



苍穹雷霆

——对地攻击型无人机作战效费全解析

李继广 董彦非 陈欣 岳源 屈高敏 著



东北林业大学出版社
Northeast Forestry University Press

CANGQIONG LEITING

苍穹雷霆

——对地攻击型无人机作战效费全解析

——DUIDI GONGJIXING WURENJI ZUOZHAN XIAOFEI QUANJIEXI

李继广 董彦非 陈欣 岳源 屈高敏 著

东北林业大学出版社
Northeast Forestry University Press

· 哈尔滨 ·

版权专有 侵权必究

举报电话：0451-82113295

图书在版编目 (CIP) 数据

苍穹雷霆：对地攻击型无人机作战效费全解析 / 李继广，
董彦非，陈欣等著. —哈尔滨：东北林业大学出版社，2017. 1
ISBN 978-7-5674-1024-4

I. ①苍… II. ①李… ②董… ③陈… III. ①无人驾驶
飞机—作战—研究 IV. ①E844

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 023061 号

责任编辑：赵 侠 刘天杰

封面设计：宗彦辉

出版发行：东北林业大学出版社

(哈尔滨市香坊区哈平六道街 6 号 邮编：150040)

印 装：三河市天润建兴印务有限公司

开 本：710 mm × 1 000 mm 1/16

印 张：14.25

字 数：192 千字

版 次：2017 年 9 月第 1 版

印 次：2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价：55.00 元

如发现印装质量问题，请与出版社联系调换。(电话：0451-82113296 82191620)

前 言

无人机是当今各主要军事大国航空器发展的重要方向之一，在当前发生的局部战争中都有无人机的身影，并发挥着重要作用。近年来，对地攻击型无人机技术已经日趋成熟，并相继被各航空强国所掌握。多种“察打一体”无人机系统相继定型并装备部队，在局部战争、反恐战争和缉毒行动中取得了不俗的战绩。以美国的“X-47B”舰载无人机为代表的新一代攻击型无人机的设计与研制已取得了突破性进展，成功完成了多种武器对地攻击和航母上的起降试验。中国、法国等国的同类型攻击型无人机系统相继首飞成功，并完成了一系列任务载荷的功能与性能试验。因此，攻击型无人机系统投入实战将指日可待。在可预见的将来，对地攻击型无人机必将成为以空制陆的主要武器平台之一。

相对于有人驾驶飞机，无人机在执行对地攻击任务时，在人员安全、使用环境、使用成本等方面具有独特优势。同时也不能否认，随着战场环境的日益复杂，地面防空能力不断加强，对地攻击任务多样性增加，所投放武器的成本提高等因素的影响，使得无人机对地攻击的使用成本不断提高。因此，需要研究对地攻击型无人机的作战效能，并根据不同战场环境要求，寻找提高作战效费比的方法和有效途径。

这本书是以著者参与的某著名飞机设计研究所关于对地攻击型无

人机作战效能研究项目为基础撰写的著作，著者在查阅当今世界上主要无人机系统的功能、性能、作战使用模式、功效效果等文献的基础上，采用经典评估模型、现代专家评估模型和神经网络等方法，对无人机对地攻击的效能进行了细致分析与研究，结合国内外先进无人机特点与对地攻击使用实例，得到了一套对地攻击综合效能评估方法。

撰写本书的初衷源于美国等发达国家为了解决经费不足和费用上涨的尖锐矛盾，从20世纪60年代起就把费用作为与性能和研制进度同等重要的因素看待，提出了效能和寿命周期费用的概念，建立了效费分析的科学方法。在攻击型无人机系统的整个寿命周期内，全过程实施跟踪和控制，分阶段进行评审，并做出相应的决策，取得了显著效果。时至今日，国外攻击型无人机效费分析研究已经取得长足发展：2003年6月，国际电工委员会（IEC）正式颁布了《寿命周期费用分析—应用指南》；美国国防部关于CAIV（Cost As An Independent Variable，费用作为独立变量）的条例趋于完善，明确规定所有采办类别（ACAT）为I和IA类的项目都必须符合CAIV原则并建立一个CPIPT（费用—性能综合产品组），采办项目基线应包括CAIV目标和关键的进度日期，ACTD项目在其计划和执行过程中应执行基于CAIV的费用—进度—性能权衡等。国内攻击型无人机系统的经济性也越来越受到重视：2001年，《攻击型无人机设计手册》第一次增设了第22分册《技术经济设计》；同年，专著《现代攻击型无人机效费分析》对攻击型无人机效费分析的理论和方法进行了系统的阐述；解放军总装备部明确规定，今后重大项目不做系统的经济性分析或经济性分析没有通过评审的不能立项。为此，空军首次增设了专门进行经济性分析的正式机构，各类航空院校普遍开设了相关课程并设立了硕士和博士学位授权点。但由于国内缺少论述攻击型无人机效费分析

的专著，不能帮助相关人员解决工作中的实际问题。因此，作者根据这个迫切需要，在自己前期研究成果的基础上，查阅国内外大量相关领域研究文献，将系统工程与效费比评估理论和方法相结合，编写完成这本专著。

本书将系统工程原理和方法应用于攻击型无人机系统效费分析研究，并将效费比这一综合性战技指标作为主要决策依据和关键技术，指导攻击型无人机系统的设计、研制与使用。攻击型无人机效费分析在观念上实现了三方面的重大突破：第一，从重视性能到重视效能的重大突破；第二，从重视采购费用到重视寿命周期费用的重大突破；第三，从仅重视效能或仅重视寿命周期费用到着眼于二者的统一，即重视效费比的重大突破。其中，全寿命周期成本（LCC）概念与计算方法已在国外军工产品研制与采购中深入人心，是项目决策的重要依据之一，它克服了传统上仅注重降低生产制造成本的局限性，强调“产品成本是研发设计的结果”，统筹考虑产品的可生产性、可靠性、可维修性等要求，减少产品在交付使用后的使用与维护费用。LCC管理强调以顾客为中心，不仅考虑了生产，同时也考虑了使用者的耗费，确定有利于提高成本效果的最佳设计方案。

本书从无人机的现状与发展趋势出发，导入对地攻击型无人机的作战样式、评估攻击型无人机作战效能的方法以及对地攻击型无人机的效费分析方法，可读性和科学性并重。给读者带来阅读愉悦的同时，又以严谨的态度介绍了对地攻击型无人机效能评估和效费分析的方法。本书适用于各类航空院校相关专业硕士和博士研究生教学与参考，同时适于航空系统专业技术人员使用。

目 录

第一章 综述	1
第一节 什么是无人机	1
第二节 对地攻击型无人机综述	9
第三节 对地攻击型无人机作战模式	37
第四节 2009~2047 年美国无人机发展规划	55
第五节 无人机设计的核心——飞控理论的发展	91
第二章 作战效能评估方法	106
第一节 攻击型无人机效能分析	106
第二节 对地攻击型无人机效能评估建模	115
第三节 算例分析	155
第三章 寿命周期费用分析	177
第一节 相关概念	177

第二节	国外攻击型无人机寿命周期费用模型	180
第三节	寿命周期费用模型类别	183
第四节	LCC 建模与应用实施程序	186
第四章	效费综合分析	188
第一节	效费权衡分析基本程序	188
第二节	攻击型无人机寿命周期费用的可比性	189
第三节	攻击型无人机效费比	192
第四节	权衡分析的比例模型	193
第五章	相关结论	195
第一节	效能分析	195
第二节	费用分析	205
第三节	设计和使用相关问题	213

第一章 综 述

第一节 什么是无人机

一、无人机的定义

回顾百年航空的发展历程，是一部以战斗机为代表的军用飞机的发展史。1903年12月17日，美国莱特兄弟驾驶“飞行者1号”成功地飞行了4次，在最后一次飞行中，飞行了59 s，距离260 m，它标志着人类飞天梦的实现。19世纪是以活塞式发动机为动力的亚声速飞行时代。当前是以喷气式发动机为动力的超音速时代。不久的将来将是无人战斗机或者说是无人机的时代。什么是无人机？所谓无人机，是动力驱动，能够自主飞行，可重复使用，而且是无人驾驶的航空飞行器。

首先来看无人机和有人机的区别。所谓无人机，首先是无人驾驶的，有人机是有人驾驶的；无人机可以按照事先规划的航线来进行飞行，而有人机是驾驶员驾驶飞行；相对有人机而言，无人机的性能比较简单，而有人机由于有人在上面，它人员的支持系统和生

命保障系统要比无人机复杂得多。另外相对而言，无人机小且轻。小的无人机才 10 g，大的无人机也就 1.1 万 kg 重，而重型战斗机都在 30 t 以上。

接下来看一下无人机与航模的主要区别。众所周知，航模也是无人驾驶的。的确，航模上也没有人驾驶，但是它们两者是截然不同的。首先无人机是自动驾驶，自主飞行。而航模是遥控操纵，对于无人机来讲可以超视距、程序控制，而航模只能在视距内范围里，由地面人员进行控制。从系统上来讲，无人机系统复杂，而航模相对来讲要简单得多。另外对无人机来讲，有高速、中速和低速飞行无人机，而航模由于是人员操作，通过目视观察速度，人员反应速度都不可能过快，所以航模一般都速度不快，它只能是低速的。

另外看一下无人机与巡航导弹它们之间有什么区别。无人机和巡航导弹都是无人驾驶，自主飞行。但是无人机可以带不同的装备，执行不同的任务。而巡航导弹带的战斗部，对敌攻击，而且是一次性使用。无人机可以重复多次使用。

无人机系统的组成。首先，它是飞行器平台，有一个飞行器与之相应。其次，它有无无线电遥控、遥测装置，即主控制站。在主控制站里可以对无人机进行操纵，比如航线的规划、整个飞行姿态的遥控与遥测，以便随时掌握无人机在空中的姿态和飞行状况。无人机还可以执行相应的任务，例如战场侦察、战场评估、对地攻击等，在执行任务时，需要带相应的任务设备。无人机的组成系统中有一个发射回收系统。

按照不同的分类标准，无人机有不同的分类。简单地说，无人机可以分为军用和民用两大类。在军用无人机中又可以分为无人侦察机、无人战斗机、靶机、微型无人机和无人直升机。

二、无人机的的发展

无人机的发展可以追溯到第二次世界大战时期。在 1935 年，德国在希特勒的领导下，为了发动第二次世界大战，命令空军开展火箭方面的研究，其中一个方面就是研究外形像飞机一样的火箭，第二种是弹道式的飞行轨迹是抛物形的火箭，而且很快在波罗的海的乌采顿岛上修建了佩内明德试验场进行试飞。1942 年 6 月，再一次把这个工程提了出来，在 1942 年的 12 月 24 日实现了首飞。这个项目是由著名的航空先驱、航空专家、火箭专家冯·布劳恩主持的。冯·布劳恩在二战之后到了美国，后来主持了美国的阿波罗空间计划。德国在此基础上成功试射了 V-1 飞弹，后来经过进一步的发展，就形成了 V-2 无人机。V-2 无人机的产生，在无人机技术方面是一个里程碑。同时无人机的发展使航空器中的另一种类得到极大的发展，那就是导弹。二战期间，德国人为了打击英国，向英国伦敦投放了 5 000 枚 V-1 飞弹。由于当初的技术水平和现在的技术水平是不可比拟的，所以打击精度不高，如果现在投入 5 000 架轰炸机，恐怕伦敦就不是今天这个样子了。

有了第一架无人机以后，无人机的后续研究得到了极大的发展。主要分为三个阶段：第一个阶段就是在 20 世纪五六十年代，形成了一个无人靶机的研制时期，简称靶机时代。在 20 世纪五六十年代，世界处在一个冷战时期，超级大国加紧进行军备竞赛，研制出了一批高性能的飞机和导弹。对这些飞机和导弹的性能进行检验和鉴定需要大量的靶机。武器装备鉴定需要，极大地刺激了无人靶机的发展。

第一架靶机是美国的“火蜂 1 型”靶机，它由涡轮喷气发动机推进，高亚音速，全金属机体结构。机长大概有 7 m，翼展 3.93 m，起飞质量 1 134 kg，最大的平飞速度是 1 112 km/h。南京航空航天大学

研制生产了中国的第一架靶机——长空一号靶机，这个靶机的机长是 8.4m，起飞质量 2 060 kg，最大的平飞速度是每小时 920 km，高度范围是在相对地面 50 m 到 1.8 万 km。

第二个阶段是无人侦察机的诞生。在越南战争期间，有人军用侦察机得到了广泛的应用，特别是像美国的 U-2 侦察机，SR-71 等有人侦察机。但是这期间，U-2 侦察机在越南、苏联和我国的上空接连被击落下来，造成了惨重的损失，给美国人在外交上带来了被动。于是美国人就提出，要研制无人侦察机，以减少人员的伤亡。于是美国人首先把火蜂靶机改装成无人驾驶侦察机，把它称为 Ryan147，它的机长是 8.8 m，翼展 3.93 m，起飞质量 1 430 kg，最大的平飞速度是 612 m/s，高度达到 18 km。那么中国的第一架无人侦察机——长虹无人机，它的机长是 8.97 m，翼展 3.76 m，起飞质量 1 085 kg。这个无人侦察机是通过母机挂在这个机翼下面，在空中进行发射的，这是一种比较少见的发射方式。

第三个阶段是无人机飞速发展的阶段。也就是 20 世纪 90 年代以后，无人机的发展在这个时期具有鲜明的时代特点。第一是现代战争中无人机被广泛地应用。可以说无人机从辅助、支援机种转为了一个主战机种，成为一种主要的武器装备，这是一个很大、飞跃性的变化。第二是小型无人机崭露头角，尤其是在中东战争中，它取得了非常好的实战应用效果。在贝卡谷地战役中，以色列利用了小型的无人飞机来诱导叙利亚的防空、堤防雷达开机，就是典型的一个战例。第三是无人机的发展系列化，出现了三大发展热点，分别是长航时无人机、无人战斗机和微型无人机。在这时，美国的“全球鹰”研制成功并装备了部队。另外一个特点是各个国家相继成立了无人机专业化部队。

三、无人机发展的动因

推动无人机快速发展的原因是多方面的。第一个原因是政治原因。美国在越南战争期间，空军有 2 600 多架飞机被击落，其中有 5 000 多名飞行员被俘，或者是死于战争，仅此一点损失就是非常大的，可以说是伤亡惨重。人们厌战、反战情绪高涨，引起了政治危机，这就必须从政治上解决人员伤亡的问题。如何减少人员伤亡呢？那就是无人化，这就有了研制无人机的需求。第二个是经济上的考虑。有人驾驶飞机的成本成倍地增长，F-22 达到了 1 亿美元的单机价格；那么轰炸机的价格更是惊人了，像 B-2 隐身轰炸机，它的造价是 4.5 亿美元。无人机的使用费用比较低，由于无人机体积比较小、质量比较轻，造价和使用成本都很低。相较于有人机，无人机的成本降低了 1/3，有的甚至是一个数量级。另外，无人机特别是无人战斗机可以长期保存在仓库里面，十年或者更长的时间。这样一来，使用维护费用就大大减少了，据军方估计可以减少 80%。另外在飞行方面，无人机的训练跟有人机不太一样。有人机，飞行员必须到空中去飞，每飞行一小时需要 4 万美元的花销。而无人机可以在虚拟的座舱里面进行训练，所以费用大大减少。同时一个人可以控制几架甚至数十架的无人机，而有人机驾驶员不可能在空中一个人开两架飞机。所以对飞行员的培养，这个费用也可以大大减少。总的来说，无人机的使用费用是较低的。

另外，战争的需求是无人机快速发展的一个推动力。在冷战期间研制了靶机，而越南战争期间无人侦察机诞生了，中东战争期间小型无人机崭露头角，在海湾战争中大量地使用了小型无人机，而在科索沃战争中，中空长航时无人机初露锋芒，之后在阿富汗和伊拉克战争中同样发挥了威力。在阿富汗战争中，“捕食者”无人机首次发射导

弹，这是无人机首次进行导弹发射，对地面进行攻击。那么在不久的将来，高空、高速、隐身、长航时无人机将是一个很大的需要。另外，无人作战飞机、高超声速无人机以及微型无人机都将是一个很大的需求。所以战争的需求是无人机得以发展的一个推动力。另外无人机有优越的使用特性，特别是小型无人机，它机动性、隐蔽性好。小型单兵无人机的使用，使战士在战场前沿就可以利用无人机看到敌方阵地上的情况，甚至可以看到对方的哪个士兵在使用什么装备，正对着哪个方向进行开火，而且都是实时的。

四、无人机的应用

无人机军事方面的应用大致可以分为4个方向。

第一，我们把它称为软杀伤，也是在电子对抗战争中使用的无人机。比如在软杀伤中可以进行雷达信号干扰，无人机装的铝箔到了作战区域以后，在空中撒出，敌方雷达看到的就是一团杂乱的信号，对敌方的雷达起到干扰的作用。无人机也可以带一些干扰设备，发射与敌方雷达同频率、同频段的电磁信号，让对方雷达接收不到，发现不了己方的飞机，这样就可以在隐蔽下进行攻击。另外还有光电干扰，比方说打闪光、激光等进行干扰，这也是软杀伤。软杀伤可以为自己争取到更多的时间。

第二是硬杀伤方式，也就是进行无人攻击。对地、对空攻击都是硬杀伤的。

第三是反辐射就是对雷达进行攻击，它是个自杀式的。

第四是侦察方面，应该说无人机更多还是用于在战场的侦察，可以进行光学侦察，带航空相机、CCD摄像机、红外行扫描仪等侦察设备。

其他比如在民用方面，包括森林防火、边防缉私、航空拍照、地

面勘探等，都可以使用无人机。

五、无人机的战场应用

下面是无人机在现代战争中的一些实际应用情况。

越南战场上无人机初露锋芒，美军出动了 3 435 架次的无人机，获取了 80% 的空中侦察照片。

中东战争中无人机可以说是身手不凡。在 1982 年 6 月 9 日贝卡谷地战役中，以色列用了“石鸡”“侦察兵”“猛犬”等小型无人机，诱导叙利亚的“萨姆-6”地空导弹的制导雷达开机，然后获得了雷达的工作参数、波段等，并测定它的位置，把这个信号通过空中的预警机传到了指挥部，指挥部命令地面导弹和空中轰炸机进行攻击，仅仅 6 min 的时间，就把叙利亚 19 个导弹阵地全部摧毁掉了。这是无人机在战场上使用的一个经典战例，使以军掌握了战争的主动权。

海湾战争中无人机大放异彩。多国部队使用了两百多架无人机，其中“先锋”无人机就有 90 多架，“敢死蜂”60 多架。仅“先锋”无人机执行任务就高达 530 多次，“敢死蜂”也执行了 500 多次任务。无人机完成了战场侦察、炮火校射、通信中继和电子对抗等任务。在海湾战争中，无人机首次实现了图像实时传输，也就是说无人机在空中飞，底下所拍摄到的、所看到的图像同时传输到了指挥所，在主控站显现出来。小型无人机即使被敌方打掉，它也很好地完成了侦察任务。在海湾战争中，无人机引导地面部队摧毁了伊军 120 多门火炮、7 个弹药库、1 个炮兵旅和 1 个步兵连。

在波黑战争中，无人机风光再现。战争中使用的无人机有 200~300 架，其中最令人瞩目的是捕食者，一种中空长航时无人机，它飞了 1 000 多个小时。战争刚开始时，塞族军队并没有把只在空中巡逻并不发动攻击的无人机当回事。直到塞族 70% 的军火库和 30% 的指

挥所遭到北约飞机的精确轰炸后，塞族人才意识到这个在空中像鸟一样飞翔的无人机的厉害。“捕食者 A”是在“纳蚊”的基础上发展起来的，是一个长航时战略性的无人侦察机。它可以把图像实时地传输到地面，地面再把它放大，找目标，最后传到了主控站。在主控站指挥部里，完成了接下来的指控进行攻击任务。它翼展有 12 m，机长 8 m，升限 7 600 m，最大速度每小时 160 多千米。可以说它的速度不是很快，但是它能很好地执行任务。尤其是它可以最大装载 204 kg 的任务载荷，续航 24 h。

阿富汗战争期间，美国人又出新招，在捕食者无人机上首次安装携带“海尔法”导弹用来进行攻击。而且在阿富汗战争中，首次使用“全球鹰”这么一个非常庞大的无人机。“全球鹰”可以在全球进行飞行侦察，它可以替代卫星更好地完成战场的侦察任务。“全球鹰”的翼展 35.4 m，相当于波音 757 飞机的翼展，机长是 13.5 m，它的升限达到了 2 万米的高度，巡航速度是 635 km/h，起飞质量 11.62 t，它的续航时间可以达到 36 h，任务质量最大可达 900 多千克。

伊拉克战争中无人机战果显著，是美军投入无人机最多的一次，数量上是在阿富汗战争中的 3 倍。按照美国国防部的说法，无人机提高了联军的作战能力，将目标摧毁力提高了 25 倍。这次战争用了 20 架“捕食者 A”和两架“捕食者 B”无人机。“捕食者 A”可以带两枚“海尔法”导弹，而“捕食者 B”是在“捕食者 A”的基础上换了发动机，加大了尺寸，最多可以装 360 kg 的任务载荷，最多可带 8 枚“海尔法”导弹、6 枚 GBU-38 攻击弹，作战能力大大地提高了。另外有 4 架“全球鹰”参加了战斗。还有很多种小型的无人机也参与了这场战斗。在这一次战争中，无人机主要是完成情报监视侦察、火力打击、电子干扰、欺骗、战场评估、信息中继和对地支援的任务。

第二节 对地攻击型无人机综述

一、无人机的应用现状与发展

在 20 世纪六七十年代有人提出发展攻击型无人机的设想，以减少飞行员的伤亡。随着这一想法的出现，人们在这方面的探索和努力就没有停止过。随着计算机等现代技术的进步，自动控制和驾驶技术被广泛应用在有人驾驶的战斗机上，这使得有人战斗机自动化程度非常高，如美国的 F-117 隐形战斗机在战斗时，飞行员除了在控制武器发射时按动按钮外，其余动作均由计算机系统自动完成。这使人们注意到，飞行员在驾驶飞机外依然可以操纵攻击型无人机进行作战任务。在航空学术领域，空气动力学、结构力学、新型材料、发动机技术、新的攻击型无人机综合设计技术都有了长足进步。所有这些，都为无人战斗机成为现实提供了有力保证。

当前，对攻击型无人机有两种定义方式：一种是攻击型无人机是一种可返回的、可控制的、有自主性的（或按照预设航线）巡航导弹；另一种是具有隐身性、自主飞行能力和长续航能力的，可受控飞行而且能大机动飞行的无人驾驶飞行器。根据前一种思想设计出的无人攻击机实际上是巡航导弹的变种，与现有巡航导弹比，增加了灵活性，但还是一次性攻击武器。典型的产品有以色列航空工业公司研制的“哈比”无人攻击机，用以攻击敌方空防雷达或地对空导弹发射系统。攻击程序是：首先通过机载的探测系统探测到敌方空防雷达发出的辐射信号，然后以一种“自杀”的方式与其同归于尽。