

# 高功率激光装置多路光束时间同步测试技术

孙志红 董 军 彭志涛\* 吕嘉坤 夏彦文 卢宗贵 刘 华

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 采用时间关联复测方法, 用光电管结合数字示波器, 利用高功率激光装置三倍频测量组件中的时间测量模块实现多路激光到达靶点时间同步的同发次测试。通过光束前端输出的任意波形发生器结合光纤放大传输组件中的光纤延迟器实现激光装置多束激光到达靶室时间同步精密调节, 分析结果表明多束激光束间同步测量精度小于 30 ps, 测试技术和方法为多路激光时间同步精密诊断提供技术支撑。

**关键词** 测量; 时间同步; 多束激光

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0908004

## Synchronization Measurement of Multi-Beams for High Power Laser Facility

Sun Zhihong Dong Jun Peng Zhitao Lü Jiakun Xia Yanwen Lu Zonggui Liu Hua

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

**Abstract** Synchronization measurement of multi-beams for high power laser facility is achieved at the same time. The time correlation and duplicate measurement method, temporal profile diagnostic module of tripled frequency, and the high-speed digital oscillograph and transient photodiode are used. The synchronization adjustment is obtained by arbitrary wave generator and optical delay cell of front end. Results show that the errors of the synchronization measurement are less than 30 ps. The measurement technology and methods are important for synchronization measurement of multi-beam laser facility.

**Key words** measurement; synchronization; multi-beams

**OCIS codes** 140.3460; 140.3295; 060.2300

### 1 引 言

多束激光时间同步到达靶点是衡量装置综合性能的一项重要指标参数,也是关系到惯性约束聚变(ICF)物理实验成败的关键参数。在 ICF 研究中,多路激光脉冲不但需要波形和能量一致,而且需要有很高的时间一致性,物理实验要求多路激光束必须精确同步到达靶点,故探讨时间波形及同步的测试和调节技术方法是非常重要的<sup>[1-5]</sup>。

根据装置的规模以及对束间同步测量精度要求,高功率激光装置所采用的多束时间同步测试技术不同。美国的 NOVA 和 OMEGA 装置采用两台条纹相机记录,每台记录五束光,每个条纹相机中的一束为专用时基,其束间同步测量精度可达

10 ps<sup>[6-7]</sup>。美国国家点火装置(NIF)装置上,采用了准直静态 X 光成像器和 X 光条纹相机测量,束间同步精度达到 6 ps<sup>[8]</sup>。国内的多路高功率激光驱动器的束间同步测试多采用光电管结合示波器和高精度条纹相机测量两种方法。神光-II 升级改造装置和神光-III 原型装置的束间同步测量,首先采用光电管结合示波器测量激光脉冲到达靶室窗口的束间同步精度,以任一路作为时间基准,测量时间基准信号与其他任意一路激光束的波形,通过调整相关光束的光程实现两路时间同步,再利用条纹相机进行多路激光时间差的精确测试,获得八路激光到达靶室窗口的束间同步精度控制在 10 ps 之内<sup>[9]</sup>,由于采用时间基准与其他路激光束分别进行重复比对测试

**收稿日期**: 2014-02-27; **收到修改稿日期**: 2014-05-03

**基金项目**: 国家自然科学基金(61377102)

**作者简介**: 孙志红(1965—),女,硕士,副研究员,主要从事光学检测技术方面的研究。E-mail: sunzh01@163.com

\* **通信联系人**。E-mail: Peng\_zhitao@163.com

方式,对于较多路光束的束间同步测量,需要花费较长时间。比较光电管和条纹相机这两种测试方法,条纹相机法虽然测量精度较高,在大型靶球上受到靶室和靶丸支撑系统承载能力等限制,测试过程复杂,而对于快速检测和调整时间同步,采用光电管结合示波器测试方法更适用,故在条纹相机进行精确同步测试之前首先采用光电管结合示波器法进行多路激光等光程初步测量和控制是非常重要的环节。

本文采用光电管结合示波器方法,利用大型激光装置的时间测量模块,对多路光束时间关联,从而实现激光装置多束激光到达靶点的时间同步的同发次测试,并分析了测试误差。

## 2 测试技术和方法

高功率激光装置多路激光从振荡器输出后,经过一系列的元件传输放大,从最后的放大级输出后通过二个频率转换晶体转换成三倍频光束,然后用楔形透镜聚焦光束到靶点,每束光从振荡器到靶点传输距离约 90 m,通过光束的光学长度的细致调节

实现多光束同时到达靶点。

要实现多数激光时间同步的同一发次的同时测量,必须对多个光束时间进行关联。对于多光束关联参数测试的关联方式很多,测量的 16 路激光测试点位于 4 m 半径靶室圆周的不同位置,测量中使用的示波器和电缆数量要尽可能少,电缆长度尽可能一致,综合考虑这些因素,采用多光束串联的关联布局方式,关联测试示意图见图 1。实验中共使用 5 个示波器,20 根 5 m 电缆和 4 个功分器,其中,1# 电缆为标准时间基准,每个示波器第一个通道为示波器四个通道测量信号的时间基准,示波器 1~5 的第 4 个通道与相邻的另一台示波器的第 1 通道进行时间串联的关联复测,功分器将一路信号等分为两路,例如,4# 和 5#、8# 和 9#、12# 和 13#、16# 和 17# 两个电缆是一个信号通过功分器获得的两路信号,分别接入两个示波器的第四和第一通道,同一个信号在两个示波器进行关联复测,基准脉冲信号将多个示波器的时基进行关联,从而通过同一发次测试数据就可以给出 16 路激光时间同步差值。

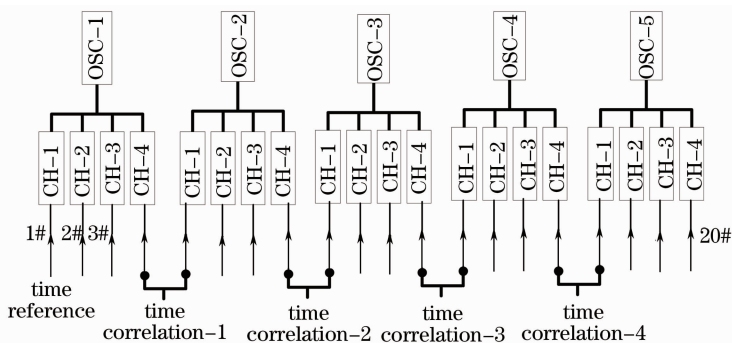


图 1 多光束时间关联测试示意图

Fig. 1 Relationship of time correlation of 16 beams

实验中,所使用的 20 根电缆的材料、长度及接头要尽可能一致,但是由于加工制作误差,总是存在差异,并且,功分器只是在关联通道中使用,故实验前,必须对所使用的 20 根 5 m 传输电缆和 4 个功分器的固有时间差进行测试,电缆的固有时间差测试示意图见图 2。用一台波长为  $1.053 \mu\text{m}$  的皮秒激光器作为光源,激光通过单模光纤连接到光电管

(1554B),光电转换后的电信号用功分器分成两路,一路连接 1# 电缆,1# 电缆作为 20 根电缆固有延迟测试基准,另一路接入其他电缆,分别测试其他电缆相对于 1# 电缆的固有时间差。测得的最大时间延迟为  $-2312 \text{ ps}$ ,最小为  $+450 \text{ ps}$ 。采用同样的测试方法测量所使用的 4 个功分器引入的时间延迟,皆为  $531 \text{ ps}$ 。

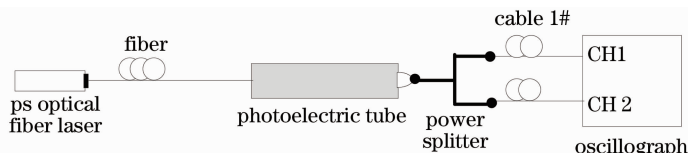


图 2 电缆相对于 1# 电缆固有延迟测试示意图

Fig. 2 Optical layout of the time difference measurement of cables relative to cable 1#

多路光束时间同步测量的理想位置应在靶点,但是由于靶室内的环境限制,在靶点附近不能架设测试设备,为了利用装置现有的测量设备,使用三倍频测量组件的时间测量模块内的光电管和示波器得到光束达到光电管的时间同步换算到靶点。三倍频测量组件装在终端光学组件内,靠近靶室球体,每一路光束配有一套三倍频测量组件。基频光束经过终端光学组件后变成三倍频光,三倍频激光通过取样光栅(BSG)<sup>[10]</sup>后的一级衍射光取样(约为入射激光

能量的2%)进入测量组件实现每路激光打靶前的能量和时间波形的诊断。图3以两路光束为例给出束间同步测试示意图。激光通过BSG、楔形透镜等光学元件后会聚到靶点,经取样光栅取样后的光束进入三倍频诊断包内的楔形取样镜和45°反射镜反射,将光束导出靶室,入射到位于靶室窗口的光电管记录时间波形,光电管前有大倍率衰减片和进行小倍率衰减的轮盘衰减器。

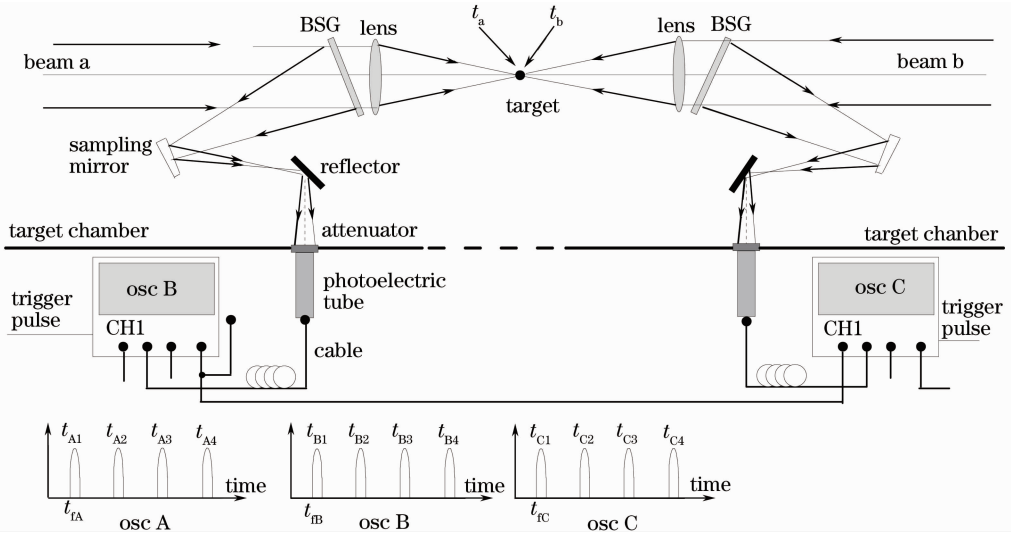


图3 光束时序关系的测试装置示意图

Fig. 3 Experimental setup for the concept of the fiducial system used for the time difference measurement of laser beams

根据BSG取样点、时间测量模块的光电管诊断点和靶点的位置关系,设光束a和b分别在 $t_a$ 和 $t_b$ 时刻到达靶点,在时间 $t'_a$ 和 $t'_b$ 到达光电管,光束a到达靶点与光电管在时间上存在以下关系:

$$t_a = t'_a + \Delta t_{a(\text{target})} - \Delta t_{a(\text{VPD})}, \quad (1)$$

式中 $\Delta t_{a(\text{target})}$ 为光束a经过的光路传输中,光栅取样点到靶点的时间间隔, $\Delta t_{a(\text{VPD})}$ 为光栅取样点到光电管的时间间隔。同样,光束b亦存在以下关系:

$$t_b = t'_b + \Delta t_{b(\text{target})} - \Delta t_{b(\text{VPD})}. \quad (2)$$

每个示波器的四个通道给出4个时间波形信号,第1通道信号为基准信号,A示波器的第1通道为束间同步测试的标准时间基准,A示波器的4通道与B示波器的1通道关联,B示波器的4通道与C示波器的1通道关联,以此类推。图3给出的两路光束a和b取样后分别由示波器B和C的第2通道测量时间波形,它们到达靶点的时间分别为

$$t'_a = (t_{B_2} - t_{B_1}) - \Delta t_{B_2\text{delay}} + \Delta t_{\text{osc B}}, \quad (3)$$

$$t'_b = (t_{C_2} - t_{C_1}) - \Delta t_{C_2\text{delay}} + \Delta t_{\text{osc C}}, \quad (4)$$

(3)式中,第一项 $(t_{B_2} - t_{B_1})$ 为光束a测试中B示波器的第2通道的时间信号相对第1通道(基准信号)的

时间延迟; $\Delta t_{B_2\text{delay}}$ 为接在示波器B第2通道的电缆、功分器(2通道没有使用)等原件引入的时间延迟总和,具体测试方法在前面已进行说明; $\Delta t_{\text{osc B}}$ 为示波器B的时间基准关联项,其中, $\Delta t_{\text{osc A}} = 0$ 。同样可以给出(4)式中各项的意义,在此不再赘述。以 $\Delta t_{\text{osc C}}$ 为例说明示波器的时间基准关联项的计算方法,

$$\Delta t_{\text{osc C}} = (t_{B_4} - t_{B_1}) + \Delta t_{\text{osc B}} + [\Delta t_{C_1\text{delay}} - \Delta t_{B_4\text{delay}}], \quad (5)$$

式中第一项为示波器B第4通道的时间信号相对第1通道的时间延迟,第二项为前一个示波器B的基准关联项,第三项为接到示波器C第1通道的电缆、功分器等原件引入的时间延迟总和与示波器B第4通道的时间延迟总和的差值。实验中,采用激光装置输出的160 ps的窄脉冲,同一发次同时测得16路激光到达光电管的时间波形,以时间波形峰值点作为束间同步的测量点<sup>[9]</sup>,根据多光束时序关系给出16路激光分别相对标准时间基准(示波器A的第1通道)的时间差,求均方根(RMS)[或峰谷(PV)]值即给出多路激光束间同步精度。

### 3 测量结果及分析

时间同步测试中,采用的双平面二极管的阶跃响应上升时间  $\tau_r \leq 60$  ps,接收口径  $\Phi 10$  mm,光谱响应 200~650 nm,瞬态数字示波器的模拟带宽 8 GHz,高速电缆和转接头的模拟带宽大于 16 GHz。根据测试得到的各路激光到达靶室窗口的时间差之间关系,通过调整任意波形发生器(AWG)波形生成的起始点,每点移动量为 100 ps,精密调整则通过调整前端系统光纤放大传输组件中的光纤延迟器,调节精度 1 ps,达到精密同步。由于激光装置输出脉冲为 160 ps 的高斯脉冲,采用峰值顶点更易判读。第一次给出每一光束所需要的时间调整量,之后,经过逐步调整确认光束同步在要求的范围。图 4 是调整前后的同步时序测试结果。与基准相比,调试前的时间差最大光程落后基准光束 684 ps(图中未画出),第一次调整光路光程后,重新测试的最大时间差值在 +9~ -33 ps 之间,如图 4 所示。

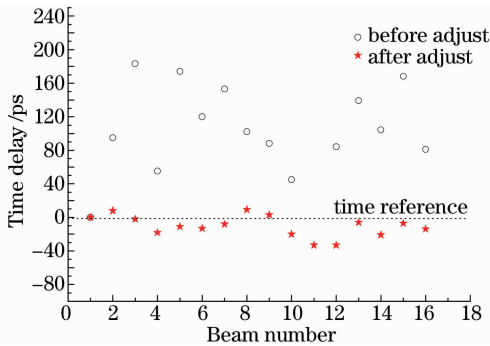


图 4 前端系统经过一次调整光纤长度后 16 束激光同步测试与调整前的时间延迟比较

Fig. 4 Comparison of time delay before and after adjustment by the adjustment of front end system

进一步调整激光束的光纤延迟器调整其光束光程,最终实现时间“零同步”。图 5 是第四示波器 4 个通道激光束时间波形按照峰值判读<sup>[9]</sup>,进行强度归一化处理后的结果。

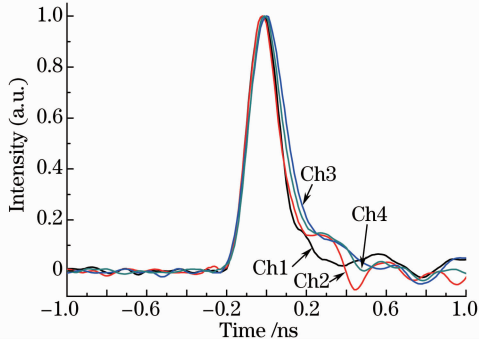


图 5 四路光束同步测试强度归一化数据处理结果

Fig. 5 Unitary results of four beams after data processing

激光装置多束激光束间同步测试不确定度的主要来源有:示波器的分辨率、光传输从打靶透镜(楔形透镜)经过 BSG、三倍频诊断模块到光电探测器(靶室窗口)的光程差、同步调整的调整精度、光传输从打靶透镜到达靶点之间差别,由于各量相互独立,束间同步测量不确定度可表示为  $\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2}$ ,式中,  $\delta_1$  为示波器的分辨率,为 2.5 ps/div;  $\delta_2$  为 BSG 到靶室窗口的光电管长度误差;光电管与衰减片等均装靶室窗口,BSG 到靶室窗口的光电管长度最大误差不会超过 4 mm,即 13.2 ps;  $\delta_3$  为前端系统光纤放大传输组件中的光纤行程器的分辨率,为 1 ps;  $\delta_4$  为打靶透镜到达靶点的偏移量,按照现激光器调节焦斑后的打靶透镜一定量最大不超过 8 mm,即 26.4 ps;则束间同步测量不确定度  $\delta = 30$  ps。因此采用此方法进行 16 路等光程范围控制在 30 ps 之内,精确的束间同步测试可以利用条纹相机进行。

### 4 结 论

针对高功率激光器时间同步测试中,涉及光束数多,测试点分布复杂等特点,采用多光束串联的时间关联测试方法实现单发次同时进行多路光束束间同步测试及同步光程调整,充分利用已有的测试仪器设备,同步调节效率高。通过对测试方法及测试过程分析,多束激光束间同步测量精度优于 30 ps。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Meicong, Zhu Mingzhi, Chen Gang, *et al.*. Research of transport beams arrangement in target area for large scale ICF facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 011403.
- 2 Sun Zhihong, Li Ping, Zhao Runchang, *et al.*. The technology of target positioning precision measurement of high power laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(8): 2121-2124.
- 3 Lu Zonggui, Xia Yanwen, Tang Jun, *et al.*. Pulse shape measurement technology for mult-beams infrared laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1129-1132.
- 4 Li Fuquan, Han Wei, Wang Fang, *et al.*. Research status of final optics assembly in high power laser facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060002.
- 5 Sun Zhihong, Dong Jun, Xia Yanwen, *et al.*. The temporal profile measurement of frequency modulation beams for high

- power laser facility [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40 (11): 1102009.
- 孙志红, 董 军, 夏彦文, 等. 高功率激光装置调频脉冲时间波形测试技术研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102009.
- 6 Donaldson W R, Boni R, Keck R L, *et al.*. UV power balance on the OMEGA laser[C]. SPIE, 1999, 3609: 121-127.
- 7 Lerche R A. Timing between streak cameras with a precision of 10 ps[C]. SPIE, 1991, 1346: 376-383.
- 8 Moses E I. National ignition facility: 1.8-MJ 750-TW ultraviolet laser[C]. SPIE, 2004, 5341: 13-24.
- 9 Liu Hua, Peng Zhitao, Xu Longbo, *et al.*. The study on synchronization measurement for multibeams laser [C]. 2009 Chinese Society for Measurement Symposium on Optical Radiation Measurement, 2009.
- 刘 华, 彭志涛, 徐隆波, 等. 多束激光时间同步测试技术研究 [C]. 2009 年中国计量测试学会光辐射计量学术研读者研讨会, 2009.
- 10 Peng Zhitao, Sun Zhihong, Liu Hua, *et al.*. Research on temporal profile measurement by BSG sampling [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s1): 280-282.
- 彭志涛, 孙志红, 刘 华, 等. 基于光栅取样的靶场激光参数诊断技术研究 [J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 280-282.

栏目编辑:何卓铭