基于任务的作战飞机效能评估模型

张建康 程 龙 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: 针对作战飞机的任务效能评估问题,提出了基于作战飞机任务的任务效能新概念;采用概率分析方法将飞机作战过程分解并抽象为一组概率值,建立了相应的任务效能评估模型;该模型可以在兼顾传统仿真评估模型结果精度的同时,具有模型简明、计算消耗低、方便快捷等特点;更具有实际作战指挥意义,其快速可信的评估结果有利于作战指挥官进行合理的、科学的任务规划,从而有利于在执行特定任务时更好地运用现有的作战飞机和武器;算例结果表明该模型可以较为有效地对作战飞机携带不同机载武器时在不同作战环境中打击不同作战目标进行效能评估.

关 键 词: 效能评估; 基于任务; 任务效能模型; 飞机突防模型; 目标毁伤模型

中图分类号: V 271.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2005)12-1279-05

Mission-based operational effectiveness evaluation model of combat aircraft

Zhang Jiankang Cheng Long Huang Jun Wu Zhe

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

Abstract: To the combat aircraft operational effectiveness evaluation, mission effectiveness concept was presented based on combat aircraft's different missions. With the probability analysis method, aircraft operation procedures were studied and abstracted into a group of probability values, and relevant evaluation models were built for several different typical operation procedures. These models have much more matter-of-fact significance and will be very helpful for commanders to make much reasonable and scientific mission plans and thus make much better use of combat aircraft and weapons available to implement certain mission. The new models are simple, easy understanding and conducting, their computing resources and time are more acceptable than that of traditional emulation methods while giving reasonable results with calculation accuracy close to the former. Example results show that the models are available and believable when evaluating mission-based operational effectiveness of combat aircraft, which concerns different aircraft platform with different weapon striking different target in different combat scenario.

Key words: effectiveness evaluation; mission-based; mission effectiveness model; penetration probability model; target damage probability model

近几场局部战争中,美国 B-2 和 F-117 往往是首当其冲,和巡航导弹一起最早拉开战争的序幕,对具有高价值、高威胁的目标进行首轮打击,并且也常常是他们,撕开了敌方的防空火力网,为随后的其它作战飞机的军事行动打开大门;“全球鹰”、“捕食者”等无人机,与其它侦察手段一起,执行战场的 ISR(情报、监视、侦察)任务,为己方获取信息优势奠定基础,其中“捕食者”还具备了对地攻击的能力,直接对目标进行“侦察—打击”一体化;B-52,A-10 等即将退役的飞机,在战

收稿日期: 2004-09-07

作者简介: 张建康(1965-),男,江苏常熟人,博士生, kar1107@sina.com.

场上也出尽了风头. 以上几种飞机,成为了媒体报导的重点,也引起了一些军事专家的注意. 显然,参战的飞机还有 F-14,F-15,F-16,F-18,“鹞式”,A-6 等很多飞机的多种型号,然而它们之所以没有成为关注的焦点是因为没有适合这些飞机的作战任务出现. 而对 B-2,F-117,A-10,B-52 和无人机来说,情况就不同了,尤其是 B-52,A-10 这样的“老爷机”,这几场局部战争为它们提供了展示的舞台,使得它们在完成特定任务的时候,如鱼得水,表现出众,说明了作战飞机在完成适当的作战任务时,效能会表现得相当好,也表明了老的飞机不一定就没用.

对任何一种作战飞机,甚至同种飞机的任何一种挂载和使用方案,在执行特定作战任务的时候,都有可能成为最优方案,所以研究作战飞机的任务效能,使各型作战飞机与机载武器“扬长避短”,进行合理组合,避免对目标进行过大打击的打击样式出现,针对特定任务,把作战飞机的任务效能发挥到最佳. 因此有必要对作战飞机的任务效能进行研究,为航空武器装备的合理利用和发展提供参考.

1 作战飞机任务特点分析

目前各型作战飞机能够执行的作战任务在空间上主要有对空、对地和对海 3 大类,作战飞机在执行不同任务时,具体情况存在着不同,作战飞机自身性能、作战环境、使用的机载武器、攻击目标的自身特点、弹药命中目标特点(含直接命中和近炸,都能够对目标构成毁伤)等,都会对任务的完成产生不同的结果和效果.

作战使用的主要特点有[1]:①投入的兵力组成,可分为单机、编队和机群 3 种形式,以及其它支援兵力;②攻击目标的类型,可分为单独点目标、成组(分散、密集)目标群和面状目标 3 大类;③使用的作战飞机种类,主要考虑攻击机、轰炸机、歼击机、截击机等,其它类型的飞机主要是用来提高这些飞机的作战能力;④投入兵力的使用特点,分为独立和协调;⑤杀伤武器和弹药类型,主要考虑制导和常规弹药(暂不考虑核弹).

考察一个具体作战任务执行的实际过程,其通常包括作战计划的制定、战前信息的准备、作战飞机起飞并飞到敌方防空武器的作用边界、突破和/或战胜飞行航线上目标的防空武器(截击机、导弹阵地、高炮阵地),进入目标并予以打击、在返航飞行时战胜防空武器的对抗、着陆和战斗力恢复. 由于作战飞机在执行任务时的这些共同特点,故可以在进行作战飞机任务效能评估时建立统一的数学模型.

2 作战飞机效能评估模型

2.1 作战飞机总体作战效能模型

武器系统的作战效能事实上包含了 3 个要素:作战条件、作战任务和完成任务的概率. 国军标《GJB 1364-92》中对武器装备的作战效能的定义是:在预定或规定的作战使用环境以及所考虑的组织、战略、战术、生存能力和威胁等条件下,由有代表性的人员使用该装备完成规定任务的能力. 可见其考虑的因素比较复杂,也体现了实际的作战情况. 本文依据上一节所述的作战飞机在执行任务的实际使用特点,并进行适当的简化,建立作战飞机总体作战效能的数学模型,以概率形式表示如下:

$$E = P_{SP} P_F E_M \tag{1}$$

式中,P_{SP} 综合体现了战前作战飞机的出动能力(可以理解为作战飞机可用度)P_S 和信息准备能力 P_P,是二者的乘积[2]:

$$P_{SP} = P_S P_P \tag{2}$$

其中

$$P_S = \frac{t_1}{t_1 + t_2 + t_3} \tag{3}$$

t_1 为飞机在排除故障和预防维修各项活动之间的平均飞行时间;t_2 为平均修复时间;t_3 为定期检查维护时间,也可以通过统计获得;另外指出,实际作战使用中,出动能力是与作战飞机的储备量密切相关的,并且其值可能与本文的计算结果差距很大. 对于 P_P,考虑完成战前获知信息主要通过使用 GPS、侦察卫星和侦察飞机对任务目标分别来进行目标定位、目标图像侦察和防区图像侦察,各自都有一定的概率和权重,以及其各自对战前信息准备概率的权重,计算如下[3]:

$$P_P = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \beta_i \alpha_{ij} P_{ij} \qquad n = 3 \qquad m = 3 \tag{4}$$

式(1)中 P_F 体现飞机任务飞行可靠度,该数据与飞机执行任务的飞行时间和飞机的平均故障间隔时间 t_4 有关,计算公式[4]为

$$P_F = \exp(-t_F/t_4) \tag{5}$$

式(1)中 E_M 是本文要讨论的主要内容,它反映了作战飞机的任务效能.

2.2 作战飞机任务效能模型

定义 1 作战飞机的任务效能是指在一定的战场威胁和支援环境下特定作战飞机携带特定的武器攻击特定目标时完成作战任务能力的大小.

考虑到作战指挥官在制定作战飞机的任务时,对任务的完成和作战飞机的存活有着一定的偏向,引入作战指挥官完成任务的决心因子 θ,来评估任务策划时依据作战指挥人员的实际要求计算作战飞机的任务效能. 当 θ 为 0 时,表明指挥官完全偏向于完成任务,要求目标击毁而不计飞机存活与否;当 θ 为 1 时表明指挥官更侧重于在目标击毁的同时,要求飞机生存;当 θ 介于 0 和 1 之间时,则表明指挥官在二者之间的权衡,θ 越大,表明指挥官越希望作战飞机完成任务的同时能够存活. 于是建立任务效能模型:

$$E_{\mathrm{M}} = [\theta P_{\mathrm{AS,TK}} + (1-\theta)P_{\mathrm{TK}}] \tag{6}$$

式中,$P_{\mathrm{AS,TK}}$为在威胁区时间 t 内,飞机生存(用 1 表示),并且目标被摧毁(用 0 表示)的概率[5],计算如下:

$$P_{\mathrm{AS,TK}} = P(0,1,t) = \exp(-\alpha t)[1-\exp(-\beta t)] \tag{7}$$

P_{TK}为在威胁区 t 内目标被摧毁(0)的概率[5],计算如下:

$$P_{\mathrm{TK}} = P(0,1,t) + P(0,0,t) = \frac{\beta}{\alpha+\beta}\{1-\exp[-(\alpha+\beta)t]\} \tag{8}$$

式中,$\alpha=\lambda(1-P_{\mathrm{AS}})$;$\beta=\mu P_{\mathrm{D}}$;$\lambda$ 为飞机遭遇威胁的频率,即作战飞机在单位时间内被敌方探测、识别、跟踪和遭受攻击的次数;μ^{-1}为从 0 时刻到攻击目标的平均时间,即飞机搜索、识别和定位目标的平均时间,与机载导航和瞄准设备、座舱视场、机载雷达及其它辅助信息设备等有关;P_{AS}为飞机的突防概率;P_{D} 为飞机对特定目标的毁伤概率.

2.3　作战飞机的突防概率模型

记 P_{ki}为单机遭遇一个 j 类威胁体攻击被击毁的概率[6],严格地说,这是一个与任务相关的量,与敌方对抗武器的性能、己方作战飞机的综合性能(机动性、隐身性、易损性等)、外界保障与信息支持能力、战场威胁环境以及飞机在威胁区的停留时间等都有着密切关系.

单机在遭遇 N 个 j 类威胁体攻击的被击毁的概率:

$$P_{\mathrm{k}Nj} = 1 - \prod_{i=1}^{N}(1-P_{\mathrm{k}i}) \tag{9}$$

单机在遭遇 m 类威胁物体后仍生存的概率,即 P_{AS}为

$$P_{\mathrm{AS}} = 1 - \prod_{j=1}^{m}(1-P_{\mathrm{k}Nj}) \tag{10}$$

实际的打击中,往往都是机群对目标进行突防和打击的,本文把机群的 P_{AS}转换成单机的 P_{AS},也相应的把机群的总体载弹量转换成单机的当量载弹量,为的是建立数学模型比较统一,也使得计算和讨论简便.

设机群组成单一,共有 n 架,假定单机对目标环境的突防概率为 P_{AS},现在要计算的是对整个机群而言,以 P_{AS}进行突防后能够存活的飞机数目,然后将存活飞机所能够携带的武器数量变换到单机能够携带的当量武器总量,以计算 P_{AS}.

步骤是这样的,先计算 n 架飞机中至少有 r 架飞机突防的概率 P_r[7]:

$$P_r = C_n^n P_{\mathrm{AS}}^n + C_n^{n-1}P_{\mathrm{AS}}^{n-1}(1-P_{\mathrm{AS}}) + \cdots + C_n^r P_{\mathrm{AS}}^r (1-P_{\mathrm{AS}})^{n-r} \tag{11}$$

式中,$r=n,(n-1),\cdots,1,0$.

然后建立一个大小为($r+1$)的一维数组,$n[r]$的值为对应 r 架突防飞机的 P_r,于是可以通过简单的比较近似得出机群在 P_{AS}下的存活飞机数目. 然后把这些飞机所带的武器总量转换到单机的当量载弹总量,以此数据来计算 P_{D}. 如果使用战区外发射导弹攻击地面目标和在敌机攻击范围外使用超视距空空导弹打击空中目标的情况下,可以认为不存在飞机的突防问题,即 P_{AS}取 1.

2.4　作战飞机对目标毁伤概率模型

对 P_{D} 的计算是作战飞机任务效能评估的核心部分,也是难点部分. 对这一部分进行评估,需要清楚作战飞机与机载武器的关系,以及机载武器对攻击目标进行毁伤的相对能力的关系,如图 1. 关系组 1 体现了不同作战飞机针对不同机载武器的挂载能力,也为执行作战任务时的挂载方案提供参考和限定的依据;关系组 2 体现了不同机载武器对不同攻击目标的摧毁能力.

先建立目标的毁伤模型,然后在此基础上建立机载武器和作战飞机对目标的毁伤模型. 根据作战飞机的任务类型,可以将目标从宏观上分为 3 类:

1)一般点目标的毁伤模型

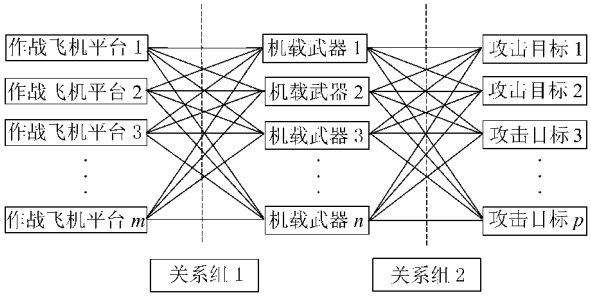

图 1　作战飞机平台、攻击目标与机载武器匹配关系组

对一般性点目标(包括可当作点目标的目标),如卫星、战斗机、舰船、坦克、桥梁、高层建筑物等,对某型单发弹药,如果弹药爆破时刻炸点与目标中心的距离为 x,武器对目标的有效杀伤半径是 R,目标的当量半径为 R_t,可以通过目标的受攻击面积进行当量转换得到:

$$R_t = \sqrt{S/\pi} \tag{12}$$

则 P_D 的数学模型如下:

$$F_{ij} = \begin{cases} F_{ij1} = 1 \times P_{DR1} & 0 \leqslant x \leqslant R_t \\ F_{ij2} = \left(1 - \dfrac{x}{R}\right) \times P_{DR2} & R_t \leqslant x \leqslant R \\ F_{ij3} = 0 & R \leqslant x \end{cases} \tag{13}$$

式中,P_{DR1} 为弹药直接命中目标情况下对目标的毁伤能力,可以通过一个数据库矩阵来进行选取:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}$$

式中,m 表示武器的毁伤级别;n 表示目标的抗毁伤级别;$d_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$ 表示 i 级毁伤级别的武器对 j 级抗毁伤级别的目标的相对毁伤能力. 武器对目标的相对毁伤能力的效能评估上,应该有一定的针对性才更加合理,体现在:①武器自身的破坏能力,已经不能简单地以武器的重量来衡量了,而且与武器的类型有很大关系,举个例子,美国的小直径炸弹(SDB),其质量虽然轻,但其毁伤能力一点也不低于更大质量的常规炸弹;②破坏能力与被攻击目标也有很大关系,主要是目标自身的抗损毁能力具有一定的相对性,与机载武器的类型、特性和目标的体积、结构、材料等所构成的承受能力有关. 考虑到机载武器和目标类型的种类的众多,这一部分的计算拟通过建立数据库实现——把一些典型的组合存储起来,需要时从库中抽取.

P_{DR2} 为弹药虽然未直接命中目标但依然能够对目标构成毁伤的能力,有的时候为了方便,可以采用降级的处理方式.

设 P_{F1} 为弹药炸点在 R_t 范围内的命中概率,P_{F2} 为弹药炸点在 R 之内,R_t 之外的命中概率,符合正态分布模型,可通过数值积分计算.

机载弹药的圆概率误差(CEP)C 是个容易得到的量,它与弹药的圆标准差 σ_r 存在着如下关系:

$$C = 1.177\sigma_r \tag{14}$$

由式(14)得到 σ_r,作变换 $u=(x-0)/\sigma_r$,P_{F1} 和 P_{F2} 可以利用式(15)求得:

$$P = 2\int_0^R \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du \tag{15}$$

单发 i 类弹药对 j 类目标的毁伤概率:

$$P_{Dij}^1 = P_{TM}(F_{ij1}P_{F1} + F_{ij2}P_{F2}) \tag{16}$$

式中,P_{TM} 为考虑目标自身机动性而引进的概率因子.

对于多枚 N_i 发 i 类弹药对 j 类目标的毁伤概率:

$$P_{Dij}^{N_i} = 1 - \prod_{k=1}^{N_i}(1 - P_{Dijk}) \tag{17}$$

M 类不同弹药对目标 j 的毁伤概率为设飞机所携带的 i 类弹药的总数目为 N_i,则对目标 j 的总的摧毁概率:

$$P_D = 1 - \prod_{i=1}^{M}(1 - P_{Dij}^{N_i}) \tag{18}$$

2) 一般面目标的毁伤模型

这样的目标,主要指由多个有一定关联的集群式点目标组成面目标,如地空导弹阵地、高炮阵地、雷达阵地等,其毁伤情况根据各点目标的毁伤情况来确定. 根据点目标对总目标的功能组成,把总目标数分为 2 大类:①无功能重复目标,即单个目标被击毁则整个目标群失去战斗力;②有功能重复目标,即在每组内的目标可以相互补充功能,只有在该组内的所有目标被击毁,目标群才失去战斗力. 建立相应的毁伤树,其形式采用各点目标的串联和/或并联方式来描述[8],如图 2 所示. 其中 $P_{D1}\sim P_{Dm}$ 表示 m 个无重复功能点目标被击毁的概率,$P_{Di1}\sim P_{Dik}$ 表示第 i 组的 $1\sim k$ 个有功能重复的点目标被击毁的概率,$P_{Dj1}\sim P_{Djl}$ 表示 j 组的 $1\sim l$ 个有功能重复的点目标被击毁的概率.

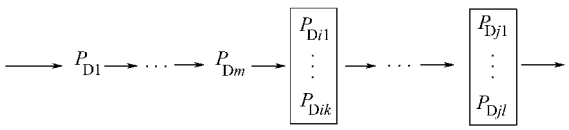

图 2 集群式面目标串联、并联关系

则该面目标的 P_D 为

$$P_D = 1 - \prod_{k=1}^{m}(1 - P_{Dk}) \prod_{p=i}^{j}\left(1 - \prod_{q=1}^{k-i} P_{Diq}\right) \tag{19}$$

3) 特殊面状目标毁伤模型

这类目标是指一枚弹药命中后只能破坏目标

的局部,包括 2 类:离散的和整体的. 典型的如坦克群、机场跑道等.

机场跑道属于面目标,但又区别于一般的面目标,对其进行打击,既没有必要,也不可能完全"摧毁". 对机场跑道进行打击的意义在于使敌方飞机在特定的时间内不能起飞和降落,即对其进行封锁. 以现役战斗机的起飞降落区作为"封锁"判据——"最小起降窗口"为准则,建立一种简单的简化的封锁模型.

建立跑道坐标系,将跑道划分为典型作战飞机的最小起飞区域(如 400 m×15 m),即"最小起降窗口",总个数为 N,如果在 N 中有弹坑的总数记为 M,则对跑道完成封锁任务的概率为

$$P_{\mathrm{D}} = M/N \tag{20}$$

3　算　例

作为初步研究,本例侧重于作战飞机任务效能 E 的计算. 设定武器弹药的毁伤级别和目标的抗毁伤级别共有 5 个级别,P_{D} 可以根据不同的毁伤级别和抗毁伤级别在数据库矩阵中进行选取:

$$\begin{bmatrix} 0.8 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.8 & 0.4 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0.8 & 0.4 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0.8 & 0.4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.8 \end{bmatrix}$$

武器弹药的毁伤级别为 5 级;目标的抗毁伤级别为 4 级,不具备机动性,相对半径为 30 m,目标防御系统对作战飞机发动攻击的周期为 15 min,2 种防空武器对该飞机的命中概率分别为 10% 和 5%,一次发射量分别为 2 枚和 4 枚. 出动一架作战飞机,携带 8 枚对地攻击弹药,执行任务时,每次投放 2 枚,弹药毁伤级别为 5 级,圆概率误差为 10 m,毁伤半径为 100 m,平均攻击时间为6 min,威胁区执行任务时间为 20 min,决心因子取 0.8,经过编程计算,作战飞机的任务效能值为 66.2%.

在此基础上:若攻击 5 级抗毁伤目标,则任务效能为 65.8%;若目标防卫一次发射武器量变为 1 枚和 2 枚,则任务效能为 78.1%;若武器弹药的 CEP 为 30 m,毁伤半径为 300 m,则任务效能为 66.1%;若作战飞机平台改变,威胁区武器的命中概率降为 5% 和 2%,平均攻击时间缩为 3 min,则任务效能为 76.6%.

4　结　论

不同作战飞机在不同作战环境下执行不同类型任务时,携带不同的机载武器会对不同目标形成不同毁损效果. 依据作战任务对象的特定,特别考虑了特定武器与特定目标的相对毁损特性等细节因素,提出任务效能的新概念,建立基于任务的作战飞机效能评估的计算模型. 可见,由于任务中飞机平台、机载武器、攻击目标特点的不同,对完成同一任务的作战飞机效能是一个根据任务的改变而变化的值. 得出的评估方法更具有实际意义,为作战指挥人员更合理和科学地组织运用作战飞机和武器资源完成特定任务提供依据和参考.

参考文献 (**References**)

[1] Phill Smith E M, O'Hara J, Griffith D. Combat UAV real-time SEAD mission simulation[R]. AIAA 99-4185,1999

[2] Sivazlian B D. Aircraft sortie effectiveness model[R]. AD-A211594,1989

[3] 范　勇,李为民. 基于概率分析法的无人攻击机作战效能分析模型研究[J]. 现代防御技术, 2003, 31(6): 60~64
Fan Yong, Li Weimin. Combat effectiveness analysis models research of unmanned combat aerial vehicle based on probabilistic method[J]. Modern Defence Technology, 2003, 31(6): 60~64(in Chinese)

[4] 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
Zhu Baoliu, Zhu Rongchang, Xiong Xiaofei. Effectiveness evaluation of combat aircraft[M]. Beijing: Aeronautics Industry Press, 1993(in Chinese)

[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 analysis 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] Przemieniecki J S. Mathematical methods in defense analyses[M]. Washington DC:AIAA inc,1994

[7] 李俊生,梁　伟,赵　伟. 弹道导弹突防数概率分布列计算模型[J]. 现代防御技术,2004,32(2):11~14
Li Junsheng, Liang Wei, Zhao Wei. Mathematics model of probability distributing sequence of penetrable missile amount when several TBMs penetrate doublelayer defence system[J]. Modern Defence Technology, 2004, 32(2):11~14(in Chinese)

[8] 金伟新. "串并联"模型框架与作战效能评估[J]. 系统工程与电子技术,2001,23(7):41~43
Jin Weixin. The series-parallel connection models frame and the combat capability evaluation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(7):41~43(in Chinese)