

隐身原理

YINSHEN YUANLI

姬金祖 黄沛霖 编著
马云鹏 张生俊

YINSHEN YUANLI



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

隐身原理

姬金祖 黄沛霖 马云鹏 张生俊 编著



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书共分7章,分别介绍了隐身技术的基本概念以及隐身技术的发展历程、雷达的基本概念和工作原理、电磁学基础、雷达散射截面、隐身计算方法、隐身测试方法、飞行器隐身设计的一般原则和一些隐身飞机的设计案例。

本书可作为高等学校飞行器设计专业本科生、研究生隐身课程的教学用书,亦可供相关专业的师生及科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

隐身原理 / 姬金祖等编著. -- 北京:北京航空航天大学出版社,2018.3
ISBN 978-7-5124-2665-8

I. ①隐… II. ①姬… III. ①航空器—隐身技术
IV. ①V218

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第036371号

版权所有,侵权必究。

隐 身 原 理

姬金祖 黄沛霖 马云鹏 张生俊 编著
责任编辑 刘晓明

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:11.25 字数:288千字

2018年4月第1版 2018年4月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 978-7-5124-2665-8 定价:38.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

本书是一本隐身技术入门教材，大部分内容由作者多年来的讲义整理而成，主要面向飞行器设计专业的本科生和研究生。本书主要内容包括隐身技术的基本概念、隐身技术的发展历程、隐身技术的主要范畴、电磁学基础、雷达散射截面、隐身计算基本方法、隐身测试基本原理、飞行器外形隐身技术中的主要方法等，能够满足课堂教学、课后复习、学生自学的需求。本教材的出版，能够弥补目前教学环节的不足，提升教学效率，使学生对隐身技术的理解更加深刻和系统。

本书的特色是从电磁散射和飞行器设计的角度来探讨隐身技术。飞行器专业的学生大都具有非常深厚的力学基础，但电磁学领域的基础相对薄弱，在学习大学物理课程之后，基本上很少学习电磁学相关的课程；但隐身技术的物理基础是电磁学，尤其是电磁场的传播与电磁散射，没有电磁学基础而去学习隐身技术，就如同没有力学基础而去学习飞机设计一样，终究难以理解透彻。因此，本书对于与电磁散射密切相关的电磁学原理进行了深入的介绍，部分公式推导尽量详细，以便学生能够尽快掌握。

对于选修隐身技术相关课程的学生，建议熟练掌握书中电磁学、电磁散射的相关概念，尽可能熟练推导书中的公式，深刻领会电磁学原理。对于在飞机设计研究所研究隐身技术的科研人员，可能更关心的是飞机隐身设计的基本原则和方法，因此电磁学理论部分可以适当略过，而重点阅读飞行器隐身设计原理部分的内容。

北京航空航天大学的姬金祖主笔编写了本书的大部分内容，北京航空航天大学的黄沛霖主要编写了第1章绪论中隐身技术的特点及发展历程的内容，北京航空航天大学的马云鹏主要编写了第2章雷达探测中雷达基本概念和组成的内容，北京航天长征飞行器研究所的张生俊主要编写了第4章雷达散射截面的频率特性的内容。

感谢北京系统工程研究所的薛晖副研究员，参与编写了第7章隐身设计方法的部分内容，对其中外形隐身设计原理的编排方式提出了重要建议。

感谢课题组的研究生刘济、杜飞和姜家新，协助完成了本书初稿的大部分校对工作。

本书内容全部由作者使用 L^AT_EX 系统排版而成，极大地提高了书稿维护效率，美化了排版页面。插图和曲线也尽量用 TikZ 宏包制作，以提高质量。在此，感谢无偿开发及扩展 L^AT_EX 排版系统的 Donald、Lamport、Tantau 博士以及将 L^AT_EX 系统汉化的吴凌云、刘海洋等热心的研究人员。

在本书编写过程中，北京航空航天大学出版社的陈守平编辑提供了持续的帮助，在书稿排版、书稿内容等方面给予了很多非常有价值的建议和指导，在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，若读者有改进的建议和意见，请及时回馈给作者，以期再版时提高教材质量。

作者电子邮箱：jjjinzu@buaa.edu.cn。

作者
2018年1月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 隐身技术基本概念	1
1.1.1 隐身技术的定义	1
1.1.2 自然界的隐身形式	2
1.1.3 隐身技术的范畴	3
1.1.4 隐身技术的意义	4
1.1.5 隐身技术的局限性	4
1.2 各类探测器的特点	5
1.2.1 雷 达	5
1.2.2 红外传感器	5
1.2.3 可见光传感器	6
1.2.4 声 呐	6
1.2.5 磁异常探测器	7
1.3 国外雷达隐身技术的发展	7
1.3.1 20世纪40年代	7
1.3.2 20世纪50—60年代	7
1.3.3 20世纪70年代	9
1.3.4 20世纪80年代	11
1.3.5 20世纪90年代以后	14
1.4 可见光、红外、声隐身	16
1.4.1 可见光隐身	16
1.4.2 红外隐身	16
1.4.3 声隐身	17
1.5 我国隐身技术的发展	17
课后习题	18
第2章 雷达探测	19
2.1 雷达基本概念	19
2.1.1 雷达主要功能	19
2.1.2 雷达发展历程	20
2.1.3 雷达主要分类	21
2.2 雷达的基本组成	22
2.3 雷达定位	24
2.3.1 雷达测距	24
2.3.2 雷达测速	25

2.3.3	脉冲压缩技术	25
2.4	雷达波段	25
2.4.1	雷达波频率范围	25
2.4.2	雷达波段字母代码	26
2.5	雷达方程	28
2.5.1	基本方程	28
2.5.2	接收机噪声	30
2.5.3	虚警和漏警	32
2.5.4	干扰机的影响	32
	课后习题	33
第3章	电磁学基础	35
3.1	电磁学的发展历程	35
3.1.1	电和磁的关系	35
3.1.2	部分物理学家对电磁学发展的贡献	35
3.2	场论	38
3.2.1	场的基本概念	38
3.2.2	矢量微分算子	39
3.2.3	其他坐标系下矢量微分算子的表达形式	45
3.2.4	时谐场	47
3.3	麦克斯韦方程组	49
3.3.1	麦克斯韦方程组的形式	49
3.3.2	本构关系	52
3.3.3	无源区域电磁场波动方程	55
3.3.4	平面电磁波的传播特性	59
3.3.5	电磁波的极化	61
3.4	电磁辐射	62
3.4.1	格林函数	63
3.4.2	位函数	65
3.5	媒质中电磁波的传播	68
3.5.1	导体中电磁波的传播	68
3.5.2	一般媒质中电磁波的传播	70
3.6	电磁波的反射和透射	70
3.6.1	电磁场边界条件	70
3.6.2	相位匹配条件	72
3.6.3	反射系数和透射系数	73
3.6.4	垂直入射时的匹配条件	75
	课后习题	75

第4章 雷达散射截面	76
4.1 雷达散射截面的定义	76
4.1.1 散射的概念	76
4.1.2 雷达散射截面表达式的推导	76
4.1.3 雷达散射截面的单位	78
4.1.4 雷达散射截面的极化	78
4.2 雷达散射截面的频率特性	79
4.2.1 理想导体球的雷达散射截面解析解	79
4.2.2 导体球的雷达散射截面随频率的变化	84
4.2.3 光学区典型构型散射特性	86
4.3 多个散射体雷达散射截面叠加	87
4.3.1 按严格相位叠加	87
4.3.2 按随机相位叠加	90
4.4 几种飞行器目标的雷达散射截面	91
4.5 二维雷达散射截面	91
4.5.1 麦克斯韦方程组维度的退化	91
4.5.2 二维 RCS 计算	92
课后习题	95
第5章 隐身计算	98
5.1 雷达散射截面计算方法概述	98
5.1.1 雷达散射截面计算方法分类	98
5.1.2 精确算法	98
5.1.3 高频近似法	99
5.2 物理光学法	100
5.2.1 基本公式	100
5.2.2 积分计算	102
5.3 边缘绕射理论	105
5.3.1 导体边缘绕射的典型解	105
5.3.2 几何绕射理论	109
5.3.3 物理绕射理论	114
5.3.4 等效电磁流法	117
课后习题	118
第6章 隐身测试	121
6.1 隐身测试概述	121
6.2 RCS 测量的基本原理和概念	122
6.2.1 相似原理和缩比测量	123
6.2.2 背景电平与 RCS 测量误差	125
6.2.3 远场条件	126
6.2.4 数据处理	127

6.3 微波暗室内电磁散射测试方法	128
6.3.1 测试设备	128
6.3.2 测试方法	130
课后习题	130
第7章 隐身设计方法	132
7.1 主要散射机理和飞机主要散射源	132
7.2 雷达隐身设计基本原则	133
7.2.1 飞机设计中隐身与其他学科的关系	133
7.2.2 飞机隐身设计基本原则	134
7.3 强散射部件外形隐身设计方法	136
7.3.1 消除角反射器效应的外形组合	136
7.3.2 消除或减弱次弱散射源	138
7.3.3 变后向散射为非后向散射	140
7.3.4 用棱边代替曲面以避免强的镜面回波	141
7.3.5 全机各部件棱边布局的统筹选择	142
7.3.6 部件的遮挡技术	142
7.3.7 腔体隐身技术	143
7.4 材料隐身技术	144
7.4.1 隐身材料的应用和分类	144
7.4.2 雷达吸波材料吸波基本原理	146
7.5 其他雷达隐身技术	147
7.5.1 无源对消技术	147
7.5.2 有源对消技术	147
7.5.3 等离子体隐身技术	147
7.5.4 超材料隐身技术	150
7.6 红外隐身技术	152
7.6.1 红外辐射基础	152
7.6.2 红外隐身措施	154
7.7 可见光隐身技术	156
7.8 国外典型隐身飞机技术分析	158
课后习题	163
参考文献	165
索引	167

第1章 绪论

隐身技术 (stealth technology) 在近年来的几次局部战争中发挥了重要作用。如 1991 年海湾战争期间, 美军隐身飞机 F-117 出动了 1 271 架次, 占总出动架次的 2%, 其攻击了伊拉克 40% 的战略目标而自身无一受损, 而且是唯一进入巴格达市区进行攻击的飞机。本章将介绍隐身技术的基本概念、隐身技术的范畴、隐身技术的发展历程等, 使读者对隐身技术的整体情况有一个基本的了解。

1.1 隐身技术基本概念

1.1.1 隐身技术的定义

武器装备的性能要求往往是多方面的。对于飞行器来说, 不仅应具有良好的飞行性能, 而且在战争环境中应具有较强的生存力。近年来, 各类飞行器的探测技术发展迅速, 防空武器系统日益完善, 地面上有强大的防空雷达网, 空中有预警机巡逻, 而且在太空还有战略预警系统。这些技术的发展对飞行器在战争中的生存力构成了严重的威胁。因此, 相应产生了各种反探测技术, 目的都是降低飞行器在战争环境中被发现的概率, 从而在战场上提高生存力。隐身性能已成为军用飞行器生存力的一个重要指标, 并且是衡量军用飞行器先进性的一个重要依据^[1]。

在军事技术领域, 隐身技术又称为目标特征信号控制技术或低可探测技术, 是通过减小武器平台的特征信号, 降低其被敌方探测器探测、跟踪、识别的概率, 降低敌方制导武器攻击的成功率, 提高武器平台生存力技术的统称。

从定义来看, 隐身技术有以下特点:

- ① 隐身技术是一类技术的统称, 并非专门针对某种探测器或某种专门技术的应用;
- ② 隐身技术的目的是提高武器平台的生存力, 是一种防御性军事技术;
- ③ 隐身技术提高生存力的手段是降低武器平台本身的特征信号, 它与雷达干扰、假目标迷惑、伪装等手段的区别是: 不需要干扰机、假目标、伪装网等其他设备或器件的辅助;
- ④ 隐身技术并不意味着武器平台完全不能被探测到, 而是其被探测到的概率能够大大降低, 不排除某些特殊情形下仍然能够被探测到的可能性;
- ⑤ 隐身技术并不只是降低武器平台被探测到的概率, 还包括降低其被跟踪、识别的概率和被制导武器攻击的成功率;
- ⑥ 从技术发展的时间顺序来看, 一般是某种探测器发展到一定程度, 对武器装备产生一定的探测威胁后, 相应的隐身技术才有发展的动力和必要性。

飞机的生存力定义为飞机躲避和抵抗人为敌对环境的能力。其定量指标可用在一定的敌对环境中, 在具体的遭遇条件下, 飞机以其自身的敏感性以及易损性所能获得的生存概率 P_S 来表示, 即

$$P_S = 1 - P_H P_{K/H} \quad (1.1.1)$$

其中, P_H 是飞行器被命中的概率, 称为敏感性; P_{KH} 是飞行器在被命中的条件下被击毁的概率, 与其抗打击能力有关, 称为易损性。 P_H 的影响因素主要有三个方面: ① 威胁的活动性 (active) 概率 P_A ; ② 飞行器被探测 (detected)、识别 (identified) 和跟踪 (tracked) 的概率 P_{DIT} ; ③ 飞行器被威胁武器发射 (launched)、引导 (guided) 和引爆 (detonated) 的概率 P_{LGD} 。因此, 命中概率可表示为

$$P_H = P_A P_{DIT} P_{LGD} \quad (1.1.2)$$

利用隐身技术可以有效降低飞行器被探测、跟踪、识别的概率, 从而提高飞机的生存概率。除了隐身技术, 飞行器还可以通过战术规避、超低空突防、电子对抗等技术有效提高躲避探测的能力,

战术规避技术是飞行员通过改变飞机的飞行状态以躲避雷达探测、光学瞄准及导弹跟踪的技术。为了让飞行员知道是否被导弹跟踪, 飞机上需要装有导弹跟踪报警装置。

超低空突防是利用在雷达天线高度 h_a 一定的情况下, 飞机的飞行高度 h_t 越低, 雷达水平视距 R_h 越小的原理, 躲避雷达的探测, 实现隐蔽突防。 R_h 可由下式计算:

$$R_h = \sqrt{2a_e}(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_t}) \quad (1.1.3)$$

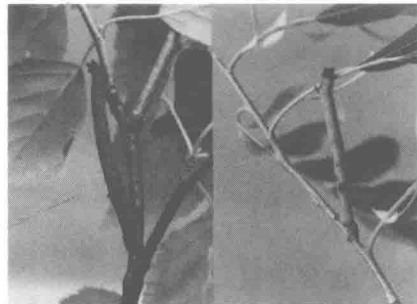
其中, $a_e = 8493 \text{ km}$, 为考虑大气折射影响的等效地球半径, 一般情况下可取地球真实半径的 $4/3$ 。水平视距 R_h 表示在一定的天线高度及目标飞行高度条件下, 雷达能看到的最远距离, 即雷达波束与地球表面相切时所能看到的目标到雷达的距离。在大于 R_h 的距离上, 雷达波束被地球表面遮挡, 使得雷达不能探测到目标。

1.1.2 自然界的隐身形式

自然界就提供了一些隐身的形式, 人类从中学会了如何应用, 并且已经以各种各样的形式应用了多年。例如, 一些昆虫和动物的颜色使它们与背景融合在一起, 从而来掩护自己。生存竞争使得很多生物进化出各种能力以提高生存力, 与隐身技术类似, 如拟态现象。拟态指的是一个物种在进化过程中, 获得与另一种成功物种相似的外表, 以欺瞒捕猎者远离拟态物种, 或者是引诱猎物靠近拟态物种。图 1.1 (a) 所示是一种蜂蝇停留在花丛中, 外形很像蜜蜂。图 1.1 (b) 为尺蠖幼虫在树上的状态, 外形酷似树枝。



(a) 蜂 蝇



(b) 尺蠖幼虫

图 1.1 生物界中的伪装现象

1.1.3 隐身技术的范畴

隐身技术所涵盖的范畴是相当大的。针对武器平台的常用探测器包括雷达、红外探测器、声呐、可见光探测器等，相应的特征信号为电磁散射、红外辐射、噪声、可见光。根据探测器的类型和相应的特征信号，隐身技术可分为雷达隐身、红外隐身、声隐身、可见光隐身等几类。各种特征信号的重要性取决于武器平台面临的主要威胁环境，对于不同目标，隐身技术的侧重点有所不同。如一般情况下，飞机的主要特征信号为电磁和红外信号，而潜艇的主要特征信号为辐射的噪声与敌方主动声呐探测时的反射声波，坦克等地面装备的主要特征信号为可见光、红外信号。低空突防的直升机的电磁、红外、噪声、可见光等特征信号都非常重要。目前，对飞行器生存力构成的主要威胁来自于雷达和红外探测器。雷达隐身技术和红外隐身技术是隐身技术最重要的两个方面，是本书将要介绍的内容，其中雷达隐身技术又是本书的重点。

隐身技术是一门正在不断发展的综合性、跨学科应用的科学技术。飞行器隐身技术涉及飞行器设计、电磁场理论、声学、光学、红外工程学以及航空材料等多种学科。在研究方法上，不仅要對飞行器隐身机理进行深入的理论研究和实验研究，而且需要与飞行器设计密切结合，才能取得满意的结果。

从字面意义来理解，“隐身”指视觉隐身，英文是“invisible”，表示完全不可见。但作为军事技术的隐身，英文用“stealth”表示，原意是“秘密行动”，并没有视觉上“看不见”的意思，而更多强调的是执行任务的隐秘性。香港、台湾地区将“stealth”翻译成“匿踪”，字面意义还包括了消除飞机雾化尾迹、潜艇尾迹等“隐匿踪迹”的技术。“隐身”这个名词虽然从科学上讲不够严格，但这样的艺术夸张起了词简目醒和印象深刻的作用。在有些非常正式、严谨的情况下，隐身也被称为“低可探测性 (Low Observability, LO)”，如雷达隐身称为“雷达低可探测性”。飞行器在执行任务过程中，雷达、通信、导航、识别等系统往往要不断向外辐射电磁信号，这些电磁信号容易被对方的无源探测系统截获，使己方暴露。降低这些电磁信号被截获概率的技术称为“低截获概率 (Low Probability of Interception, LPI)”技术，相应的隐身技术称为射频隐身^[2]。

雷达隐身主要通过减小武器平台自身的电磁散射信号，从而减小雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS)。降低雷达的探测距离最重要的手段包括外形隐身和材料隐身两种方式。外形隐身将入射雷达波偏转到偏离雷达接收天线的其他方向，材料隐身通过武器平台的吸波材料吸收入射电磁波。通过大量研究人员的艰苦努力，目标 RCS 计算和测量方法以及 RCS 控制和减缩技术日趋成熟和完善，有力地推动了雷达隐身技术的向前发展，为设计低 RCS 飞行器奠定了基础。

由于红外探测系统和红外制导武器的日益发展和广泛使用，红外探测对飞行器的生存力构成了新的威胁^[3]。因此，红外隐身是飞行器隐身技术另一个极为重要的方面。红外隐身主要是降低目标的温度，或者是采用低红外发射率材料降低目标的红外辐射强度。红外隐身技术所运用的基本理论是红外辐射原理，飞行器红外辐射源的分析及其辐射强度的计算方法与测量技术是飞行器红外隐身技术的基础，各种减弱红外辐射强度的措施则是红外隐身技术的主要内容。

在可见光隐身技术方面，涂料迷彩伪装的方法至今仍在采用，并且大量运用到地面装备中。在飞行器表面可以喷涂与背景一致的颜色和迷彩伪装图案，模拟背景的色彩，破坏飞行

器的目视外形，从而达到隐身的目的。

从 20 世纪 70 年代起，激光雷达 (laser radar) 和由激光制导的武器得到了广泛应用。美国在 1991 年的海湾战争中，就使用了激光制导武器。激光雷达与微波雷达在工作原理上非常相似，都是向被探测目标发射探测信号，通过接收目标散射的信号来探测目标，只是激光的波长比微波短得多，因此激光雷达比微波雷达有更高的角分辨力和更高的测距精度，且不需要大面积的雷达天线。激光雷达的另一特点是不怕电子干扰，这些特点都给激光隐身和激光对抗带来了困难。

1.1.4 隐身技术的意义

隐身技术意义重大，可增加敌方探测、跟踪和预测我方目标的难度，降低敌方获取信息的准确性和完整性，降低敌方使用武器进攻和防御的机会和能力，提高作战平台完成任务和生存的概率。隐身技术和其他新技术综合使用，可改变战争的形式，改变现代空战的方法和战术，影响和打破敌对双方的战略平衡。

隐身技术也可显著提高电子战作战的效能，降低对平台干扰输出功率的要求。在面对同样威胁的情况下，具有隐身性能的飞机可以采用更少的干扰输出功率，达到同样的干扰效果。

飞行器隐身技术和隐身飞行器的设计涉及军事机密，许多关键数据都是保密的，核心技术世界各国都不公开发表。本书的内容主要是讲解关于这门技术的基础知识，所引用的数据均来自公开出版的书刊和一些公开发表的学术论文、技术报告等文献资料。在涉及世界各国已经服役和正在研制的各种隐身飞行器隐身性能水平时，各种文献、资料往往会用推测数据，而且不同来源的数据往往有较大差异，只能推知大致量级，难以代表真实情况。

为了能有效地提高飞行器的隐身性能，设计人员在飞行器设计的初始阶段就要考虑隐身性能的要求，在飞行器设计的各个阶段运用各种隐身措施来降低飞行器的特征信号，使飞行器具有良好的隐身性能。由于在飞行器设计中强调了隐身性能，必然会对飞行器的战术技术指标的确定、总体布局、外形设计和结构设计产生一系列的影响。

1.1.5 隐身技术的局限性

隐身技术并不意味着隐身武器不可被发现，而是一个相对的概念，指被发现的概率大大降低。实际上，隐身飞机不是完全“看不见的”，只是发现距离缩短了，或者是被探测到的概率大大降低。

隐身技术和系统在减小雷达散射截面方面取得了巨大进步，但在获得这一优势的同时在其他方面却付出了一定的代价。隐身技术和隐身武器系统并非无懈可击。如在海湾战争中，部署在沙特的法制“猎鹰”雷达曾多次发现 20 km 以外飞行高度为 2 000 ~ 3 000 m、飞行速度为 900 ~ 1 000 km/h 的 F-117，英国一艘导弹驱逐舰上所配备的 L 频段 T-1022 型对空搜索雷达在 80 ~ 100 km 范围内也发现过 F-117。1999 年 3 月 27 日，科索沃战争期间，美军一架 F-117 就被南联盟的苏制 SA-3 导弹击落。据对南联盟军官的采访，F-117 的武器舱门打开的时候，特征信号增大，给了南联盟军队探测和攻击的机会。采用米波段的超视距地基雷达、米波段和分米波段的地基相控阵雷达能够对隐身飞行器提供远程预警。国外实验表明，超视距雷达可以在 2 800 km 的距离上发现飞行高度为 150 ~ 7 500 m、雷达散射截面为 0.1 ~ 0.3 m² 的空中目标。

隐身飞机外形的非传统设计导致飞行品质的丧失，一般需要智能控制，如 F-117、B-2 都

是静不稳定的飞机。隐身飞机大量使用复合材料、吸波材料和结构，保养维护成本很高，如B-2的存放需要恒定温度、湿度的机库，以保持吸波材料的性能。隐身飞机通常在夜间或恶劣天气出动，因此必须是全天候飞机，对飞行可靠性要求很高。隐身飞机及相关技术非常敏感，需要执行任务中的高可靠性，一旦落入敌方手中，可能泄露大量机密。

隐身飞机追求高性能，造价高昂，部分隐身飞机的成本如表1.1所列。其中，B-2是目前单机成本最高的军用飞机。

表 1.1 部分隐身飞机的成本

隐身飞机	生产商	首飞时间/年	成本/亿美元
F-22	洛克希德·马丁公司	1997	1.5
F-117	洛克希德公司	1981	1.112
B-2	诺斯罗普公司	1989	21.3
F-35	洛克希德·马丁公司	2006	1

隐身飞机开发周期长、费用高，一旦失败，损失巨大，如A-12舰载攻击机、RAH-66“科曼奇(Comanche)”武装直升机在投入大量研发经费后最终下马。

1.2 各类探测器的特点

1.2.1 雷达

雷达的工作原理是通过发射并接收目标散射的电磁波，实现对目标的精确定位。大多数雷达是一种主动探测设备，即需要发射电磁能量来探测目标，通过将能量辐射到空间并且探测目标反射的回波信号来探测目标。返回到雷达的电磁能量不仅能够表明目标的存在，而且通过比较接收到的回波信号与发射信号，就可确定其位置。

有的雷达还能获得目标的成像、微动、极化特征等信息。雷达的特点是探测距离可以或近或远、精度高、不易受天气影响，可以在黑暗、薄雾、浓雾、下雨和下雪时工作。大多数雷达工作在微波波段，即电磁波的频率在0.3~300 GHz之间，对应的波长为1~1 000 mm。雷达还可以给一些传统武器提供导引，如美国用于防空的舰载密集阵机炮，就是一种雷达导引武器。

有些探测器不需要发射电磁波，而是依据接收到的目标雷达、通信、导航、识别系统辐射的电磁信号，或者目标反射电视、广播等电磁信号实现对目标的定位，这类探测器称为无源雷达。典型的无源雷达有捷克的“塔玛拉”、“维拉”雷达，美国的“沉默哨兵”等。无源雷达利用电台、电视台甚至移动电话发射台在近地空间传输，通过区分和处理目标反射的信号，探测、识别和跟踪目标。无源雷达由于不需要向外辐射电磁波，因此隐蔽性好，不怕电子干扰和反辐射导弹，可以有效规避敌方的电子侦察。

1.2.2 红外传感器

红外线(infrared, IR)是波长在0.76~1 000 μm 之间的电磁波。红外传感器通过接收目标辐射的红外线实现定位，探测距离较近，精度高，易受天气影响。单一红外传感器不能确定目标的距离，只能探测到目标的方位角。目标与背景的温度差异，是各种红外探测器发现和识别目标的基本依据。根据物理学中的基本定律，热力学温度高于0 K的物体都会以电磁波的形式向外辐射能量。根据维恩位移定律，常温下这种辐射能量大部分处于红外波段，红

外探测器依靠接收到的红外信号实现对目标的探测。不同波长的红外线大气透过率差异很大，大气透过率高的红外线波长范围称为大气窗口。大多数红外传感器接收的是通过 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 这两个大气窗口传输的红外信号。根据斯忒藩-玻耳兹曼定律，一般物体辐射的总能量大致与温度的 4 次方成正比，因此武器装备红外隐身的一个重要手段就是降低武器平台的温度。对于飞行器目标，热源主要包括尾焰、尾喷口、电子设备、机身等。在红外传感器发展的早期，不能直接探测到目标或背景的红外辐射信号，还需要采用红外线照射目标，红外探测器实际上探测的是目标反射的红外信号。如第二次世界大战（简称二战）期间德国黑豹坦克安装了红外夜视仪，但需要猫头鹰红外照射车辅助才能正常工作。

1.2.3 可见光传感器

可见光传感器通过接收目标反射的可见光实现定位，探测距离近，精度高，光源主要是自然光，一般在白昼、天气良好的情况下使用。可见光的波长范围在 $0.4\sim 0.76\ \mu\text{m}$ 之间。可见光传感器与红外传感器的工作原理、结构、制作工艺、光路设计等方面都比较接近，一般合称光电传感器。很多情况下，一个光电吊舱内部安装有可见光、短波红外（ $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ）、中波红外（ $3\sim 5\ \mu\text{m}$ ）、长波红外（ $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ）等多种光电传感器。

1.2.4 声呐

声呐（sound navigation and ranging, sonar）通过发射并接收目标返回的声波，或者接收目标辐射的声波实现目标定位。前者称为主动声呐，后者称为被动声呐，两者都在潜艇上得到广泛应用。声波在水下具有良好的传播特性，在水中的传播速度是空气中的 4.5 倍，衰减较少，在水中可以传播上千千米，因此声呐探测距离非常远。声呐探测精度较低，主要应用于探测水下或水面目标。

主动声呐又称回声声呐，主要由换能器基阵、发射机、接收机、收发转换装置（用于收发合一的基阵）、终端显示设备、系统控制设备和电源等组成。主动声呐由简单的回声探测仪器演变而来，它主动发射声波，然后接收回波进行计算，适用于探测冰山、暗礁、沉船、海深、鱼群、水雷和关闭了发动机的隐蔽潜艇。主动声呐可以探测静止无声的目标，并能测出其方位和距离。但主动声呐发射声信号容易被敌方侦听而暴露自己，且探测距离近。

被动声呐又称噪声声呐，主要由换能器基阵（由若干换能器按照一定规律排列组合而成）、接收机、显示控制台和电源等组成。被动声呐由简单的水听器演变而来，它接收目标发出的噪声，判断出目标的位置和某些特性，特别适用于不能发声暴露自己而又要探测敌舰活动的潜艇。被动声呐主要搜索来自目标的声波，其特点是隐蔽性和保密性好，识别目标能力强，侦察距离远；但不能侦察静止无声的目标，也不能测出目标的距离。

根据使用对象的不同，声呐又可分为水面舰艇声呐、潜艇声呐、航空声呐、海岸声呐和便携声呐等。水面舰艇声呐主要用于搜索、识别、跟踪潜艇，保障对潜艇实施攻击以及探测水中障碍，多装备于大中型水面战斗舰艇、猎潜艇、反水雷潜艇和某些勤务舰艇中。潜艇声呐主要用于搜索、识别、跟踪水面舰船和潜艇，保障鱼雷、深水炸弹和战术导弹攻击，以及探测水雷等水中障碍。航空声呐是海军反潜直升机和反潜巡逻机的主要反潜探测设备，亦称机载声呐，用于搜索、识别和跟踪潜艇，保障机载反潜武器的使用或引导其他反潜兵力实施对潜攻击。海岸声呐是设置在近岸海域的固定式声呐，由水听器基阵、海底电缆、岸上电子设备和电源组成，用于海峡、基地、港口、航道和近海水域对潜警戒，并引导岸基或海上的

反潜兵力实施对潜攻击。

1.2.5 磁异常探测器

磁异常探测器 (Magnetic Anomaly Detector, MAD) 通过感受目标引起的磁场变化实现定位, 探测距离近 (约几百米)、精度低, 一般用于探测潜艇等水面下大型金属目标。

水面舰艇和潜艇绝大多数是用钢质材料制成的, 舰艇上的主机、辅机、锅炉等设备也是钢质的, 这些钢质材料都是良好的磁化体, 所以舰艇船体在地磁场中极易被磁化, 并在周围产生方向不同、强度各异的磁场。与磁场有关的因素包括电磁场的大小和方向, 舰艇的几何形状, 钢材的磁导率、机械效应、热效应, 舰艇设备的磁状态等。

未来海战, 水雷尤其是磁性水雷及其他新型水雷仍会对潜艇产生巨大的威胁。当今世界几个海军强国都储备有几十颗各种引信的水雷, 所以磁隐身一直受到各国海军的重视。如潜艇为预防磁性水雷和鱼雷的攻击, 艇体不得带磁, 或带磁的程度限制在一定范围内。磁力测量船为确保精度, 自身也不能带磁, 特别是扫雷舰艇和猎雷舰艇对无磁性的要求就更高。

潜艇的磁场是暴露自己的重要物理场, 现代反潜飞机和反潜直升机普遍装备有磁异常探测器, 如美国的 P-3C 反潜巡逻机、SH-60B/F 反潜直升机都装备有 AN/ASQ-81 型磁异常探测器。英国的“猎迷” II 型反潜巡逻机上装备有 ASQ-10A 型磁异常探测器。这些磁异常探测器可以在空中一定高度上发现水下活动的潜艇, 并能对其精确定位。

1.3 国外雷达隐身技术的发展

1.3.1 20 世纪 40 年代

二战时期, 随着雷达越来越广泛的应用, 针对雷达的隐身尝试也开始进行。二战晚期, 英国和美国水上巡逻机和驱逐舰广泛使用雷达探测德国潜艇, 迫使德国海军在潜艇指挥塔和通气管上涂敷雷达吸波材料, 这是最早使用的雷达吸波材料。

二战后期, 德国的 Ho-229 飞翼战斗轰炸机尝试使用隐身技术。Ho-229 采用翼身融合布局, 全木质的蒙皮上涂敷了掺混碳的树脂材料, 以起到吸收入射雷达波的作用。2009 年, 诺斯罗普公司制作了 Ho-229 全尺寸的模型, 采用了相同的材料。经试验和推断, 该飞机在高速、低空飞行时, 可以有效避免“锁链之家”雷达的探测。

1940 年, 诺斯罗普公司的 N-1M 飞翼飞机进行了首飞, 接着 N-9M、XB-35 轰炸机 1:3 的原型机首飞。1946 年 6 月, XB-35 首飞, 但随后军方要求改为喷气式轰炸机, 在此基础上产生了 YB-49。YB-49 于 1947 年 10 月首飞成功, 但由于操纵性恶劣, 最终没有服役。诺斯罗普从 N-1M 到 YB-49 飞翼机的设计为 B-2 的出现打下了坚实的基础。

1.3.2 20 世纪 50—60 年代

二战后, 随着冷战的开始, 雷达和防空导弹飞速发展, 美国情报部门发现苏联正在部署大型密集防空网, 军方产生了在飞机上降低雷达反射信号的想法。从 20 世纪 50 年代开始, 人们对隐身技术进行了大规模深入研究, 将隐身技术作为一门应用科学技术, 并且将它应用于军用飞行器的设计中。

1. U-2 侦察机

1955年,洛克希德公司研制了U-2(见图1.2)亚声速单座高空侦察机,主要由中央情报局使用。U-2可以在21 000~27 000 m高度飞行,利用所载探测装置侦察敌方的地面军事目标和搜集其他情报。这种飞机不携带任何武器,要求飞机设计时尽可能减小被敌方雷达探测的可能性,并避免发射出可能被敌方探测到的任何电磁波信号。其机载导航系统是无源的,通信系统仅为一部简单的近程超高频电台,而且在敌区上空不允许发出任何电磁信号。美国原本认为U-2在该高度飞行,苏联雷达不可能探测到;但是在1956年7月第一次飞越苏联上空侦察时,该飞机就被苏联雷达发现,而且苏联雷达准确判断出了飞机飞行的高度是20 km。苏联认为当时的飞机不可能飞到如此高的海拔高度,曾一度怀疑雷达探测的准确性。

U-2飞机被苏联雷达探测到之后,美国中央情报局开始了“彩虹计划”(Project Rainbow),以减小U-2飞机的雷达散射截面。该计划主要采用三种手段减缩雷达散射截面,代号分别是“墙纸”、“秋千”、“电线”。“墙纸”采用林肯实验室开发的材料,在柔性薄膜上粘贴导电图案,然后粘到蜂窝材料上,主要针对高频雷达。“秋千”是在机翼及平尾的前缘、后缘一定距离处平行放置金属导线,主要针对70 MHz的雷达。“电线”主要降低机身和垂尾的散射,在机头到机尾、垂直安定面的前缘到后缘水平面上放置导线,主要针对低频雷达,导线上还加了铁氧体微珠,可以调节隐身频率。“秋千”和“电线”本质上是无源对消技术。“墙纸”原本在机身上下表面都使用,但带来了严重的散热问题,因此后来只在下表面使用。“秋千”和“电线”导致阻力增大,飞行高度降低了1 524 m,航程降低了20%,代价很大。1957年,隐身改进后的U-2开始使用,但是结果表明,这些隐身措施几乎没有作用。从1958年5月起,这些措施都停止使用。在“彩虹计划”进行的同时,中央情报局就结合该计划组织飞机制造商、材料制造商和实验室,讨论飞机隐身的可能途径;在1957年12月总结出初步的隐身思路,主要包括以下方面:

- ① 发动机和飞机的部分金属部件应该被遮挡;
- ② 无法遮挡的部件应该采用塑料等透明材料,或者去掉金属部件;
- ③ 为对抗S波段和X波段,飞机外形可以设计成将入射电磁波反射到其他方向的形状;
- ④ 外露的边缘应该使用阻抗渐变结构。

U-2的隐身尝试虽然最终失败,但是却为后来的隐身设计提供了宝贵的经验。

2. SR-71 侦察机

1957年秋季,“彩虹计划”仅仅进行了几个月后,中央情报局和科研团队就意识到目前的手段不足以使现有飞机通过改进实现隐身,必须设计新的飞机。于是,中央情报局于同年立刻开始了“嗜好计划”(Project Gusto),研究隐身技术,设计能够穿越苏联而不被发现的侦察机。洛克希德公司参与了该计划,设计了内部代号为“大天使”(Archangel)的系列方案。飞机布局不断改进,内部编号从A-1、A-2开始,一直改进到A-12。1959年12月,中央情报局宣布洛克希德的A-12设计方案在“嗜好计划”中胜出,随后开始了制造A-12的“牛车计划”(Oxcart),1960年1月确定制造12架。在A-12基础上,洛克希德公司为美国空军研发了SR-71(见图1.3)高空、高速战略侦察机,飞行高度达30 000 m,飞行马赫数 Ma 超过3。SR-71“黑鸟”战略侦察机被认为是最早的反雷达隐身飞机,为减小雷达截面,这种飞机从外形设计到材料使用都采取了一系列综合隐身技术。吸波材料方面,该机使用了“铁球”

铁氧体吸波材料,使其外表呈黑色,因此获得“黑鸟”的名称。设计 A-12 和 SR-71 的原本目的是到苏联上空执行侦察任务,但实际应用中它们从未到过苏联上空侦察,主要原因是苏联防空力量的增强、1960 年 U-2 飞机被苏联击落事件的影响以及星载侦察技术的成熟。

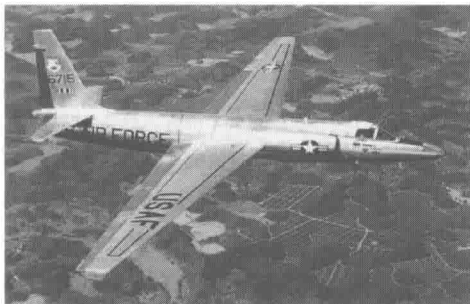


图 1.2 U-2 侦察机

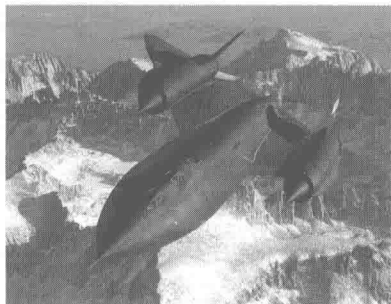


图 1.3 SR-71 高空、高速战略侦察机

3. 147A 侦察机

1960 年初,瑞安航空公司向美国空军提议研制 Q-2 “火蜂”(Fire Bee)靶机的侦察型。1960 年 7 月,美国空军与瑞安航空公司签订代号为“红色马车”(Red Wagon)的合同,演示将 Q-2 改成侦察型的技术。该项目的目的之一就是试验雷达截面减缩措施,同时又不需要对外形进行重新设计。其采用的主要手段是进气口用金属网遮蔽以屏蔽长波雷达,机身两侧贴敷雷达吸波材料,机头则用不导电的油漆处理。1961 年肯尼迪上台后,重新评估了很多军事项目,最终“红色马车”被终止。1962 年 2 月,美国空军从“大远征队”(Big Safari)项目拨付经费,要求瑞安航空公司以最小的改动将火蜂靶机改成侦察型,同时采用隐身措施,项目编号为 147A。1962 年 5 月 17 日,147A 进行了试验,对雷达截面减缩措施效果进行评估,方法是由 5 架 F-106 截击机升空去击落 147A。试验结果表明,F-106 几乎无法用雷达锁定 147A,借助地面引导手段也无法锁定。最终 F-106 的飞行员通过 147A 的凝结尾流采用目视方法成功追踪到了踪迹,发射了 8 枚 AIM-4F “猎鹰”半主动雷达导弹,结果全部落空,无一击中。

这一时期,巡航导弹也开始考虑隐身技术。1960 年,AGM-28 猎犬巡航导弹进入美国空军服役,北美公司获得合同,为其改进以减缩雷达截面积。

反观 50—60 年代,隐身技术开始受到关注,但是由于技术发展的限制,尚未出现真正的隐身武器系统。

1.3.3 20 世纪 70 年代

1. 战争对隐身性能的需求

美国有计划地进行隐身技术研究开始于 20 世纪 70 年代,有两个起决定性的因素,即超级计算机的发展和战争的需要。超级计算机原用于密码破译及核爆炸模拟,在满足了主要军事需求后,开始用于隐身性能的计算和隐身设计。越战期间,越南的地空导弹和防空高炮对美国飞机形成了巨大威胁,防空导弹和雷达引导高炮组成的防空网使美国空军和海军航空兵损失惨重。1973 年第四次中东战争中,以色列在 18 天内损失 109 架战机,显示了地空导弹的强大威力。冷战期间,苏联部署了强大的防空雷达网,包含至少 15 种互补的防空系统、地空导弹和高炮也在关键区域密集部署,使得美国的优势不复存在,美国感到了巨大的威胁。