



直升机航空电子技术的现在与未来

罗雪丰

如果有人要问“什么是航电”，有一个简单的算式常常被用来回答，那就是“航空电子=航空+电子”。航空电子就是电子技术在航空领域的应用；而直升机航空电子技术则是在直升机平台发展需求牵引下有“直升机特色”的航电技术分支。直升机航空电子技术的现在与将来都与直升机平台承担的使命密不可分。

直升机可分为专用武装直升机和运输直升机两类。专用武装直升机承担的使命最终体现在战场上，强调“看的远、打的准”“能够打赢敌人”；运输直升机则更多地强调安全，当然也可加装武器成为武装直升机担任侦察和攻击职责。

专用武装直升机

专用武装直升机又称“战斗攻击直升机”，其航空电子系统更接近固定翼战斗机，典型案例如RAH-66“科曼奇”攻击直升机航空电子系统的70%零部件可与F-22战斗机互换。随着固定翼战斗机航空电子技术的不断进步，自上世纪50年代以来专用武装直升机也经历了分立式机电仪表、数字化、综合化发展阶段：

分立式机电仪表阶段——主要使用全机械或机电式仪表完成机载信息的传感和显示，典型案例如早期越战中发展出来的第一代AH-1“眼镜蛇”专用武装直升机。

数字化航电阶段——随着电子技术的发展，机上飞行、导航、通信识别、大气、显示、火控、目标探测等子系统都装备了独立的计算机，这些系统使用ARINC429等数字总线连接，称为“分布式结构”。由于分布式结构连线复杂、电缆数量多，20世纪70年代美国空军莱特实验室提出“数字式航空电子信息系统”计划，使用1553B总线简化了设备间的连接关系，减轻了航电系统的体积和重量。典型案例如F-15和F-16固定翼战斗机、美军AH-64“阿帕奇”武装直升机、意大利A-129“猫头鹰”武装直升机、法国和德国的“虎”式攻击直升机以及我国的直10均配备了联合式航空电子系统。

综合化发展阶段——上世纪80年代，美国空军提出“宝石柱计划”，全面开展航空电子系统物理综合和功能综合，旨在提高性能、降低成本的同时改善可用性和维护性。架构设计中开始出现“功能区”的概念，宝石柱定义了3个功能区（数字信号处理区、任务处理区、飞行管理区）和5类（传感器、任务、飞行管理、座舱开关、显示）接口，典型案例包括F-22和F-35战斗机、RAH-66攻击侦察直升机。

武装直升机航空电子系统在不断改进升级换代的同时，还有两个热点发展方向：首先是有人直升机间的信息化、网络化协同作战；其次与无人机的混合协同作战。

美军提出的“网络中心战”以及近年来美陆军的“多域战”和海军的“分布式杀伤”等顶层作战概念的主要目的是为了构建战场信息机动优势，强调装备间的信息共享与互

联互通协同。包括空中侦察、武装、指挥等直升机装备之间的互联互通协同；以及直升机与空军预警指挥机、战斗机之间的互联；还有与地面步兵、车载机动指挥终端之间的互联互通协同。

由于直升机突出的悬停和低空机动能力，直升机装备作战自越南战争以来取得了骄人的战绩，在沙漠风暴行动中达到了辉煌的顶点。随着地面防空武器的发展以及针对直升机伏击作战方法的出现，1993年索马里战争中的“黑鹰坠落”事件成为了直升机装备作战的拐点，此后的第二次海湾战争、伊拉克、阿富汗、叙利亚等战争中频繁出现直升机被伏击杀伤的战例。与此同时，随着无人机技术蓬勃发展以及在海湾战争正式投入作战后其能力和承担任务不断拓展，在RAH-66“科曼奇”直升机项目研发期间美军内部甚至出现了要用无人机完全替代“科曼奇”在陆军航空兵作战系统中承担角色的声音。经过长期的辩论及定性分析后，美军得出结论：“无人机由于受到智能化程度限制暂无法完全取代有人直升机，部队需要综合集成两种作战平台的优势形成互补”“有人直升机与无人机协同是陆军航空兵建设的正确方向”。此后1993年至2006年间的“机载有人无人系统技术”“猎人远距离杀手编组”等项目通过仿真定量评估、试飞演示等方法证明了协同后的作战效能提升。

由于实际战争的迫切需求牵引了装备能力发展，美军有人直升机无人机协同作战编队目前已进入服役后的战法演训阶段。

运输直升机

欧美的运输直升机强调军民通用，而且军用运输直升机航空电子系统越来越倾向于直接使用民机平台的研发成果作为开发基础，空客直升机、莱昂纳多直升机、贝尔直升机、西科斯基的运输直升机都采用这一策略。为了降低整个谱系的研发成本，空客直升机从上世纪末开始实施“家族化、通用化”研发策略，根据不同时期的设计特征和总体风格，其直升机航电系统发展可分为两个阶段：

1992~2000年间改进改型的H系列直升机——包括自主集成的重型H225（11吨）直升机“AHCAS”航电系统；以及通过统一配装Thales公司“Meghas”航电套装和Sagem公司“Avionique Nouvelle”飞行控制系统完成了H120（1.7吨）、H130（1.4吨）、AS350（2.2吨）、H135（2.9吨）、H145（3.5吨）、H155（4.9吨）等中型轻型直升机的家族化统一。

2000年后自主研发的Helionix航电系统标志着H系列运输直升机新一代家族化风格完全形成——目前该航电系统已配装于H175（7.5吨）、H135T2（2.9吨）、H145T2（3.5吨）、H160（5.5吨）四个型号，后续将继续向其其余型号推广。

除空客直升机外，莱昂纳多直升机、西科斯基直升机从2000年以后也采取这一发展思路；贝尔直升机公司从2008年开始选

择与Garmin公司合作实施家族化通用化统一发展策略。

直升机航空电子系统的未来

直升机航空电子系统的总体发展脉络为数字化、综合化、智能化、虚拟化。目前处于由综合化向智能化的过渡阶段。

为了预先筹划下一代直升机差异化竞争点。欧美各直升机主机、航电集成商一方面继续探索航电与机电、飞控系统的深度融合综合化，典型案例如泰雷兹公司正在研发的“Avionics 2020”直升机航电平台，实现了航电系统全局优化，设备数量大大减少，系统重量和功耗大幅降低；另一方面，将直升机航电未来技术突破点锁定在“智能化”方面，加速将电子技术发展最新成果引入航空领域，并开展了大量的探索研究，其中的典型代表包括空客直升机公司和贝尔直升机公司的研究。

2011年，空客直升机公司新一代的X4直升机项目在法国政府“未来投资计划”的支持下开始进行概念设计，空客直升机公司原计划于2020年将X4概念驾驶舱航电投入市场以改变竞争格局。X4概念驾驶舱中航电系统前端信息呈现更加侧重于头盔显示方式，飞行路径引导以“空中高速公路”（highway in the sky）方式呈现；下视显示设计了一个比传统位置更低的小型仪表盘和交互式中控台；控制方面引入语音控制和立体音响告警技术。

随着信息技术的进一步发展，贝尔直升机公司为其新一代倾转旋翼机开发了全景触摸驾驶舱交互系统，其监控系统能融合巨量数据和图像并按一定逻辑显示；完全取消了物理按键，采用类似消费电子领域“平板化”的触摸操作交互方式，并对危险等级高的功能采用控制备份设计以确保高生存性。屏幕采用特殊材料，使其具备在部分显示区域损坏的情况下利用剩余部分自动重构信息显示的能力。此外，驾驶舱还可将数据投射于风挡玻璃上，与集成的虚拟显示智能头盔形成三重信息呈现冗余。其配套的航电系统自动根据飞行状态调整信息显示，如：在高空飞行仅显示基本飞行信息；而进入低空飞行时，系统自动显示地形合成视景信息；在能见度为零的情况下，则通过配备的光电传感器将周围的情况呈现于巨大的屏幕上。

2018年国际消费类电子产品展览会上，贝尔直升机展出了一台“Bell air taxi”电动无人驾驶直升机。其概念驾驶舱更像一个空中的移动办公室，下视显示采用了柔性屏幕、平视显示采用全息投影显示方式。座舱内部充满了互联网设施，方便飞行途中的乘客通过内置设备联系家人、朋友和同事，进行办公或者娱乐。

未来直升机航电系统智能化程度越来越高，航电前端人机交互将最终实现“虚拟驾驶舱”概念，由头戴显示器提供无限的、可重构虚拟显示和控制界面，交互界面可根据喜好、任务需要进行定制。先进态势感知技术、增强现实等先进信息呈现技术、语音控制等先进交互技术、智能化态势融合与辅助

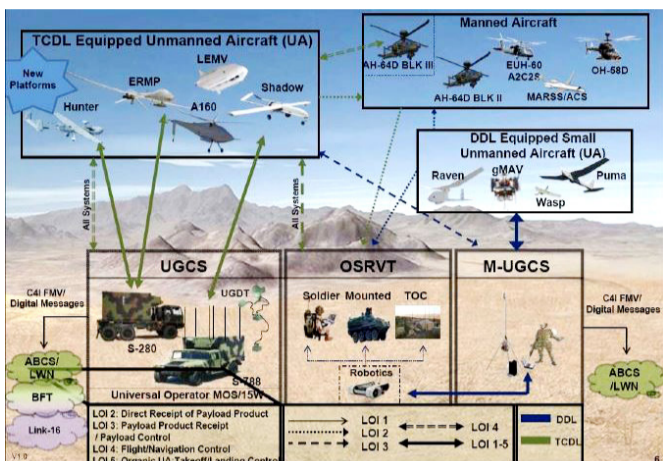
决策技术、人工智能技术等的发展和综合应用将飞行员从繁重的飞行控制操纵中解脱出来，其精力更多集中于任务管理与决策层面。

随着电子技术更新换代速度越来越快，这些概念驾驶舱航电使用的智能技术用不了多久就会来到我们身边。

我国直升机航电系统的现状及发展途径

经历了40余年的发展，我国武装直升机机载航电电子系统在总线技术、硬件综合模块化、物理组织架构设计等方面充分汲取了国外的最新理念和技术研究成果；但在驾驶员辅助决策、数据融合等智能化机载软件方面与国外最新型号存在差距。网络化作战方面，有人直升机混合编队协同作战研究已具备相当规模。

我国自主研制的民用直升机由于起步较晚，各项技术均来源于军用直升机型号研制体系下的经验积累和技术沉淀，因此要在坚持“以我为主”前提下加强国际合作，打造国产直升机型号的差异化亮点，也通过消化吸收再创新积极提升自主研发实力；驾驶员人机交互方面，可紧跟国际前沿将消费电子在虚拟现实、人工智能等方面取得的成果有选择性引入航空领域的做法，预先构建下一代直升机的竞争优势；研发模式上尽快转变到“家族化、通用化”统一发展策略以降低全谱系产品的研发成本，同时增强整体竞争力。（本文作者单位系航空工业直升机所）



美军基于网络互联的有人直升机无人混合协同作战体系



图2 EC145T2、EC175驾驶舱照片



空客公司运输直升机家族化通用化历程

F-35战斗机经济可承受性问题刍议

海涛

2018年11月，F-35项目将迎来最大的里程碑节点——完成系统研制与验证（SDD），开始交付Block 3F批次量产机型。最终，Block 3F将成为基线机型，用于满足美国空军、海军陆战队和海军的基本作战需求。按照刚刚退役的美国空军F-35项目主任克里斯托弗·博格丹中将的说法，“F-35已经从多年的争论和发展混乱之中，迈向了健康发展的轨道”。实际上，自2001年该项目启动研制以来，成本费用始终是被外界诟病的主要问题之一。时至今日，F-35项目是美军历史上费用最大的武器装备采购项目，已经是不争的事实。但从小批次生产合同的发展脉络来看，单机成本问题已经得到明显的改善。

项目总费用将超过4000亿美元

在立项阶段就把“经济承受性”作为与技战术指标同等重要的F-35项目，已经步入经济上不可承受的境地（表1）。其中，总费用已经从2001年立项论证的2330亿美元（当年币值，下文同）飙升至2017年底最新估算的4061亿美元，涨幅达到74%；平均采购单价也从2001年立项论证的6900万美元上涨至2017年底最新估算的1.41亿美元，翻了一番；项目拖期严重，飞机开始大批量生产的时间从立项论证的2012年推迟至最新规划的2019年，拖延7年。

研制费较立项超支达到60%

F-35项目的工程研制工作开始于2001年，是国际上第一个利用同一条生产线制造三种型号战斗机的研发项

表1：F-35项目成本、进度和数量的变化

	2001年10月 (最初基线)	2012年3月 (最新基线)	2017年12月 (最新估算)
研制数量	14	14	14
采购数量 (仅美军)	2852	2443	2456
总数量	2866	2457	2470
研制费 (十亿美元)	34.4	55.2	55.5
采购费 (十亿美元)	196.6	335.7	345.4
基建费 (十亿美元)	2	4.8	5.3
项目总费用 (十亿美元)	233	395.7	406.1
项目采办单价 (百万美元)	81	161	164
平均采购单价 (百万美元)	69	137	141
开始大批量生产	2012	2019	2019

备注：（1）上述费用不包括发动机，因为F135系列发动机在F-35项目之外单独立项。（2）按照美国国防部的定义，军用飞机的价格通常是飞离价格（Flyaway Cost）或者重复性飞离价格（Recurring Flyaway Cost）。这两个价格在大批量生产阶段基本上没有差别。一般只包括机体、航电和发动机。这个价格在我国被称为出厂价格。（3）平均采购单价（Average Procurement Unit Cost, APUC）是在飞离价格的基础上，增加了附件、初始备件、保障设备后的平均价格，比飞离价格明显高一些。（4）项目采办单价（Program Acquisition Unit Cost, PAUC）是项目总费用除以总生产数量。总生产数量包括研制数量和采购数量。PAUC在APUC的基础上，增加基建费和研制费两大部分。（5）采购数量仅为美军需求。其中，F-35A为1763架，F-35B为353架，F-35C为340架。国际合作伙伴的采购数量需求为612架。

目，即常规起降型（F-35A），短距起飞/垂直降落型（F-35B）和舰载型（F-35C），目的是通过三种型号的通用性，从总体上降低研发、生产、维护成本。在项目立项论证时，美国国防部预计通过联合研制可节省150亿美元。但十几年过去了，F-35项目研制费非但没有节约，反倒逐年上涨。目前最新估算的研制费将达到555亿美元，较立项论证的344亿美元上涨了61%。

针对F-35项目超支严重的问题，美国国防部在2008年组建了联合估算团队（JET I/II），对重量与设计问题、采购数量的变化、材料与人工成本的变化、进度拖延等影响该项目经费的因素进行了分析，得出的结论是，立项时估算不足以及项目并行研制策略等方面的问题是造成F-35项目超支严重的最主要原因。

同时，软件升级费用超支也是重要原因之一。最初估算的Block4软件开发费用为80亿美元，但F-35项目办公室最新估算为108亿美元。另外，进度的严重拖延也是项目超支的重要原因之一。F-35A在2016年8月达到初始作战能力（IOC），较立项论证的2013年3月推迟了3年；F-35B在2015年7月达到IOC，较立项论证的2012年3月推迟了3年；F-35C预计在2019年达到IOC，较立项论证的2015年3月预计将推迟4年。

单机价格控制效果明显

单机价格方面，自从F-35项目在2006年进入小批量生产阶段至今，其单机价格经历了一系列涨跌的情况，目前三型飞机成本均已得到有效控制。从截至2016年已经签订的前10批次

小批量生产合同中约定的单机价格（不含发动机及其附件）来看（如表2所示），F-35A从第1批次的2.21亿美元降至第10批次的9500万美元，达到了历史最低点，并逐步向设定的8500万美元的目标值靠近；F-35B从第2批次的1.61亿美元降至第10批次的1.23亿美元，降低超过20%；F-35C从第4批次的1.43亿美元降至第10批次的1.22亿美元，降低接近15%。

实际上，早在2104年初，美国国防部就与主承包商洛马公司和主要分包商达成协议，启动了“可负担性蓝图”（Blueprint For Affordability）计划，旨在通过改进生产工艺和技术，逐步减少F-35战斗机的单机成本。

表2：F-35小批数量和单机价格（单位：百万美元，当年币值）

批次	年度	F-35A 数量 单价	F-35B 数量 单价	F-35C 数量 单价
第1批次	2007年	2 221.2	0	0
第2批次	2008年	6 161.7	6 160.7	0
第3批次	2009年	7 128.2	7 128	0
第4批次	2010年	10 111.6	16 109.4	4 142.9
第5批次	2011年	22 105	3 113	7 125
第6批次	2012年	23 103	7 109	6 120
第7批次	2013年	19 98	6 104	4 116
第8批次	2014年	19 95	6 102	4 116
第9批次	2015年	42 102	13 132	2 132
第10批次	2016年	44 95	9 123	2 122
第11批次	2017年	48	18	

备注：（1）5~8批次单价中不含发动机价格。根据美国国防部2016年底发布的SAR报告，F-35A配装发动机的平均价格为1090万美元，F-35B配装发动机的平均价格为2670万美元，F-35C配装发动机的平均价格为1100万美元。（2）第11批次小批合同尚未公布各型飞机的价格。