

作战飞机的空-地攻击效能评估

黄俊 武哲

(北京航空航天大学 513 教研室, 北京, 100083)

ASSESSMENTS OF A IR-TO-SURFACE TARGET ATTACKING EFFECTIVENESS FOR A COMBAT AIRCRAFT

Huang Jun, Wu Zhe

(Department of Aircraft Design and Applied Mechanics, Beijing University
of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

摘要 用概率方法建立了描述单一飞机在威胁环境中攻击一个地面被动目标的数学模型, 导出飞机对地攻击作战的任务成功率、目标被击毁率和飞机损失率等效能的表达式, 给出用于效能评估的有关事件发生概率的计算公式, 通过计算实例讨论了作战飞机空-地攻击效能的各种度量。

关键词 军用飞机 空-地攻击 作战效能

中图分类号 V 212.13, V 271.4

Abstract By using a probabilistic method, a mathematical model was established to describe a single aircraft attacking a single passive surface target in a threat environment. The expressions of the probability of mission success, the probability that the target is killed and the probability that the aircraft is killed for an air-to-surface target attacking operation were then deduced. The formulae for calculating the probability that the aircraft is killed once it encounters an enemy threat, the frequency that the aircraft encounters enemy threat, the probability that the target is killed once attacked by the aircraft and the mean time that the aircraft takes to acquire and attack the target are presented. Finally, various effectiveness measures of a combat aircraft in an air-to-surface attacking mission were discussed with a practical example.

Key words military airplane, air-to-surface target attacking, combat effectiveness

符号表

- t_0 - 时间参数, 飞机进入战区时为 0 时刻;
- p_2 - 目标受一次攻击被击毁的概率;
- μ^{-1} - 从 0 时刻到攻击目标的平均时间;
- p_1 - 飞机遭遇一次威胁被击毁的概率;
- λ - 飞机遭遇敌人威胁的频率;
- Π_0 - 飞机的可用度;

对飞机的空-地攻击特征进行分析、建模, 从而评估其效能, 不仅有助于现役武器系统的最优使用, 而且可用于支持新型作战飞机的发展和武器系统装备规划决策。

空对地攻击是指飞机在一个敌对环境中的对方威胁下攻击指定地(海)面目标的作战任务^[1]。本文考虑一架飞机攻击一个地面被动目标(自身不具防卫能力)的情况, 根据建立的随机数学模型, 导出效能度量的表达式。

1 飞机空-地攻击数学模型

飞机起飞后, 抵达战区的飞行时间为 t_0 , 下面

的分析以 t_0 时刻为时间始点, 并且不计飞机在此期间由于其他原因终止任务的概率。假定飞机搜索、识别和定位目标的时间服从参数为 μ 的负指数分布, 飞机捕获目标即向目标开火, 忽略攻击时间, 则在 $(t, t + \Delta t)$ 内目标被捕获和攻击的概率为 $\mu\Delta t$, 攻击后目标存活的概率为 $(1 - p_2)$ 。一旦飞机进入战区即暴露在敌人的威胁之中, 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 内飞机遭遇一次以上威胁的事件, 则在 $(t, t + \Delta t)$ 内飞机遭遇到一次威胁的概率为 $\lambda\Delta t$, 遭遇威胁后飞机生存的概率为 $(1 - p_1)$ 。另外被动目标独立于它的防卫火力。

把飞机对地攻击过程看作一个两状态连续参数马尔可夫链, 用 $i (i = 0, 1)$ 和 $j (j = 0, 1)$ 分别代表目标和飞机的状态, “0”表示“被击毁”, “1”表示“仍生存”, 则在 $t = 0$ 时 $P(i, j, 0)$ 为

$$\left. \begin{aligned} P(1, 1, 0) &= \Pi_0; & P(1, 0, 0) &= 1 - \Pi_0; \\ P(0, 1, 0) &= 0; & P(0, 0, 0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

设任意 $t > 0$ 时刻战斗仍进行, 则在 $t + \Delta t$ 时目标和飞机均生存的概率等于飞机没有遭遇威胁与目标未受攻击的概率、飞机未遭遇威胁与目标受到

攻击但仍存活的概率、飞机遭遇威胁而未被击毁与目标未受攻击的概率和飞机遭遇威胁而未被击毁与目标受到攻击但仍存活的概率之和^[1-3]

$$P(1, 1, t + \Delta t) = P(1, 1, t)(1 - \lambda \Delta t)(1 - \mu \Delta t) + P(1, 1, t)(1 - \lambda \Delta t)u \Delta t(1 - p_2) + P(1, 1, t)\lambda \Delta t(1 - p_1)(1 - \mu \Delta t) + P(1, 1, t)\lambda \Delta t(1 - p_1)\mu \Delta t(1 - p_2) + o(\Delta t) \quad (2)$$

式中的 $o(\Delta t)$ 反映战斗为连续过程, 两端减去 $P(1, 1, t)$, 略去右端高阶小量, 同除 Δt , 上式变成一个一阶微分方程。令 $\alpha = \lambda p_1$, $\beta = \mu p_2$, 并取式(1)中的 $\Pi_0 = 1$ 作为初始条件, 解方程得

$$P(1, 1, t) = \exp[-(\alpha + \beta)t] \quad (3)$$

类似地可得

$$P(1, 0, t) = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \{1 - \exp[-(\alpha + \beta)t]\} \quad (4)$$

$$P(0, 1, t) = \exp(-\alpha t) [1 - \exp(-\beta t)] \quad (5)$$

$$P(0, 0, t) = 1 - \exp(-\alpha t) -$$

$$\frac{\alpha}{\alpha + \beta} \{1 - \exp[-(\alpha + \beta)t]\} \quad (6)$$

2 飞机空-地攻击效能

(1) 任务成功率 有两种定义, 即飞机生存概率

$$E_{MS(AS)} = P(1, 1, t) + P(0, 1, t) = \exp(-\alpha t) \quad (7)$$

和飞机生存与目标被击毁的概率

$$E_{MS(AS\&TK)} = P(0, 1, t) = \exp(-\alpha t) [1 - \exp(-\beta t)] \quad (8)$$

把后者定为任务成功率比较恰当, 记为 E_{MS} 。

(2) 目标被击毁率

$$E_{TK} = P(0, 1, t) + P(0, 0, t) = \frac{\beta}{\alpha + \beta} \{1 - \exp[-(\alpha + \beta)t]\} \quad (9)$$

(3) 飞机损失率

$$E_{AK} = P(1, 0, t) + P(0, 0, t) = 1 - \exp(-\alpha t) \quad (10)$$

可见 $E_{AK} = 1 - E_{MS(AS)}$ 。

3 飞机空-地攻击效能计算输入准备

(1) 飞机遭遇一次威胁被击毁的概率^[4] 飞机已被敌方雷达探测到并且已发射了一发炮弹或一枚导弹攻击飞机, 此时飞机被击落的概率为

$$P_K = \int r(x, y) P_f(x, y) V(x, y) dx dy \quad (11)$$

其中: $r(x, y)$ 为导弹或炮弹的脱靶距离分布函

数; $P_f(x, y)$ 为高爆弹头的引爆概率; $V(x, y)$ 为当弹头飞行轨迹在 (x, y) 点与拦截平面交会时, 定义飞机被击落概率的毁伤函数。对触发式引信弹头(或无引信炮弹)

$$P_K = \frac{A_V}{(2\pi\sigma_x^2 + x_0^2)^{1/2} (2\pi\sigma_y^2 + y_0^2)^{1/2}} \cdot \exp\left[-\frac{\pi u_x^2}{2\pi\sigma_x^2 + x_0^2} - \frac{\pi u_y^2}{2\pi\sigma_y^2 + y_0^2}\right] \quad (12)$$

或

$$P_K = \left[1 - \exp\left[-\frac{A_P}{2\pi\sigma_r^2}\right]\right] \frac{A_V}{A_P} \quad (13)$$

式中: A_V 为飞机的易损面积; A_P 为飞机的迎击面积, 对近炸式引信弹头

$$P_K = \frac{r_0^2}{2\sigma_r^2 + r_0^2} P_f \left[1 - \exp\left[-\frac{2\sigma_r^2 + r_0^2}{2\sigma_r^2 r_0^2} r_c^2\right]\right] \quad (14)$$

式中: $r_0 = 1.2r_l$ (r_l 为弹头对飞机的有效杀伤半径, 与 A_V 有关); P_f 为引信的引爆概率; $\sigma_r = CEP/1.177$ (CEP 为圆概率偏差); r_c 为弹头脱靶距离。

当 N 个同类威胁物体同批射向飞机时

$$P_{KN} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{K/i}) \quad (15)$$

而飞机与不同的 m 类威胁物体遭遇时

$$p_1 = 1 - (1 - P_{KN1})(1 - P_{KN2}) \dots (1 - P_{KNm}) \quad (16)$$

(2) 飞机遭遇敌人威胁的频率^[2,5,6] λ 为单位时间内飞机被所攻击目标的防卫力量探测、识别和跟踪后, 受到已发射的导弹或其他损伤机理威胁的次数。设飞机进入战区即受目标防空火力的搜索雷达探测, 则飞机遭遇一次威胁的时间为

$$\lambda^{-1} = t_s + t_r + t_{tr} + t_F \quad (17)$$

式中: t_s 为搜索雷达发现目标的时间, 取决于雷达性能, 飞机的距离、高度、速度, 光照度以及气候条件等; t_r 为搜索雷达与跟踪雷达体制转换时间; t_{tr} 为武器系统待发准备和判断射击准备时间; T_F 为威胁体飞行时间。

(3) 目标受一次攻击被击毁的概率^[7] 飞机投放武器后, 目标被击毁的概率为

$$p_2 = P_w F \quad (18)$$

式中: P_w 为武器命中精度; F 为目标毁伤系数, $F = \text{投弹量}/\text{目标承受能力}$, 当飞机向目标投放不同的武器时

$$p_2 = 1 - (1 - P_{w1}F_1)(1 - P_{w2}F_2) \dots (1 - P_{wn}F_n) \quad (19)$$

(4) 飞机搜索、识别和定位目标的平均时间^[4]

μ^{-1} 与机载导航和瞄准设备、座舱视场、机载雷达的下视能力和其他辅助电光设备等有关。

4 效能评估

飞机攻击一个地面目标, 目标承受能力为 3t 常规炸弹, 飞机一次投弹量 2t, 命中精度 0.75。目标由高炮和 SAM 导弹防御, 高炮一次射击 20 发, 触发炮弹的弹着点偏差均值 $\mu_x = \mu_y = 6m$, 标准差 $\sigma_x = \sigma_y = 3m$, 易损面积 $A_v = x_0 y_0 = 6m^2$ 且设 $x_0 = y_0$; SAM 导弹一次发射 2 枚, 近炸弹头的有效杀伤半径 $r_l = 10m$, CEP = 20m, $P_f = 1$, $r_c = 50m$ 。由式(12)和式(15)计算炮弹击毁飞机的概率, 式(14)和式(15)计算导弹击毁飞机的概率, 再由式(16)得 $p_1 = 0.3916$ 。由式(18)算出 $p_2 = 0.5$ 。取 $\lambda^{-1} = 15min$, $\mu^{-1} = 6min$, 算得 E_{MS} , E_{TK} 和 E_{AK} 随攻击时间的变化曲线(见图 1); 固定攻击时间 t , 效能随飞机易损面积的变化见图 2; 通过减缩飞机的敏感性, 可以增加敌方雷达发现飞机的时间, 效能随 λ^{-1} 的变化示于图 3。

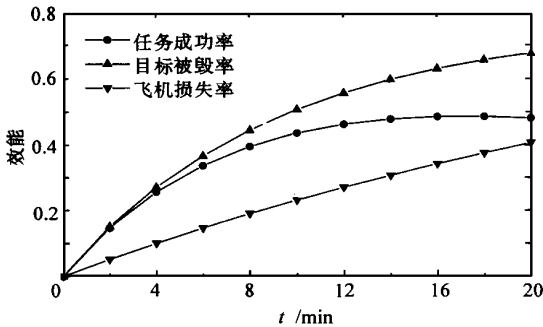


图 1 效能随攻击时间的变化

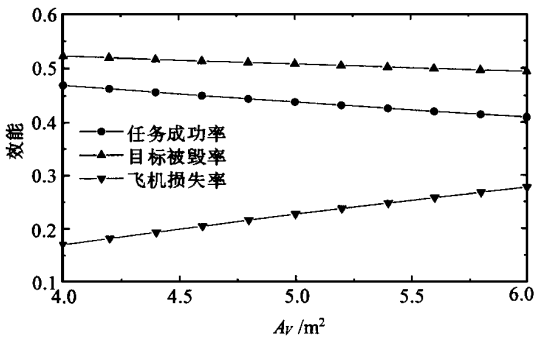


图 2 飞机易损面积对效能的影响

5 结束语

(1) 效能评估的 4 个输入参数取决于飞机的生存性(易损性和敏感性)、机载设备效能、载弹量及威胁环境, 具有全面、客观的特点。

(2) 任务成功率、目标被毁率和飞机损失率

可用于评估现役作战飞机的空地攻击效能和优选攻击作战时间, 也有助于新型作战飞机的发展规划作出决策。

(3) 这些效能度量都与费用无关, 但在式(3)~式(6)基础上, 根据需要还能导出其他指标, 包括反映耗费得失的效能度量。

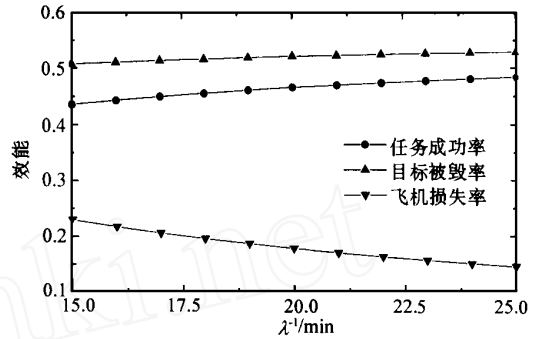


图 3 遭遇威胁时间对效能的影响

参 考 文 献

- 1 Sivazlian B D. Aircraft sortie effectiveness model AD-A 211594, 1989
- 2 Przemieniecki J S. Mathematical methods in defense analyses New York: AIAA Inc, 1994. 129~ 161
- 3 俞钟祺, 马秀兰. 随机过程理论及其应用. 天津: 天津科学技术出版社, 1996
- 4 Ball R E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design New York: AIAA Inc, 1985. 315~ 326
- 5 李廷杰. 射击效率. 北京: 北京航空学院出版社, 1987
- 6 马东立. 飞机生存力评估与敏感性减缩设计: [学位论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1996
- 7 朱宝鏊, 朱荣昌, 熊笑飞. 作战飞机效能评估. 北京: 航空工业出版社, 1993. 73~ 81



黄 俊, 34 岁, 北京航空航天大学飞机设计专业博士生, 011 基地第一设计所高级工程师。主要研究兴趣有: 飞机总体设计、机械系统设计, 最优化, 航空武器系统效能分析, 战争对抗和作战模拟等。联系电话: 010-62017251-7524。



武 哲, 1957 年 2 月 10 日生, 1988 年获工学博士学位, 1991 年博士后出站, 北京航空航天大学飞行器设计专业教授、博士生导师。曾任飞行器设计与应用力学系主任, 现任北京航空航天大学副校长。主要研究领域为飞机总体和结构设计, 侧重于飞行器隐身技术。