

脉冲功率科学与技术

Science and Technology on Pulsed Power

王莹 孙元章 阮江军 编著
刘开培 张国安



北京航空航天大学出版社

内容简介

脉冲功率 科学与技术

王莹 孙元章 阮江军 编著
刘开培 张国安

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书为目前较为全面系统论述脉冲功率科学技术的专著。在第1章对“脉冲功率”进行了溯源和内涵定义,并定义了脉冲功率系统的组成和能量压缩模式,接着论述了脉冲功率科学体系的四大要素:用第2至第5章论述了初级供能能源、储能或脉冲发电的五种型式;在第6至第10章阐述了脉冲成形和能量时间压缩的科学技术;在第11章简单地介绍了脉冲功率技术中所用介质的放电特性;用第12章较详细地介绍了各类性质负载的受能性质,即脉冲功率技术的广泛应用,以及作为新概念电磁武器的应用潜力。

此书可供从事脉冲功率科学技术的研究人员和教学人员参考;也可作为高等学校相关专业本科生或硕士、博士研究生的教科书或参考书;对新概念电磁武器或相关专业管理人员和决策负责人也具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲功率科学与技术 / 王莹等编著. — 北京:北京航空航天大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-81124-505-9

I. ①脉… II. ①王… III. ①高电压—大功率—脉冲电路 IV. TN78

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 151617 号

版权所有,侵权必究。

脉冲功率科学与技术

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:34.5 字数:951千字

2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷 印数:2000册

ISBN 978-7-81124-505-9 定价:98.00元

序 言

首先祝贺本书在国防科工局(原国防科工委)资助下得以出版!之所以值得祝贺,是因为这本书是继王莹教授出版5部与脉冲功率相关的中英文专著之后,在武汉大学工作期间出版的第6部脉冲功率专著,它对脉冲功率科学理论的系统化有重要意义,必定为脉冲功率科学技术的发展起到促进作用。

脉冲功率科学技术是一门新兴的科学。确切地说,它起源于20世纪60年代初期,英国原子武器研究中心(AWRE)的J. C. Martin研制强流相对论性电子束加速器时,他领导的研究小组用脉冲功率技术建成了世界上第一台强流脉冲电子加速器SMOC(3MV-50kA-30ns)。从此,脉冲功率科学技术成为一门学科在世界范围内迅猛发展,现在已达到100TW的功率水平,并且正向500~1000TW方向进展。从1976年开始,每两年召开一次IEEE国际脉冲功率会议(IEEE International Pulsed Power Conference),参加人员多达五六百人,每次会议都有论文集刊载世界上该领域的最新研究成果。

在50年中,脉冲功率科学技术之所以取得如此进步并形成一门新学科,完全是它本身具有广泛和巨大的应用潜力所致。它已成为新概念武器发展的基础。正如本书所述,最初脉冲功率主要用来产生高功率粒子束和闪光X射线,用于核武器试验室模拟研究,后来迅速扩散到其他诸多应用领域。诸如在强激光领域用它泵浦准分子、自由电子和软X射线激光;在电磁脉冲领域用它产生高功率微波、电磁“导弹”和宽带电磁脉冲;在核物理试验方面,用它进行惯性约束和磁约束核聚变以及Z-pinch研究;用它产生的粒子束研制粒子武器和等离子体束能武器;用它对物体内部运动闪光X射线照像;用它进行高压物理试验、碎石医疗、获得强光源和高温环境以及制备金属纳米材料和探矿等;在工业上还可用它完成金属电磁成型工艺和电磁冲击(电磁锤);在航空领域用它进行电磁脉冲除冰和航空器雷击模拟试验等;在环保方面也有许多应用;在军事上的两项新应用是电热发射和电磁装甲。后来再次兴起的电磁发射是脉冲功率技术的另一个重要应用,因为它不仅能以电磁炮形式用于海陆空军作战术和战略武器,而且还可用于航天领域进行定向增程发射和轨道转移以及攻击敌卫星,还可进行高压物理试验、航天器或陨石再入大气层研究,仿制“电磁列车”,油田电磁抽油等。脉冲功率技术目前尚有许多不能料到的重要应用,需要人类在实践中发掘。

我国的脉冲功率技术研究,是在资深院士王淦昌的倡导下从20世纪60年代与国际同步开始的(研制闪光X射线机)。目前从事研究和设立脉冲功率学科的院所和高校有几十个,形成许多初具规模的脉冲功率试验室,从事不同应用的脉冲功率科学技术研究,并取得一些显著的成果,为我国国防科研和试验等作出了贡献。更值得一提的是,和国外不同,我国脉冲功率研究相对国际上来说,更重视科研工作总结和理论工作,先后有李正瀛、王莹、白秀庭、曾正中和刘锡三教授等从不同侧面出版了脉冲功率及其相关应用的中英文技术专著9部(其中王莹6部);但就本人所知,在世界上唯有本书的理论是最完整和系统的,且书中大部分内容是作者的工作成果。

本书的独到之处在于：它以翔实全面完整的内容，以储能模式系统地分类，论述了5种脉冲功率系统，并对脉冲功率成型和转换系统作了详尽地阐述与分类，对脉冲功率用电介质绝缘特性作了分析，并结合各种负载形式和应用潜力做了详尽论述。统观全书，内容充实，结构系统，作者首先侧重科学理论论述，并以一些关键技术作补充，对脉冲功率内涵的分析亦有创新。我非常赞同和支持本书出版。它的出版将有利于促进脉冲功率科学与技术的进步和新概念武器的发展。

最后，借此希望有更多的读者投身于脉冲功率科学研究中，献身于相关的新概念武器、科学试验和国民经济领域进行开拓性的创新研究，并做出更大的努力，取得更多的成就。

脉冲功率科学技术是一门年轻的学科，因此它前途锦绣、大有作为，让我们借助它推动社会生产力发展，造福人类！

中国科学院院士



2006年2月17日于北京

前 言

本人晚年被聘到武汉大学工作,作为该校“脉冲功率技术与等离子体”学科学术带头人和博士生导师,并任电磁发射技术研究所所长领导电磁炮研究,在先前科研与教学的基础上,开始与同仁撰写本书。综而思之,写此书的动机有五:

其一,为实现王淦昌老先生的遗愿。当年参加国防科技试验前后,经常得到世界著名科学家、中国“两弹”元勋王淦昌先生的指导和教诲。他在给《高功率脉冲电源》和《新概念武器原理》两书出版题词时,曾嘱咐本人说:“你的文笔功底较好,又一直从事脉冲功率技术工作,将来一定要写一本完整系统的脉冲功率书。”因此,晚辈不敢懈怠,写本书也是为实现王老的遗愿;恰好作为今年王老百年诞辰的纪念,并借此感念王老为人:

举世学识渊博,诚恳谦逊人格;

追求真理不滞,永是我辈楷模;

呵护青年有加,遗愿史记立卓。

其二,为我国和世界脉冲功率科学技术学科的发展。本人来武汉大学工作,是由于陈仕修教授在此力主设立的二级学科“脉冲功率与等离子体”和国防科学技术研究专业工作的需要。目前,中国仅一些相关院校、科研院所设立了国家二级学科“脉冲功率技术”,而有的国家专门开办学习班,培训和培养脉冲功率技术人才,且大有发展的趋势。脉冲功率刚兴起之时,人们多注重试验和工程研究,忽视理论的系统化和有计划地培养人才。而发展至今需要有一本完整、系统的理论专著!

其三,为构建脉冲功率科学的完整理论体系以填补学术专著空白。自从20世纪六七十年代脉冲功率技术的兴起到现在,已有人从自身工作经验写过脉冲功率某一或某些方面的书;但多以电容储能来描述强流毫(微)秒脉冲电子加速器或闪光X射线机,诸如:在中国先后出版过王莹的《高功率脉冲电源》(1991)和李正瀛的《脉冲功率技术》(1992)乃至曾正中的《实用脉冲功率技术引论》(2003),以及刘锡三的《高功率脉冲技术》(2005);前苏联的Г. А. Месяц撰写了ГЕНЕРИРОВАНИЕ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ(《大功率毫微秒脉冲的产生》,1974,邵贵荣译,原子能出版社);早先美国人I. A. D. Lewis和F. H. Wells还写了《毫微秒级脉冲技术》(席德明等译,1965,原子能出版社);中国人S T Pai和Qi Zhang用英文在新加坡出版了《INTRODUCTION TO HIGH POWER PULSE TECHNOLOGY》(《高功率脉冲技术导论》,1995)。但笔者以为,这些书只论述脉冲功率的某一部分,不够全面、完整和系统;而且只注重局部技术,理论论述有所欠缺,甚至对脉冲功率的定义和内涵缺乏科学见地,直到现在尚未见到国内外有全面系统地论述脉冲功率科学的专著。也就是说,虽然在脉冲功率科学领域,工程技术和试验工作进展较快,但系统、完整的学科理论工作相对逊色。可见,为了脉冲功率科学能有序和坚实地发展,应该撰写一本较全面地论述脉冲功率科学的专著。

其四,为了激发更多领域尤其是新概念电磁武器家族的应用潜力。正如本书第12章所述,脉冲功率技术在众多新技术领域有着巨大的应用潜力,特别在国防战略上,是世

界各国的应用重点;新概念电磁武器中的绝大多数,诸如强激光武器、电磁脉冲武器、粒子束武器、电磁炮、电装甲防护、电热炮、电磁弹射器、新概念核武器等,都使用脉冲功率技术,从而构成一种使用电磁能进行杀伤或驱动的电磁武器(我们首次定义)。本人就是在毕生从事的脉冲功率科学技术的基础上,首次提出“新概念武器”和“电磁武器”术语、概念和内涵,并用《新概念武器原理》建立起它们的科学技术体系,使其形成兵器科学中的新学科。本人还重点研究新概念武器中的电磁炮和电磁装甲,第一次在世界上出版了《电炮原理》和《Physics of Electric Launch》,引起国际关注。在学习本书后,人们还可创造性地把脉冲功率技术应用于更多的新领域。

其五,为培养脉冲功率及其相关专业人才。此书可供从事脉冲功率科学技术的研究和教学人员学习参考,也可作为大专院校相关专业本科生或硕士、博士生的教科书或参考书,还是相关或新概念武器专业管理或决策负责人的必读书。本人的两位在读博士生经本人推荐,因从事电磁发射方面研究取得成就而获得世界第1个和第14个 Peter Kemmey 青年学业成就奖的。

本书与前述已出版的脉冲功率技术专著不同,它对脉冲功率内涵进行了科学分析和定义,并全面系统地论述了整个脉冲功率科学体系的四大要素:初级供能能源,储能或脉冲发电系统,脉冲成形或能量时间压缩系统以及受能负载(应用)装置。第2、3、4、5章论述了初级供能能源和储能或脉冲发电的科学技术;第6、7、8、9、10章阐述了脉冲成形和能量时间压缩的科学技术;而第11章简单地介绍了脉冲功率技术中电介质的放电特性;第12章介绍了各类负载的受能性质,是通过描述十几类(尤其军事)应用领域来体现的;在第1章绪论中对脉冲功率进行了较科学的定义和溯源,并介绍了能量的3种压缩模式。本书还包括作者们发表的一些论文和发明专利。

在撰写本书时,我们特别感谢著名科学家王淦昌老先生为我国脉冲功率科学技术的奠基贡献和对我们的教导;感谢原国防科工委副主任、国家原子能机构主任孙勤的大力关怀、支持和资助,以及原国防科工委人事教育司领导和同志们的支持;感谢我国脉冲功率科学技术的领军人王乃彦院士为本书写序;感谢严陆光和俞大光院士对本书出版的评价、推荐和支持;感谢其他广大同仁的帮助支持。在撰写本书的“短路开关”时,参考了《脉冲功率技术》的相关章节,在此向李正瀛教授致谢;本书少量引用了其他著作的一些内容(没有列入参考文献),在此向作者特致谢意。李治源副教授大力支持和撰写了有关内容,陈仕修教授、喻剑辉教授、王洪新副教授为本书提供了部分雷电试验应用内容。此外,在读博士生段效军、张朝伟、孙忠胜、束龙、马建涛和张亚东等同学为本书的编校、制图和打印做了大量工作,在此作者一并向他们致以谢意!对北京航空航天大学出版社给予的特别支持和帮助,也致以诚挚的感谢!

希望读者和同仁,对书中的错误和不当之处,给予批评指正。

王莹

2010年5月于武汉大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 脉冲功率涵义	1
1.1.1 溯 源	1
1.1.2 定 义	1
1.2 能量压缩模式	3
1.2.1 空间压缩	4
1.2.2 时间压缩	4
1.2.3 时间-空间压缩	4
1.3 历史和现状	5
第 2 章 电容储能脉冲发生器	9
2.1 脉冲功率电容器	9
2.1.1 高压脉冲电容器	9
2.1.2 双电层电容器	11
2.1.3 (蓄)电池-电容器联合电源	14
2.2 冲击电流发生器	16
2.2.1 线性负载分析	17
2.2.2 非线性负载分析导引	18
2.2.3 相关技术要点	19
2.3 经典 Marx 发生器	21
2.3.1 工作原理	21
2.3.2 多级充电	23
2.4 高效能 Marx 发生器	25
2.4.1 特 性	25
2.4.2 等效电路及其参量	28
2.4.3 向电容负载馈电分析	30
2.5 电感隔离型 Marx 发生器	33
2.5.1 全电感隔离型	33
2.5.2 电阻-电感并联隔离型	36
2.6 Marx 发生器输出波形调整	38
2.6.1 波头和波尾电阻整形	38
2.6.2 电容整形	39
2.6.3 电爆炸导体整形	39
2.7 $L-C$ 倍压器	41
2.7.1 反向叠加型	41
2.7.2 振荡级联型	42

第 3 章 电感储能脉冲发生器	44
3.1 引言	44
3.2 基本电路及其充电分析	47
3.2.1 电感储能基本电路	47
3.2.2 充电分析	48
3.3 单级电感储能的转换放电	50
3.3.1 电阻性转换电路	51
3.3.2 电容性转换电路	57
3.4 用电流过零方法产生连续脉冲	61
3.4.1 电桥抵消脉冲电路	61
3.4.2 反向抵消脉冲电路	62
3.4.3 串联抵消脉冲电路	63
3.5 多级电感储能技术	64
3.5.1 分组时序并联电路	64
3.5.2 多级 MEATGRINDER 电路	67
3.5.3 逐级压缩的电感储能方法	70
3.6 用铁磁元件变换脉冲	70
3.6.1 铁氧体传输线	71
3.6.2 非线性电感磁压缩	72
第 4 章 惯性储能脉冲发电机	75
4.1 引言	75
4.2 脉冲功率用同步发电机	76
4.2.1 空载运行	77
4.2.2 稳态工作	78
4.2.3 暂态工作	79
4.2.4 并联运行	80
4.2.5 同步发电机的激磁	83
4.2.6 充任高功率脉冲电源	84
4.3 直流脉冲发电机	86
4.3.1 励磁和空载磁场	86
4.3.2 等效电容充电	88
4.3.3 发电机对负载放电分析	89
4.3.4 感应电动势和电磁转矩	91
4.3.5 基本方程	92
4.4 单极发电机	94
4.4.1 基本理论	95
4.4.2 类型及其特点	97
4.4.3 自激式单极发电机	99
4.4.4 实用的他激脉冲激磁法	101
4.5 补偿式脉冲交流发电机	102

4.5.1	基本原理	102
4.5.2	电磁特性分析	104
4.5.3	类型	105
4.5.4	主动 CPA	109
4.5.5	被动 CPA	110
4.5.6	选择被动 CPA	111
4.5.7	高压脉冲发电机	113
4.5.8	串激 CPA	115
4.6	旋转磁通压缩机	115
4.6.1	主动式旋转磁通压缩机	115
4.6.2	切割式旋转磁通压缩机	116
4.6.3	挤压式旋转磁通压缩机	117
4.6.4	变磁通旋转磁通压缩发生器	118
4.7	变感机-电脉冲放大机	119
4.7.1	线圈式变磁阻机-电脉冲放大机	120
4.7.2	类传输线变感脉冲放大机	123
4.8	变容和压电式电脉冲机概念	124
4.8.1	变容脉冲放大机	124
4.8.2	压电式脉冲发电机	125
4.9	增频脉冲发电机	126
4.9.1	机械变频型	128
4.9.2	电变频型	128
4.10	圆盘交流发电机	129
4.10.1	单转子结构型	129
4.10.2	多转子结构型	130
第 5 章	化学能高功率脉冲电源	132
5.1	化学脉冲电源	132
5.1.1	化学电源基本概念	132
5.1.2	电池的电特性	135
5.1.3	脉冲功率用电池	138
5.2	磁通压缩发生器理论基础	148
5.2.1	述 评	148
5.2.2	磁场的冻结和压缩	149
5.2.3	MFCG 基本电路分析	151
5.3	变形式 MFCG	153
5.3.1	条状发生器	153
5.3.2	平板型发生器	155
5.3.3	螺旋发生器	156
5.3.4	同轴发生器	158
5.3.5	球形 MFCG	160
5.3.6	圆筒聚爆装置	160

5.3.7	柔性导爆索型发生器	161
5.4	MFCG 的初始储能	161
5.4.1	直接馈电	162
5.4.2	用电感储能器馈送初始能量	163
5.4.3	用中间助增器馈电	164
5.5	MFCG 的脉冲调制	164
5.5.1	镇流器方法	164
5.5.2	断路开关锐化	165
5.5.3	脉冲变压器耦合	166
5.5.4	延迟线方法	168
5.6	关于 MFCG 的限制因素	169
5.6.1	磁通损失	169
5.6.2	强磁场效应	170
5.6.3	内部过电压	170
5.7	增互感型 MFCG	171
5.7.1	轴向式	172
5.7.2	径向式	173
5.7.3	炮击式	174
5.8	能重复工作的 MFCG	175
5.8.1	轨道增强型 MFCG	175
5.8.2	螺旋-活塞型 MFCG	179
5.9	脉冲磁流体发电机概论	182
5.9.1	概述	182
5.9.2	理论基础	184
5.9.3	法拉第和霍耳 MHD 发电机特性	185
5.10	化学燃料脉冲 MHD 发电机	187
5.10.1	火箭燃料法拉第 MHD 发电机	187
5.10.2	爆炸等离子体 MHD 发电机	189
5.10.3	脉冲等离子体 MHD 发电机	192
5.10.4	磁通压缩励磁的脉冲 MHD 发电机	193
5.10.5	重复脉冲 MHD 发电机	195
5.10.6	置磁炸药脉冲 MHD 发电机	197
5.11	磁流体电容脉冲发电机	198
5.11.1	性能浅析	198
5.11.2	主要物理量	200
第 6 章	核-电脉冲功率概念	202
6.1	三种核反应释能简介	202
6.1.1	核裂变及其原子弹	203
6.1.2	核聚变及其氢弹	205
6.1.3	反-正物质湮没反应释能	206
6.2	核裂变反应发电	208

6.2.1	反应能量	208
6.2.2	裂变反应堆基本概念	209
6.2.3	压水堆	210
6.2.4	沸水堆	212
6.2.5	高温气冷堆	214
6.3	磁约束核聚变研究	215
6.3.1	核聚变反应发电概念	215
6.3.2	托卡马克等离子体位形	216
6.3.3	托卡马克运行	219
6.3.4	等离子体加热方法	220
6.4	核脉冲 MHD 发电机	222
6.4.1	传导式裂变脉冲 MHD 发电机	223
6.4.2	感应式裂变脉冲 MHD 发电机	225
6.5	旋转床反应堆强脉冲功率源	228
6.5.1	旋转床反应堆	228
6.5.2	电功率转换	231
第 7 章	脉冲传输-成形线及其倍压器	234
7.1	传输线理论基础	234
7.1.1	无损线的真实性	234
7.1.2	传输线电物理特性	235
7.2	单传输成形线及其类线网络	239
7.2.1	单传输成形线	239
7.2.2	C 型 Guillemin 类线网络	240
7.2.3	用成形线作储能元件的 Marx 发生器	241
7.3	脉冲功率常用的单传输线	242
7.3.1	带状传输线	242
7.3.2	同轴传输线	242
7.3.3	径向传输线	243
7.3.4	螺旋传输线	243
7.4	传输线的脉冲变换	244
7.4.1	多线段倍压变换器	244
7.4.2	电感隔离变换器	246
7.4.3	阻抗变换器	246
7.4.4	脉冲极性反转	247
7.4.5	变压器变换	247
7.5	Blumlein 线	248
7.5.1	传输矩阵数学法分析	249
7.5.2	波过程物理法分析	251
7.5.3	Blumlein 线参量	253
7.6	层叠线倍压器	255
7.6.1	多开关直线型	255

7.6.2	单开关直线型	257
7.6.3	阿基米得螺旋型	258
7.6.4	并联同轴线型	260
7.7	多级波发生器	260
7.7.1	相干多级波发生器	260
7.7.2	Blumlein 线型多级波发生器	262
7.8	传输线的过电压	263
7.8.1	并联时的过电压分析	263
7.8.2	串联时的过电压分析	265
7.8.3	混联时的过电压分析	265
7.9	脉冲成形网络的转换	267
7.9.1	开关转换特性	267
7.9.2	充电和预脉冲	268
7.10	磁绝缘传输线	269
7.10.1	基本原理	270
7.10.2	相对论解的理论模型	270
第 8 章	脉冲功率变压器	273
8.1	引言	273
8.2	理论基础	274
8.2.1	电物理过程	274
8.2.2	脉冲变压器的等值电路	276
8.3	设计原则	278
8.3.1	设计总要求	278
8.3.2	绕组电路的选择	279
8.3.3	电磁参数的确定	279
8.3.4	绝缘材料的选择	280
8.3.5	导线截面积的确定	281
8.3.6	磁感应增量及铁心带厚的选取	281
8.3.7	铁心截面积的确定	282
8.3.8	变压器电路的波阻抗	283
8.3.9	用分布电容修正结构参数	284
8.3.10	脉冲后沿的宽度	285
8.4	双谐振脉冲变压器	285
8.4.1	双谐振概念	285
8.4.2	电路分析	287
8.4.3	设计考虑要点	289
8.5	电缆绕组型脉冲变压器	292
8.5.1	空心式	292
8.5.2	铁芯式	294
8.6	特殊脉冲变压器	296
8.6.1	马丁脉冲变压器	296

8.6.2	HPG 馈电的脉冲变压器	296
8.6.3	自耦三段脉冲变压器	298
8.6.4	非均匀传输线脉冲变压器	299
8.6.5	串级脉冲变压器	299
8.7	纳秒脉冲变流器	300
第 9 章	短路转换开关	303
9.1	引 言	303
9.2	短路开关机理概说	304
9.3	用电极触发的气体放电开关	307
9.3.1	典型的三电极放电器	307
9.3.2	四电极短路开关	315
9.4	激光触发的短路开关	316
9.4.1	概 述	316
9.4.2	激光触发放电机理	317
9.4.3	激光触发气体间隙的放电特性	319
9.4.4	几种开关结构	325
9.5	触发真空开关	326
9.5.1	基本组成及工作原理	327
9.5.2	主要类型	328
9.5.3	特点和性能	329
9.5.4	金属等离子体电弧开关	330
9.6	固体开关	332
9.6.1	可控固体开关	332
9.6.2	半导体功率器件综述	333
9.6.3	光电导通脉冲功率开关	337
9.7	表面放电开关	338
9.8	自击穿开关	341
9.8.1	二电极自击穿开关	341
9.8.2	多开关整形器	343
9.9	大功率液体场畸变开关	346
9.9.1	可控液体放电器	346
9.9.2	液体类 V/N 开关	346
9.10	连续-重复脉冲开关	348
9.10.1	混合式开关(CS)	348
9.10.2	重复气体火花隙开关	350
9.11	磁开关	350
9.11.1	磁开关原理	351
9.11.2	磁开关的必要条件	352
第 10 章	断路转换开关	353
10.1	引 言	353

10.2	断路开关的转换功能	355
10.2.1	电感性负载	355
10.2.2	电容性负载	356
10.2.3	有功负载	356
10.3	电爆炸导体断路开关	357
10.3.1	概 述	357
10.3.2	材料选取	358
10.3.3	结构尺寸设计原则	359
10.3.4	电物理机制	362
10.4	等离子体融蚀断路开关	364
10.4.1	断路转换机理	365
10.4.2	融蚀模型	368
10.4.3	雪梨模型	369
10.4.4	阴极物质的逸出	370
10.5	机械式断流器简介	374
10.5.1	真空断流器	374
10.5.2	“波纹式”断流器	375
10.5.3	受控固体断路开关概念	375
10.6	金属等离子体弧开关概要	376
10.7	交叉场管简介	376
10.8	等离子体枪或 DPF 开关	377
10.9	热驱动和超导断路开关概念	379
10.9.1	热驱动断路开关	379
10.9.2	超导断路开关	379
10.10	非线性电阻固体开关和反射开关概要	380
10.10.1	非线性电阻固体开关	380
10.10.2	反射开关	382
10.11	电子束控制开关	382
10.11.1	电子束控制断路开关	382
10.11.2	电子束控制闭合开关	385
10.12	炸药爆炸断路开关	387
10.12.1	单向碎裂型炸药断路开关	387
10.12.2	无感型炸药断路开关	388
10.12.3	INTREPID 开关	389
第 11 章	电介质及其放电特性	390
11.1	引 言	390
11.2	气体电介质放电特性	390
11.2.1	均匀电场中的放电	391
11.2.2	不均匀电场中的放电	395
11.2.3	脉冲功率放电气体击穿规律	400
11.3	液体电介质的放电特性	414

11.3.1	水电介质的放电特性	414
11.3.2	其他液体电介质的放电特性	418
11.4	固体电介质的电击穿特性	420
11.4.1	绝缘体击穿理论	420
11.4.2	沿固体介质表面的放电	424
11.4.3	真空中沿介质表面的脉冲放电	428
11.5	真空击穿的放电特性	430
11.5.1	爆炸发射机理概述	430
11.5.2	真空间隙击穿的引燃	432
11.5.3	火花击穿阶段电流增长的规律	433
11.5.4	真空击穿火花阶段在阴极上的过程	434
11.5.5	火花击穿阶段在阳极上的过程	436
11.5.6	外加触发引燃的真空脉冲放电	436
第 12 章	负载及其应用	438
12.1	产生强流粒子束	438
12.1.1	抗核加固研究	441
12.1.2	研究粒子束武器	442
12.1.3	集团离子加速	443
12.1.4	产生热激波	444
12.1.5	热起爆高能炸药	444
12.1.6	加速大质点	445
12.1.7	作脉冲中子源	446
12.1.8	惯性约束核聚变研究	447
12.1.9	尾流场加速	448
12.1.10	建立脉冲 γ (或 X) 射线环境	450
12.2	泵浦强激光	453
12.2.1	泵浦 CO_2 激光(武器)	453
12.2.2	泵浦准分子强激光(武器)	454
12.2.3	泵浦自由电子激光(武器)	458
12.2.4	泵浦软 X 射线激光	461
12.3	激励强电磁脉冲	464
12.3.1	激励高功率微波(武器)	464
12.3.2	电磁“导弹”	468
12.3.3	电磁脉冲弹	470
12.3.4	电磁脉冲模拟	476
12.4	产生和约束等离子体	479
12.4.1	磁约束核聚变	479
12.4.2	θ 箍缩	481
12.4.3	Z 箍缩	482
12.4.4	产生等离子体焦点	483
12.5	电磁成形与电磁冲击	483

12.5.1	电磁成形	483
12.5.2	电磁冲击模拟	485
12.5.3	电磁脉冲抽油	485
12.6	模拟雷击效应	487
12.6.1	电力系统中的应用	487
12.6.2	模拟雷击航空航天器	489
12.6.3	雷电武器概念试验	490
12.7	电爆炸	491
12.7.1	电爆炸导体	491
12.7.2	液电爆炸——电水锤效应	493
12.7.3	人体内结石粉碎机	496
12.7.4	制备金属纳米材料	497
12.7.5	金属线爆炸喷涂	498
12.8	环保医疗及其他应用	500
12.8.1	脱硫脱硝	500
12.8.2	污水处理	501
12.8.3	脉冲放电产生 NO 的医疗应用	502
12.8.4	脉冲功率除尘	503
12.8.5	其他应用	506
12.9	电热发射	507
12.9.1	纯电热炮	508
12.9.2	电热化学炮	508
12.10	电装甲	509
12.10.1	主动电装甲	510
12.10.2	被动电装甲	510
12.11	电磁发射	512
12.11.1	轨道炮	514
12.11.2	线圈炮	516
12.11.3	重接炮	518
12.11.4	优点和应用	520
12.12	脉冲功率与新概念电磁武器的相关性	521
12.12.1	兵器科学发展观:电磁武器时代已开启	521
12.12.2	脉冲功率成就电磁武器	524
主要参考文献		526