

实用

曾正中 编著

脉冲功率技术

引论

SHI
YONG
MAI
CHONG
GONG
LU
JI
SHU
YIN
LUN

陕西科学技术出版社

实用脉冲功率技术引论

曾正中 编著

陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

实用脉冲功率技术引论/曾正中编著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2003. 9

ISBN 7-5369-3688-5

I. 实... II. 曾... III. 高电压—大功率—脉冲技术 N. TN78

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 079666 号

出版者 陕西科学技术出版社

西安北大街 131 号 邮编 710003

电话(029)7211894 传真(029)7218236

网址 <http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社

电话(029)7212206 7260001

印刷 西安地质矿产研究所印刷厂

规格 880 mm×1230 mm 32 开本

印张 9

字数 220 千字

印数 1—2 000

版次 2003 年 9 月第 1 版

2003 年 9 月第 1 次印刷

定价 30.00 元



版权所有 翻印必究

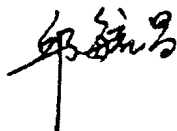
(如有印装质量问题,请与我社发行部联系调换)

序 言

脉冲功率技术是从 20 世纪 60 年代发展起来的一个多学科交叉融合的新兴技术领域。1976 年在美国召开了电气与电子工程师学会 (IEEE) 第一届国际脉冲功率技术会议。1979 年第二届会议后至今改为每两年举行一次,已成为一个重要的系列国际会议,这标志着脉冲功率技术的蓬勃发展,其应用已从军事领域扩展到民用工业。我国从 20 世纪 70 年代中期开始研究脉冲功率技术在核武器辐射效应模拟方面的应用,目前这一技术已成为我国国防高技术研究领域的支撑技术之一,并逐步扩展到新兴技术产业。

由于脉冲功率技术领域的科技人员工作特点不尽相同,他们十分盼望有一些侧重不同方面而各具特色的脉冲功率技术方面的专著,以便工作中参考。西北核技术研究所研究员曾正中博士编著的《实用脉冲功率技术引论》就是这样一本具有特色的著作。作者以多年从事脉冲功率技术研究的成果及心得为基础,对所涉及的脉冲功率技术方面的基本和共性问题进行了比较新颖、系统、实用的提炼、阐述和诠释,相信此书对有关科技人员、研究生以及大学本科高年级学生具有较高的参考价值。

西北核技术研究所是国内较早开展脉冲功率技术研究和应用的单位之一,拥有一支很有实力的脉冲功率技术科研队伍,在该所诞生 40 周年之际,我祝愿作者及所在单位为我国脉冲功率技术的发展做出更大的贡献。



(IEEE 会士)

2003 年 8 月 18 日于

西安交通大学电气工程学院高电压技术教研室

前 言

我 1982 年从清华大学工程物理系反应堆工程专业毕业来到西北核技术研究所并分配到邱爱慈院士领导的“闪光二号”加速器研制课题组，由此开始脉冲功率技术方面的科研工作至今。因此，本书涉及的一些研究内容是在邱院士的指导或关心下提出并完成的，在此向邱院士表示衷心的感谢。

同时，书中涉及的实验工作是与我的同事和研究生共同完成的，这从书后引用的参考文献中也可以清楚地看到，在此向他们表示衷心的感谢。

西北核技术研究所领导以及机关领导和主管工作同志对本书的写作和出版给予了很大支持。

脉冲功率技术是一个十分广阔的领域，本书涉及的内容只是脉冲功率技术海洋的一朵浪花。在阅读本书时若能与其他专著有机结合，定能获得较大收益。

衷心希望同行对书中可能发现的缺点、错误予以指正。

曾正中

2003 年 8 月 20 日于西安

目 录

1 概论	(1)
1.1 脉冲功率技术的概念.....	(1)
1.2 电容储能与电感储能.....	(2)
1.3 电容、电感混合储能.....	(5)
1.4 多路并联脉冲功率装置.....	(7)
1.5 脉冲功率技术的关键问题.....	(7)
2 初级储能与脉冲产生	(10)
2.1 Marx 发生器	(10)
2.1.1 电容器.....	(13)
2.1.2 气体火花开关.....	(14)
2.1.3 电阻器.....	(35)
2.1.4 连接导体.....	(36)
2.1.5 触发方式.....	(37)
2.1.6 变压器油.....	(37)
2.1.7 高压绝缘结构部件.....	(38)
2.1.8 Marx 发生器的调试	(38)
2.2 直线型脉冲变压器.....	(40)
2.2.1 结构原理.....	(40)
2.2.2 电路原理.....	(41)
2.2.3 等效电路.....	(42)
2.2.4 磁芯饱和.....	(44)
2.2.5 磁芯的反向磁化处理.....	(47)
3 脉冲压缩	(48)
3.1 电容型脉冲储能器与液体传输线.....	(48)
3.1.1 传输线的基本分析方法.....	(48)
3.1.2 油、水介质传输线.....	(56)

3.2	高功率闭合开关	(59)
3.2.1	影响开关放电脉冲前沿的主要因素	(60)
3.2.2	高压脉冲开关的击穿电压	(62)
3.2.3	高压脉冲开关的上升时间	(65)
3.2.4	多通道开关的上升时间与抖动	(67)
3.3	电感型脉冲储能器与真空传输线	(69)
3.3.1	真空传输线电感	(69)
3.3.2	线圈电感	(70)
3.4	高功率断路开关	(70)
3.4.1	等离子体断路开关	(71)
3.4.2	电爆炸导体断路开关	(87)
3.5	预脉冲	(89)
3.6	电磁脉冲模拟器	(91)
4	高功率负载	(95)
4.1	二极管的基本构型与绝缘	(95)
4.2	二极管物理研究简况	(96)
4.3	关于 Aspect Ratio 的约定	(97)
4.4	蔡尔德-朗缪尔定律	(97)
4.5	蔡尔德-朗缪尔定律的相对论形式	(99)
4.6	电子-离子双极流	(102)
4.6.1	相对论情况	(102)
4.6.2	非相对论情况	(104)
4.7	电子束自磁箍缩条件与临界箍缩电流	(104)
4.8	外施纵向磁场的强度判据式	(106)
4.9	强箍缩电子束的“顺势流”解	(107)
4.10	聚焦流/层流模型	(110)
4.11	磁绝缘	(112)
4.12	预脉冲的影响	(114)

4.13	利用 POS 驱动的二极管	(116)
4.14	Z-Pinch 负载	(117)
4.14.1	0-维模型	(117)
4.14.2	初始参数定标常数	(121)
4.14.3	最大内爆动能的定标关系	(129)
4.14.4	定标关系与实验的比较	(131)
4.14.5	电流波形的影响	(132)
4.14.6	不完全 Z-pinch	(132)
4.14.7	重负载 Z-pinch	(134)
4.15	同轴圆筒二极管	(134)
4.15.1	相对论一维电压-电流关系近似解	(135)
4.15.2	相对论一维电压-电流关系数值解	(138)
4.15.3	解的比较	(138)
4.15.4	一维相对论解的有效性	(139)
4.15.5	离子流对二极管电流的影响	(143)
4.16	一些二极管实验与理论比较	(145)
4.16.1	高阻抗电子束二极管 (一)	(145)
4.16.2	高阻抗电子束二极管 (二)	(145)
4.16.3	中等阻抗电子束二极管	(145)
4.16.4	低阻抗电子束二极管 (一)	(146)
4.16.5	低阻抗电子束二极管 (二)	(146)
4.16.6	POS-高阻抗电子束二极管 (一)	(146)
4.16.7	POS-高阻抗电子束二极管 (二)	(146)
5	纳秒级高电压大电流脉冲测量	(147)
5.1	电阻分压器	(148)
5.1.1	电阻分压器的响应分析	(149)
5.1.2	两级电阻分压器	(151)
5.1.3	一级电阻分压器	(152)

5.2	电容分压器	(157)
5.3	电磁感应线圈	(161)
5.3.1	罗可夫斯基线圈	(161)
5.3.2	微分环和积分环	(165)
5.4	小电阻测流器	(167)
5.5	标定脉冲源	(168)
5.6	标定系统与实验要点	(170)
5.6.1	电阻分压器标定的桥式脉冲馈送电路	(171)
5.6.2	罗可夫斯基线圈标定用盘式 TEM 小室	(180)
5.6.3	标定规范性问题	(181)
6	脉冲功率技术的一些数值模拟	(187)
6.1	电路模拟	(187)
6.1.1	POS 的电路模拟	(188)
6.1.2	闭合开关的电路模拟	(204)
6.1.3	Blumlein 传输线的模拟	(205)
6.1.4	脉冲变压器的电路模拟	(206)
6.1.5	磁开关的电路模拟	(213)
6.2	POS 的粒子模拟	(213)
6.2.1	POS 粒子模拟的基本方法	(214)
6.2.2	模拟问题的典型化和计算条件设定	(218)
6.2.3	模拟结果及讨论	(220)
6.2.4	临界工作电压	(224)
6.3	含噪信号的软件滤波	(227)
	后记 关于重复率脉冲功率技术	(230)
	附录 A 一些 Pspice 电路模拟示例	(231)
	附录 B 气体火花开关静态稳定性分析程序	(253)
	附录 C 非相对论二极管电压-电流关系的标度解法	(262)
	参考文献	(267)

1 概论

1.1 脉冲功率技术的概念

脉冲功率技术(pulsed power technology)所涉及的技术领域宽,发展迅速,应用领域日益广阔,因而难以为它下一个确切的定义。从它区别于其他能源、动力技术的基本特征看,脉冲功率技术是一种以较低的功率(电压、电流)储存电场(磁场)能量,将其以高得多的功率(电压、电流)变换为脉冲电磁能量并释放到特定负载中去的电物理技术,也是纳秒脉冲电子学(20世纪50年代开始发育),通用高电压技术以及应用物理学相结合的产物。

这里尝试对脉冲功率技术的范围给出一个定量的说明。分别以 P_{\max} , V_{\max} , I_{\max} , t_r 表示脉冲的功率容量、峰值电压、峰值电流、上升时间,则脉冲功率技术可以表述为满足条件

$$K_{pr} = \frac{P_{\max}}{t_r} = \frac{V_{\max} I_{\max}}{t_r} > 10^{15} \text{ W/s}$$

的电物理技术(包括器件和装置技术)。 K_{pr} 的含义是功率增长率,表示器件或装置提供一定功率的快慢程度。

例如,世界最大的发电站电功率约为 10^{10} W 量级,这一功率已经高于小型脉冲功率装置的水平,若频率为 50 Hz,则有

$$K_{pr} = \frac{P_{\max}}{t_r} = \frac{10^{10}}{5 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^{12} \text{ (W/s)}$$

这远远低于脉冲功率装置所能达到的功率增长率。

又如,纳秒脉冲电子学常用的汞润开关脉冲源输出脉冲幅值为 500 V 左右,前沿约为 1 ns,若匹配阻抗为 50 Ω ,则

$$K_{pr} = \frac{P_{\max}}{t_r} = \frac{500^2}{50 \times 1 \times 10^{-9}} = 5 \times 10^{12} \text{ (W/s)}$$

这也远小于脉冲功率技术的功率增长率。但如果某种脉冲源幅值达到 10 kV 而其他条件不变,则它也被认为进入脉冲功率装置的范畴了(参见第 5 章)。

再如,对高电压实验室常用的气体火花开关,取电压 100 kV、电流 5 kA、上升时间 $1.5 \mu\text{s}$,则

$$K_{pr} = \frac{P_{\max}}{t_r} = \frac{100 \times 10^3 \times 5 \times 10^3}{1.5 \times 10^{-6}} \approx 3.3 \times 10^{14} (\text{W/s})$$

它已很接近脉冲功率技术需要的功率增长率,如果将电流提高到 50 kA 以上,就成为标准的脉冲功率装置的常用器件了。

现代大型和巨型脉冲功率装置的功率增长率已达到 $10^{18} \sim 10^{20} \text{ W/s}$,拟建装置将达到 10^{21} W/s 。

脉冲功率技术是以 20 世纪 60 年代英国原子武器研究中心(AWRE)的马丁(J C Martin)领导的研究小组,基于经典的 Marx 发生器技术,发明用于核武器强脉冲 γ 射线辐射效应模拟的高压脉冲传输线型强流脉冲电子束加速器为标志而迅速发展起来的。经过近 40 年的发展,脉冲功率技术的研究内容和应用目的已经大大超越了核武器辐射效应模拟的范围,成为强脉冲辐射物理、高能密度物理、受控核聚变物理研究的支撑技术,并且在新兴、高新技术产业(如环境保护、辐射消毒、辐射刻蚀)以及高新技术武器(如强脉冲激光、高功率微波、电磁脉冲武器)等方面发挥着日益重要的作用。

1.2 电容储能与电感储能

前面关于脉冲功率技术的简单说明涉及三个方面的技术系统,即低功率(电压、电流)下的电场(磁场)储能系统(初级储能与脉冲产生系统),由低功率(电压、电流)获得高功率(电压、电流)的变换系统(脉冲压缩系统),高功率负载(二极管)系统,它们是构成脉冲功率装置的三大基本组成部分。

根据不同的储能类型,脉冲功率装置又可分为电容储能型、电感储能型和混合储能型。图 1-1 给出了电容储能型和电感储能型脉冲功率装置的原理电路。当储能电容上的电压达到峰值时,闭合开关(先断后通)接通,电容向负载放能;当电感中的电流达到峰值时,断路开关(先通后断)断路,电感向负载放能。

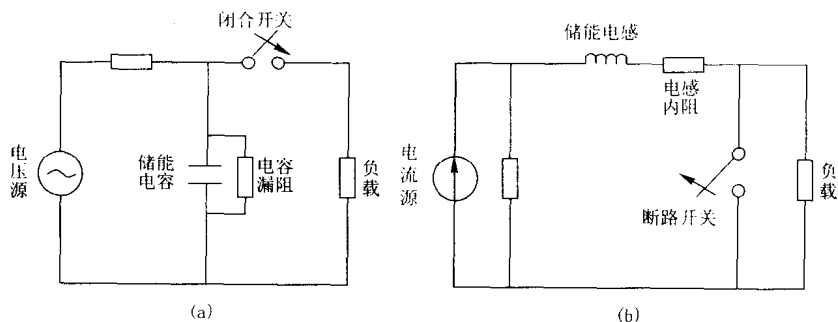


图 1-1 电容储能与电感储能的原理电路

(a) 电容储能与闭合开关系统充放电原理电路

(b) 电感储能与断路开关系统充放电原理电路

图 1-1 中,电压源既可以是高压直流电源,也可以是并联充电后经由大量气体开关串连放电的 Marx 发生器(冲击电压发生器)以及脉冲变压器、脉冲发电机、脉冲传输线等;电流源一般是并联电容器组(冲击电流发生器)、脉冲变压器、脉冲发电机、脉冲传输线等。图中的储能电容通常是电容器组或介质传输线,电感通常是线圈或真空传输线。

目前由于长传导时间高功率断路开关技术相对于高功率闭合开关的水平滞后较多,因此,完全避免使用电容型电源的高功率电感储能技术尚未实现。

图 1-2 给出了一个电容储能型多级传输线-闭合开关脉冲功率装置的原理结构。图 1-3 是一台采用水介质传输线的电容储能

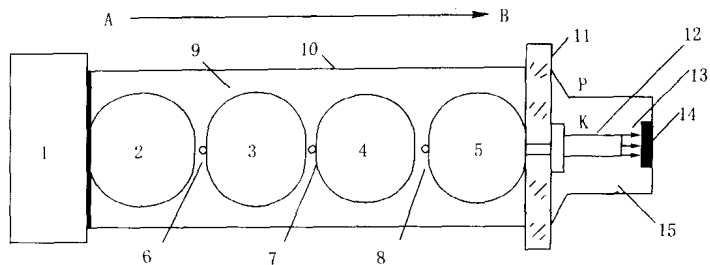


图 1-2 电容储能型多级压缩脉冲功率装置原理结构

1-高能密度低电感 Marx 发生器;2,3,4,5-同轴传输线型电容器(内导体);6,7,8-水介质闭合开关;9-去离子水;10-传输线外导体;11-绝缘子;12-二极管阴极;13-电子束;14-二极管阳极;15-电子束二极管;
A→B:能量传输方向

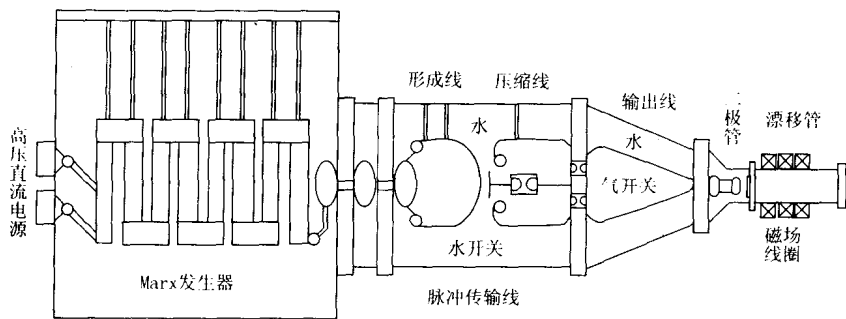


图 1-3 一台强流脉冲电子束加速器的原理结构示意图

型强流脉冲电子束加速器的原理结构示意图。

图 1-2 所示的脉冲功率装置的大致工作原理是:当 Marx 发生器充电完毕,其内的气体开关受控顺序击穿,从而在微秒量级时间内将全部电容器串联起来向传输线 2 放电;当该传输线充电到峰值时开关 6 受控击穿或自击穿,继续向传输线 3 放电;之后开关 7,8 相继击穿,最终形成幅值为兆伏级、前沿为 20~30 ns、半高宽为几十纳秒的高压脉冲施加于冷阴极二极管上,产生高功率相对

论性电子束,直接用于物理实验或者通过适当方式转换为高强度韧致辐射以及微波、激光辐射等。

图 1-3 装置的工作原理与图 1-2 装置基本相同,只是采用了水和气两种不同的开关,传输线、开关的数量、结构及工作参数等不同。

图 1-4 是西北核技术研究所研制的 1 MA 级强流脉冲相对论性电子束加速器(“闪光二号”)的外观照片,其原理结构与图 1-3 相似。



图 1-4 1 MA 强流脉冲相对论电子束加速器
(“闪光二号”提供)

1.3 电容、电感混合储能

电容储能与闭合开关技术的一个显著缺点是,由于开关的电容耦合(双线例外),在最终需要的高电压脉冲(主脉冲)到达负载之前,负载上就产生了虽幅度较低但作用时间较长的电压脉冲(预脉冲),使负载产生不稳定性。如为抑制预脉冲而增加传输线和开关的数量,则系统可靠性会大大降低,而且过于庞大、造价过高。

为了克服预脉冲带来的严重影响,20世纪70年代发明了电容储能系统中插入电感储能与等离子体断路开关的技术,实质上是一种混合储能系统。图1-5是这种系统的原理示意。采用这种技术不但消除了预脉冲,而且还使脉冲的前沿变陡、功率提高。

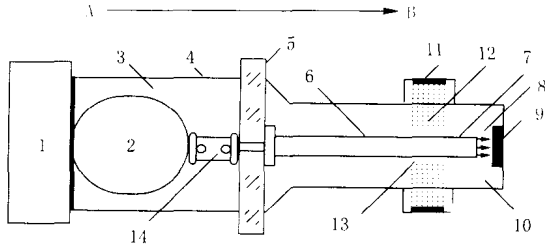


图 1-5 电容、电感混合储能型两级压缩脉冲功率装置原理结构

1-高能密度低电感 Marx 发生器;2-同轴传输线型电容器(内导体);
3-去离子水;4-传输线外导体;5-绝缘子;6-同轴传输线型真空电感器
(内导体);7-二极管阴极;8-电子束;9-二极管阳极;10-电子束二极
管;11-等离子体源;12-等离子体;13-等离子体断路开关;14-气体闭
合开关;A→B:能量传输方向

图 1-5 所示装置的大致工作原理是:当 Marx 发生器充电完毕,其内的气体开关受控顺序击穿使全部电容器串联向传输线 2 放电;当该传输线充电到峰值时,气体开关 14 击穿,向同轴真空传输线电感 6 放电;当通过传输线电感和等离子体断路开关 13 的电流达到峰值时,开关 13 快速断路,由于传输线电感的存在,电子束二极管上得到幅值为几兆伏、前沿为 10 ns 左右、半高宽为几十纳秒的高压脉冲,产生高功率相对论性电子束。

国际上正在设计建造的很多大型脉冲功率装置都采用混合储能技术,其中电感储能部分仍然由 Marx 发生器、直线型脉冲变压器这类电容储能型系统作为脉冲驱动电源。

1.4 多路并联脉冲功率装置

脉冲功率技术的发展趋势之一是建造几百太瓦级高功率和 100 MA 级大电流的巨型脉冲功率系统,而单台脉冲功率装置的技术水平只能达到太瓦级功率和兆安级电流,因此几十、上百台装置精确同步并联工作将成为巨型脉冲功率装置的基本特点和要求。作为实例,美国 Sandia 国家实验室的“Z”装置是已经成功运行的 36 路(每路约 0.5 MA)超大型脉冲功率装置,总储能 3 MJ,电功率 50 TW,总输出电流 18 MA,脉冲前沿 100 ns,用于驱动“Z 箍缩(Z-pinch)”等离子体辐射负载时得到的 X 光辐射总能量为 1.8 MJ,辐射功率达到 300 TW,用于辐射效应和聚变物理研究;美国 Los Alamos 国家实验室建造的“Atlas”脉冲功率装置,总储能为 36 MJ,总电流为 50 MA,上升时间 5 μ s,可分为 38 路或 19 路并联运行,每路 Marx 发生器电压为 240 kV 或 480 kV,用于高速冲击和材料物理研究;俄罗斯也建造了 16 路的“GIT-16”Z-pinch 研究装置。

1.5 脉冲功率技术的关键问题

前面谈到脉冲功率装置由初级储能与脉冲产生系统、脉冲压缩系统和高功率负载系统三大部分组成。

目前,单次脉冲初级储能与脉冲产生系统的主流技术还是低电感高能密度 Marx 发生器技术,正在积极发展的很有潜力的技术是真空绝缘直线型脉冲变压器技术。Marx 发生器和直线型脉冲变压器都采用大量的电容器(单台装置几十到几百个,全系统成千上万个)和气体开关(略少于电容器数)作为主要部件,而气体开关则是这类设备的关键部件。不仅单个气体开关的性能对发生器和变压器的性能有重要影响,而且大量开关的集体行为也显著制约着发生器和变压器的性能。因此,直流高压开关技术在初级储能

系统中占有很重要的地位。

脉冲压缩系统现在主要有三大类型,一种是介质传输线电容储能型,主要包括高阻抗型变压器油传输线和低阻抗型介质传输线,与油、水、气体开关配合使用;另一种是介质传输线电容储能(前级)与真空传输线电感储能(后级)混合型,与各种闭合开关和等离子体断路开关等配合使用;还有一种是真空磁绝缘传输线型,由低电感 Marx 发生器或直线型脉冲变压器驱动,多路并联工作,其后直接接负载或经过陡化开关后接负载。在一些特殊应用情况下,还有采用线圈电感储能与电爆炸导体断路开关结合使用的技术。因此,脉冲压缩系统的主要技术是高电压传输线、高功率闭合及断路开关以及磁绝缘传输线等。

高功率负载系统主要包括高、中、低阻抗的电子束二极管、离子束二极管以及等离子体辐射负载(如 Z-pinch)等,习惯上统称为“二极管”,它是最终获得高功率带电粒子束以及各类辐射的关键部件。

纳秒级高电压、大电流测量技术是脉冲功率技术不可分割的重要部分。尽管基本的测量原理不难掌握,但是由于具体测量问题的复杂性和被测脉冲电压、电流参数的极端性,给测量系统的设计、标定带来许多难点。

此外,脉冲功率装置的设计、调试、运行和维护也离不开数值模拟技术。因为脉冲功率装置的高消耗性和技术的复杂性、困难性而不允许有大的反复和事故,因此事先进行足够详细的数值模拟分析以寻求较好的解决方案是必不可少的工作。

综上所述,初级储能与脉冲产生技术、脉冲压缩技术、高功率负载技术、纳秒级高电压、大电流测量技术和数值模拟技术是脉冲功率技术研究的基本方面。

本书内容包括了作者在脉冲功率技术方面的部分工作及心得,讨论和分析了脉冲功率技术中上述五个方面的一些基本问题,