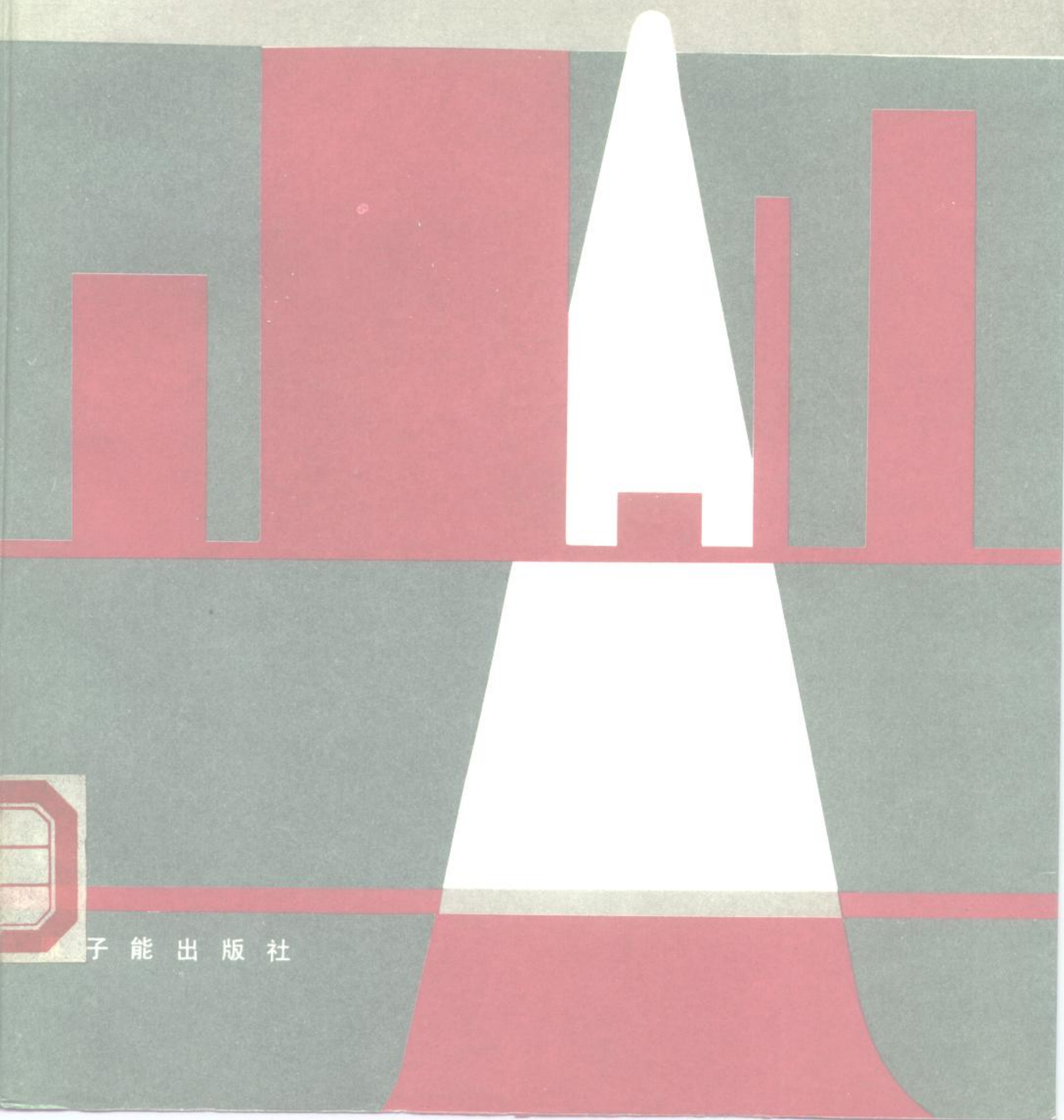


王莹 编著

高功率脉冲电源



子能出版社

73.417
121

电子工业出版社

高功率脉冲电源

王莹 编著
杨大为 审校

原子能出版社

(京)新登字 077 号

内 容 简 介

本书阐述了电容储能、电感储能、化学能、核能和机械能高功率脉冲电源的原理、性能和分析方法，并介绍了这些电源在军事、科研和生产中的多种应用。

本书可供从事高功率脉冲电源工作的人员参考，还可作为高等院校脉冲功率技术专业师生的教学参考书。

D036/02

高功率脉冲电源

王 莹 编著

杨大为 审校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行，新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/16 ·印张 19.25 ·字数 480 千字

1991 年 12 月北京第一版 · 1991 年 12 月北京第一次印刷

印数 1—2000

ISBN 7-5022-0553-5

TL · 314 定价：10.50 元

314 11111

前 言

《高功率脉冲电源》一书是在下述背景下产生的：科研和生产领域渴望应用脉冲功率技术；脉冲功率技术近 20 年来有较大发展，但尚无论述作为其主要组成部分——高功率脉冲电源技术的专著。

绪论部分介绍高功率脉冲电源科研的进展情况及有关的基本概念。第一章至第四章分别介绍电容储能高功率脉冲电源；电感储能高功率脉冲电源；化学能及核能高功率脉冲电源；机械能高功率脉冲电源。上述四章是按储能方法分类撰写的。第五章介绍高功率脉冲电源的典型应用，包括产生高功率带电粒子束；产生强脉冲磁场；电磁发射；电磁脉冲模拟；闪击航空和航天器模拟以及电爆炸等方面的应用。

本书力求保持学科的系统性和全面性，并且注意引入最新科研成果。除注明者外，均采用法定单位。

本书的撰写和出版，曾得到许多学者和同行的支持与帮助。著名科学家、我国脉冲功率技术奠基人王淦昌教授支持作者撰写本书，并为之作序；杨大为高级工程师对全书做了详尽的审校，提出许多宝贵意见，为保障书的质量做了大量的有益的工作；王乃彦研究员为本书的结构提出了有益的建议；苏耀光高级工程师、经福谦研究员、林为干教授、姚煜球教授、张寿云和刘锡三高级工程师等从学术和应用价值的观点，积极支持本书的撰写和出版；肖峰副研究员和李增水高级工程师对本书的出版也给予了支持和帮助；姚文凯副教授也给予了一定的帮助。借此，作者对上述诸位及为本书出版付出劳动的编辑、工人同志们致以诚挚的谢意！

作者诚恳地欢迎读者对本书的缺点、错误批评及指正。

王 莹

一九八九年三月于石家庄军械工程学院

序

高功率脉冲电源是脉冲功率技术中的主要组成部分。

《高功率脉冲电源》第一次全面、系统地论述了脉冲功率技术所需的各种强脉冲电源,它的出版对我国脉冲功率技术的普及和深入发展将大有裨益。

我国从70年代初形成的脉冲功率技术队伍,工作卓有成效,在科技领域中发挥着重要作用。这支年青队伍的不倦努力,为我国脉冲功率技术打下了坚实的基础,从而使赖其发展的某些高技术得以进步。

脉冲功率技术是由多学科相互渗透而形成的新科学。因此,它的发展需要各学科领域的关心和支持;固然也离不开从事脉冲功率的全体工作人员的努力;远见卓识的发展规划至关重要。

脉冲功率技术在国防、科学技术和生产诸领域中占有异常重要的地位。诚望从事脉冲功率的科技工作者,在自己的工作领域勇于进取,有所创造,以使这一学科更茁壮、成熟和完臻。

王淦昌

一九八九年三月二十一日

目 录

绪论	(1)
0.1 高功率脉冲电源的进展	(1)
0.2 能量压缩的基本概念	(3)
0.3 高功率脉冲电源概述	(4)
参考文献	(6)
第一章 电容储能高功率脉冲电源	(7)
1.1 引言	(7)
1.2 电容器组放电技术	(9)
1.2.1 线性负载分析	(9)
1.2.2 非线性负载分析导引	(10)
1.2.3 相关技术要点	(11)
1.3 经典 Marx 发生器	(13)
1.3.1 工作原理	(13)
1.3.2 多级 Marx 发生器的充电分析	(14)
1.4 高效能 Marx 发生器	(17)
1.4.1 高效能 Marx 发生器的特点	(17)
1.4.2 等效电路及其参量	(20)
1.4.3 发生器向电容负载馈电分析	(21)
1.5 电感隔离型 Marx 发生器	(24)
1.5.1 全电感隔离型 Marx 发生器	(24)
1.5.2 电阻-电感隔离型 Marx 发生器	(28)
1.6 Marx 发生器输出波形的整形	(28)
1.6.1 波头和波尾电阻整形	(28)
1.6.2 电容整形	(29)
1.6.3 电爆炸导体整形	(30)
1.7 $L-C$ 倍压器	(32)
1.7.1 反相叠加型 $L-C$ 倍压器	(32)
1.7.2 振荡级联型 $L-C$ 倍压器	(33)
1.8 脉冲功率用传输线理论基础	(34)
1.8.1 特点和无损线的真实性	(34)
1.8.2 基本理论	(35)
1.9 单成形传输线及其类线网络	(40)
1.9.1 单成形传输线	(40)
1.9.2 C 型 Guillemin 网络	(41)
1.9.3 具有成形线组元的 Marx 发生器	(42)
1.10 高功率脉冲电源常用的传输线	(43)

1.10.1	带状传输线	(43)
1.10.2	同轴传输线	(43)
1.10.3	径向传输线	(44)
1.10.4	螺旋传输线	(45)
1.11	传输线的脉冲变换	(46)
1.11.1	多线段倍压变换器	(46)
1.11.2	电感隔离变换器	(47)
1.11.3	阻抗变换器	(47)
1.11.4	脉冲极性反转	(48)
1.11.5	变压器变换	(49)
1.12	Blumlein 线	(50)
1.12.1	传输矩阵法分析	(50)
1.12.2	Blumlein 线参量	(52)
1.13	层叠线倍压器	(54)
1.13.1	多开关直线型	(54)
1.13.2	单开关直线型	(55)
1.13.3	阿基米德螺旋线型	(56)
1.13.4	并联同轴线型	(58)
1.14	多级波发生器	(59)
1.14.1	相干多级波发生器	(59)
1.14.2	Blumlein 线型多级波发生器	(60)
1.15	传输线串、并联的过电压分析	(62)
1.15.1	并联时的过电压	(62)
1.15.2	串联时的过电压	(63)
1.15.3	混联时的过电压	(64)
1.16	脉冲成形网络的转换和绝缘	(65)
1.16.1	开关转换特性	(65)
1.16.2	充电和预脉冲	(67)
1.16.3	绝缘和击穿场强计算	(68)
1.17	磁绝缘传输线	(69)
1.17.1	基本原理	(70)
1.17.2	相对论解的理论模型	(71)
	参考文献	(74)
第二章	电感储能高功率脉冲电源	(76)
2.1	概述	(76)
2.2	基本电路及其充电分析	(79)
2.2.1	电感储能基本电路	(79)
2.2.2	充电分析	(80)
2.3	单级电感储能的转换	(82)
2.3.1	电阻性转换电路	(84)

2.3.2	电容性转换电路	(90)
2.4	用电流过零方法产生连续脉冲	(94)
2.4.1	电桥抵消脉冲电路	(95)
2.4.2	反向抵消脉冲电路	(96)
2.4.3	串联抵消脉冲电路	(97)
2.5	多级电感储能技术	(98)
2.5.1	分组时序并联电路	(98)
2.5.2	多级 MEATGRINDER 电路	(101)
2.5.3	逐级压缩的电感储能方法	(104)
2.6	电感储能用断路器	(105)
2.6.1	电爆炸导体断路器	(106)
2.6.2	机械式断流器	(109)
2.6.3	金属等离子体弧开关	(110)
2.6.4	交叉场管	(111)
2.6.5	等离子体枪和 DPF 开关	(111)
2.6.6	热驱动和超导断路器	(113)
2.6.7	非线性电阻固体开关	(114)
2.6.8	扩散放电式断路器	(115)
2.6.9	等离子体融蚀开关	(117)
2.6.10	炸药断路器	(117)
2.6.11	反射开关	(119)
2.7	大功率脉冲变压器	(119)
2.7.1	电缆绕组型脉冲变压器	(120)
2.7.2	空心同轴脉冲变压器	(122)
2.7.3	自耦脉冲变压器	(123)
2.7.4	双谐振脉冲变压器	(124)
2.8	用铁磁元件变换脉冲	(131)
2.8.1	铁氧体传输线	(132)
2.8.2	非线性电感磁压缩	(133)
2.9	大功率感应加速器	(135)
2.9.1	Astron 型直线感应加速器	(137)
2.9.2	Radlac 型直线感应加速器	(142)
2.9.3	自动直线感应加速器	(144)
2.9.4	强流普通电子感应加速器	(145)
2.9.5	改进的电子感应加速器	(148)
2.9.6	仿星电子感应加速器	(152)
2.9.7	大功率电子束加速器(Rebetron)	(152)
2.9.8	跑道型感应加速器	(154)
	参考文献	(157)
第三章 化学能与核能高功率脉冲电源		(159)

3.1	蓄电池电化学脉冲电源简介	(159)
3.2	磁通压缩发生器(MFCG)理论基础	(161)
3.2.1	述评	(161)
3.2.2	磁场的冻结和压缩	(162)
3.2.3	MFCG 基本电路分析	(163)
3.3	变形型 MFCG	(165)
3.3.1	条状发生器	(165)
3.3.2	平板型发生器	(167)
3.3.3	螺旋发生器	(169)
3.3.4	同轴发生器	(172)
3.3.5	球形发生器	(173)
3.3.6	圆筒聚爆装置	(173)
3.3.7	柔性导爆索(MDF)型发生器	(174)
3.4	MFCG 的初始储能	(175)
3.4.1	直接馈电	(175)
3.4.2	用电感储能器馈送能量	(177)
3.4.3	中间助增器馈电	(177)
3.5	MFCG 的脉冲调制	(178)
3.5.1	镇流器方法	(178)
3.5.2	断路器开关锐化	(179)
3.5.3	脉冲变压器耦合	(179)
3.5.4	延迟线方法	(182)
3.6	关于 MFCG 的限制因素	(182)
3.6.1	磁通损失	(183)
3.6.2	强磁场效应	(181)
3.6.3	内部过电压	(184)
3.7	排斥型 MFCG	(185)
3.7.1	轴向活塞式 MFCG	(186)
3.7.2	径向式 MFCG	(187)
3.7.3	炮击式 MFCG	(188)
3.8	逆轨道炮(IRG)型 MFCG	(189)
3.8.1	轨道炮负载的 IRG 电源	(190)
3.8.2	$R-L$ 负载的 IRG 电源	(192)
3.9	脉冲磁流体(MHD)发电机概论	(193)
3.9.1	述评	(193)
3.9.2	理论基础	(195)
3.9.3	法拉第和霍耳 MHD 发电机特性	(197)
3.9.4	通道的磁流体力学简析	(198)
3.9.5	磁体及其它	(199)
3.10	化学燃料的脉冲 MHD 发电机	(201)

3.10.1	火箭燃料法拉第 MHD 发电机	(201)
3.10.2	爆炸等离子体 MHD 发电机	(203)
3.10.3	脉冲等离子体 MHD 发电机	(206)
3.10.4	置磁炸药脉冲 MHD 发电机	(208)
3.11	核燃料脉冲 MHD 发电机	(210)
3.11.1	传导式裂变脉冲 MHD 发电机	(210)
3.11.2	感应式裂变脉冲 MHD 发电机	(212)
3.11.3	使用旋转床反应堆的强脉冲电源	(216)
	参考文献	(221)
第四章	机械能高功率脉冲电源	(223)
4.1	概述	(223)
4.2	脉冲功率用同步发电机	(224)
4.2.1	稳态工作	(224)
4.2.2	暂态工作	(225)
4.2.3	并联运行	(226)
4.2.4	带整流器负载运行	(226)
4.2.5	同步发电机的激磁	(228)
4.2.6	充任高功率脉冲电源	(229)
4.3	直流脉冲发电机	(232)
4.3.1	发电机的等效电容充电	(232)
4.3.2	发电机对负载放电分析	(233)
4.4	单极发电机	(235)
4.4.1	基本理论	(236)
4.4.2	类型及其主要特点	(238)
4.4.3	自激式单极发电机	(240)
4.4.4	实用的他激脉冲激磁法	(242)
4.5	补偿式脉冲交流发电机(Compulsator)	(243)
4.5.1	基本原理	(243)
4.5.2	电磁特性分析	(245)
4.5.3	结构类型	(246)
4.5.4	串激 Compulsator	(248)
4.6	旋转磁通压缩器	(249)
4.6.1	主动式旋转磁通压缩器	(249)
4.6.2	切割式旋转磁通压缩器	(250)
4.6.3	挤压式旋转磁通压缩器	(251)
4.7	变感机电脉冲放大机	(252)
4.7.1	线圈式变磁阻机电脉冲放大机	(252)
4.7.2	类传输线变感脉冲放大机	(256)
4.8	变容和压电式电脉冲机概念	(257)
4.8.1	变容脉冲放大机	(257)

4.8.2 压电式脉冲发电机	(258)
参考文献	(259)
第五章 高功率脉冲电源的典型应用	(261)
5.1 产生高功率带电粒子束	(261)
5.1.1 粒子束惯性约束核聚变	(263)
5.1.2 强流电子束集团离子加速	(263)
5.1.3 粒子束武器	(265)
5.1.4 电子束泵浦高功率激光	(266)
5.1.5 激发大功率微波	(268)
5.1.6 脉冲中子源	(272)
5.1.7 用电子束产生热击波	(273)
5.1.8 电子束热起爆高级炸药	(273)
5.1.9 电子束加速大质点	(274)
5.1.10 尾流场加速	(275)
5.1.11 建立脉冲 γ (或 X)射线环境	(277)
5.2 产生强脉冲磁场	(279)
5.2.1 建立托卡马克的纵向场	(279)
5.2.2 θ 箍缩	(281)
5.2.3 Z 箍缩	(280)
5.2.4 等离子体焦点装置	(281)
5.2.5 电磁冲击模拟器	(282)
5.2.6 金属电磁成形	(283)
5.3 电磁发射	(285)
5.3.1 电磁轨道炮	(285)
5.3.2 磁行波发射器	(286)
5.3.3 等离子体脉冲加速器	(287)
5.4 电磁脉冲模拟	(288)
5.4.1 核电磁脉冲	(288)
5.4.2 闪电电磁脉冲	(289)
5.4.3 电磁脉冲的模拟方法	(289)
5.5 闪击航空和航天器的模拟	(290)
5.6 电爆炸	(291)
5.6.1 电爆炸导体	(291)
5.6.2 液电爆炸	(292)
5.7 其它应用	(294)
参考文献	(295)

绪 论

0.1 高功率脉冲电源的进展

高功率脉冲电源又可称作强脉冲电源,它是脉冲功率技术的主要组成部分。

所谓脉冲功率技术,就是把“慢”储存起来的具有较高密度的能量,进行快速压缩、转换或直接释放给负载的电物理技术。脉冲功率技术萌发于30年代,在60年代有重大进展并形成公认的学科。一般说来,脉冲功率装置(图0-1)包括初级能源、中间储能和脉冲成形系统、转换系统以及负载。通常把脉冲放电时在负载上形成的大于 10^6W 的功率看作是脉冲功率^[1]。

高功率脉冲电源是为脉冲功率装置的负载提供电磁能量的装置,构成脉冲功率装置的主体。通常,它包括初级能源、中间储能脉冲成形系统及转换系统等几部分。由于高功率脉冲电源几乎包含了脉冲功率装置的全部,所以在许多场合不加区别地把二者相提并论。看来,用高功率脉冲电源代表脉冲功率装置,似乎并不过分。

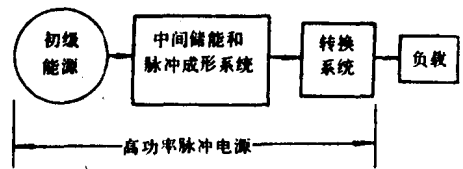


图0-1 脉冲功率装置

高功率脉冲电源之所以能出现并得以迅速发展,是因为以下诸领域的需求:等离子体物理与受控核聚变研究;核爆炸模拟;闪光X射线照相;高功率激光;大功率微波;电磁脉冲;电磁发射(或推进);粒子束武器和电磁成形等。

高功率脉冲电源始于30年代的用电容器放电产生X射线。1938年,美国人Kingdon和Tanis第一次发表了用高压脉冲电源放电产生微秒脉冲X射线的文章^[2];几乎同时,Steenbeck也公布了高功率脉冲电源能产生X射线的结果;1939年,苏联人Зеленский等制成真空脉冲X射线管,并把闪光X射线照相术用于弹道学和爆炸物理学方面。最初采用并联电容器放电的方式,不久就将模拟雷电电压波的Marx发生器用作高功率脉冲电源,正如Цукерман所做的那样。

第二次世界大战期间,企图用于军事的电磁发射器的研究,对高功率脉冲电源的发展似乎有促进作用,但是由于交战国急功近利地把更多的财力用于即刻生效的战争装备上,此期间高功率脉冲电源技术基本上处于停滞状态。

1948年,A. D. Blumlein^[3]以专利形式提出双层同轴线原理并将其用于雷达调制,使匹配负载获得线性的充电电压值。遗憾的是,它的功能和重要性没能被当时的脉冲功率界给予应有的重视。

50年代初,美、苏、英等国秘密地开始了受控热核聚变的研究,从而使不景气的等离子体物理学重现热潮,磁约束用的高功率脉冲电源应运而生。在这期间,主要使用机械能和化学能的长脉冲电源;各类脉冲发电机、铅酸蓄电池和磁通压缩发生器等得以出现和发展。

60年代是脉冲功率技术迅猛发展并形成单独学科的黄金时代。在这期间,由于对核爆炸

有关的效应模拟和粒子束惯性约束核聚变研究的需求,使得脉冲功率领域中的强流粒子束加速器得以出现和飞速发展。这首先应归功于在英国原子武器研究中心工作的 J. C. Martin,他在 1962 年把 40 年代的 Blumlein 线和更早的 Marx 发生器结合起来,从而把脉冲宽度从微秒级压缩到几十纳秒。J. C. Martin 在脉冲功率技术发展史上这一划时代的贡献,使人们看到获得更高功率的可能性。于是,产生高功率粒子束或强脉冲 X 射线的 Marx 成形线型高功率脉冲电源,雨后春笋般地在各国试验室出现。在美国 J. C. Martin 领导的小组,1967 年在 Sandia 实验室建成的 Hermes I 为当时最大装置,其输出电压为 10 MV,输出电流为 100 kA,脉冲宽度为 80 ns; 1972 年,陆军的 Hary Diamond 实验室建成了 Aurora 装置,这个闻名遐迩的设备由四台 Marx 发生器(95 级 60 kV 电容器)组成,管电压为 14 MV,电流 1.6 MA,脉宽 120 ns,效率约 50%,成本低于 10 美元/J,功率达 10^{13} W,成为脉冲功率史上的一个里程碑;尔后,“磁绝缘”的概念被用在 Sandia 实验室的 PBFA-I 装置上,这台 1400 万美元的惯性约束聚变装置,由 36 路组成;通过磁绝缘传输线辐射状向中心二极管传输能量,峰值功率达 30 TW,束的能量达 1 MJ; Sandia 实验室根据能源部的合同,于 1986 年 1 月建成了 PBFA- I 装置,其总投资为 4800 万美元。这台装置具有电压 12 MV、电流 8.4 MA、脉宽 40 ns、能量 4.3 MJ 和功率 10^{14} W,它是世界上第一个闯过 100 TW 大关的装置,成为脉冲功率发展史上的又一个里程碑。在日本,由于历史和政治原因,脉冲功率技术不能用于军事,强流粒子束加速器多用于惯性约束聚变研究,他们特别重视轻离子的惯性约束聚变。较著名的装置有大阪大学的 Raiden-IV 和长岗技术大学 1986 年建成的 ETIGO- I,后者的电压为 3 MV、电流 400 kA、脉宽 60 ns。在高功率粒子束装置方面,日本有一个欲与美国争高低的雄心计划(图 0-2)。在苏联,也建造了许多大型 Marx 成形线型的联合装置,1985 年由 Курчатов 原子能研究所建成的 Ангара-5 就是其中之一。Ангара-5 的输出电压是 2 MV,电流 40 MA,脉宽 90 ns。在中国,目前已有 16 台这类装置在运行,居首者是西南工程物理研究院 1979 年建成的“闪光-I”装置,它的运行参数是:输出电压为 6(或 8)MV、电流 100 kA、脉宽 80 ns。

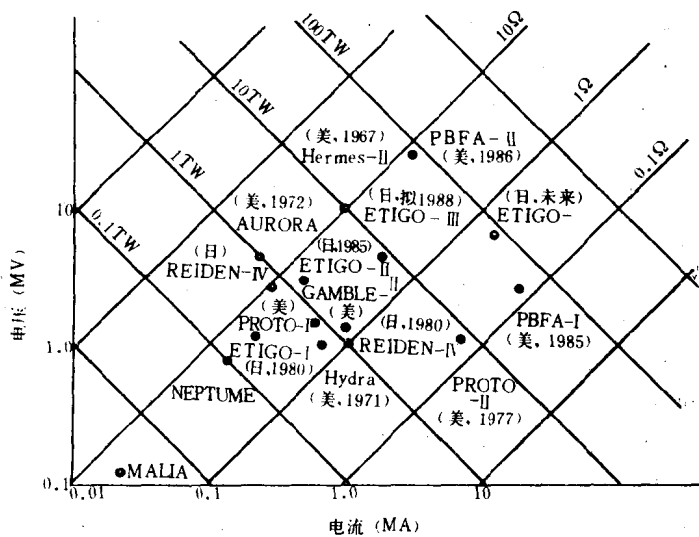


图 0-2 美、日典型强流粒子束装置发展趋势

电感储能技术,虽然在 50 年代已经开始用于高速风洞和托卡马克装置,但用于高阻抗负

载却始于 70 年代。典型的应用实例是苏联建成的 ИГВР- I 和 ИГВР- II 装置,后者是三级电感储能,用爆炸导体断路开关转换,获得 3.7 MV 管电压,70 kA 管电流,脉宽 100—500 ns 且可调。由于电感储能密度比电容高 1—2 个数量级,成本低,以及目前兴起的电磁推进技术几乎离不开它,所以目前国际上很重视电感储能的高功率脉冲电源的多方面应用与发展。

近来备受重视的定向能(尤其是粒子束)武器和其它应用,要求连续发射,促使产生连续大功率脉冲的技术快速发展。除大功率重复开关技术得以发展外,高电压、大电流的加速器从 70 年代开始崛起。1982 年美国 Lawrence Livermore 国家试验室用 4200 万美元建成的直线感应加速器,使用多台 Marx-Blumlein 型脉冲电源激励。这台直线感应加速器的指标是:电子能量为 50 MeV,束流 10 kA,脉宽 70 ns,平均重复率 5 Hz。近几年,比直线感应加速器更有前途的环形、跑道形循环感应加速器倍受青睐,因为它们不但能产生高电压和大电流,而且占据的空间小、成本低。

近来电磁发射技术又迅速发展起来。自从 1978 年澳大利亚国立大学的 R. A. Marshall 用 500 MJ, 1.6 MA 的单极发电机作电磁轨道炮的脉冲电源把质量为 3 g 的弹丸加速到 5.9 km/s 之后,全世界的军事、航天、受控热核聚变、材料状态研究等领域非常振奋,均积极试验、研究用电磁发射器为己服务,这就极大的刺激着高功率脉冲电源向多样化、高比能、小体积和低成本方向发展。电磁发射所用电源十分广泛,可用电容储能、电感储能的脉冲电源,也可用化学能、核能、机械能的高功率脉冲电源。因此,过去一度被冷落的机械能电源和化学能电源(含电池组)再展宏图,同时还促使核能高功率脉冲电源研究步伐的加快以及补偿式交流脉冲发电机(Compulsator)的出现。

总之,脉冲功率技术(乃至高功率脉冲电源)是一门年轻的学科。从 1976—1989 年由电气与电子工程师学会(IEEE)牵头召开了 7 次脉冲功率国际会议。仅用 20 多年时间,就把脉冲功率从 10^{12} W 提高到 10^{14} W。高功率脉冲电源正蓬勃地向前发展。目前,高功率脉冲电源总的发展方向仍是提高功率水平。具体的攻克方向是:提高电源的储能密度,研制大功率转换开关和产生高重复频率的大功率脉冲。脉冲功率技术的继续发展,对人类的技术革命、战略防御,乃至社会未来的发展,必将产生重大影响。

0.2 能量压缩的基本概念

高功率脉冲电源的工作,就其实质而言,是能量的压缩。

广义地讲,物体处于一定状态就具有一定的能量,即能量和物体的状态有关。能量代表系统在一定状态时所具有的特性。能量的转化过程,实际上就是物质运动的过程。

能量压缩就是在空间和时间上增加能量密度的过程。可用图 0-3 表示这种概念。能团(质量流或电磁波或引力波)从原来 ΔT 时刻的体积 ΔV ,经过压缩,变成 δT 时刻的体积 δV 。显然,纯空间的压缩能量,只能增大能量的体密度;而时间上的能量压缩,却能提高功率。因此,在高功率脉冲电源中,欲使能量密度增加,应当在空间上压缩能量;要想提高功率,应当在时间上压缩能量。

(1)在空间上能量的压缩

在空间上压缩能量,即减小其体积,是一种线性压缩过程。在高功率脉冲电源中,在空间上压缩能量包括提高初级能源的储能密度,以及选用合适的中间储能和脉冲形成系统并提高它

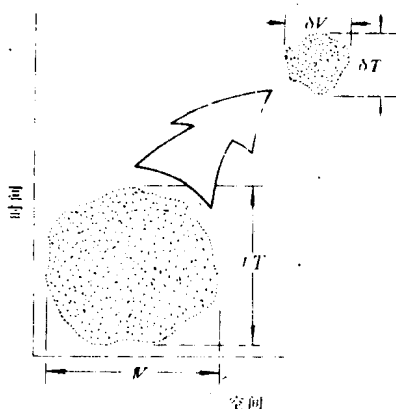


图 0-3 能量在空间和时间上的压缩^[4]

其实质是缩短释能时间。要想缩短释能时间，必须在储能元件和受能元件之间增添第三物体（压缩元件）。在某些高功率脉冲电源中，第三物体常是中间储能和脉冲成形系统，或者是开关转换系统。只有第三物体存在，才有可能互补地压缩能量。

在时间上压缩能量，原则上有两种提供非线性过程以实现时间压缩的方法^[4]：正确选取互补压缩元件的参量，或者使压缩元件参量非线性变化。

(3) 在时间和空间上能量的同时压缩

这种情况在某些高功率脉冲电源中时而有之。例如第三章中的磁通压缩发生器，化学能产生的外力做功压缩磁通，使磁能体积随时间变小，即能量在空间和时间上同时被压缩。

总之，高功率脉冲电源的工作是基于能量压缩的基本原理。认识能量压缩有助于理解高功率脉冲电源的本质。

0.3 高功率脉冲电源概述

简言之，高功率脉冲电源是实现脉冲功率的能量压缩装置。通常把在 $10^{-9} - 10^3$ s 持续时间中能产生 $10 - 10^9$ J 或更多能量的电脉冲装置定义为高功率脉冲电源^[1]。

正如图 0-1 所示，高功率脉冲电源占有脉冲功率装置的绝大部分，因此它在脉冲功率技术中的地位和重要性不言而喻。

初级能源的种类繁多。它包括：以电场形式储能的电容器或 Marx 发生器；具有磁能的电感器或脉冲变压器；具有一定转动惯量的各类机械能发电机；化学能装置；核能装置。采用何种装置，应视用途和中间储能、脉冲形成系统的性质以及本身成本而定。

中间储能和脉冲成形系统，除具有储能和成形脉冲的功能外，有时还起转化能量的作用。它包括：容性传输（或成形）线；感性储能器；脉冲变压器；磁通压缩发生器的变感器；磁流体发电机的通道发电系统；以及使用机械能的感应发电系统等。使用何种系统，应视初级能源的类型和负载性质以及本身成本而定。有时不需要中间储能和脉冲成形系统，仅用转换开关系统即可。

转换系统是指电源内各种转换开关。它包括闭合开关和断路开关两类。实际上，它们可分

表 0-1 各种高功率脉冲电源性能比较

储能方式	脉冲电源种类	储能水平(J)	产生的电脉冲参数						重量比能 (J/g)	体积比能 (J/cm ³)	效率 (%)	
			转化能量(J)	功率(W)	电压(V)	电流(A)	脉宽(s)	能量传输			能量转化	
电容 (电场)	电容储能器	2.5×10^7 (10^8)	$(6-8) \times 10^6$ (5×10^7)	$10^{10}-10^{13}$ (10^7)	10^6 (10^7)	$(4-15) \times 10^7$ (3×10^8)	$10^{-1}-10^{-7}$ (10^{-8})	0.1	$0.1-0.5$ (2-3)	50-70 (90)	14-19 (25)	
	常规电感器	10^8 (10^{10})	10^7 (10^8-10^9)	10^9 (10^{12})	10^5	4×10^7	$1-10^{-3}$ (10^{-5})	2-5 (30-50)	$0.5-5$ (10-50)	25-50 (70-80)	8-14 (20-22)	
	超导电感器	8×10^8 ($10^{11}-10^{14}$)	4×10^8 (10^9-10^{10})	(10^{11})	3×10^5	3×10^5	$10^{-2}-10^{-3}$	36	$40-90$ (100)	20 (85-90)	(26)	
机械能 (飞轮 惯性)	同步 发电 机	10^9 ($10^{10}-10^{11}$)	10^7 (10^8)	5×10^9 (10^{10})	10^4-10^5	10^5	$10^{-2}-10^{-3}$	$0.08-1.5$ (10)	$10-40$	2-3 (40)	0.5-1.5 (11)	
			$(5-7) \times 10^8$ (10^9-10^{10})	10^8-10^9 (10^{10})	10^4-10^5	10^4-10^5	$1-10^3$	1.5 (5)			50-70 (90-95)	13-19 (20-26)
	脉冲单极发电机	6×10^8 (10^9-10^{10})	10^8-10^9 (10^{10})	900 (10^4)	2.7×10^7	$10^{-2}-10$	3-15		20-80	15-60 (85-90)	4-16 (24-25)	
化学能	蓄电池组 (电化学)	$(5-10) \times 10^8$ (5×10^{11})	10^8 (3×10^{11})	10^7	5×10^3	10^5	$10^{-1}-10^3$	$90-10^3$ (10^4)	$(5-18) \times 10^2$ (5×10^3)	50 (70-80)	14 (23)	
	磁通压缩发生器 (高级炸药)		$(1-3) \times 10^7$ (10^8)	5×10^{11} (10^{13})	10^4-10^5 (10^8)	2.5×10^4	$10^{-4}-10^{-6}$				8-20 (30)	
	磁流体发电机		10^7-10^8 (10^9)	10^7-10^8 (10^9)	$10^{13}-10^{14}$	$10^{14}-10^{15}$	1-100	3-100		33	2-12 (10-20)	
核能	裂变磁流体发电机	10^{11}		10^9-10^{12} (10^{14})			100-0.5	10^{10}	10^{10}			
	聚变磁流体发电机	10^{13}		$(10^{13}-10^{14})$	(10^4)		$(100-0.5)$	10^{12}	10^{12}		(40)	

注:括号内的数字是将来可能达到的值。

布在脉冲电源的不同位置(并非一定,如图0-1所示的那样)。视应用不同,有时只用闭合开关,有时仅用断路开关,有时联合使用。本书在适当章节中将予以简略介绍。

就一般情况而论,高功率脉冲电源工作过程如下:首先经过慢储能,使初级能源具有足够的能量;其次,向中间储能和脉冲形成系统充电(或注入能量);在此,能量经过储存、压缩、形成脉冲或转化等某些复杂过程之后,最后快速放电给负载。

实际上,高功率脉冲电源三大系统的部件种类繁多,组合成的电源型式也千差万别。设计者应对具体情况做具体分析。本书以储能性质进行分类来讨论高功率脉冲电源。目前有五种储能形式的高功率脉冲电源,它们是:电容储能、电感储能、化学能、核能和机械能的高功率脉冲电源。现以文献[1]为基础,把五种储能方式的电源的性质归纳成表0-1,作为全书的导引。

高功率脉冲电源的今后发展方向,由以下几个重要方面构成:(1)由单次脉冲向重复的高平均功率脉冲发展;(2)储能技术——研制高储能密度的电源;(3)开关技术——探讨新的大功率开关概念和研制高重复频率开关;(4)绝缘技术——满足设备和开关小型化的要求;(5)开辟新的应用领域。

参 考 文 献

- [1] А. И. Сюсюкин, Техническая Электродинамика, (3), 77 (1984).
- [2] С. П. Вавилов, Импульсная Рентгеноцевная Техника, М., Энергия, (1981).
- [3] John A. Nation, Particle Accelerators, (10), 5 (1979).
- [4] Oved Zucker, Energy Storage, Compression, and Switching; Edited by V. Nardi, et al., 55 (1983).