



《中国工程物理研究院科技丛书》第061号

电磁脉冲导论

Introduction to Electromagnetic Pulse

王泰春 贺云汉 王玉芝 著



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 061 号

电磁脉冲导论

Introduction to Electromagnetic Pulse

王泰春 贺云汉 王玉芝 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

电磁脉冲导论 / 王泰春, 贺云汉, 王玉芝著. —北京: 国防工业出版社, 2011. 3

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 978-7-118-07070-5

I. ①电... II. ①王... ②贺... ③王... III. ①电磁脉冲-研究 IV. ①TL91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 235926 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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 29 $\frac{1}{4}$ 字数 645 千字

2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 73.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422
发行传真: (010)68411535

发行邮购: (010)68414474
发行业务: (010)68472764

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	王 峰			
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
胡家赣 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 材料中的氦及氡渗透
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 γ 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 氦和氡的工程技术
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
舒远杰 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 2010年11月

序

本书以作者长期在电离效应和电磁脉冲领域研究中所取得的进展和科研成果为基础,并吸收国际上公开发表的部分成果编著而成。

电离效应与电磁脉冲现象的研究是一门复杂的、理论性强的多科性学科。从等离子体物理,相对论流体力学,固体电子论到电荷的分离、复合、扩散和消失,从电磁理论到电磁脉冲的产生、传播、耦合和屏蔽等内容组成了一个广泛的研究领域。随着各种武器的现代化,大量的电子设备和计算机,固体部件和存储部件等都应用于武器的控制系统,这些都是电离效应和电磁脉冲损伤的致命部位。因此从理论、实验和数值模拟三方面对这一问题进行深入研究具有十分重要的意义。只有对该效应的产生机理、物理特性和传播规律从上述三方面深入研究并掌握其规律后,才能正确评估系统的电磁敏感度和易损性,从而采取有效的加固、防护措施。这一问题的研究不仅在国防上有重要地位,而且在航天技术和国民经济许多部门也同样不可忽视。

本书主要内容包括核辐射在大气中产生的电离效应和在大气中产生的电子及其对电磁波传播的影响,高空电磁脉冲理论,高空电磁脉冲模拟实验,内电磁脉冲理论,内电磁脉冲实验,系统电磁脉冲理论,电磁脉冲研究的延伸与拓展和在高功率电磁环境下系统易损性与加固技术。本书写作特点显著,主要体现在理论同实验相结合,在理论描述中物理与数学相结合,解析研究与数值模拟研究相结合,这后两个结合使读者易于掌握其物理实质,数学物理方法和应用数学方法。书中的内容既有基础理论,也有重要的实际应用结果,包含了作者多年在这一领域研究实践中对诸多问题的理解、体会和科研成果。以理论和实验结合方式,深入、系统地介绍强电磁现象的书在国内似乎是首次出版。

本书可作为从事这一领域研究的科研人员,大学教师的参考书,也可作为与这个研究领域有关专业的研究生、高年级本科生的参考书。

彭先觉

2010年6月28日

前 言

对核爆或模拟设备实验产生的电离效应和电磁脉冲的理论与实验研究是核效应物理的一个重要方面。中国工程物理研究院下属有关研究所是这一领域在国内最早开展研究的单位之一。长期的研究工作使得在这一领域的研究中取得了重要进展。在理论研究、实验研究和数值模拟研究中都分别取得了有实际应用价值的科研成果。在电磁脉冲效应研究中的成果,为后来继续开展高功率电磁学领域的研究工作打下了较为坚实的基础。

有关这一领域的全国性学术交流会已进行过多次且每次会议都有论文集。但据我们所知,至今还没有一本系统、深入地总结这一新学科已取得的成果的著作。本书的撰写希望能填补这一空白。本书是在作者们多年来从事该领域研究工作的基础上撰写的,其中包括从事理论研究和实验研究同志们的部分成果以及国际上公开发表的部分成果。

全书共分 14 章。前两章介绍核辐射在大气中产生的电离效应和在大气中产生的电子及其对电磁波传播的影响,第 3 章和第 4 章分别描述高空核爆产生的电磁脉冲和高空电磁脉冲模拟实验,第 5 章到第 8 章介绍内电磁脉冲理论,第 9 章介绍内电磁脉冲实验,第 10 章到第 12 章介绍系统电磁脉冲理论,第 13 章和第 14 章分别介绍了电磁脉冲的延伸与拓展——高功率微波技术进展和在高功率电磁环境下系统的易损性与加固技术。从第 1 章到第 3 章,第 5 章到第 8 章,第 10 章到第 12 章由王泰春和王玉芝共同撰写。其中物理内容和计算结果的物理分析由王泰春完成,计算数学、程序设计和数值计算由王玉芝完成。第 4、9、13 和 14 章由贺云汉撰写。王泰春负责全书的主编审定。

本书有三个明显的特点。第一,理论研究和实验研究相结合。这里所指的两者结合,不是在描述理论时引用某些实验结果,或介绍实验时引用某些理论结果,而是理论指导实验、实验证实和修正理论。两者相互促进,共同进展。第二,在理论研究中把解析研究同数值模拟研究相结合。本着下述原则处理这两者的结合,即在未做仔细计算前,尽可能通过解析方法初步掌握有关的物理概念,描述所研究的物理问题方程的特征和主要物理量的数量级,在此基础上再做进一步的数值计算。在做数值计算时给出微分方程和定解条件的差分格式及其相应的程序。通过计算机的运算最后给出在给定条件下的计算结果。这种做法使两者相互验证,彼此受益。这种做法既保证了计算结果的正确,也进一步加深了对有关物理概念和方程本质的理解。这两个特点使对理论感兴趣的从事实验研究的人员会有所帮助,同样对解析研究感兴趣的做数值模拟的研究人员,也会有所帮助。第三,书中给出大量的数值计算结果。这些数据中的一少部分已先后在国内有关刊物上以论文形式公开发表。为保持书的完整性,除引用已发表的外还包括大量未发表过的。数据以图和数表两种形式给出。如果读者只需要数量级或者半定量的结果,看图较为直观;如果需要定量地了解所关注的物理量,查表可得到较为满意的数据。这一特点对从事实验装置的设计人员,对加工装置的生产人员,对从事模拟实验的测试人员和科研管理人员应当

会从中受益。

描述电磁物理量有多种单位制。我国已规定全面采用国际单位制(SI),本书使用国际单位制。但是,由于电磁脉冲的许多理论文献中,仍大量使用高斯制单位,因此本书的读者会接触到这样两种单位制。为使读者查阅方便,附表给出了电磁物理量两种单位制的换算。

这里还需强调指出,书中给出的数值结果都是在确定的物理条件下得到的,若读者参考时必须弄清楚这些条件,如果条件不同时,相关数据就不再是准确的,甚至可能是错误的。但是对于具有一定的计算数学和程序设计能力的研究人员来说,在弄清楚与微分方程和定解条件相应的差分格式的基础上,可方便地改成自己所要研究的问题的条件,经计算后可得到自己所感兴趣的结果,因为在书中系统且详细地描述、推导了有关方程的差分格式。

作为专著,本书涉及等离子体物理、相对论流体力学、相对论电子学、电磁理论、实验测试原理和应用技术、模拟数字电路、计算数学、程序设计软件等学科专业课的内容。本书可作为从事该领域研究的科研人员、大学教师的参考书,也可作为与这个研究领域有关专业的研究生、高年级本科生的参考书。

最后,作者借此机会感谢俞大光院士在该书的编著过程中给予的关注和书中的单位制问题提出的重要意见,以及对由此带来的许多具体问题的解决提出的中肯建议和采取的有效措施。感谢彭先觉院士在百忙中为本书作序。感谢力光伦等三位教授分别对本书进行审阅和提出的修改建议。感谢赖祖武研究员在该书的早期书稿撰写过程中给予的支持。感谢《中国工程物理研究院科技丛书编委会》编委竺家亨研究员和陈贤林研究员,在解决撰写过程中所遇到的许多具体问题给予的关注和为解决这些问题所采取的有效措施。感谢作者所在研究室在本书撰写过程中给予的支持和赞助。感谢赵强和孙顺凯两位博士,乔予副研究员、胡剑女士和刘辉等在收集文献资料,核查部分物理、数学公式和把普通图制成电子版图等工作中所付出的劳动。作者还要感谢《强激光与粒子束》杂志编辑部科技丛书出版组的编委和国防工业出版社的成员,在本书出版过程中给予的支持和辛勤工作。

作 者

2010年6月20日

目 录

第 1 章 核辐射在大气中产生的电离效应	1
1.1 引言	1
1.2 X 射线产生的电离源	2
1.2.1 计算公式	2
1.2.2 计算结果	4
1.3 γ 射线产生的电离源	5
1.3.1 瞬发 γ 射线产生的电离源	5
1.3.2 缓发 γ 射线产生的电离源	6
1.4 缓发 β 射线产生的电离源	7
1.4.1 描述缓发 β 粒子运动的坐标	7
1.4.2 电离源的计算公式	9
1.5 中子产生的电离源	12
1.5.1 瞬发、缓发中子衰变产生的电离源	12
1.5.2 中子通量	13
1.5.3 中子产生的 γ 源	16
1.5.4 γ 与空气相互作用产生的电离源	17
1.5.5 电离源产生的电子数	20
1.6 电离源计算结果综述	22
参考文献	23
第 2 章 大气电离产生的电子及其对电磁波传播的影响	24
2.1 引言	24
2.2 三种大气消电离微分方程组和各种相互作用的速率系数	25
2.2.1 三种大气消电离微分方程组	25
2.2.2 电子同正、负离子作用的速率系数	25
2.3 三种大气消电离微分方程组的近似解析解	26
2.3.1 稳定条件下三种大气消电离微分方程组的解析解	26
2.3.2 源项趋于零时三种大气消电离微分方程组的解析解	28
2.3.3 被积函数中的代数式展开时的解析解	29
2.3.4 被积函数中指数式展开时的解析解	30
2.3.5 源项和等效正离子复合系数与时间无关时方程组的解析解	31
2.3.6 强源项时三种大气消电离微分方程组的解析解	32
2.3.7 等效复合系数的讨论	33

2.4	电子和负离子数密度的近似估计	34
2.4.1	X射线和瞬发 γ 射线	34
2.4.2	缓发 γ 射线	35
2.4.3	缓发 β 射线	36
2.5	三种大气消电离微分方程组的数值解	36
2.6	电子密度对电磁波传播的影响	38
2.6.1	电磁波在电离区传播的衰减公式	38
2.6.2	X射线产生的电子密度导致的电磁波衰减	39
2.6.3	瞬发 γ 射线产生的电子密度导致的电磁波衰减	42
2.6.4	缓发 γ 和缓发 β 射线产生的电子密度导致的电磁波衰减	42
2.7	计算结果及其分析	43
2.7.1	瞬发源产生的电子密度	43
2.7.2	瞬发源和缓发 γ 产生的电子密度	44
2.7.3	缓发源产生的电子密度	45
2.7.4	瞬发中子产生的电子密度	46
2.7.5	用数值解和解析解计算的不同种类源产生的电子密度	47
2.7.6	不同爆高产生的电离源和电子密度	49
2.7.7	地面爆炸产生的电子密度	51
2.7.8	考虑弹体上升、膨胀过程时电离源和电子密度的近似计算方法	53
	参考文献	54
第3章	高空核电磁脉冲	55
3.1	引言	55
3.2	麦克斯韦方程组	55
3.3	初级电子速度方程组的解析解	60
3.3.1	碰撞频率和坐标变换	61
3.3.2	用特征方程组与特征向量求解齐次电子运动方程组的解析解	63
3.3.3	用参数变易法求解非齐次电子运动方程组的解析解	66
3.4	瞬发 γ 光子在远离爆点区产生的电磁脉冲	69
3.4.1	初级电流和次级电流	69
3.4.2	电磁脉冲的数值计算	74
3.5	X射线产生的电磁脉冲	82
3.5.1	电场方程	82
3.5.2	初级电流密度的微分方程	83
3.5.3	用攒动理论求解次级电流密度	87
3.6	X射线产生的电磁脉冲的简化模型	89
3.6.1	概述	89
3.6.2	电场方程与初级电流和次级电流	89
3.6.3	初级X-光电子运动方程和次级电子方程组	91
3.6.4	X-光电子的速度谱分布函数	91

3.6.5	各类方程组的数值求解方法	93
3.6.6	数值计算结果	94
3.7	瞬发中子产生的电磁脉冲	96
	参考文献	97
第4章	高空核电磁脉冲模拟实验	98
4.1	高空电磁脉冲环境	98
4.1.1	γ 射线与物质的相互作用	98
4.1.2	电磁脉冲源区	98
4.1.3	高空核电磁脉冲产生机理	99
4.1.4	HEMP环境	100
4.2	HEMP模拟实验	102
4.2.1	实验的目的和意义	102
4.2.2	实验类型	103
4.3	HEMP模拟器	104
4.3.1	脉冲能源	104
4.3.2	有界波模拟器	106
4.3.3	辐射波电磁脉冲模拟器	107
4.4	环境与响应测量	110
4.4.1	测量的物理依据	110
4.4.2	传感器的物理含义与等效电路表示法	112
4.4.3	圆柱形短天线	114
4.4.4	环形天线	119
4.4.5	网栅式电场传感器设计思想	123
4.4.6	测量系统	124
	参考文献	129
第5章	水平导线和圆柱腔体中的电磁脉冲	130
5.1	系统电磁脉冲和内电磁脉冲	130
5.2	麦克斯韦方程组和定解条件	131
5.2.1	麦克斯韦方程组	131
5.2.2	麦克斯韦方程组的定解条件	133
5.3	γ 辐射在空气中产生的电流和电场	135
5.3.1	自由空气中的电流	135
5.3.2	自由空气中的电场强度	135
5.4	在水平导线中的麦克斯韦方程组和定解条件	136
5.5	电磁脉冲在水平导线中的传播——波动过程	137
5.6	电磁脉冲在水平导线中的传播——衰减过程	142
5.7	电磁脉冲在水平导线中的传播——扩散过程	145
5.8	γ 辐射在圆柱腔体前端面处产生的初级电流	147
5.9	二维真空圆柱腔体中的内电磁脉冲	152