



第 1 章

无人机概论

无人机最早出现在 20 世纪初期第一次世界大战中，当时作为靶机训练使用，至今已有一百多年的发展历程。“无人机”是一个描述新一代无人驾驶飞机的名词。在民用领域中的航空拍摄、遥感测绘、管道巡检、农业植保、电力巡线、城市管理、地质勘测、消防安保、抢险救灾、气象监测、物流运输等行业，无人机的用途十分广泛。在军事领域中，无人机可以用来完成战场的侦察、对敌分子的空中打击、空中地面协作、定位校射、损失评估、电子战等。相较有人机而言，无人机成本比较低，效率高，没有人员伤亡风险，生存能力较强，机动性能好，作战使用方便，在现代战争中发挥着非常重要的作用，拥有广阔的前景。我国的无人机市场已发展了 30 余年，从最初的军用领域逐渐扩展到消费领域，各航空科技企业也如雨后春笋般涌现，从助力现代乡村到建设智慧城市，凡是需要空中解决方案的地方，都将有无人机的一席之地。无人机的发展，不仅在航空领域取得了不凡的成绩，同时还带动了动力技术、材料技术、控制技术、微电子技术以及通信导航技术等的迅速发展。未来，无人机将应用在更广阔的领域中。

✧ 本章目标

- 掌握无人机的基本情况。
- 了解无人机的基础知识。
- 了解无人机产业及发展现状。

1.1 无人机简介

无人机（全称为无人驾驶航空器，Unmanned Aerial Vehicle，UAV）指的是由无线电地面设备或机载飞行控制系统驾驶飞行的无人航空器。无人机及其搭载的任务载荷设备、配套的地面控制设备、通信设备及链路、起飞（发射）及回收装置、无人机的存储和检测等装置又被统称为无人机系统（Unmanned Aircraft System，UAS），也称远程驾驶航空器系统（Remotely Piloted Aircraft Systems，RPAS）。具体来讲，无人机系统包含无人机执行任务所需的所有装置。无人机系统不仅能实时准确地控制载荷设备来完成所执行的任务，还对执行任务时无无人机的稳定性、实时数据传输的可靠性、空间位置的精准度、起飞着陆阶段的安全性提供有力保障。

无人机实际上是无人驾驶飞行平台的统称，也可以称为“空中机器人”。按照飞行平台来进行分类，可以将其划分为以下几种：固定翼无人机、无人直升机、无人多旋翼飞行器、无人飞艇、无人伞翼机、无人扑翼机等。

目前，无人机飞行平台以固定翼无人机、无人直升机及无人多旋翼飞行器为主。无人机从发展之初是将有人机加装无线电设备改制成无人机，所以其飞行原理、机体结构、操纵原理基本上与有人机相同。因此可以认为无人机是将有人机驾驶杆（舵）操纵内容迁移到地面无线电操控设备上，简化了无人机上的操纵系统与座舱结构，减轻无人机自身重量，从而增大无人机运载能力。另外，没有了前部的驾驶舱及舱内各类控制设备与生命保障系统，无人机拥有更大的空间安装任务载荷设备，让无人机可以代替有人机或其他设备工作，提高了作业效率，减少了人力的需求。

与有人机相比，无人机具有体积小、重量轻、高机动性、适应性强、成本低、使用方便等特点。由于不需要搭载飞行人员，无人机在设计时无须考虑飞行员舒适性等人为因素，更无人员伤亡的风险。设计人员只需要考虑无人机的飞行性能、执行任务的稳定性、续航时间等参数。所以，无人机更适合执行危险性较高的或不适合有人机执行的任务。

同样，无人机也有明显的不足之处。由于存在无人机在视距外飞行时不便于操作者对飞行环境的观察、操作者对飞行姿态不敏感、操纵延迟等因素，如果紧急情况处理不及时，容易造成安全事故。另外，通过地面控制系统进行无线电远距离操控易受到干扰和控制，外部环境感知设备的可靠性还有待提高等。

按应用的领域分类，无人机可分为军用无人机、民用无人机。

军用无人机又可以分为无人机侦察机、无人机攻击机、中继无人机、电子对抗无

人机、微型战术无人机和靶机等。现代化军事战争提出了“忠诚僚机”的概念，使有人机与无人机编队协同作战，实现情报互通，有人机指挥无人机实时侦察打击，不仅减少了飞行员的伤亡，甚至在必要时可用无人机来防御即将到来的伤害。现代无人侦察机可在空中侦察 24h 以上，高空长航时无人侦察机不仅提高了情报获取效率，也减少了飞行员长距离驾驶疲劳可能产生的危害。微型战术无人机可用于单兵作战，利用无人机上的红外相机、光学相机以及红外热成像仪等设备完成捕捉战场画面、实时跟踪、目标锁定等任务。军用无人机在未来战场上将发挥巨大的作用。

在民用无人机领域，将无人机技术与行业应用结合起来，才是无人机发展的真正需求。而在航拍摄影、农林植保、遥感测绘、物流运输、应急救援、电力巡检、自然灾害监控等众多领域的应用，真真正正地拓展了无人机的用途。

但日常生活中人们常常将无人机与航模等同起来，其实它们的不同主要表现在控制方式、飞行方式、模块组成以及执行任务的差别上。航模大多数情况下是操纵手通过遥控器进行控制，而无人机增加了飞行控制系统，用以对无人机本身进行主动控制。其次就是执行的任务性质不同。无人机可执行超视距的任务，任务半径可达上万千米，利用机载导航系统进行自主飞行，利用数据链系统上传控制指令和反馈飞机的状态及工作情况。航模则大多数都在视距内进行飞行，且不携带任务系统，更多地用于娱乐和大型活动上的表演。

总的来说，航模更侧重于娱乐，独特的表演性质给人们带来了更多视觉上的体验，也享受着飞行的快乐。而无人机则是人们日常生活中的帮手，帮助人们完成许许多多的任务。无人机不仅在军用领域展现了强大的生命力，在农业、电力、安防、测绘等民用领域也得到了长足发展。我国的无人机也正处于快速的发展时期，涌现出了一大批优秀企业，在国际上也拥有着举足轻重的地位，为国家的无人机事业发展贡献了力量。

中国航空器拥有者及驾驶员协会（AOPA-China）是国际航空器拥有者及驾驶员协会（IAOPA）的中国分支机构，是 IAOPA 在我国唯一合法代表。中国航空器拥有者及驾驶员协会于 2004 年 8 月 17 日在中国国家民政部登记注册，由中国民用航空局业务指导，代表中国私人航空器拥有者及驾驶员利益，接受国际航空器拥有者及驾驶员协会的监督、指导及相关规章约束。2013 年 11 月，中国民用航空局（CA）下发了《民用无人驾驶航空器系统驾驶员管理暂行规定》（以下简称《规定》），并由中国航空器拥有者及驾驶员协会负责民用无人机的相关管理。依照《规定》，我国无人机操作管理办法按照机型大小、飞行空域划分可分为 11 种情况，其中仅有 116kg 以上的无人机和充气量在 4600m³ 以上的飞艇在融合空域飞行，由民航局管理；包括现在越来越火的微型航拍飞行器在内的其他飞行，均由行业协会管理，或由操作手自行负责。图 1-1 所示为 AOPA 驾驶证。



图 1-1 AOPA 驾驶证

1.2 无人机发展简史

无人机的研发最早起源于第一次世界大战结束后。而到了第二次世界大战以后，世界上不少军事强国不约而同地将退役的各种战斗机改装成为靶机，正是这一举动开启了近代无人机发展的先河。随着电子技术方面的进步，无人机在侦察任务方面越来越展示出其优越性。例如，在越南战争期间，美国军方曾多次使用无人机对战场上高价值或者是防御严密的目标进行侦察。

目前，无人机产业同样是一个新型的高科技产业，涉及众多的领域，从产品研发、生产制造到行业使用、管理以及服务。产业链更是涉及许多高科技领域，其上游主要有新型材料，包括但不限于机身复合材料、载武器装备、操纵控制装备、发射回收装置及其他零部件等；下游主要包括军用和民用两种市场，以军用为主，还涉及科学研究、农业、电力、运输、气象等诸多行业，在民用领域也有广阔的发展空间。

1.2.1 产生背景

无人驾驶飞行器于 20 世纪 20 年代问世。1914 年，英军的卡德尔和皮切尔两名将领，向英国军队的飞行学会提交了一个提议：研究一个能够无人驾驶的飞行器，并使用无线电电子计量学来加以控制，使它能够在目标敌人进攻地域的上空，把预先挂载在无人驾驶飞机上的炮弹投放下去。这个大胆的设想刚一提出，就迅速受到了当时伦敦军事航空学会主席戴亨·德森爵士的赞许，并当即指定由 A. M. 洛教授带领团队进行有关研制。无人机在当时是作为练习用的靶机，是许多国家都用来形容新一代无人驾驶飞机的用语。

无人机是在 1917 年由英国人首次研发获得成功的，但直至 20 世纪 50 年代初才获

得了真正的应用。当时全球空军都纷纷大规模配备了大型无人机，并将其当作空中靶使用。此后，美军率先研发实现了无人驾驶侦察机，并进行了相关试验。到了 20 世纪 80 年代，大型无人机已经获得了广泛应用。

1.2.2 发展历程

1. 世界无人机发展历史

从 1903 年莱特兄弟驾驶世界上第一架飞机试飞到提出无人驾驶飞行器这个概念仅仅过去十几年。此后一百多年间，无人机在飞行平台、控制技术、数据传输、导航通信、载荷设备等各技术领域都取得了显著的进步。随着科学技术的进步，无人机在军事战场上体现了十足的重要性。从军事到民用的转变，使得无人机大放光彩。无人机在民用领域应用广泛，也带动了一大批产业迅速发展。无人机的发展大致可分为三个阶段：萌芽起步期、探索发展期和成熟稳定期。

1) 萌芽起步期

最开始，无人机的出现主要是用于军事领域。1917 年，美国人斯佩里发明了世界上第一台自动陀螺仪，美国海军采用了此款陀螺仪，并将“柯蒂斯”N-9 式教练机改装成世界首架由无线电操控的无人飞行器“空中鱼雷”式。“空中鱼雷”式无人机如图 1-2 所示，于 1918 年顺利飞行，但从未参加过战争。



图 1-2 “空中鱼雷”式无人机

随着三维立体作战模式逐渐形成，以及防空需求的增加，20 世纪 20 年代后，为了满足防空训练的需要，远程控制无人靶机开始出现。1935 年，英国的“蜂王”无人机问世，实现了现代无人机发射后能飞回至起飞点。“蜂王”无人机如图 1-3 所示，其最高飞行高度为 17 000ft，最高飞行速度为 100mi/h，但由于当时的技术相对落后，逐渐被英国皇家空军弃用。



图 1-3 “蜂王”无人机

在这一阶段的无人机研发过程中，无人机基本没有携带任何的任务载荷，仅作为靶机使用。地面上的操纵人员利用无线电遥控设备操纵搭载低精度机械陀螺仪的无人机进行飞行。伴随着有人机的快速发展，这一阶段的无人机也突破了原有飞行速度和飞行高度的限制，从不可回收到可回收重复使用，从平稳飞行到大机动动作飞行，发展意义重大，影响深远，大大提高了无人机在战场上的表现。

2) 探索发展期

20 世纪 60 年代起，无人机逐渐应用在战场之中。美国在越南战场上使用“火蜂”号无人机进行空中侦察，获取地面情报。以色列使用“侦察兵”“猛犬”等多型号无人机在战场中执行火力侦察、伪装诱饵、电子欺骗等任务。

1994 年，美国制造了“捕食者”无人机，其升级版将侦察用途的飞机改造成可携带武器并能攻击目标的无人机，开创“察打一体”的先河。1999 年，“捕食者”“先锋”“猎人”等多款无人机在科索沃战争中执行空中侦察、战场监控、电子对抗等任务。

进入 21 世纪以后，各国无人机发展极其迅速，全球 50 多个国家和地区共研发出近千种无人机。2004 年，美国制造出 RO-7B “幻影”无人机，是当时无人机家族中最小的一款。2007 年，美国“捕食者 B”“死神”无人机正式服役。2009 年，由臭鼬工厂 (Skunk Works) 设计生产的 RQ-170 “哨兵”无人机在美国空军服役，飞行高度可达 50 000ft。2010 年，美国研制的高空高速长航时无人机侦察机 RQ-4A “全球鹰”无人机部署在美国空军基地。

在横跨半个世纪的发展过程中，无人机系统从简单的机械陀螺仪向采用惯性导航加“罗兰”无线电导航的方式，从无任务载荷到加装简单载荷（如相机、红外探测等任务载荷），从操纵方式为遥控器到加装程序控制方式转变。至 20 世纪末，无人机上的导航定位系统升级为卫星定位与惯性导航组合的系统方式，任务载荷也实现了从最基本的载荷到加装光电吊舱的转变，控制方式也慢慢转变至程序控制与指令控制。至 21 世纪初，无人机发展已基本成熟，不少无人机至今仍在服役。从近程操控变成高空长航时，任务载荷除光电吊舱外还加装雷达等设备，无人机从侦察、干扰向使用大展弦比的攻击型无人机平台转变，导航系统主要采用差分定位方法加微型惯性导航系统，

采用程序控制加交互控制的方式，能自主控制并实时交互。

3) 成熟稳定期

从 2011 年至今是无人机发展的成熟稳定期。2012 年 12 月，欧洲“神经元”隐身无人机（图 1-4）在法国伊斯特里斯飞行试验中心首飞成功。2013 年 8 月，英国“雷神”隐身无人机（图 1-5）在澳大利亚武麦拉试验场完成首飞。2019 年 8 月，俄罗斯“猎人 B”隐身无人机（图 1-6）秘密试飞。这一阶段，无人机发展趋于稳定。在军事上，无人机逐渐向隐身化发展，通过改变结构布局以及使用隐身材料实现飞行平台隐身，避免雷达侦察。无人机也从单一作战逐渐向集群化、智能化战斗发展。任务载荷由侦察监视设备与精确制导武器等组成。随着人工智能技术的快速发展，无人机系统越来越智能、自主，性能也随着材料等技术的发展逐渐提高，战斗技术更加多样。



图 1-4 欧洲“神经元”
隐身无人机



图 1-5 英国“雷神”
隐身无人机



图 1-6 俄罗斯“猎人 B”
隐身无人机

2. 我国军用无人机发展历史

我国自 20 世纪 50 年代开始使用无人机，直至 1966 年 12 月，我国第一架无人机“长空一号”首飞成功，这也代表着我国的无人机进入自主研发生产阶段。“长空一号”无人机定义为靶机。1978 年 5 月，北京航空学院研制的“长虹一号”无人机试飞成功，成为我国首架高空无人侦察机，又名“无侦-5”，如图 1-7 所示。1994 年 12 月，由西北工业大学西安爱生技术集团研制完成 ASN-206 多用途无人机，它可以实时进行视频传输，为我军前线侦察提供了强有力的支持。



图 1-7 中国“长虹一号”多用途无人机

自 1999 年开始，中国航天科技集团有限公司开始研制无人机。2004 年，该无人机项目团队在没有任何经验和外界帮助的情况下，自主研发出具备自主飞行能力的“彩虹-1”无人机。2007 年，“彩虹-3”无人机首飞成功，在国内率先实现了“察打一体化”的无人机系统。“彩虹-3”无人机翼展 8m，机长 5.5m，机高 2m，起飞重量 650kg，有效载荷 60 ~ 180kg，最大升限 7000m，最大速度 256km/h，巡航高度 3000 ~ 5000m，最大航程 2400km，巡航时间 12 ~ 15h，动力系统采用活塞发动机，如图 1-8 所示。



图 1-8 中国“彩虹-3”无人机

2011 年，“翔龙”无人机面世，它是由中国航空工业成都飞机工业集团有限公司自主研发设计的一款大型高速高空长航时无人侦察机。“翔龙”无人侦察机如图 1-9 所示，机翼采用比较新颖的菱形联翼结构，在稳定性方面表现良好，升阻比比较高。“翔龙”无人机全身机长达 14.33m，机翼翼展 24.86m，飞机机身高 5.413m，正常起飞重量 6800kg，任务载荷 600kg，巡航高度为 18 000m ~ 20 000m，巡航速度大于 700km/h；作战半径 2000 ~ 2500km，续航时间最大 10h，起飞滑跑距离 350m，着陆滑跑距离 500m。

2012 年 11 月，“翼龙”系列无人机亮相珠海航展，它是由中国航空工业集团成都飞机设计研究所研制的一种中低空、军民两用、长航时多用途无人机。2021 年 7 月下旬，河南省大范围突发极端强降雨（7·20 郑州特大暴雨），导致部分地域引发了洪涝灾害，巩义市米河镇多个村庄通信中断。7 月 21 日，经研究，相关部门紧急调派“翼龙 2H”无人机（图 1-10）在空中充当应急通信平台，在跨区域长途飞行 4.5h 后抵达巩义市，21 日 18 时 21 分进入米河镇通信中断区域，利用其上搭载的移动公网基站，实现了大约 50km² 范围的长时稳定的连续移动信号覆盖。截至晚 20 时，空中移动基站共计连接用户 2572 个，产生流量 1089.89MB，单次最大接入用户 648 个，为广大灾区居民及时恢复了移动公网信号，打通了保障生命的应急通信线。



图 1-9 “翔龙”无人侦察机



图 1-10 “翼龙 2H”无人机

2021年珠海航展上，“攻击-11”无人机、“彩虹-4”无人机、“彩虹-6”无人机、“无侦-7”无人机、“无侦-8”无人机、WJ-700“猎鹰”无人机、“飞鸿-97”无人机、“彩虹-10”无人机纷纷亮相，也宣告我国逐渐走向自主研发无人机的大国时代。

3. 民用无人机发展

民用无人机相较于军用无人机起步较晚。20世纪80年代，日本雅马哈公司率先开发了一款用于农业飞防的无人直升机，并在1989年首次试飞成功。21世纪初，随着电子技术的快速发展，民用无人机迎来各国关注。2006年，汪滔创立深圳市大疆创新科技有限公司（本书简称大疆公司）。该公司先后推出了“精灵”（Phantom）系列、“悟”（Inspire）系列、“御”（Mavic）系列等消费级无人机，在民用无人机中影响巨大。2015年，无人机行业爆发，各无人机厂家飞速发展，为民用无人机行业的发展创造了非常有利的条件。目前，大疆公司的无人机在市场上依然有较高的占有率，在全球民用无人机领域也有不可撼动的地位。大疆“悟2”无人机如图1-11所示。



图 1-11 大疆“悟 2”无人机

1.3 无人机分类

无人机的种类很多，形状、用途各不相同。为了更加清晰明了地讲解无人机的种类，可以从无人机的飞行平台、用途、运行风险、飞行高度、活动半径几方面入手。

1.3.1 按飞行平台分类

1. 旋翼类飞行器

旋翼类飞行器是指一种重于空气的飞行器，当其在空中飞行时，由单个或多个旋翼旋转，进而和空气中的气流进行相对运动，从而产生一种反作用力来获得升力，形成与固定翼飞行器相对的关系。现在的旋翼类飞行器中，旋翼自动迎风旋转，主轴不需要提供动力驱动飞行的是自转旋翼机，如图 1-12 所示；主轴需要动力驱动飞行的都可以划分为直升机，所以从名字上来看，多旋翼飞行器即旋翼数量为三个或三个以上的直升机。

1) 多旋翼飞行器

多旋翼飞行器（Multirotor）也叫作多轴飞行器，是一种拥有三个及三个以上旋翼轴的特殊形式的直升机。单个旋翼轴最少需要一个电机，电机转动带动旋翼转动产生动力。通常这样来讲述多旋翼飞行器与单旋翼飞行器的差别：多旋翼飞行器的旋翼总距是固定的，而单旋翼飞行器的总距是随时可以变动的。多旋翼飞行器需要通过改变各个旋翼的转速来改变各个旋翼产生动力的大小，从而实现多轴飞行器前后左右以及上升下降的运动飞行。这种飞行器最常见的是中心对称结构或沿轴对称结构，飞行器上的各个螺旋桨按照机架的走向坐落于其边缘，结构较为简单，有利于小型化、批量化的生产。大疆“精灵 4”四旋翼航拍无人机如图 1-12 所示。



图 1-12 大疆“精灵 4”四旋翼航拍无人机

技术较为成熟的、比较实用且常见的有四旋翼、六旋翼、八旋翼飞行器等。操作简单、安全性高、构造简单、方便携带是它们的优点。消费级的小型航拍机更是越来越受到大众的欢迎，逐渐走进了寻常百姓的家庭。但是多旋翼飞行器同样存在缺点，主要有以下两点。

(1) 续航表现一般。

多旋翼飞行器和单旋翼飞行器的差别在于改变运动轨迹的方法。多旋翼飞行器的运动依赖于实时改变螺旋桨的转速来改变飞行器的运动轨迹，因此多旋翼飞行器的飞行控制系统是最重要的，而它的气动效率不是研究人员的侧重点，导致升阻比不是那么出色，降低了能量的转化效率，也就导致了续航能力的降低。

(2) 载重性能一般。

单旋翼飞行器和固定翼飞行器这两种机型可以做得很大，达到较大载荷载重的目的。而多旋翼飞行器却无法做得很大，当桨叶尺寸变大时，迅速改变桨叶转速的能力就会降低，所以单旋翼飞行器需要依靠改变飞行器的桨距来改变飞行器的升力大小，却不像多旋翼飞行器那样通过改变速度来改变升力。飞行器载重数值越高，对螺旋桨的性能要求也会越高，毕竟螺旋桨的大幅度震动之下刚性会降低，从而变得容易折断。

综上所述，在考虑到多旋翼飞行器的优缺点之后，多旋翼飞行器多用于日常生活中对续航和载重要求较低的任务，如影视航拍、农业植保、电力巡检等。

2) 直升机

直升机 (Helicopter) 是指由发动机提供动力，使飞机的旋翼转动，从而产生升力和推进力。直升机的特殊构造使其大大降低了对飞行环境的要求，可以在较小的空间进行垂直起降及悬停，并且可以实现前进（前飞）、后退（后飞）、侧飞和定点旋转（也称自旋或回转）等一系列可控飞行。“R44”直升机如图 1-13 所示。



图 1-13 “R44”直升机

直升机由机身起落架、动力装置、旋翼系统、控制系统以及各种载荷设备构成。机身空间用以放置任务载荷或用以载人。对于无人直升机，有时也可以取消这一任务空间，以机身下方挂载的方式安装在机身上。所以机身一般较为重要，它时刻影响着飞机的飞行性能、操纵性和稳定性。在飞行过程中，机身不仅承受着各种装载带来的负荷，也承担着动部件、发射武器、吊载货物带来的动负荷。这些负荷都通过接头传来。所以在研究直升机机体结构时，必须通过一定的手段降低其震动水平，以保障飞行的安全性和操控性。

轻型的直升机起落架一般采取滑橇的形式，而体型较大的或偏工业用途的大型直升机一般采取滑轮式的起落架。中大型直升机的动力一般采用涡轮轴发动机来驱动，这种发动机的输出功率较大，可为飞机提供足够的动力；轻型的直升机一般采用活塞发动机，而现今的无人直升机也逐渐出现了由电机驱动的机型。不管是何种动力驱动，其原理都是让旋翼产生旋转，以产生飞行器需要的升力和控制飞行器飞行姿态的分力。根据旋翼反作用的扭矩的平衡方式，直升机通常被分为四种形式：单旋翼带尾桨式直升机、共轴双旋翼式直升机、双旋翼纵列式直升机，以及双旋翼横列式直升机。

多旋翼飞行器的飞行轨迹通过改变旋翼的转速来改变，而直升机通过改变旋翼的桨距来实现其升降运动，通过周期变距来实现直升机的前、后、左、右运动，通过改变尾桨拉力来控制直升机的飞行方向。

（1）总距操纵。

通过改变旋翼的总桨距，使得每个桨叶的安装角实现同时增大或减小，以此来改变旋翼拉力的大小。而随着技术的改革，现在总距操纵已经变为总桨距 - 油门操纵，即改变总距的同时相应地对发动机功率也做出改变，减少了操作的复杂性。

（2）变距操纵。

变距操纵是周期变距操纵的简称，是指通过自动倾斜器使桨叶的安装角周期发生变化，从而使桨叶升力周期发生周期变化，让桨叶进行周期挥舞。此时，飞机上的表现为——旋翼锥体相对于飞机机体向着操纵杆运动的方向倾斜。

（3）航向操纵。

航向操纵是利用方向舵操纵尾旋翼（尾桨）的拉力大小，实现航向的操纵。当尾旋翼（尾桨）拉力发生改变时，这个力对飞机重心的力矩和主旋翼的反作用力不再平衡，直升机会绕立轴转动，使航向发生改变。

相对于多旋翼飞行器，直升机的优势在于载重。直升机的载重往往可以很大，而多旋翼的机型构造使其无法实现很大的载重。相对于固定翼飞行器，直升机对飞行环境的起降条件要求较低，方便在无跑道的环境下起飞降落，且可以实现在空中自主悬停。与其他机型相比，直升机的结构较为复杂，这也导致了它的维护成本较高，操控难度较高。

3) 倾转旋翼机

倾转旋翼机 (tiltrotor) 这一机型结构较为特殊, 是综合了旋翼和固定翼两种结构的飞行器。倾转旋翼机就是在相当于固定翼机翼的两侧翼梢之上分别安装一组由旋翼倾转系统组成的、能在水平和垂直位置之间转动的套件。当系统处于垂直位置时, 倾转旋翼机类似于横列式的直升机, 这时的旋翼轴与地面垂直, 可以完成像直升机一样的原地起降以及其他飞行动作; 当系统处于水平位置时, 倾转旋翼机又相当于固定翼螺旋桨飞机。将倾转旋翼机与直升机相比, 它的航程以及航速均优于直升机。

目前来看, 世界上比较有意义的一款倾转旋翼机就是美国贝尔公司研制的 V-22 型鱼鹰倾转旋翼机, 如图 1-14 所示。



图 1-14 V-22 鱼鹰倾转旋翼机

2. 固定翼飞机

固定翼飞机 (fixed-wing aircraft) 指由动力装置产生前进推力或拉力, 由飞机两侧机翼产生升力, 在大气层中飞行的重于空气的航空器。当固定翼飞机向前飞时, 机翼与空气之间摩擦, 形成压强差, 产生相对运动, 进而产生升力。固定翼飞机一般情况下由机翼、尾翼、机身、起落架和动力装置 (推进装置) 组成。依据飞机动力装置的不同分为喷气式飞机和螺旋桨式飞机。目前所存在的固定翼飞机的形状千奇百怪, 但总体上还是遵循着常规的布局来设计。

1) 机翼

固定翼飞机的机翼是产生升力的翼面, 飞机的飞行主要靠机翼来产生升力。根据气体的相对性原理和伯努利原理可以知道, 气体会在机翼表面产生压力差, 从而产生升力。升力增大, 飞机的飞行速度也增大; 反之, 升力减小, 飞机的飞行速度也随之减小。也就是说, 只有在飞机的飞行速度使机翼所产生的升力大于自身重力时, 飞机才可以离地起飞。

2) 尾翼

尾翼是调整飞机平衡、操纵飞机飞行姿态的重要结构，分为水平尾翼和垂直尾翼两部分。水平尾翼是指安装在飞机机体后方的水平翼面，目的是让飞机保持俯仰方向的稳定，翼面越大俯仰稳定性越好，反之就越差。垂直尾翼是指安装在飞机机身后的垂直翼面，目的是让飞机保持方向的稳定，垂直尾翼面积越大，方向稳定性就越好，反之就越差。

3) 机身

机身是用来连接机翼和尾翼的结构，同时用来装载货物、燃料、人员和武器等。对于无人固定翼飞机来说，一般用来挂载任务载荷以及动力设备等。

固定翼飞机在空中飞行时所做的运动是围绕重心在三维空间进行的，将重心作为飞机的旋转轴中心，那么它的三个运动轴就是横轴、纵轴、竖轴。围绕横轴的运动称为俯仰运动，在此轴上进行的运动有抬头爬升或低头俯冲。围绕纵轴的运动称为横侧运动，在此轴上进行的运动有向左或向右滚转。围绕竖轴的运动称为方向运动，在此轴上进行的运动有向左或向右的方向运动。调试好的固定翼飞机会像天平一样达到堪称完美的平衡状态，三轴的状态达到平衡时（俯仰平衡、横侧平衡、方向平衡），飞机是保持直线飞行状态的。

重于空气的固定翼飞行器之所以能够在天空中飞行，主要取决于飞机机翼的翼剖面形状，专业术语称为翼型。最常见的翼型表现为机翼前缘圆滑丰满，后缘薄而平直并呈现向上弯曲的形状，这种翼型的飞机在空中进行高速飞行时可以产生一股向上的升力，速度越快，产生的升力就越大。这种翼型之所以常见，是因为其可以应用到大部分机型上，例如，现在世界上最大的安-225运输机就是这种翼型。其他翼型还包括凹凸翼型、平凸翼型、双凸翼型、对称翼型、S翼型以及平板翼型。常见的机翼平面形状有矩形机翼、梯形机翼、后掠机翼以及椭圆机翼。

上面提到了固定翼飞机的形状“千奇百怪”，为什么这么讲？对于“常规布局”的飞机，是指既包含机翼又有平尾的机型。这一布局的飞机的最大优点是技术上成熟，是从飞机发展伊始就在使用的布局，也是航空发展史上应用最广泛的布局，不管是理论研究还是飞机生产技术都已经非常成熟。

有些飞机将原本布局在飞机机翼后方的尾翼平移至机翼的前面，这种飞机的布局称为“鸭翼”布局。单从外观上来看，“鸭翼”布局的飞机是指将主翼缩小，而将尾翼放大。鸭翼布局的飞机在某些方面还要优于常规布局的飞机，例如，在空中高速飞行时更稳定、起降距离缩短、机动性增强等。比较经典的机型有我国研发的“歼10”猛龙（图1-15）、瑞典研究的JAS39，以及法国的“阵风”等。



图 1-15 “歼 10”鸭翼布局

还有一种飞机在鸭翼布局飞机的基础上保留了平尾，称为“三翼面”布局飞机。拥有三个翼面的飞机可以将飞机上的载重更好地进行分配，并进一步地提升飞机的机动性，飞机本身对操纵者的反应也会表现得更加灵活。其缺点是增加阻力、降低了空气的气动效率、增加了飞机操控系统的复杂程度和飞机生产成本。三翼面布局飞机中最经典的当属俄罗斯研制的“苏 34”机型，如图 1-16 所示。



图 1-16 “苏 34”三翼面布局

没有平尾也没有鸭翼的飞机称为“无尾”布局。主翼位于机尾的一部分，实际上起到了水平尾翼的作用。无尾布局的飞机在高速飞行时性能最为优异，接近于导弹、火箭的气动布局，因为这一布局的特点在于其阻力较小，且结构强度足够，让其非常适合高速飞行。飞机的升力由机翼上下表面的压强差产生，升力经过水平尾翼时会形成一股阻力，导致常规布局的飞机在飞行过程中会损失一部分阻力。而无尾布局飞机大大减少了飞行中的空气阻力，提高了无尾布局的气动性。航天飞机也采用此种布局。其缺点是飞机的低速性能不够好，飞行稳定性不强，起降能力弱。代表机型为法国的“幻影”系列，如图 1-17 所示。



图 1-17 “幻影 2000” 无尾布局

固定翼飞机通常包括方向、副翼、油门、升降、襟翼等控制系统，操控原理为通过舵机或舵机组来使飞机的翼面发生变化，产生相应的扭矩（力矩），用以控制飞机的转弯、爬升、俯冲、横滚等动作。

固定翼飞机的优点如下。

(1) 飞行速度快。固定翼飞机的速度远高于直升机、多旋翼飞行器，同时也是这三类飞行器中唯一可以达到超声速飞行的飞行器。

(2) 气动效率高。固定翼飞机是直升机、多旋翼飞行器中气动效率最高的一种，航程远、载重大。

固定翼飞机的缺点如下。

(1) 起降环境要求高。对于固定翼飞机来讲，需要有一定的初速度才可以产生足够的升力起飞。相反，降落时则需要滑跑来减速。

(2) 无法原地悬停。固定翼飞机一旦停止前进的运动，就会失去升力，因此固定翼飞机无法悬停。

这些特点使固定翼飞机在城市环境中的应用较少，但是在军事中，无人机需要速度快、航时长、挂载一些特定的武器或侦察用设备，所以固定翼飞机在军事环境中还是受到了较大的欢迎。

3. 无人伞翼机、无人扑翼机、无人飞艇

无人伞翼机、无人扑翼机及无人飞艇属于小种类飞行平台。

(1) 无人伞翼机。无人伞翼机具有体积小、成本低、飞行高度低等特点，同时也存在着飞行速度慢、抗风性差、高空飞行能力差、机动性能差等缺点，所以无人伞翼机一般应用于民用领域，如图 1-18 所示。

(2) 无人扑翼机。无人扑翼机主要用于仿生飞行，依靠像鸟类一样的“翅膀”产生向上的动力来飞行，具有垂直起降能力。但其缺点也显而易见，对于操纵系统以及

材料使用要求较高，飞行速度与载荷重量难以提升，如图 1-19 所示。

(3) 无人飞艇。无人飞艇具有依靠浮力在空中飞行的特点，优点是可在空中悬停以及垂直起降，相对节省燃料，所以一般应用在环境监测、空中巡视、空中摄影等民用领域，如图 1-20 所示。



图 1-18 无人伞翼机



图 1-19 无人扑翼机



图 1-20 无人飞艇

1.3.2 按用途分类

无人机按用途可分为军用无人机、工业级无人机和消费级无人机三类。其中，军用无人机可分为侦察无人机、诱饵无人机、电子对抗无人机、通信中继无人机、攻击无人机、靶机等。工业级无人机主要有警用无人机、消防无人机、红外热成像无人机、测绘无人机、植保无人机、气象无人机、巡线无人机、架线无人机等用于专业领域的无人机。消费级无人机是大众最为熟悉的一种无人机，具有价格低廉、操作简单、体积较小等优点，但续航能力、飞行距离、可靠性与功能等还有待提高。

1.3.3 按运行风险大小分类

国家空中交通管制委员会起草的《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例（征求意见稿）》中第二章第八条规定：无人机分为国家无人机和民用无人机。国家无人机，指用于民用航空活动之外的无人机，包括用于执行军事、海关、警察等飞行任务的无人机；民用无人机，指用于民用航空活动的无人机。

根据运行风险大小，民用无人机分为微型、轻型、小型、中型、大型。

微型无人机，是指空机重量小于 0.25kg，设计性能同时满足飞行真高不超过 50m、最大飞行速度不超过 40km/h、无线电发射设备符合微功率短距离无线电发射设备技术要求的遥控驾驶航空器。

轻型无人机，是指同时满足空机重量不超过 4kg，最大起飞重量不超过 7kg，最大飞行速度不超过 100km/h，具备符合空域管理要求的空域保持能力和可靠被监视能力的遥控驾驶航空器，但不包括微型无人机。

小型无人机，是指空机重量不超过 15kg，或者最大起飞重量不超过 25kg 的无人机，但不包括微型、轻型无人机。

中型无人机，是指最大起飞重量超过 25kg 但不超过 150kg，且空机重量超过 15kg 的无人机。

大型无人机，是指最大起飞重量超过 150kg 的无人机。

1.3.4 按飞行高度分类

无人机按飞行高度可分为超低空无人机、低空无人机、中空无人机、高空无人机和超高空无人机。

超低空无人机：飞行高度为 0 ~ 100m。

低空无人机：飞行高度为 100 ~ 1000m。

中空无人机：飞行高度为 1000 ~ 7000m。

高空无人机：飞行高度为 7000 ~ 18 000m。

超高空无人机：飞行高度大于 18 000m。

1.3.5 按活动半径分类

无人机按活动半径可分为超近程无人机、近程无人机、短程无人机、中程无人机和远程无人机。

超近程无人机：活动半径为 0 ~ 15km。

近程无人机：活动半径为 15 ~ 50km。

短程无人机：活动半径为 50 ~ 200km。

中程无人机：活动半径为 200 ~ 800km。

远程无人机：活动半径大于 800km。

1.4 无人机的发展方向

1.4.1 高空长航时化

早在 20 世纪 90 年代，就已经有高空长航时无人机被研发制造出来，最初的研发目的是要用其取代一些有人驾驶的高空高速侦察机（例如，由 20 世纪 50 年代美国军方研制的 U-2/TR-1 侦察机）。高空高速侦察机不仅可以减少人员的损失，也能增加侦

察的潜藏性。

高空长航时无人机是一款飞行高度超出 10 000m，飞行续航时间不低于 12h，可以昼夜执行任务，长时间侦察监视的无人驾驶飞行器，能够持续地长时间地侦察监视、收集和截获任务区域更加全面的情报，观察任务区域的分辨率高、成本低、具有较高的安全性和灵活性等特点。

1. 高空长航时无人机的分类

高空长航时无人机的特点是要拥有“高空高速”“持久飞行”的能力。一般的小型无人机被称为低空无人机，飞行高度一般在 500m 以下；一般的大型无人机被称为中空或者高空无人机，飞行高度一般为 5000 ~ 12 000m，高空无人机的飞行高度一般在 20 000m 左右，当无人机的飞行高度远超 20 000m 时，称为超高空无人机。长航时无人机的前提是续航时间最少为 12h，当一款无人机的续航时间高达 48h 的时候，就可以称该机型为超长航时无人机。

2. 高空长航时无人机在军用领域的发展

高空长航时一直都是无人机发展中需要研发的一项重要技术，在研发过程中不仅面临着众多的难点技术问题，还要不断迎接研究过程中呈现的新问题。而具备高空长航时性能的无人机在军事领域中主要担任着战役侦察、战场监视和情报收集的任务。所以，高空长航时无人机成为了各国军事武装发展的一大重点。不难预测，在未来的高科技战争中，具有高性能高空长航时的无人侦察机、无人战斗机和无人轰炸机将会在战争中执行不同的作战任务。无人机一旦拥有了高空长航时的性能，就具备了更加持久的作战能力，展现出更加强大的作战效果。

3. 高空长航时无人机在国内外的的发展

众所周知，美国是最早研究无人机高空长航时的国家，无论是在技术领域还是资源领域，都处于领先世界的存在。美国早期的研发项目有“罗盘斗篷”和“棕色雨”。据报道，始于 1970 年的“罗盘斗篷”项目的目的就是要研制出一种最大升空高度超过 16 700m、续航时间在 20h、采用跑道起飞降落的方式、载重在 317 ~ 680kg 的无人机。而且波音公司和曾经的泰勒·雷恩公司分别研制了 YQM-94A 与 YQM-98A 两款原机型，并且这两种机型在试飞时也都达到了项目要求的性能指标。但是 1977 年 7 月该项目因为负载技术存在问题而被取消。

1983 年，美国国防高级研究计划局（DARPA）的“棕色雨”项目的研发目的就是要研制出一种由活塞发动机驱动的高空长航时无人机。由波音公司研发的代号为“秃鹰”的一款长航时无人机，于 1988 年 10 月首次试飞，巡航时间可以达到 60h，巡航速度为 360km/h，最大飞行高度为 19 800m。虽然该机型的性能让人惊叹，但并没有量产，也没有再进一步研发，项目最终被取消。

在国内，我国最早使用无人机是在 20 世纪 80 年代，不过，初始阶段是为了完善

防空系统，无人机主要作为靶机和干扰诱饵等。后来为了使我国的武器装备能够满足对未来战场作战的需求，能够出色地完成在作战时对敌周边地域的侦察任务，让作战部队能够更加了解战场，对战争情势做出更加及时准确的判断，由我国自主研发的“翔龙”和“翼龙”两款高空长航时无人机，都具备中空、长航时、侦察打击一体化多种性能，但是“翔龙”无人机研发的较早，有些技术能力稍稍落后于“翼龙”无人机。

据报道，“翔龙”的最大升限为 18 000 ~ 20 000m，最大飞行速度高于 700km/h，巡航半径为 2000 ~ 2500km，巡航时间也在 10h 左右。而在“翔龙”之后研制出的“翼龙 - II”无人机于 2017 年 2 月 27 日成功完成首次测试飞行，并展现出了优越的性能。其最大飞行高度能够达到 9000m，最大飞行速度可达 370km/h，最小飞行速度为 150km/h，巡航时间可以长达 20h 之久，让中国的察打型无人机迈进了世界一流的水平。

其他国家对高空长航时无人机也开展了相关研究工作，例如英国对隐身高空长航时无人机领域的探索有着较为深入的研究基础，相当一部分关键性技术已经取得成功并得到验证。

4. 高空长航时无人机与新型能源结合

高空长航时无人机在能源选择方面，若使用碳氢燃料作为能源，其续航时间很大程度上取决于发动机的效率和能够携带燃料的量，可见其续航时间并不是很理想。所以，有相当一部分国家把太阳能、液氢等新能源与高空长航时无人机相结合进行研究，目的是延长续航时间，并取得了十分理想的效果。因此不难预测，在不久的将来，高空长航时无人机将广泛运用新能源来为其提供动力。

5. 高空长航时无人机的自主性、可靠性

随着科技的不断进步和人工智能的持续发展，现代无人机中的“自主性”一直都是其主要的发展趋势之一，提升高空长航时无人机的自主性，让其拥有完全自主能力的性能，在未来的战场上就能够实现无人机和有人机协同作战的效果，大大提升战斗能力，共同完成作战任务。

当高空长航时无人机具备较高的可靠性，就能在执行特殊任务和运行环境中降低（甚至消除）由于恶劣环境以及有可能出现的电子对抗带来的影响。同时，较高的可靠性对导航系统在长时间保持较高的精准度起着至关重要的作用，可以增强无人机的任务执行能力和安全飞行能力。

6. 高空长航时无人机在民用领域的发展

高空长航时无人机不仅在军事领域有很好的发展趋势，在民用领域也呈现出很可观的应用前景，例如，大气监测、执行空中交通管制、导航中继和海上航行管理等。

1.4.2 无人机隐形化

无人机从1917年研制以来，在军事上就发挥着重要作用，从开始主要进行电子侦察和电子干扰等军事任务，到现在从空中对地面实施打击，都展现出了无人机的优越性。但随着科技的进步与发展，通信与雷达探测技术在战争中的作用日益提高，传统的飞行武器面临巨大的考验。无人机在战场上用来执行更危险、更深入敌方的任务，那么推动无人机隐形化的发展，提升无人机的生存、纵深打击和突防能力，成为军用无人机发展的首要目标。隐形无人机技术目前是各国高科技武器装备上比较重要的一项技术，新款的多用途、隐形无人机的研制，俨然变为世界各国空军新的研究和发展的重中之重。现在所拥有的隐形技术和无人机技术结合产生了新型隐身无人机，在隐身性能、生存能力、战场主动权方面都在逐步提高。

雷达起源于19世纪，首次使用的地点是在第二次世界大战战场上。雷达的工作原理是雷达上的发射装置发射出无线电波，当有物体碰撞此无线电波时会将无线电波反射回雷达的接收装置，从而测算出探测到的目标的方向、距离等参数。雷达具有全天候、远距离、全天时、精度高的特点，是战场上最主要的探测目标手段。躲避雷达探测是研究无人机隐形技术的主要方向。

与传统的光学隐形技术不同，雷达的出现使人们无法再使用装备与背景颜色混淆的方法来蒙蔽敌人的眼睛。雷达发射的无线电波遇到障碍物会被反射，反射回来的无线电波会在接收仪器上显示为一个光点，称为雷达反射截面，战场上可以根据雷达反射截面的大小来发现并推测目标大小。

1. 隐形无人机的主要技术

1) 外形隐形技术

外形隐形技术是无人机隐形技术最直接、最有效的隐形方法。合理地设计无人机外形及布局，能实现减小雷达反射截面，实现隐形。无人机主要反射雷达无线电波的部分为机翼、进气道及尾喷口。因此，在设计时需特别注意这三个位置。固定翼无人机基本构型为三种：正常式、鸭翼布局式和无尾式。其中，无尾式三角翼的布局最能减小反射雷达的探测无线电波。无人机在设计时应采取光洁平滑的外形，减少武器挂架、垂尾、平尾、进气道等外露部位，防止二次“反弹”。B2隐形轰炸机（图1-21）的隐身原理其实就是缩小自己的雷达反射截面。它的雷达反射截面是目前世界上各种飞机里最小的，大概只有 0.01m^2 ，相当于一只水鸟的雷达反射截面。也就是说，当B2隐形轰炸机从头顶飞过，监视雷达的人，在雷达的接收仪器上看到了光点，会认为是一只鸟。而且距离远时可能什么都看不到。

2) 材料隐形技术

材料隐形技术是目前各国使用最广的隐形技术。在无人机表面敷贴隐形材料，对

雷达发射的无线电磁波进行吸收，通过改变雷达波长，尽可能避免被发现，使无人机达到在雷达上隐形的效果。无人机蒙皮材料选用碳纤维或树脂基复合材料能提高反雷达探测能力。复合材料由于不是金属材料，接触到雷达发出的无线电磁波时，不易产生电磁流和建立电磁场，能减少向雷达反射无线电磁波的能量。无人机在尺寸、重量、结构等方面优于有人机，机体、蒙皮大部分采用复合材料也能减轻无人机自身重量，所以在无人机上使用复合材料也更容易实现隐形。



图 1-21 B2 隐形轰炸机

3) 主动欺骗隐形技术

无人机主动欺骗隐形技术是利用无人机机载诱骗系统或干扰机发出误导敌方的虚假信号，主动欺骗隐形技术包含对消隐形技术以及等离子体隐形技术。对消隐形技术是通过目标产生与雷达反射波相同频率、同振幅但相位相反的电磁波，与反射波相消干涉，从而消除散射信号。等离子体隐形技术是当对方雷达发射的电磁波遇到等离子体的带电粒子后，便发生相互作用，电磁波的部分能量传递给带电粒子，其自身能量逐渐衰减，其余电磁波受一系列物理作用的影响，绕过等离子体或产生折射，使电磁波探测失去功效。

2. 无人机隐形化的发展趋势

由于无人机不必布置飞行员座舱，不必担心人员伤亡，因此在设计中贯彻隐形理念较为容易。无人机隐形也是无人机中的一个重要分支。隐形飞机的种类将越来越多，隐形飞机的雷达反射截面将不断减小，隐形飞机将兼备多种隐形特性等都是无人机发展的趋势所向。未来，无人机隐形化需向着全方位的、不受天气影响的、更稳定的气动布局、更好的隐形能力方向发展。

1.4.3 空中预警化

无人机空中预警化最早提出于 20 世纪 90 年代的“美国空军试验室”，虽然当时有很多项技术得到了验证，但最终并没有推出能够进行试验的型号机。空中预警无人机不仅可以与载人预警机协同执行作战任务，还可以凭借自身超强的生存能力对战场实施超长预警，单独作战。协同作战时，可率先将无人预警机部署在 200 ~ 300km 以外，可先将获得的信息情报传送给载人预警机，再由载人预警机发送至地面指挥中心，这样不仅能避免让载人预警机进入危险空域，也大幅提高了战场的预警范围。单独作战时，预警无人机就需要通过机身的各种传感器将所获得的情报信息直接传送给地面指挥中心。

无人预警机与载人预警机功能相同，属于集预警、通信、控制和指挥于一身的飞机，可作为空中指挥中心、雷达中继、空中值勤和空中监察等战斗装备投入作战，扩大了作战时的预警拦截范围，并且通过无人预警机能够控制战场上所有的防空作战武器，协调统一地去指挥作战。

与传统的载人预警机相比，无人预警机的造价低，空中生存能力优越，性价比高。预警无人机的提出有着客观需要的意义。一般战略预警机的续航时间都在 12h 左右，虽然载人预警机能够通过在空中补充燃料来延长续航时间，但是长时间的留空作业，空勤人员身体的生理条件需求有着很大的局限性，不适宜执行连续长时间的工作。如果实行轮班操作，就需要增加更多的空勤人员，还需要在机内设计供空勤人员休息的休息舱室，会增加作业的复杂性，还有可能因为人体的生理疲劳等人为因素造成意外，对飞行安全、操纵安全存在些许的不利因素。

无人预警机在留空作业的过程中不需要空勤人员的参与，不需要在机内设置硕大的载人空间，也不需要像载人预警机那样为空勤人员专门配备各方面的设备，既可以做到减小机身尺寸，又能够大大减轻机身重量，还不用耗费大量的人力成本。无人预警机能够真正实现长时间的留空作业，几天、几星期都可以实现，是载人预警机的数倍。所以，预警无人机可以实现对载人预警机的等效替代，能够将费用和效率的比值保持在最佳状态，具有十分明显的优势。

对于预警无人机而言，预警雷达是至关重要的设备。预警无人机的预警雷达主要有“机械式扫描雷达”和“相控阵雷达”两类。

机械式扫描雷达的波束扫描需要依赖电机驱动雷达天线的转动来实现。而相控阵雷达是用电来控制雷达波束的指向进行扫描，因此又被称为“电雷达”。电雷达技术体系要比机械扫描雷达更加先进，没有电机、传动装置以及减速器，对雷达罩的设计进行了简化，不仅减轻了重量、降低了制造成本，还具有更高的可靠性、自适应抗干扰性能以及多功能、多波束、高速率和多目标搜索等优势，进一步提高了雷达的实用

性和可靠性。

无人预警机的价值主要体现在以下几方面。

- (1) 能够实现超长航时预警，在目标空域比有人预警机留空预警时间更长。
- (2) 比载人预警机更加擅长应对超低空目标，深入战区上空，提前预警，做好准备，载人预警机难以全面实现。
- (3) 可以在卫星的指引下实现地理避障。
- (4) 能够迅速抵达预警地点。
- (5) 能够更快地获取情报。
- (6) 在需要时，能够携带一些战备军械。
- (7) 能够争夺战场的主动权。
- (8) 成本比载人预警机低。
- (9) 用途广泛，可以执行多方面的作战任务。
- (10) 在海上时，性能、技术方面更优于固定的预警雷达站。

1.4.4 空中格斗化

空中格斗在现实战争中，就是飞机与飞机之间在空中交火作战。无人机空中格斗就是用无人机在空中交火作战。无人机在军事方面具体的应用除了情报侦探、信息对抗、通信中继、空中预警等，还包括军事打击能力，即空中格斗化。无人机携带作战武器，发现重要目标直接进行攻击，实现察打结合，在减少人员伤亡的同时还提高了部队的作战能力。无人机在战场上的优势是可以预先部署，拦截处于发射初期的战术导弹，在要地防空时可以以较远的距离摧毁敌袭导弹。攻击性无人机体积较大，飞行速度快，可以对地攻击和空战。攻击、拦截或直接摧毁地面和空中目标。战术攻击无人机在部分作战领域可以代替导弹，采取自杀式攻击方式，对敌实施一次性攻击。

随着无人机相关各技术产业的发展，无人机在战场上的地位逐渐提高，各国对军用无人机的开发与使用逐渐被重视，主要有以下几点原因。

1. 价格便宜、风险性低

无人机结构简单，重量轻，人员维护方便，不需要培养飞行员驾驶飞机，研发成本与后期保障费用都相对较低。科技的进步使无人机智能化、自动化取得了巨大的发展，无人机在执行空中格斗、武力打击等战场任务上已逐渐替代有人机，并且飞行时基本不存在人为因素造成的情况，执行高危险战斗任务时，无人员伤亡风险。

2. 灵活简单，机动性强

无人机相较于有人机，重量、体积都小得多，所以无人机在战场上起降距离大幅缩短，起降条件也不像有人机那样要求较高。无人机在飞行时，飞行速度、机动动作

等不需要考虑人的过载等因素，可以做大的机动动作和速度进行飞行。在较为复杂的天气条件下，无人机也可执行战斗任务，实施战场侦察、武力打击等。

我国的攻击-2 察打一体无人机、攻击-11 隐身无人机等都是处于世界先进水平具有格斗化的无人机，如图 1-22 和图 1-23 所示，能够携带多种武器弹药，拥有长航时的滞空能力，使其能够对敌方高价值目标和装甲力量进行有效的杀伤和打击。而且部分军用无人机也采用了隐形化的设计，具备了一定的空中格斗能力。



图 1-22 攻击-2 察打一体无人机



图 1-23 攻击-11 隐身无人机

目前，无人机空中格斗化的能力所欠缺的当属人工智能技术，需自主辨别攻击目标进行打击。如果是基于现在这种利用卫星信号远程控制的方式，无人机要想实现空中格斗是不可靠的，利用无人机自载的人工智能进行控制更为有效。

1.4.5 集群智能化

1. 无人机集群的概念

无人机集群由两架及以上数量的多功能无人航空飞行器共同组成，在人工智能的控制下，可以自主完成很多任务。多个无人机通过彼此的感知交互、信息传递来协同工作，在险恶的环境下可以低成本完成多样性的复杂任务。集群整体具有分布式自组织结构、简单式自适应个体、灵活式群体性模式、智能式紧密，可实现单个无人机行为自主决策、无人机间行为协同，最终产生能力涌现的自主式空中移动系统。

无人机集群技术并不是简单地把一大堆无人机放在一起，然后再安排一大堆操控手，一对一操作，这种低端的方式完全不符合无人机集群技术的定义。无人机集群技术是由多航空器平台通过科学的方式聚集后，给予每个个体特定的任务，随环境变化动态调整。简单来说，无人机集群是一个 $1+1 > 2$ 的群体。

2. 无人机集群在军事方面的应用

无人机集群作战是近年来随着无人机在战场上的作用不断提高而提出的。无人机的操作成本低、隐蔽性好、不怕伤亡和着陆简单、支持多任务类型等特点，也进一步推动了无人机集群的发展。无人机集群的灵感源自具有较低智能的生物在迁徙、巡游

或是躲避敌害过程中产生的集群行为。在现代战争中，制空权往往是决定战争胜负的关键因素。无人机在空中的高度优势，使得无人机系统成为实现集群作战的首选无人验证平台。

少则十几架、几十架，多则几百架、上千架组成的无人机蜂群，都叫“蜂群”，当然是小型无人机或微型无人机才可以，而不是造价昂贵、装备齐全的大型无人机。小型和微型无人机可以从复杂地形直接起飞，编队前往目的地，也可以从不同地点分散起飞，沿不同路径到达目的地，以躲避敌人的侦察。它们还可以用运输工具运送，接近作战地时再释放来组成蜂群，以解决无人机航程短等问题。未来无人机的作战方式，或许由数千架无人机组成的大型集群可以整合各种不同作战工种的无人机，实现海、陆、空全领域协同作战，以适应不同战况，不以侦察为主，兼顾打击，能主动搜索和消灭敌人所有地面目标。无人机集群在军事上的应用非常广泛，大体上可以分为空中打击地面、空中打击海面、空中打击空中、城市作战（复杂地形作战）和战场支援五个方面。

美国在无人机“蜂群”作战技术方面处于领先地位，一直致力于该技术的发展。作战模式主要包括“忠诚僚机”（图 1-24）模式、SoSITE 分布式作战模式（图 1-25）、有人-无人机自主性空中格斗模式、拒止环境下协同作战模式、可快速部署与回收集群作战、进攻性蜂群城市作战模式，以及无人机集群消耗作战模式等。在美国，无人机“蜂群”技术被列为“第三次抵消战略”的五大支撑技术之一，甚至宣称自核武器技术出现以来，“蜂群”技术是军事技术领域最重要的发明。2015 年，美军共试飞了 50 次无人机集群，创造了当年的纪录。2016 年，中国共试飞了 67 次固定翼无人机集群，成功打破了美国的纪录。2017 年，美国成功试验了 103 架“山鹑”微型侦察无人机的完整飞行。之后，中国完成了 119 架无人机的集群飞行试验，这批无人机完成了密集弹射起飞、空中集结、群组行动和多目标分组等动作，具有很强的战术价值。

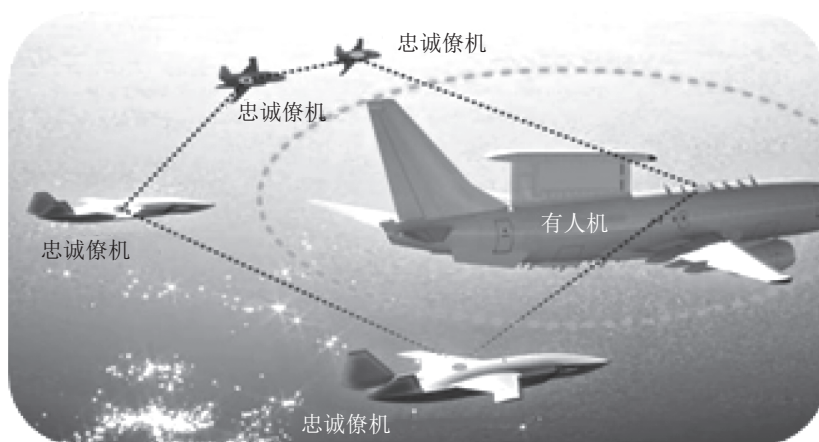


图 1-24 “忠诚僚机”模式

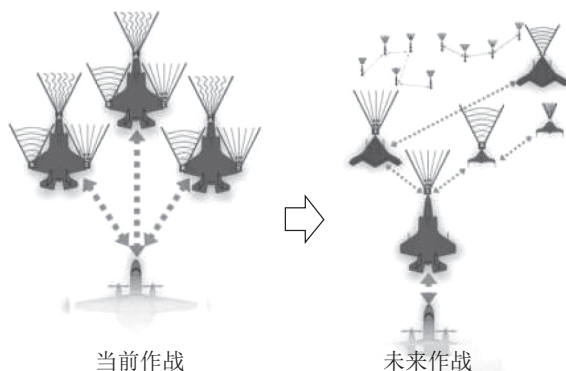


图 1-25 SoSITE 分布式作战模式

3. 无人机集群的民用

相较于无人机集群在军事方面的应用，读者可能对生活场景中无人机集群的应用更为熟悉，如大型展会活动中大规模无人机群飞表演，以及近些年比较热门的无人机外卖、无人机快递、无人机除虫害、无人机消防等。2017年，中国一家无人机公司在广州部署了1180架民用无人机，进行了9min的炫酷表演，创造了无人机集群技术的世界纪录，超过1000架无人机在数据链和人工智能操作下飞行，而且能做到自动定位，单个无人机的偏差仅1~2cm，上千架无人机进行复杂的编队飞行形成不同的模式且不会发生碰撞，说明我国已经突破了无人机编队飞行的许多技术难点。现在许多中国企业都可以做，只不过规模有大有小而已，很多人把数以千计的无人机集群表演称为一场精妙绝伦的“视觉盛宴”。

4. 无人机集群存在的问题

无人机集群虽然具有智能、无人、自主等技术优势，以及作战优势小型化、数量多、成本低等，但也存在着机动性能差、防御能力差、接收信号弱等问题。无人机集群在军事方面虽然强大，但并非无可挑剔，如信号干扰和低空防御武器都是击败无人机集群的方式，信号干扰对无人机集群可以说是“软杀伤”，低空防御武器是“硬杀伤”，都会对无人机集群造成破坏，而且无人机集群作战需要网络基础设施的支持，这要求向战场推进，架设基站等基础设施，难度非常高。如果网络基础设施被破坏，整个无人机集群就会失效，可靠性差，无法适应战场复杂多变的环境。

5. 无人机集群产生的背景

面对日益复杂的使用环境和多样化的应用需求，无人机不免受到其自身软、硬件条件的限制，使其仍有某些局限性。对于单个无人机而言，无人机本身的续航能力、质量和尺寸都起着重要的限制作用，使其无法形成持续有力的打击力度；受机载传感器以及通信设备的限制作用，单个无人机同样没办法实现对任务区域的多维度、大范围覆盖；而在执行高风险的任务时，单个无人机有可能因受到攻击或自身故障而失效，从而导致任务系统容错性不足等。

所以无人机集群的产生与发展能够有效地解决单架无人机的不足，无人机集群可以协同工作，共同完成任务，这样能够更大地发挥无人机的优势，也能避免单架无人机执行任务效果不佳而失败。无人机集群可以提高任务执行效率，拓展新的任务执行方式，从而提高任务的完成度和效果。这也是无人机集群的效果要比单架大型无人机效果好的原因。

6. 无人机集群关键技术

- (1) 群控制算法。
- (2) 通信网络技术。
- (3) 控制算法与通信技术的耦合。
- (4) 任务规划技术。
- (5) 路径规划技术。
- (6) 编队控制技术。

7. 无人机集群体系结构

无人机集群的体系结构是指各无人机之间、各无人机与控制站之间保持着不间断的信息关系和控制关系，以及智能、行为、信息、控制等要素在系统中的时空分布模式。无人机集群体系结构体现了每个无人机受系统的组织和控制关系，系统提供了无人机行为和信息的交流框架。无人机集群在执行任务时，环境是处于动态的、不确定的，存在多种不确定因素，无人机集群体系结构作为无人机集群在面临各种情况时做出反应的基础，对无人机集群能力的发挥起着举足轻重的作用。