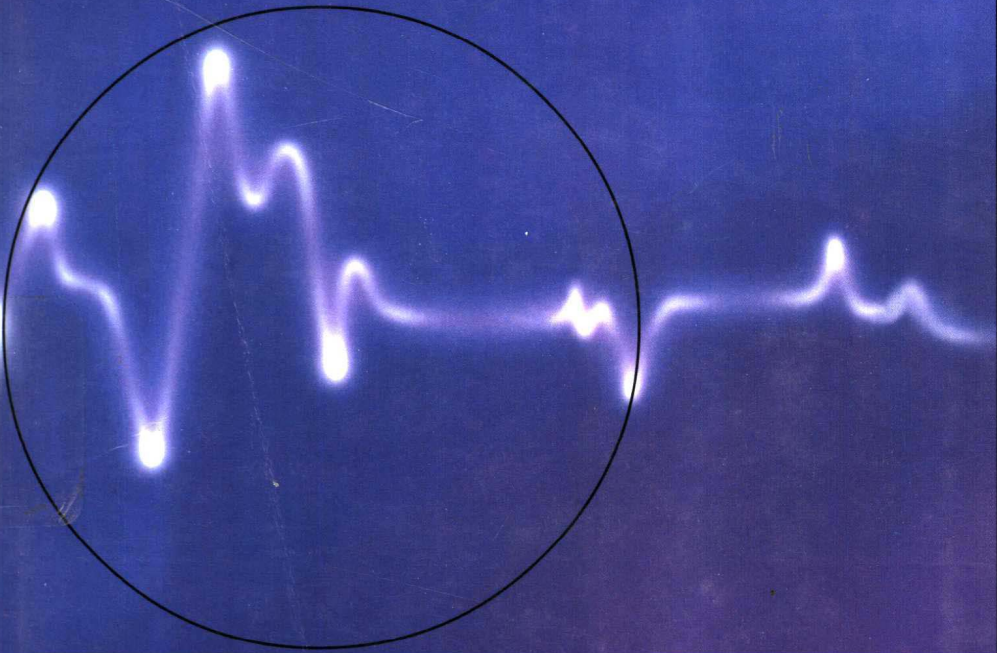


周璧华 陈彬 石立华 著

# 电磁脉冲 及其工程防护

## EMP and EMP Protection

國防工業出版社



# 电磁脉冲及其工程防护

## EMP and EMP Protection

周璧华 陈彬 石立华 著

国防工业出版社

·北京·

## 图书在版编目(CIP)数据

电磁脉冲及其工程防护/周璧华等著. —北京:国防工业出版社, 2003. 1

ISBN 7-118-02848-7

I. 电... II. 周... III. ①电磁脉冲②核防护  
IV. ①TL91②TL76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 025918 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850×1168 1/32 印张 14 $\frac{1}{2}$  359 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 34.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

## 致 读 者

**本书由国防科技图书出版基金资助出版。**

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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。

**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总装备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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业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。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	殷鹤龄			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	崔士义	蔡镛		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	彭华良	韩祖南	舒长胜

## 序

现代战争中,制信息权是克敌制胜的重要手段之一。核爆炸产生的电磁脉冲、自然环境中的电磁脉冲、非核技术产生的电磁脉冲(如高功率微波,超宽带电磁辐射等)是制约制信息权的重要因素。特别是微电子化的信息设备,对电磁脉冲更加敏感,用电磁脉冲攻击诸如计算机、卫星一类的敏感信息系统,使之失效或损伤已成为可能。因此,有关电磁脉冲及其工程防护的理论和技术的便成为当今世界各大国研究的热点之一。

周璧华等撰写的这本专著,阐述了电磁脉冲的产生机理,系统介绍了电磁脉冲环境、电磁脉冲耦合等方面的理论、分析方法和计算结果;电磁脉冲模拟、测量的关键技术;微电子设备的电磁脉冲效应及其防护等问题的实验研究和理论研究结果及由此得出的结论。书中作者在时域全波分析与频域分析相结合、理论与实验相结合的基础上,综述了大量研究成果和当前的发展。关于多用途电磁脉冲模拟器、钢筋混凝土等常用建筑材料的电磁脉冲屏蔽效能和脉冲测量失真信号的恢复等方面的阐述,均有其独到之处。

本书的出版,为关心电磁脉冲及其工程防护有关理论和技术的广大读者提供了一本有重要参考价值的专著,对该项技术的发展必有裨益。

院士 乔登江

# 前 言

电磁脉冲是一种瞬变电磁现象。从时域波形看,一般具有陡峭的前沿,宽度较窄;从频域看,则覆盖了较宽的频带。除了人们熟知的雷电会产生电磁脉冲以外,静电放电以及大功率电子、电气开关的动作也会产生电磁脉冲。特别是核爆炸产生的电磁脉冲,峰值场强极高,上升时间极短,其能量之大,作用范围之广,是其他任何电磁脉冲无法相比的,因而对各种军用和民用的电子、电气设备与系统构成的威胁最为严重。自 20 世纪 70 年代以来,核电磁脉冲及其工程防护技术受到各大国军方的普遍关注。通常在文献中提及电磁脉冲(EMP)时,如果在电磁脉冲前不加任何定语,皆指核电磁脉冲(NEMP)。当前,随着核技术的发展和核电磁脉冲武器的出现,不仅提高电磁脉冲在核爆炸能量中的份额并增强其威力已成为可能,而且非核电磁脉冲炸弹也能产生类似的效应。加之,军用电子、电气设备微电子化,使其对于电磁脉冲的敏感性和易损性日趋严重。因此,有关电磁脉冲及其工程防护的理论和技术的便成为当今世界各大国研究的热点之一。国内在这一方面也开展了大量的工作,取得了不少成果。本书作者长期从事电磁脉冲及其工程防护技术研究,这本专著系统总结了作者以往的有关研究成果,并综述了该领域的研究发展。

全书共分 9 章,重点为核电磁脉冲环境数值模拟技术、电磁脉冲的试验模拟与量测技术、电磁脉冲工程防护技术等几个方面。

在电磁脉冲环境研究方面,本书阐述了核电磁脉冲的产生机理,系统地介绍了核电磁脉冲环境数值计算的方法与结果。在此基础上,对国外发布的有关标准进行了讨论。从军事工程建设与抗核加固的实际出发,建立了电磁脉冲的各种耦合模型,对电磁脉



冲能量进入防护工程的主要渠道进行了分析,并与某些试验结果进行了对比。

本书综述了国内外各种电磁脉冲模拟设备及其相关技术,介绍了颇具新意的多用途电磁脉冲模拟器。在电磁脉冲试验量测方面,对电磁脉冲传感器及测量系统作了全面的介绍和系统的总结,提出了用于脉冲传感器时域标定的建模和评价方法、脉冲测量失真信号的校正与复原等一些新的方法。

关于电磁脉冲工程防护技术,本书介绍了对钢筋混凝土等常用建筑材料的电磁脉冲屏蔽效能进行时域全波分析的新方法,将数值分析结果与有关试验结果作了相互补充与验证。根据国内外资料和某些试验结果讨论了微电子设备对电磁脉冲的敏感性。以作者进行理论分析、试验研究和工程设计的经验为基础,讨论了各种工程防护技术的综合运用问题。

此外,本书还介绍了 $\gamma$ 与电磁脉冲同时作用的环境模拟与耦合计算。最后联系其他高功率电磁环境,阐明了作者的综合电磁防护思路,综述了电磁武器的最新发展动态。

当今世界的战争是核威慑下的信息化战争,是高技术的较量。核爆炸产生的电磁脉冲对于各种信息设备与系统构成了极其严重的威胁。本书对提高各种军用和民用设施与信息系统在核威慑下的信息化战争中的生存能力具有重要参考价值。对于其他电磁脉冲的耦合、模拟、测量与防护等问题的研究,亦有参考意义。

本书可供电子学与信息系统领域和核科学领域从事电磁兼容、抗电磁脉冲加固等方面工作的科研和工程技术人员参考,亦可作为高等院校有关专业本科生、研究生和教师的教学参考书。

全书由周璧华提出编著纲目,并执笔写成除第6章以外的各章。陈彬博士提供了第3、5、7、8章的部分初稿,石立华博士承担了第6章的写作。

乔登江院士对本书的框架结构和内容安排提出了宝贵意见,并对全书作了专审。陈雨生研究员、马运普教授、陈子铭副教授和郭英俊高工为本书的写作提供了有关资料,作者的同事和学生们

均为本书稿的完成和图片制作做出了贡献。在此一并表示诚挚的感谢。

本书承蒙乔登江院士和陶宝祺院士推荐,特此致谢。

由于作者的水平 and 写作经验有限,疏漏和错误之处在所难免,恳请读者给予指正。

# 目 录

<b>第 1 章 核武器的爆炸效应与电磁脉冲</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 核武器 .....	3
1.2.1 核武器与常规武器比较 .....	3
1.2.2 裂变核武器与聚变核武器 .....	4
1.2.3 新一代核武器与电磁脉冲弹 .....	6
1.3 核电磁脉冲的产生机理 .....	7
1.3.1 核爆炸 $\gamma$ 辐射源 .....	7
1.3.2 $\gamma$ 辐射与物质的相互作用 .....	9
1.3.3 康普顿电流模型.....	10
1.3.4 地面核爆炸电磁脉冲.....	13
1.3.5 中等高度空中核爆炸电磁脉冲.....	14
1.3.6 高空核爆炸电磁脉冲.....	14
1.3.7 地下核爆炸电磁脉冲.....	17
1.3.8 内电磁脉冲(IEMP) .....	17
1.3.9 系统电磁脉冲(SGEMP) .....	18
1.4 核电磁脉冲的特点.....	18
1.4.1 地面核爆炸和近地核爆炸电磁脉冲的主要特点 ..	19
1.4.2 高空核爆炸电磁脉冲的主要特点.....	21
1.4.3 核电磁脉冲的一般特点.....	23
参考文献 .....	24
<b>第 2 章 核电磁脉冲环境</b> .....	25
2.1 引言.....	25
2.2 地面核爆炸电磁脉冲环境问题的物理基础.....	26

2.2.1	物理模型与场方程	26
2.2.2	初始条件与边界条件	31
2.2.3	康普顿电流	33
2.2.4	空气电导率	35
2.2.5	大地电导率	36
2.3	地面核爆炸电磁脉冲环境的数值分析	37
2.3.1	差分方程的建立	37
2.3.2	网格选取	39
2.3.3	场方程与电离方程的差分分解	41
2.3.4	计算步骤	45
2.3.5	部分计算结果	46
2.4	高空核爆炸电磁脉冲环境研究	58
2.4.1	高空核爆炸电磁脉冲的理论分析	58
2.4.2	高空核爆炸电磁脉冲的数值计算	62
2.4.3	高空核爆炸电磁脉冲在地面上的覆盖范围及场分布	66
2.4.4	高空核爆炸电磁脉冲辐射环境的描述	68
	参考文献	74
<b>第3章 核电磁脉冲耦合</b>		<b>77</b>
3.1	引言	77
3.2	电磁脉冲对电小尺寸柱状导体与环状导体的耦合	78
3.2.1	单极子天线与偶极子天线	78
3.2.2	磁偶极子天线	80
3.3	电磁脉冲对电缆等长导体的耦合	81
3.3.1	架空电缆	81
3.3.2	埋地长电缆	86
3.4	HEMP作用下近地有限长电缆外导体感应电流计算	87
3.4.1	采用FDTD法	87
3.4.2	采用传输线(TL)理论的近似算法	93
3.4.3	与有关试验结果的比较	98

3.5	电力线 HEMP 感应过电压及其在供电系统中的传输	99
3.5.1	架空电力线 HEMP 感应过电压计算	99
3.5.2	在 HEMP 作用下有载架空电力线能量耦合分析	102
3.5.3	埋地电力电缆 HEMP 耦合分析	105
3.5.4	架空电力线终端接变压器时的 HEMP 感应过电压及其在供电系统中的传输	108
3.6	电磁脉冲对孔缝的耦合	115
3.6.1	实壁金属屏蔽壳体上孔缝对 HEMP 的耦合及其对电磁脉冲屏蔽效能的影响	115
3.6.2	屏蔽机箱上贯通导线对 HEMP 的耦合分析	121
	参考文献	127
<b>第 4 章</b>	<b>电磁脉冲对微电子设备的效应</b>	<b>129</b>
4.1	引言	129
4.2	电磁脉冲对微型计算机和微型计算机测控设备的干扰与损伤效应	130
4.3	电磁脉冲对微型计算机接口电路实验模型的干扰与损伤效应	134
4.3.1	微型计算机接口电路实验模型	134
4.3.2	电磁脉冲模拟实验	136
4.3.3	实验结果及其分析	136
4.4	脉冲磁场对微电子设备的干扰与损伤效应	140
4.5	电磁脉冲对微电子设备的干扰与损伤机理	142
	参考文献	143
<b>第 5 章</b>	<b>电磁脉冲模拟技术</b>	<b>145</b>
5.1	引言	145
5.2	电磁脉冲模拟器概述	148
5.2.1	有界波电磁脉冲模拟器	148
5.2.2	偶极子模拟器	152
5.2.3	静态模拟器	157

5.2.4	混合型模拟器 .....	158
5.2.5	定向辐射模拟器 .....	162
5.2.6	源区电磁脉冲环境的模拟 .....	164
5.2.7	内电磁脉冲和系统电磁脉冲模拟 .....	167
5.3	脉冲源 .....	167
5.3.1	电容放电式脉冲源 .....	168
5.3.2	Marx 发生器 .....	172
5.3.3	Marx 发生器输出波形陡化技术 .....	176
5.3.4	双极性 Marx 发生器脉冲源 .....	182
5.4	多用途电磁脉冲模拟器 .....	183
5.4.1	模拟器组成及各部分特点 .....	184
5.4.2	脉冲分压器测量系统 .....	187
5.4.3	可移动 EMP 模拟器电场分布的数值模拟 .....	189
	参考文献 .....	198
<b>第 6 章</b>	<b>电磁脉冲的测量与信号处理</b> .....	<b>199</b>
6.1	引言 .....	199
6.2	脉冲电场的测量 .....	200
6.2.1	D 传感器 .....	202
6.2.2	E 传感器 .....	206
6.3	脉冲磁场的测量 .....	208
6.3.1	B 传感器 .....	210
6.3.2	H 传感器 .....	214
6.4	脉冲电流的测量 .....	216
6.4.1	电流钳 .....	217
6.4.2	测量电缆电流的插入单元 .....	217
6.4.3	内 Moebius 互感 (Inner Moebius Mutual Inductance, IMM) 探头 .....	218
6.4.4	嵌入式 Moebius 互感 (Flush Moebius Mutual Inductance, FMM) 探头 .....	219
6.5	信号调理与传输、记录 .....	220

6.5.1	信号调理 .....	221
6.5.2	信号传输 .....	226
6.5.3	信号采集 .....	229
6.5.4	抗干扰措施 .....	232
6.6	测量系统的标定 .....	233
6.6.1	电磁脉冲时域标定系统 .....	233
6.6.2	标定数据的处理 .....	236
6.6.3	标定实例 .....	238
6.6.4	系统线性的检查 .....	241
6.7	测量结果的校正与复原 .....	242
6.7.1	采用数字滤波器的信号恢复方法 .....	242
6.7.2	系统离散传递函数模型的辨识 .....	244
	参考文献 .....	249
<b>第7章</b>	<b>电磁脉冲的工程防护</b> .....	<b>251</b>
7.1	引言 .....	251
7.2	电磁脉冲在岩土介质中的衰减 .....	253
7.2.1	SREMP 场在地面以下岩土介质中的衰减 .....	253
7.2.2	HEMP 辐射场在岩土介质中的衰减 .....	254
7.2.3	HEMP 对无限大有耗介质板的穿透 .....	260
7.2.4	岩土介质的色散效应对电磁脉冲传播的影响 .....	266
7.3	电磁脉冲屏蔽技术 .....	275
7.3.1	屏蔽的基本概念 .....	275
7.3.2	对连续波的屏蔽效能分析及提高屏蔽性能的常用措施 .....	278
7.3.3	对电磁脉冲的屏蔽 .....	288
7.3.4	钢筋混凝土层对电磁脉冲的屏蔽效能 .....	299
7.3.5	不同屏蔽材料对平面波型电磁脉冲的屏蔽效能 .....	313
7.4	电磁脉冲防护中的接地技术 .....	318
7.4.1	概述 .....	318
7.4.2	电磁脉冲感应电流在接地体中的散流特性 .....	319

7.4.3	冲击接地电阻 冲击阻抗 冲击系数 .....	320
7.4.4	冲击阻抗的时间特性 .....	321
7.4.5	单根接地体的冲击接地电阻的估算 .....	322
7.4.6	多根并连接地体冲击电阻的估算 .....	325
7.4.7	辐射式水平接地体 .....	325
7.4.8	接地方面的其他问题 .....	327
7.5	典型市电供电系统对核电磁脉冲的防护措施 .....	328
7.5.1	HEMP 过电压的特点与危害 .....	329
7.5.2	10kV 架空线 HEMP 过电压与 10kV 埋地 电缆 HEMP 感应电压比较 .....	330
7.5.3	避雷器及其对 HEMP 过电压的响应特性 .....	330
7.5.4	串联电抗线圈和并联电容器对 HEMP 过电压的 防护作用 .....	336
7.5.5	10/0.4kV 配电变压器 HEMP 过电压防护 .....	338
7.5.6	供电系统二次设备的核电磁脉冲防护 .....	340
7.6	电磁脉冲工程防护中的其他问题 .....	341
7.6.1	地下工程口部的电磁脉冲防护 .....	341
7.6.2	与金属管道有关的电磁脉冲防护措施 .....	344
	参考文献 .....	345
<b>第 8 章</b>	<b><math>\gamma</math> 与电磁脉冲同时作用的环境模拟 .....</b>	<b>347</b>
8.1	引言 .....	347
8.2	$\gamma$ 与电磁脉冲同时作用的环境模拟 .....	349
8.2.1	金属圆柱腔体 IEMP 数值分析 .....	349
8.2.2	$\gamma$ 与 EMP 同时存在的综合核环境生成 .....	356
8.2.3	IEMP 及细长导体表面电流的三维数值计算 .....	363
8.2.4	EMP 平面波单独作用下细长导体 表面电流的计算 .....	373
8.3	电缆受 $\gamma$ 和 EMP 同时作用及分别作用的实验 .....	375
8.3.1	实验目的和实验内容 .....	375
8.3.2	实验结果及其分析 .....	375



参考文献	376
<b>第9章 高功率电磁环境</b>	<b>377</b>
9.1 引言	377
9.2 雷电与雷电电磁脉冲	378
9.2.1 雷电的形成机理及其特性	378
9.2.2 雷电电磁脉冲	393
9.2.3 有关雷电效应的电磁环境标准	401
9.2.4 球状闪电之谜	405
9.3 现代电磁武器的发展与高功率超宽带电磁环境	410
9.3.1 HPM, UWB 和 HEMP	410
9.3.2 FREMP(Fast Risetime Electromagnetic Pulse)	413
9.3.3 超宽带短脉冲电磁学(Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics)	415
9.3.4 对防护工程的影响	417
9.3.5 用于产生高功率电磁脉冲的磁通压缩发生器(MFCG)	418
参考文献	423