

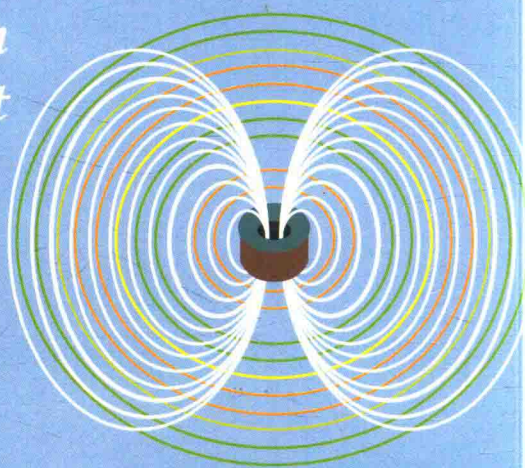


国防科技图书出版基金

装备电磁辐射 效应规律与作用机理

魏光辉 潘晓东 万浩江 著

*Feature and Mechanism of
Electromagnetic Radiation
Effects for Equipment*



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

装备电磁辐射效应规律与作用机理

Feature and Mechanism of Electromagnetic
Radiation Effects for Equipment

魏光辉 潘晓东 万浩江 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

装备电磁辐射效应规律与作用机理 / 魏光辉, 潘晓东, 万浩江著. —北京: 国防工业出版社, 2018.12

ISBN 978 - 7 - 118 - 11721 - 9

I. ①装… II. ①魏… ②潘… ③万… III. ①电磁辐射 - 辐射效应 - 研究 IV. ①O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 290258 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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 234 千字

2018 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 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

致 读 者

本书由中央军委装备发展部**国防科技图书出版基金**资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就,国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 柳荣普

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

现代信息化条件下的联合作战将是基于信息系统的体系对抗,是全系统、全方位、电磁频谱支持下陆、海、空、天及电磁、网络领域的综合对抗。作战任务的实施通常需要运用信息系统把各种作战力量、作战单元、作战要素融合为整体作战能力,逐步构建作战要素无缝链接、作战平台自主协同的一体化联合作战体系,实现部队从机械化到信息化的转变。为实现装备互联互通,用频装备需追求更远的作用距离,更大的空、时、频域覆盖范围,使其接收灵敏度进一步提高,发射功率进一步增大。大功率用频设备的不断增加以及电子战系统、电磁脉冲弹和高功率微波武器的出现,使战场电磁环境日趋复杂、恶劣,各种武器装备不仅处于己方武器装备产生的强电磁辐射、自然和民用设备产生的电磁辐射的包围之中,还会遇到超宽谱、高功率微波等定向能武器、电磁脉冲弹及强电磁辐射干扰机等敌方的有意干扰,武器装备能否具有良好的电磁环境适应性,已经成为完成战场情报侦察、目标探测识别、联合指挥控制、武器精确攻击以及多军兵种协同作战任务的决定性因素之一,直接影响战争的成败。

准确揭示装备电磁辐射效应规律和作用机理,既是针对装备电磁防护薄弱环节对症下药进行电磁防护加固的依据,也是基于装备电磁辐射敏感特性建立装备多源电磁辐射效应预测模型,探索装备复杂电磁环境适应性试验评估方法的基础工作,是破解装备复杂电磁环境适应性试验评估的技术难题,是提高装备战场复杂电磁环境适应性和强场电磁防护能力的必经之路。基于上述目的,我们选择典型通信电台、无线电引信作为受试对象,系统研究了其窄谱连续波电磁辐射效应与宽谱强电磁脉冲辐射效应,比较了电磁辐射场调制方式对受试装备效应规律的影响,确定了用频装备电磁辐射效应共性规律和作用机理,给出了电磁防护方法、技术措施和试验验证结果,能够为提升相关装备的电磁环境适应性和确定新型装备电磁兼容与防护技术指标提供技术支撑。

本书以装备电磁辐射效应规律研究为主线,从战场电磁环境分析入手,系统阐述了静电、雷电等电磁脉冲源的特性及其一般防护方法,分析了人为电磁辐射源特性,总结了电子信息装备面临的电磁环境问题。重点分析了电磁辐射效应试验方法研究的现状,给出了不同方法的优缺点和适用范围,阐明了提高装备电

磁辐射效应试验准确度应遵循的原则和技术问题。从单频、扫频、调幅连续波电磁辐射效应和宽谱强电磁脉冲辐射效应两方面,系统阐述了典型通信电台、无线电引信的电磁辐射效应规律,确定了引起干扰效应的能量耦合通道,揭示了作用机理,提出了防护加固方法。

全书共分7章:第1章阐述了战场电磁环境构成、特点及相关概念,总结了电磁危害源的基本特性,给出了防止静电、雷电危害的一般方法;第2章从作战样式变化和装备发展两方面,系统总结了电子信息装备面临的电磁环境威胁,分析了产生电磁不兼容问题的本质原因,指出了试验方法存在的问题;第3章总结了电磁辐射效应试验方法的研究现状,给出了不同试验方法的适用范围以及降低装备连续波电磁辐射效应、电磁脉冲辐射效应试验误差的试验程序和一般要求,阐明了连续波电磁环境和电磁脉冲场模拟方法;第4章给出了典型通信电台、无线电引信的单频、扫频、调幅电磁辐射效应试验结果,通过综合分析、比较,确定了窄谱连续波电磁辐射效应规律;第5章给出了典型通信电台、无线电引信的宽谱电磁脉冲和窄带高功率微波辐射效应试验结果,分析了效应机理,给出了防护加固方法并进行了试验验证;第6章通过理论分析和试验验证,系统阐述了无线电引信连续波电磁辐射效应机理,给出了无线电引信综合防护对策和高效干扰方法;第7章总结了装备电磁辐射共性效应规律,阐明了复杂电磁环境效应试验、评估技术的发展方向。

本书由魏光辉提出纲目并撰写,潘晓东提供了第3章的初稿,万浩江提供了第1章的初稿。书中采纳的效应数据均来自实装试验,是项目组工作人员和研究生共同研究的结果。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和欠妥之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2018年5月

目 录

第 1 章 战场电磁环境分析	1
1.1 战场电磁环境概述	1
1.1.1 基本概念及内涵	1
1.1.2 复杂电磁环境的特点	2
1.1.3 电磁环境适应性相关概念	5
1.2 自然电磁危害源及其一般防护方法	7
1.2.1 静电及其电磁脉冲	7
1.2.2 防止静电危害的一般方法	12
1.2.3 雷电及其电磁脉冲	15
1.3 人为电磁危害源及其特性	23
1.3.1 电磁脉冲武器	23
1.3.2 无意电磁辐射干扰源	28
第 2 章 装备电磁环境效应概述	32
2.1 电子信息装备面临的电磁环境威胁	32
2.1.1 作战样式变化与战场电磁环境	32
2.1.2 电磁环境效应对装备发展的影响	36
2.2 装备电磁环境效应与防护对策	38
2.2.1 装备电磁环境效应共性问题	38
2.2.2 装备电磁环境适应性试验方法评述	39
2.2.3 电磁兼容与防护技术的作用	40
第 3 章 电磁辐射效应试验方法	42
3.1 电磁辐射效应试验方法研究现状	42
3.1.1 电磁环境模拟设施分类	42
3.1.2 整体辐射与局部分区辐射试验方法	43
3.1.3 电流注入试验方法	44
3.1.4 差模注入—线性外推等效试验方法	47

3.2	连续波电磁辐射效应试验方法	53
3.2.1	连续波电磁辐射效应试验系统	53
3.2.2	电磁辐射效应试验的一般要求	54
3.2.3	测试环境准备与测量	57
3.2.4	照射位置的选取	58
3.2.5	测试程序	61
3.3	电磁脉冲场模拟与辐射效应试验方法	64
3.3.1	超宽谱电磁脉冲辐射效应试验方法	64
3.3.2	雷电电磁环境模拟方法	68
3.3.3	高空核爆电磁脉冲场模拟方法	75
3.3.4	雷电与核电磁脉冲辐射效应试验方法	82
第4章	连续波电磁辐射效应规律	87
4.1	装备电磁辐射效应试验相关问题	87
4.1.1	通信电台连续波电磁辐射效应试验	88
4.1.2	无线电引信连续波电磁辐射效应试验	93
4.2	典型装备单频电磁辐射效应规律	99
4.2.1	单频电磁辐射对超短波电台的作用规律	99
4.2.2	单频电磁辐射对模拟式短波电台的作用规律	104
4.2.3	单频电磁辐射对无线电引信的作用规律	106
4.2.4	用频装备单频电磁辐射效应规律比较	110
4.3	调频、调幅电磁辐射对用频装备的作用规律	111
4.3.1	调频连续波电磁辐射对通信电台的作用规律	111
4.3.2	调幅连续波电磁辐射对通信电台的作用规律	112
4.3.3	扫频电磁辐射对无线电引信的作用规律	115
4.3.4	调幅电磁辐射对无线电引信的作用规律	117
4.4	典型装备连续波电磁辐射效应比较	118
4.4.1	电磁辐射场调制方式对受试装备效应规律的影响	118
4.4.2	不同受试装备连续波电磁辐射效应规律比较	120
第5章	装备强电磁脉冲辐射效应机理	126
5.1	通信电台宽谱电磁脉冲辐射效应	126
5.1.1	通信电台超宽谱电磁脉冲辐射效应	127
5.1.2	通信装备静电放电效应	130
5.2	短波电台宽谱电磁脉冲耦合通道与效应机理	132
5.2.1	短波通信电台电磁脉冲耦合仿真分析	132

5.2.2	通信电台电磁脉冲耦合试验验证	135
5.2.3	宽谱电磁脉冲辐射对短波电台的作用机理	138
5.3	无线电引信超宽谱电磁辐射效应机理	139
5.3.1	效应试验方法与程序	139
5.3.2	电磁辐射对技术处理状态无线电引信安全性的影响	140
5.3.3	电磁辐射对分米波无线电引信工作性能的影响	140
5.3.4	电磁辐射对米波无线电引信工作性能的影响	145
5.3.5	超宽谱电磁脉冲辐射对无线电引信的作用机理	146
5.4	无线电引信高功率微波电磁辐射效应机理	148
5.4.1	高功率微波辐射对工作状态分米波无线电引信的 辐射效应	149
5.4.2	高功率微波辐射对工作状态分米波无线电引信的 作用机理	152
5.5	无线电引信强电磁脉冲防护技术	155
5.5.1	强电磁脉冲导致晶闸管误动作的本质原因	155
5.5.2	更换晶闸管提高引信抗电磁脉冲辐射能力	156
5.5.3	电源滤波技术	157
5.5.4	瞬态干扰抑制技术	158
第6章	无线电引信连续波电磁辐射效应机理	160
6.1	单频电磁辐射对无线电引信的效应机理	160
6.1.1	电磁辐射作用途径分析	160
6.1.2	高频电路输出信号与引信意外发火	162
6.1.3	单频电磁辐射效应机理分析	163
6.2	扫频电磁辐射对无线电引信的效应机理	165
6.2.1	引信意外发火原因试验验证	165
6.2.2	扫频电磁辐射效应机理	165
6.2.3	扫频步长对引信意外发火的影响	167
6.2.4	频点驻留时间对引信意外发火的影响	169
6.3	调幅电磁辐射对无线电引信的效应机理	171
6.3.1	多普勒信号模拟仿真	171
6.3.2	晶体管混频原理	173
6.3.3	自差收发机混频特性分析	174
6.4	引信综合干扰与防护对策	174
6.4.1	无线电引信综合干扰方法	175

6.4.2 无线电引信综合防护对策 176

第7章 效应机理研究带来的启示 177

7.1 电磁辐射场线耦合规律 177

7.1.1 同轴线缆终端负载电磁辐射响应规律 177

7.1.2 同轴线缆外导体感应电流分布理论分析 181

7.1.3 局部辐射条件的线缆感应电流分布 185

7.1.4 天线终端负载电磁辐射响应规律 189

7.2 用频装备电磁辐射共性效应规律 193

7.2.1 带内电磁辐射耦合效应机理 193

7.2.2 强场电磁辐射效应机理 194

7.3 电磁辐射效应试验评估技术发展方向 195

7.3.1 强场电磁辐射效应等效试验技术 196

7.3.2 复杂电磁环境适应性评估技术 196

参考文献 199

Contents

Chapter 1	Analysis of battlefield electromagnetic environment	1
1.1	Overview of battlefield electromagnetic environment	1
1.1.1	Basic concepts and their connotations	1
1.1.2	Characteristics of complex electromagnetic environment	2
1.1.3	Related concepts of electromagnetic environmental adaptability	5
1.2	Natural electromagnetic hazard sources and their general protection methods	7
1.2.1	Electrostatic and electrostatic discharge electromagnetic pulse	7
1.2.2	General method to prevent electrostatic hazard	12
1.2.3	Lightning and lightning electromagnetic pulse	15
1.3	Man-made electromagnetic hazard sources and their characteristics	23
1.3.1	Electromagnetic pulse weapon	23
1.3.2	Unintentional electromagnetic radiation interference sources	28
Chapter 2	Overview of electromagnetic environmental effects of equipment	32
2.1	Electromagnetic environmental problems faced by electronic information equipment	32
2.1.1	Combat style and abominable electromagnetic environment	32
2.1.2	Electromagnetic environmental effects and development of equipment	36
2.2	Electromagnetic environmental effects and protection counterplan	38
2.2.1	Common problems of equipment in electromagnetic environment	38
2.2.2	Review on the test methods of electromagnetic environmental adaptability	39

2.2.3	Role of electromagnetic compatibility and protection technology	40
Chapter 3	Test methods of electromagnetic radiation effects	42
3.1	Research status on the test methods of electromagnetic radiation effects	42
3.1.1	Classification of simulation facilities on electromagnetic environment	42
3.1.2	Overall radiation test method and partial partition radiation test method	43
3.1.3	Current injection test methods	44
3.1.4	Equivalent test method using differential-mode injection and linear extrapolation	47
3.2	Test methods of continuous wave electromagnetic radiation effects ...	53
3.2.1	Test system of continuous wave electromagnetic radiation effects	53
3.2.2	General requirements for electromagnetic radiation effect test	54
3.2.3	Preparation of the test environment and measurement	57
3.2.4	Selection of the radiation positions	58
3.2.5	Test procedures	61
3.3	Simulation and radiation effect test methods for electromagnetic pulse field	64
3.3.1	Radiation effect test method of ultra-wide spectrum electromagnetic pulse	64
3.3.2	Simulation method of lightning electromagnetic environment	68
3.3.3	Simulation method of electromagnetic pulse field from high-altitude nuclear bursts	75
3.3.4	Effect test methods of lightning electromagnetic pulse and nuclear electromagnetic pulse	82
Chapter 4	Effect feature of continuous wave electromagnetic radiation	87
4.1	Relevant problems of electromagnetic radiation effect test of equipment	87
4.1.1	Continuous wave electromagnetic radiation effect test on communication equipment	88

4. 1. 2	Continuous wave electromagnetic radiation effect test on radio fuzes	93
4. 2	Effect feature of single-frequency electromagnetic radiation on typical equipment	99
4. 2. 1	Effect feature of single-frequency electromagnetic radiation on ultra-short wave communication equipment	99
4. 2. 2	Effect feature of single-frequency electromagnetic radiation on analog short wave communication equipment	104
4. 2. 3	Effect feature of single-frequency electromagnetic radiation on radio fuzes	106
4. 2. 4	Comparison of single-frequency electromagnetic radiation effect feature on frequency-dependent equipment	110
4. 3	Effect feature of FM and AM electromagnetic radiation on frequency-dependent equipment	111
4. 3. 1	Effect feature of FM continuous wave electromagnetic radiation on communication equipment	111
4. 3. 2	Effect feature of AM continuous wave electromagnetic radiation on communication equipment	112
4. 3. 3	Effect feature of sweep electromagnetic radiation on radio fuzes	115
4. 3. 4	Effect feature of AM electromagnetic radiation on radio fuzes ...	117
4. 4	Comparison of continuous wave electromagnetic radiation effects on typical equipment	118
4. 4. 1	Influence of the modulation type of electromagnetic radiation field on the effect feature of EUT	118
4. 4. 2	Comparison of continuous wave electromagnetic radiation effect feature for different EUT	120

Chapter 5 Effect mechanism of high intensity electromagnetic pulse radiation

5. 1	Wide-spectrum electromagnetic pulse radiation effect of communication equipment	126
5. 1. 1	Ultra-wide spectrum electromagnetic pulse radiation effect of communication equipment	127
5. 1. 2	Electrostatic discharge effect of communication equipment	130

5.2	Coupling channel and effect mechanism of wide-spectrum electromagnetic pulse on short wave communication equipment	132
5.2.1	Simulation analysis of electromagnetic pulse coupling to the short wave communication equipment under test	132
5.2.2	Test verification of electromagnetic pulse coupling to communication equipment	135
5.2.3	Mechanism of wide-spectrum electromagnetic pulse radiation on short wave communication equipment	138
5.3	Effect mechanisms of ultra-wide spectrum electromagnetic pulse radiation on radio fuzes	139
5.3.1	Test method and procedures	139
5.3.2	Influence of electromagnetic radiation on the security of radio fuzes in nonworking status	140
5.3.3	Influence of electromagnetic radiation on the performance of decimeter wave radio fuzes	140
5.3.4	Influence of electromagnetic radiation on the performance of meter wave radio fuzes	145
5.3.5	Effect mechanism of ultra-wide spectrum electromagnetic pulse radiation on radio fuzes	146
5.4	Electromagnetic radiation effect mechanism of high power microwave on radio fuzes	148
5.4.1	Radiation effect of high power microwave on decimeter wave radio fuzes in working status	149
5.4.2	Effect mechanism of high power microwave on decimeter wave radio fuzes in working status	152
5.5	Protection technology against high intensity electromagnetic pulse for radio fuzes	155
5.5.1	Essential reason of false action of silicon controlled rectifier caused by high intensity electromagnetic pulse	155
5.5.2	Improving the anti-electromagnetic pulse radiation capability of radio fuzes by replacing silicon controlled rectifier	156
5.5.3	Power filter technology	157
5.5.4	Transient interference suppression technology	158

Chapter 6	Electromagnetic radiation effect mechanism of continuous wave on radio fuzes	160
6.1	Effect mechanism of single-frequency electromagnetic radiation on radio fuzes	160
6.1.1	Action pathway analysis of electromagnetic radiation	160
6.1.2	Output signal of high-frequency circuit and accidental fire of fuzes	162
6.1.3	Effect mechanism analysis of single-frequency electromagnetic radiation	163
6.2	Effect mechanism of sweep electromagnetic radiation on radio fuzes	165
6.2.1	Test verification on the reason of accidental fire of fuzes	165
6.2.2	Effect mechanism of sweep electromagnetic radiation	165
6.2.3	Influence of the sweep step length on the accidental fire of fuzes	167
6.2.4	Influence of the frequency stay time on the accidental fire of fuzes	169
6.3	Effect mechanism of AM electromagnetic radiation on radio fuzes	171
6.3.1	Simulation of doppler signal	171
6.3.2	Frequency mixing principle of transistor	173
6.3.3	Frequency mixing characteristics analysis of autodyne	174
6.4	Comprehensive interference to radio fuzes and protection method	174
6.4.1	Comprehensive interference method to radio fuzes	175
6.4.2	Comprehensive protection method of radio fuzes	176
Chapter 7	Inspirations from the research of effect mechanism	177
7.1	Field-line coupling feature of electromagnetic radiation	177
7.1.1	Electromagnetic radiation response feature of coaxial cable terminal load	177
7.1.2	Theoretical analysis of the induced current distribution on the outer conductor of coaxial cable	181
7.1.3	Induced current distribution of coaxial cable under local irradiation	185

7.1.4	Electromagnetic radiation response feature of antenna terminal load	189
7.2	Common effect feature of electromagnetic radiation for frequency-dependent equipment	193
7.2.1	Mechanism of in-band electromagnetic radiation coupling effects	193
7.2.2	Mechanism of high intensity electromagnetic field radiation effects	194
7.3	Development direction of test evaluation technology on electromagnetic radiation effects	195
7.3.1	Equivalent test technology for high intensity electromagnetic field radiation effects	196
7.3.2	Evaluation technology of complex electromagnetic environmental adaptability	196
References		199