

隐身技术推动新一代飞行器发展

Development of New Generation Air Vehicles Driven by Stealth Technology

桑建华 周海 陈颖闻 / 中航工业成都飞机设计研究所

导读:从飞行器的总体、气动、结构、系统、制造和试验等几个方面,讨论雷达隐身技术要求对飞行器设计、制造、成本等带来的挑战。

关键词: 飞行器; 设计; 隐身技术

Keywords: air vehicles; design; stealth technology

0 引言

雷达的发明,其第一个猎物就是飞行器。飞行器工程师们一直在进行着不懈的努力,以避免飞机在飞行时被雷达发现,从而催生了飞行器隐身技术的发展。从U-2、SR-71侦察机到F-117A和B-2轰炸机,再到F-22、F-35等战斗机,隐身技术不断成熟。隐身技术的出现及其在作战中所表现出来的巨大威力,使之成为新一代作战飞机所必备的重要标志之一,并不断推动着飞机设计和制造技术的进步。从雷达隐身、红外隐身到射频隐身,针对探测器的不断发展和新型传感器的出现,隐身的内涵及相关性能要求也在不断得到丰富和提高。

1 雷达隐身要求对飞行器总体气动设计带来的影响

在传统的气动力设计方面,研究的重点是得到一个高升阻比、易于控制且敏捷的气动力布局和外形。雷达隐身外形设计要求的引入,给飞行器气动力设计带来了新的约束,导致许多传统的气动力设计准则做出让步。

在传统的设计中,为了降低阻力,要求尽量减小飞行器的浸润面

积。因此,飞行器的机身截面通常都设计成为接近于圆形,因为圆形浸润面积最小(图1)。但圆形截面是雷达隐身最不希望采用的形状,因为从任何方向看,圆形截面都有很强的雷达散射。理想的雷达隐身外形希望采用倾斜的平面设计,将强散射集中在某个方向上,这个方向对隐身而言不太重要或威胁较小(图2)。

同时,隐身要求采用斜置的双垂尾使气动效率变差、浸润面积进一步加大、并导致额外的重量增加。为了更好的隐身性能,B-2飞机更采用了飞翼布局,取消了常规的垂直尾翼和水平尾翼,导致其飞行性能和机动性大幅度降低(只能亚声速飞行),飞

机的飞行控制系统难度大幅度增加。

此外,为了满足隐身要求,所有的武器必须内置在武器舱内,导致飞机的尺寸进一步加大(常规飞机大多为外挂武器);发动机压气机是飞行器前方最大的散射源,为了有效降低其影响,进气道必须采用大弯度内管道的气动力流道设计,以便形成对发动机压气机的有效遮挡并有效提高雷达吸波材料的效率,导致进气道的重要设计参数总压恢复系数下降,气动效率降低。

雷达隐身涂料的使用导致重量和成本增加、飞机维护性能下降,但其对飞行器飞行性能的影响相比前述的影响还是要小得多。



图1 圆形截面浸润面积小但隐身特性差



图2 倾斜平面设计浸润面积大但隐身特性好

2 雷达隐身要求对飞行器结构设计带来的影响

传统的结构设计的研究重点是在满足总体气动外形要求和结构强度/刚度要求的前提下,得到最小的飞行器结构重量,且要求构造简单、成本低、寿命长。雷达隐身设计要求的引入,给飞行器结构设计带来了新的约束,导致许多传统的结构设计准则做出让步。

首先是大型武器舱开口对结构完整性的破坏。硕大的舱门,其刚度/强度设计、变形控制等要求非常高,使设计变得非常困难。

单从力学和结构设计角度考虑,曲面结构更有利于承受飞行器表面的气动力,而平面结构承载能力较差,易失稳。为保证结构的强度和刚度,一般情况下平面结构要付出更多的重量代价。但好在大多数常规飞机表面也多是曲面的,在过去的结构设计中并未出现太多矛盾。现在为了满足隐身要求,气动外形已基本为平面,导致结构设计必须为之付出必要的重量代价(图3)。

同样的问题表现在座舱透明件的设计和制造上,为保证强度/刚度和隐身外形,导致座舱玻璃厚度和重量成倍增加,从而导致成本增加,同时给救生系统的设计带来新的极大的挑战。

飞机表面的蒙皮分块和对缝阶差控制也给结构设计带来挑战。过去的

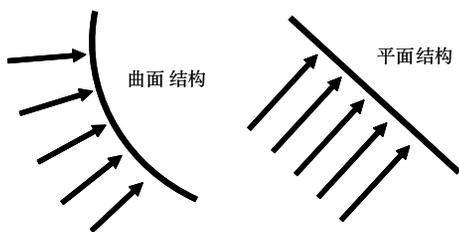


图3 曲面结构有利于承受表面载荷,平面结构承载能力较差,易失稳,重量代价大

飞机结构设计大多采用直对缝蒙皮分块,简单、可靠、重量轻。但数以千计的任何一条缝隙如果处理不善都将导致飞行器重要方位的RCS大幅度增加(图4)。因此,隐身飞机的蒙皮分块必须是锯齿对缝,而且必须是全部朝向一个方向,一般要求与飞机机翼后掠角平行,更大的难度是要求锯齿尽可能大,数量尽可能少,由此导致为保证结构强度/刚度付出更多重量代价。

数以万计的铆钉和紧固件是飞机上不可忽视的散射源。因此,必须提升飞机表面质量,要有新的设计和工艺要求,研制新型铆钉和紧固件。而新型紧固件的使用往往会受到大范围的抵制:新可能就意味着不成熟,易出问题;新的铆钉和紧固件要求新的工具和新的操作程序导致成本上升;大量库存的传统紧固件需要处理等。如图5是一种新型紧固件,可减少铆钉数量,这些快黏带肩螺母用来将可拆卸部件固定在飞机上,拔出中间的塑料棒,里面的黏合剂就能迅速将其固定在金属部件上。这种紧固件带来的另一好处是改善了结构的疲劳特性,容易被结构设计工程师接受。

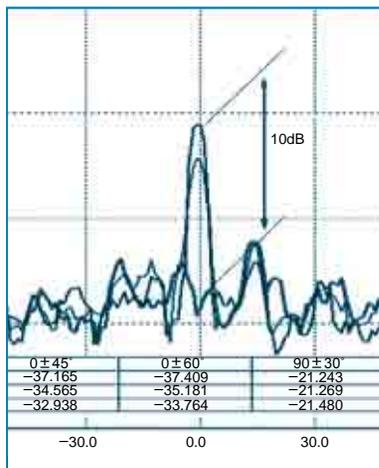


图4 一条缝隙处理不善导致飞行器重要方位的RCS大幅度增加

由于边缘等隐身设计要求,传统的蜂窝夹层复合材料设计方案也必须做出改变,必须按隐身要求进行新的定义和设计,而大部分结构工程师并不擅长于此。

3 雷达隐身要求对飞行器系统设计带来的影响

如果说总体、气动力和结构的隐身设计要求已经给飞机设计带来了巨大的压力,那么,飞机系统的隐身设计要求所带来的挑战则更为严峻。因为前者一般还处于一个或两三个研制单位(经济体)内部,尚有行政管理的强制性约束可以加以利用,可以在单位内部强制推行某些“不合理”的要求;而后者大多数是分散在几十个承制单位(或经济体),相互之间无行政上的制约可以利用,基于成本、进度等压力,导致隐身要求所带来的新的约束很难得到彻底的理解和接受。

大量不同类型的探测器、传感器,包括:所有机载天线、外露的灯具、大气传感器等,都是飞机上的雷达散射源。如果不对这些雷达散射源采取措施,飞行器不可能有一个良好的隐身性能。一般情况下,这些探测器或传感器在隐身飞机上的命运只有两种:一是取消(如F-117A飞机的就未装雷达,因为当时还没有很好的技术措施能使其实现有效隐身),或



图5 为减少铆钉数量研发的新型螺母

被其他传感器综合；二是按隐身设计要求重新研制新一代的探测器（传感器）。

第一种情况对探测器或传感器的研制单位来说是痛苦的。因为这意味着没有“蛋糕”或你的“蛋糕”给别人了。

第二种情况对探测器或传感器的研制单位和总体研制单位来说同样也是痛苦的。因为过去是没有隐身要求的，这就意味着过去成熟的成品将过时，必须重新投入经费和人员，研制出满足隐身要求的探测器或传感器。在今天这个竞争激烈的市场经济中，即使付出了也不一定能保证获胜。对总体研制单位而言，则意味着在研制周期、成本、质量控制等方面增加了更多的不定因素，意味着研制风险的大幅度增加。为控制风险，总体研制单位必须制订相应的备份措施和降低风险的工作计划，从而大幅度增加设计和管理的难度和工作量。



图6 F-22飞机发动机的二元可调喷口、耐高温的吸波材料、降低红外辐射的冷却气膜孔



图7 F-22飞机上每一条缝隙均平行于特定角度

对于飞机上最大和最昂贵的系统——动力系统，按隐身设计要求来进行设计，可能遇到的阻力要远远大于前面所述的所有系统的总和。看一下F-22飞机的发动机尾部（图6）就可知其难度：巨大的二元可调喷口、耐高温的吸波材料（高于1000℃）、为降低红外辐射而精密制造的数以万计的冷却气膜的微孔清晰可见。为了实现隐身要求，重量工程师们也不得不对此做出让步。

4 雷达隐身要求对飞行器制造带来的影响

同样，在隐身飞行器的制造和工艺方面，表现为制造成本大幅度提高，新的制造设备、工具、初期大量零件的返工和报废、大量的过去从来没有过的形状怪异试验件等。

隐身飞机对表面质量的要求使传统飞机制造厂的大部分设备和传统工艺流程都需要更新升级，施工人员也



图8 F-35飞机光洁如镜的复合材料平尾

需要重新培训，以满足飞机表面对铆钉、缝隙、台阶、表面光洁度的制造要求（见图7、图8）。

当美国最后一架F-22“猛禽”战斗机下线时，其项目团队办公室的一位资深管理人员非常感慨地说道：“从编号4001的第一架试验机出厂起，这一机型的生产工艺产生了巨大的变化！与刚刚走下生产线的这架最新机型相比，他们制造的第一架飞机就像一架特制的飞机或是唯一的样机！”

5 雷达隐身对飞行器隐身性能测试系统的要求

隐身飞机从设计之初，就必须经常性地对其目标特征进行评估，这些评估在经过必要的理论分析之后还必须以实物测试来加以决断。测试的目标小到一个传感器、一条缝隙，大到一个结构部件乃至整机（图9），这些测试会贯穿隐身飞机的整个研制历程，并持续到飞机交付后的外场保障。

为保障隐身飞机的研制，美国兴建了大小不等的多个专门用于隐身试验的微波暗室和室外RCS测试场，夜

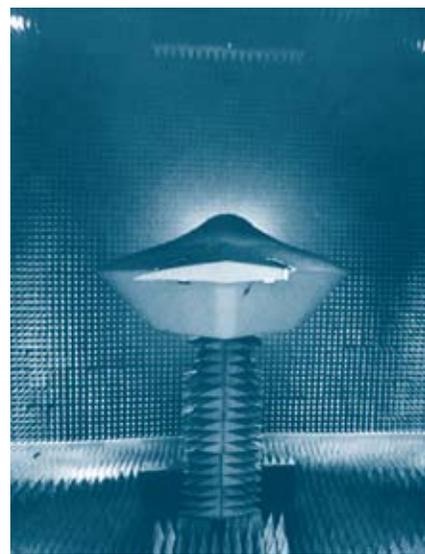


图9 隐身部件试验件进行试验



图10 隐身测试场中的全尺寸F-35飞机

以继日地测试那些经过多次改进但性能仍然改善不大的试验件。这些试验和试验件是非隐身飞机所不需要的。小块的机身部件在安装之前，要先在一间小型实验室里对其隐身性能进行检测，每一架F-22战斗机交付之前都要进入雷达反射截面试验室(RCSVF)进行试验，根据严格的规范对其隐身特性进行评估。

这些花费数以亿计的专用试验场地（或试验设施）的正常运转除了需要大量的经费支撑以外，还需要一支

专业的、并且是稳定的技术队伍。成本的提高还远不止于此，必须生产一架专门用于隐身测试和性能改进的试验飞机，进行整机数千小时的地面性能评估、数百小时计的空中试飞，并配以相应的地面和空中测试系统（图10、图11）。

6 结束语

实际上的影响和困难还不止于此，如为了满足隐身要求，所有的武器都要求内置，为了避免飞机尺寸变得太大，要求尽可能减小武器的尺寸，老一代的武器难以满足新一代的飞机要求，必须发展新一代的武器。

以上讨论的仅为雷达隐身要求导致的对飞行器设计的影响，如果再考虑飞行器的红外隐身和射频隐身问题，设计难度、制造难度、试验难度都将成倍地增长。而再考虑新的设计系统、新的软件系统、新的设计工具等，所涉及的研制经费可想而知是上一代飞机研制所不可比拟的。正如一位美国隐身工程师在讨论隐身技术时说过的话：“隐身技术不是一件可

以轻易给战斗机披上的斗篷”，“隐身设计时，任何一个细节的失误，就像一束光线就会破坏整个城区的灯火管制”，“隐身技术是一整套工业标准——你必须在每一个细节上都下足工夫，从每一个口盖到每一条接缝！”

飞行器工程师都学过电磁场，也都知道麦克斯韦方程，但真正理解麦克斯韦方程的不多，懂得雷达和RCS的就更少，在过去，几乎没有工程师知道如何减缩和控制RCS。因此，在传统的飞行器研制团队中，要将隐身技术要求融入飞机设计非常困难。隐身工程师面对的是成百上千的希望固守自己领地的传统设计师和工艺师。但是，当工程师和决策者们经过艰苦努力找到了解决问题的途径并在飞机上实现了隐身性能要求后，他们将会发现，隐身技术已推动飞行器设计和制造技术向前跨出了一大步！

AST

参考文献

[1] 阮颖铮,等. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

作者简介

桑建华, 博士, 自然科学研究员, 长期从事航空工程技术研究, 中航工业隐身技术首席技术专家。

周海, 高级工程师, 长期从事飞机总体设计、飞行器隐身技术研究和科研管理工作, 参与多个重大型号研制, 获国家级、省部级科技成果多项。

陈颖闻, 工学学士, 工程师, 从事飞行器总体技术研究, 主要研究领域包括雷达隐身设计、红外隐身设计和射频隐身技术。

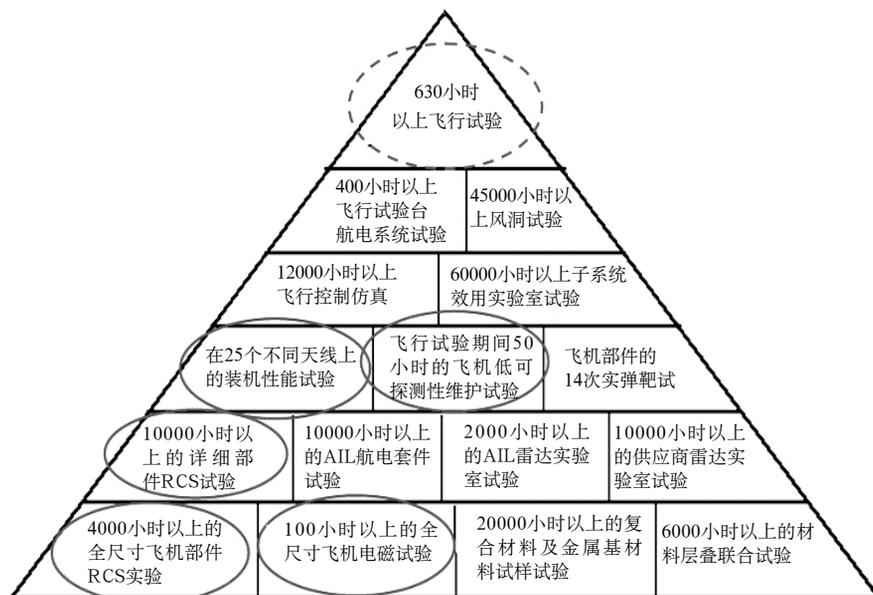


图11 F-22飞机研发过程中进行的重要试验项目