

# ICF 实验软 X 射线能谱仪对辐射能流时间关联测量的时标系统

宋天明<sup>†</sup> 易荣清 崔延莉 于瑞珍 杨家敏 朱托 侯立飞 杜华冰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011 年 2 月 23 日收到; 2011 年 5 月 29 日收到修改稿)

介绍了时标系统的构成、原理和数据处理方法, 并对时间关联的不确定度进行了分析. 该时标系统成功将软 X 射线能谱仪自身多个探测通道的信号以及三台不同位置处的谱仪的时间信号关联起来, 关联精度约为 70 ps. 在神光 III 原型激光装置上进行的实验中用软 X 射线能谱仪从不同方向测得辐射源和辐射输运管末端口辐射能流随时间的演化曲线, 反映了输运管内热波沿轴向传输以及软 X 射线辐射流衰减的物理过程.

**关键词:** 惯性约束聚变, 辐射能流, 时标系统, 绝对时间关联

**PACS:** 52.57.-z, 52.70.La

## 1 引言

惯性约束聚变相关物理实验中, 需要对软 X 射线辐射能流、能谱等随时间演化的过程进行测量<sup>[1,2]</sup>. 如在黑腔物理实验中, 需要从不同角度测量黑腔等效辐射温度随时间的演化过程<sup>[2]</sup>; 在辐射输运实验中, 软 X 射线辐射能谱经过低 Z 泡沫的吸收和输运管壁的吸收和再发射而得到改造, 输运管不同轴向位置、不同能区辐射流的延迟时间是重要的诊断量之一<sup>[3]</sup>. 在神光系列装置上进行的惯性约束聚变实验中, 使用了多台软 X 射线能谱仪从不同角度测量辐射能流、辐射温度以及能谱分布随时间的演化过程<sup>[4]</sup>; 使用平响应 XRD 阵列从不同的角度测量辐射能流的角分布<sup>[5,6]</sup>; 同时还使用三色谱仪记录不同能区软 X 射线的空间分布、时间演化等物理现象<sup>[3]</sup>.

在这些测量中, 多道谱仪的不同探测通道以及几种不同的探测设备受探测器距离光源的光程、传输电缆的长度和性能、示波器等记录设备的响应快慢等诸多因素的影响, 物理信号到达探测器灵敏面并转化为电信号并记录下来的时间相对于激光到达靶面的零时刻有不同的延迟时间. 多道谱仪

的各个探测通道的时间如果没有关联, 就不能进行解谱等数据处理; 不同探测设备间没有时间关联, 就无法对测量结果进行时间上的比对. 对软 X 射线能谱仪测量结果的不确定度分析也显示, 时间延迟是一项重要的不确定度来源<sup>[7]</sup>. 因此必须建立时标系统, 将不同诊断设备测量得到的数据和图像的时间过程绝对关联起来.

林宏奂等对神光 III 原型激光装置上建立的时标激光系统的原理进行了报道<sup>[8]</sup>. 国际上针对单一设备如条纹相机使用的时标系统<sup>[9,10]</sup>进行了深入的探讨, 对示波器测量的超短脉冲峰值的选取等数据处理细节问题<sup>[11]</sup>也进行了研究. 本文将对可以用于建立多台诊断设备间时间关联的时标系统的构成、获取共同时间零点的原理和方法、时标系统的稳定性以及实验测量的结果进行综合介绍, 并且对时间对齐的误差进行了分析. 最后给出了三台多道软 X 射线能谱仪的实验测量结果, 为进一步的物理分析提供了时间关联的辐射流测量数据.

## 2 时标系统的原理

神光 III 原型装置上的时标系统的示意图见

<sup>†</sup> E-mail: tianming.song@gmail.com

图 1. 它通过从打靶主激光中分出一束光(基频光), 经过时标激光器转化为间距 500 ps, 宽度 200 ps 的五个脉冲峰. 基频时标脉冲经过光电转换产生多路同步的电信号, 接入示波器作为软 X 射线能谱仪和平响应 XRD 的时标信号, 并提供触发源. 时标激光器产生的三倍频激光时标信号使用光纤引到 X 射线条纹相机的光阴极, 作为三色谱仪的时标信号.

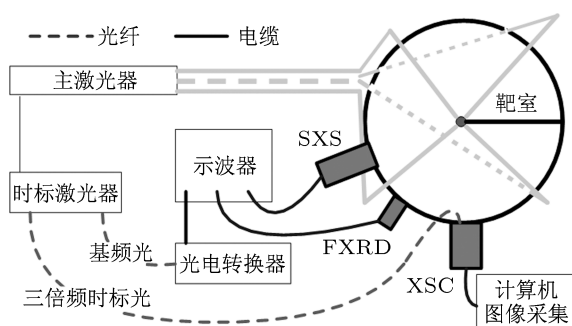


图 1 神光 III 原型装置上的时标系统示意图

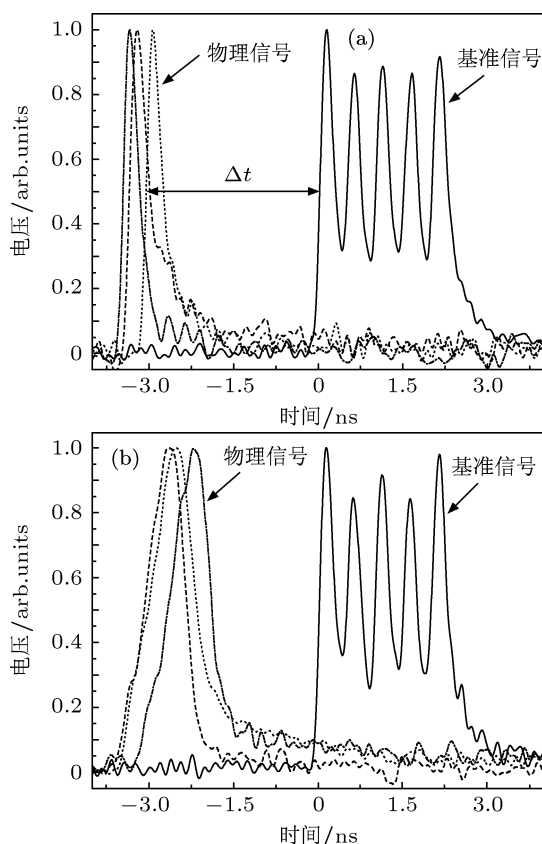


图 2 典型带时标信号的物理信号记录图像 (a) 短脉冲; (b) 长脉冲

为确定不同诊断设备共同的时间零点, 在正式的物理实验之前, 采用小能量短脉冲激光打靶的形式, 来获取物理信号和探测设备记录信号间的延迟时间, 确定物理信号的时间零点. 以神光 III 原型装

置上的实验为例, 采用 3 倍频激光, 8 束激光每束能量 100 J, 激光脉冲宽度为 250 ps 的短脉冲小能量打金球靶或金平面靶. 短脉冲激光和金靶作用产生的 X 射线在示波器上记录为上升沿较陡的窄脉冲信号. 利用它们陡峭的上升沿来确定物理信号和时标信号的延迟时间. 以软 X 射线能谱仪和平响应 XRD 阵列为例, 作为记录设备的一台示波器的四个通道记录到的短脉冲小能量时间基准打靶信号和大能量物理实验信号图线分别如图 2(a) 和 (b) 所示, 使用示波器的 1—3 通道记录物理信号, 使用第 4 通道记录从光电转换器中引出的时标信号. 时标信号同时作为示波器的触发源, 确定信号的时间零点. 为了方便比较, 将图 2 中信号幅度进行了归一化.

示波器记录的物理信号半高处与时标信号半高处的时间差为

$$\Delta t_{\frac{1}{2}} = t_{f_{\frac{1}{2}}} - t_{s_{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

其中  $t_{f_{\frac{1}{2}}}$  与  $t_{s_{\frac{1}{2}}}$  分别代表时标信号和物理信号半高处对应的时刻. 短脉冲物理信号上升沿半高处  $t_{s_{\frac{1}{2}}}$  和激光到达靶点的零时刻仍然具有一定的时间差. 因为驱动激光的脉冲形状并不是完美的矩形, 同时物理信号零点附近噪声较大, 因此激光到达靶点的时间无法准确确定. 我们采用上升沿半高处将信号对齐.

需要注意的是, 示波器获得时间零点采用时标信号上升沿绝对幅度触发的方式, 即当时标信号上升沿超过某个幅值, 示波器触发并设定该处为记录信号的零点. 时标信号的幅度和主激光的能量直接相关, 而短脉冲小能量和长脉冲大能量打靶, 示波器记录的时标信号的幅度不同, 因而其触发的位置也略有不同. 在测量长脉冲大能量信号时, 时标信号的触发位置对应的时刻和峰值半高处对应时刻  $t_{f_{\frac{1}{2}}}$  并不相等, 记录  $\Delta t_{\text{trigger}} = t_{f_{\frac{1}{2}}}$ . 如果触发信号上升沿比较陡, 或者上升沿触发电压和信号半高处的电压相近, 这个误差将较小. 图 2(b) 中触发信号上升沿 (10%—90% 信号峰值) 的时间跨度约为 150 ps,  $\Delta t_{\text{trigger}}$  约为 30 ps.

综上, 实际测量中, 将不同诊断设备得到的物理信号移到时间零点, 需要将物理信号的时间做平移:

$$t'_{\text{signal}} = t_{\text{signal}} + \Delta t - \Delta t_{\text{trigger}}. \quad (2)$$

### 3 不确定度分析

在实际的处理中,按照短脉冲半高处进行时间对齐的前提假设是不同探测通道时间响应相似,进而短脉冲半高处到达时间一致.而软 X 射线能谱仪的各个探测通道对光谱的响应能区不同,因此上述假设引入了误差,这个误差可以通过将所有短脉冲电压信号按半高处对齐,对其峰值时刻进行统计来估计.一台软 X 射线能谱仪各通道测得的短脉冲电压信号按上升沿半高处对齐的图线如图 3,峰值的不确定度为 24 ps.

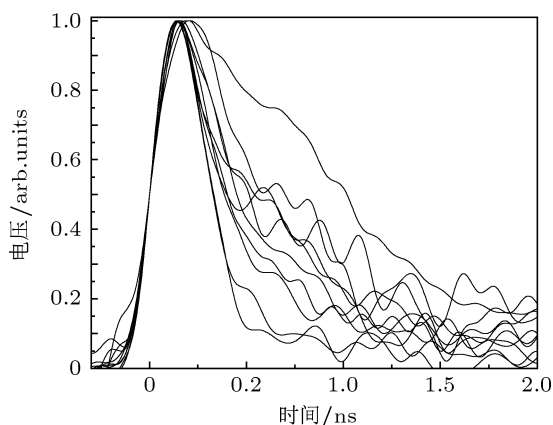


图 3 短脉冲打靶第一台谱仪各通道信号归一化曲线图

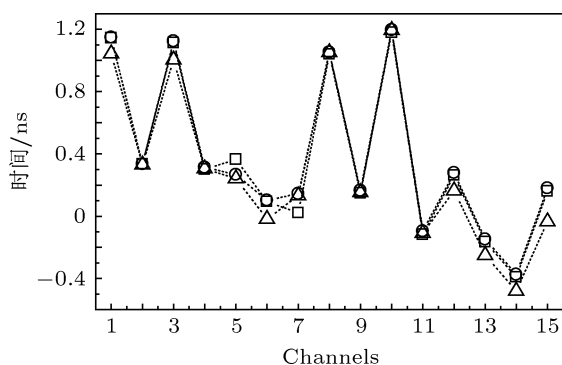


图 4 第一台谱仪各通道三次短脉冲物理信号和时标信号的时间差

三次短脉冲打靶确定的各个探测通道的物理信号相对于时标信号的延迟时间如图 4. 这个延迟时间受打靶产生的等离子体性质、光电转换器、电缆性质、示波器响应等因素影响,不同发次间有一定的波动.因为打靶发次有限,采用三发打靶数据无法准确给出所有探测通道的不确定度数据,但是通过对探测通道的信号数据进行统计分析,可以获得打靶发次间的波动引入的不确定度约为 65 ps,

作为所有探测通道的不确定度.综合考虑短脉冲谱形重合和发次间波动引入的误差,这个时标系统引入的时间关联不确定度约为 70 ps.

同样的时标系统还用于将平响应 XRD 和三色谱仪等诊断设备的时间测量结果关联起来.

### 4 实验数据处理

在神光 III 原型激光装置上进行的大长径比 CH 泡沫辐射输运实验中,大长径比输运靶由半腔源靶和填充有低密度 CH 泡沫的 1500  $\mu\text{m}$  长的辐射输运管组成.八路激光从源靶的激光注入口注入,在半腔内形成辐射场,源靶底端引出的辐射作为输运管的辐射源. X 射线在输运管内经过管壁的吸收和再发射,逐渐向管端输运.使用三台软 X 射线能谱仪从不同的角度进行辐射能流的测量.软 X 射线能谱仪 SXS<sub>1</sub> 从源靶的激光注入口 20° 方向测量辐射源的辐射温度.另外两台软 X 射线能谱仪 SXS<sub>2</sub> 和 SXS<sub>3</sub> 从大长径比输运管末端出口的 30° 和 67.5° 两个不同方向测量输运管壁不同区域的辐射能流.三台谱仪的视野范围如图 5(a) 所示.因为辐射到达管壁不同轴向区域的时间不同, SXS<sub>2</sub> 和 SXS<sub>3</sub> 两台谱仪测量到的辐射能流相对于 SXS<sub>1</sub> 测得的辐射源有不同的时间延迟.利用时标系统将各个探测通道测量的物理信号进行时间关联后,获得的三台软 X 射线能谱仪测量的辐射能流随时间的演化过程如图 5(b) 所示.下方两台软 X 射线能谱仪记录的辐射流相对 SXS<sub>1</sub> 记录的辐射源的辐射流信号有明显的时间延迟, SXS<sub>2</sub> 和 SXS<sub>3</sub> 测得辐射能流半高处的延迟时间分别为 933 ps 和 641 ps, 对应着辐射热波到达输运管相应轴向位置的时间延迟,据此可以推断热波传输的速度近似为  $1 \times 10^6$  m/s, 为超声速传播.因为软 X 射线能谱仪没有空间分辨,且视场较大,只能对热波速度进行近似估计. SXS<sub>1</sub>, SXS<sub>2</sub> 和 SXS<sub>3</sub> 测得峰值时刻的能流分别为  $3.56 \times 10^{18}$  W/m<sup>2</sup>,  $1.34 \times 10^{17}$  W/m<sup>2</sup> 和  $2.22 \times 10^{17}$  W/m<sup>2</sup>, 反映了 X 射线辐射在沿轴向的输运过程中由于管壁和填充物的吸收而逐渐减弱.上述实验数据为与进一步与二维辐射流体力学和辐射输运模拟计算结果进行比对提供了比无时间关联谱仪更为丰富的物理信息.

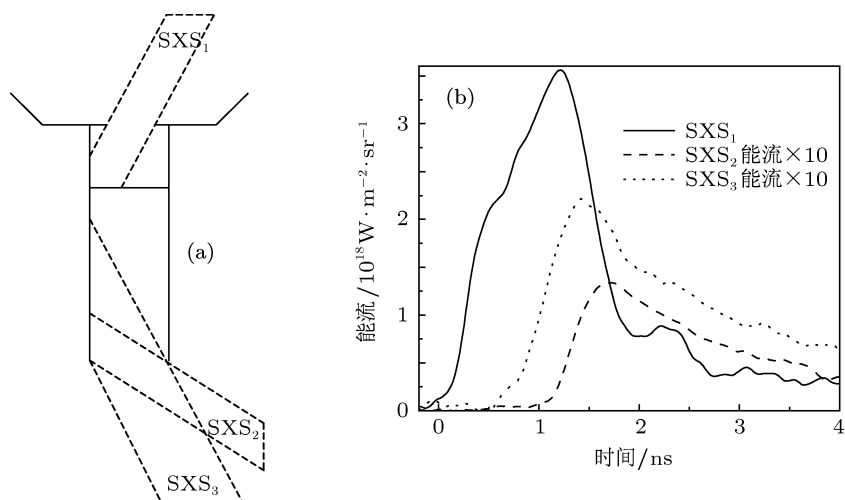


图5 软X射线能谱仪的(a)测量方位示意图和(b)测量的辐射能流

## 5 结论

在神光系列激光装置上进行的惯性约束聚变物理实验中使用了本文论述的时标系统,这个时标系统将三台软X射线能谱仪,以及平响应XRD阵列中的多只平响应XRD、三色谱仪等诊断设备进行了绝对时间关联.通过对神光Ⅲ原型激光装置上进行的大长径比CH泡沫辐射输运等实验中的数据进行的处理,成功地获得了从不同方向进行测量的三台软X射线能谱仪相互关联的辐射温度时间演化过程,观测到大长径比输运管管壁不同位置处辐射流相对于辐射源的时间延迟,计算出了热波传输的速度以及软X射线辐射沿轴向传输过程中的

强度衰减,据此可以更深入地了解黑腔和辐射输运靶中随时间演化的物理现象,并对二维甚至三维数值模拟程序进行更广泛的校对.

上述工作进行了时间关联的不确定度分析,初步的通道时间关联不确定度评估值为70 ps.但是短脉冲打靶次数较少,尚无法单独给出各个通道的时间关联的精确的不确定度.而实验要求的时间关联精度更高,如部分NIF实验对探测设备间的时间关联提出了好于30 ps的精度要求<sup>[10]</sup>.因此还需要进一步开展工作,对时标系统的稳定性进行评估,更准确地确定时间对齐的不确定度,并据此对时标系统做进一步的改进.

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S J, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Physics of Plasmas* **11** 339
- [2] Yi R Q, Li S W, Jiang S E, Du H B, Cui Y L, Sun K X, He X A 2008 *High Power Laser and Particle Beam* **20** 965 (in Chinese) [易荣清, 李三伟, 江少恩, 杜华冰, 崔延莉, 孙可煦, 何小安 2008 强激光与粒子束 **20** 965]
- [3] Jiang S E, Xu Y, Ding Y K, Lai D X, Zheng Z J, Sun K X, Huang Y X, Hu X, Yi R Q, Cui Y L 2005 *Science in China G* **35** 473 (in Chinese) [江少恩, 许琰, 丁永坤, 赖东显, 郑志坚, 孙可煦, 黄翼翔, 胡昕, 易荣清, 崔延莉 2005 中国科学 G 辑 **35** 473]
- [4] Sun K X, Yang J G, Zheng Z J 1990 *High Power Laser and Particle Beam* **2** 16 (in Chinese) [孙可煦, 杨建国, 郑志坚 1990 强激光与粒子束 **2** 16]
- [5] Tirsell G 1982 *UCRL* (New Orleans: Lawrence Livermore National Laboratory) 87946
- [6] Li Z C, Jiang X H, Liu S Y, Huang T X, Zheng J, Yang J M, Li S W, Guo L, Zhao X F, Du H B, Song T M, Yi R Q, Liu Y G, Jiang S E, Ding Y K 2010 *Rev. Sci. Inst.* **81** 073504
- [7] Li S W, Song T M, Yi R Q, Cui Y L, Jiang X H, Wang Z B, Yang J M, Jiang S E 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 058104 (in Chinese) [李三伟, 宋天明, 易荣清, 崔延莉, 蒋小华, 王哲斌, 杨家敏, 江少恩 2010 物理学报 **60** 058104]
- [8] Lin H H, Jiang D B, Wang J J, Li M Z, Zhang R, Deng Y, Xu D P, Dang Z 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 025208 (in Chinese) [林宏奂, 蒋东滨, 王建军, 李明中, 张锐, 邓颖, 许党朋, 党钊 2011 物理学报 **60** 025208]
- [9] Popil R, Fedosejevs R, Offenberger A A 1986 *Rev. Sci. Inst.* **57** 1049
- [10] Nilson D G, MacGowan B J 2006 *Rev. Sci. Inst.* **57** 2187
- [11] Lerche R A, Golick B P, Holder J P, Kalantar D H 2010 *Rev. Sci. Inst.* **81** 10E121

# Fiducial system for the diagnosis of temporal evolution of radiation fluxes with soft-X-ray spectrometer in inertial confinement fusion experiments

Song Tian-Ming<sup>†</sup> Yi Rong-Qing Cui Yan-Li Yu Rui-Zhen Yang Jia-Min  
Hou Li-Fei Zhu Tuo Du Hua-Bing

(*Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 23 February 2011; revised manuscript received 29 May 2011)

## Abstract

In inertial confinement fusion experiments, a fiducial system is established in order to correlate the signals from different channels of one spectrometer and the signals from different spectrometers to obtain time-related experimental data. The constitution, the principle and the data processing method, together with the uncertainty analysis are introduced. Signals from different channels and from three spectrometers diagnosing from different directions are correlated with an uncertainty of 70 ps. The time-related historical radiation fluxes from a cylinder target, measured from three different directions, are obtained in the experiments on Shenguang III prototype laser facility, offering the physical information about the heat wave propagation along the axis of the cylinder and the attenuation of soft X-ray radiation flux.

**Keywords:** inertial confinement fusion, radiation flux, fiducial system, absolute time relationship

**PACS:** 52.57.-z, 52.70.La

---

<sup>†</sup> E-mail: tianming.song@gmail.com