



Z 箍缩等离子体的图像分幅诊断技术

王远*, 江孝国*, 杨礼兵, 黄显宾, 陈思富, 禹海军, 朱隽, 张开志

中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900

* E-mail: ideawy@163.com, J_xg_caep@sina.com

收稿日期: 2011-03-29; 接受日期: 2011-05-11

国防科技基础研究基金资助项目(批准号: 51077119)

摘要 具有时间分辨能力的高速分幅相机, 其幅间间隔时间达到 10 ns, 每幅曝光时间不大于 5 ns, 一次可以获得 8 幅图像, 图像分辨率为 1376×1035, 标准幅面可以达到 $\Phi 80$ mm, 满足在阳加速器上进行的 Z 箍缩内爆实验所要求的超快分幅诊断, 系统由高速分幅图像采集、远近端控制部分、触发时间同步系统组成, 该技术以分幅原理获得大幅面的图像数据, 具有图像特征清晰、空间信息详细的特点, 为 Z 箍缩过程的研究提供了翔实的实验数据.

关键词
阳加速器
时间分辨
Z 箍缩
高速分幅相机

对于在阳加速器上开展的 Z 箍缩内爆试验图像分幅诊断技术而言, 随着对其性能的研究深入和测试手段的进步, 已提出了对 Z 箍缩过程的研究必须具备高的时间分辨测量, 时间分辨测量的重要性在于可以了解喷气 Z 箍缩前期、中期、后期及等离子体界面不稳定性发展过程、丝阵 Z 箍缩过程等物理现象^[1], 并获得了定量分析的实验数据. 过去曾作过用扫描相机获取 Z 箍缩等离子体演变过程的摄影技术研究^[2], 由于所获结果仅限于等离子体区域上的一条细线, 图像数据非常不全面, 无法对 Z 箍缩的全面状况进行描述, 甚至有时候无法解释等离子体区扭曲、崩溃的现象^[3]; 所以要进行时间分辨测量, 必须具有幅间间隔时间 10 ns、每幅曝光时间不大于 5 ns 高速分幅相机. 结合快电子技术、图像增强技术、光学分光技术等多门学科的成果, 研制的可用于时间分辨测量领域的高速分幅相机, 幅间间隔时间达到 10 ns, 每幅曝光时间不大于 5 ns, 一次可以获得 8 幅图像, 图像分辨率为 1376×1035, 标准幅面可以达到 $\Phi 80$ mm; 利用该相机建立一套在阳加速器上开展的 Z 箍缩内爆实验图像分幅测量系统, 系统由高

速分幅图像采集部分、控制部分、触发时间同步系统组成. 该系统具有高速分幅、远近端计算机控制、触发时间精确同步, 从而获得可正确判读和处理的时间分辨图像^[4].

1 高速分幅相机结构

图 1 是高速分幅相机的结构示意图, 它主要由成像物镜、平行光转换及 8 路分光系统、8 路 ICCD 相机、时间控制系统和微机组成. 入射物光经主成像物镜后, 成像于平行光变换物镜的前焦平面上, 因此进入分光系统后的成像光线为平行光束, 由分光锥分为空间分离的 8 路光束, 8 路光束的每一束对应一路镜头耦合的 ICCD 相机, 由其上的镜头清晰地成像在 ICCD 的光敏面上, 图像信息则由计算机读取. 因此, 分光系统及相应的成像镜头在空间上将图像分为了 8 幅, 而在时间上则由多路时间控制系统产生控制 8 路 ICCD 顺序导通的门控信号, 从而获得在时间上也分开了的序列图像, 最终达到有时间分辨能力的图像采集能力. 表 1 是其性能^[5].

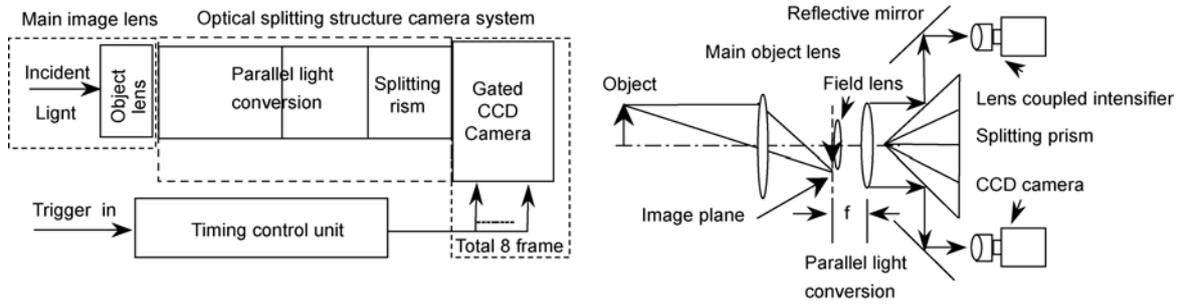


图1 高速分幅相机结构

表1 高速分幅相机主要性能

Exposure time (ns)	Interframing time (ns)	Delay time (ns)	Spatial resolution (lp mm ⁻¹)	Total frame
3	10, 20, 40	33.1		
5	80, 160, 320	32.7	~15	8
10	640, 1280	32.4		

2 时间分辨测量系统

图2是本时间分辨测量系统^[9]的实验布局的主要构成。当电流(或预脉冲电流)从功率系统往负载上输送时,通过阳加速器腔上的电流信号获取点得到电流同步信号,该信号作为同步触发系统的输入,经一定延迟后由其产生前沿较快的触发高速分幅相机快门的输入信号,分幅相机在经过内部的固有延迟后打开快门进行拍摄;如果延迟时间正确,则Z箍缩过程也正好落在相机拍摄的时间段,从而获得Z箍缩过程图像^[6]。

3 远近端计算机控制

在阳加速器上开展的喷气Z箍缩实验中采用了远近端控制技术^[7]。在实验中测量系统近端图像采集部分研制了紧凑型嵌入式控制系统,这样可以更加有效克服强烈电磁干扰信号,采用嵌入式控制系统改造原来的电路、传输电缆,研制了一套以光纤为传输线的触发系统。制作、完成了实用的、小型化的同步触发及控制系统,不仅完全解决了系统Z箍缩实验环境中被干扰的严重问题,而且该同步触发系统的延迟同步精度约1 ns。通过编制软件在远端控制近端测量系统,实现在远控端对相机进行远距离操作的。由分幅相机输出数字化的图像信号给嵌入式控制系统,嵌入式控制系统内装有图像采集卡以及触

发电路卡。在远端计算机上运行图像数据采集控制软件以及实验参数的调整和设置,实现分幅相机输出的图像数据采集与控制。嵌入式控制系统和远程控制计算机用光纤相连。图3是Z箍缩实验中嵌入式远程控制系统实验装置图。

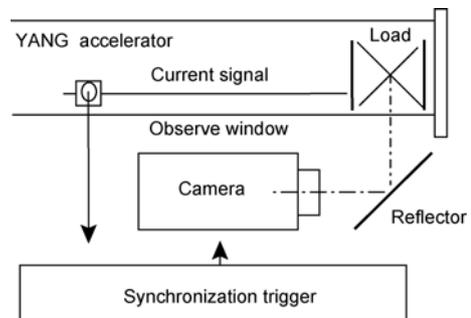


图2 阳加速器上进行Z箍缩的时间分辨测量系统

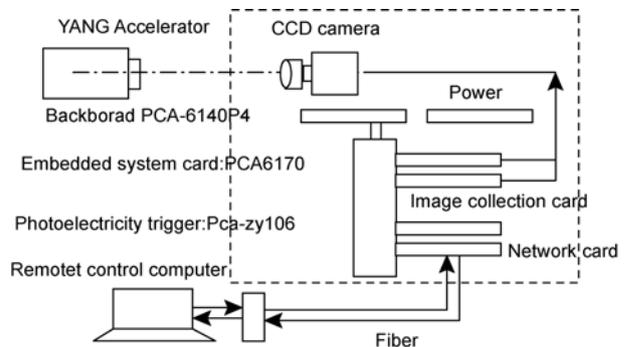


图3 Z箍缩实验中嵌入式远程控制系统实验装置图

4 触发时间同步系统

在 Z 箍缩实验中, 时间的确定是很重要的. 为了监测各时间关系, 建立了触发系统输入和各输出之间时间差别的测量系统, 利用测量结果可以获得相互的准确时间关系, 从而倒推准确的拍摄时刻. 图 4 是其主要波形的时间关系测量原理框图. 图 4 中的同步触发器框包含了图 4 中的同步、电光和光电转换部分; 示波器的一路用于记录加载电流的波形, 该波形用于判断是否与相机触发信号的匹配, 另一路用于记录箍缩时(或前后)X 光功率波形; 图 4 中隔离器起到的作用是将触发高速分幅相机的信号与电流信号、X 光功率信号进行电气隔离, 图中虚线表明通过同步机一路触发示波器, 同时触动相机; 并且在实际实验时, 只对电流波形、X 光信号和监测信号进行记录, 以使高速分幅相机系统与加速器平台之间不存在电气连接, 防止可能的电磁干扰. 为了得到监测信号与分幅相机触发信号间的时间差异, 对其进行了实际条件下的测量, 其中的光纤长度为 20 m, 表 2 是 13 次测量结果, 图 5 是相应的记录波形, 如果选定波形上相应电压处(如 2.5 V 处)进行延迟时间计算, 可以得到的固有延迟时间主要在 108.2~108.7 ns 间变化, 抖动在纳秒量级, 并以此为依据来倒推高速分幅相机的拍摄时刻, 精度也可以达到纳秒量级^[9].

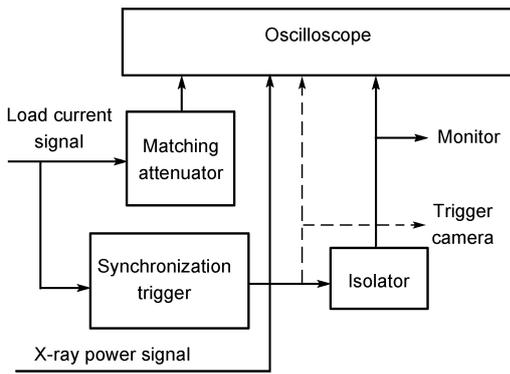


图 4 主要波形的时间关系测量原理

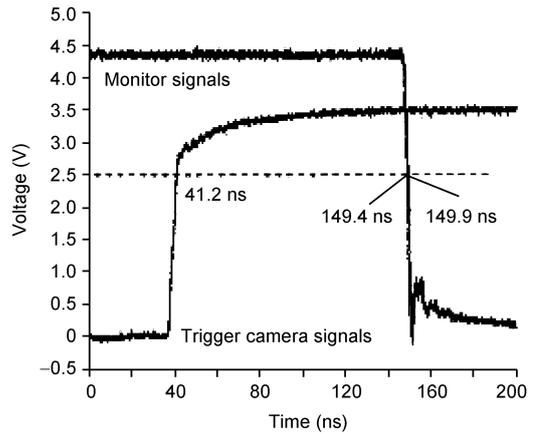


图 5 相机触发信号及监测信号波形

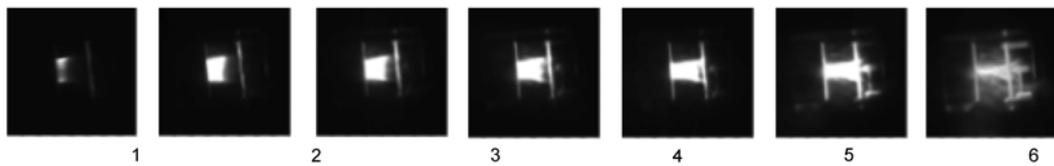
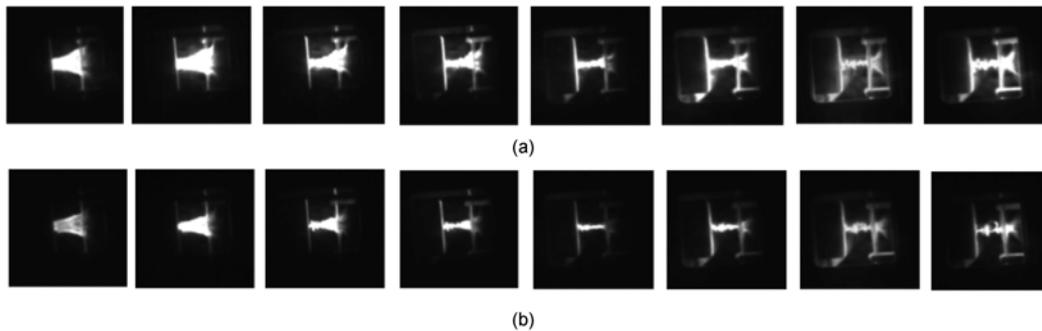
5 Z 箍缩的典型实验结果

时间分辨测量系统在阳加速器上进行了一系列的 Z 箍缩实验, 获得了成功应用, 稳定地获得了 Z 箍缩特定时刻的演变过程图像(电磁内爆早期等离子体的初步形成、等离子体向轴心箍缩的发展过程、等离子体内爆到芯时刻的景象、电磁内爆末期等离子体的崩溃等^[8]), 所获数据图像展现了在“阳”上进行 Z 箍缩实验获得的最新进展. 实验中, 负载电极间距为 20 mm, 从侧面进行测量; 所有图像的曝光时间为 3 ns, 幅间间隔为 10 ns.

图 6 是喷气 Z 箍缩早期(喷气阶段)的一个实验结果, 喷嘴在图中的左侧, 向右喷气, 主要目的是验证自行设计的超音速喷嘴结构的正确性. 从结果来看, 负载气体(已发生电离的等离子体)在向丝阵电极运动的过程中能较好地保持前沿面形和径向对称性, 获得了较好的喷气效果, 说明该超音速喷嘴的设计是成功的^[9]; 由图 6 同时可以测量到喷气时前沿运动的速度以及等离子体发光区域的径向收缩运动速度, 喷气后期的结果在图 7 中的现象则更加明显, 图 7 中 2010120102#实验的第 7 幅对应了箍缩点前后, 此时的等离子体区直径约 1 mm, 与文献[4]记录到的差不多, 而到第八幅时, 箍缩的等离子体开始崩毁^[10].

表 2 分幅相机触发信号与监测信号间的固有延迟时间(ns)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
108.233	108.749	108.231	108.736	108.559	108.518	108.324	108.313	108.692	108.564	108.578	108.490	108.447

图6 喷气 Z 箍缩早期过程: 2010113002[#]图7 典型的喷气 Z 箍缩
(a) 2010120102[#]; (b) 2010120201[#]

6 结论

Z 箍缩实验结果表明, 本时间分辨分幅图像诊断技术是完全可以满足目前 Z 箍缩实验的需要的. 该技术主要针对 Z 箍缩等离子体的可见光波段图像, 下一

步将开展等离子体的干涉诊断实验以及配合合适 X 光波段的分幅相机进行摄影^[11], 可以获得更加全面的数据, 对 Z 箍缩的深入研究具有重要意义^[12]. 从而获得一定的时间分辨能力以研究 Z 箍缩等离子体的演化过程.

参考文献

- 1 Ryutov D D, Derzon M S, Matzen M K. The physics of fast Z pinches. SAND, 98-1632, 1998
- 2 汪伟, 畅里华, 陈思富, 等. 强流脉冲电子束时间分辨测试技术研究. 光子学报, 2005, 34(6): 939-942
- 3 Hanson D L. Diagnostics development plan for ZR. SAND, 2003-2917, 2003
- 4 Li J, Huang X B, Xie W P, et al. Investigation of spectra unfold for a filtered X-ray diode array with improved smoothness. Rev Sci Instrum, 2009, 80: 063106
- 5 Nash T J, Derzon M S, Chandler G A, et al. Diagnostics on Z pinches. Rev Sci Instrum, 2001, 72(1): 1167-1172
- 6 江孝国, 李成刚, 王远, 等. 神龙一号电子束束参数测量系统猝发式的精确触发方式研究. 高能物理与核物理, 2006, 30(8): 784-787
- 7 王远, 江孝国, 杨国君, 等. OTR 时间分辨测量系统的嵌入式远程控制方法. 强激光与粒子束, 2006, 18(2): 300-304
- 8 Zeng Z Z, Qiu A C. Numerical study of the scaling of the maximum kinetic energy per unit length for imploding Z-pinch liner. Chin Phys, 2004, 13(2): 201-204
- 9 Spielman R B, Deeny C, Chandler G A, et al. Tungsten wire- array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ. Phys Plasma, 1998, 5(5): 2105-2111
- 10 Shelkovenko T A, Pikuz S A, Hammer D A, et al. Evolution of the structure of the dense plasma near the cross point in exploding wire Z pinches. Phys Plasmas, 1999, 11(6): 2840-2844
- 11 邱孟通, 吕敏, 王奎禄, 等. Z-pinch X 射线时间分辨多幅图像诊断系统. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 101-104
- 12 Deeny C, Douglas M R. Enhancement of X-ray power from a Z-pinch using nested-wire-ray. Phys Rew Lett, 1998, 81(22): 4883-4889