

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.09.003

人-机作战系统对地攻击作战效能模型

张毅¹, 姜青山²

(1. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 指挥系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对以往只考虑静态作战效能或者只考虑动态作战效能, 以及难以量化分析人对作战效能的影响的弊端, 综合考虑单机对地攻击的静态作战效能和动态作战效能, 引入人对作战效能的影响因素, 得出人-机作战系统对地攻击的作战效能模型。给出一个算例说明运用该数学模型分析攻击机作战效能的方法。结果表明, 在对地攻击作战效能评估的分析中, 摒弃了以往只考虑静态作战效能或者只考虑动态作战效能的弊端, 可为对地攻击作战效能的研究提供参考。

关键词: 模型; 作战效能; 对地攻击; 人-机系统**中图分类号:** N945.12; V271.4 **文献标识码:** A

Air-To-Ground Strike Effectiveness Model for Person-Attacker System

Zhang Yi¹, Jiang Qingshan²(1. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Dept. of Command, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Operational effectiveness of attacker is considered for static state or dynamic state separately, and it's difficult to analyze person's influence with quantity. Synthesize the single attacker's state effectiveness and dynamic state effectiveness, and consider person's influence factor at the same time to get an operational effectiveness model of person-attacker system. One example is introduced for explaining the using of this mathematical model. The result shows that the model eliminates shortfall of considering static state or dynamic state effectiveness only and it can provide reference for air-to-ground strike operational effectiveness.

Keywords: model; operational effectiveness; air-to-ground strike; person-attacker system

0 引言

由于攻击机携带武器不同、打击目标类型多样、战场环境复杂等多方面的原因, 对地攻击作战效能的研究较为复杂。文献[1]建立了编队对地攻击航空武器系统作战效能分析的总体指标和框架, 并给出了总体指标和各飞行阶段的效能指标关系; 文献[2]从突防效能、电子战效能、攻击效能和协同能力 4 个因素入手, 研究了攻击机编队总体作战效能模型; 文献[3]分析了任务成功率、目标被毁率和飞机损失率 3 个对地攻击效能指标, 并重点对影响效能指标的因素进行了灵敏度分析; 文献[4]以模糊理论为基础, 给出了对各类地面目标射击时的靶场效能模糊型指标算法; 文献[5]运用全概率分析方法, 建立了对地攻击的动态模型, 并给出任务成功率、目标被毁率等指标的数学模型; 文献[6]用概率方法导出了单一飞机在威胁环境下对地作战的任务成功率、目标被毁率和飞机损失率等效能指标的表达式, 并给出用于效能评估的有关事件发生概率的计算公式; 文献[7]对飞机作战效能评估中人的作用的引入方法进行了探讨和研究, 得出一些有益的结论; 文献

[8]提出用对数法评估作战飞机效能。

从现有研究成果可以看出, 对地攻击作战效能的研究主要集中在对单机或编队在静态条件下或攻防对抗条件下的研究。故在前人研究成果的基础上, 综合考虑单机对地攻击的静态作战效能和动态作战效能, 引入人对作战效能的影响因素, 得出人-机作战系统^[9]对地攻击的作战效能模型。

1 人-机作战系统作战效能的含义

武器系统的作战效能可定义为^[10]: 预期一个系统能满足一组特定任务要求的程度。任何武器装备作战效能的充分发挥都离不开人的参与, 把同时包含武器装备系统本身和人为因素的系统称为人-机作战系统。作战系统的结构层次为: 武器本身→人-机作战系统→作战群体。其中, 每一层次本身就是一个完整的系统, 具有特定的作战效能, 组合方式不同, 它对上层系统作战效能的影响也不同, 各层次系统效能之间存在复杂的关联影响。

2 单机对地攻击作战效能模型分析

2.1 静态条件下单机对地攻击作战效能模型

静态条件下的对地攻击作战效能是指: 在不考

收稿日期: 2010-03-02; 修回日期: 2010-05-07

作者简介: 张毅(1979-), 男, 安徽人, 博士生, 工程师, 从事航空兵战术研究。

考虑敌方对抗和其它外部因素(如飞行员个体差异、战场环境、气象条件、战术运用等)的条件下, 攻击机本身所固有的打击地面目标的能力。故对文献[8]所给的对地攻击作战效能模型做出改进, 则静态条件下单机对地攻击作战效能 $D_{\text{静}}$ 的数学模型为:

$$D_{\text{静}} = \left[\ln^{(R \times P_e \times R_m \times P_n)} + \ln^{(W_B \times P_a)} \right] \varepsilon_4 \quad (1)$$

式中: $D_{\text{静}}$ 为静态条件下单机对地攻击作战效能; R 为攻击机最大航程; P_e 为攻击机突防系数; R_m 为攻击机远程武器系数; P_n 为攻击机导航能力系数; W_B 为攻击机最大载弹量; P_a 为攻击机对地攻击效率系数; ε_4 为电子对抗能力系数。

其中:

$$P_e = \frac{1}{6} \times (n_{y\max}/9) + \frac{5}{12} \times (100/H_{\text{突}}) + \frac{5}{12} \times (V_{\text{突}}/1200) \quad (2)$$

$$R_m = 1 + (\text{武器射程}/3) \times K_{\text{武}} \times \sqrt{n} \quad (3)$$

$$P_a = 0.2 \times \text{挂架数量}/15 + 0.4 \times (\text{武器精度系数} + \text{发现目标能力系数}) \quad (4)$$

式(2)、式(3)、式(4)中, $n_{y\max}$ 、 $H_{\text{突}}$ 和 $V_{\text{突}}$ 分别是攻击机最大允许过载、最低突防高度和最大突防速度; $K_{\text{武}}$ 为武器品种修正系数; n 为射程最大的武器数量。

2.2 动态条件下单机对地攻击作战效能模型

动态条件下单机对地攻击作战效能是指考虑攻防对抗情况下, 攻击机所具有的打击敌地面目标的能力。为简化分析, 特选取与动态作战效能密切相关的效能指标: 目标平均被毁率^[3,5,6]来度量单机动态作战效能。战场基本想定是一架对地攻击机, 以计划好的战术对敌地面目标进行打击。敌地面目标自身没有防卫能力, 但它拥有地空导弹和高炮防御系统, 并假定地面目标与其防卫火力之间相互独立。攻击机起飞后经一定时间进入战区(记此时刻为 0 时刻), 也就是被敌雷达探测到而且地面的防空武器系统进入启动状态。然后, 攻击机搜索、定位、识别和攻击目标, 作战过程以攻击机脱离敌防空火力威胁圈结束(记此时刻为 T 时刻)。不考虑敌战斗机的拦截和攻击机在飞抵战区过程中由于非战斗原因而终止任务的情况, 则动态条件下单机对地攻击作战效能 $D_{\text{动}}$ 的数学模型为:

$$D_{\text{动}} = \frac{\beta}{\alpha + \beta} T + \frac{\beta}{(\alpha + \beta)^2} \left[e^{-(\alpha + \beta)T} - 1 \right] \quad (5)$$

式中: $D_{\text{动}}$ 为动态条件下单机对地攻击作战效能; α 为攻击机每分钟遭遇威胁并被损毁的次数; β 为攻击机每分钟对目标进行攻击并成功击毁目标的次数; T 为攻击机执行作战任务的持续时间(单位为分钟)。

其中:

$$\begin{cases} \alpha = \lambda P_1 \\ \beta = \mu P_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: λ 为每分钟攻击机遭遇敌人威胁的平均次数; P_1 为攻击机遭遇一次威胁被击毁的概率; μ 为每分钟攻击机对目标实施攻击的平均次数; P_2 为目标受一次攻击被击毁的概率。

在此, 给出 P_1 、 P_2 这二个参数确定方法^[3,5,6]的简要说明。

1) P_1 的确定

假设敌防空武器系统只有触发或无引信高炮炮弹和装有近炸引信的导弹, 并假设对一种防空武器系统, 单发击毁概率相同, 设 $i \in I = \{1, 2\}$, 且 1 表示敌高炮武器系统, 2 表示敌防空导弹武器系统。则:

$$P_1 = 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - P_{kei}) \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{ke1} = P_{d1} \times P_{i1} \times \left[1 - \left(1 - \frac{A_r}{2\pi\sigma_r^2 + A_p} \right)^{N_1} \right] \\ P_{ke2} = P_{d2} \times P_{i2} \times \left[1 - \left(1 - \frac{r_0^2}{2\sigma_r^2 + r_0^2} P_f \right)^{N_2} \right] \end{cases} \quad (8)$$

式(7)、式(8)中: P_{kei} 为攻击机遭遇第 i 类威胁时的被击毁概率; P_{di} 为攻击机被第 i 类地面防空武器系统雷达探测到的概率; P_{ii} 为第 i 类地面防空武器系统向攻击机射击的概率; A_r 、 A_p 分别为攻击机的易损面积和迎击面积; P_f 为引信的引爆概率; 比例参数 r_0 与弹头的杀伤半径 r_1 有关, 可取 $r_0 = 1.2r_1$; σ_r 为地面防空武器系统总的脱靶距离标准差, 有 $\sigma_r = CEP/1.177$ (CEP 为圆概率偏差); N_i 为一次发射的第 i 类威胁体的个数。

2) P_2 的确定

攻击机执行特定的作战任务时, 一般都根据目标特性的不同, 合理选择挂载同类对地武器, 因此, 假设攻击机向地面目标一次投射 n 发武器, 并假设武器的单发命中概率为 P_a , 命中目标 k 发后目标即被摧毁 (k 值可根据目标特性和武器类型计算得出)。则敌地面目标受一次攻击被击毁的概率 P_2 为:

$$P_2 = C_n^k P_d^k (1 - P_d)^{n-k} + C_n^{k+1} P_d^{k+1} (1 - P_d)^{n-k-1} + \dots + C_n^n P_d^n (1 - P_d)^0 \quad (9)$$

3 人-机作战系统的对地攻击作战效能模型

飞行员是人-机作战系统的主体,飞行员能否正确执行既定作战方案,所下决定是否正确,关系到作战任务成败的关键。因此,在攻击机效能分析中引入人的影响因素,将会使攻击机效能评估更加合理和科学。飞行员在人-机作战系统作战效能评估中的影响,体现在对动态条件下单机作战效能的影响,同时飞行员和飞机作为人-机作战系统可用串联表示他们之间的关系。另外,单机静态作战效能和考虑飞行员因素的动态作战效能,这二者可以处理成加权的方式,则人-机作战系统对地攻击作战效能 D 的数学模型为:

$$D = k_1 D_{\text{静}} + k_2 R D_{\text{动}} \quad (10)$$

式中: D 为人-机作战系统对地攻击作战效能; k_1 、 k_2 为权系数,有 $k_1 + k_2 = 1$; R 为飞行员可靠度。

飞行是一项非常耗费体力与精力的挑战性工作,飞行员的可靠度将随时间增长呈负指数规律降低,同时飞行员的可靠度还与飞行员所受的瞬时过载、座舱环境、心理状态等许多因素有关。这里,仅考虑飞行员所受过载和任务飞行时间影响,并设任务开始时刻为 0 时刻,则飞行员可靠度 R 可表示为^[7]:

$$R = \exp\left\{\left[-\rho(n_{y,\max} - n_y)t + (n_y - 1)\ln \varepsilon\right] / (n_{y,\max} - 1)\right\} \quad (11)$$

式中: ρ 为飞行员的故障率,即人的失误随着时间增长的平均速度,它的值可由地面应用虚拟现实技术建立的飞行模拟器上得到,即进行飞行员的操作可靠性训练,用失误的次数与总的操作次数的比值表示, ρ 的取值范围一般在 0.01~0.1 之间; $n_{y,\max}$ 为最大可用过载; n_y 为 t 时刻飞行员所承受的过载,它是关于时间 t 的一个函数; t 为任务过程中的任意时刻; ε 为一非常小的正数,与 $n_{y,\max}$ 有关,一般可取 $\varepsilon = 0.01$ 。

由式 (11) 可知,人的可靠度是一个瞬态值,为便于作战效能的评估应用,在此引入人的可靠度的均值 \bar{R} ,但是过载 n_y 也是关于时间 t 的一个函数,并且过载 n_y 与任务执行时间无确定的函数关系。根据执行任务的不同类型,可人为地设定一个过载均值 \bar{n}_y 作为执行任务期间的过载均值,比如:依据作战任务类型纯空战、空战兼对地攻击和纯对地攻击,可分别设过载均值 \bar{n}_y 为 5、 $5c_1 + 1.5c_2$ (c_1 、 c_2 为空

地任务分配比例)和 1.5^[7]。则人的可靠度均值 \bar{R} 为:

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{1}{T} \int_0^T \exp\left\{\left[-\rho(n_{y,\max} - \bar{n}_y)t + (\bar{n}_y - 1)\ln \varepsilon\right] / (n_{y,\max} - 1)\right\} dt \\ &= \frac{n_{y,\max} - 1}{\rho T (n_{y,\max} - \bar{n}_y)} \times \exp\left[\frac{(\bar{n}_y - 1)\ln \varepsilon}{n_{y,\max} - 1}\right] \times \left\{1 - \exp\left[-\frac{\rho T (n_{y,\max} - \bar{n}_y)}{n_{y,\max} - 1}\right]\right\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: \bar{R} 为人的可靠度均值; \bar{n}_y 为任务期间人的过载均值; T 为攻击机执行作战任务的持续时间,其它各符号含义同上文。

由式 (10)、式 (12),可把人-机作战系统对地攻击作战效能 D 的数学模型改写如下:

$$D = k_1 D_{\text{静}} + k_2 \bar{R} D_{\text{动}} \quad (13)$$

4 算例

本算例所用数据可参见文献[3]和文献[5~8]。战场想定为一架携带 4 枚空地战术导弹的攻击机攻击敌方一个地面目标,在敌地面目标附近部署有一个双通道空地导弹火力单元和一个高炮火力单元。做如下相关假设:空地导弹的单发命中概率为 $P_d = 0.85$,命中 2 发即认为摧毁目标。高炮营一次向攻击机射击有效炮弹 40 发,且炮弹为带触发引信的高爆炸弹,触发炮弹弹着点总脱靶距离标准为 $\sigma_r = 2$ m,高炮武器系统雷达探测到攻击机的概率和向攻击机射击的概率分别为 $P_{d1} = 0.75$ 和 $P_{l1} = 0.95$;防空导弹武器系统一次发射 2 枚,引信引爆概率为 $P_f = 0.95$,近炸弹头的杀伤半径为 $r_1 = 10$ m, $r_0 = 1.2r_1 = 12$ m,圆概率偏差为 $CEP = 5$ m, $\sigma_r = CEP/1.177 = 4.25$,防空导弹武器系统雷达探测到攻击机的概率和向攻击机射击的概率分别为 $P_{d2} = 0.85$ 和 $P_{l2} = 0.98$;攻击机的易损面积和迎击面积分别为 $A_v = 6$ m² 和 $A_p = 50$ m²;取 $\lambda^{-1} = 15$ min 和 $\mu^{-1} = 9$ min;攻击机作战任务持续时间为 $T = 30$ min。攻击机最大航程为 $R = 2000$ km,攻击机最大允许过载、最低突防高度和最大突防速度分别为 $n_{y,\max} = 8$ 、 $H_{\text{突}} = 300$ m 和 $V_{\text{突}} = 900$ km/h,攻击机导航能力系数为 $P_n = 0.75$,武器最大射程为 70 km,且射程最大的武器数量为 $n = 4$,武器品种修正系数为 $K_{\text{武}} = 1$,挂架数量为 8,武器精度系数和发现目标能力系数分别为 1.0 和 0.90,最大载弹量为 $W_B = 4.5$ t,电子对抗能力系数为 $\varepsilon_4 = 1.15$ 。不妨考虑攻击机执行绝对地攻击任务,分别取 $k_1 = 0.4$ 、 $k_2 = 0.6$ 、 $\rho = 0.05$ 、 $\varepsilon = 0.01$ 和 $\bar{n}_y = 1.5$ 。

(下转第 17 页)

的保障路子。

7 结束语

对我军而言, 虽然装备保障工作开展得较晚, 但可以吸取美军的成功经验, 根据装备保障专业相近、技术需求相似, 费用经济等原则发展基地“一专多能”的保障能力, 改变以往基地级维修机构只针对专项装备进行维修保障的局面。选择适合项目、适当规模、适度引入竞争, 将部分保障任务通过军地双方合作, 或通过竞争直接外包给民间机构完成, 达到发展民间保障力量, 储备保障骨干、节约保障经费、应对多元化要求的目的。

参考文献:

[1] DoD Directive 4151.18. Maintenance of Military Materiel[Z/OL].<http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/pdf/415118p.pdf>, 2004, 31(3).

[2] DoD Instruction 4151.20. Depot Maintenance Core

(上接第8页)

$$\text{由式 (2) 得: } P_e = \frac{1}{6} \times \frac{8}{9} + \frac{5}{12} \times \frac{100}{300} + \frac{5}{12} \times \frac{900}{1200} = 0.60,$$

$$\text{由式 (3) 得: } R_m = 1 + \frac{70}{3} \times 1 \times \sqrt{4} = 47.67, \text{ 由式 (4) 得:}$$

$$P_a = 0.2 \times \frac{8}{15} + 0.4 \times (1.0 + 0.90) = 0.87. \text{ 把上述相关数据带}$$

入式 (1) 得静态条件下单机对地攻击作战效能为:

$$D_{\text{静}} = [\ln(2000 \times 0.60 \times 47.67 \times 0.75) + \ln(4.5 \times 0.87)] \times 1.15 = 13.84.$$

由式 (8) 得:

$$\begin{cases} P_{ke1} = 0.75 \times 0.95 \times \left[1 - \left(1 - \frac{6}{2\pi \times 2^2 + 50} \right)^{40} \right] = 0.69 \\ P_{ke2} = 0.85 \times 0.98 \times \left[1 - \left(1 - \frac{12^2}{2 \times 4.25^2 + 12^2} \times 0.95 \right)^2 \right] = 0.78 \end{cases}, \text{ 由}$$

$$\text{式 (7) 得: } P_1 = 1 - (1 - 0.69) \times (1 - 0.78) = 0.93, \text{ 由式 (9) 得:}$$

$$P_2 = C_4^2 \times 0.85^2 \times (1 - 0.85)^2 + C_4^3 \times 0.85^3 \times (1 - 0.85) + C_4^4 \times 0.85^4 = 0.988$$

$$\text{, 由式 (6) 得: } \alpha = 0.93/15 = 0.062, \beta = 0.988/9 = 0.11.$$

把上述相关数据带入式 (5) 得动态条件下单机对地攻击作战效能为 $D_{\text{动}}$:

$$D_{\text{动}} = \frac{0.11 \times 30}{0.11 + 0.062} + \frac{0.11}{(0.11 + 0.062)^2} \times \left[e^{-(0.11 + 0.062) \times 30} - 1 \right] = 15.49.$$

由式 (12) 得 \bar{R} 为:

$$\bar{R} = \frac{8-1}{0.05 \times 0.5 \times (8-1.5)} \times e^{\left[\frac{(1.5-1) \times \ln(0.01)}{8-1} \right]} \times \left\{ 1 - e^{\left[\frac{-0.05 \times 0.5 \times (8-1.5)}{8-1} \right]} \right\} = 0.71.$$

则由式 (13) 得人-机作战系统对地攻击作战效能 D 为:

Capabilities Determination Process[Z/OL].
<http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/pdf/415120p.pdf>, 2007, 5(1).

[3] John R. Withers. Contracting for Depot-Level Maintenance—CPT[OL].
<http://www.almc.army.mil/alog/issues/JanFeb00/MS453.htm>, 2000.

[4] DoD 8910.1-M, DoD Procedures for Management of Information Requirements[S/OL].
<http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/html/891001m.htm>, 1998, 30(6).

[5] 韩国玉, 等. 外军装备经费向量分析[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.

[6] DoDD 4151.18h. Depot Maintenance Capacity and Utilization Handbook[Z/OL].<http://www.stormingmedia.us/87/8735/A873523.html>, 2007, 10(3).

[7] 美国法典 第10编第2466节.

[8] 美国法典 第10编第2464节.

[9] DoDD 4151.21. Public-Private Partnerships for Depot-Level Maintenance[Z/OL].<http://www.dtic.mil/whs/directives/corres/pdf/415121p.pdf>, 2007, 25(4).

$$D = 0.4 \times 13.84 + 0.6 \times 0.71 \times 15.49 = 12.13$$

5 结束语

该模型可为对地攻击的兵力配置、方案选择等提供分析方法和手段, 可在较严格、科学和精确的定量条件下制订战术决策, 为对地攻击作战效能的研究提供了一种新的方法和思路。

参考文献:

[1] 张安, 张耀中. 编队对地攻击航空武器系统效能顶层分析研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(9): 1225-1228.

[2] 李相民, 张晓康, 李志刚. 编队对地攻击总体作战效能[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(7): 99-102.

[3] 苏畅, 张恒喜, 吴兆强. 对地攻击摧毁能力和生存能力的关系研究[J]. 兵工学报, 2007, 28(1): 57-62.

[4] 汪民乐, 高晓光. 攻击机靶场效能模糊型指标体系研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 32(7): 104-107.

[5] 姚灿, 侯志强, 贾忠湖. 攻击机对地作战效能分析的全概率方法[J]. 电光与控制, 2007, 32(7): 59-62.

[6] 黄俊, 武哲. 作战飞机的空-地攻击效能评估[J]. 航空学报, 1999, 20(1): 69-71.

[7] 苏畅, 张恒喜. 飞机作战效能评估中人的可靠性的引入方法[J]. 航空学报, 2006, 27(2): 262-266.

[8] 朱宝蓂, 朱荣昌, 熊笑非. 作战飞机效能评估(第2版)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006: 63-89.

[9] 赵超, 文传源. 作战系统综合效能评估方法探索[J]. 电光与控制, 2001(1): 63-65.

[10] 汪民乐, 高晓光, 蔡付东. 作战飞机效能分析研究综述[J]. 飞行力学, 2001, 19(4): 1-5.

[11] 王凤朝, 黄树采, 韩朝超, 等. 基于神经网络的空天信息支持反导作战效能[J]. 四川兵工学报, 2009(1): 5-7.