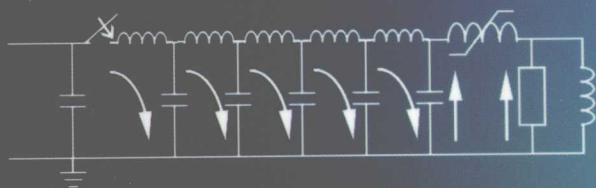


电力电子
新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎余岳辉 梁琳 编著

脉冲功率器件 及其应用

MAICHONG GONGLÜ QIJIAN
JIQI YINGYONG



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电力电子新技术系列图书

脉冲功率器件及其应用

余岳辉 梁琳 编著



机械工业出版社

脉冲功率技术近年来发展迅速,在军事和工业的众多领域都有着广泛的应用前景。脉冲功率开关是脉冲功率系统的核心器件之一,由于半导体器件具有体积小、寿命长、可靠性高等优点,脉冲功率开关目前有半导体化的趋势。本书首先对脉冲功率开关的发展历程进行了总体概述,然后分别论述了电流控制型器件(具体包括GTO晶闸管、GCT和IGCT、非对称晶闸管)和电压控制型器件(具体包括功率MOSFET、IGBT、SITH)的结构、工作原理、特性参数及其在脉冲功率系统中的应用,特别讨论了几种新型专门用于脉冲功率领域的半导体开关(包括反向开关晶体管、半导体断路器、漂移阶恢复二极管和光电导开关)的机理模型和实际运用等问题,最后论述了脉冲功率应用的相关问题。

本书可供电力电子技术、微电子技术以及脉冲功率技术等领域的研究生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

脉冲功率器件及其应用/余岳辉,梁琳编著. —北京:机械工业出版社,2010.3

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-28956-2

I. ①脉… II. ①余… ②梁… III. ①大功率—脉冲电路—电子器件
IV. ①TN103

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第030605号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孙流芳 责任编辑:朱林

版式设计:霍永明 封面设计:马精明

责任校对:陈立辉 责任印制:杨曦

北京双青印刷厂印刷

2010年6月第1版第1次印刷

169mm × 239mm · 19.25印张 · 425千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28956-2

定价:40.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

电力电子新技术系列图书

编辑委员会

主任: 王兆安

副主任: 白继彬 牛新国 徐德鸿 杨耕

委员: (按姓名拼音字母排序)

白继彬	陈伯时	陈道炼	陈坚	陈守良
陈治明	高艳霞	郭世明	黄耀先	康勇
李崇坚	李永东	刘进军	吕征宇	牛新国
钱照明	阮新波	孙流芳	童宗鉴	王鸿麟
王旭东	王兆安	邬伟扬	肖湘宁	徐德鸿
徐殿国	杨耕	杨旭	余岳辉	张波
张承慧	张为佐	张卫平	张兴	赵善麒
赵争鸣	钟彦儒	周波	周维维	查晓明

秘书组: 陈守良 刘进军 孙流芳 罗莉

电力电子新技术系列图书 序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来，使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化，同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，新的电力电子器件层出不穷，新的技术不断涌现，其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群，如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业，这个产业群就更加庞大了。与之相应，在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大，且与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，成为眼下的迫切需要。

在20世纪80年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿工作，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

1. 本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。

2. 理论联系实际，以应用技术为主。

3. 本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

脉冲功率技术产生于20世纪30年代,60年代之后得到迅速发展。脉冲功率开关是脉冲功率系统的核心器件之一,其参数和特性对脉冲的上升时间、幅值、关断时间等都会产生最直接的影响。近20年来,开关技术的发展极大地改变了脉冲功率及其应用的概念。气体放电的性质本身决定了气体开关存在原理上的缺陷,通过用固体开关取代传统的火花隙等气体开关,脉冲功率技术在寿命、重复频率、紧凑性和灵活性等方面获得了全新的参数范围。电力半导体器件在功率能力和工作速度两方面都取得了显著进步,以其体积小、寿命长、可靠性高等优点,逐渐成为了脉冲功率开关的发展方向。由各自的物理结构和工作机理决定,每种半导体开关都有其功率能力、工作频率、断路或导通特性。

半导体脉冲功率器件实质上是在脉冲功率领域里应用的电力半导体器件,它们具有一致的物理基础,只是需要更多的考虑到大注入、强电场等极端条件下的特殊表现,以及高电压、大电流、高电流变化率的特殊应用背景,所以半导体脉冲功率器件是涉及微电子学与固体电子学、电力电子技术、脉冲功率技术、高电压技术等多门学科交叉的器件。目前国内外对半导体脉冲功率器件的研究方兴未艾,在电力电子新技术系列图书中包含这一主题,可以开拓电力电子基础器件研究人员的视野、启发创造性思维,也呼应了国家在“十一五”期间提出的“器件是电力电子技术的基础和发展重点”的思路,在行业内再次彰显了基础器件研究的重要性和生命力。

作者在为本书集结素材时,一方面参考了大量有关电力半导体器件、脉冲功率技术等方面的传统教材,另一方面广泛搜集了国际上该领域的许多新文献资料,尤其是在脉冲功率研究领域处于领先地位的俄罗斯、日本、美国等国将半导体器件应用于脉冲功率的最新成果,同时还结合了我们课题组在进行国家项目的研究中积累的实际经验,力图将半导体脉冲功率器件这一有着悠久研究历史基础的新兴课题准确地展示给读者。本书的具体内容包括:脉冲功率开关概论、电流控制型脉冲功率器件(GTO晶闸管、GCT和IGCT、非对称晶闸管)、电压控制型脉冲功率器件(功率MOSFET、IGBT、SITH)、新型半导体脉冲功率器件(RSD、SOS、DSRD、PCSS)以及脉冲功率应用技术。

本书第1、2、5章由余岳辉编写,第3、4章由梁琳编写。在成书过程中,得到华中科技大学电子科学与技术系电力电子技术研究所07和08级研究生的大力协助,限于篇幅,不能将他们的名字一一列举,仅此表示深深的谢意。在编写过程中,我们参考了大量国内外文献资料,其中主要的已详细列于每章之后,但难免会有未顾及到的,在此一并表示衷心感谢。由于教学科研工作繁忙,时间仓促,加上作者水平限制,错漏之处在所难免,敬请广大读者不吝赐教。

作者

2009年8月于华中科技大学

目 录

电力电子新技术系列图书序言

前言

第 1 章 概论 1

1.1 脉冲功率技术的产生背景及应用 1

1.2 脉冲功率系统简介 2

1.2.1 脉冲功率技术 2

1.2.2 脉冲功率系统的组成与分类 4

1.3 常用的传统脉冲功率开关 5

1.3.1 触发真空开关 (TVS) 5

1.3.2 伪火花开关 (PSS) 6

1.3.3 断路开关 7

1.4 半导体器件在脉冲功率技术中的应用 9

参考文献 12

第 2 章 电流控制型脉冲功率器件 13

2.1 门极关断 (GTO) 晶闸管 13

2.1.1 GTO 的发展 13

2.1.2 GTO 的结构 13

2.1.3 GTO 的工作原理 14

2.1.4 GTO 的特性优化 19

2.1.5 GTO 的驱动电路和吸收电路 20

2.1.6 GTO 的功耗 22

2.2 门极换流晶闸管 (GCT) 和集成门极换流晶闸管 (IGCT) 23

2.2.1 GCT 的发展 23

2.2.2 GCT 的结构和特点 24

2.2.3 IGCT 的工作原理和开关波形 27

2.2.4 IGCT 的驱动电路和开关

特性 29

2.2.5 IGCT 的特性改进 31

2.3 非对称晶闸管 33

2.3.1 非对称晶闸管概述 33

2.3.2 非对称晶闸管的断态电压 34

2.3.3 非对称晶闸管的最小长基区宽度 $W_{N(\min)}$ 36

2.4 电流控制型器件在脉冲功率系统中的应用 38

参考文献 39

第 3 章 电压控制型脉冲功率器件 41

3.1 功率场效应晶体管 (Power MOSFET) 41

3.1.1 功率 MOSFET 的基本原理及分类 41

3.1.2 功率 MOSFET 的基本结构 42

3.1.3 功率 MOSFET 的特性和主要电学参数 45

3.1.4 新型结构的功率 MOSFET——“超结” 48

3.1.5 功率 MOSFET 的栅极驱动 49

3.1.6 功率 MOSFET 在脉冲功率系统中的应用 51

3.1.6.1 功率 MOSFET 在高压脉冲调制器中的应用 51

3.1.6.2 功率 MOSFET 在兆赫兹脉冲功率发生器中的应用 53

3.1.6.3 利用 MOSFET 的高电压固态加法脉冲发生器的模拟幅度调制 55

3.1.6.4 为细菌转化提供的基于

MOSFET 的脉冲电源	59	3.3.5.1 变压变频逆变器	127
3.1.6.5 与脉冲变压器串联的由 功率 MOSFET 转换的 20kV/500A/100ns 脉冲 发生器	61	3.3.5.2 高质量电源装置	128
3.1.6.6 基于 MOSFET 的简单高 电压纳秒级脉冲电路	63	3.3.5.3 脉冲功率发生器	130
3.2 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	70	参考文献	132
3.2.1 概述	70	第 4 章 新型半导体脉冲功率 器件	136
3.2.2 IGBT 的结构和工作原理	71	4.1 反向开关晶体管 (RSD)	137
3.2.3 IGBT 的基本特性	72	4.1.1 国内外研究概况	137
3.2.4 IGBT 的栅极驱动和保护	80	4.1.2 RSD 的工作机理	139
3.2.5 五代 IGBT 及第五代 IGBT 的 3 种新技术	86	4.1.2.1 借助可控等离子层换 流原理	139
3.2.6 IGBT 的发展	96	4.1.2.2 RSD 的结构和工作 机理	141
3.2.7 IGBT 在脉冲功率系统中的 应用	97	4.1.3 RSD 的换流特性	147
3.2.7.1 改进的 Marx 发生器	97	4.1.3.1 RSD 开通与大电流 特性	147
3.2.7.2 串联谐振充电电源	102	4.1.3.2 RSD 的功率损耗 特性	150
3.2.7.3 IGBT 在脉冲变压器 驱动源中的应用	105	4.1.3.3 RSD 的关断特性	154
3.2.7.4 IGBT 的串联	105	4.1.4 RSD 的结构优化	160
3.3 静电感应晶闸管 (SITH)	114	4.1.4.1 薄发射极改善 RSD 开通特性	160
3.3.1 SITH 的基础理论知识	115	4.1.4.2 “薄基区-缓冲层-透明 阳极”结构探索	164
3.3.1.1 器件结构	115	4.1.5 RSD 的关键工艺	169
3.3.1.2 基本工作原理	116	4.1.5.1 基本工艺方案	169
3.3.2 静态特性	117	4.1.5.2 阳极多元胞结构	169
3.3.2.1 正向开通特性	117	4.1.5.3 阴极短路点的设计	171
3.3.2.2 正向阻断特性	118	4.1.5.4 新工艺技术研究	173
3.3.2.3 电压增益	119	4.1.5.5 部分芯片测试记录	177
3.3.3 动态特性	119	4.1.6 基于 RSD 的脉冲发生 电路	178
3.3.3.1 开通时间 t_{on} 和关断 时间 t_{off}	119	4.1.6.1 基于 RSD 的脉冲放电 系统主回路	178
3.3.3.2 du/dt	122	4.1.6.2 120kA 大功率脉冲发生 电路的设计与实现	181
3.3.3.3 di/dt	124	4.1.6.3 RSD 在重复频率脉冲 工况下的应用	185
3.3.4 驱动电路和损耗	125	4.1.6.4 大功率 RSD 多元 并联技术	187
3.3.4.1 驱动电路	125		
3.3.4.2 损耗	125		
3.3.5 SITH 在脉冲功率系统中的 应用	127		

4.1.6.5	高速长寿命化 RSD 芯片的级联	192	4.4.4	PCSS 的击穿特性与寿命	227
4.2	半导体断路开关 (SOS)	193	4.4.5	PCSS 的性能改进	227
4.2.1	SOS 效应的发现	193	4.4.6	PCSS 的应用	228
4.2.2	SOS 模式的物理基础	194		参考文献	228
4.2.2.1	SOS 的基本工作原理	194	第 5 章 脉冲功率应用技术		235
4.2.2.2	SOS 效应模式下的电子空穴动力学	198	5.1	磁脉冲压缩技术	235
4.2.3	SOS 二极管的特性及主要参数	200	5.1.1	磁开关	235
4.2.4	基于 SOS 二极管的脉冲发生器	204	5.1.2	磁脉冲压缩原理	236
4.2.4.1	基于 SOS 的 Marx 发生器	204	5.1.3	磁脉冲压缩电路	237
4.2.4.2	基于 SOS 的纳秒重复脉冲发生器	208	5.1.4	磁开关设计	240
4.3	漂移阶跃恢复二极管 (DSRD)	212	5.2	高电压大电流脉冲测量	246
4.3.1	DSRD 工作原理	213	5.2.1	大电流脉冲测量	247
4.3.1.1	DSRD 结构及电路原理	213	5.2.1.1	分流器	247
4.3.1.2	DSRD 的超快速恢复原理	214	5.2.1.2	罗氏线圈法	249
4.3.1.3	高压下 DSRD 的电流电压特性	215	5.2.1.3	磁光式电流传感器	253
4.3.2	薄 DSRD 的结构及新材料的应用	216	5.2.2	脉冲高压测量	255
4.3.3	DSRD 的应用	217	5.2.2.1	电阻分压器	255
4.3.3.1	电光开关驱动控制	217	5.2.2.2	电容分压器	258
4.3.3.2	脉冲产生器	218	5.2.2.3	阻容分压器	259
4.4	光电导开关 (PCSS)	219	5.2.2.4	微积分测量系统	261
4.4.1	PCSS 的基本结构与工作原理	219	5.3	脉冲功率技术应用	261
4.4.1.1	器件结构	219	5.3.1	脱硫脱硝处理	261
4.4.1.2	工作原理	222	5.3.1.1	引言	261
4.4.2	PCSS 的工作模式	222	5.3.1.2	实验装置	262
4.4.2.1	线性工作模式	222	5.3.1.3	对同时脱硝脱硫处理的评价	262
4.4.2.2	非线性工作模式	224	5.3.2	气体激光器	263
4.4.2.3	两种工作模式比较	226	5.3.2.1	TEACO ₂ 激光器	263
4.4.3	PCSS 中的衰减振荡	226	5.3.2.2	受激准分子激光器	263
			5.3.2.3	其他脉冲放电激励气体激光器	264
			5.3.3	X 射线光源	264
			5.3.3.1	X 射线的种类和应用	264
			5.3.3.2	Z 箍缩放电型软 X 射线源	265
			5.3.3.3	光刻用的激光等离子 X 射线源	265
			5.3.3.4	激光等离子 X 射线源用作 X 射线显微镜	267
			5.3.4	紫外线光源	267

5.3.4.1	引言	267	5.3.11.2	利用高压脉冲进行 破碎分离实验	280
5.3.4.2	表面放电型紫外线 光源	267	5.3.12	电磁加速	281
5.3.4.3	箍缩型紫外线光源	268	5.3.12.1	引言	281
5.3.4.4	其他脉冲紫外线 光源	268	5.3.12.2	电磁加速方法	282
5.3.5	产生臭氧	268	5.3.12.3	电磁加速的研究和 应用	282
5.3.5.1	引言	268	5.3.12.4	电磁加速的研究 现状	283
5.3.5.2	电晕放电的特征	269	5.3.12.5	今后的研究方向	284
5.3.5.3	电晕放电法的研究 现状	269	5.3.13	惯性核聚变	284
5.3.5.4	今后的研究方向	270	5.3.13.1	引言	284
5.3.6	工业废弃物处理	270	5.3.13.2	关于惯性核聚变	284
5.3.6.1	引言	270	5.3.13.3	放射线控制	284
5.3.6.2	放射性污染物质的 处理	270	5.3.13.4	Z 箍缩实验	284
5.3.6.3	脉冲功率系统	271	5.3.13.5	被照射目标设计	285
5.3.7	二恶英处理	271	5.3.13.6	核聚变的实现	286
5.3.8	微生物杀菌	273	5.3.14	产生微波	286
5.3.8.1	引言	273	5.3.14.1	引言	286
5.3.8.2	脉冲电场对微生物的 影响	273	5.3.14.2	迟波电子回旋加速微波 激励器和零磁场后进 波振荡器的实验	286
5.3.8.3	脉冲电场杀菌的 研究	273	5.3.14.3	小结	287
5.3.8.4	杀菌效果和机理的 相关讨论	275	5.3.15	新材料的开发	288
5.3.8.5	今后的研究方向	276	5.3.16	离子注入	288
5.3.9	水处理	277	5.3.16.1	引言	288
5.3.9.1	引言	277	5.3.16.2	金属离子注入原理	288
5.3.9.2	水中放电现象	277	5.3.16.3	金属离子注入的 特征	288
5.3.9.3	水处理的应用	277	5.3.16.4	装置组成	289
5.3.9.4	小结	278	5.3.16.5	电源	290
5.3.10	岩石粉碎	279	5.3.17	NO 的生成	290
5.3.10.1	引言	279	5.3.17.1	引言	290
5.3.10.2	岩石内部的放电 现象	279	5.3.17.2	医疗中 NO 的吸入 疗法	291
5.3.10.3	破坏的特点	280	5.3.17.3	实验装置和实验 方法	291
5.3.10.4	今后的研究方向	280	5.3.17.4	实验结果	292
5.3.11	废弃混凝土的循环利用	280	参考文献		293
5.3.11.1	引言	280			

第1章 概 论

1.1 脉冲功率技术的产生背景及应用

将电磁能量经过时空压缩而得到的大的功率称为脉冲功率。在涉及进行巨大功率试验的许多近代物理领域及一系列技术领域，常常需要在微秒、纳秒及亚纳秒的时间范围内对巨大的电功率（由兆瓦到太瓦）进行换流。这种需要常常出现在如可控热核合成、大功率激光及加速器、高频等离子体电子学、大功率无线电发送、导航、雷达系统等工作的某些方面。

脉冲功率技术最初是基于材料响应实验、闪光 X 射线照相及模拟核武器效应的需要而出现的。1962 年英国的 J. C. 马丁成功地将已有的 Marx 发生器与传输线技术结合起来，产生了持续时间短达纳秒级的大功率脉冲，从而开辟了这一崭新的领域。1976 年在美国召开的第一届脉冲功率国际会议上，脉冲功率这一说法得到确认。当时，单次脉冲的大功率脉冲发生器研究十分盛行。以美国和前苏联为中心，在军事方面进行了很多应用，花费了巨额费用之后，随着冷战的结束，积蓄型脉冲功率技术在产业应用中的利用机会得到提高。随之，高技术领域如受控热核聚变研究、大功率粒子束、大功率激光、定向束能武器、电磁轨道炮等的研制都对大功率脉冲技术的发展提出了新的要求，使大功率脉冲技术成为 20 世纪 80 年代极为活跃的研究领域之一。

近年来，相对于脉冲功率装置的大功率化的研究，脉冲功率技术在产业应用上要求具有更高的可靠性。长时期高重复率工作的脉冲功率发生装置的开发也在进行中。而且，为了在产业应用中具有高效率，用波形控制负载的能量传输效率等也成了重要因素。脉冲功率产业应用中广泛使用的利用脉冲功率放电等离子现象的解释变得很重要。如此一来，要想扩展新的脉冲功率应用领域，与之相关的进一步的技术开发和物理现象的解释就是不可或缺的。

大脉冲功率系统的主要参量有：脉冲能量（千焦～吉焦）、脉冲功率（吉瓦～太瓦）、脉冲电流（千安～兆安）、脉冲宽度（微秒～纳秒）和脉冲电压。大脉冲功率系统的工作原理是，先从小功率能源中获得的能量存储起来，然后将这些能量经大功率脉冲发生器转变成大脉冲功率，并传给负载。由一定的能量所转换成的脉冲持续时间愈短，在负载上得到的功率愈大。所提供的能源可以是电能、磁能、化学能或其他形式的能。

现在，脉冲功率已经是一项应用十分广泛的技术。它可在很短的时间内产生极高的温度、耀眼的闪光和巨大的声响，它可将粒子加速到很高的速度，可产生极大的力量，也可远距离探测目标，并且还能创造很多不可能连续维持的极限条件。在军事方

面，脉冲功率技术是许多新概念武器和新装备的技术支持，如电磁发射与电磁炮、大功率微波、强流电子束与粒子束、卫星推进、受控激光核聚变、同位素分离等。在工业领域，脉冲功率技术用于驱动激光器完成切割与焊接等工作、进行高强度紫外辐射的精密半导体光刻，注入金属离子、处理废气废水、高压电容充电、静电除尘、生成臭氧、保鲜食品以及加工纳米尺寸粉体等。在医用领域，脉冲功率技术可以驱动加速器以产生 X 射线治疗癌症患者，用作心脏起搏器和去纤颤器，用 NO 吸入疗法治疗呼吸系统疾病以及粉碎结石等。事实上，脉冲功率技术已渗透到我们日常生活的方方面面。

1.2 脉冲功率系统简介

1.2.1 脉冲功率技术

脉冲功率技术是将相对较长的时间内存储起来的能量在很短的时间内迅速释放出来的一门科学技术。众所周知，能量 (E) 等于功率 (P) 乘以功率作用时间 (t)，即： $E = Pt$ 。由此可知：当能量一定时，缩短时间（脉冲压缩）就可以增大功率，这就是脉冲功率技术的基本原理。换言之，实现短时间脉冲化和得到大的功率密切相关。图 1-1 描述了功率 P 与时间 t 的关系：图 1-1a 在 1s 时间内的输入功率为 1kW，假设没有能量损失，图 1-1b 在 1 μ s 内将这些能量释放，则输出功率达到 1GW。

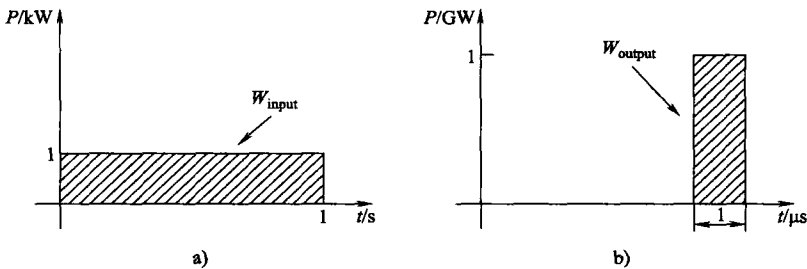


图 1-1 功率 P 与时间 t 的关系 (能量 E 一定)

a) 输入波形 b) 输出波形

图 1-2 所示的是利用 LC 振荡回路的 4 段 LC 反转型高电压发生器。首先，给如图 1-2 所示各电容充电，之后闭合开关 (S_1, S_2)， LC 回路开始谐振，以转换时间 $\tau = \pi (LC)^{1/2}$ 加入主开关，可以得到电压值为充电电压 4 倍的高电压。这种方式可以简便地用于产生高电压的场合。但是随着电压极性的反转，大的应力会使电路很不安全，所以不太实用。

实用的方式多为给电容并联充电、串联放电的 Marx 发生器。图 1-3 所示为 6 段 Marx 发生器的基本电路。首先，各电容通过充电电阻充电，充电之后，闭合开关，电容中存储的电荷经过开关放出（首先选定的 CR 时间常数较大），可以得到电压值为充

电电压 6 倍的高电压。这种方式多用于用单机产生大的脉冲功率的场合。

对于较小单脉冲功率、高重复频率工作的民用脉冲功率发生器，多用图 1-4 所示的电荷移动型高电压发生电路。首先，按照 $C_1 \rightarrow L_1 \rightarrow L_2$ 回路充电后，闭合开关，电流按照 $C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow L_1$ 回路流过。 C_1 中存储的电荷由谐振转移到 C_2 中，并提供给负载。

用图 1-4 所示方式得到的高电压不太适合直接接在负载上，经常是在进行脉冲波形整合后再接到负载上。对于波形整合，通常使用电感比较大的同轴线路，把这种线路称为脉冲成形线路（Pulse Forming Line, PFL）。图 1-5 所示是使用同轴传输线路的脉冲功率发生电路。

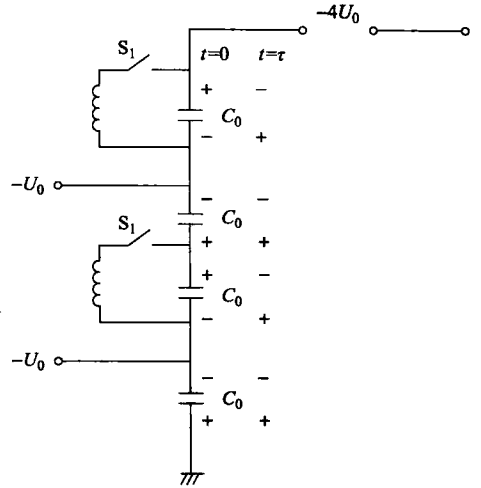


图 1-2 LC 反转型高电压发生器

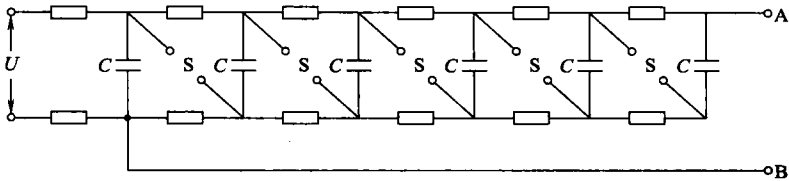


图 1-3 Marx 发生器的基本电路

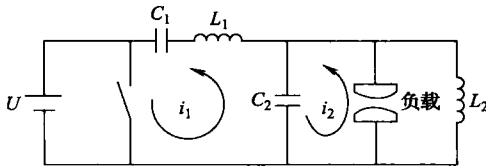


图 1-4 电荷移动型高电压发生电路

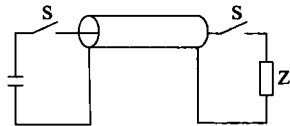


图 1-5 使用同轴传输线路的脉冲功率发生电路

另外，由同轴线路构成的 PFL 的单位长度中的静电容量 (C) 和电感 (L) 由式 (1-1) 和式 (1-2) 给出：

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(R_o/R_i)} \quad (1-1)$$

$$L = \left(\frac{\mu_o}{2\pi}\right) \ln(R_o/R_i) \quad (1-2)$$

由以上两式可知，同轴线路的阻抗

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_o}{\epsilon}} \ln(R_o/R_i) \approx \frac{\sigma_o}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln(R_o/R_i) \quad (1-3)$$

脉宽是由电磁波在同轴线路中往返时间决定的，应满足式 (1-4) 的要求

$$\tau = \frac{2\varepsilon_r^{1/2}}{C} \quad (1-4)$$

由此知道，若使用纯水（相对介电常数 ε_r 为 80）作为电感体，要得到脉宽 50ns 的脉冲，需用长度为 84cm 的同轴线路。

1.2.2 脉冲功率系统的组成与分类

脉冲功率系统的组成一般包括高压电源单元、能量存储单元、脉冲压缩单元、主开关和负载几部分（见图 1-6）。高压电源是脉冲功率系统的能源，一般以电能为主，也可以是化学能或其他形式的能源；能量存储单元在一定时间内将能量存储起来；脉冲压缩单元将图 1-1a 那样的长脉冲输入压缩成图 1-1b 所示的窄脉冲输出，根据输出脉冲的要求，可以有数级脉冲压缩单元；负载前面的最后一个单元是主开关，其作用是将压缩后的脉冲传递给负载。

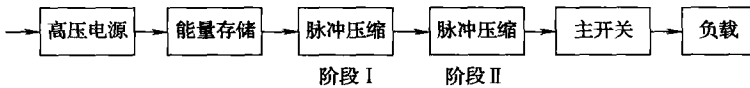


图 1-6 脉冲功率系统的构成

根据不同的储能类型，脉冲功率系统基本上可以分为电容储能型和电感储能型。

1. 电容储能型脉冲功率系统

图 1-7 给出了基本的电容储能型脉冲功率电路的结构和典型的负载电压曲线。在高压电源 U_0 将储能电容 C 充到一定电压后闭合开关 S ，理想情况下，负载 R_L 上脉冲的上升时间为零，但是回路的寄生电感增加了上升时间；脉冲的下降时间由电容 C 与负载 R_L 组成的 RC 谐振时间常数决定，在大功率脉冲装置中，这一下降时间往往是数十至数百微秒，甚至是毫秒级。

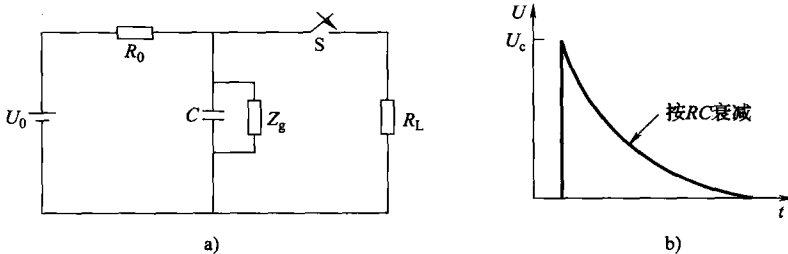


图 1-7 典型电容储能型脉冲功率电路与输出电压波形

a) 电容储能电路 b) 输出电压波形

2. 电感储能型脉冲功率系统

在脉冲功率技术中，绝大多数纳秒脉冲发生器是基于电感储能型。图 1-8 是基本

的电感储能型脉冲功率电路的结构和典型的负载电压曲线。首先，直流大电流 I_L 流经储能电感 L ，当断路器 S 断开时，通过 L 的电流很快下降，负载电压由式 (1-5) 给出：

$$U_L = -L \frac{di}{dt} \quad (1-5)$$

电感 L 两端将会产生上升率很高的电压脉冲 U_L ，如果储能电感 L 的内阻 R_s 很小，这时负载 R_L 两端也会产生同样上升率的电压脉冲 U_{ZL} ，脉冲的下降时间为 L/R_L 。

对于电感储能型脉冲功率系统，理论上可以通过采用高阻负载来获得大功率、窄时延的脉冲输出，但是断路器 S 对输出脉冲的影响非常大。纳秒级的断路器开关和储能密度大、内阻低的储能电感的研制是电感储能型脉冲功率技术的关键技术问题。

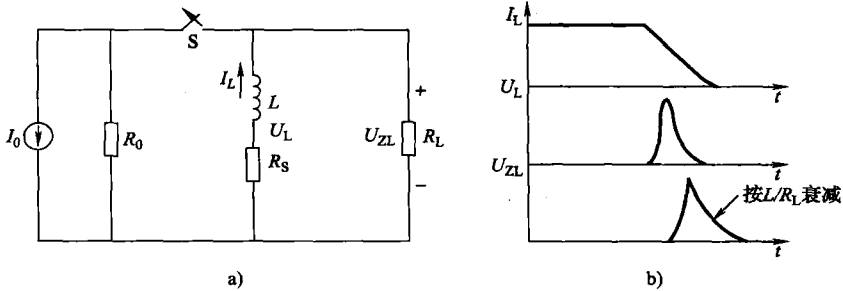


图 1-8 典型的电感储能型脉冲功率电路与输出电压波形

a) 电感储能电路 b) 输出电压波形

1.3 常用的传统脉冲功率开关

脉冲功率技术中传统开关元件有火花隙 (Spark gap)、引燃管 (Ignitron)、闸流管 (Thyratron)、真空管和爆炸式开关等。火花隙应用在许多脉冲功率领域，它的速度快，能够进行高压大电流的开通和关断。但由于它们的寿命较短，且恢复特性的限制使得气体火花隙开关在不吹气时最高重复频率仅为数十赫兹，因此其应用受限于较低的重复频率场合，另外冷却也是一个难题。引燃管具有耐压高、功率大、电流上升速度快等特点，其最大的优点是峰值电流大 (可达 1000kA)，电荷转移量大 (可达 500C)，但是引燃管的寿命和火花隙一样短。闸流管的速度很快，能够在所需电压下进行工作，20 ~ 40 个闸流管并联可以达到需要的电流量级，运行时间长达一年，但是它的同步控制比较困难，同时价格昂贵，易击穿。另外还有触发真空开关、伪火花开关和断路器开关等。上述器件大多使用在单次或频率很低的电容储能放电应用中，以下重点介绍几种使用在重复频率场合的传统脉冲功率开关，大多用于电感储能应用中。

1.3.1 触发真空开关 (TVS)

触发真空开关 (Triggered Vacuum Switch, TVS) 工作气压在 10^{-4} Pa 以下，一般认

为触发真空开关的工作过程包括触发、导通、熄灭、恢复4个过程。

· 触发：为高度绝缘的真空主电极间隙击穿提供介质——带电粒子。

导通：触发阶段产生的初始带电粒子扩散进入主间隙，在主电场的作用下，电子向阳极加速运动，撞击阳极表面放出吸附气体、金属蒸气或直接放出电子；同时受阴极吸引，大量的正离子在阴极附近集中，形成正离子鞘层，大大增强了阴极附近的场强，在阴极表面形成强烈的阴极发射斑点，两者导致主间隙导通。

熄灭：导通后，随着主电流的下降，金属等离子体的再生率下降，主电流降到零，输入功率降到零，持续一小段时间，当等离子体的再生速率小于其总的复合速率时，电弧熄灭，开关进入截止状态。

恢复：在电弧熄灭过程中，如果电极间隙中的介电强度在外加电压到来之前达到足够大，且加电压后不足以引起击穿时，则认为开关绝缘已经恢复到原始状态。

密封工艺、电极材料和触发技术是触发真空开关的关键技术。

TVS具有以下优点：承受电压高、工作电压范围宽、主间隙介电强度恢复迅速、不受外界环境的影响、动作时延及分散性小和可导通较大的电流。因为触发真空开关的导电过程是由电极材料蒸发出来的金属蒸气电离形成的等离子体完成的，而电极表面的放气及烧蚀使得触发真空开关内部真空的维持十分困难，特别是在导通大电流时，电极材料的烧蚀极为严重。

1.3.2 伪火花开关（PSS）

20世纪50年代末期，德国科学家J. Christiansen在研究平板电子雪崩探测器时，发现在巴申曲线低谷附近常常发生异常放电现象，并导致计数器工作失效。20年之后，J. Christiansen与C. Schultheiss重新研究这一现象，通过采用空心阴极结构，他们将这种放电从电极边缘转移到了电极中心，进一步研究表明，这是一种新的放电现象，它具有辉光放电的外形，又有火花放电时的大电流、窄时延和小抖动的特性，但是其放电机理和放电过程既不同于辉光放电，也不同于火花放电，因此命名为伪火花放电。

伪火花开关（Pseudo Spark Switch, PSS）是一种低气压（1~80Pa）的气体放电开关，其工作过程大致分4个阶段：汤生（Townsend）放电阶段—空心阴极阶段—超发射阶段（或大电流阶段）和电弧—介质恢复阶段。

在汤生放电阶段，由于电子的平均自由行程较长，故放电沿着极间最长路径发生。电极的结构形成的电场分布使得电子在阴极内经过的路程变长，增加了孔内的电离，同时电离产生的电子在轴向电场作用下很快被引出，在奔向阳极过程中电离产生大量的正离子，正离子向阴极孔运动。由于电子的扩散速率大于离子的扩散速率，结果在阴极孔内形成正离子积累，产生强烈的正空间电荷区，形成所谓虚阳极。在阴极之间形成强电场区域，使电离增加，同时正离子轰击阴极内表面，产生二次电子发射，使电流急剧上升，形成所谓超发射阶段，其后电流继续升高，由放电产生的热效应而转入金属蒸气电弧阶段。

伪火花开关与触发真空开关、闸流管及引燃管等相比，在开关的通流能力、电流

上升率、寿命、触发和抖动方面都有了较大改善，这是伪火花开关的最大优点之一。但现有的伪火花开关耐受电压还比较低，需要研究提高伪火花开关耐受电压的方法。

1.3.3 断路开关

电感储能中对断路开关的性能要求为导电性良好；能流过大电流、阻断电流时阻抗变化大、电流阻断后具有大的阻抗、不会因电流阻断时产生的高电压而遭到破坏和能够快速返回到工作前的状态。

完全满足以上条件的开关虽然不存在，但是为了充分发挥电感储能重量轻、压缩型存储方式最大优点的断路开关却是可能的。电流阻断时，开关两端产生的电压 U_L 为

$$U_L = RI = -L_0 \frac{dI}{dt} \quad (1-6)$$

式中， R 为开关的阻抗； L_0 为从开关侧看到的电源的等效电感。

下面介绍几种常见的断路开关。

1. 熔丝

虽然熔丝在重复工作上存在问题，但是为了能够轻易快速阻断大的电流，在基础实验中仍然经常使用它。从电流经过熔丝开始到电流被阻断的这段导通时间取决于熔丝的材质，形状和周围媒介。当熔丝中流过大电流时，由于焦耳热会使熔丝熔化变为液体和气体，而断路开关在汽化时阻抗变化很大，这个机理在脉冲功率的产生中得以利用。

汽化后的蒸气和冲击波一起膨胀，由于随着密度的减少容易产生绝缘破坏，为了抑制膨胀，用水作为周围媒介，水中可以熔断熔丝。图 1-9 是断开负载时的典型输出波形。当流过熔丝的电流随着熔丝阻抗变化而不断减小时，就产生了电感电压。图 1-10 所示的是熔丝长度和输出电压的关系，由图可以看出，存在一个最合适的熔丝长度。在熔丝比较短的情况下，汽化后铜蒸气通道的绝缘破坏电压限制了输出电压。

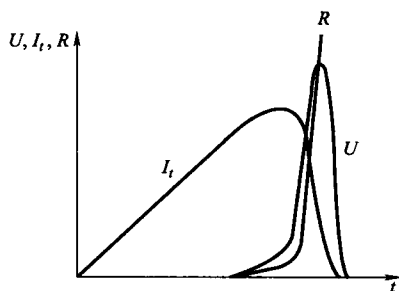


图 1-9 断开负载时的电流 I_L 、电压 U 和熔丝阻抗 R 曲线

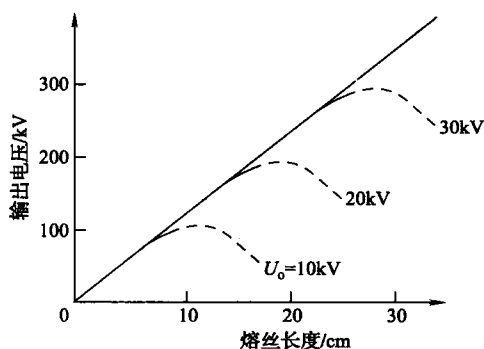


图 1-10 使用熔丝时输出电压与熔丝长度的关系