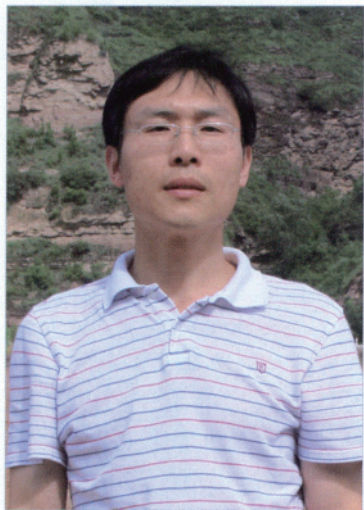


无人直升机设计关键技术

Key Technologies of Unmanned Helicopter Design

南京航空航天大学 朱清华 张呈林



朱清华

南京航空航天大学航空宇航学院副教授、硕导，飞行器设计专业博士，研究方向为旋翼飞行器总体设计、直升机飞行力学与控制、直升机工程。

在信息技术的推动下，无人机已经成为发展速度最快的机种，作为无人机体系中的重要分支——无人直升机，因其结构紧凑、转场灵活、空中悬停、垂直起降、低空低速性能、机动性和安全性高等特点，已经形成了覆盖靶标、情报侦察、战场监视、通信中继、目标指示、引导与摧毁、电子干扰与对抗、灾害灾情调查、气象探测、国土资源调查、地理信息测绘、电力巡线和输油管线巡线等军、民用任务领域的产品体系。

在信息技术的推动下，无人机已经成为发展速度最快的机种，作为无人机体系中的重要分支——无人直升机，因其结构紧凑、转场灵活、空中悬停、垂直起降、低空低速性能、机动性和安全性高等特点，已经形成了覆盖靶标、情报侦察、战场监视、通信中继、目标指示、引导与摧毁、电子干扰与对抗、灾害灾情调查、气象探测、国土资源调查、地理信息测绘、电力巡

线和输油管线巡线等军、民用任务领域的产品体系。但是，由于其特有的一些关键技术尚未完全突破，所以相对于无人机体系中的另一个分支——固定翼无人机，无人直升机的发展则比较滞后。

无人直升机的发展经历了一个较长的、持续改进与提高的过程。从20世纪50年代起美国就开始研究无人直升机，到目前已有包括美国、

以色列、俄罗斯、英国等十多个国家在研究和生产无人直升机。根据发展途径可以分为三类:

(1) 无线电遥控模型直升机飞行自主化,即在遥控航模直升机基础上增加自动导航功能,该类无人直升机起飞时重量较小,有效载荷不大;

(2) 有人直升机无人化,即直接将有人直升机改为无人直升机,或沿用有人直升机构型研制无人直升机;

(3) 摆脱常规直升机构型设计,充分发挥无人飞行器不受载人条件限制的技术优势,最大限度地提升飞行性能和对不同任务的适应能力。

无人直升机和固定翼无人机相比,除了飞行包线及用途外,突出的特点还有:

(1) 无人直升机的旋翼既是升力面又是操纵面,姿态调整通过操纵旋翼得以实现,但各姿态控制通道相互耦合,操纵过程中协调动作多,控制系统各通道间协调配置比固定翼无人机更为复杂困难;

(2) 无人直升机旋翼气动阻力较小,旋翼拉力基本与飞行速度无关,而且旋翼动量矩很大,如果按照无桨毂力矩式设计,会使得无人直升机的操纵反应迟缓;

(3) 无人直升机的稳定性较差,尤其在悬停状态时。

与有人直升机相比,无人直升机具有无人员伤亡、体积小、造价低、战场生存力高等特点,而且构型和气动布局也可以不受有人驾驶时的约束而多样化。

由上述特点形成了无人直升机技术的复杂性,迄今为止只有少数型号无人直升机正式装备部队投入实际应用。要想实现快速发展无人直升机的目的,就必须突破一些难度较大的关键技术。

总体构型与气动布局设计技术

总体构型与气动布局设计是无人直升机总体设计的主要内容,要依

据技术要求选择恰当的型式,合理布置各气动部件的位置及形状,从而提出总体布局方案。总体构型与气动布局设计技术涉及型式、参数和外形的的设计,融合了空气动力学、飞行力学、航空材料与工艺学、结构强度和动力学等多个方面的专业技术,是一项决定无人直升机飞行性能的关键技术。

不同型式的直升机,相关的设计问题差异很大,其中构型设计是影响全局的重要决策。目前,根据构型的不同,无人直升机大致可分成四大类:

(1) 单旋翼带尾桨式。

如美国的MQ-8、奥地利的Camcopter S-100、日本的RMAX和中国的WZ-1等无人直升机。此类无人直升机采用常规的单旋翼带尾桨式,可充分借鉴技术相对成熟的有人直升机的设计经验和构造结构,从而实现操纵较为简单目的;缺点是占地空间大、安全性低、效率偏低。MQ-8“火力侦察兵”(Fire Scout)是战术无人直升机典型代表,已在美国海军部队列装。

(2) 共轴双旋翼式。

如加拿大的CL-327、俄罗斯的Ka-37、美国的QH-50、英国的Sprite、中国的“海鸥”等都是此类无人直升机。其优点是气动效率和操纵效率高、结构较为紧凑、纵向尺寸小;缺点是高度较高、传动及操纵机构较为复杂。

(3) 倾转旋翼式。

如美国的Eagle-Eye、韩国

的SUAV。该型无人直升机技术延续有人驾驶的倾转旋翼机V-22和BA609,其特点是速度快,结合了固定翼飞机的中高速飞行性能和直升机的悬停、垂直飞行的低速机动性能;其缺点是控制相当复杂,对动力装置及机载监测和控制设备要求高。

(4) 涵道旋翼式(包括涵道螺旋桨式、涵道风扇式)。

根据平衡反扭矩的不同方式,可将无人直升机分为共轴双桨式和单桨式。其中共轴双桨反转相互平衡反扭矩,如美国的Cypher;单桨式则靠涵道底部安装导流片或翼板,在旋翼/螺旋桨/风扇的尾流下产生气动力形成对重心的力矩以此来平衡反扭矩,如美国的ISTAR、Helispy。这类无人飞行器具有对称结构的涵道机体,布局紧凑、安全性高、操纵性好,双桨式稳定性好、悬停效率高,单桨式可倾转飞行、机动性好、速度快;缺点是双桨式飞行速度慢、单桨式垂直飞行气动效率低。

(5) 升力转换式。

主要通过旋翼/机翼转换升力。



美国的“火力侦察兵”MQ-8

垂直飞行时靠旋翼旋转提供升力,水平前飞时旋翼停转转换为固定翼,如美国的 Dragonfly; 也有水平前飞时旋翼倾成螺旋桨提供拉力,机翼倾转成升力面,如美国的 MTR-SD。这类飞行器构型具有原理新颖、高速等特点,但升力转换难度大、操纵复杂,该项技术还在求证中,有待检验。

不同构型的无人直升机气动布局各有不同,总体设计也不同。即使同一种构型的直升机,由于气动布局的不同,其几何外形和气动性能也会有很大差别。

无人直升机的气动布局是指直升机气动外形、各部件的外形、参数及相互位置的确定,其目的是使直升机具有所要求的空气动力性能——飞行性能及操纵性、稳定性。在分析气动布局时,除了主要从空气动力的要求考虑以外,还必须考虑到最小重量、使用、工艺等方面的要求及结构布置的可能性。

直升机是否具有良好的飞行动力学特性在很大程度上决定于气动布局,在气动布局中必须保证直升机在前飞时,具有一定的迎角静稳定性、速度静稳定性、航向静稳定性、上反效应及角速度阻尼等。直升机的旋翼及机身往往是迎角静不稳定的,因此,必须采取其他措施来抵消,如安装水平尾面。假如通过气动布局

能使直升机在平衡状态时旋翼合力位于重心之后,也可以改善迎角静不稳定性。

除此以外,气动布局还必须保证飞行状态改变时(如由悬停转入前飞、前飞转入自转等),作用在直升机上的力矩不致于产生突然的变化。通过气动布局及重心定位,系统还应保证在各种飞行状态及极限重心位置时直升机的平衡,并留有一定的操纵余量。

另外,在进行无人直升机构型与气动布局设计时,避免各部件相互气动干扰是重要的设计内容之一。气动干扰主要是旋翼与机身的气动干扰、旋翼下洗流对平尾和垂尾及尾桨的干扰、尾桨与垂尾的干扰,因此在气动布局时要恰当地安排各气动部件的相互位置,以此避免或减少各种负面影响。

设计无人直升机时要解决总体构型与气动布局设计这一关键技术,有效途径是通过理论与试验相结合的方法充分掌握不同构型与气动布局的气动干扰机理,精细化建立空气

动力学模型,多学科设计优化参数,并采用 CFD 模拟计算和风洞吹风试验验证。



美国贝尔公司的Eagle Eye



加拿大的CL-327

飞行控制与导航技术

从飞行控制和导航技术来看,由于无人直升机作为受控对象具有多变量、非线性、强耦合性、时变性等特性,是一种稳定性差、不易操纵和难以控制的飞行器。所以目前飞行控制和导航技术是制约无人直升机投入实际应用中的瓶颈,也是一项决定无人直升机飞行品质的一项关键技术。

美军根据飞行控制与导航技术水平的高低,按照发展型谱把无人直升机的能力分类定义成十级,分别是:远程引导飞行控制能力、实时故障诊断与监控能力、飞行条件和故障的适应能力、机上航线再规划、集群配合、集群战



奥地利的Camcopter S-100

术再规划、集群战术目标、分布式控制、集群战略目标和完全自主集群。概括起来就是无人直升机的飞行控制与导航技术水平可分为四类：遥控飞行技术、自动飞行技术、自主飞行技术和智能飞行技术。

无人直升机遥控飞行需要地面人员操纵,按人工指令飞行,其中包括连续指令和离散指令控制飞行两种状态。自动飞行需要预编程机载飞控系统,无人直升机按编定的程序指令飞行,具有自动导航功能,可按照程序设定实现自动起飞、航线飞行和着陆(舰)。自主飞行需要先进的机载传感器、飞控和导航系统,在给定任务后,无人直升机自行判断飞行状态、自发指令控制飞行,具有自主目标识别和自主航迹重规划能力;智能飞行则是在自主飞行的基础上,增加智能化的机载设备,可实现单机间合作飞行、多机编队飞行、有人机与无人机协同飞行。

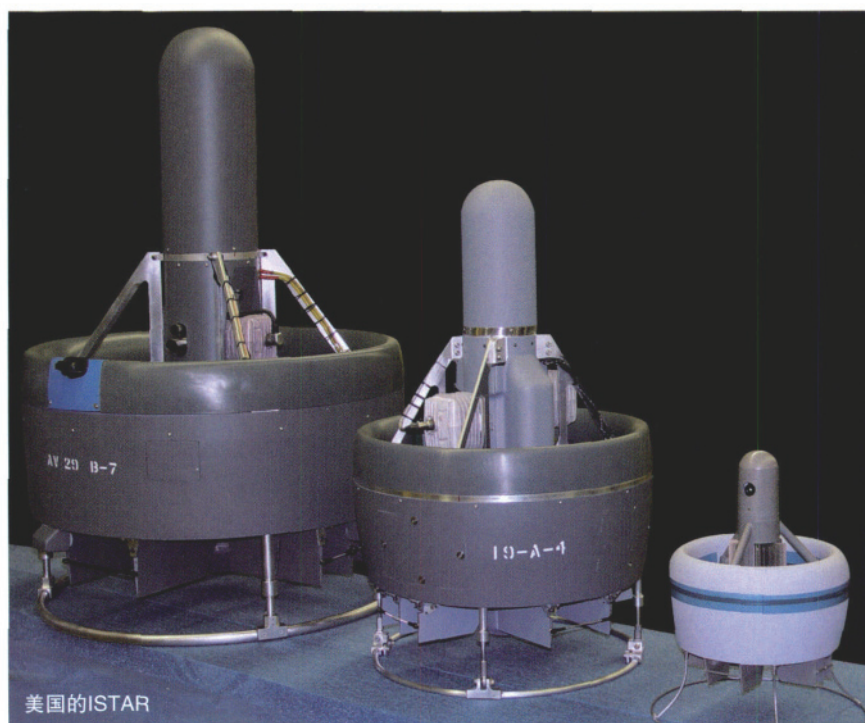
就目前发展情况来看,无人直升机的飞行控制技术和导航技术还不够成熟。当前各国研发的无人直升机大多实现了自动飞行的计划,在不同环境风速条件下,自动控制功能的可靠性和精度(尤其是大速度前飞自动控制),以及作为无人直升机在实际应用当中所必须具有的自动起飞、着陆(舰)功能还在研究和仿真试验阶段当中,且缺乏严重应付突发事件的能力,系统只能执行预定的任务。

在向自主飞行阶段迈进后,无人直升机都将集自主飞行、自动飞行和人工实时遥控飞行于一身,可以通过指令切换飞行方式,既适应不同场合或执行不同任务,也可以在紧急情况下启用该技术以提高生存力。

飞行控制和导航技术涉及状态测量、信息综合与管理、姿态控制等方面的技术,包含了起降/飞行控制律设计、航线规划及全向导航设计、发动机控制律设计、人工智能与容错

控制策略设计、智能化故障模式识别与处理、综合电气管理等相关内容。

设计无人直升机时不仅仅需要先进的飞行控制与导航理论和经验(并装有功能强大的机载计算机系统),同时还对传感器技术和测控技术提出了要求。为了突破这一关键技术,科研技术人员尝试了鲁棒控制、遗传模糊控制、显模型跟踪控制等控制方法,以及视觉导航技术和嵌入式飞控系统、分布式飞控系统 etc 系统设计方面的探索。但还没有形成



行之有效的方法。

遥测遥控技术

由于在大部分的时间里无人直升机都在地面人员的视野之外飞行,在飞行器和地面控制站之间必须有稳定、可靠、高速的数据传输通道,地面人员对飞机的各种监视测量和操纵控制都依赖于提供数据通道的遥测遥控系统。遥测遥控技术是解决通信链路和遥测遥控数据高可靠性、稳定性、实时性,以及飞机各种状态的准确测量技术难题,建立遥测遥控系统的关键技术,是一项保证无人直

升机超视距安全可靠飞行的关键技术。

无人直升机的遥测遥控系统不仅包括通信信道部分,还包括无人直升机地面检测、指挥、操纵与协同部分内容。此外,该系统为监控机上及地面站各设备工作状态并为可能出现的故障提供分析数据,还需要对无人直升机机上控制环路各部分以及地面站遥测设备进行全程监测。因此,无人直升机遥测遥控系统分为机载测控子系统和地面测控子系统

两个部分。

一般无人直升机遥测遥控系统由天线(含低噪放)、发射机、上下变频器、基带处理器组成,与飞控和任务设备的接口数据转换在基带处理器完成。地面测控设备采用全向天线加定向天线,机载测控设备采用全向天线,收发一体。地面测控设备将地面显控设备的控制指令形成遥控信息,上传到无人机机载测控设备,机载测控设备实现遥控信息接口转换,传递给飞控设备,进行飞行状态控制;然后机载测控设备接收飞控设备输出的飞行状态信息以及任务

载荷输出的信息,形成遥测信息,下传到地面测控设备,最后由地面测控设备进行接口转换,传递给地面显控设备。由于无人直升机使用环境的特殊性,要求遥测遥控系统具有以下特点:

(1) 遥测数据具有高可靠性和高实时性,系统对异常情况能够快速有效地提示和反应;

(2) 高机动飞行的情况下确保通信链路稳定可靠,为了保证数据的正确稳定,系统应具有低误码率;

(3) 由于重量限制,要求机载设备尽量降低复杂度,做到简单、可靠;

(4) 遥测数据具有良好的可视化方法,地面设备要求简洁、高效,以符合车载移动地面站安装和使用。

上述系统特点都需通过遥测遥控技术来实现。虽然直升机振动大,但在信道流量和抗干扰性能方面该技术已足够成熟,其他该技术也已经具有实用性。针对不同型号无人直升机而言,目前主要是其遥测遥控技术的专用性问题。

此外,地面测控子系统还需通过光学、微波和其他探测方式辅助完成无人直升机近距离精确定位,为无人直升机在任意地形和地貌环境下实现自主降落提供位置和高度信号(尤其是在 GPS 信号丧失时),成为完成无

人直升机自主起降的关键手段。对小型化的无人直升机而言,由于机上安装位置和重量的限制,航电装置拟采用组合设计构成一体化航电装置,即将飞控、导航与通讯以模块方式构成一个整体装置,将大大提高通信与机上其他航电装置一体化的共型设计可靠性并减小航电装置的重量和尺寸。对具有较高自主飞行和智能飞行能力的无人直升机需具有多机协同能力,还需有与其他装备协同作战能力,即无人直升机在执行任务中不仅要保持无人直升机与地面指控站的通信,还需要具有与其他飞行器和地面装备的通信,以实现多机协同和多装备间的协同。一些新研制的测控装置将考虑这种具有一站多机通信和多机通信功能的群控通信网络系统。

结束语

除了上述关键技术以外,无人直升机的发展还离不开动力、传动、机载设备、航空材料等技术的支持,这些技术是无人机共性的关键技术,或是设计所需要的重要技术,但相对



总体构型与气动布局设计技术、飞行控制与导航技术和遥测遥控技术而言,这些不是造成无人直升机发展落后于固定翼无人机的主要因素。

随着上述关键技术的突破,无人直升机将会得到快速发展和应用。在 2007 年美军发布的《无人机系统路线图 2007-2032》中,共规划了 7 种无人飞行器,其中 5 种是垂直起降的,2 种是水下发射的。5 种可垂直起降的无人飞行器中,无人直升机有 3 种: A-160 “蜂鸟”、DP-5X、无人攻击直升机(UCAR),分别代表:长航时、模块化、武装攻击 3 个方向。表明美军今后将大力开发无人直升机,作为一种重要武器装备,无人直升机将步入快速发展轨道。

无人直升机设计发展将有以下趋势:

- (1) 任务多样化,载荷和续航能力不断提升;
- (2) 由“以平台为中心”向“以任务为中心”转变;
- (3) 模块化,使用维护便捷;
- (4) 智能化和自主能力稳步提高;
- (5) 大量采用新材料和新技术。

(责编 岭雾)



声明:本刊 2011 年第 10 期封面图为北京航空制造工程研究所研制的具有自主知识产权的柔性多点模具拉形铝合金马鞍形蒙皮零件。