

邱爱慈 主编

# 脉冲功率技术应用



陕西新华出版传媒集团



陕西科学技术出版社  
Shaanxi Science and Technology Press



# 脉冲功率技术应用

主 编 邱爱慈  
副主编 曾正中  
编 委 (以姓氏笔画为序)

于 力	毛从光	尹佳辉	王亮平
丛培天	孙凤举	孙鹞鸿	闫克平
汤俊萍	刘 振	张永民	张东东
吴 刚	吴 坚	李应红	邱爱慈
严 萍	陈维青	杨海亮	宋慧敏
易爱平	姚伟博	曾正中	

陕西新华出版传媒集团



陕西科学技术出版社  
Shaanxi Science and Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

脉冲功率技术应用/邱爱慈主编. —西安:陕西科学技术出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-5369-6897-4

I. ①脉… II. ②邱… III. ①高电压—大功率—脉冲电路 IV. ①TN78

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 311286 号

脉冲功率技术应用

---

出版者 陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社  
西安北大街 131 号 邮编 710003  
电话(029)87211894 传真(029)87218236  
<http://www.snstp.com>

发行者 陕西新华出版传媒集团 陕西科学技术出版社  
电话(029)87212206 87260001

印刷 陕西博文印务有限责任公司

规格 880mm×1230mm 16 开本

印张 30

字数 860 千字

版次 2016 年 12 月第 1 版  
2016 年 12 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-5369-6897-4

定价 200.00 元

---

版权所有 翻印必究

(如有印装质量问题,请与我社发行部联系调换)

# 前 言

脉冲功率技术是一门与国防科技的需求和发展紧密相关、涉及多学科的前沿尖端科学技术。在核爆辐射模拟及其他高新技术领域应用的牵引下,脉冲功率技术及其应用得到了长足的发展。早在 20 世纪 50~60 年代,美国、苏联和英国就开始了脉冲功率技术在核武器及效应模拟中的应用研究。Biumlein 传输线技术的采用,使脉冲功率技术取得了突破性的进展,相继建立了多个大型辐射模拟装置。自 70 年代开始,由于核爆辐射模拟的需要,中国工程物理研究院和西北核技术研究所开始研制基于传输线技术的大型核爆辐射模拟装置。自 80 年代开始,因高功率激光和微波产生的需求,中国原子能研究院、国防科技大学等单位也相继开展了脉冲功率技术研究。此外,脉冲功率技术和在其基础上建立的辐射模拟设备,还可用于 Z 箍缩惯性约束聚变、小焦斑闪光照相和电磁发射等领域。近年来又在地球物理勘探、化石能源开发、环境保护、航空技术等领域开展了脉冲功率技术新的应用研究。

本书的撰写,旨在发展和提高国内脉冲功率技术的研究水平,提高面向未来的研究能力。书的内容主要基于西北核技术研究所脉冲功率技术研究团队 40 多年的研究积累,重点放在近 20 年的研究成果和进展,同时介绍了国内其他几个单位在新应用领域的相关成果。从内容叙述上,比较系统地介绍了脉冲功率技术及其应用的各个重要方面,包括已建成的重要脉冲功率装置和取得的研究成果,探讨了该领域今后的发展趋势和前景。

西北核技术研究所的脉冲功率技术研究和装置研制大致可以分成 4 个阶段。第一阶段从 20 世纪 70 年代初到 80 年代初,与中国科学院高能物理研究所合作,研制了我国第一台油介质绝缘的高阻抗强流脉冲电子束加速器“晨光号”之后,独自对“晨光号”进行了升级改造,实现了“高低阻抗、一机两用”,在早期的试验测试系统标定和抗干扰研究、抗辐射效应和技术研究,以及高功率激光和高功率微波产生技术等方面都发挥了重要作用。作为脉冲功率实验平台,“晨光号”至今仍在发挥作用。第二阶段从 20 世纪 80 年代初到 90 年代初,其标志性成果是独立自主设计并研制成功了我国第一台束流达 1 MA 的水介质绝缘低阻抗强流脉冲电子束加速器“闪光二号”。这台设备的指标在当时处于国际先进水平。1990 年“闪光二号”投入运行后,除了满足用强流脉冲电子束模拟核爆 X 射线的热-力学效应和脉冲辐射测试系统标定等需求外,还开展了电子束泵浦准分子激光和产生高功率微波的实验,获得了当时国内最好水平的实验结果。为此,“二弹一星”功勋科学家王淦昌院士于 1991 年 3 月 25 日专门来信,对“闪光二号”加速器初步建成并开展多种物理实验和获得 XeCl 准分子激光好的输出结果表示祝贺。在“闪光二号”加速器顺利达标鉴定后,又对它进行了升级改造,使电子束能注量提高了 3 倍多,取得了全新的实验结果并成功地开展了高功率离子束产生的研究。第三阶段,从 20 世纪 90 年代初至 21 世纪初,

与俄罗斯科学院西伯利亚分院托木斯克强流电子学研究所合作,建成了国际上首台多功能辐射装置“强光一号”,它在脉冲功率源部分集成了直线型脉冲变压器、电感储能、电爆炸导体断路开关和等离子体断路开关等多项新技术,2000年初投入运行,之后又对它进行了改进和提高,使“强光一号”成为我国核爆脉冲辐射效应模拟的主力装置,满足了急需、填补了空白,发挥了不可替代的重要作用。建成快Z箍缩实验平台,在国内率先开展快Z箍缩研究,取得了重要成果。第四阶段是从21世纪初至今,在脉冲功率技术研究上取得了多项重要成果,一是自主研制了基于感应电压叠加器和阳极杆箍缩聚焦二极管新技术路线的国内首台、世界第二台小焦斑闪光照相装置“剑光一号”,并发展了相关技术;其二是建成了3 MV大型辐射波快前沿高空电磁脉冲模拟器,在核爆辐射模拟器研制方面取得了重要进展;其三是在以快放电直线型变压器为代表的直接驱动脉冲功率源技术、金属丝电爆炸等离子体驱动含能材料的可控冲击波技术等方面取得了突破性进展,为今后的深入研究奠定了基础。

本书共分10章,第1章介绍了脉冲功率技术的特点、脉冲功率装置的构成和关键部件以及脉冲功率技术的主要应用领域,其余各章较系统地描述了不同类型辐射源的相关脉冲功率技术,有的还涉及它的应用,也有的章节(如第7章)采取了概略介绍的方式。各章节的执笔者都是相关研究的主要参加者。全书的撰写,除了主编和副主编外,各章节的执笔者分别有:第1章,邱爱慈、曾正中;第2章,张永民、姚伟博(2.1~2.6),杨海亮(2.7);第3章,丛培天;第4章,孙凤举(4.1),杨海亮(4.2),王亮平(4.3、4.4),吴刚(4.5),吴坚(4.6);第5章,孙凤举(5.1、5.2),杨海亮(5.3);第6章,陈维青(6.1、6.2),汤俊萍(6.3),毛从光(6.4);第7章,曾正中;第8章,易爱平,于力(8.3、8.4);第9章,严萍、张东东(9.1),刘振、孙鹤鸿(9.2),张永民、姚伟博(9.3),闫克平、刘振(9.4),李应红、宋慧敏(9.5);第10章,曾正中(10.1、10.2),尹佳辉(10.3、10.4),闫克平、刘振(10.5)。曾正中对全书进行了统稿,汤俊萍负责编写过程中的协调和沟通。

本书的写作依托多项重大科研成果,无疑具有重要的参考价值。我们期望本书的出版对于从事脉冲功率技术及其应用研究的科技人员,对于高等院校相关专业的师生,能够提供有益的帮助。

清华大学的王新新教授和中国工程物理研究院的章林文研究员对全书内容进行了审读,在此表示衷心的感谢!感谢国家出版基金和陕西新华出版传媒集团对本书出版的资助!最后,还要特别感谢陕西科学技术出版社和杨波编审的大力支持,正是由于他们的努力,本书才得以出版。

恳请读者对本书存在的纰漏之处给予指正。



2016年11月

# 目 录

## 第 1 章 总论

1.1 脉冲功率技术的内涵与特点 .....	1
1.1.1 脉冲功率技术的内涵 .....	1
1.1.2 脉冲功率技术的主要特点 .....	1
1.2 脉冲功率装置 .....	2
1.2.1 脉冲功率装置的基本构成 .....	2
1.2.2 脉冲功率技术的关键部件 .....	4
1.3 脉冲功率技术应用概述 .....	11
1.3.1 核爆辐射效应模拟 .....	11
1.3.2 惯性约束聚变 .....	13
1.3.3 X 光闪光照相 .....	13
1.3.4 高功率微波驱动源 .....	14
1.3.5 高功率激光 .....	15
1.3.6 材料科学及其他领域 .....	15

## 第 2 章 强流脉冲带电粒子束产生与应用

2.1 低阻抗强流脉冲电子束加速器 .....	17
2.1.1 总体设计 .....	17
2.1.2 基本构成 .....	18
2.1.3 关键单元的技术要求 .....	19
2.2 高功率脉冲驱动源 .....	20
2.2.1 Marx 发生器 .....	20
2.2.2 水介质同轴线 .....	27
2.2.3 水介质主开关 .....	30
2.2.4 多级多通道气体主开关 .....	31
2.2.5 预脉冲抑制电感与抑制开关 .....	34
2.3 低阻抗大面积电子束二极管系统 .....	36
2.3.1 强流脉冲电子束的产生 .....	36
2.3.2 强流脉冲电子束的输运 .....	45
2.3.3 强流脉冲电子束的控制 .....	54

2.3.4	低阻抗二极管	57
2.3.5	高能注量二极管	60
2.4	加速器结构设计要点	62
2.4.1	大电流下的机械结构连接	62
2.4.2	水中气泡的处理	63
2.4.3	电水锤效应卸载	66
2.5	强流脉冲电子束的测量	67
2.5.1	强流脉冲电子束总能量的测量	67
2.5.2	强流脉冲电子束总束流的测量	69
2.5.3	强流脉冲电子束束流密度分布的测量	70
2.5.4	强流脉冲电子束能注量及其分布的测量	72
2.5.5	强流脉冲电子束有效入射角的测量	73
2.6	强流脉冲电子束的应用	77
2.6.1	X射线热-力学效应研究	77
2.6.2	大面积电子束泵浦气体准分子激光	77
2.6.3	强流脉冲电子束产生高功率微波	77
2.7	强流脉冲离子束的产生与应用	78
2.7.1	强流脉冲离子束的产生	78
2.7.2	强流脉冲离子束的应用	84

### 第3章 强脉冲韧致辐射产生与应用

3.1	多功能强流脉冲电子束加速器	91
3.1.1	系统组成及状态转换	91
3.1.2	直线变压器	92
3.2	短脉冲高剂量率韧致辐射	102
3.2.1	脉冲传输线及水介质开关	102
3.2.2	等离子体断路器	108
3.2.3	短脉冲高阻抗电子束二极管设计	111
3.2.4	高剂量率短脉冲韧致辐射源实验结果	114
3.3	脉冲宽度可调的长脉冲韧致辐射源	116
3.3.1	电爆炸断路器	116
3.3.2	长脉冲高阻抗电子束二极管	118
3.3.3	脉冲宽度可调的长脉冲韧致辐射源实验结果	119

### 第4章 Z箍缩等离子体辐射源

4.1	快Z箍缩等离子体脉冲驱动源	123
4.1.1	Z箍缩驱动惯性约束聚变对驱动源的要求	123

4.1.2	Z 箍缩脉冲功率源 .....	124
4.1.3	多级串联直线变压器脉冲源的电路模型及触发时序影响 .....	130
4.1.4	一种基于模块支路和角向线的直线变压器新型触发技术 .....	136
4.1.5	基于 1 MA 直线变压器模块的 20 MA 直线变压器驱动源的概念设计 .....	140
4.1.6	基于快 Marx 发生器串并联 20 MA/300 ns 直接驱动脉冲源的概念设计 .....	142
4.2	磁绝缘传输线技术 .....	143
4.2.1	磁绝缘传输线的基本概念和特点 .....	144
4.2.2	磁绝缘传输线的理论模型 .....	144
4.2.3	磁绝缘传输线的数值模拟 .....	146
4.2.4	磁绝缘传输线的实验研究 .....	147
4.2.5	磁绝缘传输线的实际应用 .....	149
4.3	Z 箍缩等离子体的产生 .....	150
4.3.1	Z 箍缩的基本过程 .....	150
4.3.2	影响 Z 箍缩辐射输出的因素 .....	153
4.4	丝阵 Z 箍缩 .....	156
4.4.1	丝阵负载构型 .....	156
4.4.2	圆柱型钨丝阵 Z 箍缩实验研究 .....	157
4.4.3	圆柱型铝丝阵 Z 箍缩实验研究 .....	162
4.4.4	平面型铝丝阵 Z 箍缩实验研究 .....	166
4.5	喷气负载 Z 箍缩 .....	170
4.5.1	喷气负载 .....	170
4.5.2	喷气负载的内爆压缩 .....	178
4.5.3	辐射性质与箍缩状态参数 .....	190
4.6	X 箍缩 .....	200
4.6.1	X 箍缩研究概况 .....	201
4.6.2	兆安级电流 X 箍缩实验研究 .....	203
4.6.3	X 箍缩诊断 Z 箍缩早期行为 .....	209

## 第 5 章 小焦斑闪光 X 光产生与应用

5.1	感应电压叠加型闪光照相装置 .....	226
5.1.1	原理与组成 .....	226
5.1.2	感应电压叠加器感应腔电磁模型和电路模型 .....	233
5.1.3	单/双路馈入叠加器感应腔角向传输线的优化 .....	237
5.1.4	感应电压叠加型闪光照相装置的典型实例 .....	246
5.1.5	感应电压叠加型闪光照相装置的发展趋势 .....	249
5.2	剑光一号感应电压叠加型闪光照相装置 .....	253
5.2.1	Marx 发生器及触发系统 .....	253
5.2.2	水介质同轴线 .....	254



5.2.3	叠加器的感应腔	257
5.2.4	磁感应腔和平板传输线	258
5.3	小焦斑脉冲电子束二极管	259
5.3.1	概述	259
5.3.2	阳极杆箍缩聚焦二极管	259
5.3.3	预充等离子体阳极杆箍缩聚焦二极管	264
5.3.4	其他类型强聚焦二极管的性能与适用范围	267

## 第6章 高空电磁脉冲模拟器

6.1	高空电磁脉冲环境	273
6.1.1	高空电磁脉冲的产生机制	273
6.1.2	高空电磁脉冲的环境标准	274
6.2	高空电磁脉冲模拟器	276
6.2.1	导波式电磁脉冲模拟器	277
6.2.2	偶极子电磁脉冲模拟器	281
6.2.3	混合型电磁脉冲模拟器	283
6.3	脉冲驱动源	283
6.3.1	电容直接放电型电磁脉冲模拟器	284
6.3.2	一级陡化型脉冲源	286
6.3.3	二级陡化型脉冲源	292
6.3.4	双向二级陡化型脉冲源	301
6.3.5	多功能电磁脉冲模拟器	302
6.4	电磁脉冲模拟器天线设计	302
6.4.1	天线设计的时域有限差分法	302
6.4.2	辐射波模拟器的天线设计	311

## 第7章 高功率微波驱动源简介

7.1	单次高功率微波驱动源	315
7.1.1	平面型虚阴极振荡器驱动源	315
7.1.2	同轴型虚阴极振荡器驱动源	315
7.1.3	爆炸磁通压缩发生器	317
7.2	低重复率高功率微波驱动源	318
7.2.1	特斯拉变压器驱动源	318
7.2.2	陡化-截波型驱动源	319
7.3	高重复率高功率微波驱动源	319
7.3.1	基于磁开关的驱动源	319
7.3.2	基于半导体断路开关的驱动源	319

7.4	长脉冲型驱动源 .....	320
7.4.1	Marx-PFN 型长脉冲驱动源 .....	320
7.4.2	使用螺旋线的长脉冲驱动源 .....	320
7.4.3	快前沿直线脉冲变压器型长脉冲驱动源 .....	320
7.4.4	Tesla-PFN 型长脉冲驱动源 .....	321

## 第 8 章 高功率气体激光泵浦源

8.1	强流电子束准分子激光泵浦源 .....	323
8.1.1	强流电子束泵浦源总体要求及关键技术分析 .....	323
8.1.2	强流电子束准分子激光泵浦源及应用 .....	328
8.2	脉冲放电气体激光泵浦源 .....	332
8.2.1	脉冲放电气体激光概述 .....	332
8.2.2	脉冲放电泵浦源关键技术 .....	334
8.2.3	脉冲放电泵浦源典型应用实例 .....	336
8.3	表面放电准分子激光泵浦源 .....	341
8.3.1	表面放电激光概述 .....	341
8.3.2	表面放电光泵浦源技术 .....	343
8.3.3	表面放电光泵浦应用实例——XeF(C-A)激光器 .....	350
8.4	重频高功率气体激光泵浦源 .....	352
8.4.1	重频强流电子束泵浦源 .....	352
8.4.2	重频脉冲放电激光泵浦源 .....	356
8.4.3	重频表面放电光泵浦源 .....	360

## 第 9 章 脉冲大电流与放电等离子体

9.1	脉冲大电流在电磁发射技术中的应用 .....	365
9.1.1	电磁发射基本概念 .....	365
9.1.2	电磁发射用脉冲电流源 .....	369
9.1.3	电磁发射器 .....	373
9.1.4	电磁发射技术的发展趋势 .....	375
9.2	脉冲等离子体源及其在地球物理勘探方面的应用 .....	375
9.2.1	高电导率水中脉冲电晕放电原理 .....	375
9.2.2	基于半导体开关的脉冲电流源 .....	380
9.2.3	多电极等离子体发射阵列 .....	382
9.2.4	在海洋高分辨率浅地层地质勘探方面的应用 .....	385
9.2.5	海洋/陆地勘探电火花震源 .....	385
9.3	用于化石能源开发的脉冲大电流源 .....	390
9.3.1	概述 .....	390

9.3.2	冲击波产生设备	391
9.3.3	应用研究	394
9.4	脉冲等离子体环境应用	397
9.4.1	脉冲等离子体脱硫和脱硝	397
9.4.2	脉冲静电除尘	405
9.4.3	脉冲等离子体用于有机废气处理	408
9.4.4	脉冲放电用于汽车尾气处理	410
9.4.5	脉冲放电用于废水处理	412
9.4.6	脉冲等离子体助燃及重整	416
9.5	脉冲等离子体源在航空领域的应用	417
9.5.1	等离子体流动控制技术	418
9.5.2	等离子体点火助燃技术	424
9.5.3	小结	427

## 第10章 标定、触发技术

10.1	纳秒级高电压、大电流测量标定	431
10.2	用于纳秒级电压脉冲测量标定的高压脉冲源	432
10.2.1	高压快沿方波脉冲源	432
10.2.2	高压非方波脉冲源	437
10.3	快前沿触发脉冲及其产生	437
10.3.1	触发系统的指标参数	437
10.3.2	触发脉冲产生技术的比较	438
10.3.3	电容快放电型触发器及其电路分析	439
10.3.4	mini-Marx 型触发器	443
10.3.5	变压器型触发器	445
10.3.6	传输线型触发器	446
10.3.7	Pichugin 型触发器及小结	447
10.4	大型脉冲功率装置的同步与触发	448
10.4.1	Marx 型驱动源的同步与触发	448
10.4.2	直线脉冲变压器型驱动源的同步与触发	450
10.5	多开关脉冲电流电压源	455
10.5.1	引言	455
10.5.2	多开关电路的基本原理	455
10.5.3	多开关纳秒脉冲电源	457
10.5.4	多开关脉冲电路拓展	463
索引		467

### 1.1 脉冲功率技术的内涵与特点

#### 1.1.1 脉冲功率技术的内涵

脉冲功率技术是一种研究强电脉冲功率放大的技术。它以较低功率在较长的时间内储存电场或磁场能量,然后借助于各种开关进行快速能量切换、脉冲压缩、功率放大,在很短时间内将脉冲电磁能量释放到特定的负载上。<sup>[1-13]</sup>

脉冲功率技术是大功率高电压脉冲技术,与一般用于实验核物理、无线电、计算机、雷达和激光等领域中的脉冲技术不同,它们之间的根本区别在于所利用器件的特性和参数范围。脉冲功率技术的表征参量是:峰值电压  $U_{\max}$ 、峰值电流  $I_{\max}$ 、峰值功率  $P_{\max}$ 、平均功率  $P_{\text{av}}$ 、脉冲重复率  $f_p$  及脉冲波形参数(脉冲上升时间  $t_R$ 、脉冲宽度  $t_H$ 、脉冲下降时间  $t_p$  等)。其参数范围为:峰值电压为几十千伏至几十兆伏,峰值电流为几千安至几十兆安,脉冲宽度为纳秒至微秒,上升时间为百皮秒至百纳秒,峰值功率为几十兆瓦至几百太瓦。脉冲功率技术有时也叫作高功率脉冲技术。

脉冲功率技术基本上可分为 2 类:一类是以单次脉冲的工作方式产生单个脉冲,重点是获得高的峰值电压、电流和功率,又可分为高电压大电流和低电压大电流 2 种;另一类是以重复脉冲的工作方式产生重复率脉冲串,重点是获得高平均功率。

脉冲功率技术中常用名词的意义:脉冲上升时间  $t_R$  定义为从脉冲幅值的 10% 上升至 90% 的时间,脉冲宽度  $t_H$  定义为 50% 幅值处的时间宽度(又叫半高宽),脉冲下降时间  $t_p$  定义为从脉冲幅值的 90% 下降至 10% 的时间。预脉冲定义为主脉冲前面幅值较低的脉冲,在脉冲功率装置中它是一个重要参数。占空因子  $DF$  定义为脉冲持续时间与脉冲重复率之积,即

$$DF = t_H f_p \quad (1-1)$$

式中,  $t_H$  为脉冲宽度;  $f_p$  为脉冲重复率,即每秒产生脉冲的个数(pps)。

脉冲功率技术主要研究对象包括能量储存、高电压和大电流脉冲产生、脉冲压缩、电磁能量传输和转换,以及与此相应的器件技术、快脉冲测量技术等。

#### 1.1.2 脉冲功率技术的主要特点

##### (1) 高功率及很高的功率增长率

以脉冲功率技术为基础建成的脉冲功率装置可以产生极高的峰值功率而无需一台非常大的供电设备。从功率方面来看,目前已研制成功的装置输出峰值功率达 40 TW,远高于目前全球的电网总功率(太瓦量级),占地面积仅为足球场大小。从功率增长率来看,世界最大的发电站装机电功率约为  $2 \times 10^{10}$  W 量级,对于 50 Hz 频率,其功率增长率约为  $10^{12}$  W/s,远远低于一般脉冲功率装置所能达到的功率增长率。现代大型和巨型脉冲功率装置的功率增长率已达到  $10^{18} \sim 10^{20}$  W/s,而拟建装置将达到  $10^{21}$  W/s 以上。

## (2)非线性效应

在脉冲功率技术中,高的峰值功率会引起诸多非线性效应。如脉冲功率开关在工作过程中呈现出强烈的负阻抗效应,即峰值功率愈高,开关上的压降愈低;又如绝缘介质和电阻元件在高功率下可能超出其线性工作极限。在脉冲功率装置中,常需要避免非线性效应,但也可以利用非线性效应,这就需要发展相关的非线性理论和方法,为大型脉冲功率装置设计及复杂问题的分析和解决提供依据。

## (3)时间特性

在脉冲功率技术中,由于脉冲作用时间足够短,以至一些物理过程来不及发生,具有明显的时间效应。如介质击穿过程需要一定的时间,因此在脉冲电压下气体、液体介质的击穿场强要比直流下高得多,从而同样输出电压的脉冲功率装置尺寸要比直流设备小许多,而且脉冲作用时间越短,介质击穿场强越高,在脉冲功率装置中常利用这一特性,通过多级脉冲压缩获得快上升前沿和高幅值的脉冲;又如二极管的设计中总是利用电子束和离子束的产生与阴、阳极等离子体形成及运动速度之间的时间差异,有效引出电子束或离子束,获得高的能量转换效率等。

## (4)绝热特性

在脉冲功率装置中,能量的释放和传输都在很短瞬间完成,因此在脉冲作用期间的热现象往往可以视为绝热过程。单次脉冲或低重复率脉冲的装置散热很少,基本不需要考虑散热问题。

## 1.2 脉冲功率装置

### 1.2.1 脉冲功率装置的基本构成

脉冲功率装置基本上由3大部分构成:初级储能与初级脉冲产生系统、脉冲压缩和传输系统、各类负载系统,如图1-1所示。主要工作过程:由常规能源系统供电,通过变压、整流装置以相对缓慢的方式在电容器中储存能量,然后通过开关产生初级高电压或大电流脉冲,同时传送给脉冲储能部件,再通过开关将脉冲成形和压缩,由传输线将脉冲电磁能量传递给负载。前2部分组成脉冲功率驱动源,驱动源的复杂程度和造价主要决定于负载的要求和驱动源中部件的性能指标。脉冲功率装置按不同的用途或负载有不同的叫法,如产生电子束(离子束)的装置叫作强流脉冲电子束(离子束)加速器。

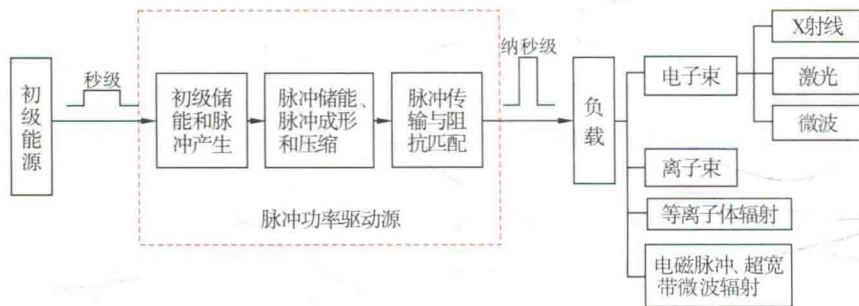


图 1-1 脉冲功率装置的一般构成

脉冲功率装置除了主机系统外还必须配置辅助系统。辅助系统包括初级能源、控制和触发系统、水处理系统、油处理系统、脉冲磁场系统、真空系统、参数测量和记录系统等。以西北核技术研究所研制的闪光二号强流脉冲电子束加速器为例,单台装置的结构框图如图1-2所示,图1-3是它的外貌照片。参数测量包括脉冲电压、电流、束流以及脉冲电场、磁场测量等,这些将在第5章作详细介绍。触发系统在脉冲功率装置中非常重要,它关系到开关的性能、装置的同步可靠运行。触发系统一般有电触发系统和激光触发系统。电触发系统是最常用的,它由1台或多台小型脉冲功率装置组成,其参数由被触发开关的要求决定。在脉冲功率装置中,要求开关具有低的自放电概率和低的击穿时间抖动,但是这两者是相互矛盾的。要求低的自放电概率,需要选择开关工作电压与自击穿电压之比(叫作工作系数)小于50%~60%,但却使开关的击穿延迟时间和抖动大大增加,因此为减小开关击穿时间的抖



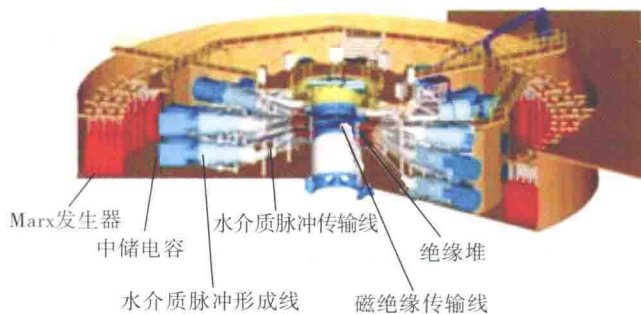


图 1-4 美国圣地亚国家实验室的 Z 装置

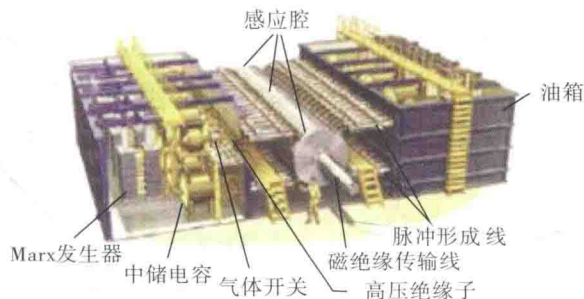


图 1-5 美国圣地亚国家实验室的 Hermes-III 装置

## 1.2.2 脉冲功率技术的关键部件

### (1) 初级储能和脉冲产生系统

初级储能和脉冲产生系统的主要作用是储存初级电磁能量,通过开关和不同的电路、结构的组合产生微秒级或更慢的高电压或大电流脉冲。

在脉冲功率装置中最常用的初级储能和脉冲产生系统主要有脉冲电容器组、Marx 发生器、直线型脉冲变压器(linear transformer driver, LTD)、特斯拉(Tesla)脉冲变压器、爆炸磁压缩脉冲发生器等。其中 Marx 发生器和直线型脉冲变压器是大型脉冲功率装置中最常用的 2 种初级储能系统,比较适合单次高功率工作方式,而脉冲重复率不高,一般只能工作在较低的平均功率水平下。表征它们性能的主要参数是储能、输出电压、输出电流、特征放电时间常数  $\tau(\tau = \sqrt{L_m C_m})$ 。其中,  $L_m$  为发生器的等效串联电感;  $C_m$  为发生器的串联电容,又叫建立电容)、每兆伏的电感量、建立时间(定义为第 1 级开关动作至最后一级动作的时间)及其抖动、自放电概率、工作寿命(一般用放电次数表示)等。

#### 1) 脉冲电容器组

脉冲电容器组是最基本的静电储能方式,主要用于产生低电压(一般为几十千伏)、大电流(几十千安至几百千安)脉冲,脉冲上升时间为几微秒至几毫秒,当需要输出更大的电流时,常采用多个模块并联。大多数电容器组都用来直接驱动负载,如脉冲电容器组常作为等离子体焦点装置、脉冲强磁场、电磁发射装置、泵浦激光的脉冲供电电源。

#### 2) Marx 发生器

Marx 发生器的工作原理与高电压工程中的冲击电压发生器的原理相同,即电容器并联充电、通过开关串联放电,获得高电压脉冲。由于用途不同,其根本区别在于总储能、储能密度、串联电感、建立电容和输出电压波形很不相同。在大型脉冲功率装置中 Marx 发生器的负载一般是液体介质的电容,介质的击穿特性和开关特性要求发生器有快的放电时间,在发生器储能确定的情况下,需要重点解决高电压与低电感之间的矛盾,尤其是对负载为水介质电容的发生器。通过几十年的努力,发生器的线路、结构、器件等在降低电感方面都有很大的进步。今后的发展趋势是进一步减小 Marx 发生器的串联电感,从而减小其放电特征时间常数,提高输出电流,以达到大大简化或完全省去脉冲储能和压缩系统的要求,可直接向最终的负载系统供电。

#### 3) 直线型脉冲变压器

直线型脉冲变压器是近 30 多年来发展起来的一种新技术,它是一种基于 1:1 变压器的电压、电流感应叠加系统。初级电容并联充电、通过开关并联放电,结构上以模块化、直线式串联排列为特征,在次级感应出的脉冲电压和电流近似线性叠加,所以叫直线型脉冲变压器。它与 Marx 发生器相比,具有结构紧凑、储能密度高、不需要庞大的变压器油系统、易于实现模块化、回路电感较小和工作可靠性比较高等优势,但也存在技术复杂、增大电流受变压器磁芯饱和限制、需要较庞大的触发系统等缺点。如强光一号装置中初级储能系统是一台直线型脉冲变压器,其外形如图 1-6 所示,其标称储能为 450 kJ、输出电压为 3 MV、储能密度约为  $15.6 \text{ kJ/m}^3$ ,比闪光二号的 Marx 发生器储能密度约高 1 个量

级( $1.5 \text{ kJ/m}^3$ )。直线型脉冲变压器近些年发展很快,有可能成为大型脉冲功率装置中首选的初级储能系统,发展方向也是要尽可能减小其特征放电时间常数。



图 1-6 强光一号装置外形

#### 4) 特斯拉脉冲变压器及其他脉冲变压器

特斯拉脉冲变压器是一种电感耦合回路谐振变压器。它通过初、次级 2 个 LC 振荡回路组成的系统来转换电压,在次级电容上得到高压脉冲,再通过开关快速向负载放电,获得纳秒脉冲高电压。1981 年俄罗斯强流电子学研究所提出并研制成功了将脉冲形成线与特斯拉变压器做成一体结构的脉冲功率装置,把脉冲形成线的电容作为变压器的次级电容,从而使特斯拉变压器在中小型的脉冲功率装置中得到广泛应用,其输出电压可达兆伏量级,脉冲宽度可从亚纳秒至  $20 \text{ ns}$ 。它的主要特点是结构紧凑、易做到小型化,适合重复脉冲工作。另外,一般的脉冲变压器在小型脉冲功率装置中也常作为初级储能和脉冲产生的主要部件,如在全固态脉冲功率源中的应用。对一些小型脉冲功率装置,为了直接产生纳秒脉冲高压,也可采用同轴绕组变压器(小于  $100 \text{ kV}$ )或多段同轴电缆变压器(几百千伏以下)。

#### 5) 爆炸磁压缩脉冲发生器

爆炸磁压缩脉冲发生器是将化学能转变为电磁能的装置,它利用高能炸药推动载流线圈导体,并因磁通守恒在回路负载上产生大电流。爆炸磁压缩脉冲发生器属于一次性使用的脉冲产生和功率放大装置,其输出脉冲上升时间取决于化学爆炸的时间尺度,一般在微秒以上,若要获得纳秒脉冲尚需要进一步压缩脉冲。

### (2) 脉冲储能、压缩和传输系统

脉冲储能、压缩和传输系统的主要作用是将系统产生的初级电压脉冲或电流脉冲压缩和成形,达到负载所要求的脉冲波形,实现功率放大(电流放大或电压放大),并将脉冲电磁能量传输给负载。脉冲储能是指储能部件以脉冲工作方式储存能量,一般可分为电容储能、电感储能和电容电感混合储能。脉冲压缩是通过闭合开关或断路开关快速释放脉冲储能部件中的电磁能量实现的。脉冲电磁能的传输和汇聚一般由水介质传输线和真空磁绝缘传输线完成,或者采用感应电压叠加器获得更高电压的脉冲。

#### 1) 电容储能方式

电容储能是脉冲功率装置中最早采用也是应用最普遍的一种储能方式,储能元件一般采用传输线,可分双同轴线、单同轴线、平板型传输线和螺旋型传输线。在大型脉冲功率装置中常采用前 3 种传输线结构,并用液体介质(油、水等)作为绝缘介质。双同轴线又叫布鲁姆莱因传输线,它是由 A. D. Blumlein 根据传输线短路时电压极性会改变的原理而提出的,在 20 世纪 60 年代初由英国原子能武器



研究中心(AWE)的 J. C. Martin 和他领导的研究小组首先将布鲁姆莱因传输线技术应用于脉冲功率装置,从而开创了脉冲功率技术的新局面,从那时起,在国防需求的推动下,脉冲功率装置得到了迅速发展。布鲁姆莱因传输线比较适合高阻抗负载,一般用变压器油作为绝缘介质,在与负载阻抗匹配的条件下,理论上可以获得与充电电压幅值相等的纳秒脉冲,电压幅值可达到几兆伏至十几兆伏,典型的装置是美国的 Aurora,其输出电压为 15 MV、脉冲宽度为 120 ns,4 台并联,电流为  $4 \times 400$  kA,是国际上采用布鲁姆莱因传输线的电压最高的脉冲功率装置;中国工程物理研究院研制的闪光一号装置也是双同轴线装置,其输出电压为 8 MV、脉冲宽度为 80 ns、电流为 100 kA,主机长 26 m、宽 6 m、高 6.5 m,其外形照片见图 1-7。

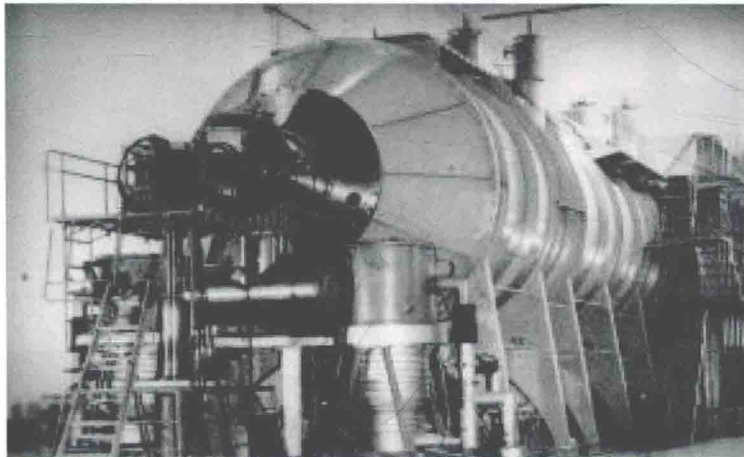


图 1-7 闪光一号装置外形

采用去离子水作为脉冲储能传输线的绝缘介质,是 20 世纪 70 年代发展起来的技术,水介质传输线的成功应用是脉冲功率技术发展中的又一个里程碑。它适合低阻抗负载,阻抗可以做到小于  $1 \Omega$ ,从而可以获得大电流脉冲。在与负载阻抗匹配的条件下,理论上可以获得为充电电压幅值 50% 的纳秒脉冲,而电流幅值可以达到几百千安到兆安。因此对于水介质传输线脉冲储能方式,它是通过降低电压,实现脉冲压缩、电流放大而获得高功率脉冲的,这就要求初级储能系统有较高的电压脉冲输出。在低阻抗高功率脉冲装置中,脉冲储能、压缩、传输系统(可以统称为水介质传输线)往往十分庞大,其造价和体积大约占整个脉冲功率装置的 70% 以上,其复杂程度主要取决于初级储能系统的特征放电时间常数、负载要求(包括脉冲上升时间、宽度、预脉冲、阻抗)以及所采用的开关的性能。如对负载为低阻抗二极管而言,要求脉宽为几十纳秒,上升时间快、预脉冲电压小(千伏量级),阻抗低(欧姆量级),而 Marx 发生器或直线型脉冲变压器对水介质传输线的充电时间一般在微秒量级,因此为了满足负载的要求,常采用多级水线和相应的开关串联,通过选择合适的开关击穿时间和水线尺寸来形成和压缩脉冲、陡化脉冲前沿、减小预脉冲电压。如美国的 Blackjack 5 是国际上单台输出电流最大(达 5 MA)的脉冲功率装置,水介质传输线部分的结构也最庞大、复杂,由 5 级水线和 4 个开关串联组成。多级水线串联的结构还可以通过调整开关击穿时间和几段线之间的组合实现输出脉冲宽度的调节。

最后一级水线叫输出传输线或输出线,其作用除了传输电脉冲功率外,还可实现阻抗变换,或改变脉冲极性、传输线结构,使其阻抗与负载等效阻抗相匹配。如美国的 PBF A-II 装置,在输出级水线上实现了“倒相”(将负极性脉冲变换为正极性脉冲)和由同轴型传输线变为平板型传输线的转换,并使输出电压串联相加,将输出电压提高 1 倍。

## 2) 电感储能及混合储能方式

基于电感储能和断路器压缩脉冲的思想是在 20 世纪 60 年代由俄罗斯技术物理研究院的 A. B. Luchinsky 等专家提出的,他们还建成了世界上第 1 台输出功率大于 0.1 TW 的基于电感储能的脉冲功率装置 ИГУР-1。它的基本工作过程是由作为初级储能部件的 Marx 发生器向螺旋电感线圈放电,