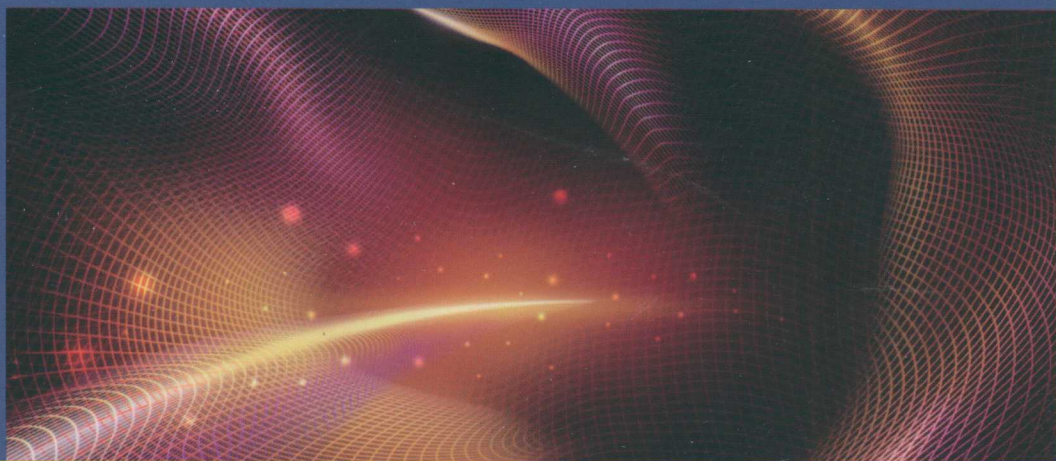


新材料新工艺新技术丛书



# 隐身材料技术

YINSHEN CAILIAO JISHU

主编 孙 敏 于名讯  
执行主编 张玉龙 李 萍  
副主编 张 雨 汪业福 邵颖慧 刘宝玉 曹根顺



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TB34  
J0136

新材料新工艺新技术丛书

# 隐身材料技术

主 编 孙 敏 于名讯  
执行主编 张玉龙 李 萍  
副 主 编 张 雨 汪业福 邵颖慧  
刘宝玉 曹根顺

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

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。另外,还对综合隐身材料结构以及隐身材料在飞机、武装直升机、导弹、坦克装甲车辆、舰船、水雷和人体目标上的应用作了较全面的介绍。与此同时还扼要介绍了隐身技术的基础知识。

本书是材料研究人员、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。

### 图书在版编目(CIP)数据

隐身材料技术 / 孙敏,于名讯主编. —北京:国防工业出版社,2013.7

(新材料新工艺新技术丛书)

ISBN 978-7-118-08582-2

I. ①隐... II. ①孙...②于... III. ①隐身技术-材料技术 IV. ①TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 288046 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京市李史山胶印厂

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 17 字数 426 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 78.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

## 本书编委会

主 编 孙 敏 于名讯  
执行主编 张玉龙 李 萍  
副主编 张 雨 汪业福 邵颖慧 刘宝玉 曹根顺  
编 委 (排名不分先后)

于名讯	孔祥海	马 源	王四清	王国义
王敏芳	王 超	王建江	石 磊	厉 宁
刘乃环	刘向平	刘志成	刘宝玉	刘朝辉
许劲松	齐 昕	朱洪立	孙英富	孙德强
闫惠兰	任 滨	陈跃如	汪业福	杜仕国
李旭东	李迎春	李宏伟	李 丽	李树虎
李 萍	李桂变	李桂群	杨 耘	杨振强
杨晓冬	张文栓	张玉龙	张用兵	张冬梅
张宝东	张德琪	张 蕾	邵颖惠	吴建全
周 力	周敏华	官周国	段金栋	郝英华
姚春臣	赵媛媛	郭 毅	姜 萍	唐 华
高 岩	陶文斌	盖敏慧	窦 鹏	黄晓霞
黄 晖	崔 英	曹根顺	普朝光	路香兰
潘士兵	穆卫军	薛维宝	戴均平	张 岩
刘忠刚	陈晓理			



# 前 言

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,隐身技术可分为可见光隐身技术、雷达波隐身技术、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,中国兵工学会科技出版工作委员会、非金属专业委员会和山东兵工学会组织编写了本书,全书共8章,较为详细地介绍了隐身材料、雷达隐身材料、可见光隐身材料、红外隐身材料、激光隐身材料、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,此外,还介绍了综合隐身材料结构与性能,以及隐身材料在飞机、武装直升机、坦克装甲车辆、导弹、舰船、水雷和人体目标等方面的应用。与此同时还扼要介绍了隐身技术的基础知识。本书是材料研究人员、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。

作者

2012.8

V

# 目 录

第1章 概述 .....	1
1.1 简介 .....	1
1.1.1 概念 .....	1
1.1.2 分类 .....	1
1.2 面临的形势与任务 .....	2
1.2.1 武器装备主要战场威胁分析 .....	2
1.2.2 探测与反隐身技术 .....	4
1.3 隐身技术 .....	9
1.3.1 目标特征信号控制技术 .....	9
1.3.2 雷达目标特征信号控制技术 .....	10
1.3.3 红外及可见光特征信号控制技术 .....	12
1.3.4 声频特征信号控制技术 .....	13
1.3.5 其他目标特征信号控制技术 .....	13
1.3.6 新型的隐身技术 .....	13
第2章 吸波剂与隐身材料 .....	16
2.1 磁性吸波剂与隐身材料 .....	16
2.1.1 铁氧体吸波剂 .....	16
2.1.2 羰基铁吸波剂 .....	32
2.1.3 磁性微球吸波剂 .....	32
2.2 纤维吸波剂与隐身材料 .....	38
2.2.1 多晶铁纤维吸波剂 .....	38
2.2.2 碳纤维吸波剂 .....	40
2.2.3 碳化硅纤维吸波剂 .....	44
2.2.4 晶须吸波剂 .....	45
2.2.5 玄武岩纤维吸波剂 .....	46
2.2.6 竹碳纤维吸波剂 .....	47
2.3 视黄基席夫碱盐吸波剂 .....	48
2.3.1 简介 .....	48
2.3.2 制备工艺 .....	49
2.3.3 吸波性能 .....	49
2.4 导电高分子吸波剂 .....	50
2.4.1 本征导电高分子材料 .....	50

2.4.2	作为隐身材料的研究	64
2.5	纳米吸波剂	65
2.5.1	纳米吸波剂的类型	65
2.5.2	吸波剂的制备方法	67
2.5.3	作为隐身材料的研究	68
2.5.4	研究进展	70
2.5.5	碳纳米管吸波剂	71
2.6	手性与放射性同位素吸波剂	79
2.6.1	手性吸波剂	79
2.6.2	放射性同位素吸波剂	80
2.7	自适应(智能)隐身材料	81
2.7.1	简介	81
2.7.2	自适应隐身的基本原理	81
2.7.3	自适应隐身材料	82
2.7.4	自适应隐身材料的发展	86
2.8	隐身材料与结构	87
2.8.1	隐身材料用基体材料	87
2.8.2	吸波隐身材料的设计	88
2.8.3	主要的隐身材料结构	94
<b>第3章</b>	<b>雷达吸波隐身材料</b>	<b>98</b>
3.1	简介	98
3.1.1	基本概念	98
3.1.2	分类	98
3.1.3	雷达吸波隐身机理	98
3.1.4	雷达吸波材料的主要类型与特性	100
3.1.5	对雷达吸波材料性能的测试表征技术	101
3.2	吸波剂的制备技术	102
3.2.1	化学共沉淀法	102
3.2.2	溶胶-凝胶法	103
3.2.3	水热合成法	103
3.2.4	微乳液法	104
3.2.5	超细镍粉吸波剂的制备	104
3.2.6	纳米 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 吸波隐身材料的制备	106
3.3	雷达波吸波涂料	107
3.3.1	高磁损耗(HP)吸波涂层	107
3.3.2	磁性纤维吸波涂层	108
3.3.3	手征(Chiral)吸波涂层	108
3.3.4	导电高聚物涂层	109
3.3.5	智能化多功能隐身涂料	109

3.3.6	单层雷达吸波涂层	110
3.3.7	掺杂 $\text{Sm}_2\text{O}_3$ /丙烯酸酯雷达吸波涂料	112
3.4	结构吸波隐身材料	114
3.4.1	结构吸波材料的种类	114
3.4.2	结构雷达吸波材料的制备	115
<b>第4章</b>	<b>可见光隐身材料</b>	<b>123</b>
4.1	简介	123
4.2	可见光隐身迷彩涂料	124
4.2.1	成膜物质	124
4.2.2	迷彩图案与颜色	124
4.2.3	可见光吸收剂(染料)	125
4.2.4	隐身涂料	133
4.2.5	伪装遮障	134
4.3	新型可见光隐身材料	136
4.3.1	智能隐身材料	137
4.3.2	纳米隐身材料	138
4.4	多波段隐身材料	139
4.4.1	可见光、近红外二波段隐身织物	139
4.4.2	可见光、近红外、中远红外三波段复合隐身材料	139
4.4.3	可见光、近红外、中远红外、雷达波四波段复合隐身材料	140
<b>第5章</b>	<b>红外隐身材料</b>	<b>141</b>
5.1	理论基础	141
5.1.1	红外辐射的基本原理	141
5.1.2	红外隐身技术	142
5.1.3	红外隐身技术研究进展	144
5.2	红外隐身低反射率材料	145
5.2.1	隐身涂料	145
5.2.2	低反射率薄膜	153
5.3	降温红外隐身材料	154
5.3.1	简介	154
5.3.2	陶瓷降温隐身材料——微波衰减陶瓷	154
5.4	红外隐身材料的性能及其表征	160
5.4.1	红外隐身材料的消光系数	160
5.4.2	隐身效果的评估方法	161
5.4.3	红外隐身材料的测量	165
<b>第6章</b>	<b>激光隐身材料</b>	<b>167</b>
6.1	激光隐身技术	167
6.1.1	简介	167

6.1.2	激光隐身原理	167
6.1.3	激光隐身技术与措施	168
6.2	激光隐身材料	170
6.2.1	激光吸收剂	170
6.2.2	激光隐身涂料	176
6.3	激光隐身效果评价方法	181
6.3.1	激光隐身原理公式	181
6.3.2	相对反射比法	182
6.3.3	隐身距离法	182
6.3.4	隐蔽系数法	182
6.3.5	效果	183
<b>第7章</b>	<b>多频谱兼容与综合隐身材料</b>	<b>184</b>
7.1	多频谱兼容隐身材料	184
7.1.1	红外/雷达波兼容隐身材料	184
7.1.2	红外/激光复合隐身材料技术	203
7.1.3	雷达/激光复合隐身材料	205
7.1.4	多频段兼容雷达隐身材料	207
7.2	综合隐身材料结构	210
7.2.1	简介	210
7.2.2	网状隐身材料与结构	211
7.2.3	隐身薄膜	215
7.2.4	碳纤维增强 PVC 隐身泡沫塑料	218
7.2.5	多层隐身材料结构	219
7.2.6	纸/玻璃纤维增强复合材料隐身层压板材	220
7.2.7	热隐身材料与结构	221
7.2.8	长纤维/环氧隐身导弹发射管	223
7.2.9	防化学战剂、防细菌战剂的隐身材料	224
7.2.10	隐身浸渍剂	224
7.2.11	隐身混凝土	225
<b>第8章</b>	<b>隐身材料的应用</b>	<b>227</b>
8.1	隐身材料在飞机上的应用	227
8.1.1	简介	227
8.1.2	提高飞机隐身能力的措施	227
8.1.3	飞机(飞行器)用隐身材料	229
8.1.4	隐身飞机	230
8.2	隐身材料在武装直升机上的应用	232
8.2.1	军事需求分析	232
8.2.2	国外应用研究	234
8.3	隐身材料在导弹上的应用	234



8.3.1	军事需求 .....	234
8.3.2	应用 .....	235
8.4	隐身材料在坦克装甲车辆上的应用 .....	236
8.4.1	坦克装甲车辆的隐身需求分析 .....	236
8.4.2	隐身技术与措施 .....	237
8.4.3	隐身材料 .....	238
8.4.4	隐身技术在国外装甲装备上的应用 .....	239
8.5	隐身材料在舰船上的应用 .....	242
8.5.1	舰船的隐身技术 .....	242
8.5.2	舰船隐身用材料技术 .....	245
8.6	隐身材料在水雷上的应用 .....	250
8.6.1	水雷隐身技术基本原理 .....	250
8.6.2	隐身技术 .....	251
8.6.3	隐身材料 .....	252
8.6.4	应用与发展 .....	253
8.7	隐身材料在人体目标上的应用 .....	254
8.7.1	人体目标的热红外隐身原理 .....	254
8.7.2	人体目标和背景的红外特征 .....	255
8.7.3	热红外隐身材料 .....	256
<b>参考文献</b>	.....	<b>258</b>

# 第1章 概述

## 1.1 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,涉及到空气动力学、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。在隐身技术领域美国仍处于领先地位。

### 1.1.1 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。

### 1.1.2 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:

(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。涂敷迷彩涂料、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。

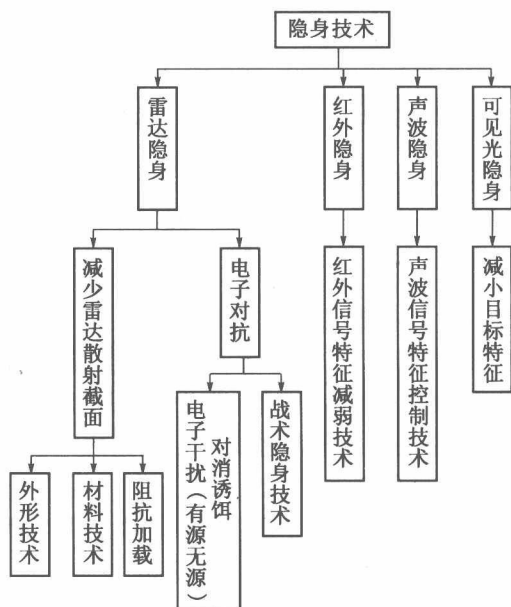


图 1-1 隐身技术分类

## 1.2 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。

### 1.2.1 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、声纳、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。

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-5X X 雷达;英国“姆斯塔”和 ZB298 战场监视雷达;法国 RBI2A 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

## 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 1-2 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 8 毫米波	机载	
“海尔法-2”(Hellfire-2)	美国	激光 1.06 $\mu$ 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 $\mu$ m, 10 $\mu$ 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	传感器类型	名称	弹径/mm	传感器类型
SADARM	155	双色红外、3 毫米波主被动	ZEPL	155	红外、毫米波
SMART155	155	双色红外、3 毫米波主被动	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、3 毫米波主被动	AIFS	203	红外、毫米波

## 1.2.2 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0.2GHz~29GHz的厘米波雷达,超视距雷达工作波长长达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150m~7500m、雷达截面为 $0.1\text{m}^2\sim 0.3\text{m}^2$ 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图探测,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。

## 2. 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 个~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。

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三代凝视型前视红外,如 LANTIRN2000、LITENING II 等项目中,都采用了  $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$  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时工作能力,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,通过在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 英里 ~ 200 英里 (40km ~ 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 544km<sup>2</sup> 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。

### 4. 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。

### 5. 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