

张玉龙 李萍 石磊 主编

Stealth Materials

隐身材料

红外谱



化学工业出版社

—— 张玉龙 李萍 石磊 主编 ——

Stealth Materials

隐身材料



化学工业出版社

· 北京 ·

本书重点介绍了隐身材料的主要类型、特性与应用,较为详细地介绍了雷达吸波隐身材料、可见光隐身材料、红外隐身材料、激光隐身材料和多频谱兼容隐身材料的主要种类和特性,涂覆型和结构型隐身材料结构的选材、制备、性能与应用。

本书可供材料研究人员、武器装备与尖端设备设计人员、隐身制品的设计与制造人员、管理与销售人员及教学人员参考使用,也是军事爱好者学习隐身材料的首选读物,还可作为培训教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

隐身材料/张玉龙,李萍,石磊主编. —北京:化学工业出版社,2018.2
ISBN 978-7-122-31351-5

I. ①隐… II. ①张…②李…③石… III. ①隐身材料-研究 IV. ①TB34

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第009141号

责任编辑:韩霄翠 赵卫娟 仇志刚 装帧设计:王晓宇
责任校对:边涛

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装:三河市延风印装有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张17¼ 字数325千字 2018年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:98.00元

版权所有 违者必究

编委会名单

主编 张玉龙 李 萍 石 磊

委员 (按姓氏汉语拼音排序)

曹玉阁 陈庆昌 高福欣 韩军慧 李守刚

刘向平 马 源 任崇刚 王 磊 魏仲华

吴 伟 杨 波 杨兴娟 张 灿 张文栋

赵金伟 郑 辉 朱洪立

隐身技术又称目标特征信号控制技术，是通过控制装备或人体信号特征，使其难以被发现、识别和跟踪打击的技术。按照所使用的探测波来划分，隐身技术可分为雷达吸波隐身技术、可见光隐身技术、红外隐身技术、激光隐身技术和多频谱兼容隐身技术等。通常所采用的隐身措施与手段主要有隐身外形技术、隐身材料技术、无源干扰技术、有源隐身技术等。其中，隐身材料技术是具有长期有效性和行之有效性的隐身手段，在隐身技术中显得尤为重要，也是世界各国研究发展的重点。经过科研工作者的长期努力，隐身材料以涂覆型和结构型结构方式广泛地在各国武器装备和尖端装备与设施上应用，并显示出良好的隐身效果。可以说隐身材料技术是隐身技术中技术含量较高、效果极佳、发展前景极为光明的技术。

为了普及隐身材料技术的基础知识，推广并宣传隐身材料技术的研究与应用成果，在广泛收集国内外文献资料的基础上，组织编写了本书。书中较为详细地介绍了隐身材料基础知识，雷达吸波隐身材料、可见光隐身材料、红外隐身材料、激光隐身材料和多频谱兼容隐身材料等的理论基础，隐身材料种类与特性，涂覆型和结构型隐身材料的制备、性能与应用等内容，是材料研究人员、武器装备与尖端设备设计人员、隐身制品的设计与制造人员、管理与销售人员及教学人员的必读之书，也是军事爱好者学习隐身材料的首选读物，也可作为培训教材使用。

本书突出实用性、先进性和可操作性，理论叙述从简，着重用实用数据和实例说明问题，注重由浅入深、循序渐进，语言简练，结构层次清晰，信息量大、数据可靠。若本书的出版发行能对我国的隐身材料技术研究与发展有一定的促进作用，那么，编者将感到十分欣慰。

由于水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2017.8

01 | 第一章
概述 / 001

第一节 简介 / 001

一、基本概念 / 001

二、隐身技术的主要类型与分类 / 001

第二节 面临的战场威胁与任务 / 002

一、武器装备主要战场威胁分析 / 002

二、探测与反隐身技术 / 005

第三节 隐身技术 / 010

一、低 RCS 外形技术 / 010

二、目标特征信号控制技术 / 010

三、雷达目标特征信号控制技术 / 012

四、红外及可见光特征信号控制技术 / 014

五、声频特征信号控制技术 / 015

六、其他目标特征信号控制技术 / 016

七、新型的隐身技术 / 016

02 | 第二章
吸波剂与隐身材料 / 022

第一节 微粉吸波剂 / 022

一、简介 / 022

二、铁氧体吸波剂 / 024

三、羰基铁吸波剂 / 029

四、磁性微球吸波剂 / 030

五、 BaTiO_3 及其隐身材料 / 035

六、铁(镍)氮化物 / 035

七、 SiC 、 Si/C/N 及其隐身材料 / 036

八、石墨、炭黑吸波剂 / 037

九、导电高分子吸波剂 / 038

十、纳米吸波剂 / 047

十一、手性吸波剂 / 059

十二、放射性同位素吸波剂 / 060

十三、视黄基席夫碱盐吸波剂 / 061

第二节 纤维吸波剂 / 063

- 一、多晶铁纤维吸波剂 / 063
- 二、碳纤维吸波剂 / 066
- 三、碳化硅纤维吸波剂 / 072
- 四、晶须吸波剂 / 074
- 五、玄武岩纤维吸波剂 / 075
- 六、竹炭纤维吸波剂 / 076
- 第三节 新型吸波剂 / 077
 - 一、等离子体吸收剂 / 077
 - 二、电路模拟吸波结构 / 078
 - 三、自适应(智能)隐身吸波剂 / 078
- 第四节 隐身材料与结构设计 / 085
 - 一、隐身材料用基体材料 / 085
 - 二、吸波隐身材料的设计 / 086
 - 三、雷达吸波材料的结构类型及设计 / 089
 - 四、涂覆型吸波材料的结构形式设计 / 092
 - 五、结构吸波材料的结构设计 / 096

03 | 第三章 雷达吸波隐身材料 / 102

- 第一节 简介 / 102
 - 一、基本概念 / 102
 - 二、分类 / 102
 - 三、雷达吸波隐身机理 / 102
 - 四、雷达吸波材料的主要类型与特性 / 104
 - 五、对雷达吸波材料性能的测试表征技术 / 105
- 第二节 雷达吸波剂的制备技术 / 107
 - 一、化学共沉淀法 / 107
 - 二、溶胶-凝胶法 / 108
 - 三、水热合成法 / 108
 - 四、微乳液法 / 109
 - 五、超细镍粉吸波剂的制备 / 109
 - 六、纳米 Fe_3O_4 吸波隐身材料的制备 / 111
- 第三节 雷达吸波涂料 / 112
 - 一、高磁损耗(HP)吸波涂层 / 112
 - 二、磁性纤维吸波涂层 / 114
 - 三、手性(chiral)吸波涂层 / 114
 - 四、导电高聚物涂层 / 115
 - 五、智能化多功能隐身涂料 / 116

- 六、单层雷达吸波涂层 / 116
- 七、掺杂 Sm_2O_3 /丙烯酸酯雷达吸波涂料 / 119
- 八、雷达吸波涂层的质量控制 / 120
- 第四节 结构吸波隐身材料 / 123
 - 一、结构吸波材料的种类 / 123
 - 二、结构设计 / 124
 - 三、雷达吸波结构材料的制备 / 125

04 | 第四章 可见光隐身材料 / 134

- 第一节 可见光隐身迷彩涂料 / 134
 - 一、军事需求与面临的任务 / 134
 - 二、可见光隐身涂料 / 135
- 第二节 新型可见光隐身材料 / 153
 - 一、智能隐身材料 / 153
 - 二、纳米隐身材料 / 156
- 第三节 多波段隐身材料 / 156
 - 一、可见光、近红外二波段隐身织物 / 157
 - 二、可见光、近红外、中远红外三波段复合隐身材料 / 157
 - 三、可见光、近红外、中远红外、雷达波四波段复合隐身材料 / 158

05 | 第五章 红外隐身材料 / 159

- 第一节 红外隐身技术 / 159
 - 一、红外隐身材料的隐身原理 / 159
 - 二、红外隐身的主要技术措施 / 161
 - 三、红外隐身方法 / 163
 - 四、红外隐身技术研究进展 / 164
 - 五、红外隐身技术的发展趋势 / 166
 - 六、红外隐身的军事应用 / 167
- 第二节 红外隐身低发射率材料 / 168
 - 一、红外隐身材料 / 168
 - 二、低发射率薄膜 / 177
- 第三节 光子晶体红外隐身材料技术 / 177
 - 一、光子晶体基本特性 / 177
 - 二、光子晶体红外隐身材料研究 / 178
 - 三、光子晶体红外隐身材料的设计 / 183

第四节 新型红外隐身材料 / 187

- 一、降温红外隐身材料 / 187
- 二、控温涂层材料 / 194
- 三、智能隐身材料 / 195
- 四、生物仿生隐身材料 / 196
- 五、发展趋势 / 197

06 | 第六章 激光隐身材料 / 198

第一节 激光隐身技术 / 198

- 一、简介 / 198
- 二、激光隐身原理 / 198
- 三、激光隐身技术与措施 / 200
- 四、激光隐身技术的兼容性 / 206
- 五、发展分析 / 207

第二节 隐身目标激光近场散射特性 / 208

- 一、简介 / 208
- 二、目标激光散射特性计算模型 / 209
- 三、目标激光散射特性仿真计算 / 210

第三节 激光吸收剂 / 212

- 一、主要品种与特性 / 212
- 二、转型激光吸收剂 / 213
- 三、过渡元素掺杂 SnO_2 激光吸收剂 / 215
- 四、电致变色激光吸收剂 / 216
- 五、 ErFeO_3 高强激光吸收剂 / 218
- 六、稀土激光吸收剂 / 220

第四节 激光隐身涂料 / 225

- 一、激光隐身涂料的设计 / 225
- 二、聚氨酯基红外-激光兼容隐身涂层 / 229
- 三、纳米激光隐身涂料 / 230

07 | 第七章 多频谱兼容隐身材料 / 233

第一节 雷达与红外兼容隐身材料 / 233

- 一、对多频谱兼容隐身技术的需求分析 / 233
- 二、红外雷达兼容隐身材料主要品种与特性 / 237
- 三、红外/雷达隐身结构材料设计 / 240
- 四、红外雷达隐身复合涂层 / 249

第二节 红外与激光兼容隐身材料 / 251

一、简介 / 251

二、红外/激光隐身材料的设计原理 / 252

三、等离子共振原理 / 253

四、激光红外隐身材料的研制 / 254

第三节 多频段兼容雷达隐身材料 / 255

一、简介 / 255

二、雷达/激光复合隐身材料 / 256

三、四段兼容隐身材料技术 / 258

四、红外、激光兼容隐身材料技术 / 259

五、智能型隐身材料 / 259

六、纳米隐身涂料 / 260

第四节 红外/可见光与多波段兼容隐身材料 / 261

一、红外与可见光兼容隐身材料 / 261

二、可见光、红外、激光、雷达多波段兼容隐身材料 / 262

第一章 概述

Chapter

第一节 简介

隐身技术是现代武器装备发展中出现的一项高新技术，是当今世界三大军事尖端技术之一，是一门跨学科的综合技术，涉及空气动力学、材料科学、光学、电子学等多种学科。它的成功应用标志着现代国防技术的重大进步，具有划时代的历史意义。对于现代武器装备的发展和未来战争将产生深远影响，是现代战争取胜的决定因素之一。世界军事强国已把隐身技术提升到与电子信息战技术同等地位来发展。

近年来，隐身技术发展迅速，已在飞机、导弹、舰船、坦克装甲车辆以及军事设施中应用，并取得了明显的效果。

一、基本概念

隐身技术又称为“低可探测技术”，是指通过弱化呈现目标存在的雷达、红外、声波和光学等信号特征，最大限度地降低探测系统发现和识别目标能力的技术。通过有效地控制目标信号特征来提高现代武器装备的生存能力和突击能力，达到克敌制胜的效果。

二、隐身技术的主要类型与分类

根据探测器的种类不同，隐身技术可分为雷达隐身、红外隐身、声波隐身和可见光隐身等技术。图 1-1 所示为隐身技术的分类。

采用隐身技术可达到的目的与效果如下。

① 减少雷达回波。通过精心设计武器装备外形，减少雷达波散射截面(RCS)，使结构吸波材料或贴片或涂层吸收掉部分雷达波或透过部分雷达波，以

实现隐身的目的。

② 减少红外辐射。适当改变发动机排气系统，减少发射热量。采用多频谱涂料和防热伪装材料，改变目标的红外特征，以实现红外隐身。

③ 降低噪声。使用低噪声发动机，并运用消声隔声蜂窝状或泡沫夹层结构，控制信号特征，达到声波隐身的目的。

④ 伪装遮障。涂覆迷彩涂料、视觉伪装网、施放遮蔽烟幕，降低目视特征达到可见光隐身的目的。

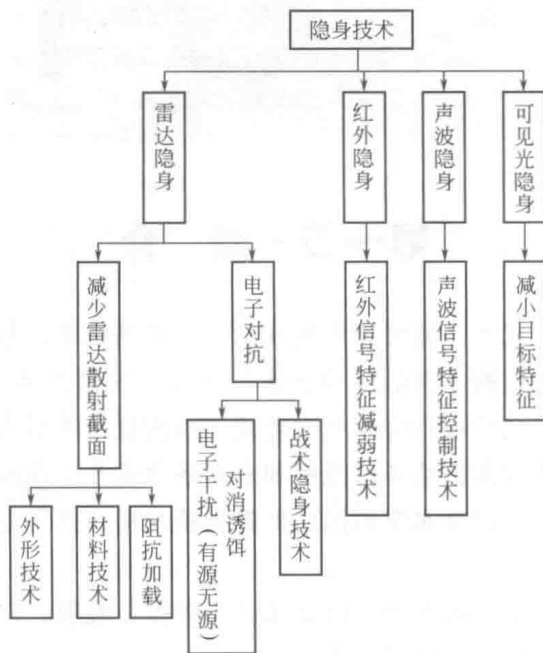


图 1-1 隐身技术的分类

第二节 面临的战场威胁与任务

隐身技术是未来信息化战争中实现信息获取与反获取、夺取战争主动权的重要手段，是攻防对抗双方取得战略、战役、战术和技术优势的重要内容，也是新一代武器装备的显著技术特征。隐身性能已成为现代主战武器装备的重要战技指标之一，是军队战斗力生成的重要增长点之一。随着信息技术的飞速发展和战场环境的复杂变化，隐身武器的出现对战争模式已经带来了重要影响，并成为战争中决定胜负的一个重要因素。

一、武器装备主要战场威胁分析

在现代战场上，随着探测、控制、弹药技术的长足发展，先进侦察系统和精

确打击系统已经对地面武器装备构成了不可忽视的威胁。这种威胁具有全方位、大纵深、全天候、多层次等显著特点。因此，在高新技术战争中，先进侦察系统和精确打击系统构成了地面武器装备的主要战场威胁环境。

1. 先进侦察技术构成的威胁

各种高新技术的广泛应用，使得现代军事侦察技术种类繁多。按侦察平台可分为天基侦察、空基侦察、海基侦察、陆基侦察。

① 天基侦察。天基侦察主要依托的平台是各种军用卫星，是一种重要的战略侦察手段。其中，对装甲装备构成直接威胁的主要有侦察卫星，包括成像侦察卫星、电子侦察卫星、海洋监视卫星等。目前，美国是拥有军事卫星最多的国家，其功能配系较全。

② 空基侦察。空基侦察主要指各种航空侦察装备（也称空中侦察装备），是军事侦察系统的重要组成部分，它包括有人驾驶侦察机、无人侦察机、侦察直升机、预警机、侦察气球和飞艇等侦察平台，以及安装在平台上的各种雷达、电子探测器材等侦察设备。

③ 海基侦察。目前，各国海上的侦察装备是由水面舰艇、潜艇等平台携带有关传感器（包括雷达、声呐、电子支援设备、光电设备）组成的侦察系统。这些系统虽然专用于侦察目的，但大都是包括武器、指挥和控制等功能的综合系统。对于地面两栖装备，可能遇到的海基侦察手段有各种舰载或岸基雷达。未来还有雷达与指挥控制综合系统、主动式被动相控阵雷达、高频表面波雷达。

④ 陆基侦察。地面侦察装备主要包括装甲侦察车、战场雷达、地面传感侦察系统和无人地面侦察车等。这些侦察系统可与海基、空基、天基侦察资源共同构成陆战侦察体系，及时为地面部队提供准确的战场态势和目标信息。表 1-1 列出了典型的陆基侦察装备。

2. 精确打击技术构成的威胁

精确打击技术是各种高新控制技术和弹药技术相结合的产物。地面武器装备面临的精确打击火力基本可以分为两类，一类是精确制导导弹，另一类是末敏弹。

(1) 精确制导技术

精确制导技术的发展集中体现在导弹导引体制的变化上。现已发展的制导技术主要有毫米波制导、红外制导、激光制导、电视制导、微波制导、光纤制导等。这些技术的应用，使反坦克导弹对装甲目标实施精确打击成为可能。尤其是毫米波的使用以及红外导引头/探测器技术的发展，使导弹的精确制导有了引人注目的发展。表 1-2 列出了国外研制的几种新型反坦克导弹。

表 1-1 陆基侦察装备

载体	设备类型	举 例	典型装备	备注
装甲侦察车		美国 M3“骑兵”侦察车、英国“弯刀”和“佩刀”侦察车、法国 AMX-10RC(6×6)侦察车、德国“山猫”(8×8)侦察车以及俄罗斯“山猫”侦察车	战场监视雷达、热像观察装置、激光测距仪、地面导航系统	
战场雷达	侦察雷达	美国 AV-PPS-5 雷达、AN-TPS-5XX 雷达;英国“姆斯塔”和 ZB298 战场监视雷达;法国 RB12A 战场监视雷达		厘米波段,分远程、中程、近程
	测试雷达			
	炮位侦察雷达	美国 20 世纪 80 年代初装备的 AN-TPQ-36 和 AN-TPQ-37 炮位侦察雷达	电扫描的相控阵体制	作用距离可达 30km、扇扫范围 90°
地面传感侦察系统		美国 20 世纪 80 年代装备的“伦巴斯”系统	传感器、中继器和监视器	探测范围几米至几百米
无人地面侦察车		美国“萨格”(Sarge)监视、侦察地面设备	彩色和增强型黑白摄像机	遥控距离达 4km

表 1-2 国外最新研制的几种反坦克导弹

名称	国别	工作波段	发射平台	射程/m
“沃斯普”(WASP)	美国	94GHz	机载	
“幼畜”AGM-65H	美国	末段 8mm 波	机载	
“海尔法-2”(Hellfire-2)	美国	激光 1.06 μ m 和红外制导	直升机或地面车辆	8000
“陶氏”系列(TOW)	美国	红外与毫米波复合制导	车载	65~3750
“霍特”(HOT)	欧盟	1 μ m、10 μ m 双色红外	地面、车载或直升机	75~4000
“米兰”(MILAN)	欧盟	红外热像与可见光相机	地面、车载或直升机	25~1920
AT-5“Spandrel”	印度	红外主被动	车载	25~2000

(2) 末敏弹技术

末敏弹是末端敏感弹药的简称。这里的“末端”是指弹道的末端,而“敏感”是指弹药可以探测到目标的存在并被目标激活。末敏弹专门用于攻击集群坦克的顶部装甲,是一种以多对多的反集群装甲和火炮的有效武器。末敏弹除了具有常规炮弹间瞄射击的优点以外,还能在目标区上空自动探测、识别并攻击目标,实现“打了不用管”,是一种具有优化性价比的智能炮弹。尽管末敏弹的命中概率低于导弹的命中概率,但要高于常规炮弹,且其成本较低,因此具有广阔的应用前景。世界上较为典型的末敏弹如表 1-3 所列。

表 1-3 几种典型的末敏弹举例

名称	弹径/mm	敏感器类型	名称	弹径/mm	敏感器类型
SADARM	155	双色红外、3mm 波主被动	ZEPL	155	红外、毫米波
SMART155	155	双色红外、3mm 波主被动	EPHRA	155	红外、毫米波
BONUS	155	红外、毫米波	MXM838	203	毫米波
ACED	155	双色红外、3mm 波主被动	AIFS	203	红外、毫米波

二、探测与反隐身技术

1. 雷达探测技术

雷达反隐身技术是指使雷达探测、跟踪、定位隐身目标而采用的技术。通过采取扩展雷达的工作频段、改进雷达的探测性能、发展新技术体制雷达等途径,可提高雷达的反隐身能力。现在要提高雷达的反隐身探测能力有两个途径:一是改进现有雷达本身的探测能力;二是研制新型雷达或使用新的探测方法。

雷达探测距离的增加必须从提高雷达接收信号处理能力入手,力争使雷达的灵敏度提高几个数量级。可以通过采用超高频和毫米波超高速集成电路、单片集成电路技术、计算机数据处理技术、数字滤波、电荷耦合器件、声表面滤波和光学方法等先进技术来提高信号处理能力。在此基础上,再通过雷达联网来提高现有雷达的反隐身能力。另外提高探测隐身目标能力的先进技术还包括频率捷变技术、扩频技术、低旁瓣或旁瓣对消、窄波束、置零技术、多波束、极化变换、伪随机噪声、恒虚警电路等技术。还可以通过功率合成技术和大时宽脉冲压缩技术,来增加雷达的发射功率。

(1) 超宽带雷达

超宽带雷达的定义:雷达发射信号的分数带宽大于 0.25 的雷达。超宽带雷达的发射脉冲极窄,峰值功率很高、频谱分布在很宽的范围内,具有相当高的距离分辨力,能够有效对付采用雷达吸波材料和平滑外形等隐身技术的隐身目标。有以下几点优势和能力:①测距分辨率可高达厘米量级;②具有能够识别和区分各目标的重要能力;③发射的脉冲包含许多频率,能够突破窄频段吸波材料的吸波效应;④具有对单个或多个目标的高分辨率成像能力;⑤具有较强的穿透植被、土壤和墙壁的能力;⑥具有一定对抗电子对抗的能力。美国和俄罗斯在超宽带雷达的研制方面已走在前列,充分研究和总结超宽带技术在各方面的进展,有助于形成一个完整的理论体系,加速超宽带产品的开发。

(2) 超视距雷达

当前隐身系统主要对抗频率为 0.2~29GHz 的厘米波雷达,超视距雷达工作波长达 10m,靠谐振效应探测目标,几乎不受现有雷达波吸收材料的影响。同

时，超视距雷达波是经过电离层反射后照射到飞行器上的，因此它成了探测隐身武器的有力工具。国外实验表明，超视距雷达可以发现 2800km 外、飞行高度 150~7500m、雷达截面为 $0.1\sim 0.3\text{m}^2$ 的目标。

(3) 双基地或多基地雷达

多基地雷达的发射机和接收机处在不同的地方，最简单的多基地雷达是由一部发射机和一部接收机组成的双基地雷达。多基地雷达利用目标的侧向或前向反射回波，从不同的方向对隐身飞机进行探测，破坏了隐身武器通过减少后向反射进行隐身的目的。测试表明，利用前后向反射探测的雷达截面值比仅利用后向反射的高约 15dB。多基地雷达的发射站和接收站相对目标之间的夹角越大，就越有可能捕获到隐身目标。由于多基地雷达的接收机是被动接收，所以不会受到定向干扰和反辐射导弹的威胁。

(4) 双波段雷达和多种探测装置融合

美国反隐身导弹技术的核心是频带相隔较宽的双波段雷达系统。这种雷达使用一个频率非常低的频段，探测远距离目标；使用另一个频率较高的频段，对目标进行非常精确的测量和定位。最后把融合的雷达信息与由光学和红外探测装置得到的部分数据进行综合，构成能精确确定和分析目标的多频谱系统。

(5) 机载和浮空器载雷达

隐身飞行器的隐身重点一般放在鼻锥方向 $\pm 45^\circ$ 范围内，机载或浮空器载探测系统通过俯视探测，容易探测隐身目标。美国空军的 E-3A 预警机的 S 波段脉冲多普勒雷达在高空巡航时可发现 100km 距离以内、雷达截面为 $0.1\sim 0.3\text{m}^2$ 的目标。

飞艇和气球等浮空器也有可能作为反隐身平台。1996 年，美国批准“联合陆地攻击巡航导弹空中网络探测器”计划，这种在气球平台上载有监视雷达和跟踪照射雷达的系统能探测、跟踪、辅助拦截低空巡航导弹，可连续工作 32 天。Mark7-CS 对流层系留气球雷达，高度 3000m，采用 TPS-63 雷达，探测隐身巡航导弹的距离为 56km。

2. 红外探测技术

红外探测是利用特定波段的红外线来实现对物体目标的探测与跟踪，红外探测技术是将不可见的红外辐射线探测出并将其转换为可测量的信号。任何物体，只要其温度高于热力学零度，就会发出红外辐射，就能被红外探测设备所探测，因此红外探测技术有其独特的优点，从而在军事国防和民用领域得到了广泛的研究和应用。

红外探测技术的主要优点在于符合隐身飞机自身高度隐蔽性的要求，即被动探测、不辐射电磁波，而且由于工作波长较微波雷达短 3~4 个数量级，可以形成高度细节的目标图像，目标分辨率高。随着隐身技术的发展，红外探测系统正

逐步成为新一代战斗机的主要传感器之一，与电磁微波雷达处在了同样重要的位置。

到目前为止，红外探测技术已发展到第四代，现已大批装备的主流产品是采用扫描焦平面 4N 或 6N 阵列的第二代前视红外系统。扫描焦平面阵列（FPA）是碲镉汞多元线列并联扫描技术的进一步发展。它不仅增加线列的单元数量，而且增加线列（行）数，形成串并扫描，同时采用多级时间延迟和积分（TDI）技术把串联扫描同一行单元的光电信号依次延迟并相加。它采用阻抗低的光伏型碲镉汞材料，能与硅电荷耦合器电路低耗耦合。碲镉汞多元焦平面阵列与硅电荷耦合器中间由钢柱连接形成夹层结构从而制成混成双片焦平面阵列红外探测器。

扫描焦平面阵列的优点在于降低了噪声等效温差（NETD）和最小可分辨温差（MRTD），因而使前视红外的探测距离增大 50% 甚至 1 倍。但是，它的探测单元数量仍然不够多，满足不了全视场成像的要求，属于扫描线列与凝视焦平面阵列之间的过渡型。

第三代前视红外的标志是凝视焦平面阵列。与第二代产品相比，增加了探测单元的数量，取消了光机扫描器；利用微电子技术把探测阵列和各种信息处理电路集成在一个芯片或混成在两个芯片上，消除大量从杜瓦瓶内向外的引线；以新型中、长波红外探测材料，替代难加工且昂贵的碲镉汞。凝视焦平面阵列被认为是热成像（包括前视红外）技术的一次革命，成为第三代热成像器的标志。在最新的机载光电探测系统中，已经开始大范围地采用第三代凝视型前视红外，如 LANTIRN2000、LITENING II 等项目中，都采用了 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的红外焦平面器件。

第四代前视红外体现在中波和长波波段的同時工作能力，最近出现的多量子阱红外探测器为这种双波段探测器提供了一种方法。具有不同光谱灵敏度的多量子阱层可以在纵向集成的结构中生长，通过多量子阱叠层的中波红外和长波红外部分产生分开的接触层，实现了精确的像元匹配。多量子阱技术为人们提供了一种容易生产的多色焦平面阵列。这种技术允许人们对两种或者更多的颜色同时进行积分和读出，每一种颜色都在同一个焦平面阵列上得到像元配准。这种像元配准多色焦平面阵列提高了系统的性能，同时也大大简化了系统其他元件的设计，简化了现有多色设计中的多个焦平面阵列、扫描器、制冷器等，可降低系统的成本，减轻系统的重量，缩小体积，并能减轻计算机的处理负担，从而可以应用于更多的军事领域。

3. 利用声学探测装置探测隐身飞机和导弹

为了成功地对付 B-2 轰炸机，要求在 25~200mile（40~320km）远处进行探测、跟踪、杀伤。为此，美军提出了声学探测系统。

声学探测系统的基本探测装置是麦克风，由 5 个扬声器组成的探测器阵列可