

无人机动力进排气系统隐身设计分析

Analysis of Stealth Design for UAV Inlet and Exhaust Systems

■ 郑伟连/中国航发动力所

发动机的隐身能力是实现无人机整体隐身效果的关键，主要体现在进排气系统的隐身设计，对此进行分析和归纳，可为无人机动力的隐身设计提供参考。

作战装备的无人化是航空武器装备发展的重要方向，无人机(UAV)呈现出多样化、系列化发展趋势，主要包括无人侦察机(URAV)、无人作战飞机(UCAV)和长航时无人机(HALE UAV)^[1]。无人机在战场中发挥的作用也由过去的空中侦察、信息中继、战场监视等，转变为敌方火力压制、对地攻击、对空作战等。无人机成为未来战争的核心武器装备的关键是需要保证高的生存率，而提高无人机的隐身性能是提高无人机战场生存率的关键。无人机动力的隐身能力对无人机整机的隐身能力具有举足轻重的意义，主要体现在发动机的进气和排气系统。

进气系统隐身技术

无人机动力进气系统由于处于低温

条件下，隐身设计主要考虑雷达隐身。雷达隐身的本质就是使敌方雷达无法准确地探测到目标回波信号，而雷达截面积(RCS)是表征目标返回到雷达的回波信号幅度。所以，要实现雷达隐身，核心就是降低目标RCS，主要是通过改变外形、材料结构和电磁特征来实现。

无人机进气系统的雷达隐身设计在无人机隐身设计中占有非常重要的比重。有资料显示，在飞机正前方 $\pm 30^\circ$ 范围内对雷达波的强散射源中，发动机进气道与风扇占据了雷达波散射的40%^[2]。目前，无人机动力进气系统雷达隐身主要包括以下3种措施。

藏起来

“藏起来”是指将发动机进气道通过设计布局避免和雷达波的正

接触，主要采用埋入式进气道、背负式进气道、后倾半下凹式进气道等形式。

在各种进气道形式中，埋入式进气道(又称融合式进气道)的雷达隐身效果最好。埋入式进气道是将发动机进气口以下凹的方式，埋入机体常规气动外形之中，在飞机机体上无凸起的进气口，发动机的进气气流沿着机体的型面流经一个倾斜的长斜板通道引入发动机进口；该斜板初始段狭窄，其扩散的尖缘侧壁一直连到进口展向的末端。这种结构充分利用进口两侧的棱产生具有三维效应的涡结构，为发动机提供必要的流量，由涡卷吸空气进入进气道^[3]。比较有代表性的是美国的AGM-129和AGM-158巡航导弹(见图1)，埋入式进气道位于机体下



图1 AGM-129(左)和AGM-158(右)巡航导弹



图2 “全球鹰”无人机

表面。该结构存在进气效率和总压比恢复不足的缺点，不适用于需要做剧烈机动的有人驾驶战斗机，但适用于对机动性要求不高的无人机和导弹。

考虑到不需要设置飞行员驾驶舱的特点，无人机相对于有人机在结构布局方面更加灵活。空中侦察和空中打击用的无人机大多采用背负式进气方式，将发动机进气道背在飞机上方，并通过机头外廓进行前向遮挡，这种进气方式也具有较好的前向隐身效果。美国的“全球鹰”等高空长航时无人机就采用了背负式进气口，利用卫星通信天线罩对进气口进行前向遮挡，一方面提高了无人机的前向雷达隐身能力，另一方面还有助于提高发动机的进气效率，如图2所示。

美国的X-45A无人机、X-47B无人机、欧洲的“神经元”无人机均采用了后倾半下凹式进气口技术，如图3所示。机身前部正上方有一个

近似三角形的进气口，这样设计的好处是使得发动机舱的高度获得了降低，减小无人机前向发动机进口RCS，从而提升雷达隐身能力。

弹出去

“弹出去”是指将无人机前向来的雷达电磁波反射到雷达无法接收的方向上。主要采用的措施有外形



图3 X-45A和X-47B无人机

技术和进气道格栅技术。

外形技术是通过对外露在外面的结构件进行几何形状的优化设计，减小或消除镜面反射和角反射效应，进而减少雷达反射波的反射角度范围，获得较好的雷达隐身效果。飞机进气道唇口也是强散射源，通过进口边缘斜掠的措施可以降低RCS。通过将上、下唇口做成锯齿形，减少唇口反射雷达波的强度，可起到减少雷达探测主方向的RCS的作用。在发动机方面，通常的做法是修改发动机进口整流罩的形状，采用尖锥形的进口整流罩代替传统的圆弧形进口整流罩，可降低RCS，提高发动机前向雷达隐身性能。

飞行器的发动机进气道通常为大口空腔结构，当进入到空腔的电磁波被腔体内壁和发动机进口支板或叶片反射后，在雷达波的入射方向形成一定的RCS。进气道格栅技术是进气道隐身的典型措施之一。早在20世纪60年代初，美国就在部分Q-2无人机上使用了金属丝网罩住发动机进气道。典型的成功案例为RQ-170飞翼布局无人机，其设计原理为：一方面，通过进气道格栅将电磁波进行散射，散射后的电磁波基本不会回到雷达接收的方向；另一方面，进气道格栅和进气道腔体使得进入的电磁波经过多次反射后的能量大大衰减，进而减小了回波强度，提高了进气道前向雷达隐身特性^[4]。

吸收掉

“吸收掉”是指通过多次反射衰减雷达波，或者是通过雷达吸波材料吸收衰减雷达波，进而减少雷达波反射。主要技术手段包括：S弯进气道+吸波导流体和涂覆雷达吸波涂层。

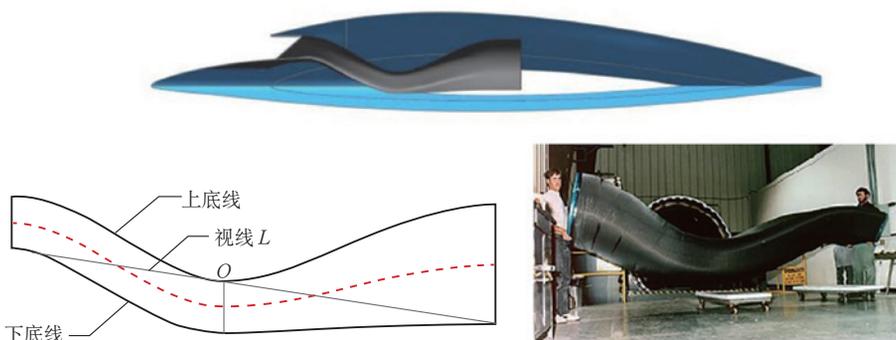


图4 S弯进气道

S弯进气道（见图4）能够避免雷达波直接照射在发动机进口支板、叶片等零组件上，通过S形进气弯道对电磁波的多次反射，最终降低雷达反射回波。进气吸波导流体是在进气道内布置吸波导流片（环）并通过优化设计，改善进气道隐身性能。当雷达波长大于管道宽度的2倍时，雷达波不能进入管道，在进气口被散射；当波长为管道宽度的1~2倍时，管道变成波导管，雷达波可沿其S形管道有效传播，但波长不能进入作为隐身装置的导流叶片的间隙，吸波导流体吸收了大部分能量；当波长明显小于管道宽度时，雷达波类似于光波束在S形管道内壁进行多次反射，大部分被吸波材料吸收，少量通过吸波导流体叶片的短波经过管道、发动机叶片的多次反射而消耗能量，同时还要受到导流体吸波材料的吸收使能量大幅衰减，所以反射回波具有很小的能量^[9]。“捕食者”C无人机、“战斧”巡航导弹和“全球鹰”无人侦察机等都采用S弯进气道，大大降低了发动机雷达信号特征。

雷达隐身吸波材料是一种重要的隐身材料，它能吸收雷达波，使反射波减弱甚至不反射雷达波。具体原理是通过材料的介质损耗将电

磁波能量转化为热能或其他形式的能量。相比于通过外形来提高雷达隐身能力，雷达隐身吸波材料具有更广泛的应用范围，因为发动机许多结构件为了保证气动性能无法采用外形隐身。在发动机进气道唇口、吸波导流叶片、发动机进气锥、进气机匣支板、可调叶片、风扇转子叶片等位置涂敷雷达吸波涂层，有效提高发动机进口雷达隐身能力。

排气系统隐身技术

无人机动力排气系统温度较高，因此发动机排气系统的隐身主要为红外隐身，同时还要兼顾雷达隐身。实现红外隐身的关键是要减小发动机排气系统的红外(热)信号特征。由斯忒潘-玻耳兹曼定律可知，红外辐射能量与其温度的4次方和表面发射率成正比，因此降低发动机排气系统表面温度和红外辐射率是发动机排气系统红外隐身的关键^[9]。目前实现无人机动力排气系统红外隐身的手段有：降低温度、进行遮挡和采用低发射率技术。

降温

降温主要是降低发动机喷管温度。主要包括喷管腔体的降温和喷流降温。

通过气膜冷却技术或冲击冷却

技术降低发动机喷管腔体的中心锥、涡轮后机匣支板和喷管侧壁等高温部件的表面温度，实现降低排气系统红外辐射的目的。

喷流降温主要通过加强喷管内涵气流与外涵气流或喷管喷流与大气的掺混，来降低发动机排气系统整体温度，最终达到减少红外辐射的目的。

通过对发动机喷管的改进设计，例如采用二维喷管或S弯喷管，可以使发动机的燃气流按选定的方向排出，并且容易与外界空气掺混而增加尾焰的周长，实现对喷管内涵和外涵气流以及喷流和大气掺混的强化，加快燃气的冷却速度。因此采用二维喷管或S弯喷管，并对喷管出口锯齿和波瓣混合器等进行设计，可以降低发动机排气系统的红外辐射强度。

采用二维喷管有利于加大喷管与冷空气的接触面积，促进尾喷流与周围空气快速混合，从而加快尾喷流的散热速度及与燃气射流的混合速度，使尾喷流长度缩短，降低辐射强度。采用波瓣混合喷管或合理的后机体设计形成的通道，加速外涵的冷气与高温燃气的掺混或引射环境空气进入排气流中，降低尾喷流温度。给二维矢量喷管的冷却提供足够的冷气，改变外涵道结构形式和沿途冷却气流的分配，可确保二维矢量喷管的冷却效果；同时，对二维喷管的扩张调节片进行修形，实现和无人机整体布局的统一，降低雷达散射强度，也能提高战斗机整机的雷达隐身能力。

遮挡

排气系统红外遮挡技术是指在发动机排气系统红外隐身设计时，将红外辐射强度较强的部件用红外

辐射强度较弱的部件进行遮挡或代替,实现降低排气系统红外辐射的目的。排气系统的遮挡技术主要用于喷管的遮挡和喷流的遮挡。

发动机在无人机整体布局上常常采用背负式和内缩安装。利用飞机机体、尾翼或其他结构对发动机喷管进行遮挡,改变喷管的红外辐射方向,避免了地面红外探测器从飞机的下方或侧面探测到飞机的红外辐射信号,从而起到红外隐身的作用。“捕食者”C无人机(见图5)采用V形大尾翼布局,两片尾翼前后缘平行且相互垂直,实现了对发动机喷管的遮挡,降低了发动机排气系统的红外辐射信号特征,同时还可以实现对雷达探测信号的偏转反射。

RQ-4A/B“全球鹰”无人机也采用巨大的V形尾翼对喷管进行有效的遮挡,以降低其红外辐射。

在发动机喷管设计方面,对发动机高温部件遮挡设计须采取以下措施:采用S弯喷管、二维喷管或者具有遮挡功能的喷管,实现对内部高温部件的遮挡,降低红外辐射特征,避免红外探测器直接探测到高

温喷管出口。对喷管外罩采用复合材料隔热结构,以屏蔽内部的热辐射,降低外罩温度,以降低红外辐射特征。

低发射率

低发射率技术是指通过降低固体部件表面的红外发射率来降低红外辐射。具体包括在无人机发动机喷管腔体内的末级涡轮叶片、中心锥、支板等高温部件表面涂敷低红外发射率的红外吸波涂层,以提升发动机排气系统红外隐身能力。

发动机排气系统的雷达隐身措施主要包括:S弯喷管对雷达波的衰减;采用喷管锯齿化结构、尾锥尖锥修形、喷管涂覆雷达吸波涂层等形式,降低无人机动力的后向雷达散射特性。

无人机动力排气系统的结构设计往往综合考虑红外隐身和雷达隐身措施。例如“捕食者”C无人机采用S弯二维喷管。该喷管一方面形状上采用隐身喷口设计,有效降低雷达散射,提升雷达隐身能力;另一方面通过二次引气设计实现对排气的有效冷却,降低了发动机排气系统的红外信号特征,减小了地面红

外探测设备对其发现的概率。

结束语

无人机动力的进气、排气系统的隐身设计需要开展飞发一体化设计。

一方面,由于无人机相对于有人机在外形和布局上具有较高的灵活性,背负式进气道、背负式喷管、喷管红外辐射遮挡设计,在无人机动力隐身设计中被广泛采用。

另一方面,在无人机动力隐身设计过程中,还要考虑将红外和雷达隐身技术进行一体化设计,例如在发动机喷管的外表面涂敷兼容雷达和红外隐身的吸波涂层,在喷管的外形设计上兼顾降低红外辐射和雷达隐身设计。

此外,无人机动力的进气、排气系统隐身设计还需要综合权衡发动机的性能和可靠性。例如,遮挡型的发动机进口方式需要考虑进气流量、进气畸变等因素,二维喷管设计需要综合考虑冷却气流量以及喷管质量等因素。

航空动力

(郑伟连,中国航发动力所,工程师,主要从事航空发动机总体结构设计)



图5 “捕食者”C无人机

参考文献

- [1] 尹泽勇,李上福,李概奇.无人机动力装置的现状与发展[J].航空发动机,2007,33(1).
- [2] 李天.战斗机的发展对隐身与气动技术的需求[J].流体力学试验与测量,2002,16(1):3-7.
- [3] 郁新华,赵明禹.无人机进气道设计中的隐身技术[J].飞行力学,2007,25(4):69-72.
- [4] 郭文.军机进气道雷达隐身技术研究[C].第二届中国航空学会青年科技论坛文集,2006.
- [5] 董应超,申彪,张丽静.无人机隐身技术发展研究[J].无人机,2017(4).