



电磁兼容与电磁防护系列著作

无人机装备 电磁环境效应与作用机理

■ 陈亚洲 等著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无人机装备电磁环境 效应与作用机理

陈亚洲 程二威 周 星 张冬晓 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书紧贴军事装备建设需求,瞄准无人机当前及今后面临的复杂战场电磁环境威胁,以典型无人机为研究对象,系统地开展了无人机电磁环境效应及防护加固研究,主要内容包括:无人机装备的发展历史、工作原理和应用,以及全寿命周期面临的复杂电磁环境构成分析;无人机装备电磁辐射效应试验方法,连续波和几种典型强电磁脉冲的模拟方法以及对无人机装备的电磁辐射效应和作用机理;无人机外壳电磁防护性能评价技术,电磁能量耦合建模和仿真方法,以及电磁防护方法和新材料、新技术。

本书可供从事电子信息装备电磁环境效应研究和电磁兼容领域的科研人员、工程师参考,也可作为相关专业本科生和研究生的教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

无人机装备电磁环境效应与作用机理 / 陈亚洲等著.

—北京:国防工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-118-11158-3

I. ①无… II. ①陈… III. ①无人驾驶飞机—电磁环境—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 013114 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 插页 2 印张 16½ 字数 308 千字
2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 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

前 言

随着科学技术的快速发展,无人作战从理论、需求以及技术层面上逐渐成熟,其中无人机以零伤亡、低损耗、高效费比等优势成为现代战争的利器。习主席明确指出,“无人机是现代战场的重要作战力量”。可以预见,在未来的军事斗争中,无人机装备的地位和作用将日益凸显,并有可能最终替代有人机成为夺取制空权和战争主动权的关键武器。大量用频装备投入战场以及电子战的持续发酵,导致战场电磁环境复杂多变,无人机面临的电磁环境愈发恶化。无人机电子集成度高,舱内密集分布多种射频工作设备并通过线缆连接;机头、机尾以及机身不同部位装载多部通信天线,涉及频段多且频段跨度大;壳体通常采用复合材料达到减重目的,但屏蔽效能较金属差;机身多处分布孔缝和口盖,导致电气连续性差。这些特殊性质导致无人机容易受到电磁环境干扰,影响机载设备和数据链正常工作。近年来,不同国家发生过多起无人机遭受电磁干扰坠毁以及电磁诱骗捕获的事件,引起了国际社会的广泛关注,复杂电磁干扰环境下无人机装备的安全应用成为摆在各国面前的突出问题。本书正是瞄准无人机应用前沿,在国内率先开展了无人机装备电磁环境效应研究并总结成册,目的是为无人机相关专业和电磁兼容领域的科研工作者和本学科的师生提供一本比较系统的交叉学科专业著作。

全书共8章:第1章概述了无人机装备的发展历史、工作原理以及未来应用面临的挑战;第2章系统地分析了无人机装备战场应用面临的复杂电磁环境构成和特点;第3章根据无人机结构和工作特性设计了电磁辐射效应试验方法;第4、5章分析了连续波和几种典型强电磁脉冲对无人机装备的电磁辐射效应及作用机理;第6章提出了基于混响室环境的无人机外壳电磁防护性能评价技术;第7章为无人机电磁能量耦合建模与仿真方法;第8章针对性地总结并提出了无人机电磁防护加固方法和新材料、新技术。

本书是作者在长期从事电子信息装备电磁环境效应及防护技术研究的基础上,针对无人机装备开展多年研究总结而来的。全书主要由陈亚洲撰写并统稿,第3~5章由陈亚洲撰写,第1、2、6~8章由程二威、周星、张冬晓协作撰写。

由于无人机系统复杂,未来战场电磁环境持续恶化,因此本书涵盖内容有限,后续相关研究必将更加深入。加之作者学识有限,书中难免出现不妥之处,敬请读者批评指正。

作者

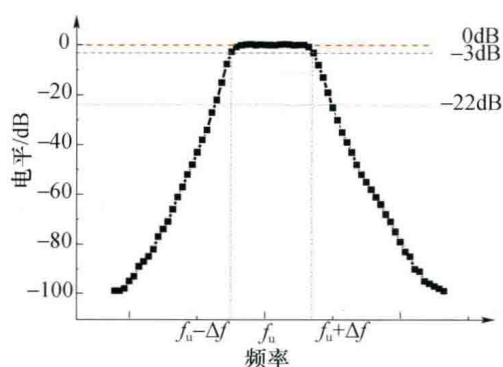


图 4-14 双工器频响特性

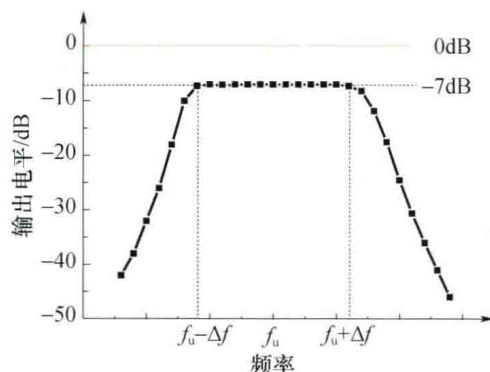


图 4-16 双工器隔离度曲线

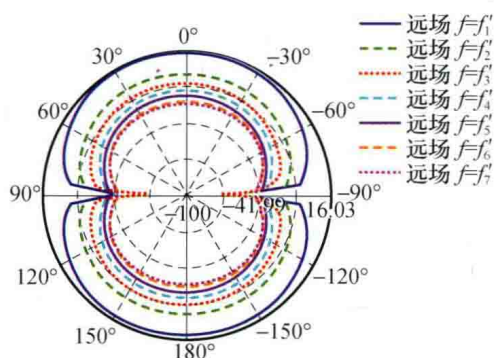


图 4-23 副遥控天线不同频点处辐射 E 面比较图

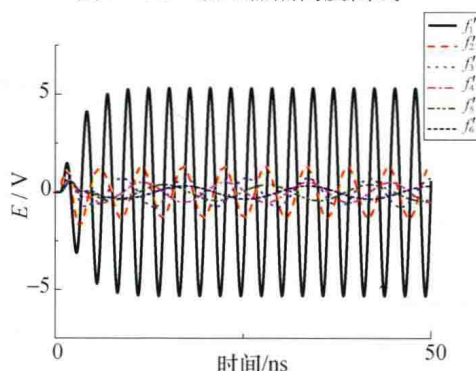


图 4-24 副遥控天线不同频点处耦合电压响应曲线

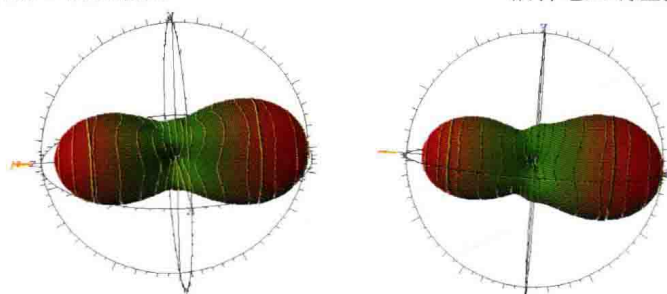


图 5-23 900MHz 频点处风扇面和孔缝面辐射方向图

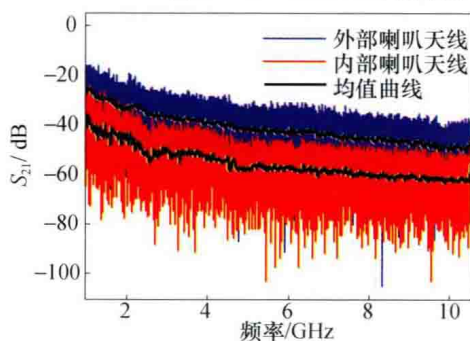


图 6-37 S_{21} 参数测试曲线

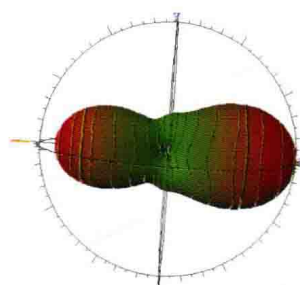


图 6-40 箱体屏蔽效能仿真模型

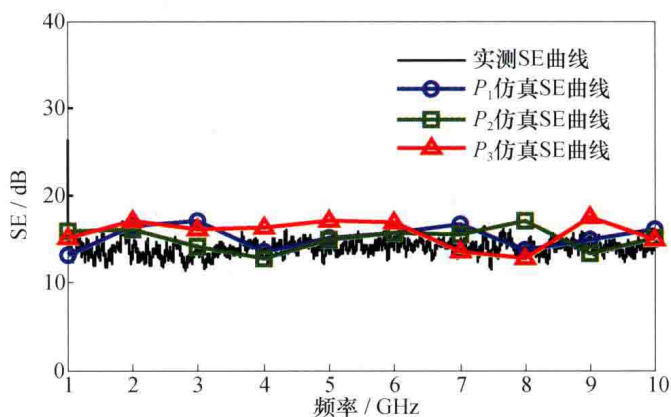


图 6-41 箱体屏蔽效能仿真值与测试值对比图

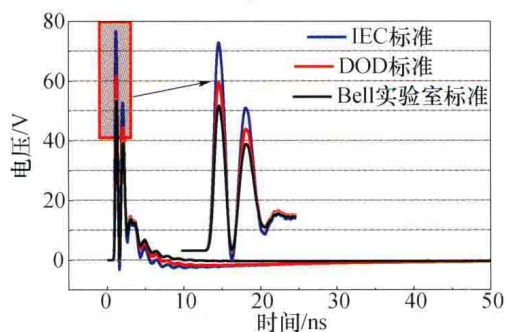


图 7-7 入射波水平极化天线
端口响应电压波形

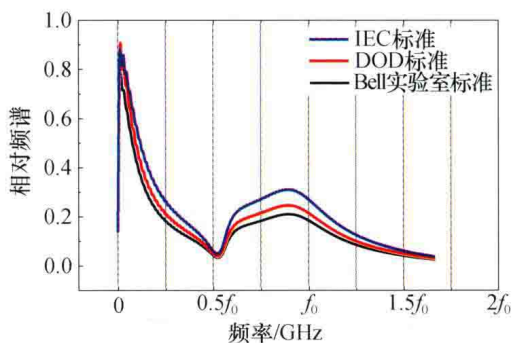


图 7-8 入射波水平极化天线
端口响应电压频谱

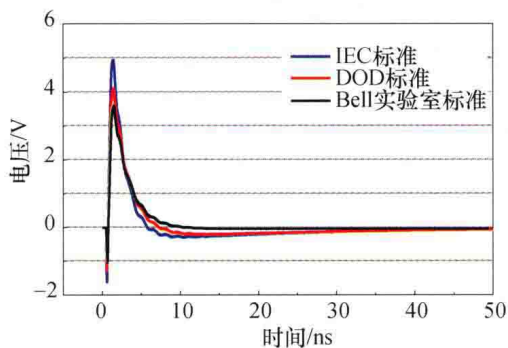


图 7-9 入射波垂直极化天线端口
响应电压

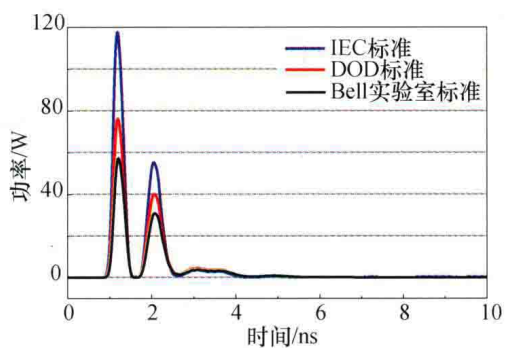


图 7-10 3 种 HEMP 辐照端口
天线 50Ω 负载功率

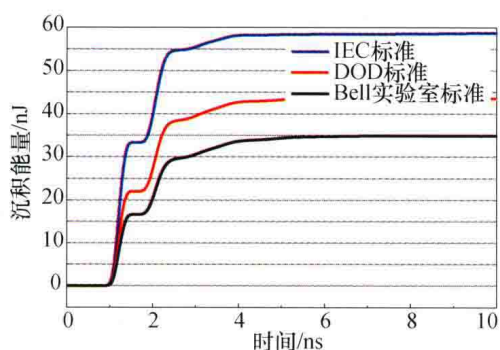


图 7-11 3 种 HEMP 辐照时天线
50Ω 负载沉积能量

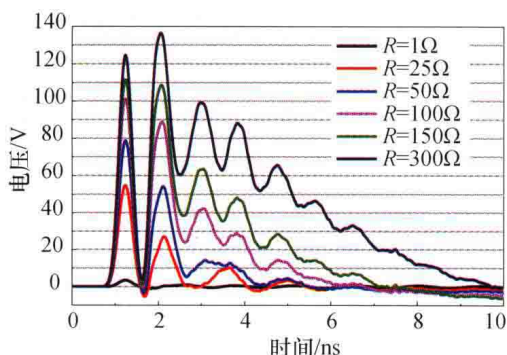


图 7-12 不同负载的天线感应电压

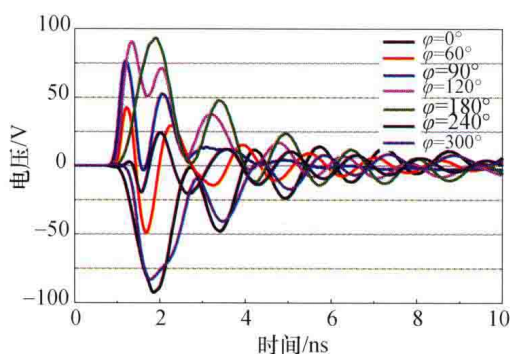


图 7-14 平面波水平角 φ 对端口
响应电压波形影响

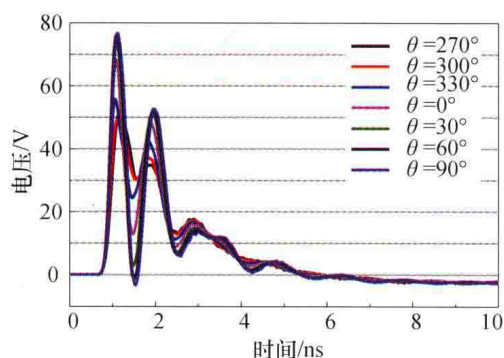


图 7-15 平面波垂直角 θ 对端口
响应电压波形影响

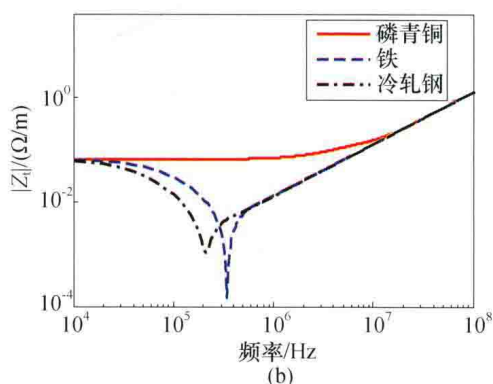
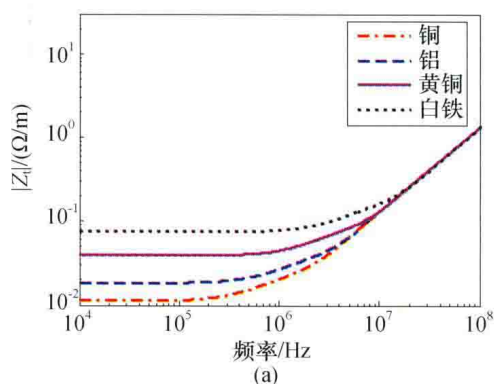


图 7-46 屏蔽材料电导率对转移阻抗的影响

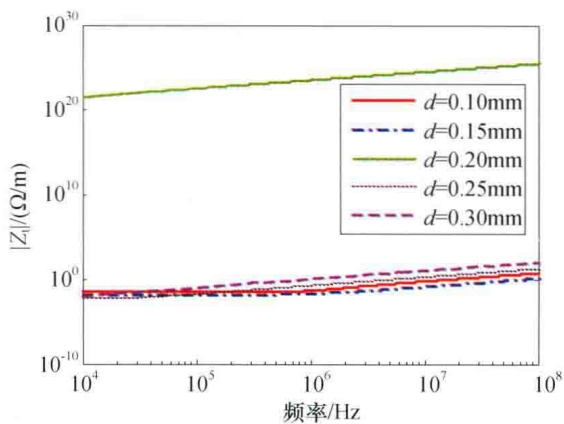


图 7-48 编织线直径对转移阻抗的影响

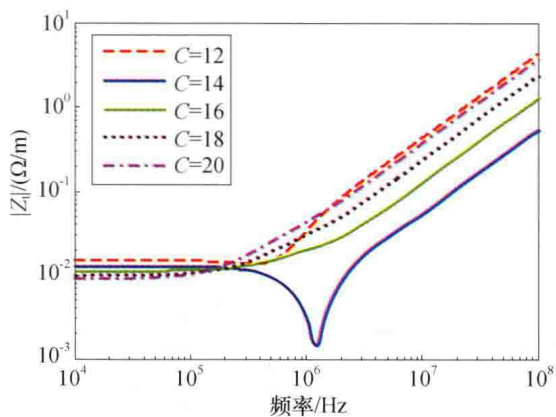


图 7-49 编织束数对转移阻抗的影响

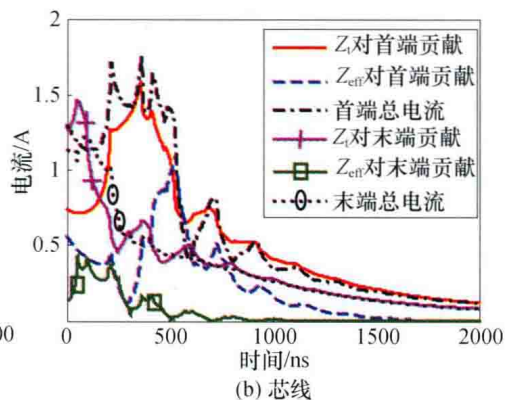
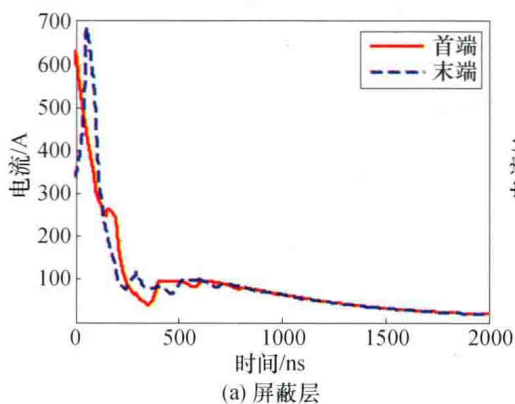


图 7-51 编织型屏蔽电缆两端负载处感应电流

目 录

第1章 无人机装备概述	1
1.1 无人机的发展历史	1
1.2 无人机工作原理	4
1.2.1 无人机飞行平台	5
1.2.2 任务载荷	6
1.2.3 无人机系统及遂行任务特点	11
1.3 无人机装备军事应用及面临挑战	13
第2章 无人机全周期电磁环境分析	17
2.1 战场电磁环境构成	17
2.2 自然电磁环境	18
2.2.1 静电环境	18
2.2.2 雷电环境	19
2.2.3 地磁场	26
2.2.4 宇宙射线	27
2.3 人为电磁环境	28
2.3.1 无意电磁辐射	28
2.3.2 有意电磁辐射	31
2.4 无人机可能遭遇的电磁环境	43
第3章 无人机装备的电磁辐射效应试验方法	44
3.1 无人机飞机系统基本组成	44
3.1.1 机载计算机	45
3.1.2 伺服作动设备	47
3.1.3 机载传感器及测量设备	48
3.1.4 数据链系统设备	58
3.1.5 系统工作过程	60
3.2 无人机电磁辐射效应检测指标分析	61
3.2.1 误码率与失锁关联性研究	63
3.2.2 评价指标选取	64

3.3	无人机电磁辐射效应动态监测系统	64
3.4	连续波电磁辐射效应试验方法	65
3.5	强电磁脉冲电磁辐射效应试验方法	68
3.5.1	超宽带电磁脉冲对无人机装备的电磁辐射效应 试验方法	68
3.5.2	有界波环境下无人机装备电磁辐射效应试验方法	70
第4章	连续波对无人机装备的电磁辐射效应	71
4.1	连续波电磁环境模拟	71
4.1.1	开阔场电磁环境	71
4.1.2	电波暗室	74
4.1.3	横电磁波传输小室	76
4.1.4	混响室	77
4.1.5	试验场地选择及环境构建	78
4.1.6	连续波电磁场测量	81
4.2	连续波对无人机装备的电磁辐射效应	82
4.2.1	主通道效应分析	84
4.2.2	副通道效应分析	85
4.3	连续波对无人机装备的作用机理	85
4.3.1	无人机主通道电磁干扰机理	85
4.3.2	无人机副通道电磁干扰机理	93
第5章	强电磁脉冲对无人机装备的电磁辐射效应	97
5.1	核电磁脉冲对无人机装备的电磁辐射效应	97
5.1.1	核电磁脉冲模拟装置	97
5.1.2	核电磁脉冲对无人机装备的电磁辐射效应	108
5.1.3	核电磁脉冲对数据链分系统的电磁辐射效应	110
5.1.4	核电磁脉冲对数据链分系统的作用机理	112
5.2	雷电电磁脉冲对无人机装备的电磁辐射效应	116
5.2.1	雷电电场模拟装置	116
5.2.2	雷电脉冲电场对无人机装备的电磁辐射效应	121
5.2.3	雷电脉冲磁场模拟装置	122
5.2.4	雷电脉冲磁场对无人机装备的电磁辐射效应	123
5.2.5	雷电脉冲磁场对无人机装备的作用机理	125
5.3	超宽带电磁脉冲对无人机装备的电磁辐射效应	128
5.3.1	超宽带电磁脉冲模拟装置	128
5.3.2	超宽带电磁脉冲对无人机装备的电磁辐射效应	130

5.3.3	超宽带电磁脉冲对无人机装备的作用机理	131
5.3.4	超宽带电磁脉冲对数据链分系统的电磁辐射效应	134
5.3.5	超宽带电磁脉冲对数据链分系统的作用机理	136
第6章	无人机外壳电磁防护性能评价技术	137
6.1	壳体屏蔽效能测试标准	137
6.1.1	壳体屏蔽原理及屏蔽效能计算方法	137
6.1.2	大尺寸壳体屏蔽效能测试技术	138
6.1.3	小尺寸壳体屏蔽效能测试技术	146
6.1.4	混响室环境下壳体屏蔽效能测试标准	151
6.1.5	无人机外壳屏蔽效能测试存在的技术难题	155
6.2	基于混响室环境的无人机外壳屏蔽效能测试新方法	155
6.2.1	混响室的种类	155
6.2.2	混响室频率搅拌技术有效性研究	157
6.2.3	频率搅拌技术在屏蔽效能测试中的应用验证	176
6.2.4	混响室环境下无人机外壳屏蔽效能测试新方法	182
第7章	无人机电磁能量耦合建模与仿真方法	185
7.1	天线耦合建模与仿真方法	185
7.1.1	模型建立	185
7.1.2	贴片偶极子天线的 HEMP 响应特性	187
7.1.3	贴片天线阵的 HEMP 响应特性	193
7.2	壳体与孔缝耦合建模与仿真方法	194
7.2.1	飞机外壳屏蔽效能仿真分析	194
7.2.2	飞机内部组合壳体与孔缝耦合建模	200
7.3	线缆耦合建模与仿真方法	210
7.3.1	平行线耦合模型	210
7.3.2	双绞线耦合模型	215
7.3.3	同轴线耦合模型	220
7.4	射频前端响应建模与仿真	225
7.4.1	限幅器模块建模仿真	226
7.4.2	高频组件建模仿真	232
第8章	无人机电磁防护加固技术	235
8.1	屏蔽技术	235
8.1.1	电磁屏蔽原理	235
8.1.2	改善腔体屏蔽效能的工程措施	238
8.1.3	屏蔽体的设计原则	242

8.2 滤波技术	242
8.2.1 滤波的基本原理	242
8.2.2 滤波器的选择与安装	243
8.3 射频前端电磁脉冲防护	245
8.4 电磁防护新材料与新技术	247
8.4.1 电磁防护复合材料	247
8.4.2 频率选择表面	251
8.4.3 能量选择表面	252
参考文献	253

第1章 无人机装备概述

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是一种由无线电遥控设备或者自身预先设定程序控制的无人驾驶飞行器。伴随着电子信息技术和人工智能技术的快速发展,无人机技术日益成熟,自主控制能力不断提高,逐步减少了对人为决策的依赖,并在多种场合取代有人机执行急难险重任务。

无人机在军事斗争中的应用极大地推动了相关技术的发展,多次战例进一步验证了无人机装备因为无人驾驶所具有的零伤亡率、机动性强、作战效能高、成本低等突出优点,并且也得到了世界各国军事专家的公认。美军在近期的阿富汗、科索沃和伊拉克等战争中使用了不同用途、性能各异的军用无人机装备。这些无人机装备不仅独立完成了情报获取、战场侦察与监视、通信与电子对抗等任务,而且还与其他武器系统配合,共同完成了对敌重要目标打击和毁伤效果评估,实现了真正意义上的“侦察、指挥、打击、评估”的“一体化”作战,既取得了突出战绩,又避免了人员伤亡,令世界各军事强国所震惊。不仅如此,民用无人机系统也得到了迅猛发展,并投入到了越来越多的实际应用中,在和平时期完成了诸如科学研究、人道主义援助、抢险救灾等多种多样的任务。目前,军用、民用无人机市场正在呈现出空前的繁荣景象。

习主席在会见十二届全国人大四次会议解放军代表团时明确指出,“无人机是现代战场的重要作战力量”。可以预计,在未来的军事作战中,无人机装备的地位和作用将日渐突出,并有可能最终替代有人机夺取制空权和战争主动权。

1.1 无人机的发展历史

无人飞行器的发展历史起源于古希腊,并且持续发展到了21世纪初。据史料记载,来自意大利东南部城市塔兰托的 Archytas 完成了关于自主装置工作的突破性进展,是他制造了能够飞行的“机械鸽子”,如图1-1所示。也正是在同一时期,中国人最先提出了垂直飞行的想法。这个想法是,在一支木棒的顶端加装上羽毛,在两手之间捻转该木棒以产生足够的升力,然后释放双手让其自由飞行。

17世纪后期,有人再次提出了源自 Archytas 最初想法的无人飞行装置。文献所记载的是,文艺复兴时期一些不知名的工程师们建造了一只类似的“飞



图 1-1 世界上首台自主飞行装置

鸟”,如图 1-2 所示。这只“飞鸟”的腹部安装有机械动力装置。无从知晓这种新颖的设计是否是基于 Archytas 的想法,但其理念却极其相似。

1483 年,莱昂纳多·达芬奇设计了一台能够盘旋的飞行器,称其为空中机组或空中陀螺仪,如图 1-3 所示。它的直径有 5m,其构思是使轴旋转起来,当所施加的力足够大时,这台飞行器就会旋转起来并且能够飞起来。一些专家认为这一装置就是现代直升机的鼻祖。1508 年,莱昂纳多·达芬奇还发明了一只机械鸟。当这只机械鸟顺着缆绳下降时,利用一套双曲柄机械装置来拍打其翅膀。

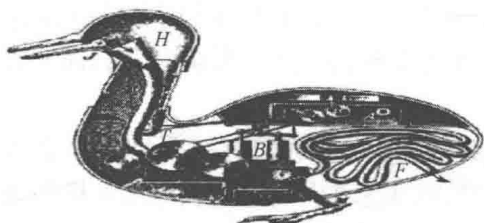


图 1-2 文艺复兴时期建造的“飞鸟”

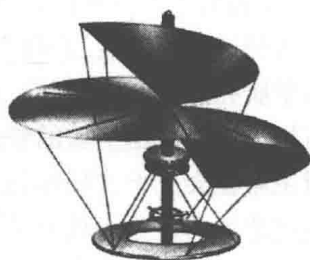


图 1-3 莱昂纳多·达芬奇的空中机组

1860—1909 年间人们设计制造出了大量的飞行装置。由于当时所使用的蒸汽发动机的限制,最初所设计的飞行装置大多为垂直起降飞行器。这些飞行装置引领了当今飞行器的设计。1916 年,美国人劳伦斯和斯佩里设计了第一架“现代”无人机,如图 1-4 所示。为了制造自动驾驶仪,他们设计了陀螺仪来稳定机体,这被认为是用于飞行器自动转向的“姿态控制”的开端。劳伦斯和斯佩里将这个无人机称为“航空鱼雷”,实际驾驶它飞行超过了 30 英里(mile, 1mile = 1.6093km)。

人员和货物的快速和安全运输始终是飞行器发展的主要关注点。然而,在军方认识到无人机的潜在优势后,立即开始致力于研究没有机载飞行员操作的飞行器。最初的这类系统是无人军械运送系统,现在被视作为“导弹”或“敏感炸弹”。这类系统还用作无人驾驶飞机,辅助于防空高炮操作手的训练。

或许,符合当今无人机系统定义的第一代无人机是图1-5所示的 Ryan147 型系列飞机。它们被设计成无人驾驶飞机,在20世纪60—70年代,美国利用这些无人机对中国、越南和其他一些国家进行侦察。



图 1-4 “航空鱼雷”

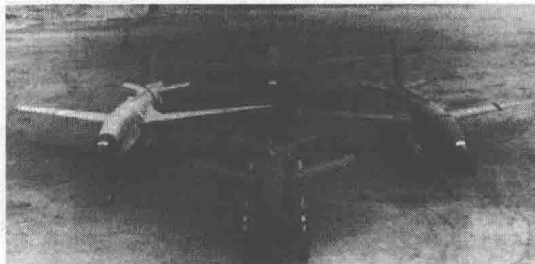


图 1-5 几种 Ryan147 型无人侦察机

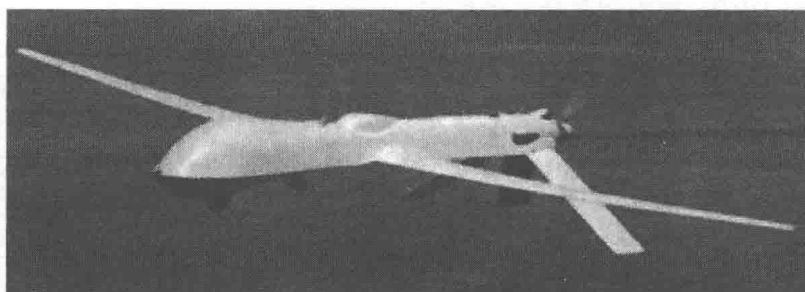
越南战争后,美国和以色列开始发展小型且廉价的无人机。这些小型无人飞行器采用摩托车或雪地机动车所使用的小型发动机,携带有视频摄像机,可以将图像传送给操控手。似乎在此期间可以找到现代无人机的雏形,但真正促使无人机一战成名的事件是发生在叙利亚和以色列之间的贝卡谷地之战。1982年6月,叙利亚军队占据贝卡谷地并部署了苏制先进的防空导弹,以军首先利用无人机诱导叙军雷达开机,而后指挥盘旋在战场前沿的无人侦察机探测并确定叙军防空导弹雷达的工作频率和准确部署位置,最后派出电子干扰机和有人攻击机协同作战,在战争打响的几分钟就彻底摧毁了叙军苦心经营数十年价值几十亿美元的防空导弹系统。此后,美国等军事强国纷纷将装备发展重心转移到先进无人机制造上来。1991年,美国在科索沃战争和海湾战争中实际使用了无人机,并取得了骄人的战绩。

2001年阿富汗战争期间,美国空军在对恐怖分子发动空袭中第一次使用了无人机发射导弹,这是世界上首次将无人飞机用于实战中的武器进攻。完成此次空中打击任务的是 RQ-1“掠夺者”无人机,对塔利班恐怖分子阵地发射了“地狱火”反坦克导弹,并取得了预期打击效果。

目前,无人机的发展呈现出前所未有的热潮。世界上绝大多数国家的军队都装备了无人机,30多个国家从事无人机的研制和生产,先后有4000余种型号无人机问世。无人机正朝着察打一体化、滞空长时化、高度智能化、机体微型化、飞行隐身化的方向发展。以美国、以色列、俄罗斯、中国和欧盟为代表的国家在无人机研制发展过程中领跑全球。

美国依仗其雄厚的经济实力和先进技术的支撑,已形成高、中、低空,远、中、近程,大、中、小型,战略、战役、战术侦察,通信中继、信息战、火力攻击等多种类型梯次搭配的无人机装备体系,使其在无人机领域以起步早、种类全、应用广而在世界无人机领域全面称雄。美国最著名的军用无人机是通用原子能航空系统

有限公司制造的“捕食者”无人机、诺斯罗普·格鲁曼公司研制的“全球鹰”无人机和“X-47B”无人机,如图 1-6 所示。



(a)“捕食者”无人机



(b)“全球鹰”无人机



(c)“X-47B”无人机

图 1-6 美军最著名的军用无人机

以色列拥有丰富的研制与使用无人机的经验,其无人机技术居世界领先地位。目前,以色列先后研制了三代数十种型号的无人机,已经装备的型号主要有“侦察兵”“先锋”“猎人”“苍鹭”“埃坦”等,并向着隐形化和察打一体化方向发展,其无人机产品远销世界数十个国家。俄军研制无人机从 20 世纪 50 年代开始起步,至今在研和已研制出的无人机型号 20 余种,代表机型有图-141“雨燕”、图-143“航行者”、“信天翁”等,与此同时,不断加大无人机研制力度。

我国无人机的研发与应用起步较晚,但发展势头迅猛,经过数年的追赶和创新,已经取得了显著的成绩。目前,全国从事无人机研发、生产、服务的单位有 300 多家,处于快速增长的阶段,至今已经拥有了包括手抛式地空战术无人机、中空察打一体无人机以及高空长航时隐身无人侦察机,产品口碑较好,远销海外。目前,中国“翼龙”“彩虹-3”“彩虹-4B”察打一体无人机已经活跃在巴基斯坦、伊拉克战场上执行打击恐怖分子的任务。此外,尼日利亚、缅甸、埃及等国纷纷引进中国高性价比的先进无人机以替代传统有人战机执行高危任务。

1.2 无人机工作原理

无人机是在传统有人机基础上发展起来的,早期无人机通常执行空中侦察和校射等辅助作战任务,随着无人机技术的不断发展成熟,其智能化程度显著提

高,执行任务种类日趋多样,但其自身只是一个自动飞行驾驶平台,只有通过搭载不同的任务设备才能执行预期作战任务。

1.2.1 无人机飞行平台

无人机飞行平台是深入敌战区执行任务的主要支撑,它由5个部分组成,如图1-7所示,包括飞机机体、动力装置、航空电子设备、地面保障单元和发射回收系统,各分系统正常工作是保证整机飞行性能参数达标的前提。

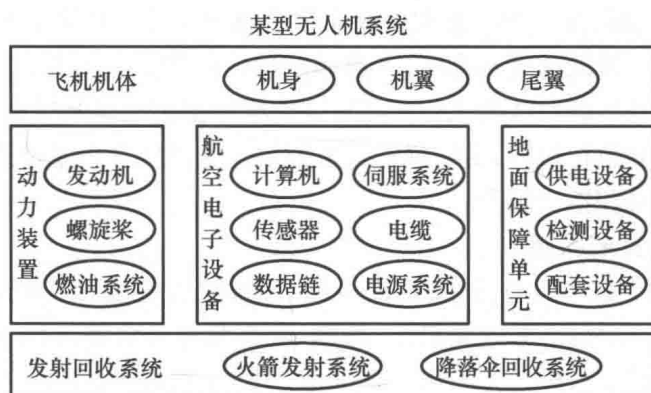


图1-7 某型无人机系统组成

1. 飞机机体

良好的气动布局决定了飞机的高机动性,本书研究对象属于常规气动布局无人机,机体主要由机身、机翼和尾翼3个部分组成,此外还有鸭式布局、三翼面布局和无尾布局等。机身主要为动力装置、航空电子设备、发射回收系统和任务设备提供装载空间和工作环境,内部划分不同舱段起到隔离和减弱背景噪声的目的。机翼和尾翼能够为飞机提供升力,是改变飞行姿态的外置驱动,也是改善气动布局进而侧面提高无人机机动性能的切入点。

2. 动力装置

动力装置决定了无人机的飞行高度和巡航速度,主要由发动机、螺旋桨和燃油系统组成。该型无人机装载水平对置二冲程风冷活塞发动机,通过调节风门张开角度控制输出功率,将化学能转化为机械能,驱动螺旋桨转动、改变无人机飞行参数。此外,动力装置还为整机航电设备供电,并且向蓄电池充电为后期降落阶段发动机关闭后航电系统正常工作储蓄电能。一般情况下,活塞式航空发动机只能满足中低空中程无人机飞行需求,大型高空高速长航时无人机常采用燃气涡轮发动机,而高推重比发动机的制造能力也象征了一个国家航空工业的发展水平。

3. 航空电子设备

航空电子设备是无人机的飞行控制“中枢”,主要包括机载计算机、数据链