



北京市高等教育精品教材立项项目

# 脉冲功率技术基础

韩旻 邹晓兵 张贵新 编著

Han Min Zou Xiaobing Zhang Guixin

清华大学出版社



北京市高等教育精品教材立项项目

# 脉冲功率技术基础

韩旻 邹晓兵 张贵新 编著

Han Min Zou Xiaobing Zhang Guixin

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书主要介绍脉冲功率技术的基本原理及应用。内容包括能量的储存、高功率脉冲的产生、开关技术、绝缘、强流相对论二极管的结构和特性、脉冲功率装置中常用的检测与诊断技术、几种典型脉冲功率装置及其应用,以及脉冲功率技术的最新发展等。

本书可作为高等院校电气工程、工程物理、核聚变、强激光与高功率微波等专业高年级本科生和研究生相关课程的教材,也可供相关领域的科研和工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

脉冲功率技术基础/韩旻,邹晓兵,张贵新编著.--北京:清华大学出版社,2010.7  
ISBN 978-7-302-21942-2

I. ① 脉… II. ① 韩…② 邹…③ 张… III. ① 高电压—大功率—脉冲电路  
IV. ① TN78

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 017986 号

责任编辑:石磊 赵从棉

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969,c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015,zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:13.75 字 数:296 千字

版 次:2010 年 7 月第 1 版 印 次:2010 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00 元

产品编号:026607-01

# 第一作者简介

韩 旻 清华大学教授。1960年毕业于清华大学电机系。主要从事强电流脉冲放电技术、稠密等离子体焦点和 Z 箍缩(Z-Pinch)等离子体等学科的教学与科研工作。曾任清华大学气体放电与等离子体实验室主任(1983—1997年),北京市等离子体学会两届理事。先后为清华大学高年级本科生新开设选修课程“冲击大电流技术”(1983—1988年)“强流脉冲放电技术”(1989—1992年),为研究生新开设选修课程“脉冲功率技术基础”(1994—2002年),并编写了相关教材。作为指导教师指导硕士、博士研究生及博士后 20 余人。获清华大学教学工作优秀成果二等奖两项(1987年,1993年)。科研方面,获得国防科工委科技进步二等奖(第一完成人,1992年),获得国家教委科技进步二等奖(第二完成人,1988年)。作为项目负责人完成国家自然科学基金重点基金和自然科学基金、国家攻关项目子课题、国防预研基金、国家 863 基金、清华大学基础研究重点基金等十余项。在国内外发表论文 100 余篇。获国务院政府特殊津贴。是 IEEE 高级会员(Senior Member)。

脉冲功率技术是 20 世纪 60 年代发展起来的一门高新科技领域,是当代高科技的主要基础学科之一。脉冲功率技术是用较长时间储存能量,然后经过快速压缩、转换,最后将巨大的功率瞬时有效地释放给负载。应用脉冲功率技术可以获得非常大的瞬时功率,例如  $10^{14}$  W,这比全世界的发电量还要大 1~2 个量级。随着近代许多新兴科学技术的发展,如可控热核聚变研究、新兴强激光、高能电子与粒子加速器、电磁脉冲、新武器研究等方面的应用,脉冲功率技术得到快速发展。特别是近来脉冲功率在民用方面也取得了较大的发展,如在能源、烟气净化、环境科学、医疗和生物工程等领域都取得了可喜的进展。目前对脉冲功率技术的要求越来越高,即不但要求高电压(如几十兆伏)、大电流(如几百千安到几十兆安),而且要求快脉冲(如纳秒、亚纳秒)和重复频率运行等。由于脉冲功率技术无论在军事上或民用上都具有广阔的发展前景,因此受到了越来越广泛的关注。1976 年在美国召开了第一届 IEEE 国际脉冲功率技术会议(IEEE International Conference on Pulsed Power Technology),1979 年在美国又召开了第二次会议,以后定期每两年召开一次会议,至今已召开了第 17 届脉冲功率技术会议。同时,在其他相关学科的学术会议上,“脉冲功率技术”的内容也被列为主要内容之一,如高功率粒子束国际会议(International Conference on High-Power Particle Beams)、IEEE 国际功率调制讨论会(IEEE International Power Modulator Symposium)等。

我国脉冲功率技术主要是与可控核聚变研究、电子束与粒子束加速器、新兴强激光等重大科学技术项目和国防的需要紧密结合而发展起来的。中国工程物理研究院(简称中物院)建成了 6MeV “闪光-I 号”高阻抗强流相对论电子束加速器、20MeV 感应直线加速器;西北核技术研究所建成了 0.9MV、0.9MA “闪光-II 号”低阻抗相对论加速器;中物院和中国科学院上海光学精密机械研究所建成了用于激光核聚变研究的“神光二号”装置;中国科学院合肥等离子体所建成了超导 Tokmak 磁约束聚变研究装置等。自 20 世纪 70 年代起,清华大学气体放电与等离子体实验室在杨津基教授带领下开展了等离子体焦点与脉冲功率技术领域的研究工作,20 世纪 80 年代与西北核技术研究所合作建成了当时亚洲最大的等离子体焦点装置。这些都标志着我国在脉冲功率技术领域取得了一定的成果。相信在国家的大力支持下,脉冲功率技术必将取得更大进展。

第一作者韩旻教授自1983—2002年为清华大学研究生和高年级学生先后讲授了“冲击大电流技术”、“强电流脉冲放电技术”、“脉冲功率技术基础”等课程。在讲授过程中曾先后3次编写了讲义(教材,约50万字)。这本教材就是在此基础上并结合相关科研实践编写的。本书除重点讲述有关脉冲功率技术的基本概念和基础知识、脉冲功率装置及应用外,还简要介绍新近该领域一些新的发展。

本书由韩旻教授主编,她编写了本书大部分内容,邹晓兵副教授编写了第6章和第7章的7.2节和7.6节,张贵新副教授编写了第7章的7.5节。

本书的编写要感谢杨津基教授、白秀庭教授;感谢中国工程物理研究院、西北核技术研究所与我们合作的同志们;感谢罗承沐教授、王新新教授、张贵新副教授、邹晓兵副教授,以及实验室历届博士后、博士、硕士研究生们,感谢他们在脉冲功率技术及等离子体研究方面所做的贡献,并为本书的编写提供了有意义的资料。在此还要感谢中国原子能科学院的曾乃工研究员、清华大学电机系的高玉明教授,他们对书稿进行了认真的审阅,提出了许多宝贵意见。最后,要特别感谢罗海云博士生和杨振清副教授,他们对本书的编排和校核等做了大量的工作。

书中难免存在不妥甚至错误之处,衷心希望广大读者批评指正。

韩 旻

2010年4月于清华园

# 符 号 表

<b>A</b>	矢量磁位; 矢量面积元	$I_m, I_{max}$	电流最大值
<b>A</b>	面积; 原子量; 阳极	<b>J</b>	电流密度; 射线强度; 贝塞尔函数
<b>B, B</b>	磁感应强度	<b>j</b>	电流密度
<b>C</b>	电容; 常数; 阴极	<b>j</b>	虚数单位, $\sqrt{-1}$
$C_m$	Marx 发生器串联电容	<b>K</b>	克尔常数; 开关放电时欠压比; 阴极
$C_B$	传输线电容	<b>k</b>	玻尔兹曼常量; 耦合系数; 阻尼系数; 迁移率; 衰减系数
$C_L$	负载电容	<b>L</b>	电感
<b>c</b>	光速; 比热容	<b>l</b>	长度
<b>D, D</b>	电位移矢量, 电子扩散系数	$L_c$	充电电感
<b>d</b>	间隙距离	$L_s$	漏电感
<b>E, E</b>	电场	$L_L$	负载电感
<b>E</b>	能量	<b>M</b>	互感系数
$E_b$	击穿场强	<b>m</b>	工作系数; 粒子质量
<b>e</b>	基元电荷	$m_0$	粒子静止质量
<b>F, F</b>	力	$m_e$	电子质量
<b>f</b>	频率; 焦距	$m_i$	离子质量
<b>G</b>	电导率; 增益; 重力加速度	<b>N</b>	单位长度电子数目; 通道数目; 粒子总数; 开关电压工作范围
<b>G</b>	气体火花间隙	<b>n</b>	单位体积内的原子数; 磁场对数梯度
<b>H, H</b>	磁场强度	$n_e$	电子密度
<b>h</b>	高度; 厚度; 普朗克常数	$n_i$	离子密度
$I, i$	电流	<b>P</b>	功率
$I_e$	电子电流	<b>p</b>	气压; 动量; 拉氏算符
$I_i$	离子电流	<b>Q</b>	电荷; 热量
$I_a$	阳极电流; 阿尔文电流		
$I_c$	阴极电流		
$I_{cr}$	临界电流		

$q$	电荷	$\gamma$	相对论性能量因子; 二次电子发射系数
$R$	电阻	$\delta$	$\delta$ 函数; 阻尼系数; 趋肤深度; 解吸附系数(detachment coefficient)
$R_L$	负载电阻; 二极管电阻	$\sigma$	电导率; 反应截面; 电荷面密度
$R$	半径	$\eta$	效率; 电子吸附系数
$S$	坡印廷矢量	$\varepsilon$	介电常数
$S$	开关	$\varepsilon_0$	真空介电常数
$S$	截面; 电极距离	$\varepsilon_r$	相对介电常数
$T$	周期; 温度; 渡越时间; 传输系数	$\lambda$	波长; 尺寸因子; 平均自由程; 热传导系数
$t$	时间	$\mu$	磁导率
$t_r$	脉冲上升时间	$\mu_0$	真空磁导率
$t_p$	脉冲宽度	$\mu_r$	相对磁导率
$t_m$	脉冲峰值对应时间	$\nu$	频率
$U, u$	电压	$\rho$	电荷体密度; 反射系数; 体电阻率
$U_a, U_{app}$	施加电压	$\tau$	时间常数; 时延
$U_b$	击穿电压	$\tau_d$	放电时延
$U_t, U_{tr}$	触发电压	$\tau_j$	放电时延分散性
$U_{st}$	开关静态击穿电压	$\Phi$	磁通量
$V$	电位(电势); 体积; Verdet 常数	$\varphi$	电位; 功函数; 相位
$v$	波速度	$\theta$	偏角; 散角; 透射系数; 相位角
$W$	能量; 宽度; 或然率	$\psi$	磁通链; 位移
$W_{in}$	动能	$\omega$	角频率
$x, y, z$	直角坐标	$\omega_c$	回旋频率
$Z$	特性阻抗; 原子序数	$\omega_L$	拉摩尔频率
$Z_B$	Blumlein 线特性阻抗	$\omega_p$	等离子体频率
$Z_L$	负载特性阻抗		
$\alpha$	衰减因子; 汤森第一电离系数		
$\beta$	相对论性速度因子 $v/c$ ; 过电压系数; 场增强因子		



<b>第 1 章 脉冲功率技术概述</b> .....	1
1.1 什么是脉冲功率技术 .....	1
1.2 脉冲功率技术的发展 .....	2
1.3 脉冲功率系统的基本组成与应用 .....	3
参考文献.....	3
<b>第 2 章 能量的储存</b> .....	5
2.1 概述 .....	5
2.2 电容储能及脉冲电容器 .....	6
2.2.1 电容储能.....	6
2.2.2 脉冲电容器.....	7
2.2.3 Marx 发生器储能系统 .....	9
2.3 电感储能.....	11
2.3.1 工作原理 .....	11
2.3.2 人工过零技术 .....	12
2.4 机械储能.....	13
2.4.1 脉冲发电机组 .....	13
2.4.2 单极发电机 .....	15
2.5 化学能.....	16
2.5.1 蓄电池 .....	16
2.5.2 爆磁压缩发生器 .....	17
参考文献 .....	19
<b>第 3 章 高功率脉冲的产生</b> .....	20
3.1 概述.....	20

3.2	大容量电容器组并联运行	21
3.2.1	多台电容器并联运行	21
3.2.2	放电回路分析	22
3.2.3	用于电力部门的冲击电流发生器简介	27
3.2.4	开关并联运行的条件	28
3.3	Marx 发生器	30
3.3.1	用于脉冲功率技术领域的 Marx 发生器	30
3.3.2	Marx 发生器-陡化电容器电路	35
3.4	单传输线	37
3.4.1	电磁波在均匀无损线上的传播	37
3.4.2	单传输线型高压脉冲形成线	41
3.5	Blumlein 传输线	45
3.5.1	同轴 Blumlein 传输线的工作原理	45
3.5.2	Marx 发生器对 Blumlein 传输线充电时的电压和能量传输效率	51
3.5.3	Blumlein 传输线放电时负载上电压波形	57
3.5.4	Blumlein 传输线对负载的能量传输效率	63
	参考文献	64
<b>第 4 章</b>	<b>开关技术</b>	<b>65</b>
4.1	概述	65
4.1.1	开关的主要特性参数	66
4.1.2	开关的触发系统	70
4.2	气体开关	71
4.2.1	三电极开关	72
4.2.2	电场畸变火花开关	74
4.2.3	多弧道开关	79
4.2.4	激光触发气体开关	82
4.3	固体开关	84
4.3.1	固体薄膜多通道开关	84
4.3.2	磁开关	84
4.3.3	光导半导体开关	88
4.3.4	高功率重复频率半导体固态开关	90
4.4	液体开关	92
4.5	开断开关简介	94
4.5.1	开断开关	94

4.5.2 等离子体断路器 .....	95
4.6 灭火花开关 .....	98
4.6.1 工作原理 .....	98
4.6.2 灭火花开关举例 .....	99
参考文献 .....	100
<b>第5章 电介质的绝缘特性</b> .....	<b>101</b>
5.1 引言 .....	101
5.2 气体绝缘 .....	102
5.2.1 静态电压下气体电介质的绝缘强度 .....	103
5.2.2 脉冲电压下气体介质的击穿特性 .....	106
5.3 液体绝缘 .....	107
5.3.1 液体绝缘介质中的实用公式 .....	107
5.3.2 几种常用的液体绝缘介质 .....	108
5.4 固体绝缘 .....	110
5.4.1 固体绝缘介质的几种击穿机制简述 .....	110
5.4.2 计算几种固体绝缘材料击穿场强的实用公式 .....	111
5.5 固体绝缘介质沿面闪络 .....	111
5.5.1 沿面闪络结构类型 .....	111
5.5.2 空气中纳秒脉冲电压下同轴电缆沿面闪络特性的试验研究 .....	113
5.5.3 真空沿面闪络的击穿机制 .....	117
5.5.4 纳秒脉冲下绝缘子真空沿面闪络特性试验研究举例 .....	119
参考文献 .....	123
<b>第6章 真空二极管</b> .....	<b>124</b>
6.1 真空二极管的构型与绝缘 .....	124
6.1.1 真空沿面绝缘设计原则 .....	125
6.1.2 真空磁绝缘 .....	127
6.2 二极管中电子束和离子束的物理机制及特性 .....	133
6.2.1 电子的发射过程 .....	133
6.2.2 高功率二极管中的电子流 .....	135
6.2.3 电子、离子双向流 .....	138
6.2.4 二极管上的预脉冲 .....	139
6.2.5 箍缩电子束二极管 .....	141
6.2.6 同轴径向二极管 .....	143



6.2.7 高功率离子束二极管	144
参考文献	146
<b>第7章 测量与诊断</b>	<b>147</b>
7.1 引言	147
7.2 用分流器测量脉冲大电流	148
7.2.1 基本原理	148
7.2.2 分流器的种类	149
7.2.3 分流器应用举例	150
7.3 Rogowski 电流测量线圈	151
7.3.1 电流测量线圈的基本原理	151
7.3.2 用 Rogowski 线圈测量冲击电流时的误差分析	154
7.4 用法拉第筒测量加速器二极管中强流电子束	158
7.4.1 法拉第筒的结构	158
7.4.2 法拉第筒同轴测量电阻阻值的标定	159
7.5 磁光电流测量装置	160
7.5.1 磁光效应	160
7.5.2 磁光式电流传感器原理与构成	161
7.5.3 磁光式电流传感器信号处理	162
7.6 用分压器测量脉冲高电压	165
7.6.1 电阻分压器	165
7.6.2 电容分压器	169
7.6.3 阻容分压器	171
7.7 脉冲功率技术中的诊断技术举例	171
7.7.1 X 射线总剂量测量	171
7.7.2 X 射线能谱范围	172
7.7.3 稠密等离子体焦点脉冲 X 射线源随时间的变化特性	174
7.7.4 X 射线针孔成像	174
7.7.5 激光差分干涉诊断	175
参考文献	176
<b>第8章 脉冲功率装置及其应用举例</b>	<b>177</b>
8.1 引言	177
8.2 相对论电子束(或离子束)加速器	178
8.2.1 加速器的组成	178

8.2.2 应用举例	178
8.3 高功率脉冲驱动的快速 Z 箍缩装置	181
8.4 直线感应加速器	183
8.5 高功率微波发生器	186
8.6 稠密等离子体焦点装置	188
8.6.1 等离子体焦点脉冲 X 射线源的应用举例	189
8.6.2 等离子体焦点脉冲中子源的应用举例	190
8.7 脉冲功率技术在环境保护中的应用	192
8.8 液电效应及其应用	194
8.8.1 液电效应	194
8.8.2 应用举例	195
8.9 重复频率脉冲功率装置	198
8.9.1 Tesla 变压器型重复频率加速器的应用	199
8.9.2 Tesla 变压器的工作原理	201
参考文献	204

# 脉冲功率技术概述

## 1.1 什么是脉冲功率技术

脉冲功率技术又称高功率脉冲技术,它是一个研究在相对较长的时间里把能量储存起来,然后经过快速压缩、转换,最后有效释放给负载的新兴科技领域。脉冲功率技术研究电参数范围一般是:电压  $10^3 \sim 10^7$  V, 电流  $10^3 \sim 10^7$  A, 脉冲宽度  $10^{-10} \sim 10^{-3}$  s, 脉冲功率大于  $10^6$  W。脉冲功率技术在技术上的特征是:高脉冲功率,短脉冲持续时间,高电压,大电流。目前世界上最大的单台脉冲功率装置是美国 Sandia 国家实验室的 PBFA-Z 加速器,它释放出的脉冲功率可达  $10^{14}$  W(100TW)量级,比全世界发电量的总功率大约高 1~2 个量级,它主要用于高功率脉冲驱动的快速 Z 箍缩研究。高功率脉冲装置也是高压设备的一种类型,但它又与一般高压设备不同,它属于高功率、强电流、短脉冲的一种特殊设备,这种设备提供的是一种暂态过程的物理量。

脉冲功率技术的研究内容主要是能量的储存、高功率脉冲的产生和应用。一般包括下列内容。

(1) 能量的储存:电容储能、电感储能、机械储能(脉冲发电机组、单极脉冲发电机等)、化学能储能(蓄电池、炸药等)。如何提高储能密度和高效率地把储存的能量传输给形成线,这是能量储存研究中的重要课题。

(2) 高功率脉冲的产生:用传输线方法获得高压纳秒级高功率脉冲,常用的是 Blumlein 传输线和单传输线技术、大容量电容器组并联放电技术、Marx 发生器及 Marx 陡化电容器技术以及如何获得更高功率的脉冲(如 1000TW),并高效率地把能量传输给负载。

(3) 开关技术:开关是脉冲功率装置中的关键器件之一。要求开关通流能力大、固有电感小、放电时延及其分散性小等。开关种类繁多,如:场畸变火花开关、多极多通道开关、激光开关、磁开关、光导半导体开关、水开关和等离子体断路开关等,主要研究开关的放电过程及物理特性。

(4) 脉冲功率装置及其相关技术: 作为负载的真空二极管、纳秒级高电压脉冲下介质的绝缘特性及相关的测量与诊断技术。

还应特别指出, 重复频率脉冲功率技术的研究也是当前的一个热点。

## 1.2 脉冲功率技术的发展

脉冲放电现象存在于大自然之中。人们对于脉冲放电的研究始于研究天然雷电现象的雷电特性, 以及它对输电线路、建筑物等的危害及其防护措施。这些研究其放电过程的时间一般是在毫秒或微秒的量级。1947年英国人 A. D. Blumlein 以专利的形式, 把传输线波的折反射原理用于脉冲形成线, 在纳秒脉冲放电方面取得了突破。20世纪60年代, 英国原子能武器研究中心的 J. C. Martin 领导的研究小组, 成功地将 Marx 发生器与 Blumlein 的专利结合起来, 建造了世界上第一台强流相对论电子束加速器 SMOG(3MV, 50kA, 30ns), 脉冲功率达到 TW( $10^{12}$ W)量级, 从而开创了高功率脉冲功率技术研究的新纪元。

脉冲功率技术的发展经历了几次重大突破。首先是 Blumlein 传输线的应用, 建成脉冲功率达到 TW 量级的强流相对论电子束加速器; 第二阶段是以“水”代替“油”, 发展了低阻抗强流电子束加速器, 脉冲功率达到了数十 TW 量级; 第三阶段是激光开关的应用, 实现了多台加速器并联运行, 脉冲功率达到 100TW; 当前正处于第四次突破口, 即发展重复频率脉冲功率技术。现在世界上脉冲功率技术正向着更高功率(500~1000TW)、更高电压( $10^7$ V)、更大电流( $10^7$ A)和高重复频率方向发展。

脉冲功率技术的发展主要是结合高新技术和国防建设的需求和研究而发展起来的。例如, 在核聚变的惯性约束聚变研究中, 一个直径为 1mm 的氘-氚靶丸要实现聚变反应, 要求在  $10^{-8}$ s 的时间内提供给靶丸 1MJ 的能量。即要求提供的脉冲功率达到  $10^{14}$ W。然而当今世界上最大的发电厂能提供的功率只是  $10^{10}$ W 量级, 这就要求人们寻找新的科学技术途径。这样就促进了脉冲功率技术的研究和发展。美国从 20 世纪 70 年代起, 以 Sandia、Los Alamos、Lawrence Livermore 三大国家实验室为主, 在脉冲功率技术领域一直代表着当时发展的方向, 是世界最高水平。另外, 俄、英、法、日、德等国也先后建成了为数众多的高功率脉冲装置。我国脉冲功率技术主要是与我国可控核聚变研究、电子束与粒子束加速器、新兴强激光等重大科学技术项目和国防的需要紧密结合而发展起来的。中国工程物理研究院建成的 6MeV“闪光-I”高阻抗强流相对论电子束加速器、20MeV 感应直线加速器, 西北核技术研究所建成的 0.9MV、0.9MA“闪光 II 号”低阻抗相对论加速器, 中物院和上海光机所建成的用于激光核聚变的“神光二号”装置, 中国科学院合肥等离子体所建成的超导托克马克(Tokmak)磁约束聚变研究装置, 中国原子能科学院研制的高功率准分子激光器, 清华大学电机系与西北核技术研究所共同建成的 DPF-200 等离子体焦点脉冲 X 射线源……这些都标志着我国在脉冲功率技术领域的研究方面已奠定了一定的基础。

### 1.3 脉冲功率系统的基本组成与应用

典型的脉冲功率系统的组成框图如图 1-1 所示。最基本的系统是由两部分组成：一部分是低功率水平的能量储存系统；另一部分是高功率脉冲的产生和有效传输到负载。人们在相对较长的时间内把低功率水平的电能储存起来，如电力系统提供的长时间连续运行的电能(相对脉冲功率放电)，对大容量电容器组充电。储存的能量通过脉冲放电得到高功率脉冲，再有效地释放给负载。

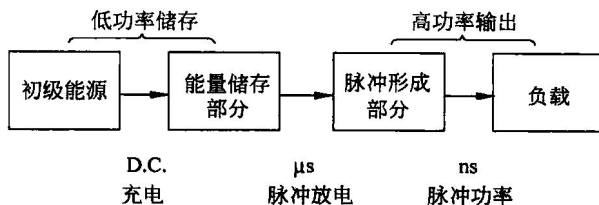


图 1-1 脉冲功率系统组成框图

已故著名科学家王淦昌院士曾指出：“高功率脉冲技术是当代高科技的主要基础学科之一。”脉冲功率技术的应用，过去和现在都主要是在高新科学技术领域和国防科研领域，例如：受控核聚变与等离子体物理研究(惯性约束聚变和磁约束聚变)、新兴强激光、核爆实验室模拟、高功率微波、电磁炮等。目前，脉冲功率技术的应用正逐渐发展到民用科技领域，如环境保护中处理烟气、用脉冲放电等离子体脱硫脱硝、生命科学中强脉冲电场(磁场)对人体的影响等，但这些研究工作正处于进行中。在脉冲功率装置中，由 Marx 发生器、脉冲形成线(Blumlein 传输线或单传输线)和二极管组成的系统应用最为典型和普遍。如强流相对论电子(或离子)束加速器，它广泛地应用于高新科技领域和国防建设。

### 参考文献

1. 王淦昌. 高功率粒子束及其应用. 强激光与粒子束, 1989, 1(1): 1~21
2. Martin T H, Guenther A H, Kristiansen M, et al. J C Martin on Pulsed Power. New York: Plenum Press, 1996
3. Pai S T, Zhang Q. Introduction to High Power Pulse Technology. Singapore: World Scientific, 1995
4. Blumlein A D. Electrical Network for Forming and Shaping Electrical Waves. US Patent, No. 2465840. March 29, 1949
5. Turman B N, Martin T H, Neau E L, et al. PBFA-II, A 100 TW Pulsed Power Driver for the Inertial Confinement Fusion. In: Rose M F, Turchi P J, ed. Proceedings of 5<sup>th</sup> IEEE International Pulsed Power Conference. Arlington, Virginia, USA, June 10~12, 1985: 155~161



6. 杨津基. 高温度高密度磁化等离子体. 北京: 科学出版社, 2000
7. (美)米勒 R B 著, 刘锡三, 张芝兰, 吴衍彬等译. 强流带电粒子束物理学导论. 北京: 原子能出版社, 1990
8. Deeney C, Douglas M R, Spielman R B, et al. Enhancement of a X-ray Power from a Z Pinch Using Nested Wire Arrays. *Physical Review Letters*, 1998, 81(22): 4883~4886
9. 清华大学电力系高电压技术专业. 冲击大电流技术. 北京: 科学出版社, 1978
10. Cooperstein G. Status of Particle Beam and Pulsed Power Research in the US. In: Mehlhorn T A, Sweeney M A, ed. *Beams 2002: 14<sup>th</sup> International Conference on High-Power Particle Beams*. Albuquerque, New Mexico, USA, June 23~28, 2002: 3~8