

迷惑雷达的“魔法”

谢亮 赵小青

(北京市北方工业大学理学院 100144)

诞生于第二次世界大战的雷达，有人这样评价了它对这场战争的重要性：“原子弹只不过为战争划下句号，真正赢得战争的却是雷达。”是的，从不列颠之战、中途岛大败日军到追踪日军潜艇，雷达在二战中战功赫赫。到了20世纪70年代初期，雷达探测与雷达制导地面火炮及导弹已对进攻的飞机构成了致命的威胁。尤其是在越南和中东战场上，美制战斗机更是在地对空导弹的攻击中损失惨重。如何使雷达这双“千里眼”变成“近视眼”，从而使飞机躲过雷达的探测？英国著名科幻小说家威尔斯在其小说《隐身人》中描写了一个天才青年科学家格里芬发明了一种“隐身服”，穿上它，可把自己变成一个来去无踪的“隐形人”。如果能给飞机设计一种有魔力的“雷达隐身服”来迷惑雷达，那么，在雷达面前，飞机也将成为匿迹消声的“隐形人”。

“雷达隐身服”该如何设计呢？首先需要了解雷达的探测原理。当雷达发出的电磁波遇到金属目标会发生反射和散射，雷达将接收到的回波中具有足够强度的稳定成分分离出来，以此探测、锁定目标，而过于微弱和闪烁不定的回波将被作为杂波过滤掉。这既是雷达聪明的地方，也是隐身可以钻空子的地方。因此，“雷达隐身服”的功能就是要干扰、破坏雷达回波。虽然不可能完全消除回波，但可以削弱回波的强度，并使回波闪烁不定，使得雷达无法从背景噪音中稳定可靠地分辨出目标，从而降低了雷达对目标的探测可靠性。所以，“雷达隐身服”虽不能使雷达致盲，但可以降低目标自身的可探测信号特征，从而缩短雷达发现目标的距离，使“千里眼”雷达变成“近视眼”。衡量目标被雷达发现概率的特征量被称为雷达散射截面积，它表示的是目标受到雷达波照射后，向雷达接收方向散射电磁波能力的量度。雷达散射截面积的大小直接反映了目标对雷达的隐身效果，雷达散射截面积越小，目标的隐身性能越好。雷达散射截面积与很

多因素有关，但影响最大的就是目标的形状。例如，投影面积完全相同的平板和球体，前者的散射面积比后者要大四个数量级，如图1所示。洛克希德·马丁公司臭鼬工厂的设计人员曾经说过，隐身设计的重点，第一是形状，第二是形状，第三还是形状，隐身效果的九成在于形状。

基于上述原因，飞机“雷达隐身服”的第一招“魔法”就是“改头换面”，即通过改变飞机传

统的外形设计来达到减小飞机的雷达散射截面积的目的。首先消除产生镜面反射的表面设计，避免出现较大平面。其次消除产生角反射器效应的外形组合，即消除飞机上的两面体和三面体之间的相互反射。第三减少空洞反射，机身上的空洞在电磁波射入之后，经过多次反射，容易使电磁波返回雷达。第四减少外挂设备和武器，尽量避免外部突出物，减少散射源数量。当美国人把两架将上述原则应用到极致而设计出来的隐身飞机F-117和B-2展示在世人面前时，人们惊呆了，“这是飞机吗？它能飞起来吗？”是的，飞机的奇异形状与传统飞机大相径庭，如图2和图3所示。从飞机上方看，两架飞机的外形均呈三角形。F-117

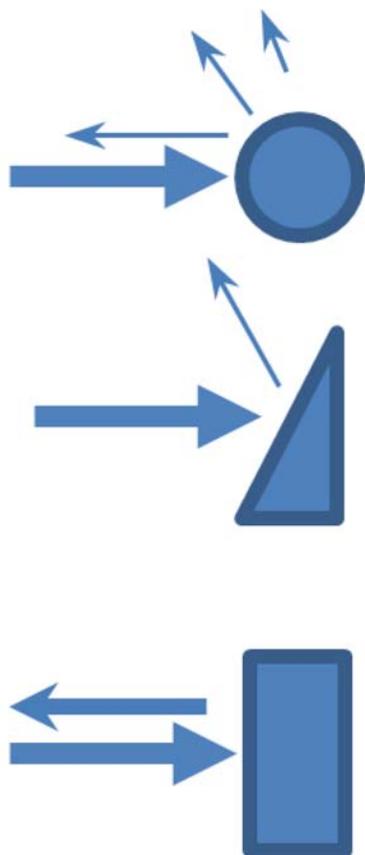


图1 雷达波在垂直面、斜面、球面上的反射

的机身由很多折面组成，这些折面与铅垂线的夹角大于 30° ，很像钻石的表面，前机身与机翼融为一体。所有舱门和口盖都有锯齿状边缘以抑制雷达波反射。双垂尾V型向外侧倾斜，像翘起的燕尾。发动机舱放在机背两侧，进气道设有条状屏蔽格栅，以干扰雷达波的反射。飞机外部没有武器挂件。全机外形如同一只中国古代的三角形燕尾飞镖。B-2的整个机身从头到尾平滑地融合，一个气泡状座舱平滑地埋入机翼中央，两侧各有一个埋入式发动机舱，各装两台发动机，进气道为蛇形并装有导流片，迫使雷达波拐弯抹角地进入气道，造成回波的反射次数增加，降低最后的回波强度。飞机最大的特点是没有垂直尾翼，所有武器都被安置在机舱内，整架飞机如同一只巨大的黑蝙蝠。



图2 F-117“夜鹰”隐身战斗轰炸机



图3 B-2“黑蝙蝠”隐身轰炸机

但是，“改头换面”是不能任意的。飞机最终必须要满足战术要求所规定的武器性能，即飞机是用来作战的，再怎么变，也不能丧失战斗能力。

飞机“雷达隐身服”的第二招“魔法”是“乔装打扮”。在飞机表面涂敷吸波材料，或对飞机的某些部件使用结构型吸波材料，从而实现进一步减小雷达散射截面积的目的。结构型吸波材料通常是用复合材料作为承载的结构，使其既具有优良的力学性能又兼备卓越的吸波性能，可应用于机身、机翼、导弹壳体等。吸波材料分吸收型和干涉型，吸收型材料通过电损耗和磁损耗，将入射电磁波能量转化为其他形式的能量，再通过该运动的耗散作用而转化为热能。例如，B-2的整个机身，除主梁和发动机机舱外，其他部分均由碳纤维和石墨等复合材料构成，并且这些部件是经高压压铸而成的。飞机内部填充了能吸收雷达波的不规则多孔蜂窝状物质，使雷达波在蜂窝结构内不断反射，直到被吸收。发动机机舱周围的材料，是能吸收雷达波的碳粒压缩复合材料。飞机表面是吸波材料的涂层。F-117机身表面涂有黑色铁氧体涂料，这种干涉型吸波材料对特定波长 $\lambda = \frac{4nd}{k}$ （其中 n ：材料折射率， d ：涂层厚度， $k = 1, 2, \dots$ ）范围内的电磁波吸收效果很好，但不能覆盖全波段。

由上述“魔法”形成的飞机“雷达隐身服”确实能够使雷达散射截面积大幅度减小，如图4所示。但是由于飞机形状的复杂，不可能在所有方向都实现最小的雷达散射截面积，飞机的雷达截面积与雷达观测角有关，如图5所示。不过由于飞机受雷达威胁最大的区域一般是迎头方向左右 45° 扇形区，所以飞机在这一角域内雷达散射截面积的减缩应是考虑的重点。

雷达散射截面积减小 $\frac{1}{10}$ 或 $\frac{1}{100}$ ，雷达探测距离缩短45%或70%，这就为攻击者提供了宝贵的进攻时间，迫使防御者以2倍或3倍的监视雷达的数量来守卫漫长的边界。

除此之外，还可以采取以攻为守的方法，主动向雷达波的入射方向发射同频率、同振幅相位相反的电磁波，与雷达回波发生相消干涉，实现隐身。但主动隐身难度较大，容易弄巧成拙。

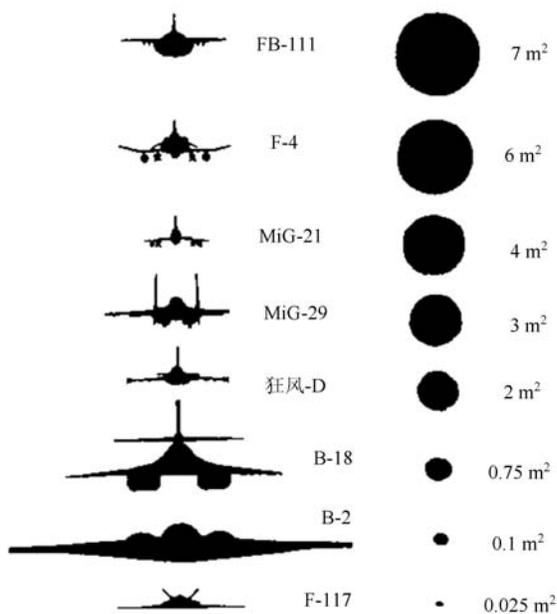


图4 各类飞机雷达散射截面积的比较

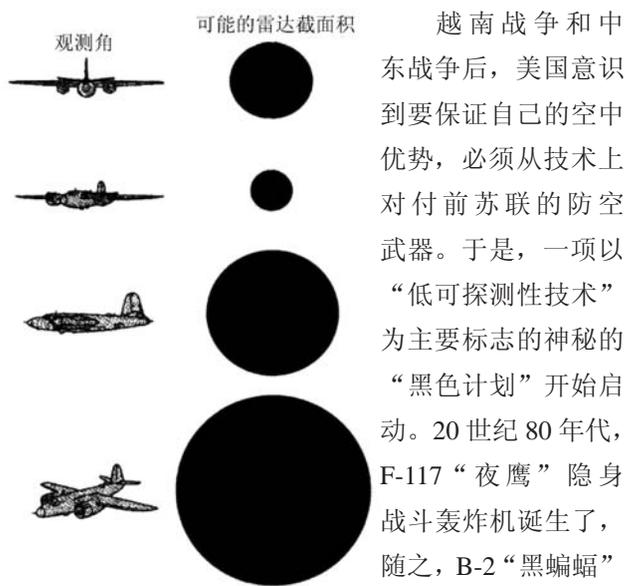


图5 飞机的雷达截面积与雷达观测角有关

越南战争和中东战争后，美国意识到要保证自己的空中优势，必须从技术上对付前苏联的防空武器。于是，一项以“低可探测性技术”为主要标志的神秘的“黑色计划”开始启动。20世纪80年代，F-117“夜鹰”隐身战斗轰炸机诞生了，随之，B-2“黑蝙蝠”隐身轰炸机、F-22“猛禽”隐身战斗机和F-35“闪电”隐身战斗机相继问世。F-117和B-2相继参加了海湾战争和科索沃战争，并取得了骄人的战绩。但同时它们的缺陷也暴露无遗，由于过度强调隐身，奇异的飞机外形和厚重的吸波涂层使得它们牺牲了其机动性。并且，哪怕是飞行中飞禽的粪便弄脏了一小块飞机表面也会使飞机的雷达截面积成倍增加。尤其是B-2必须停在特殊机库中，以保证其吸波涂层的完好，且飞行后的维护时间长达80小时。美军在

认真总结经验后得出一个重要结论：隐身飞机单靠降低雷达散射截面将不能生存，而要依靠隐身及战术配合才能生存。所以，随后问世的F-22和F-35在关注隐身的同时，更加注意了其机动性和战斗能力，如图6和图7所示。飞机的外形不再怪异，F-22的雷达散射截面积与玻璃弹球相当，而F-35的雷达散射截面积则与高尔夫球相当约为0.5m²，虽牺牲了一些隐身性能，但由此机动性得到了极大的提高，它们都具有了超音速巡航的能力，而F-117和B-2不具有这种能力。在F-35的设计中应用了“首日隐身”的概念，即在第一轮打击后，隐身不再重要。所以F-35采用了机内和外挂两种武器挂载方式。隐身飞机在战争中的突出表现，使得许多国家加入到了研制隐身飞机的竞争之中，其中最有力的对手就是俄罗斯。目前，苏霍伊T-50是美国之外第一个公之于众的隐身战斗机，如图8所示。火力凶猛，远程攻击是俄罗斯战机的强项。俄罗斯专家认为为了隐身而牺牲飞机的机动性和作战性能不值得，所以T-50的隐身性能与F-35相当，略不及F-22，但具有第四代战斗机的超音速巡航、超视



图6 F-22“猛禽”隐身战斗机



图7 F-35“闪电”隐身战斗机



图8 苏霍伊 T-50 隐身战斗机

距攻击和超信息化能力。

雷达隐身技术在隐身飞机上的成功应用给了武器专家很大的启示。目前，军舰、坦克、导弹都已开始采用相似的方法来实现对雷达的隐身，均获得了很好的效果。据说法国“拉斐特”级隐身护卫舰曾经发生过舰上的直升机执行任务后返回时，雷达居然无法找到舰艇，最后不得已采用了增大自身雷达散射截面积的方法，才引导直升机返回甲板的事件。

“雷达隐身服”的“魔法”迷惑了雷达，但是再诡异的魔法也会有破绽。破绽之一，良好的隐身性能只在一定的波长范围内有效。第一，雷达散射截面积随着雷达波波长的变化而改变，雷达散射截面积在厘米波段下为 $0.2 \sim 0.5 \text{ m}^2$ ，在分米波段变为 $0.3 \sim 0.7 \text{ m}^2$ ，在米波段为 $0.5 \sim 1.0 \text{ m}^2$ ；第二，飞机表面吸波涂层的厚度只对一些特定的波长有效，如果想要实现全波段吸波的效果，吸波涂层就要加厚，飞机的重量必然要增加，这显然是不允许的。破绽之二，隐身飞机特殊的外形可以改变雷达波的反射方向，以对付单基地雷达。但是被反射到其他方向的电磁波仍然存在。

“魔法”的破绽找到了，便有了破解“魔法”的方法。方法一，米波雷达或毫米波雷达。由于隐身飞机主要针对的是地空导弹雷达的厘米波，所以只要将米波或毫米波作为探测雷达的工作波长，飞机的雷达散射截面积将增大，隐身效果变差。目前，美国的 AN/FP3—118 超视距雷达，工作波长 $10 \sim 60 \text{ m}$ ，其作用距离 3700 km ，可以探测隐身轰炸机和隐身巡航

导弹。俄罗斯在毫米波雷达的研制方面处于领先地位，已拥有频率为 33.3 GHz 的毫米波雷达。方法二，双(多)基地雷达。由于隐身飞机特殊的外形只是改变了雷达波的回波方向，使其不再回到与发射机同处一地的接收机。因此可以将发射机和接收机分别安放在相距很远的两个或多个站址上，接收机可以是一部或多部，设在不同地址的接收机，会接收来自飞机不同部位的反射波，如图9所示，由此，飞机的雷达散射截面积

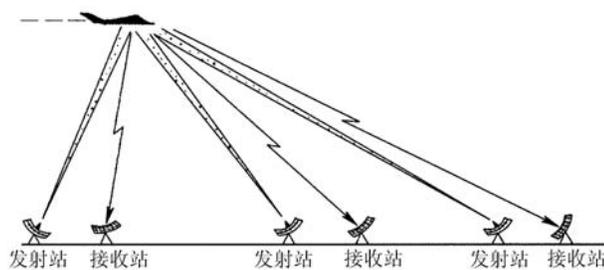


图9 多基地雷达侦测隐身飞机示意图

变大，隐身效果被破坏。

在科索沃战争中，美军几乎在每轮空袭中都出动了 F-117 隐身战斗轰炸机，就在 1999 年 3 月 27 日的第四轮空袭中，一架 F-117 隐身战斗轰炸机在巴尔干上空被击落，“夜鹰”折翼科索沃，坠毁在贝尔格莱德西北约 40 km 的地区，一举打碎了美军 F-117 “不可探测”的神话。而神话的破灭恰是由于上述破解“魔法”的方法的正确使用。首先，南军的防空系统配备的是前苏联的低频(米波)雷达，因此发现着重于厘米波隐身的 F-117 隐身飞机是有可能的。其次，美国隐身技术专家认为，南联盟可能装备了先进的光学探测设备、红外探测器等无源探测系统，或采用了双/多基地探测模式。第三，有分析认为，F-117 隐身飞机为了其隐身性能，没有装备电子干扰设备。南联盟可能采用了前苏联的射频干扰机，干扰了 F-117 隐身飞机的电子飞行控制系统，从而使飞机失去控制并被击落。由此可见，隐身飞机虽然被视为当今世界高科技的结晶，但其性能并非人们所想象的那样完美无缺，不少系统仍然存在着致命的缺陷。

随着科学技术的发展，隐身“魔法”会更加诡异，而“魔法”的破解也将更精彩。