3)两边同时减去 $P(1,2,t)$ 并略去高阶小量后,令 $\Delta t\to 0$ 时可得

$$\mathrm{d}P(1,2,t)=-P(1,2,t)(\mu tP_{目}+2\lambda tP_{机})\mathrm{d}t \quad (4)$$

令 $\alpha=\lambda P_{机}$,$\beta=\mu P_{目}$,解式(4),并代入 $A=1$ 的初始条件式(2)可得

$$P(1,2,t)=\exp[-(2\alpha+\beta)t] \quad (5)$$

通过同样的方法可得

$$P(1,1,t)=2[1-\exp(-\alpha t)]\exp[-(\alpha+\beta)t] \quad (6)$$

$$P(1,0,t)=-\frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)(2\alpha+\beta)}-\frac{\alpha}{\alpha+\beta}\exp[-(\alpha+\beta)t]+\frac{2\alpha}{2\alpha+\beta}\exp[-(2\alpha+\beta)t] \quad (7)$$

$$P(0,1,t)=\{1-2\exp(-\alpha t)-\exp(-(\beta t)+2\exp[-(\alpha+\beta)t]\}\exp(-\alpha t) \quad (8)$$

$$P(0,2,t)=[1-\exp(-\beta t)]\exp(-2\alpha t) \quad (9)$$

$$P(0,0,t)=\frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)(2\alpha+\beta)}-\exp(-\alpha t)+\exp(-2\alpha t)+\frac{\alpha}{\alpha+\beta}\exp[-(\alpha+\beta)t]-\frac{2\alpha}{2\alpha+\beta}\exp[-(2\alpha+\beta)t] \quad (10)$$

2 双机编队的对地攻击效能指标

2.1 任务成功率

任务成功率定义为目标被摧毁而两架攻击机

均没有被击落的概率,即

$$E_{MS} = P(0,2,t) = [1 - \exp(-\beta t)]\exp(-2\alpha t) \tag{11}$$

式中 E 为效能指标,下标 MS 表示任务成功. 因为攻击机作战的主要目的是在击毁目标的同时尽可能地保存自己,所以在此选 $P(0,2,t)$ 作为衡量任务成功率的指标.

2.2 目标被毁率

目标被毁率定义为目标被击毁而两架飞机均生存或有一架生存的概率和目标与两架飞机均被击毁的概率之和,即

$$E_{TK} = P(0,2,t) + P(0,1,t) + P(0,0,t) = \frac{\alpha\beta}{(\alpha+\beta)(2\alpha+\beta)} - \frac{\beta}{\alpha+\beta}\exp[-(\alpha+\beta)t] + \frac{\beta}{2\alpha+\beta}\exp[-(2\alpha+\beta)t] \tag{12}$$

式中下标 TK 表示目标被击毁.

2.3 飞机损失率

飞机损失率定义为目标生存而两架攻击机被击毁的概率和目标被毁一架攻击机生存的概率以及目标和两架攻击机均被毁的概率之和,即

$$E_{AK} = P(1,0,t) + P(0,1,t) + P(0,0,t) = -\exp(-2\alpha t) - \exp[-(\alpha+\beta)t] + 2\exp[-(2\alpha+\beta)t] \tag{13}$$

式中下标 AK 表示飞机被击落.

3 双机编队对地攻击效能评估准备

要对上述性能指标进行分析,需首先确定以下 4 个关键参数:$P_{目}$,$P_{机}$,λ,μ.

3.1 攻击机遭遇威胁被击毁的概率

单机作战的情况下,攻击机遭遇单个威胁被击毁概率表示为

$$P_{机} = P_T \cdot P_F \cdot P_{KS} \tag{14a}$$

对于双机编队模式下两架型号相同且具有相互支援能力的战斗机对敌攻击的情况,可引入一新的因子——战斗机生存力扩展因子 $w(0 \leqslant w \leqslant 1)$,它表示受到威胁时、在相互支援的情况下攻击机的平均生存概率,该因子的具体数值可通过专家经验获得或通过一定量的空战模拟实验后应用概率统计的方法得到. 则双机偏队模式下攻击机遭遇单个威胁被击毁概率表示为

$$P_{机} = P_T \cdot P_F \cdot P_{KS}(1 - w) \tag{14b}$$

式(14)中 P_T 为攻击机被地面目标防空雷达探测到的概率,可以采用式(15)进行计算[8].

$$P_T = 1 + \int_1^{P_n} e^{-(S/N)} J_0[-4(S/N)] \ln u \, du \tag{15}$$

式中,P_n 为虚警概率,J_0 为零阶贝塞尔函数,S/N 为信噪比;P_F 为目标防御系统向攻击机发射威胁体的概率;P_{KS}为攻击机的单发击毁概率,对触发式或无引信弹头用圆库克-卡特击中函数表示为[5]

$$P_{KS} = \frac{A_V}{2\pi\sigma_r^2 + A_P} \tag{16}$$

式中 A_V 和 A_P 分别为攻击机的易损面积和迎击面积.

对近炸弹头用圆库克-卡特击中函数表示为[5]

$$P_{KS} = \frac{r_0^2}{2\sigma_r^2 + A_P} \cdot P_f \tag{17}$$

式中,P_f 为引信的引爆概率;比例参数 r_0 与弹头杀伤半径 r_1 有关,一般取 $r_0 = 1.2r_1$;σ_r 为所攻击地面目标的防空武器系统总的脱靶距离标准差,它主要取决于防空系统中雷达跟踪和火控/制导精度,并有 $\sigma = 1.1774\sigma_r$(σ 表示制导武器的圆概率误差),攻击机机载电子攻击对其会产生较大影响. 跟踪精度的主要影响因素是热噪声和目标的闪烁,机载电子攻击设备不仅能削弱雷达制导武器系统的命中精度, 还能降低雷达的探测概率. 当 $N(N>1)$ 个同类威胁体同时射向战斗机时,有

$$P_{KSN} = 1 - \prod_{i=1}^{N}(1 - P_{KSi})$$

此时

$$P_{机} = P_T \cdot P_F \cdot P_{KSN}(1 - w) \tag{18}$$

当攻击机与 m 类不同的防空武器系统遭遇时,攻击机被击毁概率为

$$P_{机} = 1 - \prod_{i=1}^{N}(1 - P_{KSi})(1 - w) \tag{19}$$

3.2 地面目标受攻击后被击毁的概率

攻击机向地面目标发射武器后,目标被击毁的概率可以根据式(20)计算.

$$P_{目} = P_M \cdot F \tag{20}$$

式中,P_M 为武器命中精度;F 为目标毁伤系数,定义为当量打击能力指数与目标承受能力指数之比,向目标投射 N 类不同的武器时,目标被击毁的概率可用式(21)表示.

$$P_{目} = 1 - \prod_{i=1}^{N}(1 - P_{Mi} \cdot F_i) \tag{21}$$

由于不同目标的易损性评估是非常复杂的,因此引入"目标承受能力指数",它是一个与攻击目标所用武器的打击能力指数有关的相对概念,能反

映地面目标的毁伤系数. 其表达形式为

$$A_{目} = A_{基} \cdot P_{基} / P_{目} \tag{22}$$

式中,$A_{目}$,$A_{基}$ 分别为任意目标和基准目标的承受能力指数;$P_{基}$,$P_{目}$ 分别为任意目标和基准目标的被击毁概率.

3.3 频率指标[5]

λ 的物理意义是单位时间内攻击机被所攻击地面目标的防卫系统探测、识别和跟踪后,受到已发射的导弹或其它防空武器威胁的平均次数. 设攻击机进入战区后即受到目标防空火力系统的雷达探测,则攻击机遭遇一次威胁的时间为

$$\lambda^{-1} = t_{S1} + t_T + t_R + t_F \tag{23}$$

式中,t_{S1}为搜索雷达发现攻击机时间;t_T 为搜索雷达与跟踪雷达体制转换时间;t_R 为武器系统待发和判断射击准备时间;t_F 为威胁体飞行时间.

μ 的物理意义是单位时间内攻击机对目标实施攻击的平均次数,设攻击机进入战区后即开始执行任务,则有

$$\mu^{-1} = t_{S2} + t_I + t_L + t_A \tag{24}$$

式中,t_{S2}为攻击机搜索目标的时间; t_I 为识别目标的时间;t_L 为定位目标的时间;t_A 为攻击目标一次所用的时间.

上述参数中涉及的各时间量可通过查阅相关数据记录或经过一定量的作战模拟应用概率统计的方法获得.

4 算例分析

首先作定性分析,比较单架攻击机攻击地面目标与两架攻击机同时攻击目标的攻击结果的区别:假定对于一给定的地面目标,要想对其进行毁灭性的打击需要两架飞机的载弹量对其实施有效攻击. 在单架攻击机执行这项任务的情况下,飞机将其自身的所有武器载荷向攻击目标投放后需返回基地进行弹药补充. 而在此过程中,地面目标将会进行自我修复,这时,原本只需两架飞机的载弹量就可以毁灭的地面目标,很可能需要单架飞机起降3次甚至更多次才能给其致命性的打击. 但是,对于两架飞机同时攻击的情况,只须1次起降便可解决问题. 从而表明对于单架次无法摧毁的地面目标,两架飞机同时攻击对比于单架飞机攻击,一方面增加了飞机的生存率,另一方面也有效地节约了攻击成本.

下面对两架飞机同时攻击一地面目标的情况作定量分析:假想一双机编队的战斗机群向一敌方地面战略要地发动袭击,该要地拥有典型的早期预警雷达警戒,并用部署在附近的雷达引导地空导弹和配有炮瞄雷达的防空高炮防卫. 战斗中所使用的各种武器装备的相关数据如下:高炮的有效射程为3 000 m并以1 200发/min的速度射击带触发引信的高爆炮弹;地空导弹的有效射程为25 km,其弹头装有近炸引信;系统的预警时间为4.5 min,搜索雷达探测到来袭飞机后的发射准备时间为25 s;高炮和地空导弹系统的 σ 均为10 m,而且近炸弹头的 $r_1 = 12$ m;雷达散射截面RCS值为1 m^2 并带雷达干扰机的攻击飞机的 $A_P = 120$ m^2,$A_V = 4$ m^2,携带6 000 kg常规炸弹,以5 km的飞行高度和720 km/h的速度突防,俯冲到500 m高度向目标投射炸弹,任务完成后返回基地. 同时,令防空系统每次发射一枚导弹和向飞机射击50发有效炮弹.

根据对数法[9]计算出攻击机的当量打击能力指数 $C_{机} = 13.3$,预估要地的 $A_{目} = 6$,飞机一次向要地投弹1 200 kg,设 $P_M = 0.9$,则地面目标受一次打击后 $E_{TK} = 0.399$. 设 $\mu^{-1} = 9$ min,$\lambda = 3.2$ h^{-1},$w = 0.3$,则两架飞机相对独立地对地面目标实施攻击时的作战效能指标曲线见图1实线部分,双机编队的战斗机群对地面目标实施攻击时的作战效能指标曲线见图1虚线部分.

图1可见,双机编队的联合攻击对比于两架相对独立飞机的攻击具有以下特点:

1) 在任务成功率和目标被毁率提高的同时使飞机损失率得以降低. 并且,根据公式(11)和公式(14b)可得生存力扩展因子 w 的线性变化会给任务成功率带来指数影响;

2) 在战斗中期,双机编队的效能指标明显优于两架相对独立攻击机的效能指标(任务成功率在 $t = 20$ min时差值最大,约为0.05),这充分说明了协同作战的重要性;

3) 战斗后期,双机编队的任务成功率有趋近于两架相对独立攻击机任务成功率的趋势. 这是

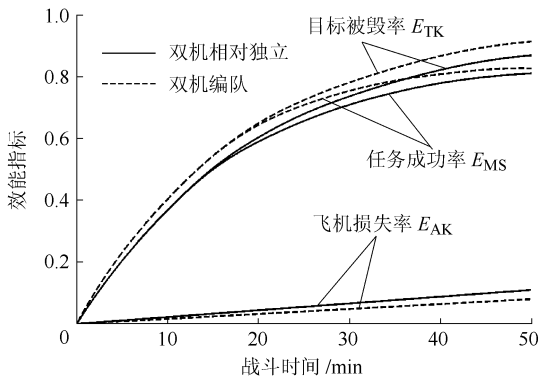


图1 攻击机的作战效能指标曲线

由于随着战斗时间的增长,两种情况都可能已处于单机作战的情况下. 同时,在给定 w 的条件下,两种情况下的目标被毁率的差值将趋于恒定.

5　结 束 语

首先对双机编队的对地攻击飞机的作战效能作了定性分析,指出了效能评估的 4 个输入参数与飞机的易损性、敏感性、机载设备效能、载弹量以及威胁环境等因素有关. 同时确定了双机编队下任务的成功率、目标被毁率和飞机损失率的一般表达式,可用于对双机编队的对地攻击效能的进一步分析之中. 此外,可以在式(5) ~式(10)的基础上导出其它效能指标,包括反映耗费得失的效能度量. 而后,对双机编队的对地攻击效能作定量分析,通过生存力扩展因子 w 的引入以及算例的分析不难看出,双机编队不但可以提升任务的成功率和攻击机的生存率,而且可以更加有效地打击敌地面目标. 这与“在有效打击敌方目标的同时最大限度地保存我有生力量”的现代化战争理念是完全相符的.

参考文献 (**References**)

[1] 艾剑良. 攻击机作战效能评估的顶层数学模型[J]. 飞行力学,1999,17(2): 19-24
Ai Jianliang. Top mathematical model for operational effectiveness analysis of attacker[J]. Flight Dynamics, 1999, 17(2): 19-24(in Chinese)

[2] Kish B A, Mittlestead D R, Wunderlich G, et al. Practical limits of supermaneuverability and full envelope agility [R]. AIAA96-3493, 1996

[3] Fielding J P, Nilubol O. A design assessment methodology for combat aircraft operational effectiveness[R]. AIAA Paper 2003-6551, 2003

[4] Al-Ahmed S, Fielding J. Integrating combat effectiveness disciplines into the conceptual/preliminary design process [R]. AIAA95-3904, 1995

[5] 黄俊,孙义东,武哲,等. 战斗机对地攻击作战效能分析[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(3):354-357
Huang Jun, Sun Yidong, Wu Zhe, et al. Operational effectiveness analyses of air-to-ground strike for battle-plane[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(3):354-357(in Chinese)

[6] Ray P T, Thomas D, Jeff S G. Impact of aircraft flight dynamics modeling technique on weapon system beyond-visual-range combat effectiveness[R]. AIAA Paper 2003-5689, 2003

[7] 邹俊,韩景倜,闫永刚,等. 对抗条件下双机编队空-地作战效能评估[J]. 电光与控制,2004,11(1):25-27
Zou Jun, Han Jingti, Yan Yonggang, et al. Evaluation of air-to-ground combat efficiency with two-plane formation under oppositing condition[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(1):25-27(in Chinese)

[8] Hovanessian S A. Radar detection and tracking system[M]. MA: Artech House Inc, 1973

[9] 朱宝鎏,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京:航空工业出版社,1993:64-91
Zhu Baoliu, Zhu Rongchang, Xiong Xiaofei. Assessments of effectiveness for aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993: 64-91(in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)