

YINSHEN CAILIAO CESHU JISHU

# 隐身材料测试技术

孙敏 张雨 主编



化学工业出版社

YINSHEN CAILIAO CESHU JISHU

# 隐身材料测试技术

孙敏 张雨 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书重点介绍了吸波材料电磁参数测试技术、隐身吸波剂测试技术、雷达隐身测试技术、红外与可见光隐身测试技术、激光隐身测试技术、多频谱隐身测试技术和等离子体隐身测试技术等。每一测试技术均详细地介绍了其原理、方法、效果及评价,且列出了大量实例,是武器装备设计、制造、研究、管理以及隐身技术从业人员必读必备之书,也可作为教材使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

隐身材料测试技术/孙敏,张雨主编. —北京:化学工业出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-122-18386-6

I. ①隐… II. ①孙… ②张… III. ①隐身技术-材料技术-测试技术 IV. ①TB34

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第212239号

责任编辑:丁尚林  
责任校对:战河红

文字编辑:徐雪华  
装帧设计:韩飞

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张27¼

字数720千字

2014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:128.00元

版权所有 违者必究

## 本书编写人员名单

主 编：孙 敏 张 雨

副 主 编：冯典英 冀克俭 陈方汀 赵 华 荀其宁 张玉龙

参编人员：

王学琴	王宝柱	邓卫华	付兴中	石 磊	辛宗伟
任 滨	刘 新	刘 霞	刘元俊	刘云松	华 兰
孙 文	许 峰	张 伟	张 坤	张 彬	张文申
张军英	张学范	张宝芹	张智勇	李 萍	李国强
李洪彬	李晓甫	李桂群	李艳玲	杜明欣	杨欣欣
肖德凯	邵鸿飞	陈 艳	拓 锐	林 帅	周 彤
姜维维	柳洪超	段长生	胡国星	赵京城	赵晓刚
赵燕军	夏 敏	徐俊田	高岩立	高泉喜	崔 剑
梁秀丽	隋 峰	黄玉松	傅兴天	樊永元	潘士兵
潘忠泉	颜 华				

## 前言

## FOREWORD

隐身技术实际上是反侦察与反探测技术，是提高武器装备战场生存能力的关键技术之一。在未来的信息化战争中，要实现信息的获取与反获取，既可有效地保存自己，又能有效地消灭敌人，夺取战争主动权，隐身技术程度的高低则是重要的因素。另外，隐身技术水平也是衡量新一代武器装备的重要战技指标，代表了新型武器装备的重要技术特征。要确保武器装备隐身实战效果，要确保所用隐身技术的有效性和实用性，必须对其进行测试或检测，可以说隐身测试技术是弄清隐身技术性能优劣，确保其在武器装备上有效应用，并在战场上发挥作用的重要的技术手段。在隐身技术已广泛在国内外武器装备中应用的今天，隐身测试技术的发展显得格外重要，本书的编写则顺应了这一发展需要，并且填补了这一领域的空白。

本书普及了隐身测试技术的基础知识，宣传并推广隐身测试技术近年来应用与研究成果，较为详细地介绍了吸波材料电磁参数测试技术、隐身吸波剂测试技术、雷达隐身测试技术、红外与可见光隐身测试技术、激光隐身测试技术、多频谱隐身测试技术和等离子体隐身测试技术等。每一测试技术均详细地介绍了其原理、方法、效果及评价，且列出了大量实例，是武器装备设计、制造、研究、管理以及隐身技术从业人员必读必备之书，也可作为教材使用。

本书突出实用性、先进性、可操作性，理论叙述从简，侧重于用实例与实用数据说明问题。整体结构清晰严谨，语言简洁流畅，图文并茂，数据翔实可靠，信息量大。若本书的出版发行能对我国隐身测试技术发展起到促进作用，编者将感到无比欣慰。

本书由中国兵器工业集团第五三研究所组织编写，由于水平有限，文中不足之处在所难免，敬请读者批评指教。

编者

2014年3月

# 目录

## CONTENTS

### 第一章 探测与隐身技术 1

- 一、面临的形势与任务 ..... 1
- 二、探测技术 ..... 3
- 三、隐身技术 ..... 7

### 第二章 吸波材料电磁参数的测试技术 14

- 第一节 基础知识 ..... 14
  - 一、简介 ..... 14
  - 二、电磁参数测试方法与复介电常数、复磁导率的测试 ..... 15
- 第二节 传输/反射测试技术 ..... 22
  - 一、简介 ..... 22
  - 二、矩形波导传输/反射法测量电磁参数 ..... 35
  - 三、同轴传输/反射法测量电磁参数 ..... 41
  - 四、反射式谐振腔微扰法测量介电常数 ..... 44
  - 五、用同轴线法测试材料的电磁参数 ..... 47
  - 六、用多样品法测试材料的电磁参数 ..... 50
  - 七、用传输/反射法测得的散射参数推算材料电磁参数的新方法 ..... 53
- 第三节 吸波材料及其电磁参数的测试技术 ..... 55
  - 一、吸波材料 ..... 55
  - 二、掺杂 M 型铁氧体电磁性能测试 ..... 58
  - 三、TiO<sub>2</sub>与碳纳米管混合物的电磁参数测定 ..... 60
  - 四、碳包镍纳米粒子电磁性能测试 ..... 62
  - 五、羰基铁粉/橡胶吸波材料电磁参数的测试 ..... 65
  - 六、BZN 陶瓷/石蜡吸波材料电磁参数的测试 ..... 67

### 第三章 隐身吸波剂的测试技术 71

- 第一节 简介 ..... 71
  - 一、基本概念 ..... 71
  - 二、分类 ..... 71
  - 三、吸波隐身机理 ..... 71
  - 四、吸波材料的主要类型与特性 ..... 73

五、对吸波材料性能的测试表征技术 .....	73
第二节 常用隐身吸波剂 .....	75
一、铁氧体吸波剂 .....	75
二、羰基铁吸波剂 .....	83
三、磁性微球吸波剂 .....	87
第三节 新型隐身吸波剂 .....	92
一、多晶铁纤维吸波剂 .....	92
二、碳化硅与氧化硅吸波剂的测试 .....	101
三、十二烷基苯磺酸钠掺杂的聚吡咯吸波剂的测试 .....	109
四、磁介质吸波剂/多孔金属材料吸波性能的测试 .....	113
五、铁钴镍合金粒子/石墨薄片复合材料的吸波性能 测试 .....	115
六、纳米硫化锑吸波剂的测试 .....	118
七、新型视黄基席夫碱盐吸波性能的测试 .....	123
八、碳纳米管吸波剂的测试 .....	124

## 第四章 雷达隐身测试技术

129

第一节 雷达隐身材料与测试技术分析 .....	129
一、简介 .....	129
二、隐身材料技术与隐身效果 .....	129
三、雷达无源干扰效果测试技术 .....	132
四、超高频雷达无源干扰技术 .....	132
第二节 雷达隐身用主要测试技术 .....	133
一、简介 .....	133
二、左手损耗介质电磁参量的表示方法 .....	137
三、雷达截面的测试技术 .....	145
四、雷达散射截面测试技术 .....	146
五、基于室外场 RCS 精确测试技术 .....	150
六、大地靶场地面散射特性的测试方法 .....	153
七、连续波 RCS 测试技术 .....	158
八、单点频与宽带扫频测试目标 RCS 测试技术 .....	165
九、宽带 RCS 自动测试系统设计与应用 .....	168
十、球面波环式散射远近场变换算法 .....	170
第三节 雷达吸波涂层的测试技术 .....	174
一、雷达吸波涂层的设计基础知识 .....	174
二、毫米波涂层隐身材料吸波性能的测试 .....	178
三、雷达吸波涂层的在线测量方法 .....	181
四、8mm 波段隐身涂层的设计与性能测试 .....	184
五、掺杂 $\text{Sm}_2\text{O}_3$ /丙烯酸酯涂层的雷达吸波性能测试 .....	187
第四节 结构型雷达隐身材料的测试技术 .....	191
一、结构吸波材料的结构设计 .....	191
二、结构型雷达隐身材料的测试方法 .....	193



三、碳纤维复合材料吸波性能的测试 .....	197
四、碳纤维增强水泥复合材料结构的隐身性能测试 .....	201
五、厘米波/毫米波兼容隐身湿纺织物的性能测试 .....	207
六、二维圆柱超材料隐身罩的设计和测试 .....	210
七、罩体结构材料介电常数高温带测试方法 .....	212
第五节 武器装备实物雷达隐身测试技术 .....	215
一、飞机雷达隐身测试模型设计 .....	215
二、两种隐身飞机模型的雷达散射特性测试与分析 .....	217
三、翼剖面介质构形的隐身缩比模型数值计算 .....	221
四、飞行器目标的双站散射特性的测试分析 .....	225
五、飞行器表面缝隙电磁散射特性的测试 .....	227
六、基于 MLFMA 的飞行器电磁散射特性测试 .....	233
七、大型水面舰船的雷达截面积测试 .....	238

## 第五章 红外与可见光隐身的测试技术

242

第一节 简介 .....	242
一、红外隐身技术 .....	242
二、红外隐身的性能表征 .....	245
三、红外隐身性能测试与计量技术 .....	251
第二节 红外隐身主要测试技术 .....	257
一、基于数字图像处理的人类视觉对比度分辨率限制 测定方法 .....	257
二、红外隐身材料的分析与测试技术 .....	262
三、红外伪装效果仿真检测方法 .....	264
四、迷彩伪装效果检测评价方法 .....	265
五、用偏振散射光谱测试红外隐身(伪装)材料 .....	269
第三节 红外隐身(伪装)吸收材料的测试技术 .....	273
一、颜料粉体红外发射率的测试 .....	273
二、葡萄糖基碳包覆 ZnFeO 红外发射率的测试 .....	277
三、改性钡铁氧体红外隐身性能的测试 .....	280
四、改性聚乙烯隐身性能的测试 .....	282
五、石蜡微胶囊化红外隐身(伪装)性能的测试 .....	284
六、纳米 ZnO 红外发射率的测试 .....	287
七、碳纳米管自组装材料性能测试 .....	290
第四节 红外隐身(伪装)涂层与薄膜的测试技术 .....	291
一、红外隐身涂层的测试技术 .....	291
二、红外隐身薄膜的测试技术 .....	325
第五节 红外隐身(伪装)装具与实物的测试技术 .....	337
一、可见光/热红外隐身(伪装)织物的性能测试 .....	337
二、涤棉迷彩面料的隐身性能测试 .....	339
三、染色涤纶的近红外伪装性能的测试 .....	343
四、伪装网的性能测试 .....	347



五、迷彩战服的测试	348
六、军用迷彩织物色牢度的测试	351
七、红外伪装篷布的测试	355
八、特种车辆动力舱温度场的红外隐身测试	357
九、无人侦察机红外辐射特性测试与视距估算	359
十、反舰导弹的舰艇红外隐身效果评估方法	365

## 第六章 激光隐身测试技术

368

第一节 激光隐身技术简介	368
一、激光隐身原理	368
二、激光隐身主要途径	369
三、国外武器装备激光隐身的评价方法	371
第二节 激光隐身效果评价技术	374
一、激光隐身性能的表征技术	374
二、激光隐身效果的评价方法	374
第三节 激光隐身测试技术	376
一、激光隐身性能外场测试	376
二、激光隐身性能实验室测试	378
三、激光隐身材料测试举例	380
第四节 激光隐身计量技术	389
一、激光参数计量测试	389
二、激光隐身计量应当开展的主要工作	394
三、激光测距机测距准确度校准	395

## 第七章 多频谱隐身与等离子隐身的测试技术

396

第一节 多频谱隐身的测试技术	396
一、红外/雷达隐身及其测试技术	396
二、激光/红外隐身及其测试技术	400
三、毫米波/激光隐身的测试技术	406
四、雷达/激光隐身测试技术	408
五、红外/雷达/激光隐身测试技术	410
第二节 等离子体隐身的测试技术	414
一、简介	414
二、等离子体隐身工程设计参数选取	418
三、等离子体隐身技术测试方法	419

## 参考文献

424

# 第一章 探测与隐身技术

## 一、面临的形势与任务

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。

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。这种威胁具有大纵深、全方位、全天候、多层次等显著特点。因此，在高技术战争中，先进的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、空、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”。

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	—	合成孔径技术	—
	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

(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 1-2 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 1.06μm 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	1μm, 10μm 双色红外	地面、车载或直升机	75~4000
“米兰” (MILAN)	欧盟	红外热像与可见光摄影机	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	传感器类型	名称	弹径/mm	传感器类型
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、探测技术

### (一) 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、恒虚警电路等技术等。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) 超宽带雷达技术在军事上的应用 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 0.1~0.3m<sup>2</sup> 的目标。目前,美军正在建造米波段的 AN/FPS-118 超视距预警雷达和可移动的小型战术超视距雷达。澳大利亚、俄罗斯、英国、法国、日本等也在部署超视距雷达。但超视距雷达的缺点是它提供的跟踪和位置数据不够精确。美军也在不断发展毫米波雷达技术。

(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,就更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。

目前，美国、英国、俄罗斯等军事大国都非常重视对双（多）基地雷达的研究、发展和使用，并已经取得了显著的成果。特别是美国，已将多个双（多）基地雷达系统应用于国土防御网中，担负着远、中、近程的战略警戒任务。从 20 世纪 80 年代初开始，美国 DARPA 和国防部还开展了多方面的开发工作，以评估它在执行多种战术防御任务时的工效，结果令人满意。

(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。美军正在研制的舰载 X 和 S 双波段雷达系统，一个波段用于搜索弹道导弹，而另一个波段与远程光学和红外系统用于收集导弹的物理量，其分离情况、材料甚至其精度。

(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  $0.1\text{m}^2 \sim 0.3\text{m}^2$  的目标。美海军正在研制的“钻石眼”预警机也能有效地探测隐身目标，俄罗斯、英国、印度等国都很重视发展预警机的工作。

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。

## (二) 红外探测技术

红外探测是利用特定波段的红外光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光探测出并将其转换为可测量的信号。任何物体，只要其温度高于绝对零度，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。

目前，美国、法国、德国、英国等已经研制出  $48 \times 4$  单元、 $288 \times 4$  单元、 $480 \times 4$  单元和  $960 \times 4$  单元光伏型碲镉汞扫描焦平面阵列，美国主张在第二代前视红外中采用  $480 \times 4$  单元，欧洲则采用  $288 \times 4$  单元。扫描焦平面阵列已经成熟并列入 RAH-66 “科曼奇”直升机等计划，开始在第二代前视红外以及红外成像导弹寻的器和红外搜索跟踪系统中应用。其分辨率较第一代前视红外提高了 50%~60%，探测距离更远，在恶劣气象条件下的工作也更

有效。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二代凝视型前视红外, 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。

### (三) 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 25~200 英里 (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以探测 8km 外的 B-2 轰炸机的声音, 能够粗略估计信号到达的方向。每个探测器阵列将探测和方向信号传送给中央设施进行最后处理。为了保证 B-2 轰炸机在 15min 内 (飞行 240km) 处于被跟踪状态, 要求“警戒线”覆盖  $544\text{km}^2$  地区, 这需要 27000 个探测器阵列。此外, 战术、干扰和其他设计问题也将降低该系统的效能。但这并不说明声探测系统没有用, 而是说其比较复杂。

### (四) 激光探测技术

激光探测是将激光信号通过探测器转换成电信号的过程, 在激光接收以及激光测距、通信、跟踪、制导、雷达等研究和应用中具有重要的作用, 有直接探测和外差探测两类。直接探测的方法比较简单实用, 普遍用于可见光和近红外波段。外差探测方法能提高信噪比和对微弱信号的探测能力, 但设备比较复杂, 且要求信号有很好的相干性, 主要用于中、远红外波段。随着激光技术在武器装备中的应用, 侦察敌方激光制导炸弹、激光测距等激光信号, 对于提高己方生存能力和重点目标的防御能力具有重要意义, 已成为各国武器装备和技术发展的热点。

### (五) 紫外探测技术

早在 20 世纪 50 年代, 人们即开始了对紫外探测技术的研究。紫外探测技术是继红外和激光探测技术之后发展起来的又一军民两用光电探测技术。紫外告警探测器是通过探测导弹尾翼中的紫外线辐射来探测目标的。紫外告警设备是战术飞机等作战平台用来对来袭导弹进行逼近告警的一种光电探测装备, 即通过探测来袭导弹尾焰的紫外辐射, 以判断威胁方向及



程度,实时发出警报信息,提示驾驶员或者自动选择合适时机,实施有效干扰,采取规避等措施,对抗敌方导弹的攻击。

尽管红外制导是目前导弹的主流制导方式,但随着红外对抗技术的日趋成熟,红外制导导弹的功效将受到严重威胁。为了反红外对抗技术、制导技术正在向双色制导方面发展,这其中也包括红外-紫外双色制导方式。

高灵敏度、低噪声紫外探测器件的研制是紫外探测技术的另一关键。目前,紫外探测器有如下几类:紫外真空二极管、分离型紫外光电倍增管(UV-PMT)、成像型紫外变像管、紫外增强器及紫外摄像管等。而最新的一种是带微通道的光电倍增管(MCP-PMT),它具有响应速度快、抗磁场干扰能力强、体积小、重量轻且供电电路简单等特点。目前,带有MCP结构的近贴式聚焦型紫外变像管及增强器以及与之相应的自扫描阵列也已经出现,并被用于紫外探测卫星、空间防务及火箭-导弹尾焰紫外探测等方面。

国外在固体紫外探测器件方面亦有发展,目前增强型硅光电二极管、GaAsP和GaP薄膜紫外固体器件、GaN紫外探测器、紫外CCD(UV-CCD)等器件都已在开发研究之中。

## (六) 无源微波探测系统

无源探测系统本身并不发射电磁波,而仅仅依靠被动地接收其他辐射源的电磁信号对隐身目标进行跟踪和定位。按照所依靠辐射源的不同,无源探测系统分为两类:

(1) 通过接收被探测目标辐射的电磁信号对其跟踪和定位。隐身飞机在突防的过程中,为了搜索目标、指挥联络等,必然使用机载雷达等电子设备,电子设备发出的电磁波有可能被无源雷达发现。据报道,捷克生产的“塔玛拉”无源雷达能够探测到隐身飞机。

(2) 利用电台、电视台甚至民用移动电话发射台在近地空间传输的电磁波,通过区分和处理隐身目标反射的这些电磁波的信号,探测、识别和跟踪隐身目标。此方法的优点:第一,民用电视发射机和中继站网、移动电话发射台,在实战中被敌方攻击的可能性小;第二,接收站不以辐射方式工作且机动性强,不易对其探测和攻击,生存能力强;第三,信号源是40~400MHz的低频、波长较长的电磁波,有利于探测隐身目标和低空目标;第四,该系统简单,尺寸小,可以安装在机动平台上;第五,该系统可以昼夜和全天候工作;第六,价格低廉。

但是,这种被动探测方法需要解决一系列技术问题,主要是必须在无线电发射机直接辐射信号背景上鉴别出很弱的目标反射信号(衰减千万分之一至万分之一)。此外,为测定目标角坐标需要高速测量和信号幅相特性处理设备,需要新一代超高性能信息处理机。目前,美国、法国和德国正在研制这种探测技术的系统。

美国洛克希德·马丁公司研制的这种跟踪飞机、直升机、巡航导弹和弹道导弹的新型被动探测系统,称为“隐蔽哨兵”。它实际是一个无源接收站,利用商业调频无线电台和电视台发射的50~800MHz连续波信号能量,检测和跟踪监视区内的运动目标。该系统由大动态范围数字接收机、相控阵接收天线、每秒千兆次浮点运算的高性能商用并行处理器和软件等组成。大约2.5m的面阵天线安装在建筑物侧面,能获得关于频率反射能量的精确方向。该测试系统采用标准电视接收天线,一个平面阵能覆盖105°方位,仰角50°,横向视角60°内覆盖最好。要求覆盖360°方位则需要用多个面阵,它们可共享一个处理器,但更新速率会降低。该系统的核心是“无源相干定位”技术。该系统的早期实验证明,它跟踪10m<sup>2</sup>小目标的距离可达180km,改进后可达220km。该系统经过改进后,最终能同时跟踪200个以上的目标,间隔分辨力为15m。

法国“汤姆森-CSF”公司研制了“黑暗”探测系统,配置在巴黎市郊,它从20km外的埃菲尔铁塔上以及距巴黎180km的电视发射机信号中获得目标信息。据报道,该系统与典



型的空间探测雷达的指标可一比高低。在接收站实验时所用的是“亚其”式波道天线（八木天线），价格不超过400法郎。

德国西门子公司将移动电话设施作为对付隐身飞机的雷达系统。该系统将移动电话基站作为“发射机”，用于照射空中目标，使用手提箱大小的接收机系统截获目标反射的信号。通过计算接收到的几个基站的信号之间的相位差，就能提供飞机的位置。

无源探测雷达系统将朝着高精度、高速度、组网型、小型化的方向发展，而实现高精度快速探测有赖于电磁环境监测、大动态数字接收机、直达波对消、微弱信号检测、机动目标检测、多平台组网等多项关键技术的突破。

总之，采用雷达、红外、紫外、激光等技术的复合型复合光电探测器系统，并不断拓展其响应频谱范围，降低虚警率和提高多传感器数据融合能力，才能满足未来战场反隐身探测技术的需要。根据目前我国经济状况和军队装备水平的现实情况，提高现有雷达的探测能力和信号处理质量不失为一种效费比较高的反隐身手段。

### 三、隐身技术

#### （一）目标特征信号控制技术

目标特征信号控制技术（又称隐身技术）是集空气动力学、材料学、电磁学、工程物理等诸多技术的一门综合性交叉学科，介绍如何减少武器系统的目标特征信号，使其难以被探测系统发现和跟踪的各种技术，其中包括雷达特征信号控制技术、声频特征信号控制技术、红外特征信号控制技术、磁特征信号控制技术等。

由于不同武器系统的作战环境各不相同，其隐身设计的侧重点也就有所不同，因此必须综合分析威胁条件和可达性要求，对隐身、气动、结构等指标进行综合考虑，组合各项隐身技术，使武器达到预期的隐身效果。

在隐身飞行器的总体设计中，需要考虑气动与隐身外形之间的矛盾等众多因素，如采用S进气道或埋入式进气道和矢量推力技术对发动机推力影响很大，降低了发动机的效率，从而影响飞行器的航程和负载能力；非常外形对武器系统结构强度设计提出了新的要求；吸波材料将增加飞行器的重量，采用保形技术将武器安排在机舱内，将减少武器的有效载荷，天线、进气道的位置应兼顾作战环境要求，发动机的安排有利于红外特征信号抑制等。

在隐身舰船的设计中，应主要考虑雷达隐身，兼顾红外及磁特征信号控制。雷达隐身以采用外形技术为主，对舰船侧面的船体应向外或向内倾斜一定角度，上层建筑则采用大倾角设计，避免角反射器，同时对船侧覆贴吸波材料，排气管应安排在接近水线，以便于将废气直接排入水中。对舰艇表面的传感器及武器系统必须采用专门的隐身措施，如对雷达、通信天线加装频率选择表面，舰炮及导弹发射架用涂有吸波材料的倾斜外壳遮挡起来。采用这些措施后势必降低舰船对威胁的探测能力，减少武器装载数量，降低舰船的作战能力。同时，对船体覆贴吸波材料后维护困难。

潜艇的隐身设计以声频特征信号控制为主，兼顾磁、雷达、红外和尾流化学特征信号控制。研究的重点放在低噪声流线外形设计、新型推进系统、浮筏隔振、管路噪声以及声隐身材料（如消声瓦）等方面。应注意采用减振浮筏或消声瓦材料将减少潜艇的可用空间、增加潜艇重量、降低有效载荷，同时，应考虑采用磁性材料制造潜艇外壳或内部安装消磁系统。

坦克等路上战车所面临的威胁主要包括毫米波雷达、红外以及可见光指令制导导弹，因此要求坦克的隐身以雷达、红外隐身为主，兼顾可见光隐身。采用外形技术降低战车雷达目标特征信号的同时，应考虑合理安排气/冷却管的位置，减少排气中的粒子杂质，并采用兼顾雷达、红外隐身材料进一步降低武器特征信号。

工事、机库等设施的隐身设计应以雷达隐身为主，兼顾红外、可见光隐身，主要采用复杂的外形布局和应用兼顾雷达、红外复合隐身材料为主。

目前的探测系统仍以雷达为主，因此隐身技术研究仍以雷达目标控制信号为主，声、光、红外等特征信号控制为辅，逐步向多功能隐身方向发展。

## （二）雷达目标特征信号控制技术

### 1. 雷达有源隐身技术

近年来雷达有源隐身技术越来越受到专家们的青睐，它是指利用有源手段使武器装备规避声、光、电、热等探测设备探测的一种技术，其实现的主要技术途径如下：

（1）电子欺骗和有源干扰 利用电子干扰机可使作战飞机的生存能力提高 40% 以上，主要措施：①用先进计算机鉴别战斗机可能遭到威胁的探测工作频率，用这种频率发射脉冲，使敌方探测器上出现虚假信号；②在兵器上安装干扰机，不断发射干扰信号；③采用先进的诱饵系统，这种诱饵能辨认敌方雷达或红外探测信号，并能快速产生对抗信号，使敌方误认为诱饵是真目标。美国正在研究一种新型诱饵，它能发射甚高频（VHF）、特高频（UHF）和微波信号，可以模仿隐身飞机目标。

（2）使用低截获概率探测器 在保证完成任务的情况下，尽量减少机载设备辐射信号被截获的机会，如自动管理发射功率，一旦捕获到目标，立即自动将辐射能量降低到跟踪目标所需能量的最小值；在时间、空间和频谱方面控制信号的发射，并快速改变其发射频率等。美国 B-2、F-22 等隐身飞机都装有低截获概率雷达。

（3）采取有源对消法 利用在目标上装备有源对消电子设备，产生与雷达反射波同频率、同振幅但相位相反的电磁波来减弱或消除反射波，从而使敌方雷达接收不到目标反射波信号。为此，飞机上需要安装传感器，它必须能测量出被对消信号的频率、波形、强度和方向，信息系统的软件需含有各种角度和频率下飞机的雷达反射率详细数据的复杂信号处理系统，首先预测入射波如何反射，然后产生并发射一个合适的对消信号。美国的 B-2 隐身轰击机所载的 SR-63 电子战设备就是一种有源对消系统，它主动发射电磁波来消除照射在其机体上的雷达能量。美国国防部预测，在未来十几年内，有源隐身技术可能取代降低雷达特征信号技术；到 2015 年，武器系统将装备“一体化欺骗装备”。美国计划在 2025 年采用有源技术实现卫星隐身。

### 2. 雷达吸波材料

吸波材料技术的发展和运用是实现武器系统隐身重要措施之一，是隐身技术发展的关键。

#### （1）常见非结构型吸波材料

① 铁氧体吸波涂料。铁氧体吸波材料已广泛应用于隐身技术，如 TR21 高空侦察机上使用了铁氧体吸波涂层。研究表明，在较低温度下，通过硬脂酸凝胶法可制备六角晶系铁氧体纳米晶，其电磁参数易于调节、介电常数较低、粒度均匀，吸波性能优于铁氧体微粉。由于氧化铁只能用于 250℃ 以下，而飞行器在飞行时与空气摩擦产生高温，因此西方国家研制出了锂镉铁氧体、锂铈铁氧体、镍镉铁氧体、陶瓷铁氧体等新型铁氧体材料。

② 多晶铁纤维吸波材料。这种材料是通过涡流损耗等多种机制损耗电磁波能量，因而可以实现宽频带高吸收，而且可比一般吸波涂料减重 40%~60%。美国 3M 公司研制的吸波涂料中使用了直径为 0.26 $\mu\text{m}$ 、长度为 6.5 $\mu\text{m}$  的多晶铁纤维。据报道，在法国战略导弹与再入式飞行器上应用了该涂料。

③ 金属微粉吸波材料。金属微粉吸波材料具有微波磁导率较高、温度稳定性好等特点。它主要通过磁滞损耗、涡流损耗等吸收损耗电磁波，主要有两类，一类是羰基金属微粉，包