

航空器新宠

——纵览无人机系统技术变革

A New Focus on Aircrafts: an Overview of Unmanned Aircraft System (UAS) Technical Development

北京航空航天大学 王英勋 李新军 王建平
解放军 63928 部队 牛凌宇

无人机向长航时、大载荷、多功能、微小型化等方向发展,呈现高生存、超高声速的趋势。无人机系统技术正经历着一系列变革。



王英勋

研究员,博士生导师,主要研究方向为无人机自主控制。

无人机是无人驾驶飞机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)的简称,它机上无人,是一种可自主飞行或遥控操纵的可重复使用的航

空器,可携带致命或非致命的载荷。

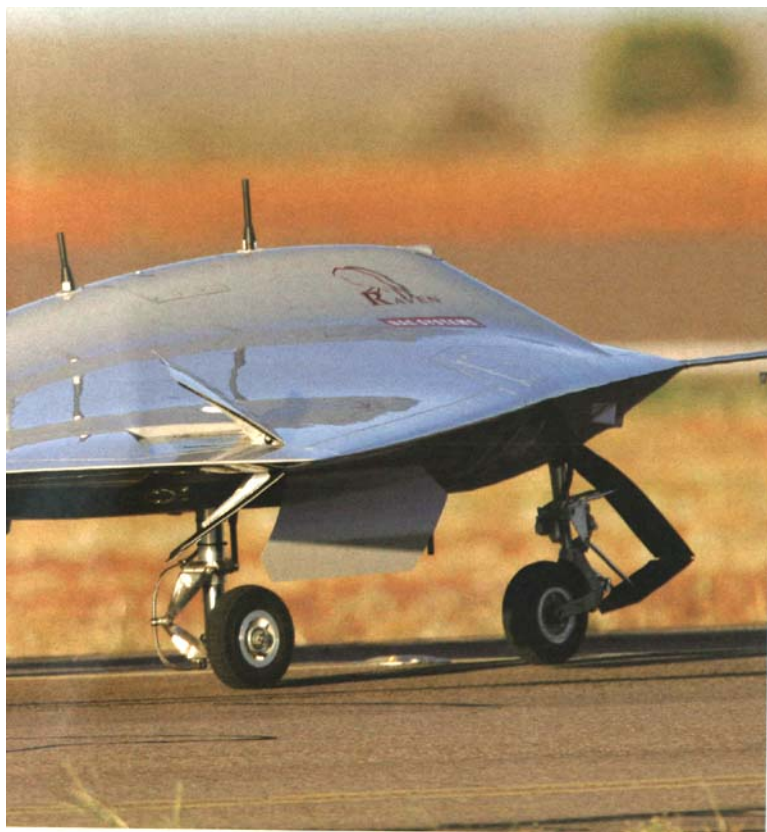
1909年,第一架遥控航模飞机在美国试飞成功;1915年,德国研制出采用伺服控制装置和指令制导的滑翔炸弹,它被公认为有控无人机的先驱;1939年,美国开始研制靶机,如瑞安公司的“火蜂”(Firebee)和诺斯罗普公司的“石鸡”(Chukar);第二次世界大战期间,德国人把靶机技术与遥控技术结合起来,研制成功世界上第一枚飞航式导弹V-1。

早期的无人机大多用作靶机,直到近20年内的几次局部战争无人机才崭露头角,逐步成为除有人驾驶飞机和导弹以外的另一类作战武器。无人机不仅具有了战场侦察、监视、目标探测、电子战能力,甚至逐渐发展成为无人攻击飞机。

1982年,以色列成功地在贝卡谷地以“猛犬”(bandog)无人机为诱饵成功摧毁了敌方的导弹基地。1991年海湾战争中无人机大量参战,其发

展开始进入一个崭新的局面。特别是在21世纪初,美国研制的无人机在阿富汗的反恐战争中大展身手,在伊拉克战场更是突显神威。这掀起了无人机在世界范围内研究和发展的热潮。

随着控制系统的发展,无人机逐渐被赋予新的使命。无人机在高风险环境和长时间飞行任务中显现了其独特的优势,可通过实时监视与侦察、打击毁伤评估、干扰、欺骗甚至实现直接精确打击来形成信息战和无人化非接触远程作战的平台;通过在资源勘探、气象探测、灾难预测与控制、农作物生长监视、天-空-地信息一体化等方面的应用成为科学研究与应用的平台;通过用于大过载、高超声速、新型动力、新型隐身结构、新型飞行模态等先进航空技术的验证,成为航空技术基础研究的平台,在一定程度上牵引和推动着航空技术的发展。



针对新的使命,无人机向长航时、大载荷、多功能、微型化等方向发展,呈现高生存、超高声速的趋势。无人机系统技术正经历着一系列变革:一是作战任务从战术级延伸向战役和战略级,从支援保障型拓展向攻击作战型;二是越来越综合化、智能化和隐身化;三是任务载荷向全天候、高分辨率、远距离、宽收容、实时化方向发展;四是测控和传输系统向远距离、通用化、数字化和网络化方向发展;五是向高安全、高生存、高效能、低损耗方向发展。这些发展促使相关技术领域也在发生着突飞猛进的变化。

飞行器平台

针对高效率、大载荷、高生存的需求,飞行器平台从气动到材料和结构都在不断进行新的探索和尝试。

1 气动布局

在气动布局方面,无人机平台从

常规、固定结构逐渐向非常规、非定常、可变飞行模态方向发展,从追求单一气动性能向气动-结构-隐身-控制一体化方向发展。

早期的无人机只作为靶机或者执行战术侦察等任务,一般采用静安定性良好的常规布局。

随着无人机综合化、通用化的发展,目前大多数先进无人机采用无垂尾或V形双垂尾、前翼以及翼身融合体等非常规布局,如图1所示为V形双垂尾全球鹰结构。非常规气动布局还可以有效地降低雷达反射截面积,甚至可以做到目视隐身。除通过改进气动结构外,未来的隐身还将与声音、红外、电磁等控制技术结合,使无人机成为信息战中的“蜘蛛侠”。美空军一项正在秘密研发的技术还可帮助无人机操作人员不留痕迹地直接进入敌方的通信程序。

为了缩短起降距离,兼顾高速打击与低速巡航待机,可变气动力的布

局形式也已崭露头角。如图2所示的“鹰眼”倾转旋翼无人机,可以最大限度降低对跑道的依赖并实现远高于直升机的巡航速度和作战范围。为了提高无人机在复杂地形条件下的起降能力和复杂气象条件下的飞行稳定性,一些构思新颖的双连翼、鸭式布局、串列式无人机和各种旋翼无人机都在积极的研究和试验之中。

洛·马公司正在研制的“变形机翼”技术将实现无人机在飞行中进行机翼形状甚至翼形的调整,扩展了飞机的飞行包线,使飞机兼备低速巡航侦察和高机动空战的能力。图3为一种可变形无人机概念图。

图4所示的是美国空军研究实验室(AFRL)和工业界合作伙伴正在试验的一种混合翼身融合无人机X-48B,能显著改善燃油效率的飞翼设计。这架翼身融合飞机后缘上有20个控制面,可完全依赖机翼上的控制面进行稳定性和操纵性控制,充分体现了气动-结构-隐身-控制一体化设计的最新趋势。图5中,美国最新公布的“弹簧小折刀”斜翼式无人机的机身和机翼可根据飞行需要随时保证在最佳匹配状态。例如当单翼与引擎成直角时,飞机处于亚音速巡航状态,成 60° 角时,可以2倍音速飞行。

2 先进结构和材料

在先进结构技术和机体材料方面,现代无人机普遍采用优化设计的机身、机翼和便于快速拆装、维修的模块化结构,并大量采用重量轻、强度高、雷达反射特征小、容易维修的复合材料和结构隐身技术。为降低可探测性,机体的蒙皮要采用近乎无缝结构的复合材料。使用高强度、轻质复合材料成型蒙皮,不仅可增加燃油和有效载荷量,还可直接增强无人机的生存能力。目前DR技术公司已开发出一种密度仅为 $7.4\text{kg}/\text{m}^3$ 的轻质复合材料,其防护力可抵挡90mm口径炮弹的破片。诺斯罗普·格鲁门

公司正在研制的 X-47A 采用智能材料和结构自适应机翼,机翼可在正负 20° 范围内变动,可显著提升飞机机动性、增大航程和有效载荷。图 6 所示为波音公司研制的 X-45A 验证机,其机身由高速切削的铝合金龙骨、梁及复合材料蒙皮构成,机身上、下均采用了整体蒙皮。

动力装置

无人机低成本、长航时、大过载、强功率、宽速限和飞行高度的条件对其动力装置提出了十分严酷的要求。无人机动力装置的发展必须兼顾性能、寿命、能耗、储存性、维护性、成本控制等方面。

涡扇发动机的效率在过去的 10 年内得到了很大的改善。到目前为止,其成果已将小型涡轮发动机(如 F124)的推重比提高了 40%,耗油率降低了 20%,同时还降低发动机系统的生产和维护费用降低了 40%。正在开展的多用途经济可承受高级涡轮发动机(VAATE)研究计划,目标是到 2025 年,动力系统的推重比提高 250%,耗油率和费用降低 60%。

面对无人机动力装置的特殊要求,新型动力装置的发展也是不容忽视的课题。为了提高无人机搭载能力和使用效率,研究人员正在努力研发各种推进机理和新概念动力装置。例如脉冲爆震发动机,它的燃气

制设备,自主决策并完成所规定的任务,包括在线实时重新规划任务并自动生成完成任务的飞行轨迹,是无人机水平的重要标志。近年来,随着各种新技术的不断应用,无人机系统的复杂性及功能的自动化程度等日益增加。由于作战环境的高度动态化、不确定性以及飞行任务的复杂性,使得规划与决策成为无人机面临的新的技术挑战,各种基于程序化的自动控制策略已经不能满足未来先进多功能无人机对复杂作战环境下的多任务的需求,自主飞行控制能力的提高将是未来无人机飞行控制系统发展的主要目标。

自主控制是当前所有无人系统中一个主要的研究领域,无论是在军事领域、商业领域还是在学术领域都占据着很重要的位置。自主控制可以减少操作人员数量,扩大了军事行动范围。实现自主控制需要更强大的感知能力,自适应能力和学习能力,而其中从经验中学习的能力还处在初级阶段。自主控制还包括多机合作能力,包括同步通信和合作执行任务,可以同时承担目标感知、干涉和监视等任务,这个能力将有助于完成大规模行动。无人机拥有了更强的自主控制能力,就相对降低了与地面控制站通信要求,可以节省出更多的带宽。

无人机的飞行自主控制经历了遥控(RC)、指令控制(CC)、程序控制(PMC)、目标引导控制(GMC)、自适应控制(AMC)、自主任务控制



图1 全球鹰的V形双垂尾结构

由于发动机的研发成本高、周期长,在无人机的应用上基本还是采取选型、改进和新研相结合的途径。要保证高空性能,降低燃油消耗,关键是要改善燃烧和传热条件,提高燃烧效率。在优化发动机结构的同时,目前对常规动力进行改进的技术途径包括:对活塞、转子发动机进行电子喷射、涡轮增压改造,提高涡喷发动机压气机级数,增加高空补氧,实现燃油电子化调节,合理提高涡扇发动机涵道比等。如美国在 ROTAX-914 活塞发动机上进行二级、三级增压和相应改造,使发动机适用高度从 5000m 提高到 16000m,普惠公司也从 PW530 发展出了适用于高空长航时无人机的 PW545 发动机,如图 7。

1988 年起,由美国空军研究实验室所主导开展的综合高性能涡轮发动机技术(IHPTET)项目使美国

压力高、热循环效率高、推重比大、比冲大、工作范围宽(可在 Ma 为 0 ~ 10、高度为 0 ~ 50km 飞行),且重量轻、成本低、噪声小,还可在地面静态起动,具有其他发动机无法比拟的优势。重油陶瓷发动机也是无人机发动机的一个值得关注的重要发展方向,这种发动机的续航时间可望达到目前的近 10 倍,而且有较低的红外可探测性。正在悄然兴起的高能量密度推进技术的研究,如激光推进、反物质流推进等,具有更高的推进效率,也可作为新型无人机的动力。

自主控制

自主控制,即无人机不依赖外界指令和设备支持,在不确定的环境中仅依靠自身的控



图2 “鹰眼”倾斜旋翼无人机

通讯自动调遣地面待飞和空中飞行的单机进行编队。

任务载荷和武器化

无人机从执行侦察、监视任务的战场辅助武器系统向直接攻击作战的发展已经被“捕食者”和“全球鹰”所证实,无人机的任务载荷不再是单一的侦察监视设备,而是走向“察”与“打”的集成,也就是“感知”载荷和“攻击”载荷的融合。

感知载荷主要包括光电/红外/微波/毫米波传感器、合成孔径雷达、数据传输系统、通信导航系统等,用于执行侦查、搜索、通信中继、信息传输以及毁伤评估等任务。目前这种载荷的主要研究方向是降低重量、体积、功耗、成本以及如何将这些传感器与无人机更好地优化集成等。一方面,可以使用更小更经济的平台来执行单一任务,另一方面便于实现多种载荷混装,提高作战效率。

通信系统

无人机测控与信息传输系统未来发展的核心技术是提高数据传输速率,这主要依赖于红外通信系统和光学通信系统的发展。光学通信系统以激光为基础,所提供的数据传输码速率要比红外通信系统的最大值还要大2~3倍。据美国在1996年对一套激光通信(Lasercom)系统的验证试验,在150km远的距离处,其数据传输速率可以达到1.1T(10¹²)bit/s。预计到2025年,机载激光通信系统以及空间激光通信系统将会推向实际应用。尽管激光通信系统的数据传输速率要远远高于红外通信系统,但由于红外通信能够在各种气象条件下有效工作,红外通信系统将仍然在很长一段时间内存在。

由于通信设施的带宽有限,如何将数据进行高效压缩成为目前的一个现实问题,但是美国国防部对发展宽带通信设施所投入的力度要远远大于在数据压缩研究领域

的投入。

超宽带信息传输同样是无人机集群组网的前提。通讯卫星在未来无人机系统中仍然会充当顶端节点的角色,主要是实施机群与地面中心站之间的沟通和联络。无人机机群将在不同的高度层、以网络结构分布。在接受集结和任务指令后,机群将利用自身的宽带



图3 可变形无人机概念图

(ATMC)几个发展阶段。美军将无人机的自主控制分为10个等级。可程序控制飞行和远距离遥控的“捕食者”可达到1级;能够根据预编程序并具有故障诊断能力,在数据链丢失后仍可根据环境变化具有一定适应能力的“全球鹰”可达到2~3级。达到4级以上的自主飞行必须依赖于智能决策与智能控制。X-45C和X-47B可以根据一定的信息进行任务重规划,并利用数据链信息共享,实现机群联合行动,其自主水平有望达到5级。美军的近期目标是达到机群协同和机群战术任务重规划的6级自主控制。

未来先进多功能无人机必然将在复杂作战环境下实现多任务和多目标自动攻击,因此,无人机必然从单机自主飞行(Solo-Autonomy)逐渐进入多机自主飞行(Flock-Autonomy)时代。单机自主飞行可以重新定义其目标,UAV将具有自行产生新目标的能力;多机自主飞行的UAV可在机群内以及机群间进行协调,并根据战场每个单机的状态和战场环境重新定义机群目标和每架无人机的任务。多机执行任务时,如果单机发生损失,多机飞行控制系统将在剩下的UAV中智能地重新进行任务分配。

智能自主飞行能力达到10级时,将可能实现有人机与无人机的混合编队飞行,有人机和地面指挥系统可以直接通过指令或语音命令指挥具有甚至超过有人驾驶飞机飞行和作战能力的无人机去完成任务。

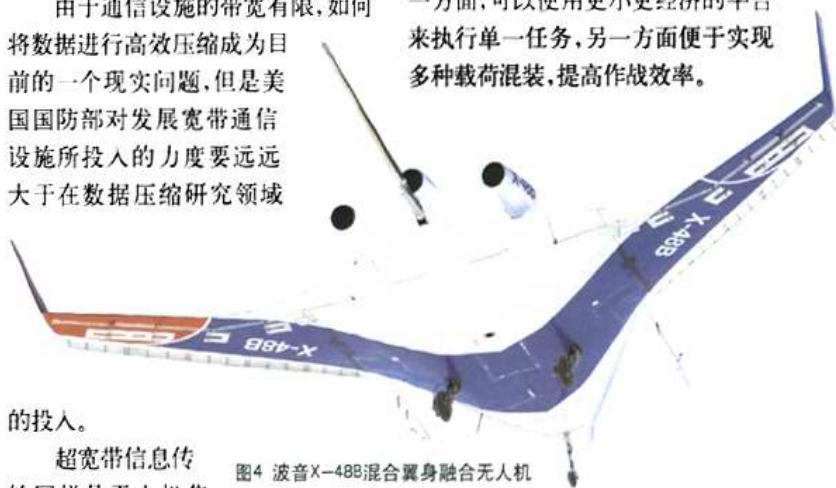


图4 波音X-48B混合翼身融合无人机



图5 “弹簧小折刀”斜翼式无人机

攻击载荷是遂行打击任务的核心能力,出于隐身和载荷能力的限制,提高武器的制导精度和战斗部的威力是无人机武器系统发展的关键。在上世纪90年代以前,美军利用的“火蜂”系列无人机已经挂载各种弹药,并初步实现了察-打一体化,并进行了实战,但攻击精度有限。目前,美国又发展了包括波音公司的GBU-39B小直径炸弹、BAE系统公司的激光制导“海怪蛇”70火箭弹、“海尔法”导弹、JCM联合通用导弹以及低成本自主攻击系统等在内的多种高精度武器(如图8所示),并进行了“捕食者”无人机发射“海尔法”导弹,“火力侦察兵”无人旋翼机发射火箭弹以及X-45投射导弹等多种试验。

在以网络为中心的电子战中,采用定向能武器也是未来无人作战飞机的一个重要作战方式,但目前的定向能武器体积、重量、功耗都超出无人机负载能力。因此,美国正在积极发展适合无人机搭载的定向能武器。

此外,美国已经开始研究专门针对无人作战飞机的小体积、高精度的弹药系统,例如美国海军开展的“飞碟武器”研究计划,空军的“小灵巧炸弹”等,将采用内嵌式传感器实现360°的认知和攻击,形成具有无人侦察-打一体化特色的精确打击模式。

安全性和生存性

无人机曾经被认为是一种低成本的武器,但随着其功能的不断



图7 PW530(上)和PW545(下)发动机

增加,特别是长时间的飞行和“敢于”深入敌后超危险环境的要求,以及对飞行安全性和生存能力的更高要求,必然使其成本居高不下。历史上,无人机的灾难性事故率要比有人驾驶的军用飞机高出一到两个数量级,因此,不能因为低成本的要求而忽略无人机的安全性与生存性。

无人机的生存能力是在给定威胁环境条件下,飞行器在战术、技术和费用之间的平衡折衷。无人机的生存性往往随着任务的不同而改变,美国海军和空军在设计无人作战飞机时,已经考虑了生存性的问题,把生存性和性能作了最佳折衷,这样保证了在预算费用范围内将无人作战飞机的生存性提高到最高水平。

另外,为了达到低可观测性,提高生存能力,降低噪声也不可忽视。1960年以来,无人机的噪声水平每隔10年就降低

15%。

飞行控制系统、推进系统和操作的失效和失误是造成无人机事故的主要因素,约占所有事故的75%,所以提高无人机的可靠性和生存性主要从这三个方面入手。在未来无人机的设计中,要权衡控制、推进和训练与可靠性和生存性之间的关系,争取在费用和性能的折衷上达到最优。

无人机的保障与维修

无人机系统的综合保障包括飞机和地面装备的使用保障与维修保障。相对于有人机而言,无人机系统的使用与保障费用将明显较低。因为有人驾驶作战飞机使用寿命的90%消耗在平时的训练飞行中,而大多数无人机常常几个月、甚至几年都保存在机库中,有的甚至能贮存10年以上。无人机系统操作员的初始训练、任务训练和后续训练都可以在模拟器中进行。因而外场使用和维修时间所占比重明显减小,从而大量节省人力、物力与材料消耗,降低了使用和保障费用。无人作战飞机的使用和保障费用有望比目前的战术飞机降低50%~80%。

综合保障通过采用综合检测、故障预测与状态监控,以及预先维修等先进技术实现自主式后勤保障,大大推动飞机的自动化诊断、维修和保障管理,减少了诊断维修时间和维护费用,显著地提高飞机的快速出动能力。美国先进战术无人机除了具有优越的性能之外,还配备有一整套实现故障诊断、维修和保障的系统,并装载了通用的诊断维修和保障信息库,为快速准确维修飞机和地面装备提供必要的帮助和支持。

无人机的系统训练

无人机系统的使用操纵并非单纯的飞行操纵,其操纵训练更不是



图6 波音X-45A验证机

熟练掌握全系统各岗位的技能 and 相互匹配,甚至是与有人机混合作战的匹配。

事实上,无人机的所有岗位的操作工作均在地面进行,因此在不需平台升空的前提下,利用真实系统,结合数字飞机,借助虚拟现实(VR)技术在视觉、听觉、触觉等方面为受训者生成一个极为逼真的战场虚拟环境,使受训者最大限度地接受近似实战的训练是极其重要的。

美军的虚拟训练已经进入实用化阶段,并广泛运用于军事理论创新、作战指挥训练、作战方案生成与优选等各个层次,形成并装备了无人机多任务仿真训练系统,集成了有人机与无人机的混合训练能力。

另一种高级训练系统是基于VR遥操作技术构建新型无人机地面控制站。2005年,美国国防部给爱荷华州立大学虚拟显示应用中心投资280万美金,用于研究基于VR遥操作技术的无人机地面控制站,该系统基于虚拟现实和遥操作技术,系统地研究构建无人机地面控制站所要解决的各种关键技术,包括灵活方便的人机界面、延迟算法补偿、综合仿真环境、任务载荷仿真、操纵训练、无人机群协同作战等,并基于RAVE构建了一个大屏幕展示沉浸式的虚拟现实演示环境。其远景目标是希望基于VR技术简化不同任务中的无人机群的指挥和控制。

无人机的空域管理

随着无人机在军事和民用范围的大量使用,解决其空中管制问题提到了各国的议事日程。除了在相应空域内安装必要的显示和识别装置,无人机的防撞、异地起降和迫降更是空域和飞行安全的难题和关键。

美国联邦航空局(FAA)指导性规定表明,无人机必须具有“相当于或优于”有人驾驶飞行器安全水平的相关监视、发现和规避能力(DSA)才

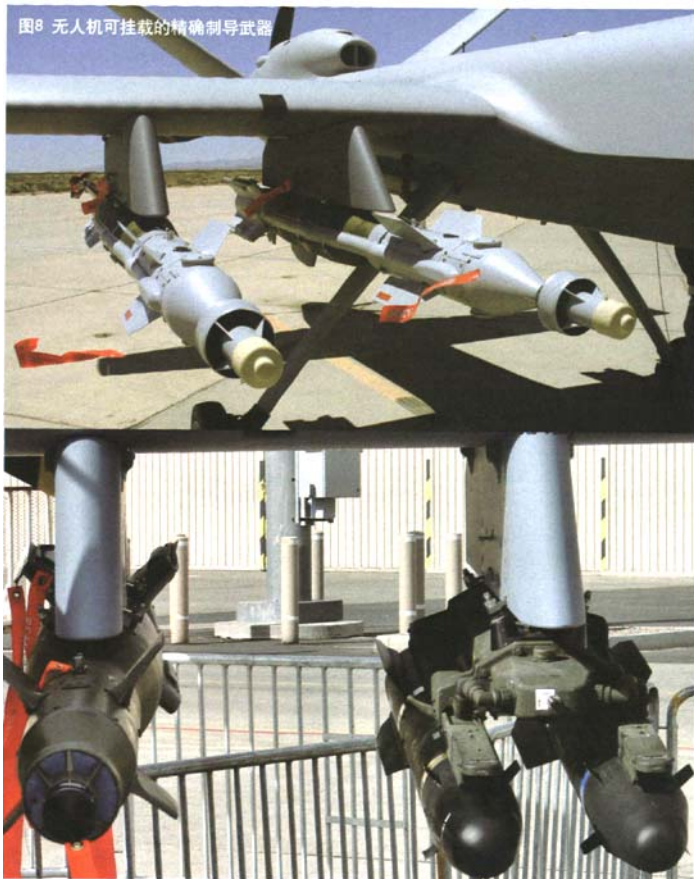


图8 无人机可挂载的精确制导武器

能在国家空域系统中使用。但到目前为止,还没有制定出能够满足无人机发展的合理的解决方法。

过去两年,NASA在环境研究飞机与传感器技术计划(ERAST)中提供了部分投资,由现代技术方法公司(MTSI)、超光谱科学公司和传感器概念公司联合在中国湖(China Lake)开发独立的DSA系统。该系统装备到无人机上,可以目前的空中交通管制系统实现对无人机的发现、监视,以便指挥有人机规避。在此基础上,利用现有技术,无人机不难实现直接转发来自空中交通管制语音信息,操纵员能像有人机飞行员一样可以实现与空中交通管制员的直接对话,但无人机

还必须使用其他技术来实现空域内的探测和主动规避。

参考文献

- [1] Fahlstrom Paul G, Gleason Thomas J. 无人机系统导论,吴汉平,译. 电子工业出版社,2003.
- [2] 网络中心战对无人机系统的技术挑战. 中国船舶信息中心. 国防网, [2006.06.26]. <http://www.dsti.net/Video/59.html>.
- [3] 李广义. 发展无人作战飞机要考虑的技术与战略问题. 人民网, [2004.12.03]. <http://www.people.com.cn/GB/junshi/1079/3030305.html>.
- [4] 王洪锋,译. 无人机在国家空域系统(NAS)应用的探测发现与规避(DSA)技术. AUVSI年会文集,2003.

(责编 制卫)