

惯性约束核聚变激光驱动器多路光束时间同步测试方法

张 波 彭志涛* 吕嘉坤 孙志红 董 军 卢宗贵

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 提出了一种测量惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器靶点处多路光束时间同步的方法。首先测量参考光路脉冲到达靶点与到达基准点之间的时间间隔,然后测量待测光路脉冲到达靶点与参考光路脉冲到达基准点之间的时间间隔,计算得出待测光路脉冲与参考光路脉冲到达同一靶点的同步时间差。分析结果表明多束激光束间时间同步测量精度小于25.2 ps,测试技术和方法具有简单高效的特点,已成功应用于ICF激光驱动器多路强激光时间同步精密诊断。

关键词 测量;时间同步;靶点;示波器;光电管;多束激光

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0208003

Multi-Beams Time-Synchronization Measurement for Inertial Confinement Fusion Laser Facility

Zhang Bo Peng Zhitao Lü Jiakun Sun Zhihong Dong Jun Lu Zonggui

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

Abstract A method measuring timing synchronization of multi-beams laser for inertial confinement fusion (ICF) facility is proposed. Firstly, the time interval of reference laser beam arriving criterion point and target point is measured. Secondly, the time interval of reference laser beam arriving criterion point and measured laser beam arriving target point is measured, the D-value between these two intervals stand for the time synchronization difference between reference beam and measured beam arriving the same target point. The analysis shows that the precision of this method is 25.2 ps. The measurement technology is simple and efficient, and it has been successfully applied in the synchronization measurement of ICF laser facility.

Key words measurement; timing-synchronization; target point; oscilloscope; phototube; multi-beams

OCIS codes 120.4640; 140.3460; 140.3295; 060.2300

1 引 言

惯性约束核聚变(ICF)装置中,为提高到靶能量,通常采用多束激光同时聚焦打靶的方式。多路激光到达靶点的束间时间同步性直接关系到ICF实验的成败,多束激光束间靶点时间同步精密测试对于提高激光装置束间功率平衡诊断能力,提高装置总体性能具有重要意义^[1-5]。

ICF激光驱动器时间同步测试中主要有以下几种方法,美国NOVA装置,在光束到达靶室前的Pickoff镜处取样,使用条纹相机测量各待测光束与时标光束的差值,从而给出各光路之间的时间同步差,时间同步测量精度为10 ps^[6]。美国国家点火装置(NIF)采用X光条纹相机进行同步测量,通过测试高能脉冲打靶时所激发X光的产生时刻给出各光路到达靶点的时间同步差,测试前需预先对光束的入射角和离焦量进行调节,

收稿日期: 2015-07-08; 收到修改稿日期: 2015-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(61377102)

作者简介: 张 波(1988—),男,硕士,研究实习员,主要从事激光参数测量方面的研究。

E-mail: zhangbo19880331@sina.com

*通信联系人。E-mail: peng_zhitao@163.com

使得各路光束在靶点处相互间存在微小的空间间隔,其时间同步测量精度为 6 ps^[7]。神光 II 装置采用在靶点处放置一个内置多路光纤的模拟靶丸将光束耦合条纹相机,测试前预先对各路光纤的延时差异进行标定并调节模拟靶丸的姿态使得模拟靶丸中各引光孔与光路精确衔接,时间同步测量精度为 10 ps;神光 III 原型装置采用在靶室窗口对光束取样,使用光电管结合示波器的测量方法,测试前预先对探测器和信号电缆的延时差异进行标定,测试中通过改变光电管的位置获得测试光路相对于参考光路光束到达取样点的时间同步差^[8];神光 III 主机装置初期使用靶场三倍频时间测量模块,即取样测量点在测量模块中,采用关联复测的方法进行多路光束时间同步精度测量,测量精度为 30 ps^[9]。

为了获得多路光束到达靶点处时间同步的直接测量,本文在靶点放置一具有较大的光束接收角度的快响应光电管,在参考点放置另一快响应光电管,使用低能量重频脉冲,获得被测光路与基准光路到达靶点的时间同步差值。该方法设备布局简单,由于使用低能量重频脉冲,测试效率高,尤其适用于同步差的实时观测调整,所提出的测试技术和方法实现了靶点处束间同步的直接快速测试。

2 测试方法

ICF 激光器驱动器中,靶点为多路激光的会聚点且激光脉冲宽度远大于束间时间同步精度测试要求,如果将单个探测器置于靶点处对多束激光束间同步差进行直接测试,脉冲之间会发生时间上的混叠而无法分辨同步误差。采用的时间同步测试方法其原理如图 1 所示,测试时首先测量参考光路脉冲到达靶点与到达基准点之间的时间间隔,然后测量待测光路脉冲到达靶点与参考光路脉冲到达基准点之间的时间间隔,两个时间间隔相比较得出待测光路脉冲与参考光路脉冲到达同一靶点的同步时间差。图 1 中,光电管 1 置于靶室中心且光电管 1 光敏面过靶点;光电管 2 置于参考光路中处的基准点处,光电管 1 和光电管 2 的输出信号分别接到示波器的 CH1 和 CH2 上;光电管 2 后有一可推入/推出的挡光板,挡光板推入后,参考路激光脉冲不能到达靶点。

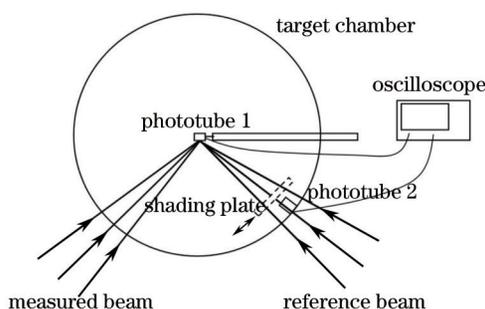


图 1 时间同步测试原理图

Fig.1 Diagram of synchronization measurement principle

首先,参考光路发射激光脉冲,脉冲的一部分入射到光电管 2 上,剩余部分入射到光电管 1 上,在示波器上读出参考光路脉冲到达靶点与到达参考点之间的时间间隔为

$$\Delta t_s = t'_a - t'_b, \quad (1)$$

式中 t'_a 为示波器上参考光路脉冲到达靶点时刻的示值, t'_b 为示波器上参考光路脉冲到达参考点时刻的示值, $t'_a = t_a + \delta t_{1(\text{phototube})} + \delta t_{1(\text{cable})}$, $t'_b = t_b + \delta t_{2(\text{phototube})} + \delta t_{2(\text{cable})}$, t_a 为参考光路脉冲达到靶点处的时刻, $\delta t_{1(\text{phototube})}$ 为光电管 1 的渡越时间, $\delta t_{1(\text{cable})}$ 为光电管 1 信号电缆的传输延时, t_b 为参考光路脉冲达到靶点处的时刻, $\delta t_{2(\text{phototube})}$ 为光电管 2 的渡越时间, $\delta t_{2(\text{cable})}$ 为光电管 2 信号电缆的传输延时。

之后,推入挡光板,参考光路和待测光路同时发射激光脉冲,待测光路脉冲入射到光电管 1 上,参考光路脉冲入射到光电管 2 上,在示波器上读出待测光路脉冲到达靶点与参考光路脉冲到达基准点之间的时间间隔为:

$$\Delta t_m = t'_c - t'_b, \quad (2)$$

式中 t'_c 为示波器上待测光路脉冲到达靶点时刻的示值, $t'_c = t_c + \delta t_{1(\text{phototube})} + \delta t_{1(\text{cable})}$, t_c 为待测光路脉冲达到靶点处的时刻, $\delta t_{1(\text{phototube})}$ 为光电管 1 的渡越时间, $\delta t_{1(\text{cable})}$ 为光电管 1 信号电缆的传输延时。

待测路脉冲和参考路脉冲到达靶点的时间同步差为 $\Delta t = \Delta t_m - \Delta t_s$ 。根据(1)、(2)式可得到 $\Delta t = \Delta t_c - \Delta t_a$ ，即 Δt 的值与光电管 1 与光电管 2 的渡越时间差异、光电管 1 信号电缆与光电管 2 信号电缆的传输延时差异均无关。若 $\Delta t = 0$ ，说明待测路与参考路到达靶点的时间达到完全同步；若 $\Delta t > 0$ ，说明待测光路脉冲滞后于参考光路脉冲到达靶点，滞后量为 $|\Delta t|$ ；若 $\Delta t < 0$ ，说明待测光路脉冲超前于参考光路脉冲到达靶点，超前量为 $|\Delta t|$ 。当 $\Delta t \neq 0$ 时需要根据 Δt 的值在光路输出的前端对待测路脉冲到达靶点处的光程进行调整，粗调通过任意波形发生器(AWG)完成，调节精度为 100 ps；精细调节通过光纤延时器完成，调节精度 1 ps，同时在示波器上观察调节结果，直到观察到 $\Delta t = 0$ 。之后，更换另一待测路进行测试，直至所有待测路均测试完毕。

要准确测量得到两个脉冲之间的时间间隔，测试脉冲的时间波形中应具有明显的特征点，比如拐点或顶点。测试中光电管的信号处理电路、传输电缆及示波器的放大电路均可视为有限带宽的低通滤波器，脉冲信号通过后其时间波形会产生畸变，影响测量特征点的选择。ICF 激光驱动器输出通常为平顶脉冲或高斯脉冲，图 2(a)、(b)分别为脉宽为 200 ps 的平顶脉冲和高斯脉冲在通过一个 8 G 带宽理想低通滤波器后的波形变化。从图 2 可知，平顶脉冲经过低通滤波器后波形明显畸变，其拐点已不能明显分辨，相对于平顶脉冲，高斯脉冲具有更小的波形畸变，且顶点位置不产生移动。因此，在测试中选用 200 ps 脉冲宽度的高斯脉冲进行同步精度测试并选取高斯脉冲的顶点作为特征点测量两个脉冲之间的间隔，能够获得准确的时间同步测量结果。

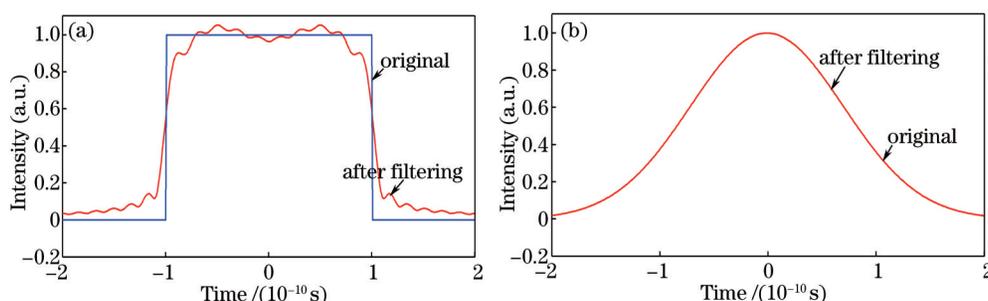


图 2 脉冲经过理想低通滤波器后的波形变化。(a) 平顶脉冲；(b) 高斯脉冲

Fig.2 Alteration of pulse after passing low passing filter. (a) Flattop pulse; (b) Gaussian pulse

测试中，为避免频繁调整光电管 1 的位置和姿态，光电管 1 应具有较大的光束接收角度，当光电管 1 接收角度(天顶角)大于测试光路光轴与靶室赤道面法线所成的最大夹角时，光电管 1 只需定位两次即可完成靶室上下两个半球所有待测光路的时间同步测试。

3 测试结果及分析

实验中，采用 200 ps 高斯脉冲进行时间同步测试，所用半导体光电管阶跃响应上升时间 $\tau_r \leq 35$ ps，接收口径 $\Phi 6$ mm，光谱响应范围 300~1700 nm；实时数字示波器的模拟带宽 8 GHz，最大采样率 40 GS/s；高速电缆和转接头的模拟带宽大于 16 GHz。测试时，首先测量参考路脉冲到达靶点与到达基准点的时间差 Δt_s ，如图 3 所示，测量得到 $\Delta t_s = 9.26$ ns；随后调整示波器 CH1 通道时基超前于 CH2 通道 9.26 ns，测量待测路脉冲到达靶点与参考路脉冲到达基准点之间的时间间隔 Δt_m ，此时示波器上两个脉冲之间的时间间隔即为待测路与参考路到达同一靶点的时间同步差 Δt ，图 4 为调整示波器两通道延时后观察到的时间同步差测量结果， $\Delta t = 2$ ps。

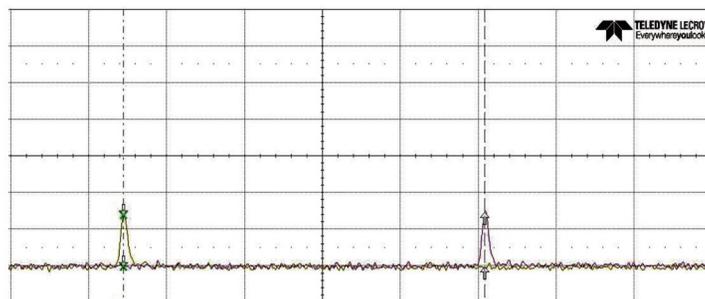


图 3 参考路到达靶点与基准点的时间差测量结果

Fig.3 Measurement result of time interval between reference beam arriving criterion point and target point

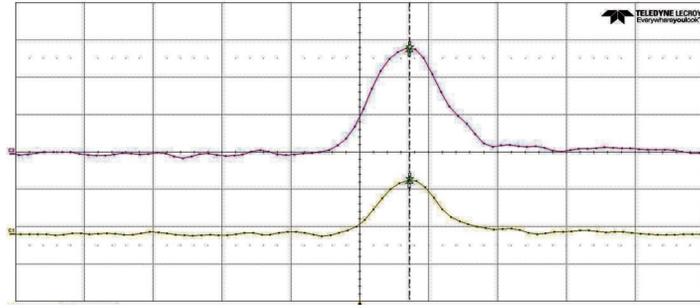


图4 同步差测量结果($\Delta t=2$ ps)

Fig.4 Measurement result of synchronization D-value ($\Delta t=2$ ps)

ICF激光驱动器多路光束时间同步测试的误差来源主要有三部分,示波器的示值误差 δ_1 ,波形畸变带来的读数误差 δ_2 和靶点处光电管定位偏差带来的测量误差 δ_3 。根据待测光路与参考光路脉冲到达靶点的时间同步差表示式, $\Delta t = \Delta t_m - \Delta t_s$,由于 Δt_s 和 Δt_m 互不相关,示波器示值误差为 $\delta_1 = \sqrt{\delta_{1s}^2 + \delta_{1m}^2}$,其中 δ_{1s} 和 δ_{1m} 分别为测量 Δt_s 和 Δt_m 时的示波器示值误差,可以表示为 $\delta_{1s}(\delta_{1m}) = \pm[0.06\Delta p + 10^{-6} \times \Delta t_s(\Delta t_m)]^{110}$,其中 Δp 为示波器的采样间隔;测试时 $\Delta p=25$ ps, $\Delta t_s=9.26$ ns, $\Delta t_m \approx \Delta t_s$,计算得到 $\delta_1=2.1$ ps。同理,波形的畸变带来的读数误差 $\delta_2 = \sqrt{\delta_{2s}^2 + \delta_{2m}^2}$, δ_{2s} 和 δ_{2m} 分别为测量 Δt_s 和 Δt_m 时的读数误差,该项误差主要是由于示波器的有限采样率引起的,测试中示波器采样率为每点25 ps,高斯脉冲中心点测量最大误差为12.5 ps,测量 Δt_s 和 Δt_m 时引入的测量误差 $\delta_{2s}(\delta_{2m}) = \sqrt{\delta_{i_s}^2 + \delta_{i_m}^2(\delta_{i_s}^2)} = 18.7$ ps,计算得到 $\delta_2=25$ ps。测试时,放置在靶室中心光电管1的光敏面与靶室的赤道面可能存在偏离,如图5所示,光电管1的光敏面偏离靶点距离为 L ,此时,若参考路与待测路的入射角不同,将会产生测量误差。若两束光到达靶点的光程差为 l_1-l_2 ,同步测量误差为 $\delta_3 = (l_1 - l_2)/c$ 。测试时通过靶监测仪观察来调整光电管1的位置和姿态,光电管1光敏面距离靶室赤道面的定位偏差 L 小于1 mm;根据光路的实际排布位置,参考光路及待测光路光轴与光电管1光敏面法线夹角 α 和 β 的可能取值为 55° 、 49.5° 和 25° ,当 $\alpha = 55^\circ$, $\beta = 25^\circ$ (或 $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 55^\circ$)时可求得由于定位偏差导致的最大同步测量误差 $\delta_3 = (0.001/\cos \alpha - 0.001/\cos \beta)/(3 \times 10^8) = 2.1$ ps。以上三项误差 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 互不相关,时间同步测量的最大误差为 $\delta = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2} = 25.2$ ps。

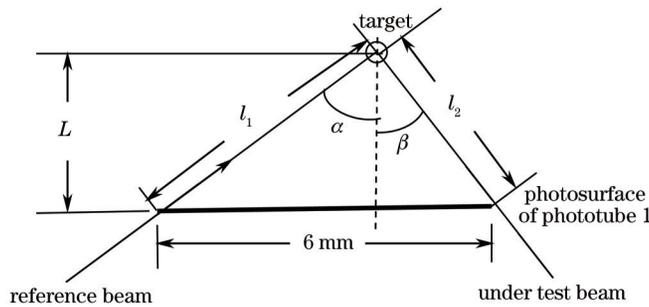


图5 定位偏差所致同步测量误差计算示意图

Fig.5 Diagram of calculating measurement error caused by positional deviation

4 结 论

提出了一种ICF激光驱动器束间时间同步的测试方法,通过比较参考光路脉冲到达靶点与到达基准点之间的时间间隔和待测光路脉冲到达靶点与参考光路脉冲到达基准点之间的时间间隔,得到待测光路脉冲与参考光路脉冲到达同一靶点的时间同步差值。该方法消除了光电管渡越时间和电缆传输延时对测量结果的影响,多路测量时无需挪动或增加测量设备,操作简单,测量效率高。测试方法与技术已成功应用于ICF激光驱动器多路激光时间同步测试。

- 1 Wang Meicong, Zhu Mingzhi, Chen Gang, *et al.*. General layout and structure design of ICF facility[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(3): 701–708.
王美聪, 朱明智, 陈 刚, 等. 惯性约束聚变装置总体布局和结构设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3): 701–708.
- 2 Chen Ningbo, Li Fuquan, Feng Bing, *et al.*. Research on route optimization for laser beam alignment at target area of an ICF laser system [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0202005.
程宁波, 李富全, 冯 斌, 等. ICF激光装置靶场光束引导路径的优化研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0202005.
- 3 William R Donaldson, Robert Boni, Robert L Keck, *et al.*. UV power balance on OMEGA laser[C]. SPIE, 1999, 3609: 121–127.
- 4 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.
- 5 Shao Ping, Xia Lan, Zhao Dongfeng, *et al.*. Measurement and debugging of wedge-shaped lens in high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2015, 40(4): 1102009.
邵 平, 夏 兰, 赵东峰, 等. 高功率激光装置终端楔形透镜的测量与调试[J]. 中国激光, 2015, 40(11): 1102009.
- 6 R A Lerche. Timing between streak cameras with a precision of 10 ps[C]. SPIE, 1991, 1346: 376–383.
- 7 B M Van Wonterghem, S C Burkhart, C A Haynam, *et al.*. NIF Commissioning and Initial Performance Results[R]. Lawrence Livermore National Lab, 2003: UCRL–CONF–155818.
- 8 Liu Hua, Peng Zhitao, Xu Longbo, *et al.*. The study on synchronization measurement for multibeams laser[J]. ACTA Metrologic Sinica, 2009, 30(6A): 181–185.
刘 华, 彭志涛, 徐隆波, 等. 多束激光时间同步测试技术研究[J]. 计量学报, 2009, 30(6A): 181–185.
- 9 Sun Zhihong, Dong Jun, Peng Zhitao, *et al.*. The synchronization measurement of multi-beams for high power laser facility [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0908004.
孙志红, 董 军, 彭志涛, 等. 高功率激光装置多路光束时间同步测试技术[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0908004.
- 10 苏水金. 利用实时示波器进行高精度时间测试和分析[J]. 电子设计与应用, 2008, (9): 92–95.

栏目编辑: 何卓铭