



《中国工程物理研究院科技丛书》第062号

# 高功率超宽带电磁脉冲技术

High Power EM Pulse Technology

孟凡宝 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

《中国工程物理研究院科技丛书》第 062 号

# 高功率超宽带电磁脉冲技术

**High Power EM Pulse Technology**

孟凡宝 主编

杨周炳 马弘舸 周海京 廖勇 编著

国防工业出版社

·北京·

**图书在版编目(CIP)数据**

高功率超宽带电磁脉冲技术 / 孟凡宝主编. —北京:  
国防工业出版社, 2011. 11

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 07101 - 6

I. ①高... II. ①孟... III. ①电磁脉冲 - 脉冲  
辐照 IV. ①TN788

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 038092 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787 × 1092 1/16 印张 14½ 字数 342 千字  
2011 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 52.00 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  
第六届评审委员会组成人员

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 主任委员      | 刘成海 |     |     |     |
| 副主任委员     | 宋家树 | 蔡 镭 | 程洪彬 |     |
| 秘书长       | 程洪彬 |     |     |     |
| 副秘书长      | 邢海鹰 | 贺 明 |     |     |
| 委 员       | 于景元 | 才鸿年 | 马伟明 | 王小谟 |
| (按姓氏笔画排序) | 甘茂治 | 甘晓华 | 卢秉恒 | 邬江兴 |
|           | 刘世参 | 芮筱亭 | 李言荣 | 李德仁 |
|           | 李德毅 | 杨 伟 | 肖志力 | 吴有生 |
|           | 吴宏鑫 | 何新贵 | 张信威 | 陈良惠 |
|           | 陈冀胜 | 周一宇 | 赵万生 | 赵凤起 |
|           | 崔尔杰 | 韩祖南 | 傅惠民 | 魏炳波 |

# 《中国工程物理研究院科技丛书》

## 出版说明

中国工程物理研究院建院 50 年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业领域里,不论是在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人才。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 50 年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过的 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书自 1989 年开始出版,在今后一段时期还将继续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 50 年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会

2008 年 5 月 8 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》  
第六届编审委员会

学术顾问 俞大光

编委会主任 杜祥琬

副主任 彭先觉 汪小琳 李志民

委员 (以姓氏笔画为序)

冯建农 帅茂兵 田 勇 华欣生 刘柯钊

汤业朋 陈贤林 何建国 李 凡 李正宏

李泽仁 苏 伟 吴志杰 张 凯 张 健

张文平 张方晓 张保汉 孟凡宝 赵 峰

顾 援 莫 军 唐永建 袁光伟 傅思祖

彭述明 谢 平

科技丛书编辑部负责人 李天惠

本册编辑 李天惠

# 《中国工程物理研究院科技丛书》 已出版书目

- 001 高能炸药及相关物性能  
董海山 周芬芬 主编  
科学出版社 1989年11月
- 002 光学高速摄影测试技术  
谭显祥 编著  
科学出版社 1990年02月
- 003 凝聚炸药起爆动力学  
章冠人 等编著  
国防工业出版社 1991年09月
- 004 线性代数方程组的迭代解法  
胡家贛 编著  
科学出版社 1991年12月
- 005 映象与混沌  
陈式刚 编著  
国防工业出版社 1992年06月
- 006 再入遥测技术(上册)  
谢铭勋 编著  
国防工业出版社 1992年06月
- 007 再入遥测技术(下册)  
谢铭勋 编著  
国防工业出版社 1992年12月
- 008 高温辐射物理与量子辐射理论  
李世昌 编著  
国防工业出版社 1992年10月
- 009 粘性消去法和差分格式粘性  
郭柏灵 著  
科学出版社 1993年03月
- 010 无损检测技术及其应用  
张俊哲 等著  
科学出版社 1993年05月
- 011 半导体材料辐射效应  
曹建中 著  
科学出版社 1993年05月
- 012 炸药热分析  
楚士晋 编著  
科学出版社 1994年12月
- 013 脉冲辐射场诊断技术  
刘庆兆 主编  
科学出版社 1994年12月
- 014 放射性核素活度的测量方法和技术  
古当长 编著  
科学出版社 1994年12月
- 015 二维非定常流和激波  
王继海 编著  
科学出版社 1994年12月



- 016 抛物型方程差分方法引论  
李德元 陈光南 著 科学出版社 1995 年 12 月
- 017 特种结构分析  
刘新民 韦日演 主编 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 018 理论爆轰物理  
孙锦山 朱建士 著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册  
潘吉安 编著 国防工业出版社 1995 年 12 月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析  
陈元金 编著 国防工业出版社 1997 年 01 月
- 021 近代成像技术与图像处理  
吴世法 著 国防工业出版社 1997 年 03 月
- 022 一维流体力学差分方法  
水鸿寿 著 国防工业出版社 1998 年 02 月
- 023 抗辐射电子学—辐射效应及加固原理  
赖祖武 等著 国防工业出版社 1998 年 07 月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术  
周德惠 谭云 编著 国防工业出版社 1998 年 12 月
- 025 试验核物理测量中的粒子分辨  
段绍节 编著 国防工业出版社 1999 年 06 月
- 026 实验物态方程导引(第二版)  
经福谦 著 科学出版社 1999 年 09 月
- 027 无穷维动力系统  
郭柏灵 著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 028 真空吸取器设计及应用技术  
单景德 编著 国防工业出版社 2000 年 01 月
- 029 再入飞行器天线  
金显盛 编著 国防工业出版社 2000 年 03 月
- 030 应用爆轰物理  
孙承纬 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 031 混沌的控制、同步与利用  
陈式刚 等著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 032 激光干涉测速技术  
胡绍楼 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 033 空气炮理论与实验技术  
王金贵 著 国防工业出版社 2000 年 12 月
- 034 一维不定常流与激波  
李维新 著 国防工业出版社 2000 年 12 月

- 035 X射线与真空紫外辐射源及其计量技术  
孙景文 编著  
国防工业出版社 2001年03月
- 036 含能材料热谱集  
董海山 等编著  
国防工业出版社 2001年03月
- 037 材料中的氦及氚渗透  
王佩璇 宋家树 著  
国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体 X射线谱学  
孙景文 编著  
国防工业出版社 2003年01月
- 039 激光核聚变靶物理基础  
张钧 常铁强 著  
国防工业出版社 2004年11月
- 040 系统可靠性工程  
金碧辉 主编  
国防工业出版社 2004年06月
- 041 核材料  $\gamma$  特征谱的探测和分析技术  
田东风 等编著  
国防工业出版社 2004年06月
- 042 高能激光系统  
苏毅 万敏 编著  
国防工业出版社 2004年06月
- 043 近可积无穷维动力系统  
郭柏灵 高平 陈瀚林 著  
国防工业出版社 2004年06月
- 044 半导体器件和集成电路的辐射效应  
陈盘训 著  
国防工业出版社 2005年06月
- 045 高功率脉冲技术  
刘锡三 编著  
国防工业出版社 2005年08月
- 046 热电池  
陆瑞生 刘效疆 编著  
国防工业出版社 2005年08月
- 047 原子结构、碰撞与光谱理论  
方泉玉 颜君 著  
国防工业出版社 2006年01月
- 048 非牛顿流动力系统  
郭柏灵 林国广 尚亚东 著  
国防工业出版社 2006年02月
- 049 动高压原理与技术  
经福谦 陈俊祥 主编  
国防工业出版社 2006年03月
- 050 直线感应电子加速器  
邓建军 主编  
国防工业出版社 2006年10月
- 051 中子核反应激发函数  
田东风 孙伟力 编著  
国防工业出版社 2006年11月
- 052 实验冲击波物理导引  
谭华 著  
国防工业出版社 2007年03月
- 053 核军备控制核查技术概论  
刘成安 伍钧 编著  
国防工业出版社 2007年03月
- 054 强流粒子束及其应用  
刘锡三 著  
国防工业出版社 2007年07月
- 055 氦和氚的工程技术  
蒋国强 等编著  
国防工业出版社 2007年11月

- 056 中子学宏观实验  
段绍节 编著  
国防工业出版社 2008 年 05 月
- 057 高功率微波发生器原理  
丁武 著  
国防工业出版社 2008 年 05 月
- 058 等离子体中辐射输运和辐射流体力学  
彭惠民 编著  
国防工业出版社 2008 年 08 月
- 059 非平衡统计力学  
陈式刚 编著  
科学出版社 2010 年 02 月
- 060 高能硝胺炸药的热分解  
彭惠民 编著  
国防工业出版社 2010 年 06 月
- 061 电磁脉冲导论  
王泰春 贺云汉 王玉芝 著  
国防工业出版社 2011 年 03 月
- 062 高功率超宽带电磁脉冲技术  
孟凡宝 主著  
国防工业出版社 2011 年 11 月
- 063 分数阶偏微分方程及其数值解  
郭柏灵 蒲学科 黄凤辉 著  
科学出版社 2012 年 01 月
- 064 快中子临界装置和脉冲堆实验物理  
贺任辅 灯门才 编著  
国防工业出版社 2012 年 02 月

# 前 言

超宽带电磁脉冲在时域上为一个快上升前沿的高峰值功率脉冲,其脉冲宽度往往只有纳秒或亚纳秒量级,而频谱上则可以达到两个倍频程以上。高功率超宽带电磁脉冲技术研究的实质是如何产生和辐射快上升沿的高峰值电磁脉冲,以及这种电磁脉冲在各种不同环境下的传播和效应等问题。本书是编者自 1995 年起从事高功率超宽带电磁脉冲技术研究工作的结晶,是一本概括高功率超宽带电磁脉冲技术方面的专著,其主要特点是理论和实际应用相结合,注重系统性,并强调工程设计方法,可为本领域的学者和工程技术人员参考。

本人带领课题组从 1995 年起开展高功率超宽带电磁脉冲技术方面的研究工作,本书的其他作者也是课题组的主要成员。在此期间,课题组的部分成员以超宽带电磁脉冲技术研究为题完成了博士和硕士论文。我于 1999 年完成了博士论文《高功率超宽带电磁脉冲产生和辐射》及 2002 年的博士后研究报告《高功率超宽带抛物面冲击脉冲辐射天线研究》,周海京于 2000 年完成了博士后研究报告《超宽带高功率电磁脉冲辐射天线的研究》,廖勇于 2003 年完成了硕士论文《超宽带 TEM 喇叭天线阵列辐射特性初步研究》。在此基础上,我从 2003 年开始,为研究生开设了高功率超宽带电磁脉冲技术的课程,但很难找到一本合适的教科书。20 世纪 80 年代以来,Carl E. Baum 发表的大量学术论文以及每两年一次的“超宽带短脉冲电磁学”国际会议文集上其他研究人员发表的论文为广大科技工作者提供了重要的资料 and 知识来源,但这些论文本身无法直接用来教学。为此,根据多年研究工作的积累,在课题组成员博士和硕士论文以及广泛参考国内外学术论文的基础上,我于 2005 年编写了一本《高功率超宽带电磁脉冲技术》研究生课程参考讲义。经过对讲义内容的重新编写,最终完成了本书。科学技术的发展是无止境的,要想获得本领域的最新信息,还需要随时关注相关科技杂志和国际学术会议的文集。

周海京编写了第 1 章绪论和第 4 章超宽带天线概述;杨周炳和丁恩燕编写了第 2 章超宽带脉冲充电电源技术和第 3 章超宽带电磁脉冲形成技术;廖勇编写了第 5 章冲击脉冲辐射天线(IRA)、第 6 章 TEM 喇叭天线及阵列和第 7 章超宽带电磁脉冲测量技术;马弘舸编写了第 9 章超宽带电磁脉冲效应简介;我编写了第 8 章高功率超宽带电磁脉冲辐射源系统介绍并负责全书的审核。

本人是在[惠钟锡]老师和周传明老师引领下步入高功率微波技术和超宽带电磁脉冲

技术领域的,衷心感谢他们对我的关心、帮助、支持和指导。本书在编写过程中得到了中国工程物理研究院科技丛书编委会和院、所相关领导的关心和支持,得到了国内同行的诚挚关心和鼓励,在此一并表示衷心的感谢。感谢我的同事陆巍、陈洪斌、虞惠龙、康强等同志,他们的很多专业知识被融合到了本书的内容中。徐刚博士在书中英文翻译、插图修订等方面提供了很大帮助。由于作者的水平有限,书中难免存在错误和不足之处,恳请读者批评指正。

孟凡宝  
2009年8月

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....             | 1  |
| 1.1 高功率电磁脉冲技术的历史沿革 .....          | 1  |
| 1.2 高功率电磁环境及高功率微波 .....           | 4  |
| 1.3 国外典型的高功率超宽带研究情况 .....         | 7  |
| 1.3.1 研究情况简介 .....                | 7  |
| 1.3.2 典型高功率超宽带电磁脉冲系统简介 .....      | 8  |
| 1.4 典型高功率宽带电磁脉冲系统简介.....          | 14 |
| 1.5 超宽带技术在雷达和通信中的应用.....          | 17 |
| 1.5.1 超宽带技术的发展历程.....             | 17 |
| 1.5.2 超宽带雷达.....                  | 19 |
| 1.5.3 超宽带通信.....                  | 20 |
| 1.6 本书组成.....                     | 21 |
| 参考文献 .....                        | 22 |
| <b>第 2 章 超宽带脉冲充电电源技术</b> .....    | 23 |
| 2.1 Tesla 变压器技术 .....             | 23 |
| 2.1.1 Tesla 变压器的理论分析 .....        | 23 |
| 2.1.2 Tesla 变压器设计中的几个重要参数关系 ..... | 26 |
| 2.1.3 Tesla 变压器参数设计 .....         | 28 |
| 2.2 基于 SOS 开关的脉冲充电电源技术 .....      | 30 |
| 2.2.1 概述.....                     | 30 |
| 2.2.2 SOS 开关 .....                | 32 |
| 2.2.3 SOS 脉冲源典型电路.....            | 33 |
| 2.3 马克斯(Marx)发生器脉冲充电电源技术 .....    | 34 |
| 2.3.1 电感隔离型 Marx 发生器 .....        | 35 |
| 2.3.2 Marx 发生器回路电阻及电感 .....       | 35 |
| 参考文献 .....                        | 37 |
| <b>第 3 章 超宽带电磁脉冲形成技术</b> .....    | 38 |
| 3.1 冲击脉冲形成原理.....                 | 39 |
| 3.1.1 单传输线高压冲击脉冲形成.....           | 39 |
| 3.1.2 同轴 Blumlein 传输线 .....       | 41 |
| 3.2 单周期脉冲形成的基本原理.....             | 44 |
| 3.2.1 双开关形成单周期脉冲.....             | 44 |

|            |                      |           |
|------------|----------------------|-----------|
| 3.2.2      | 带有单支节短路线的传输线形成双极脉冲   | 45        |
| 3.2.3      | 短路—锐化开关组合形成双极脉冲      | 46        |
| 3.3        | 形成线对形成线充电技术          | 47        |
| 3.4        | 亚纳秒开关技术              | 48        |
| 3.4.1      | 气体火花隙开关              | 48        |
| 3.4.2      | 油火花隙开关               | 52        |
| 3.4.3      | 光导开关                 | 53        |
|            | 参考文献                 | 55        |
| <b>第4章</b> | <b>超宽带天线概述</b>       | <b>56</b> |
| 4.1        | 超宽带天线的基本概念           | 56        |
| 4.1.1      | 天线的带宽                | 56        |
| 4.1.2      | 超宽带天线的时域描述           | 57        |
| 4.2        | 超宽带天线的基本理论           | 60        |
| 4.2.1      | 线天线的瞬态分析             | 61        |
| 4.2.2      | 面天线的瞬态分析             | 65        |
| 4.2.3      | 时域方向图                | 67        |
| 4.2.4      | 天线阵列                 | 69        |
| 4.3        | 超宽带天线的基本类型           | 71        |
| 4.3.1      | 对数周期天线               | 72        |
| 4.3.2      | 平面螺旋天线               | 73        |
| 4.3.3      | 盘锥天线和双锥天线            | 76        |
| 4.3.4      | TEM 喇叭天线             | 78        |
| 4.3.5      | 新型 TEM 类天线           | 79        |
| 4.4        | 高功率超宽带天线             | 83        |
| 4.4.1      | 组合振子天线               | 83        |
| 4.4.2      | 冲击脉冲辐射天线             | 85        |
|            | 参考文献                 | 86        |
| <b>第5章</b> | <b>冲击脉冲辐射天线(IRA)</b> | <b>87</b> |
| 5.1        | 引言                   | 87        |
| 5.2        | IRA 辐射特性分析           | 87        |
| 5.2.1      | 时域口径场理论              | 87        |
| 5.2.2      | IRA 轴上辐射场            | 90        |
| 5.2.3      | IRA 辐射方向图            | 95        |
| 5.2.4      | 轴上辐射场频谱分析            | 96        |
| 5.3        | 抛物面 IRA 的馈入阻抗        | 98        |
| 5.3.1      | 时域中增益的定义             | 98        |
| 5.3.2      | 圆锥馈入                 | 99        |
| 5.3.3      | 共面平板馈入               | 101       |
| 5.3.4      | 讨论                   | 103       |

|              |                                |            |
|--------------|--------------------------------|------------|
| 5.4          | 反射面 IRA 馈入结构的优化 .....          | 104        |
| 5.4.1        | 反射面 IRA 馈臂结构的优化 .....          | 104        |
| 5.4.2        | 同轴到平板过渡结构 .....                | 107        |
| 5.4.3        | 半抛物面 IRA (HIRA) 的馈电结构 .....    | 110        |
|              | 参考文献 .....                     | 114        |
| <b>第 6 章</b> | <b>TEM 喇叭天线及阵列 .....</b>       | <b>116</b> |
| 6.1          | 引言 .....                       | 116        |
| 6.2          | 小张角标准 TEM 喇叭天线的理论模型 .....      | 116        |
| 6.2.1        | 开路传输线模型 .....                  | 116        |
| 6.2.2        | 轴上远场辐射 .....                   | 116        |
| 6.2.3        | TEM 喇叭天线的频率响应 .....            | 119        |
| 6.2.4        | TEM 喇叭天线的低频特性 .....            | 120        |
| 6.2.5        | 改善 TEM 喇叭的低频辐射 .....           | 120        |
| 6.2.6        | 改善 TEM 喇叭天线的高频特性 .....         | 121        |
| 6.3          | TEM 喇叭的特性阻抗 .....              | 121        |
| 6.4          | 单个 TEM 喇叭远场辐射特性 .....          | 122        |
| 6.5          | TEM 喇叭天线阵列 .....               | 123        |
| 6.5.1        | TEM 喇叭天线阵列轴上远场辐射特性 .....       | 124        |
| 6.5.2        | TEM 喇叭阵列方向图 .....              | 125        |
| 6.5.3        | 不同时刻阵列 <i>E</i> 面瞬态电场分布 .....  | 127        |
| 6.6          | TEM 喇叭天线阵列实验 .....             | 129        |
| 6.6.1        | 半 TEM 喇叭天线特性 .....             | 129        |
| 6.6.2        | 阵列实验 .....                     | 132        |
| 6.7          | 高功率 TEM 喇叭四元天线阵列实验 .....       | 136        |
| 6.7.1        | 阵列系统设计 .....                   | 136        |
| 6.7.2        | 实验研究 .....                     | 136        |
|              | 参考文献 .....                     | 139        |
| <b>第 7 章</b> | <b>超宽带电磁脉冲测量技术 .....</b>       | <b>141</b> |
| 7.1          | 引言 .....                       | 141        |
| 7.2          | 瞬态脉冲测量 .....                   | 141        |
| 7.3          | 超宽带辐射场测量 .....                 | 145        |
| 7.4          | 脉冲信号传输畸变的软件补偿 .....            | 149        |
|              | 参考文献 .....                     | 153        |
| <b>第 8 章</b> | <b>高功率超宽带电磁脉冲辐射源系统介绍 .....</b> | <b>155</b> |
| 8.1          | 引言 .....                       | 155        |
| 8.2          | 全抛物面电磁脉冲辐射源 .....              | 155        |
| 8.2.1        | 脉冲充电电源 .....                   | 155        |
| 8.2.2        | 脉冲形成系统 .....                   | 156        |
| 8.2.3        | 全抛物面 IRA 系统 .....              | 159        |



|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 8.2.4      | 实验研究 .....                | 164        |
| 8.2.5      | 电磁脉冲源系统实验结果 .....         | 169        |
| 8.3        | 半抛物面电磁脉冲辐射源系统 .....       | 170        |
| 8.3.1      | Tesla 变压器型亚纳秒脉冲源 .....    | 171        |
| 8.3.2      | 半抛物面 IRA .....            | 172        |
| 8.3.3      | 实验结果 .....                | 173        |
| 8.4        | 基于光导开关的超宽带电磁脉冲系统 .....    | 174        |
| 8.4.1      | 实验装置 .....                | 174        |
| 8.4.2      | 实验结果 .....                | 176        |
|            | 参考文献 .....                | 177        |
| <b>第9章</b> | <b>超宽带电磁脉冲效应简介 .....</b>  | <b>178</b> |
| 9.1        | 引言 .....                  | 178        |
| 9.1.1      | 电磁脉冲效应现象的表征 .....         | 179        |
| 9.1.2      | 超宽带电磁脉冲效应的特点 .....        | 179        |
| 9.1.3      | 典型电子学系统的超宽带电磁脉冲效应现象 ..... | 180        |
| 9.1.4      | 国外的电磁脉冲效应研究 .....         | 180        |
| 9.2        | 超宽带电磁脉冲效应技术 .....         | 182        |
| 9.2.1      | 超宽带电磁脉冲效应的基本研究内容及方法 ..... | 182        |
| 9.2.2      | 超宽带电磁脉冲效应实验技术 .....       | 184        |
| 9.2.3      | 实验数据的分析和处理方法简介 .....      | 187        |
| 9.2.4      | 系统电磁脉冲效应的评估流程 .....       | 188        |
| 9.3        | 电磁脉冲效应机理简介 .....          | 189        |
| 9.3.1      | 超宽带电磁脉冲的耦合 .....          | 189        |
| 9.3.2      | 组件级的电磁脉冲效应机理 .....        | 201        |
| 9.3.3      | 系统总敏感效应阈值 .....           | 204        |
| 9.4        | 电磁脉冲的防护研究简介 .....         | 205        |
| 9.4.1      | 防护的需求 .....               | 205        |
| 9.4.2      | 国外防护技术的发展 .....           | 206        |
| 9.4.3      | 加固过程的基本要素 .....           | 206        |
| 9.4.4      | 前门及后门电磁脉冲加固技术简介 .....     | 207        |
|            | 参考文献 .....                | 209        |