

流体物理研究所高功率脉冲技术研究进展

邓建军[†] 石金水 曹科峰 谢卫平 章林文 王 勤

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

摘 要 中国工程物理研究院流体物理研究所是中国最早开展高功率脉冲技术研究的单位,文章简要回顾了流体物理研究所 50 年来在高功率脉冲技术研究方面的研究情况,介绍了中国大型高功率装置的典型代表、新近建成的世界最高水平的直线感应加速器神龙一号装置(20MeV, 2.5kA, 80ns),以及超高功率装置——正在建设的用于 Z 箍缩研究的初级实验平台(PTS, 8—10MA, 90ns). 神龙一号是由 84 个感应腔串接而成的强流脉冲直线感应电子加速器,每个感应腔由 Marx 高电压发生器和 Blumlein 脉冲形成线组成的高功率脉冲系统驱动,逐级加速电子束打靶,通过韧致辐射产生强 X 射线,对武器内爆过程进行瞬态闪光照相. PTS 装置是一台基于 Marx 发生器和水介质脉冲成形技术、由 24 路相同模块并联构成的超高功率装置,其单路验证性样机已经完成研制并达到设计指标要求,PTS 主机的建设正在进行中. 文章还介绍了近几十年来在高功率开关、直线感应加速器(LIA)、Z 箍缩、脉冲 X 光机、爆磁压缩技术、重复频率脉冲技术、直线变压器技术、时间分辨快脉冲诊断技术等高功率脉冲技术方面的研究进展.

关键词 脉冲功率技术,直线感应加速器,Z 箍缩,时间分辨诊断技术

Pulsed power research at the institute of fluid physics

DENG Jian-Jun[†] SHI Jin-Shui CAO Ke-Feng XIE Wei-Ping

ZHANG Lin-Wen WANG Meng

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract The Institute of Fluid Physics was the earliest institution in China to engage in pulsed power research, covering areas such as the development of high power switches, linear induction accelerators, facilities for Z-pinch studies, pulsed X-ray machines, explosive magnetic compression technology, rep-rate pulsed power generation, time resolved diagnostic technology, and so on. The newly built Dragon-I facility (20 MeV, 2.5kA, 80 ns), curenly the most advanced linear induction accelerator in the world, is described. The status of the Primary Test Stand (PTS, 8—10 MA, 130ns) for Z-pinch studies that is still under construction is also reported. The PTS consists of 24 modules based on the Marx generator-water PFL (pulse forming line) technology. The single module prototype has been tested successfully. Other progress on the rep-rate pulsed power generator, linear transfer driver, and time resolved diagnostic technology is also presented.

Keywords pulsed power technology, linear induction accelerator, Z-pinch, time resolved diagnostic technology

1 引言

中国工程物理研究院流体物理研究所自 1958 年成立之初就开展了脉冲功率技术方面的研究,至今已有 50 年的历史. 1962 年,成功研制了我国第一台脉冲 X 光机,其主要性能参数为 1.6MeV, 5kA, 400ns. 流体物理研究所先后开展了电压范围从数十 kV 到几 MV 的不同类型高功率开关的研究,包括:

场畸变气体开关、磁开关、激光触发开关、等离子体断路开关、爆炸丝断路开关、固体开关等. 也广泛开展了脉冲功率技术的应用研究,包括:脉冲 X 光机、自由电子激光、高功率微波、电磁轨道炮、电热化学炮、等离子体聚焦装置(DPF)、固体套筒内爆、Z 箍缩、直线感应加速器、环境应用、金属丝电爆炸产生纳米粉末材料等.

2009—11—11 收到

[†] 通讯联系人. Email:jjdeng@caep. ac. cn

本文的第二部分介绍了工作电压从数百 kV 到 MV 量级,抖动在 ns 量级的高功率开关的新近成果;第三部分介绍了产生 MHz 猝发重复频率脉冲的三种创新技术方案及相应的实验结果;第四部分涉及到脉冲 X 光机的最新研究成果;第五部分介绍了新近建成的神龙一号直线感应加速器,其技术指标为 20MeV,2.5kA,80ns,焦斑直径约 1mm,这是目前世界上性能最好的直线感应加速器;第六部分介绍了 Z 箍缩研究的进展情况;第七部分介绍了在直线变压器(LTD)驱动技术方面的进展;用于脉冲功率及应用等研究的相关快脉冲诊断技术的发展将在本文的第八部分中介绍,最后是结束语。

2 高功率开关

高功率开关是高功率脉冲系统中最关键的部件之一,不同的应用场合需要不同性能、不同种类的高功率开关.50 年来,流体物理研究所开发研制出诸如电触发火花隙气体开关、激光触发火花隙气体开关、水开关、磁开关、固体开关、等离子体断路开关和爆炸丝断路开关等不同类型、不同工作电压水平的高功率开关,并成功地应用于各种脉冲功率系统中。

下面重点介绍气体开关的进展情况。

2.1 同轴场畸变气体开关

针对 Marx 发生器及其他高功率脉冲发生器中对 ns 量级低抖动高性能开关的需求,已经研制出同轴场畸变开关(见图 1),其工作电压水平在 100—200kV,抖动约 1ns.图 2 是开关电压为 200kV 时的多通道放电图。

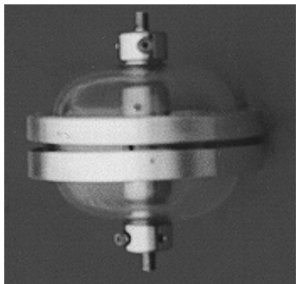


图 1 同轴场畸变开关

2.2 同轴圆柱型场畸变气体开关

同轴圆柱型火花隙气体开关在 20 多年前就研制出来,并用作我国第一台直线感应加速器脉冲功率系统中 Blumlein 脉冲形成线的主开关.该型开关在工作电压约 250kV 时的抖动小于 1ns.通过结构改进,开关的抖动和电感进一步降低,目前得到了更高的同步性和更快的脉冲上升前沿.改进后的同轴圆柱型火花隙气体开关在神

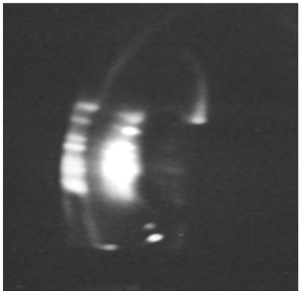


图 2 多通道放电图

龙一号直线感应加速器上运行稳定可靠。

2.3 激光触发多级多通道气体开关

20 世纪 90 年代早期至今,流体物理研究所一直在进行激光触发气体开关技术的研究.研制成功的激光触发多级多通道气体开关,其工作电压从 200kV 到 5MV,电流达 500kA,成功应用于 PTS(PTS 是目前正在建设的用于 Z 箍缩研究的初级实验平台)等装置的研制。

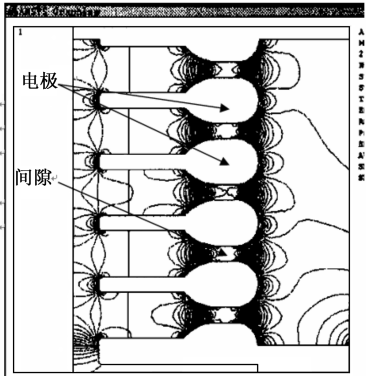


图 3 多级开关极间电场分布图

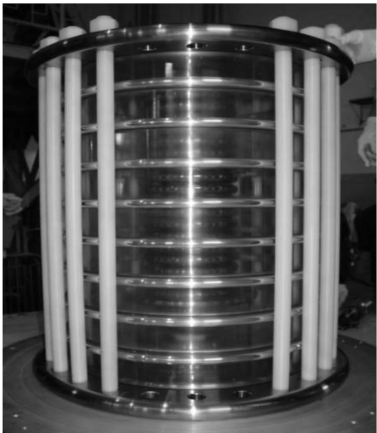


图 4 5MV 激光触发多级多通道气体开关照片

激光触发多级多通道气体开关的极间电场分布如图 3 所示.图 4 是 5MV 激光触发多级多通道气体开关照片,2006 年,它在 PTS 单路原型样机上已经过实验验证和考核.其自击穿电压抖动小于 5%,在触发激光能量大于 20mJ 时,触发延迟时间小于 20ns,抖动小于 1.5ns^[1]。

3 高重复频率脉冲技术

高重复频率脉冲技术在科学研究、工业、环境保护、国防等方面有广泛的应用. 近 10 多年来, 流体物理研究所开展了高重复频率脉冲 (100Hz—数 MHz) 产生相关技术的研究. 提出了基于单次工作开关的猝发模式下产生高功率、MHz 重复频率脉冲的几种创新性技术方案, 并进行了实验研究, 在数百 kV 电压水平下获得了很好的实验结果.

3.1 基于电爆炸丝断路开关的猝发多脉冲产生技术

一种猝发多脉冲产生方案是基于电爆炸丝断路开关, 其等效电路如图 5 所示. 实验得到了在 1Ω 低阻抗负载上的时间间隔为几个微秒的多脉冲输出, 负载上的电压约 250kV, 电流约 40kA^[2], 见图 6.

3.2 基于电缆延时的猝发双脉冲产生技术

创新性地提出了基于单次火花隙开关和利用电缆延时的方法产生时间间隔约几百纳秒的双脉冲产生技术, 并在几年前进行了原理性实验, 验证了技术可行性^[3]. 近期, 经过进一步的技术改进和优化, 实验上得到了更好的脉冲波形和更高的电压水平, 见图 7.

3.3 基于分时控制脉冲叠加的多脉冲产生技术

近年来提出并在实验上成功验证了另一种产生重复频率高达几 MHz 高功率脉冲的创新设计思想. 该设计思想基于传统单次火花隙开关, 并通过分时控制脉冲叠加及高压硅堆隔离技术来解决高功率、MHz 重复率脉冲产生的难题^[4]. 多个单脉冲模

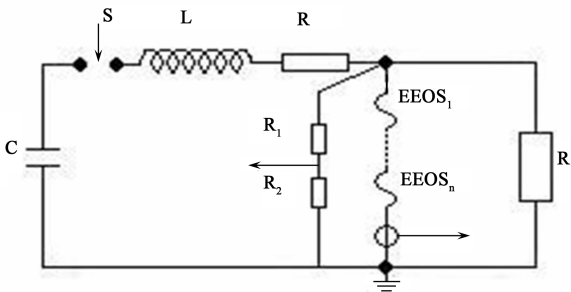


图 5 基于电爆炸丝断路开关多脉冲产生等效电路

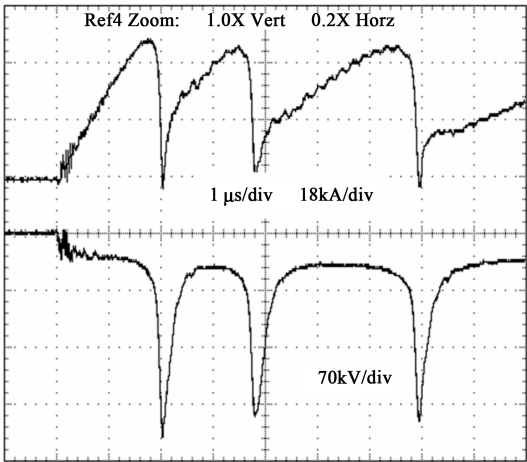


图 6 基于电爆炸丝断路开关的多脉冲实验波形

块通过高电压硅堆并联连接至负载, 在不同时刻触发每个单脉冲模块以实现不同时间间隔的多脉冲输出. 更多脉冲可以通过增加更多的单脉冲模块来实现. 这种方案的优点是每个脉冲的电压幅度和脉冲之间的间隔都易于调节. 图 8 和图 9 分别是三脉冲系统的方案图及实验结果.

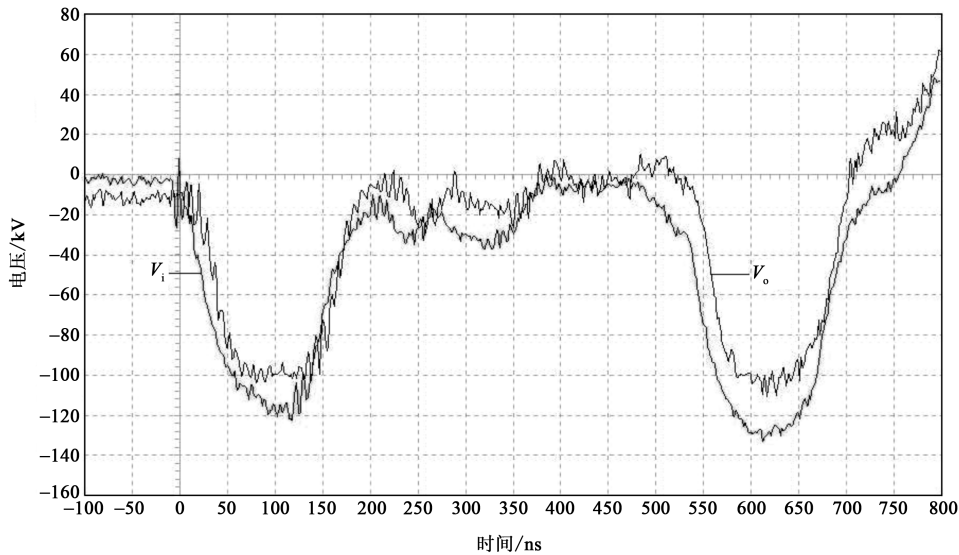


图 7 基于电缆延时得到的双脉冲输出波形(两个脉冲的间隔为 500ns)

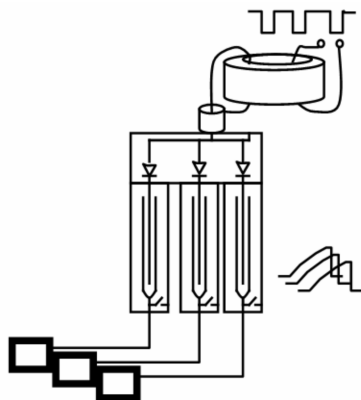


图 8 基于分时控制脉冲叠加及高压硅堆隔离的三脉冲产生技术方案示意图

4 脉冲 X 光机

流体物理研究所已开发研制出一系列的脉冲 X 光机,能量范围从几百 keV 到几个 MeV(见表 1).比较典型的为 X-V 型脉冲 X 光机,其技术参数为 300keV,6kA,50ns,输出端具有两个可移动的 X 光管,如图 10 所示.

5 直线感应加速器研制与发展

直线感应加速器技术在流体物理研究所已有 20多年的发展历史.流体物理研究所已开发研制出

表 1 流体物理研究所研发的脉冲 X 光机系列

型号	能量/MeV	电流/kA	脉宽/ns	时间/年
X-I	1.6	5	400	1962
X-I-A	1	5	40	1972
X-II	0.8	30	50	1977
X-II-A	0.75	18	40	1974
X-III	1.5	10	40	1988
X-V	0.3	6	50	1998

一系列不同能量的直线感应加速器.从 1989 年建成我国第一台直线感应加速器(1.5MeV,LIA)到 1991 年建成的用于自由电子激光研究的曙光一号加速器(3.3MeV,LIA)以及 1993 年建成的我国第一台用于闪光 X 射线照相的直线感应加速器 LIAXF(10MeV,2.0kA,60ns,X 光焦斑直径约 6mm),新近建成的神龙一号直线感应加速器(20MeV,2.5kA,80ns,X 光焦斑直径约 1mm),是目前世界上性能最好的直线感应加速器,它的研制成功标志着我国闪光 X 射线照相能力上了一个新的台阶,并跻身世界前列.该加速器由基于感应叠加技术的 3.6MeV 电子注入器,72 个加速腔(4 个腔一组,共 18 组)、束输运系统、靶室、图像接收系统以及相应的脉冲功率系统和辅助系统构成.在每一组

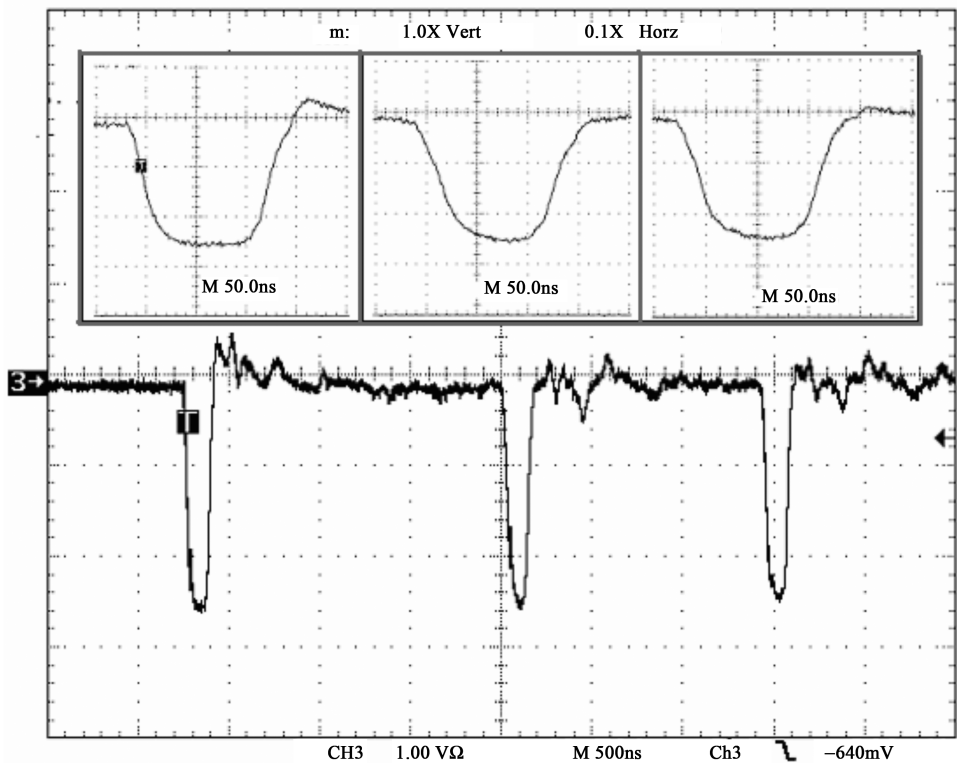


图 9 基于分时控制脉冲叠加及高压硅堆隔离的多脉冲实验波形

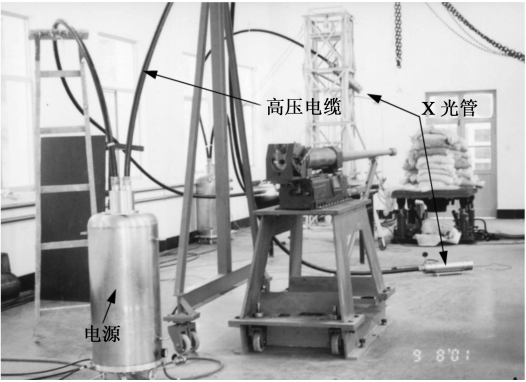


图 10 X-V 型脉冲 X 光机

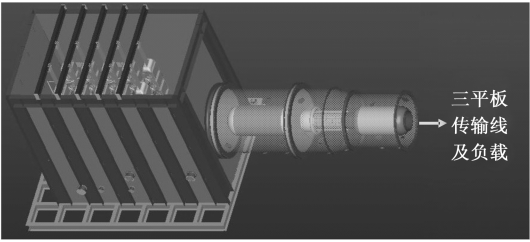


图 11 单路验证性样机结构示意图

加速腔末端有一个多功能腔,用于束流强度和位置监测、磁场过渡、束剖面测量及真空泵浦等^[5]. 神龙一号加速器达到的技术指标为:束流强度大于 2.5kA、焦斑直径约 1mm^[5,6].

6 Z 箍缩研究

6.1 用于 Z 箍缩研究的初级实验平台

流体物理研究所已有的 Z 箍缩研究平台是电流为 1MA 的“阳”加速器,目前正在研制用于 Z 箍缩研究的初级实验平台(PTS). PTS 装置基于 Marx 发生器和水介质脉冲形成线技术路线,由 24 路相同模块并联而成. PTS 装置的总储能约 7.2MJ,其设计指标为负载电流峰值 8—10MA,电流上升沿约 90ns. PTS 装置的单路验证性样机已研制成功(见图 11),从激光触发脉冲输出到负载电流输出的抖动约 2ns. PTS 装置主机的建设正在进行中.

6.2 Z 箍缩物理实验研究

流体物理研究所以“阳”加速器为平台,开展了 Z 箍缩(喷气和金属丝阵负载)、X 箍缩、磁驱动飞片等方面的实验研究. 目前,根据 Z 箍缩物理研究需求,已建立了用于测量 X 射线辐射功率/能量、辐射能谱、等离子体内爆图像和参量的相关诊断设备(见图 12),同时具备 X 射线元器件标定、实验数据处理和分析判断的能力,为 Z 箍缩物理实验和惯性约束聚变点火可行性判断研究工作的深入开展奠定了基础.

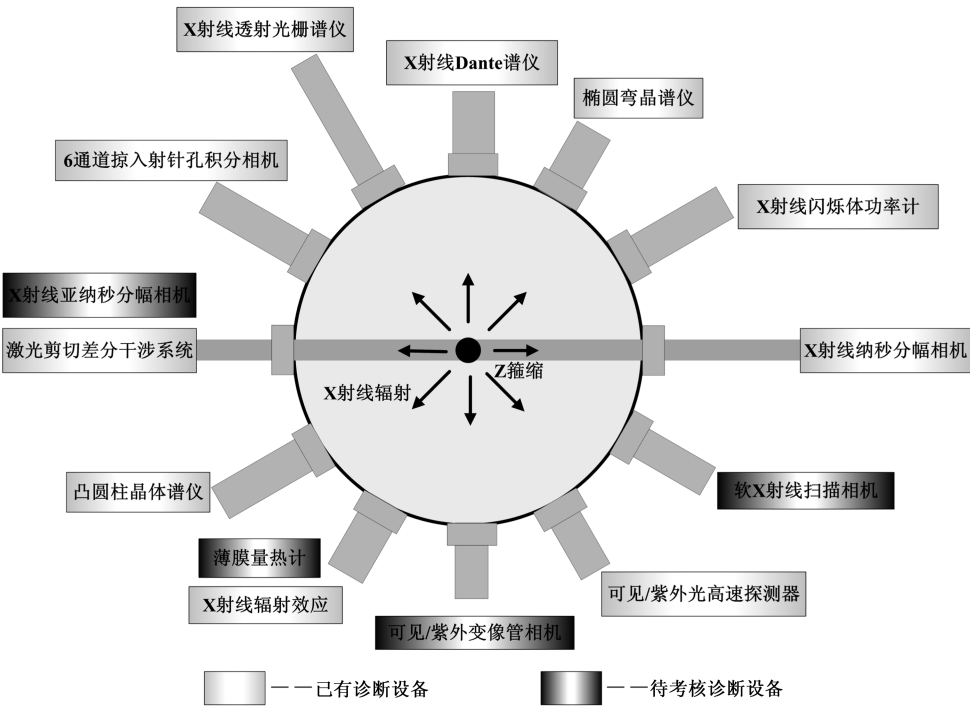


图 12 “阳”加速器上的 Z 箍缩实验诊断系统

7 直线变压器(LTD)技术

针对大型 Z 箍缩驱动装置、脉冲 X 光机等对初级功率源的需求,流体物理研究所于 21 世纪初就开始进行直线变压器(LTD)技术的研究. 完成了低电流 LTD 模块研制(电流 40kA, 上升时间不到 37ns), 开展了几种不同等效频率下磁芯的磁特性实验研究, 开展了两种不同结构的 200kV 多间隙开关设计和性能研究. 进一步完成了 100kA 单模块 LTD 研制(电流 102. 2kA, 上升时间 53. 6ns, 见图 13 和图 14). 正在进行 10 模块串联的 1 MV-LTD 以及 1 MA-LTD 单模块的研制.

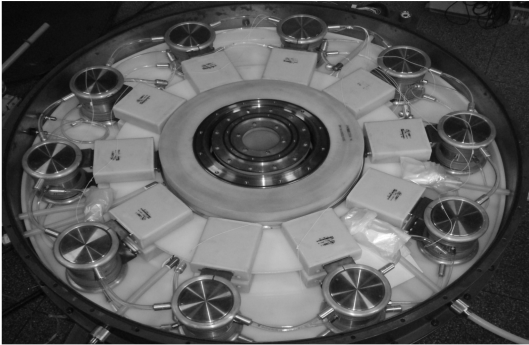


图 13 100kA 单模块 LTD 照片

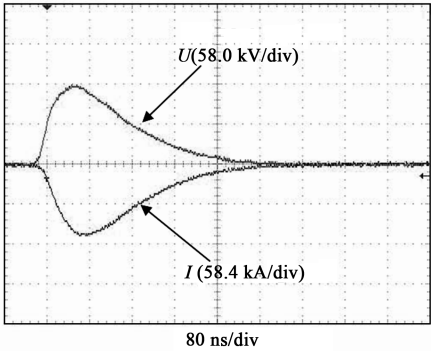


图 14 100kA 单模块 LTD 输出波形

8 快脉冲诊断技术

除用于 Z 箍缩物理研究的诊断技术外,流体物理研究所还开发研制出用于束流参数一维和二维时间分辨诊断和测量的多种诊断方法和系统. 图 15, 16, 17 和 18 分别给出了时间分辨束能量测量、采用扫描相机进行基于切连科夫辐射的时间分辨束包络测量、基于光学渡越辐射(OTR)的时间分辨束发射度测量、神龙一号加速器的时间分辨束质心测量的实验结果^[7].

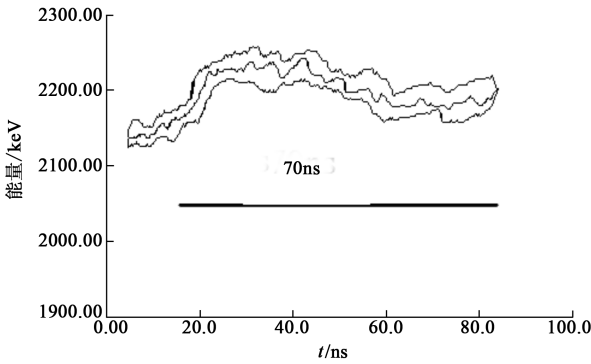


图 15 时间分辨束能量测量结果

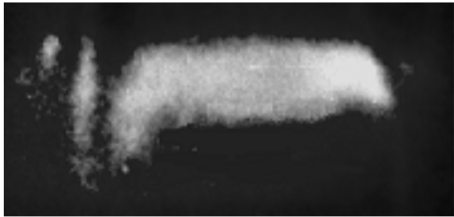


图 16 时间分辨束包络扫描结果

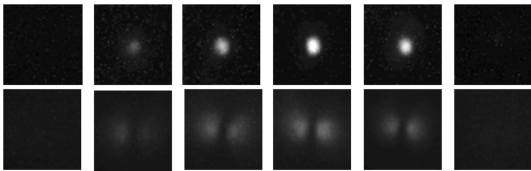


图 17 基于 OTR 时间分辨束发射度测量分幅图像

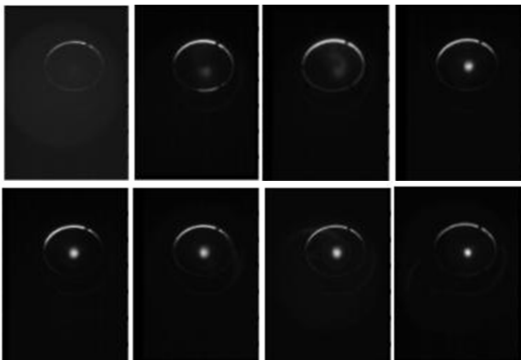


图 18 时间分辨束心分幅图像

9 结束语

中国工程物理研究院流体物理研究所是我国最早开展高功率脉冲技术研究单位,经过 50 年的发展,自主研发了一批国际先进水平的大型脉冲功率装置、高水平的脉冲功率技术基础研究实验平台、先进的脉冲功率测试和诊断技术及设备以及计算机软件,取得了大量重要的科研成果,促进了我国脉冲功率技术的发展和水平的提高,为我国核武器及高新技术武器的研制发展做出了非常重要的贡献,同时培养了一支高水平 and 具有较

强自主创新能力的高功率脉冲技术研究队伍. 流体物理研究所在重视研究的同时,还积极与国内外开展合作研究和学术交流,除邀请国外专家来所交流外,还积极选派科研骨干赴国外进行访问研究和参加国际学术会议;多次承办重要国际会议并创办了亚欧脉冲功率会议,提高了我国在国际脉冲功率领域的学术地位,扩大了国际影响. 倡导成立了全国脉冲功率技术及应用学会,作为学会理事长单位和学会依托单位,我们积极组织开展国内外学术交流. 经过半个世纪的发展,目前流体物理研究所已成为国内外有重要影响的高功率脉冲技术研究单位,将继续为提高我国高功率脉冲技术及应用研究水平而不断努力,为我国国防事业做出更大的贡献.

参考文献

[1] Li H T, Feng S P, Deng J J *et al.* Proc. of the First Euro-Asian Pulsed Power Conference. 2006(1):274
[2] Hao S R, Xie W P, Ding B N *et al.* Proc. of the First Euro-Asian Pulsed Power Conference. 2006(1):210
[3] Deng J J, Ding B N, Zhang L L *et al.* Proc. of LINAC,2002. 40
[4] Chen S F, Deng J J, Li X *et al.* Proc. of the First Euro-Asian Pulsed Power Conference,2006,1: 36
[5] Deng J J, Huang Z P, Wang H C *et al.* AIP Conference Proceedings of Beams,2002, 650: 49
[6] Ding B N, Deng J J, Zhang L L *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics,2005 (6): 604
[7] Jiang X G, Yang G J, Zhang K Z *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics,2005(11): 1095