无人作战飞机对地攻击效费比分析

魏金钟 王光耀

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191) (沈阳飞机设计研究所，沈阳 110035)

顾诵芬

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：UCAV(Uninhabited Combat Aerial Vehicle)具有高隐身、高机动、不涉及飞行员以及全寿命周期费用低等特点.针对 UCAV 的特点，应用适应现代作战飞机效费比分析的方法和手段，仿真计算了 UCAV 的隐身、作战半径、机动能力以及武器装载等主要设计参数与对地攻击效能的关系，计算了 UCAV 主要设计参数与全寿命周期费用的关系，研究了未来 UCAV 同有人作战飞机及巡航导弹在面临相同的威胁环境、执行相同的对地攻击任务时的效费比情况，并对 UCAV 在未来作战中的地位进行了分析.研究表明，UCAV 在执行对有防空系统保护的敌重要目标进行攻击的任务时，综合效费比高于巡航导弹和有人隐身飞机.

关 键 词：无人作战飞机；效费比；对地攻击效能；巡航导弹

中图分类号：V 221

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)06-0709-05

Cost efficiency analysis of attack UCAV

Wei Jinzhong

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Wang Guangyao

(Shenyang Aircraft Research Institute, Shenyang 110035, China)

Gu Songfen

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The uninhabited combat aerial vehicle (UCAV) has its special characters of high stealth, high maneuverability, unmanned, and low life circle cost etc. Considering the features of the UCAV, and utilizing the method used in the modern aircraft cost efficiency analysis, the relationship between the main design factors, such as stealth, radius of action, maneuverability and weapon payloads, and the combat efficiency of attack UCAV was simulated. The effects of the main design factors on the life cycle cost of attack UCAV was calculated. The differences of cost efficiency among UCAVs, cruise missiles and manned aircrafts at the same threaten situation and at the same attack mission were studied. The UCAV's position in the future war was analyzed. The study draws a conclusion that the cost efficiency of UCAVs is higher than that of manned aircrafts and cruise missiles in term of fulfilling suppression enemy air defenses mission.

Key words: uninhabited combat aerial vehicle (UCAV); cost efficiency; combat efficiency; cruise missile

UCAV(Uninhabited Combat Aerial Vehicle)作为一种新型的武器平台，具有独特的高隐

收稿日期：2008-05-14

作者简介：魏金钟(1965—)，男，河南郑州人，博士生，weijzh@tom.com.

身、高机动、不涉及飞行员以及长期储存快速部署等特点[1]，使 UCAV 相对于一般的有人驾驶飞机来说，具有得天独厚的效能优势和费用优势. 美国、俄罗斯和欧洲等国已经在研制或提出了发展研究方案，但目前还都未形成正式装备.

对地攻击型 UCAV 可与巡航导弹和有人作战飞机执行相同的对地攻击任务，研究它们在执行相同任务时的效费比情况，对研究 UCAV 在未来作战中的地位和发展方向是非常有意义的. 本文针对以对地攻击为主要任务的 UCAV 的特点，应用对地攻击效能仿真、费用估算以及效费比评估的方法和手段，仿真计算了 UCAV 主要设计参数与对地攻击效能的关系，研究了 UCAV 与有人作战飞机及巡航导弹在面临相同的威胁环境、执行相同的对地攻击任务时的效费比情况，对 UCAV、有人作战飞机及巡航导弹在未来作战中的地位进行了分析.

1 模型介绍

1.1 对地攻击战效分析仿真模型

本文采用作战模拟仿真方法进行 UCAV 的对地攻击效能研究.

1) 对地攻击模式和仿真建模概述

本研究的作战想定为攻击武器平台(包括携带空地武器的有人/UCAV 和巡航导弹)对有远、中、近距防空导弹和高炮保护的目标群进行攻击. 在模拟对地攻击作战过程中，主要考虑了飞机性能、机载设备性能、攻击武器性能、自卫武器性能、目标特性、战场环境特性、飞机执行的战术以及被攻击目标所处区域的防空能力等因素.

对地攻击的战效分析仿真模型主要包括作战飞机及地面防御系统的数据库、作战飞机的攻击模型、地面防御系统的防御模型和作战结果的效能评估模型.

地面防御系统模型包括防空武器战术技术性能模型、防空系统的作战模型、防空雷达模型以及信息对抗模型等. 防空系统作战模型中包括防空高炮作战模型、近程防空导弹系统作战模型、中程防空导弹系统的作战模型和远程防空导弹系统的作战模型等.

2) 对地攻击效能评估模型

飞机作战出动架次 N 和攻击目标时的飞机损失 ΔN 是与效能相关的主要参数. N 和 ΔN 可以按照以下公式[2]计算：

$$N = N_n + (1 - W_a) \times \Delta N_5^0 + \frac{n-1}{2} \times \Delta N_5 + \Delta N_4 \tag{1}$$

$$\Delta N = (1 - W_a) \times \Delta N_5^0 + n \times \Delta N_5 \tag{2}$$

其中，n 为飞机进入目标的次数(每次进入消耗 $1/n$ 的弹药)；N_n 为飞机的靶场架次；W_a 为飞机首攻成功概率；ΔN_4 为飞机从进入目标的防空系统起到发射武器前(对于航空炸弹、一次性弹箱、航空火箭、机炮)或者到制导结束时(对于使用导弹情况)的损失；ΔN_5 为飞机进入目标一次在使用武器各个阶段的总损失；ΔN_5^0 为飞机第 1 次进入目标时，由于种种原因飞行员没能瞄准使用武器情况下飞机的损失.

当考虑到出动许多架次的战斗机的效能时，每一架飞行器都有一个完成任务的可用性(A_A)，并且，每一架可用的飞行器有一个任务成功率(M_{OMS}). 任务效能(M_{OME})与 A_A 和 M_{OMS} 相关[3]：

$$M_{OME} = A_A \times M_{OMS} \tag{3}$$

对于给出的一个总的作战目标，如果成功的架次为 N_S，则达到这一给定目标必须出动的可用飞机的数量由下式给出：

$$N = N_S / M_{OMS} \tag{4}$$

本文用 M_{OME} 来计算 UCAV 执行对地攻击任务的作战效能(简称任务效能)，计算公式为

$$M_{OME} = A_A \times M_{OMS} = A_A \times N_S / N \tag{5}$$

1.2 费用估算模型

该模型估算战斗机全寿命周期费用时参考 Roskam 模型，采用公式[4]：

$$L_{CC} = C_{RDTE} + C_{ACQ} + C_{OPS} + C_{DISP} \tag{6}$$

其中，L_{CC} 为战斗机全寿命周期费用；C_{RDTE} 为研究、开发、试验和评估费用；C_{ACQ} 为采购费用；C_{OPS} 为使用维护费用；C_{DISP} 为退役处理费用.

针对不同飞机的特点，该模型的费用估算公式中加入了修正系数. 如估算 C_{RDTE} 时，要考虑在开发和生产时采用的先进技术，如隐身、推力矢量以及增加最大速度所带来的工程小时的变化，修正系数的值在常规军用战斗机和攻击机的 1.0 到先进军用飞机的 2.0 之间变化. 估算飞机飞行试验费用时，把战斗机分为常规和非常规两种，常规飞机值为 1.0，非常规飞机(有隐身特性)根据雷达探测水平其值在 1.0 到 3.0 之间变化.

1.3 效费比分析原理

效费比分析方法采用战斗机在完成某一攻击任务的效能与任务中战斗机所消耗的费用的比值来确定战斗机的效费的高低[5]. 飞机效费决策分析的目的就是要追求高的效费比，而不应该片面追求高的效能，或者片面追求低的费用.

飞机任务效费比可定义为[6]

$$\text{飞机效费比} = \text{飞机效能} / \text{任务费用} \tag{7}$$

任务费用＝任务所需飞机架次×任务时间×每飞行小时费用＋损失架次×单机价格

2　UCAV 设计参数变化的效费比分析

利用上节所述的作战效能仿真模型、费用估算模型和效费比分析原理,本节进行 UCAV 设计参数变化对效费比的影响分析,并给出对于 UCAV 的设计优化参数.

在仿真中使用的作战想定为:UCAV 装载空地武器对有远、中、近距防空导弹和高炮保护的目标群进行攻击.攻击目标群是一个装甲部队,覆盖了 200 m×5 m 的线形区域,装甲车之间的间距在 10 m 左右,移动的速度为 60 km/h.

1) 隐身水平对任务效费比的影响

由图 1 可见,在未来的作战环境下 UCAV 必须有较高的隐身水平,当 RCS(Radar Cross Section)由 1 m^2 到 0.1 m^2,对效费比的影响不大;当 RCS 由 0.1 m^2 到 0.01 m^2,对效费比有较大的影响;当 RCS 由 0.01 m^2 到 0.001 m^2,对效费比影响非常大.但 UCAV 隐身水平还受到设计和生产水平以及材料等的限制,决定 UCAV 隐身水平不可能无限小下去.

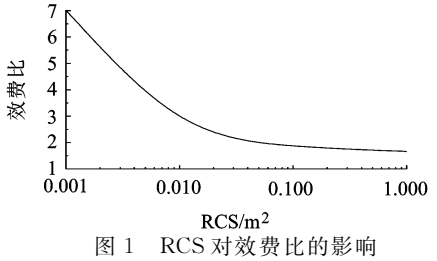

图 1　RCS 对效费比的影响

由于 UCAV 一般采用无尾布局,没有座舱、雷达舱,采用背部式高隐身进气道,机载天线、活动口盖等次散射源少.因此,UCAV 的隐身水平可较高.根据估算,飞翼布局类 UCAV 的头向和侧向的 RCS 均值可低于 0.01 m^2 和 0.1 m^2.考虑技术多方面的限制以及可实现性,UCAV 的隐身水平在前向和侧向的 RCS 均值不高于 0.01 m^2 和 0.1 m^2 是可能的.

2) 作战半径对任务效费比的影响

由图 2 可见,对于典型的作战目标,作战半径越小,UCAV 的效费比越高.这是由于本文所采用的仿真模型,针对具体的对地攻击任务,作战半径对作战效能的影响不大,而对费用的影响较大.但事实上,作战半径的增大是国内外军方的普遍需求,当作战需求与效费分析结果相矛盾时,满足作战需求应该是首要的.如果从航空装备系统的角度进行效能分析时,作战效能会随作战半径的增大而增大.作战半径对效费比影响可能不会如图 2 那样.

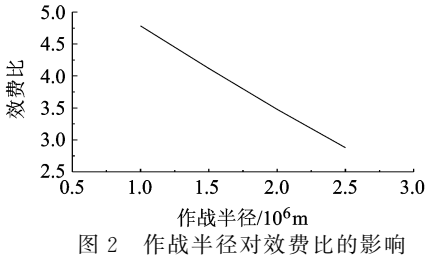

图 2　作战半径对效费比的影响

根据 UCAV 面对的作战环境,如果满足未来作战的需要,UCAV 的作战半径应不小于 2×10^6 m.

3) 机动能力对任务效费比的影响

由图 3 可见,对于攻击未来的典型作战目标,最大使用过载越小,UCAV 的效费比越高.其主要原因是在对地攻击中,机动能力强弱对攻击效能的结果影响很小.但考虑到 UCAV 能力的扩展性,最大使用过载取 6.5g 较为合适.

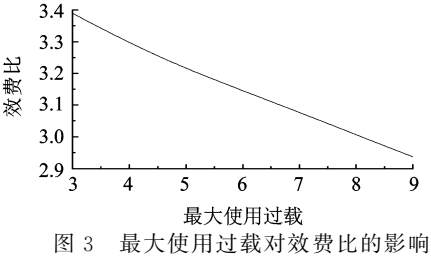

图 3　最大使用过载对效费比的影响

4) 武器装载对任务效费比的影响

由图 4 可见,相对其他参数的变化,武器装载的重量越大并不一定效费比越高,1 000 kg 的武器装载重量是最优值.这是由于本研究假设的是,UCAV 装载多枚 500 kg 制导炸弹,每次对地攻击进入投放 2 枚炸弹,而首攻成功概率对作战效能的影响较大,再次进入攻击的作战效能相对首攻会减小,而增加装载重量对费用的增加较快,所以,超过一定的装载重量,效费比会下降.因此武器装载重量的选取应考虑单枚武器重量和首攻发射武器的数量.本文研究的 UCAV 方案选 1 000 kg 左右的武器装载比较合适.

5) 满足未来作战需求的 UCAV 的主要指标

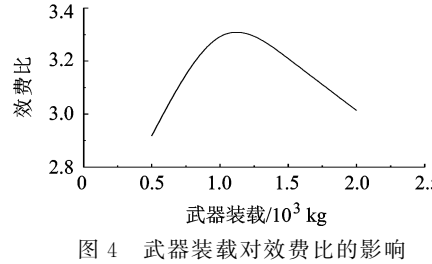

图 4　武器装载对效费比的影响

参数

根据前面的权衡分析，可以得到一个效费比相对较高的UCAV的技术指标要求(表1)，以此为基础，进一步开展UCAV与有人作战飞机和巡航导弹的效费比分析.

表1 UCAV的技术指标要求

参 数	数 值
起飞重量/kg	8760
空机重量/kg	5025
作战半径/km	2000
最大使用过载/g	6.5
武器装载/kg	1000
前向RCS/m^2	0.01

3 与有人机和巡航导弹的对比分析

根据上节得到的权衡后的UCAV技术指标(表1)，对UCAV和有人作战飞机以及巡航导弹在执行相同对地攻击任务(第2节的作战想定)时的作战效能、费用以及效费比进行仿真和计算，得到如下结果(图5～图7).

由结果可以看出：

1) UCAV相比有人作战飞机具有较高的效费比

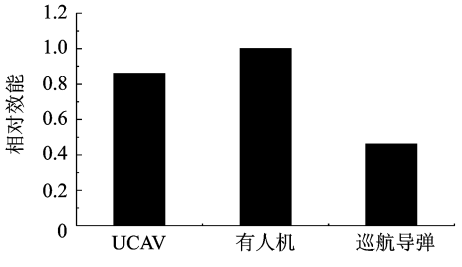

图5 UCAV与有人机和巡航导弹的效能

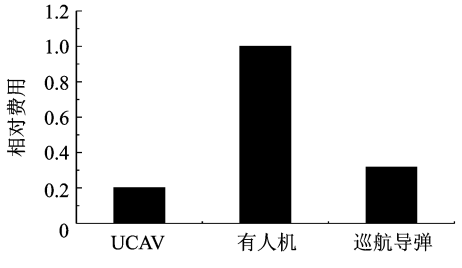

图6 UCAV与有人机和巡航导弹的费用

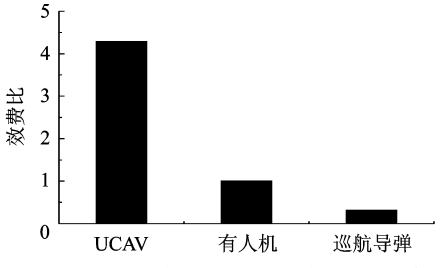

图7 UCAV与有人机和巡航导弹的效费比

在取得相同的攻击效果的情况下，UCAV相比有人作战飞机具有较高的效费比，主要原因是UCAV不需要座舱，气动隐身综合优化，可以实现更高的隐身水平，从而使UCAV作战效能大幅提高；UCAV最大设计过载小，减轻了重量；另外UCAV长期储存，机体设计寿命可以减少；UCAV使用维护简单，自动检测，视情维护；上述特点使得UCAV的使用费用大幅下降，单机价格和小时使用费用大幅下降.

2) UCAV相对巡航导弹具有较高的效费比

UCAV相对巡航导弹，在攻击具有一定风险的目标时具有较高的效费比.虽然UCAV在攻击目标时有一定的损失，但由于其多次使用的特点，对于成本较高的巡航导弹，成本还是要低很多.使用低成本全球定位系统制导炸弹，既可保证攻击的精度，也可使攻击的成本降得很低.挂载低成本的精确制导炸弹对于高隐身的UCAV来说将是未来UCAV的有效方案.

3) 在攻击有完善防空系统保护的目标时，巡航导弹相对于有人战斗机具有优势

在攻击有完善防空系统保护的目标时，巡航导弹相对有人战斗机效费比较高，主要原因在于有人战斗机具有较高的价格.然而，如果有人驾驶飞机用于攻击在敌防空系统被UCAV和巡航导弹摧毁后的低风险目标，能不冒太大风险攻击目标，那么其效费比相比使用复杂的巡航导弹更合算.

4) 巡航导弹、UCAV、有人驾驶飞机的使用建议

目前的巡航导弹、UCAV、有人驾驶飞机作战中是相互补充，不是相互取代的.无疑在冲突的第1阶段中UCAV和巡航导弹是非常有用的，其主要任务是破坏敌防空系统.UCAV还具有随后的战场评估能力和根据战场评估进行任务再规划的能力.一旦防空系统遭破坏，用常规飞机来执行攻击任务更为经济.由于许多国家不能确保在未来冲突中实施有效的对敌防空压制，所以巡航导弹会继续发挥更加重要的作用.而UCAV由于其完全能够执行如巡航导弹执行高危险度任务，且具有执行高复杂度任务的能力，并具有很高的效费比，因此，必将是未来发展的重要方向.

4 结 论

本文对战斗机效费分析的基本概念和原理进行了分析和阐述，并应用该原理，对隐身、作战半径、机动能力和武器装载等参数变化对UCAV对地攻击的效费比影响进行了分析，权衡得到符合未来作战环境下的UCAV的指标参数.

对满足优选指标的 UCAV 效能、费用以及效费比进行了计算,并与有人战斗机和巡航导弹的效费比进行了对比分析,经过效费优选后得出,重 8 000 kg、载弹 1 000 kg、作战半径 2 000 km 和 RCS 不大于 0.01 m^2 的 UCAV 在执行对有防空系统保护的敌重要目标进行攻击的任务时,综合效费比高于巡航导弹和有人隐身飞机.

参考文献(References)

[1] Lewis W K. UCAV-the next generation air-superiority fighter[R]. School of Advanced Airpower Studies, Air University, Maxwell Air Force Base, 2002: 41－53

[2] 温特切勒. 现代武器运筹学导论[M]. 北京:国防工业出版社,1974:175－196
Winter E C. Introduction to operational research of modern weapon [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1974:175－196(in Chinese)

[3] Ball R E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design [R]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2005:44－49

[4] Roskam J. Airplane design (Part Ⅷ): Airplane cost estimation: design, development, manufacturing and operating [R]. Kansas, USA: DAR Corporation, 2003: 21－42

[5] GJB1364—92,装备费用-效能分析[S]. 1992:8－16
GJB1364—92, Cost-effectiveness analysis for materiel [S]. 1992:8－16(in Chinese)

[6] 张恒喜. 现代飞机效费分析[M]. 北京:航空工业出版社,2000:149－170
Zhang Hengxi. Cost-effectiveness analysis for modern airplane [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000:149－170 (in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)

(上接第 664 页)

称力矩也较小[6],因此飞翼的偏航操纵效能通常可以满足不利侧风下的单发失效配平需求.

另外,飞翼布局飞机由于操纵面冗余,加装控制系统后通过控制分配可实现 3 轴操纵解耦,因此单发失效仅对偏航配平操纵提出要求,而滚转操纵力矩仅需用来配平侧滑,基本不受单发失效的影响.由表 7 也可以看出,大展弦比飞翼的滚转轴操纵效能很容易满足侧滑配平要求.

3　结　论

1) 大展弦比飞翼作战飞机由于构型的原因导致本体(开环)动态响应特性较差;随着控制系统所起调节作用日益增强,飞机闭环动态响应特性改善很多,较容易满足飞行品质规范要求.因此,控制系统对飞翼布局作战飞机的飞行品质评定结果影响更明显.

2) 控制系统虽能改善飞机的动态响应特性,但却无法改变飞机的稳态配平特性或静操纵性.大展弦比飞翼由于构型的原因呈现航向轻微静不稳定,导致定常侧滑配平所需的偏航操纵力矩与常规飞机方向相反,不符合驾驶员的操纵习惯以及飞行品质要求.

3) 由于气动构型和操纵面配置等差异,飞翼布局飞机在完成某些任务时对操纵效能的需求可能与常规构型的飞机存在较大差异,在飞机设计中要进一步考虑这些需求特性.

参考文献(References)

[1] 马松辉, 吴成富, 陈怀民. 飞翼飞机稳定性与操纵性研究[J]. 飞行力学,2006,24(3):19－21
Ma Songhui, Wu Chengfu, Chen Huaimin. Study on stability and manoeuvrability of flying wing aircraft[J]. Flight Dynamics,2006,24(3):19－21(in Chinese)

[2] 马超,李林,王立新. 大展弦比飞翼布局飞机新型操纵面设计[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(2):149－153
Ma Chao, Li Lin, Wang Lixin. Design of innovative control surfaces of flying wing aircrafts with large ratio aspect [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007,33(2):149－153(in Chinese)

[3] 李林,马超,王立新. 大展弦比飞翼构型的横航向操纵特性[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(10):1186－1190
Li Lin, Ma Chao, Wang Lixin. Lateral-directional control characteristics of high aspect-ratio flying wing configurations [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007,33(10):1186－1190(in Chinese)

[4] MIL-STD-1797A, Flying qualities of piloted airplanes[S]

[5] 方振平,陈万春,张曙光. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005:272－329
Fang Zhenping, Chen Wanchun, Zhang Shuguang. Aircraft flight dynamics[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005:272－329 (in Chinese)

[6] James M S, William B B, Dieter M. Control concepts for a vertical tailless fighter[R]. AIAA Paper 93-4000,1993:1－6

(责任编辑:娄　嘉)