



KINETIC ENERGY PULSED ALTERNATOR

惯性储能交流脉冲发电机

崔淑梅 吴绍朋◎著



科学出版社

惯性储能交流脉冲发电机

崔淑梅 吴绍朋 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是以脉冲发电机为核心内容的专著。第1章给出了高功率脉冲功率技术和高功率脉冲电源的定义,进而给出了高功率脉冲电源的典型应用、分类和未来发展情况;第2章介绍了脉冲发电机的原理、类型和发展;第3~5章分别论述了脉冲发电机的电磁设计、热管理及冷却结构设计、力学性能分析方法;第6章论述了几种典型的脉冲发电机驱动的电磁武器负载。

本书可供从事脉冲功率技术的研究人员和教学人员参考;也可以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;对以脉冲发电机作为核心研究方向的专业管理人员具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

惯性储能交流脉冲发电机/崔淑梅,吴绍朋著. —北京:科学出版社,2015.11
ISBN 978-7-03-046360-9

I. ①惯… II. ①崔… ②吴… III. ①脉冲电源-交流发电机-研究
IV. ①TM34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 269967 号

责任编辑:刘凤娟 鲁永芳/责任校对:邹慧卿
责任印制:张伟/封面设计:铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第一版 开本:720×1000 1/16
2015年11月第一次印刷 印张:10 1/4 插页:2

字数:200 000

定价:78.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

脉冲功率技术产生于 20 世纪 30 年代, 20 世纪 60 年代之后得到了迅速发展, 近年来更是在多个领域进入实用化阶段。高功率脉冲电源是脉冲功率系统的主要组成部件, 其技术的发展直接制约着脉冲功率技术的发展和應用。脉冲发电机具有能量密度和功率密度高, 集惯性储能、机电能量转换和脉冲成形于一体的单元件综合性优势。在国民经济的各个领域得到了越来越多的重视和发展, 尤其在军事领域, 它作为电磁发射、电磁弹射以及微波、激光等定向能武器的高功率脉冲电源, 得到了各国和地区的高度重视, 美国、欧洲、俄罗斯以及中国等对其研究投入了大量的科研人员和经费支持。

本书广泛吸纳了国际上尤其是美国脉冲发电机顶级研究机构的文献资料, 重点结合了哈尔滨工业大学多年来在该方向上的研究成果和实际经验, 以脉冲发电机为核心部件, 对整个脉冲发电机系统进行了系统的介绍, 包括脉冲发电机的原理及发展、电磁设计、热管理分析、力学性能分析、电磁武器负载及建模。

本书由崔淑梅和吴绍朋撰写。在编写过程中, 得到了哈尔滨工业大学电气工程系电磁与电子技术研究所脉冲发电机课题组赵伟铎博士、李茜元博士、万援博士、王少飞博士、吴松霖博士等的大力协助, 他们在脉冲功率技术及脉冲发电机研究方面做出了很大的贡献, 并为本书的编写提供了有意义的资料, 在此表示深深的谢意。

在编写过程中, 参考了很多国内外文献资料, 在此一并表示感谢。

由于作者水平有限, 书中不妥之处在所难免, 恳请专家和读者批评指正。

作 者

2015 年 8 月于哈尔滨工业大学

目 录

前言

第 1 章 高功率脉冲电源技术概述	1
1.1 脉冲功率技术	1
1.2 高功率脉冲电源	4
1.3 高功率脉冲电源的典型应用	5
1.3.1 工业应用	5
1.3.2 军事应用	8
1.4 高功率脉冲电源种类	12
1.4.1 电容储能式脉冲电源	12
1.4.2 电感储能式脉冲电源	15
1.4.3 化学能脉冲电源	17
1.4.4 惯性储能式脉冲电源	20
1.5 脉冲功率技术的未来发展情况	26
参考文献	27
第 2 章 脉冲发电机基本理论	28
2.1 脉冲发电机的原理	28
2.1.1 常规发电机的基本原理	28
2.1.2 脉冲发电机的基本结构	29
2.1.3 脉冲发电机的工作原理	31
2.1.4 脉冲发电机的工作过程	35
2.2 脉冲发电机的类型	36
2.2.1 补偿形式分类	36
2.2.2 励磁方式分类	38
2.3 脉冲发电机的发展	39
参考文献	47
第 3 章 脉冲发电机的电磁设计	49
3.1 脉冲发电机主要尺寸、储能和功率的关系	49
3.1.1 主要尺寸与储能的关系	49
3.1.2 主要尺寸与功率的关系	50
3.2 电机极数与相数的选择原则	51

3.2.1	极数选择原则	51
3.2.2	相数选择原则	51
3.3	脉冲发电机的空载磁场分析	52
3.3.1	空芯电机	53
3.3.2	非空芯电机	54
3.4	脉冲发电机的关键参数计算	56
3.5	脉冲发电机的放电特性分析	58
3.5.1	脉冲发电机放电过程的分析	58
3.5.2	影响脉冲发电机放电电流因素的分析	61
3.5.3	空芯脉冲发电机自激建立条件的分析	63
3.6	脉冲发电机数学模型	65
3.6.1	相坐标系下空芯脉冲发电机的数学模型	66
3.6.2	交直轴坐标系下空芯脉冲发电机的数学模型	68
3.7	脉冲发电机有限元建模方法	71
3.8	脉冲发电机设计流程	73
3.9	设计实例	74
3.9.1	双轴补偿的提出	74
3.9.2	双轴补偿空芯 CPA 的等效电感分析	76
3.9.3	双轴补偿空芯 CPA 的双轴匹配设计	78
3.9.4	双轴补偿空芯 CPA 的设计参数及仿真模型	79
3.9.5	双轴补偿空芯 CPA 的单脉冲放电特性分析	80
3.9.6	双轴补偿空芯 CPA 的多脉冲放电特性分析	86
	参考文献	90
第 4 章	脉冲发电机的热管理研究	91
4.1	脉冲发电机温度场分析	91
4.1.1	基本传热学理论	91
4.1.2	电机温度场计算方法	92
4.1.3	空芯 CPA 温度场分析	94
4.1.4	空芯 CPA 温度场分析实例	102
4.2	脉冲发电机冷却计算基础	107
4.2.1	计算流体动力学基础	107
4.2.2	Ansys CFX 流场计算的主要步骤	108
4.2.3	电机冷却方式	110
4.3	脉冲发电机的冷却设计	111
4.3.1	主动冷却结构 1	111

4.3.2	主动冷却结构 2	113
4.3.3	两种冷却结构的比较	116
	参考文献	116
第 5 章	脉冲发电机电力学性能	118
5.1	脉冲发电机电力学性能的分析理论	118
5.1.1	脉冲发电机的机械应力	118
5.1.2	脉冲发电机的电磁应力	119
5.2	脉冲发电机的应力研究方法	120
5.2.1	机械应力的研究方法	120
5.2.2	电磁应力的研究方法	122
5.3	脉冲发电机应力场分析	124
5.3.1	电磁应力分析	125
5.3.2	机械应力分析	128
5.4	脉冲发电机动力学特性研究	136
5.4.1	高速转子动力学研究现状	137
5.4.2	临界转速及模态分析	137
	参考文献	138
第 6 章	脉冲电源的电磁武器负载	140
6.1	轨道炮	140
6.1.1	基本原理	140
6.1.2	负载特性	141
6.1.3	关键技术问题	143
6.2	线圈炮	145
6.2.1	基本原理	145
6.2.2	关键技术问题	147
6.3	电热化学炮	148
6.3.1	电热化学炮的工作原理	148
6.3.2	电热化学炮的负载特性	149
6.3.3	未来发现前景与关键技术	150
6.4	空芯 CPA 及其负载系统的联合仿真模型	153
	参考文献	154

第 1 章 高功率脉冲电源技术概述

脉冲功率技术与高功率脉冲电源产生于 20 世纪 30 年代, 20 世纪 60 年代之后得到了迅速发展, 并逐渐形成独立学科的新兴技术领域。高功率脉冲技术是国防、航天等领域的重要技术基础 [1-20]。

1.1 脉冲功率技术

脉冲功率技术, 是把较小功率的能量以较长时间慢慢输入储能元件中, 将能量进行压缩与转换, 然后在极短的时间内 (最短可为纳秒) 以高功率向负载释放的电物理技术, 其实质上是输出功率对输入功率的放大。

由能量与功率及时间的关系: $E = Pt$ 可知, 当能量恒定时, 储能元件 (如电容器、电感器、储能飞轮等) 经过较长时间能量存储, 在极短的时间内释放, 将会产生较高的功率, 脉冲功率压缩原理示意图如图 1-1 所示。

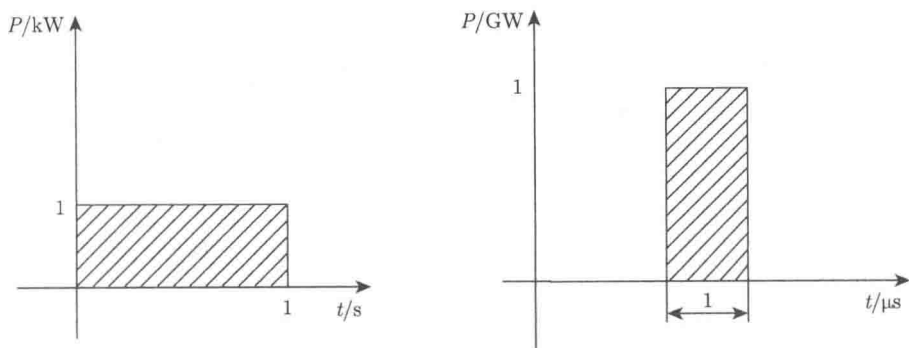


图 1-1 脉冲功率压缩原理示意图 (能量 E 恒定)

脉冲功率技术以高电压、大电流、高功率、强脉冲为主要特点, 研究的主要内容是能量储存与高功率脉冲的产生及应用, 主要包括: ①能量储存技术; ②高功率脉冲的产生技术; ③脉冲开关技术; ④脉冲大电流测量技术。

脉冲功率系统一般包括以下几个部分: 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、受能负载装置, 如图 1-2 所示。前三部分组成了高功率脉冲电源。

脉冲功率系统初级能源的储能方式有多种, 包括: 以电场形式储能的电容器、

以磁场形式储能的电感器、机械能发电机、化学能装置以及核能等。表 1-1 为四种常用储能系统的典型参数。

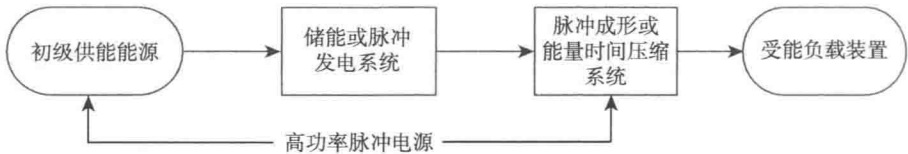


图 1-2 脉冲功率系统的基本组成

表 1-1 四种常用储能系统的典型参数

储能方式	储能器	储能密度		储能/J	脉冲参数			
		J/g	J/cm ³		功率/W	电压/V	电流/A	脉宽/s
电容	脉冲电容器	0.1	0.1~0.5	2.5×10^7	$10^{10} \sim 10^{14}$	$10^6 \sim 10^7$	$10^7 \sim 10^8$	$10^{-8} \sim 10^{-1}$
电感	电感器	2~5	0.5~5	$10^8 \sim 10^{10}$	$10^9 \sim 10^{12}$	10^5	10^7	$10^{-3} \sim 1$
	超导电感器	36~50	40~100	$10^8 \sim 10^{14}$	10^{11}	3×10^5	10^5	$10^{-3} \sim 10^{-2}$
机械	脉冲发电机	1.5~10	100	$10^9 \sim 10^{11}$	$10^9 \sim 10^{10}$	$10^4 \sim 10^5$	$10^5 \sim 10^7$	$10^{-3} \sim 1$
	单极发电机	3~15	—	—	10^{10}	900	—	$10^{-2} \sim 10$
化学	高级炸药	5000	—	4.2×10^7	10^{12}	$10^4 \sim 10^6$	—	$10^{-6} \sim 10^{-4}$

开关元件的参数和特性对脉冲的上升时间、幅值等产生最直接、最敏感的影响，因此开关元件在脉冲功率系统中占有特殊的地位。在脉冲功率系统中，常用的传统开关有机械开关、油浸开关、火花隙开关、闸流管、真空开关管、等离子体开关、电爆炸导体开关、电子束控制反射断路器开关等，这些开关技术已经很成熟，在脉冲功率系统中使用很广泛。近年来，又有一些高性能开关不断涌现，如磁开关、半导体开关、光导开关等。表 1-2 是几种常用开关的主要参数。

表 1-2 几种常用开关的主要参数

名称	工作电压/kV	峰值电流/kA	开关速度/级	重复频率/Hz	寿命
油浸开关	290	3	ms	200	短
火花隙开关	100	40	ns	125	短
闸流管	30	50	ms	10	中等
真空开关管 (V1)	50	100	ns	10	中等
等离子体开关 (POS)	4250	750	ns	100	中等
磁开关	250	40	ns	1000	长
门极可关断晶闸管 (GTO)	6.5	140	μ s	300	长
绝缘栅晶体管 (IGBT)	6.5	3	μ s	150	长
反向开关晶体管 (RSD)	3.5	250	ns	1000	长

在脉冲功率系统中，脉冲大电流一般具有电流峰值大、上升时间和下降时间均

很短、主脉宽不长且变化非常迅速等特点，因此，脉冲电流测试是脉冲功率技术的关键技术之一。图 1-3 为脉冲电流测量系统示意图。

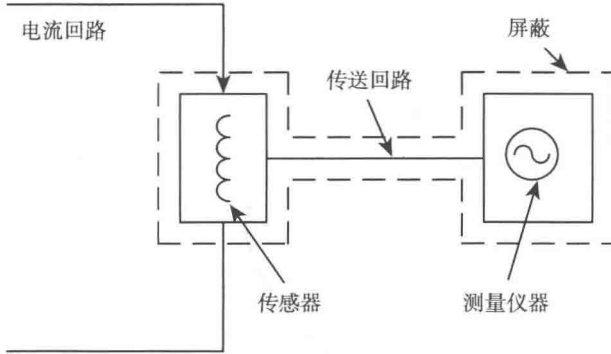


图 1-3 脉冲电流测量系统示意图

从被测电流的回路开始，传感器取出与之成比例的电物理量，经过适当的传送回路送到测量仪器上。

1938 年，美国人金登 (Kingdon) 与坦尼斯 (Tanis) 首次提出用高压脉冲电源产生微秒级脉宽的闪光 X 射线。1939 年，苏联人制成真空脉冲 X 射线管并把闪光 X 射线照相技术应用于弹道学与爆轰物理学实验，采用高压脉冲电容器并联充电、串联放电方式来获得高电压脉冲。1947 年，英国人布鲁姆林 (Blumlein) 以专利的形式将传输线波的折反射原理用于脉冲形成线，在纳秒级脉冲放电方面取得了突破。1962 年，马丁 (J. C. Martin) 领导的小组，将马克思 (Marx) 发生器与布鲁姆林的专利结合，建造了世界上首台强流相对论电子束加速器 SOMG(3MV, 50kA, 30ns) (MV 表示兆伏，kA 表示千安，ns 表示纳秒)，脉冲功率达到太瓦 (TW, 10^{12} W) 量级。之后大型脉冲功率装置迅速发展，1986 年建成 PBFA- II (第二代粒子束聚变加速器) 装置，峰值电压为 12MV、电流为 8.4MA、脉宽为 40ns，其二极管束能为 4.3MJ，脉冲功率为 10^{14} W，是世界上首个超过 100TW 的大型脉冲功率装置。

目前，国内研究脉冲电源技术的有中国科学院等离子体物理研究所、中国科学院高能物理研究所、中国科学院电工研究所、哈尔滨工业大学、华中科技大学、清华大学等单位，它们的研究水平居于国内领先地位。如今国内已有 20 多台 Marx 装置在运行，居首者是 1979 年核工业西南物理研究院建成的“闪光 I 号”装置；20 世纪 90 年代以后，国内相继又建成的装置有西北核技术研究所的“闪光 II 号”，中国工程物理研究院和中国科学院上海光学精密机械研究所的“神光二号”。几种典型脉冲功率装置的技术参数如表 1-3 所示。

表 1-3 几种典型脉冲功率装置的技术参数

型号	电压/MV	电流/MA	脉宽/ns	功率/TW
Hermes-I (美国)	10	0.1	80	1.0
Aurora(美国)	14	4×0.4	120	22.4
PBFA-II (美国)	12	8.4	40	100.8
ANGARA-I (俄罗斯)	1	1	60	1
ANGARA-5M(俄罗斯)	2	0.5	100	1
A H rapa-5(俄罗斯)	2	40	90	80
ETIGO-II (日本)	3	0.4	60	1.2
Raiden-IV (日本)	1.4	1.4	50	1.96
SMOG(英国)	3	0.05	30	0.15
APEX(英国)	36	3	80	108
闪光 I (中国)	8	0.1	80	0.8
闪光 II (中国)	0.9	0.9	70	0.81

1.2 高功率脉冲电源

高功率脉冲电源是为脉冲功率装置提供电磁能量的电源，是脉冲功率装置的主体部分。高功率脉冲电源的主要特点是先以较低功率缓慢积聚能量，再瞬时集中释放高功率和大能量。通常把在时间 $10^{-9} \sim 10^{-3}\text{s}$ 内产生能量 $10^6 \sim 10^9\text{J}$ ，脉冲功率达 $10^6 \sim 10^{14}\text{W}$ 的电脉冲装置定义为高功率脉冲电源。

高功率脉冲电源主要由初级能源（输入级）、中间储能以及能量转换和释放系统（输出级）组成。初级能源为小功率的能量输入设备，如电容器的充电机、电感线圈的励磁电源、惯性储能电机的拖动电机，其能源来自电网；中间储能设备有以电容器和 Marx 发生器为例的电场储能，以常温或超导电感线圈为例的磁场储能，以各类具有转动惯量的脉冲发电机为主的惯性储能，以蓄电池、磁流体发电机、爆炸磁通压缩发生器为代表的化学储能，以及以核能磁流体发电机为例的核能初级能源等；能量转换与释放系统主要包括各种大容量闭合开关和断路开关及各种波形调节电路。

高功率脉冲电源技术以高电压、大电流、高功率、强脉冲及高品质波形为特点，是一个综合电机电器、高电压工程、变流技术、电力电子学、精密电气测量、自动控制、继电保护、接地技术与电磁兼容的多专业交叉的综合性学科。其在核爆炸模拟、受控核聚变试验、强流粒子束加速器、高功率脉冲激光器、高功率微波、定向能武器、电磁发射、电磁弹射、电磁推进、电磁成形、材料表面处理及半导体离子注入等近代科学、国防科研和高技术领域有着重要的科学意义与应用价值。同时在新的应用领域，诸如污水、废气和各种有害物质的处理等环境保护方面也有着广阔的应用前景。

高功率脉冲电源的核心技术是研究高储能密度 (kJ/kg) 与高功率密度 (kW/kg) 的脉冲功率储能系统, 并且要求脉冲放电波形可调节性好、系统内阻小以满足不同负载的需要, 还要求脉冲重复性好, 系统构成简单与低成本等, 因此提高储能密度、提高可重复频率、轻型化、小型化与实用化是其未来研究的方向。

国际上正在大投入地进行研究以提高各种储能系统储存能量的能力。在电化学储能方面, 美国与日本研究发展了高功率密度蓄电池以弥补该储能系统功率密度低的缺点, 美国的锂金属硫化物蓄电池功率密度达到了 $250\sim 340\text{W/kg}$, 日本采用的钠硫化物的蓄电池效果较好, 但蓄电池的发热与密封的问题仍需亟待解决。

在高储能密度电容器方面, 主要方向一个是高强度电介质电容器, 另一个是电解质电容器, 目前这两种电容器均达到十几 kJ/kg 数量级的水平, 储能密度达 36kJ/kg 。

在惯性储能方面, 有直流发电机、同步发电机、单极发电机、高性能盘式交流电机、补偿脉冲发电机 (compensated pulsed alternator, CPA)、旋转磁通压缩机等, 根据不同的负载要求选择不同的惯性储能方式。

高功率脉冲电源技术主要包括储能技术、能量转换和功率放大、高功率开关技术、高压绝缘技术和控制技术, 属于一门典型的交叉学科。

1.3 高功率脉冲电源的典型应用

1.3.1 工业应用

1. 环境工程领域的应用

1) 脉冲净化工业废气

工业废气净化常采用脉冲电晕等离子体法净化废气技术, 也称为纳秒级高压脉冲电晕放电产生等离子体化学技术。其机理是利用前沿陡峭窄脉宽 (小于纳秒级) 的高压脉冲电晕放电, 在常温下获得非平衡等离子体, 即产生大量的高能电子和 O 、 OH 等活性粒子, 对工业废气中的有害气体分子进行氧化、降解等, 使污染物转化为低毒或无毒物质。

脉冲电晕等离子体法脱硫脱氮技术研究主要集中在高压窄脉冲电源研制、反应器结构优化、脱硫脱氮等离子体化学反应机理及添加剂选取等方面。其采用的脉冲式变压器电源原理如图 1-4 所示, 其直流高压电源 DC 通过电感 L 和变压器 T 对电容 C 谐振充电到峰值后接通开关 S , 使电容 C 放电形成脉冲。脉冲变压器式电流技术较为成熟, 但因采用了变压器铁芯材料而限制了脉冲前沿的陡度。

2) 脉冲放电处理污水

采用高电压技术处理难处理的工业污水是当前研究热点之一。汽水相间的混合

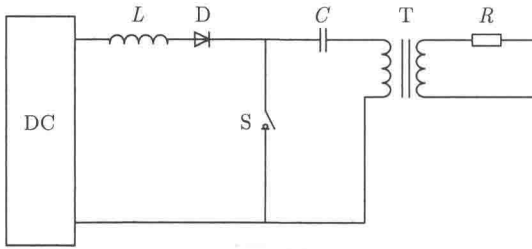


图 1-4 脉冲式变压器电源原理图

系统中施加高压窄脉冲可实现气体电晕放电。外加电压幅值为 10kV，上升时间为纳秒级的高压脉冲时，电晕放电产生的电子温度高达几百摄氏度，而离子和中性气体温度接近常温。被这种非平衡等离子体包围的水滴同时承受 4 种效应：高能电子轰击、电晕放电产生的臭氧对水滴的杀菌消毒、放电产生的紫外线对水滴起光化学处理作用、放电等离子体中产生活性自由基。它们的共同作用使难处理的工业污水得到了快速净化。该项技术的研究主要集中在高压窄脉冲电源的设计和等离子体生成法的优化设计上。

3) 脉冲静电除尘

脉冲静电除尘技术，就是用脉冲电源代替传统的直流电源，以提高除尘效率的一种技术。采用脉冲供电时，除尘器粉尘层的等效电容在脉冲施加期间只充上很少的电荷，在脉冲消失期间所充电荷基本放完。除尘器粉尘层不会因积累电荷形成高电压而造成反电晕，故脉冲供电电源除尘器的除尘效果优于直流电源供电的除尘器。其原理图如图 1-5 所示， E_p 为电除尘的本体，其吸尘极接地。电晕线为线柱，隔离二极管 D_2 接电压可调的基础直流高压电源 E_2 的负极，其电压值通常调到接近临界电晕电压。脉冲供电电源由可调直流电压源 E_1 、滤波限流电感 L_1 、谐振储能电容 C_1 、快速晶闸管 D_T 的反馈二极管 D_1 及谐振电感 L_2 组成的谐振电路构成。脉冲频率和占空比的调节可以通过控制晶闸管 D_T 的触发脉冲来实现，脉冲宽度则由谐振回路的参数决定。

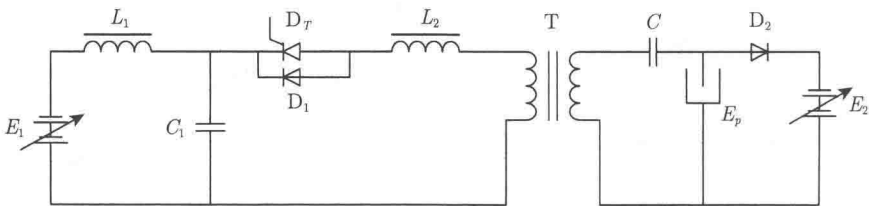


图 1-5 静电除尘脉冲电源原理图

4) 脉冲电场杀菌

高压脉冲电场对几十种与食品有关的微生物具有良好的杀菌作用，如大肠杆

菌、枯草菌、短乳菌、啤酒酵母、金黄色葡萄球菌、产朊假丝酵母、粪链球菌及黏质沙雷氏菌等。关于脉冲电场杀菌机理，主要有细胞膜穿孔效应、黏弹极形成模型、电磁效应、电解产物效应及臭氧效应等。

5) 脉冲制取臭氧

臭氧制取技术也开始采用脉冲电源。脉冲制取臭氧的原理是在突变电场（高频或脉冲电场）作用下，使空气中的部分氧气分解成氧原子，并在瞬间重新结合成臭氧，是氧的同素异形转变过程。目前臭氧技术的主要问题是生产效率低、能耗高。臭氧制备的理论效率为 $2\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，实际上用空气制取的效率仅为 $46\sim 58\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，采用高压脉冲技术可提高臭氧的生产效率。

2. 油田领域中的应用

脉冲功率技术适用于原油破乳、油水井除垢、降黏、解堵、增渗、增产、增注。在石油采取过程中，原油的破乳对原油开采、集输和加工都极其重要。在破乳中，纳秒级的上升沿主要是用来产生等离子体，使乳状液内的离子含量增加，提高液滴破乳的效率，同时陡峭的上升沿能够增加介质的击穿电压，并辅助窄脉宽可以使很高电压的脉冲加载在反应器上而不会发生击穿，提高注入的功率。电破乳技术是利用乳状液中液滴所含的离子在高压电场的作用下发生极化，两个被电场所极化的液滴在电场作用力下挤破液膜的束缚和乳状液之间的排斥力，液滴互相聚集、融合，并在重力作用及油水不相容的作用下从油中析出。油水分离如何避免破乳剂的添加，根据高压脉冲破乳的特性和原理设计高性能的符合要求的电源是关键。脉冲电源产生的高压脉冲要满足产生等离子体的条件，需电压足够高，脉冲上升沿足够快，同时脉冲脉宽要很窄。采用脉冲的脱水方法对环境无污染，并且有较高的脱水效率。

3. 电磁成形中的应用

电磁成形属于高能（高速率）成形技术，电磁成形排除了爆炸成形的危险性，较之电液成形更方便。从 20 世纪 50 年代末，电磁成形在国内外迅速发展起来，成为金属塑性加工的一种新的工艺方法，深受各工业国的高度重视。

板材电磁成形原理如图 1-6 所示，将电能储存在高压电容器中，当高压开关闭合时，电容器向线圈中快速放电（微秒级），从而在回路中产生急剧变化的电流，依据电磁感应定律可知，圆线圈周围将产生变化的磁场。随着电容器的不断充放电，在圆线圈周围将产生变化的脉冲磁场，当脉冲磁场穿过工件时就会在金属工件中产生感应电流（涡流），因此，金属工件就成为带电体。根据电磁学知识可知，带电的金属工件处于急剧变化的磁场中就会受到磁场力的作用，当磁压力达到材料的屈服强度时，金属工件将发生相应的塑性变形，达到金属零件成形的目的。

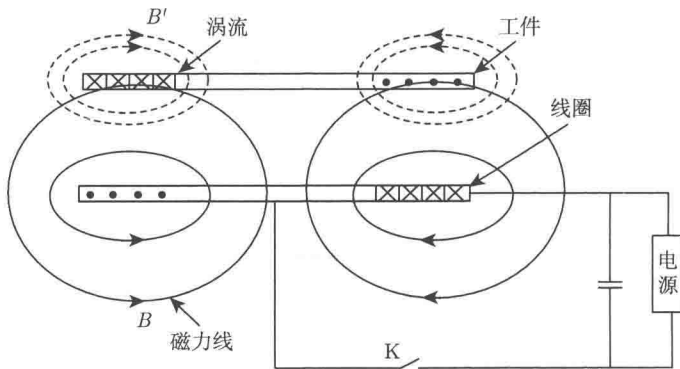


图 1-6 板材电磁成形原理图

在 21 世纪,要求塑性加工技术向着更精、更省、更净的方向发展,追求高效率、高质量、低消耗、低成本,成形过程要求绿色无污染。成形工件(毛坯)将由近净成形向无余量的净成形发展,产品开发周期要短,生产工艺应具备快速市场响应能力。利用大功率脉冲放电产生的强磁场进行金属成形加工,包括对金属工件正成形和负成形的加工,此时力的传递是借助工件材料内的电子受力而实现的,力的传递可无机械接触,不存在高温,工件剩余应力小,具有良好的可控性和重复性,材料微观变形均匀、加工质量好,并且生产效率高。这些优点使得电磁成形技术必将成为金属塑性加工中的重要方法之一,在众多工业领域中得到越来越广泛的应用。

我国电磁成形技术的研究始于 20 世纪 60 年代。20 世纪 70 年代末期,哈尔滨工业大学开始研究电磁成形的基本理论和工艺,并在实验装置的基础上,于 1986 年成功研制出我国首台生产用的电磁成形机。目前国内有多所高等院校和研究所开展了电磁成形技术的研究,并使之应用于实际生产。

1.3.2 军事应用

1. 电磁发射技术中的应用

发射技术来自于战争中的武器推进,发射技术可分为机械发射、化学发射、电磁发射。电发射技术是利用电能发射物体的发射技术,主要包括电磁发射技术与电热发射技术。电磁发射技术是借助电磁能做功,将电磁能转化为弹丸等有效载荷动能的一种发射技术。电热发射技术是利用电能加热产生等离子体(或化学气体)发射物体的发射技术。与常规的化学发射方式相比,电磁发射方式具有明显的优势。电磁发射能提供较大动能,可将弹丸等有效载荷加速到化学发射方式难以达到的超高初速与发射速度,且速度易调控、精度高、射程远、威力大,发射过程不易受干扰,无噪声、无烟雾效应产生。该技术可以应用于电磁炮弹与导弹的发射,也可以应用于飞机电磁发射系统,在超远程压制、防空反导、微小卫星发射等领域也具

有重要的应用前景。

电磁发射装置主要由发射装置本体、被发射的组件与高功率脉冲电源三部分组成,发射装置本体是脉冲电源的负载,由脉冲电源向其提供强电流,被发射的组件由发射的有效负载及其承载机构组成,高功率脉冲电源是电磁发射装置中最为关键的部分。

20世纪70年代,堪培拉的澳大利亚国立大学试验了第一门电磁炮(轨道炮),将3g重的塑料块加速到6km/s的速度,显示了电磁发射武器的巨大潜力。从此,电磁发射技术在军事上的应用成为研究热点,并开始了长足的发展。目前,美国在此领域的研究处于国际领先水平。

电磁炮作为发展中的高技术武器,被世界各国海军所重视,把它作为未来新式武器,其军事用途十分广泛。相对于传统的火炮而言,电磁炮武器有以下优势:

(1) 电磁推动力大,弹丸速度高。电磁发射的脉冲动力约为火炮发射力的10倍,因此它发射的弹丸速度很高。

(2) 弹丸稳定性好。电磁炮弹丸在炮管中的推力为电磁力,这种力量是非常均匀的,且易控制,所以弹丸稳定性好,可提高炮弹打击精度。

(3) 隐蔽性好。电磁炮在发射时不产生火焰和烟雾,也不产生冲击波,因此比较隐蔽,不易发现。

(4) 弹丸发射能量可调。可根据目标性质和射程大小快速调节电磁力的大小,从而控制弹丸发射能量。

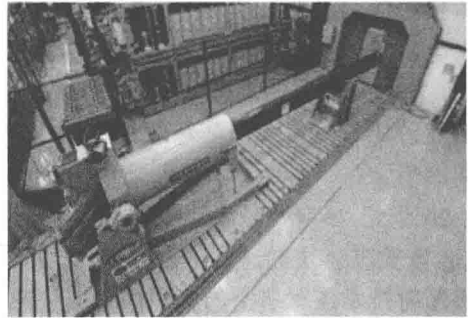
(5) 比较经济。与常规武器比较,火炮发射药产生1J能量需要10美元,而电磁炮只需要0.1美元。

电磁炮可分为轨道炮、电热炮、线圈炮与重接炮。线圈炮与轨道炮原理相似,都是利用电磁力将炮弹加速至相应的发射速度,以炮弹的大动能为目标的杀伤性武器。电热炮常采用的是在炮弹的尾部加上等离子体燃烧器,当在等离子体燃烧器的电极上加上高电压时,便可产生电弧,使等离子体过热成为高压等离子体,进而给弹丸加速。重接炮是一种多级加速的无接触电磁发射装置,但要求炮弹进入重接炮之前要有一定的初速度,是电磁炮的最新发展形式。

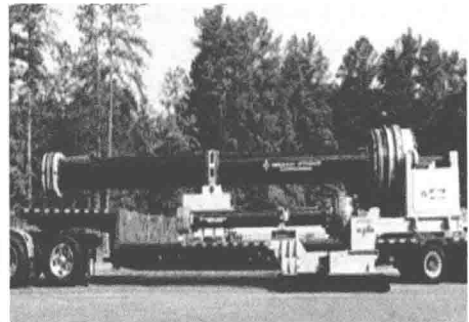
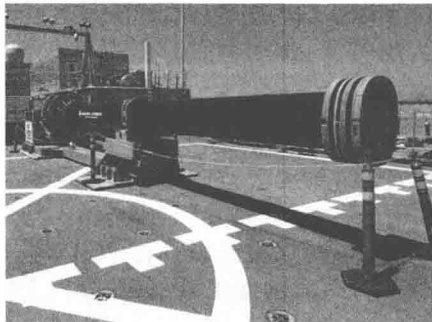
在电磁武器系统中高功率的脉冲电源是系统的重要组成部分,脉冲电源的发展决定了电磁武器的发展。脉冲电源主要趋向于高功率密度、高能量、小型化的发展,同时还需考虑脉冲电源的高频率重复发射下的稳定型与使用寿命。图1-7为两个典型的电磁炮工程模型样机。

在许多年前,美国海军已经开始对大型电磁轨道炮远距离(超过200mi^①)发射进行研究并取得了一定的进展。为达到有效载荷范围,炮弹直径为150mm,轨

^① 1mi=1.609344km。



(a) 32MJ 电磁炮 (英国航空航天系统公司)



(b) 闪电系列电磁炮 32MJ (美国通用原子能公司)

图 1-7 典型的电磁炮工程模型样机

道长度为 10~12m, 发射质量预计将超过 20kg, 如拥有 2km/s 的初速度, 相应的炮口能量将大于 60MJ。这将需要脉冲功率系统每次提供超过 100MJ 的能量到轨道炮膛。对于后膛馈能单轨系统, 这种能量脉冲将超过 5MA, 电压高达约 20kV。典型的脉冲宽度只有几毫秒, 对应的是弹丸整体通过筒体的时间。理想的脉冲形状, 将减小峰值至平均值的加速力和加速波动, 同时确保弹丸离开枪口前无显著的电

流中断。图 1-8 为脉冲发电机驱动轨道炮系统的组成。



图 1-8 脉冲发电机驱动轨道炮系统的组成