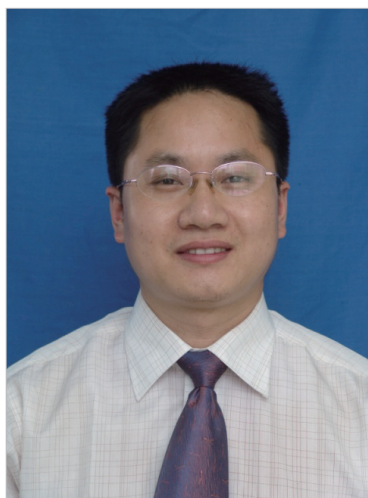




# 无人机系统 发展与关键技术综述

## Development and Key Technology of UAV

西北工业大学无人机研究所 陶于金 李沛峰



陶于金

副教授,长期从事无人机总体气动设计、无人机飞行仿真与飞行品质研究。

无人驾驶飞机是一种有动力、可控制、能携带多种任务设备、执行多种任务并能重复使用的无人驾驶航空器,简称无人机(Unmanned Aerial Vehicle)。无人机的发展具有悠久的历史,可追溯到一战时期,第一架无人机是1917年由英国研制成功的。早期的无人机是在退役飞机基

各种类型的无人机性能各异、功能纷呈,具体的关键技术也千差万别,这正是无人机作为一种新型装备蓬勃发展的重要特色所在。无人机研制周期相对较短,研制经费较省,使用风险较低,各种新技术、新材料可大量应用于新型无人机的发展,各种关键技术也得到高度重视。在信息化、网络化、体系化背景下,无人机的发展将更加突飞猛进。

础上进行改装的,只能按预设程序沿固定航线飞行,无法进行人工干预,更不会自主反应,仅能完成简单的任务,主要用于炮兵辅助靶标演练。

20世纪60年代以后,随着无线电技术、自动控制技术、计算机技术的飞速发展,应用计算机飞行控制系统的无人机可以按较复杂的任务剖面飞行,自动驾驶仪、电传操纵系统、基于航路点的导航系统、数据链和先进传感器使无人机不再完全依赖地面控制,可以灵活执行多种任务,成为真正意义上的无人机,并应用于战争行动中。越战期间,面临越军大量苏制地空导弹带来的威胁,美国使用“火蜂”无人机收集越军防空部署的情报,共飞行了近3500架次,返回

2900架次,回收率达到80%以上,提供的情报量占美军总情报量的80%,大大减少了人员伤亡或被俘虏的风险。1982年“贝卡谷地”之战,以军以“侦察兵”、“猛犬”无人机为诱饵配合战斗机作战,以极小的代价摧毁了叙军整个防空导弹阵地。因此,无人机不受人员生理与生命风险限制,适合执行“枯燥”、“肮脏”、“危险”任务的突出优势得到世界各国的高度重视。

20世纪90年代以来,随着信息化技术、轻量化/小型化任务载荷技术、卫星通信技术、复合材料结构技术、高效空气动力技术、新型能源与高效动力技术、起降技术的迅猛发展,无人机性能不断提升、功能不断

扩展,各种类型和功能的无人机不断涌现,应用领域也越来越广泛。无人机按规模可分为微型无人机、小型无人机、中型无人机、大型无人机;按飞行高度可分为低空无人机、中空无人机、高空无人机、临近空间无人机;按飞行速度可分为低速无人机、高速无人机;按机动性可分为低机动无人机、高机动无人机;按能源与动力类型可分为螺旋桨式无人机、喷气式无人机、电动无人机、太阳能无人机、燃料电池无人机;按活动半径可分为近程无人机、短程无人机、中程无人机、远程无人机;按起降方式可分为滑跑起降无人机、火箭助推/伞降回收无人机、空投无人机、炮射无人机、潜射无人机等;按功能用途可分为靶标无人机、诱饵无人机、侦察无人机、炮兵校射无人机、电子对抗无人机、电子侦听无人机、心理战无人机、通信中继无人机、测绘无人机、攻击无人机、察打一体无人机、预警无人机……

各种类型的无人机性能各异、功能纷呈,具体的关键技术也千差万别,这正是无人机作为一种新型装备蓬勃发展的一个重要特色所在。无人机研制周期相对较短,研制经费较省,使用风险较低,各种新技术、新材料可大量应用于新型无人机的发展,各种关键技术也得到高度重视。在信

息化、网络化、体系化背景下,无人机的发展将更加突飞猛进。

## 国外无人机发展现状及趋势

### 1 国外无人机发展现状

目前在全世界范围内已掀起了无人机的研制热潮,全球共有 57 个国家研制和发展无人机,种类达 1000 多种,其中已成为无人机产品的有 400 多种。这些无人机主要应用于军事领域,并逐步向民用领域扩展。其中美国和以色列水平最高、起步最早、发展最快、技术最成熟、应用最广泛,紧随其后的是英国、法国、德国、意大利等欧洲发达国家。

美国占据无人机发展的制高点,引领着无人机的发展潮流。其无人机产品在研制水平、性能指标、技术成熟度方面都居于世界前列。目前已开发出高、中、低空,大、中、小型上百种无人机,覆盖了情报/监视/侦察、电子对抗、通信中继、攻击作战等任务领域。研制无人机的公司主要是诺斯罗普·格鲁曼公司、通用原子航空系统公司、航空环境公司以及美国飞机军械有限公司,典型产品包括“扫描鹰”、“影子”、“捕食者”、“死神”、“全球鹰”、“RQ-170”等(见图 1)。此外,美国始终重视无人机技术的创新,积极开展隐身无人机、潜射无人机、变体无人机、短距/垂直起

降无人机、倾转旋翼无人机、太阳能无人机、氢动力无人机等新型无人机的预先研究。

以色列在中小型战术无人机方面具有特色和优势,并抓紧研制大型长航时无人机。根据国情需要,以色列多年来重点发展中、小型战术无人机、攻击无人机,水平与美国相当。以色列具有无人机研制、生产和实际应用的丰富经验,研制无人机的公司主要是以色列飞机工业公司马拉特(MALAT)分部和埃尔比特(Elbit)公司,典型产品有“哈比”、“猎人”、“搜索者”、“苍鹭”、“赫尔墨斯”、“云雀”等。以色列也是无人机系统技术与整机的最大输出国,其多种机型已经出口到英国、俄罗斯、印度、韩国等 10 多个国家和地区,年出口销售额达 10 亿美元以上。

欧洲各国无人机发展虽落后于美、以两国,但也不甘落后。近年来通过联合研制、直接购买以及自主研发等方式,逐渐缩小了差距,并积极发展高空长航时、无人作战等高端无人机。在高空长航时领域,欧洲航宇防御系统公司与美国诺斯罗普·格鲁曼公司联合开发“欧洲鹰”高空长航时无人机系统,该系统是“全球鹰”Block20 的最新改型,并加装了欧洲宇航防御公司研制的新型信号情报(SIGINT)任务系统。在无人作



(a) 捕食者无人机



(b) 全球鹰无人机

图1 美国现役典型无人机

战领域,由法国牵头,瑞典、意大利、西班牙、瑞士和希腊等国共同参与研制的无人作战飞机“神经元”已于2012年12月实现首飞,目前正在开展投弹、隐身等一系列测试试验。此外,英国耗资2.5亿美元选择BAE系统公司研制“雷神”无人作战飞机,2013年已经实现首飞,计划在2018年为空军服役。

无人机的发展已不是欧美传统航空发达国家的专利,日本、印度、韩国、伊朗、巴基斯坦、土耳其、朝鲜、台湾等均积极发展无人机武器装备。其中,日本正在研制飞行高度在20000m以上的长航时无人机;印度从20世纪80年代起开始研制无人机,目前正在全面引进以色列“苍鹭”无人机生产线;韩国也在积极发展中高空、高空长航时和垂直起降等无人机;台湾则研制了“天翔”系列无人机。

纵览国外无人机,其发展呈现出以下主要特点:

(1)大/中/小/微型、远/中/近程、高/中/低空各种类型无人机全谱系全面发展。既发展了大量供单兵、分队、低层级建制使用的超近程、近中程无人机,又发展了一批供高层级建制、战区司令部、政府要害部门使用的中高端无人机。在役无人机的任务半径实现了近至视距、远至5000公里以上的无缝覆盖,既可用于阵地作战支持,又可满足远程甚至洲际作业任务需要。低空可至近地,伴随地面部队前进;高空已达临近空间低界。

(2)无人机型号系列化发展。为满足不同客户需求或为尽快显著提高战术技术性能,多采用系列化改进改型。例如,美国通用原子航空系统公司为了满足美国陆军需求,在空军“捕食者”A的基础上发展了MQ-1C“灰鹰”;为满足空军更高的要求,在“捕食者”A的基础上研制了战术技术性能显著提升的MQ-9“死神”。

为满足客户逐渐增加新功能和适度提升性能的需求,多采用批次渐进方式。例如,诺·格公司的RQ-4B“全球鹰”按第20、30、40批次渐进发展,逐渐增加情报能力和侦察性能,满足美国空军需求。

(3)采取以任务为牵引、平台为核心的发展模式。根据不同任务研制了一系列全新飞行平台,针对预定任务要求,高度重视平台优化设计,以重点满足续航时间、飞行高度、飞行速度、低可探测性、任务载荷/数据链机载终端装机要素等要求。采用“通用平台、针对不同任务需求系

列化发展模式”,根据不同任务需要,基于通用化飞行平台,通过换装光电/红外、多光谱、雷达、电子对抗、通信中继、气象探测、地形测绘、磁力探测等任务设备以及武器等各类任务载荷,发展出侦察、电子对抗、探潜、察打一体等多种类型和功能的无人机。

(4)无人机自主化水平有待提高。目前国外现役无人机以遥控飞行或预编程自主飞行为主,总体上看自主控制技术等级仅达到3~4级(依据美国国防部2005年版《无人机路线图》的自主控制技术等级划分)。



(a) RQ-180 无人机



(b) X-47B 无人机

图2 飞翼布局无人机

对于自主态势判断、自主决策、集群协同、有人机/无人机协同的自主控制尚未达到实际应用水平。

## 2 国外无人机发展趋势

(1) 中小型无人机仍将占有重要的位置。中小型无人机操作简便灵活,使用成本低,具有较强的机动性能和低空飞行优势,而且随着机载设备的不断小型化和系统集成技术的提高,中小型无人机完成的功能越来越强大,应用领域越来越广泛。随着全球反恐和特种作战任务的需要,欧美等军事强国对中小型无人机的发展十分重视。

(2) 无人作战飞机发展迅猛。美国《新世纪展望:21世纪的航空航天力量》的研究报告指出:“不久的将来,无人作战飞机将有可能成为21世纪空中作战的主导力量。”如美国的“捕食者”、“火力侦察兵”等察打一体化无人机和“X-47”系列无人作战飞机近年来发展迅猛,并得到了应用。

(3) 用于侦察监视的高空长航时无人机需求旺盛。从当前世界各国,尤其是美国的发展看,无人机的应用仍然是以信息支援为主,各军事大国均在发展中小型无人机的基础上,向新技术更密集、作战效率更高、覆盖面积更大、生存力更强的隐身、高空、高速、长航时无人机方向发展,且性能不断提高。

(4) “飞翼布局”无人机是高端无人机发展的重要方向。隐身性能已成为提高生存力和作战效能的基本手段,无人机的高隐身性能是各国追求的目标。外形隐身是飞行器隐身设计中最重要因素,飞翼布局具有先天外形隐身优势,从而成为国际上远程隐身轰炸机、隐身无人战斗机、隐身侦察机的首选布局形式(见图2)。

(5) 临近空间超高速无人机将作为重要突防装备进行大力发展。临近空间超高速无人机飞行速度快

( $Ma>3$ ),飞行高度高( $>30000m$ ),不仅能快速抵达目标区执行任务,而且突防能力很强,目前尚缺乏有效防空手段对其构成威胁。

(6) 近中程多用途无人直升机成为新的热点,将成为无人机大家族中不可或缺的重要组成部分。无人直升机由于其灵活的起降方式,能够在特定环境下使用,将在陆军和海军得到广泛应用。无人直升机包括常规单旋翼带尾桨无人直升机、倾转旋翼无人机、涵道/螺旋桨无人直升机、旋翼/固定机翼转换式无人直升机以及微型无人直升机等。

(7) 无人机系统技术全面协调发展。平台通用化且不断完善,向更高自主能力、模块化、开放式结构和网络化发展;任务设备向多功能、全天候、高分辨率、远距离和小型化发展;数据链向远距离、安全保密、通用化、网络化发展;地面控制站向通用化发展,逐步实现互连、互通、互操作;飞行控制向自主方向发展,逐步具备容错、自修复、自动规避防撞、自主敌我识别和自主飞行等能力。

## 无人机关键技术及发展预测

### 1 能源与动力技术

无人机采用的推进系统形式要比有人飞机多,采用的能源与动力类型各异,包括:传统的小型涡扇发动机、小型涡喷发动机、小型涡桨发动机、活塞发动机、转子发动机以及电池组、太阳能电池、燃料电池、超燃冲压发动机、定向能及核同位素等。

不同用途的无人机对动力装置的要求不同,但都希望动力装置燃油经济性好、重量轻、体积小、可靠性高、成本低、使用维修方便。从经济



图3 太阳能无人机

因素、可靠性等方面考虑,现阶段无人机均采用技术成熟的活塞、涡扇、涡喷、涡桨发动机或在这些发动机基础上进行适应性改进。活塞式发动机适合于低空低速中小型、长航时无人机;涡扇、涡桨发动机适合于高空长航时无人机以及无人作战机,这类发动机油耗低,发动机尺寸、重量和推力能与无人机达到较好的匹配;涡喷发动机适合于低成本、短寿命、高机动的靶机或自杀攻击类无人机。

从长远发展来看,单纯对现有发动机进行改型并不能完全满足无人机对飞行速度、高速、续航性能等指标的要求,开发适合于无人机使用的发动机十分必要,尤其是中小推力的涵道比、小尺寸核心机的涡扇发动机,这类发动机将是未来无人机动力装置发展的重点。此外,开展太阳能、燃料电池、液氢燃料系统等新型能源的应用研究,可为无人机提供更高效的动力源。新能源无人机如图3所示。

### 2 无人机平台技术

#### (1) 高效气动力技术。

无人机在气动力设计要求、设计理念方面与有人机存在较大差别。有人机气动设计通常以航程、速度作为优先优化目标,然而无人机通常以航时作为优先优化目标。无人机尺寸小、速度低,存在低雷诺数条件下

的高升力、高升阻比、高续航因子设计要求。高效气动力技术是提高无人机能的重要技术途径。

### (2) 隐身技术。

提高无人机的生存能力的关键就是降低其可探测性。随着材料、电磁学、热力学、空气动力学等学科的不断发展和进步,越来越多的新技术也将应用于无人机的隐身设计中,具体包括以下几个方面。

外形隐身技术。采用翼身高度融合的无尾飞翼布局、内埋式进气道、二维喷管等设计技术可有效降低雷达反射面积和红外特征,提高无人机的隐身能力。

等离子体隐身技术。理论和试验研究表明,等离子体技术是隐身技术发展的新方向之一,飞行器上安装的等离子发生器所产生的等离子体能对飞行器关键部位进行遮挡,并对雷达照射进行吸收,从而实现飞行器隐身。目前,这项技术在研究中暴露出了很多问题,仍有待解决。

主动隐身技术。主动隐身技术是根据照射到飞行器上的电磁波频率、入射方向等,利用机载有源射频发射装置主动地发射与散射回波相位相反、幅度一致的电磁波,实现与散射回波的对消。目前,主动隐身技术尚处于理论与试验研究阶段,但随着隐身技术的发展,特别是飞行器近场散射特性技术、ESM(电子支援措施)等技术的发展,主动有源对消隐身技术必将成为未来发展的重点。

### (3) 气动弹性技术。

为追求长航时性能,无人机通常采用大展弦比布局以尽可能提高升阻比(如一些无人机展弦比达到30以上),采用轻量化机体结构降低飞行重量。但大展弦比布局、轻量化结构与机体强度和刚度要求会产生突出矛盾。

### (4) 气动载荷设计技术。

滞空型无人机一般飞行速度较低、翼载小、升力大,对于同样强度的

阵风,无人机阵风载荷比有人机大得多。无人机结构强度一般需要将阵风载荷作为主要的设计工况,而阵风载荷大小决定了无人机结构设计的强度。如果以现有轻型飞机、通用飞机的强度设计标准进行无人机载荷设计,无人机结构将付出很大的代价。以轻量化结构为目标,综合无人机气动力特性、无人机飞行控制操纵方式、无人机设计寿命等因素开展无人机气动载荷设计技术是提高无人机综合性能的重要技术途径。

### (5) 复合材料结构技术。

无人机以复合材料结构为主,不同类型的无人机对复合材料结构有不同的要求,如大型无人机主要对大尺寸、全复材结构有较高要求,而小型无人机对复合材料结构的要求是低成本、快速加工制造、快速修复等。

## 3 自主控制技术

根据无人机自主控制的定义和内涵,无人机自主控制的关键技术应该包括态势感知技术、规划与协同技术、自主决策技术以及执行任务技术4个方面。

### (1) 态势感知技术。

实现无人机自主控制必须不断发展态势感知技术,通过各种信息获取设备自主地对任务环境进行建模,包括对三维环境特征的提取、目标的识别、态势的评估等。

### (2) 规划与协同技术。

规划与协同技术涉及两个方面的技术:路径规划和协同控制。这两个方面相互依托,互相联系。

无人机路径规划与重规划能力是无人机自主控制系统必须具有的,即系统可以根据探测到的态势变化,实时或近实时地规划、修改系统的任务路径,自动生成完成任务的可行飞行轨迹。自主飞行无人机典型的规划问题是如何有效、经济地避开威胁,防止碰撞,完成任务目标。

未来无人机的工作模式包括无人机单机机动和多机编队协同,协同

控制技术主要包括:优化编队的任务航线、轨迹的规划和跟踪、编队中不同无人机间相互的协调,在兼顾环境不确定性及自身故障和损伤的情况下实现重构控制和故障管理等。

### (3) 自主决策技术。

对于复杂环境下工作的无人机,必然要求具有较强的自主决策能力,以适应未来的需要。自主决策技术需要解决的主要问题包括:任务设定、编队中不同无人机协调工作、机群的使命分解等。

### (4) 执行任务技术。

无人机自主控制发展的最终目的是使它对环境和任务的变化具有快速的反应能力。无人机自主控制应该具有开放的平台结构,并面向任务、面向效能包含最大的可拓展性。先进的无人机自主控制应当提供编队飞行、多机协同执行任务的能力。

## 4 网络化通信技术

目前的无人机系统作为相对独立的系统只在局域使用,未来的战场在同一空域将充斥着各种功能、各种类型的无人机与战斗机、直升机。无人机之间、无人机与有人机之间、无人机与地面作战系统必须进行有机协调,使无人机都成为“全球信息栅格”的一个节点,实现无人机与其他无人机或指挥控制系统之间的互联、互通、互操作。

针对无人机集群作战、协同作战以及网络化作战的应用需求,应突破无线宽带分布式动态多址接入、实时鲁棒的宽带传输、数据链网络顽存等关键技术,构建无人机集群数据链自适应网络体系,为实现实时、宽带、安全的无人机集群数据链提供技术支撑。

针对无人机宽带网络多跳中继动态变化、节点容量受限问题,需要将网络编码技术与路由技术相结合,通过选择编码机会最大的路径进行传输、优化基于网络编码的节点接入策略、多跳网络节点间信息交换传输

策略,在不增加时延的情况下提高网络吞吐量,实现网络的大容量传输。

## 5 多任务载荷一体化、平台/任务载荷一体化技术

有效载荷是无人机执行侦察、监视、电子对抗、打击、战效评估任务的关键因素,应用于无人机的有效载荷包括通用传感器(光电、雷达、信号、气象、生化)、武器、货物(传单、补给品)等。无人机系统作战效能不仅仅对任务载荷本身性能有较高的要求,而且必须满足无人机尺寸、重量、功耗、隐身等装机要素约束以及成本要求。随着电子、通信、计算机等技术的进步,无人机的传感器技术发展主要表现在以下几个方面。

多光谱/超光谱探测技术。该技术可探测可见光和红外区域的几十个甚至几百个频段,它利用检测低反差目标的杂波抑制和光谱识别可以降低误判率,极大提高了目标识别和探测的准确性,常用于探测隐蔽或普通伪装的目标。

先进的合成孔径雷达技术。相对于光电/红外探测系统,合成孔径雷达能在夜间以及能见度低的恶劣天气条件下工作,以高分辨率进行大范围成像侦察,但其设备重量和功耗均较大,只适合于大型无人机装载使用。随着轻型天线和紧凑信号处理装置等技术的进步,合成孔径雷达有向小型化发展的趋势,并可装备于中小型的战术无人机。

激光雷达技术。激光雷达具有分辨率高、隐蔽性好、低空探测性能好、体积小、重量轻等显著优势,不但可以探测“树下目标”,还可以对目标进行分类,为指挥人员提供精确的目标信息。将激光雷达技术与无人机相结合,必将发挥更大的作用。然而当遇到大雨、浓雾、浓烟等恶劣天气时,激光衰减急剧加大,而且大气环流还会导致激光光束发生畸变、抖动,直接影响激光雷达的测量精度。

## 我国无人机发展现状、存在的问题及建议

### 1 我国无人机发展现状及存在的问题

我国无人机研究起步于20世纪50年代,在90年代取得实质性进展。经过不懈努力,无人机技术取得长足进步,性能不断提高,已形成较为完善的无人机体系,各种类型、各种功能无人机已投入使用。但从整体水平来看,我国无人机技术与美国和以色列等无人机强国相比差距明显,存在以下几个突出问题。

(1)行业规划与规范问题。虽然我国在无人机技术发展方面取得长足发展,产品种类繁多,但存在重复投资、低水平重复、高端无人机发展依然较落后的突出问题。

(2)发动机瓶颈问题。我国无人机的发展很大程度上受制于发动机,一方面我国发动机研制基础本身较为薄弱;另一方面在无人机特定的高空低雷诺、大过载等飞行条件下,对发动机也提出了特殊的要求。目前,我国无人机动力主要以活塞和燃气涡轮发动机为主,活塞发动机技术成熟、应用广泛。但作为未来主流,无人机动力所采用的涡扇发动机与国外差距明显,不能完全满足无人机对飞行速度、航时等指标的要求。

(3)网络化通信问题。我国在无人机数据链技术方面取得了长足进步,但需要进一步提高不同类别无人机之间,无人机与有人机之间,不同使用单位之间大范围、大规模使用无人机的互操作能力;规范完善数据链与任务载荷、数据链与航电系统之间的接口标准体系;提高网络化水平;进一步提高测控与信息传输速率,以满足高分辨率、多光谱/超光谱、多载荷的传输速率需求。

### 2 对我国无人机发展的建议

重视系统协调发展,提高无人机系统整体水平。无人机是一个完整的系统,涉及多领域、多学科的技术,

而平台(含动力)、通信、载荷是发展无人机最基本的几项技术。借鉴国外先进设计思想,以任务为中心,重视平台、通信、有效载荷协调发展,从而拓展无人机系统的任务功能,提高我国无人机系统的整体水平。

注重系统应用研究,提高无人机系统适用性。当前我国无人机系统种类繁多、功能各异,呈现出百花齐放的局面。因此,需要制订相应的应用规范,重视各无人机间互联、互通、互操作的应用,加强无人机与其他系统进行协同作业的能力,提高无人机系统的适用性。

加强市场培育与转化,扩大无人机的民用领域。我国民用无人机的应用目前刚刚起步,主要处于项目论证和前期小规模可行性试验阶段。随着气象探测、人工影响天气、防震救灾、海洋赤潮探测、海况探测等对无人机提出的迫切需求,无人机民用市场具有很大的潜力。应该加强市场培育,与用户积极沟通交流,向用户推广无人机产品并及时了解用户需求,尽早研制出安全、可靠、实用、价廉的无人机,打破无人机进入民用领域这层坚冰。

## 结束语

无人机因其独特的优势越来越受到国内外高度重视。随着技术的进步,无人机的性能不断提高、功能不断扩展,在军事领域已从辅助装备逐步发展成为不可或缺的主战装备。随着军、民用需求对无人机性能要求越来越高,无人机技术已不再是有人机简单地无人化,需要解决一系列独特的关键技术。经过多年不懈努力,我国无人机技术取得了长足发展,但也暴露出一些不足,需重点解决行业规划与规范、发动机瓶颈、网络化通信等一系列问题。随着大量高新技术应用于无人机,其性能、功能将进一步提升,将迎来更加灿烂的明天。

(责编 谷雨)