

基于共轭反射的高功率激光装置脉冲同步测试技术

张波**, 彭志涛*, 夏彦文, 吕嘉坤, 卢宗贵, 孙志红, 董军

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 提出一种基于共轭反射的高功率激光装置靶点时间同步测试方法。首先在靶点两侧放置一对相互平行、相对靶点距离相等的反射镜,在反射镜关于靶点的共轭像点处放置两个高速光电探测器,随后将靶室上下两个半球入射到靶点的激光分别反射到共轭像点的两个光电管上,光电管输出波形信号的时间间隔即为待测光路之间的时间同步差。该测试方法具有操作简单、测试效率高等特点,已成功应用于高功率激光装置多路激光时间同步的精密诊断。

关键词 测量; 时间同步; 靶点; 共轭; 反射

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0104002

Conjugate-Reflection-Based Measurement of Time-Synchronization in High-Power Laser Facility

Zhang Bo**, Peng Zhitao*, Xia Yanwen, Lü Jiakun, Lu Zonggui, Sun Zhihong, Dong Jun

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

Abstract A conjugate-reflection-based time-synchronization measurement method is proposed for target points of a high power laser facility. First, two parallel reflectors with equal distances from the target point are placed on both sides of the target point, and simultaneously two high-speed photodiodes are placed on the conjugate image point of the target point. Second, two laser beams from the up and down hemispheres in the target chamber are reflected to the two photodiodes placed on the conjugate image point of the target point, and the time interval between two output signals from the two photodiodes is just the time-synchronization difference between the optical paths to be measured. The proposed measurement technology possesses nice characteristics of simple operation, high test efficiency, which has been successfully applied in the time-synchronization measurement of multiple laser beams in high-power laser facilities.

Key words measurement; time-synchronization; target point; conjugation; reflection

OCIS codes 120.5700; 140.3295; 140.3290

1 引 言

在惯性约束聚变实验中,为保证实验效果,要求高功率激光装置发出的多束激光束同时到达靶点来对靶丸进行压缩。多束激光的时间同步测量精度和调节速度,对于提高装置运行能力和运行效率具有重要意义^[1-3]。

高功率激光装置主要采用如下几种方法对靶点处脉冲时间进行同步测试。1)美国诺瓦(NOVA)装置在靶室前的 pickoff 镜处对光束进行取样,利用

条纹相机测量各待测光束与时标光束的时间同步差,从而得到各光路间的时间同步差,同步测量精度为 10 ps^[4]。2)美国国家点火装置(NIF)通过测试高能激光打金盘靶所激发 X 光的时间同步来反演激光脉冲在靶点处的时间同步,测试前需精确调节各路激光在靶盘上的弹着点,其时间同步测量精度为 6 ps^[5]。3)我国的神光 II 装置早期采用通过模拟靶丸及光纤将光束导引到单个条纹相机进行同步测试的方法,测试前需要对模拟靶丸的姿态进行精密调节,使得模拟靶丸中各光纤耦合透镜与光路精确

收稿日期: 2018-06-22; 修回日期: 2018-08-24; 录用日期: 2018-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(61605185)、中国工程物理研究院激光聚变研究中心青年人才成长基金(RCFCZ-2017-12)

* E-mail: peng_zhitao@163.com; ** E-mail: zhangbo19880331@sina.com

对接,束间时间同步测量精度为 $10\text{ ps}^{[6]}$;该装置升级改造后采用在靶室窗口对光束取样,并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^[7]。我国的多路大型高功率激光装置在建设初期采用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,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到时间同步差的方法,测试精度为 $25.2\text{ ps}^{[8]}$ 。

为了缩短测试准备时间,同时规避操作人员进入靶室所带来的安全风险,本文提出了一种基于共轭反射的时间同步测试方法。首先,在靶点两侧放置一对相互平行、相对靶点距离相等的反射镜,在反射镜关于靶点的共轭像点处放置两个具有较大接收角度的高速光电探测器;随后,将靶室上下两个半球入射到靶点的低能量重频脉冲激光分别反射到共轭像点处的两个光电管,光电管输出波形信号的时间间隔即为待测光路之间的时间同步差。该方法的准备时间短、测试效率高,能够充分利用现有靶室中心监测设备对反射镜位置进行快速精确定位,实现靶点处多路光束同步差的快速实时观测调整。

2 测试原理及方法

高功率激光装置输出的脉冲宽度通常远大于束间时间同步精度的测试要求^[9],无法使用单个探测器在靶点处对同步差进行直接测试。为实现靶点处多束激光时间同步的精密测量,需要对入射到靶点处的激光进行空间分离,所采用的时间同步测试方法的原理如图 1 所示。

测试前,在靶室外将靶点同步测量组件固定在靶传感器支架上并通过靶传感器精密搭载平台将支架及同步测量组件一并送入靶室内。靶点同步测量组件主要由反射镜 1、反射镜 2、光电管 1、光电管 2、定位基准及配套支撑结构组成,其中光电管 1 和定位基准关于反射镜 1 共轭对称,光电管 2 和定位基准关于反射镜 2 共轭对称;随后通过使用靶室中心监测仪观测定位基准对靶点同步测量组件的位置进行调节,直至定位基准位于靶室赤道面。此时光电管 1 和靶点关于反射镜 1 共轭对称,光电管 2 和靶点关于反射镜 2 共轭对称,靶室上半球任意角度入射到靶点的光束经反射镜 1 反射后入射到光电管 1,且光束到达光电管 1 的光程与到达靶点的光程相等;靶室下半球光束任意角度入射到靶点的光束经反射镜 2 反射后入射到光电管 2,且光束到达光电管 2 的光程与到达靶点处的光程相等。

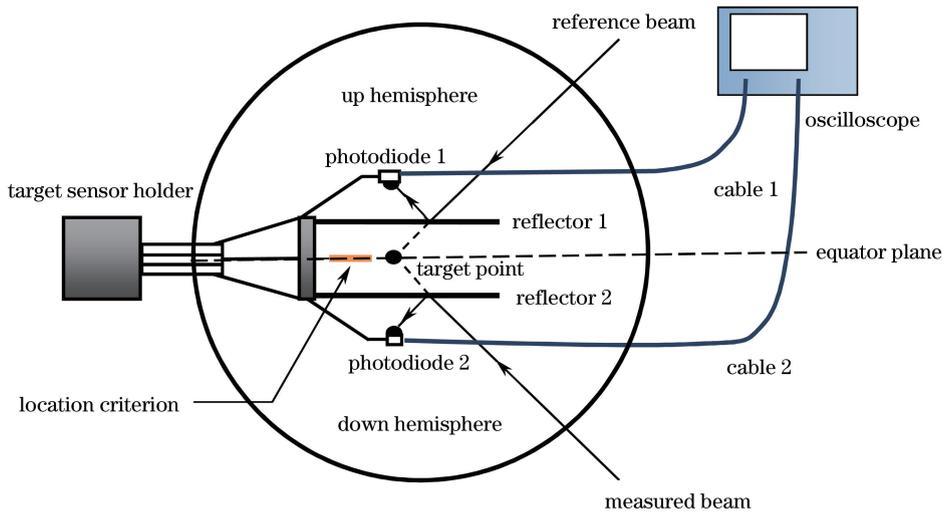


图 1 时间同步测试原理图

Fig. 1 Schematic of time-synchronization measurement

测试时首先根据高频电缆 1 和 2 的传输延时差异 τ 的标定结果,将示波器两通道的延时调整为 τ ;随后任选靶室上半球一光路为基准路,下半球中任一光路作为待测路,基准路和待测

路同时发射半峰全宽 (FWHM) 为 200 ps 的高斯分布重频脉冲,基准路激光脉冲经反射镜 1 入射到光电管 1,待测路激光脉冲经反射镜 2 入射到光电管 2,示波器上显示两个激光脉冲的波形,基准

路脉冲顶点在示波器时基坐标上的示值为 t_1 ，待测路脉冲顶点在示波器时基坐标上的示值为 t_2 ，则两条光路之间的时间同步差 $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

若 $\Delta t = 0$ ，待测路与基准路在靶点处完全同步，无需进行同步调节；若 $\Delta t \neq 0$ ，则需调节待测路脉冲的光程，使其在靶点处与基准路达到完全同步，当 $\Delta t > 0$ 时，需缩短待测路光程，当 $\Delta t < 0$ 时，需延长待测路光程。待测路脉冲光程的调整在光路的前端完成，通过调节任意波形发生器上的脉冲发生时序完成粗调，调节精度为 100 ps；通过前端光路中的光纤延时器完成精调，调节精度为 1 ps，调节完毕后在示波器上对 Δt 进行复测，确认 $\Delta t = 0$ 后即可更换另一条下半球待测路进行测试。所有下半球光路测试完毕后，任选一下半球光束作为参考路，重复以上过程对靶室上半球的光束（原上半球基准路除外）进行时间同步测试，直至所有光束测试完毕并与靶室上半球基准路达到时间同步。

实验中光电管、示波器、信号电缆组成的信号探测系统可视为有限带宽的低通滤波器，为保证测量结果的准确性，信号探测系统的带宽应远大于 FWHM 为 200 ps 的高斯脉冲带宽，以避免高斯脉冲顶部变缓对脉冲顶点（测量特征点）判读的影响。高斯脉冲带宽与上升时间的关系为 $\tau_{\text{pulse}} = 0.35/D_{\text{BW}}$ ，其中 τ_{pulse} 为脉冲上升时间， D_{BW} 为高斯脉冲带宽。FWHM 为 200 ps 的高斯脉冲的上升时间约为 143 ps，模拟带宽 D_{BW} 约为 2.45 GHz，结合常见光电管及示波器的带宽，当示波器带宽为 8 GHz（上升时间 $\tau_{\text{oscilloscope}} = 45$ ps）、光电管及信号电缆带宽（上升时间 $\tau_{\text{diode}} = \tau_{\text{cable}} = 35$ ps）为 10 GHz 时，测量得到的脉冲上升时间 $\tau_r = \sqrt{\tau_{\text{pulse}}^2 + \tau_{\text{oscilloscope}}^2 + \tau_{\text{diode}}^2 + \tau_{\text{cable}}^2} \approx 157$ ps，信号探测系统产生的波形信号畸变较微弱，不影响脉冲波形顶点的判读（图 2）^[10]。

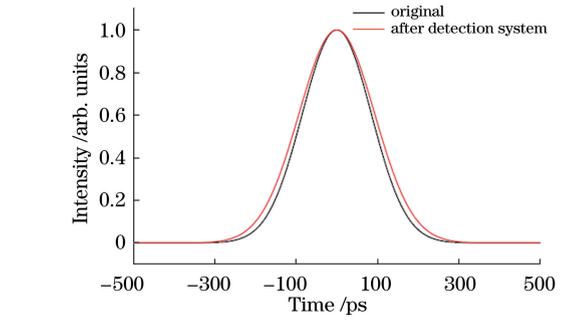
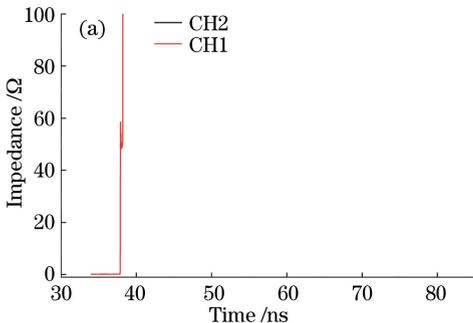


图 2 FWHM 为 200 ps 的高斯脉冲经过信号探测系统后的波形
Fig. 2 Waveform of 200 ps FWHM Gaussian pulse after detection system

3 实验与分析

根据上述原理及方法开展了脉冲同步测试实验，激光装置输出 FWHM 为 200 ps 的高斯脉冲作为测试光源，实验所用德国 Alphas 公司 UPD-UVIR-35 型光电管的上升时间 $\tau_{\text{diode}} \leq 35$ ps，有效接收口径 Φ 为 6 mm；高速电缆模拟带宽 ≥ 10 GHz，实时数字示波器的最高采样率为 40 GSa/s，模拟带宽为 8 GHz。

测试时，首先使用时间分辨率为 3.75 ps 的采样示波器结合时域反射 (TDR) 模块通过 TDR 方法来标定两根传输电缆之间的传输时延差 τ ，标定时 TDR 模块通过向电缆首端注入高频脉冲信号，并记录电缆不同长度点处回波信号强度，以获得信号通路的阻抗以及阻抗随信号延时的变化，阻抗由 50 Ω 到无穷大的突变点标记为电缆末端^[11-12]。标定结果如图 3 所示，两根电缆之间的双程延时差 $2\tau = 2\tau_2 - 2\tau_1 = 71.406 - 79.966 = -8.560$ ns，其中 τ_1 和 τ_2 分别为信号电缆 1 (CH1) 和信号电缆 2 (CH2) 从首端到末端的单程传输延时差（高频电缆 1 连接 CH1，高频电缆 2 连接 CH2），两根电缆之间的单程延时差 $\tau = -4.28$ ns。

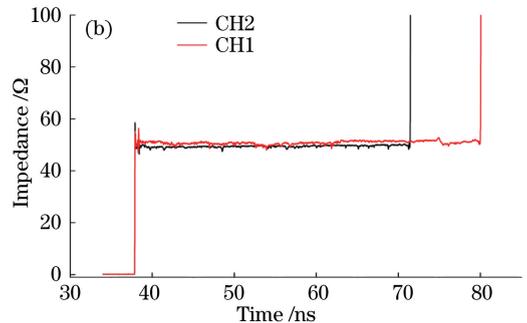


图 3 电缆延时差的标定结果。(a) 接入电缆前；(b) 接入电缆后

Fig. 3 Calibration results of cable time-delay difference. (a) Without cable; (b) with two cables

使用示波器的 DeskView 功能调节示波器,使 CH1 通道的时基比 CH2 通道超前 4.28 ns,读出示波器上基准路脉冲与待测路脉冲之间的时间间隔,即两者到达靶点的时间同步差 Δt ,图 4 所示为基准路与待测路达到完全同步状态时示波器上观察到的同步差测量结果。

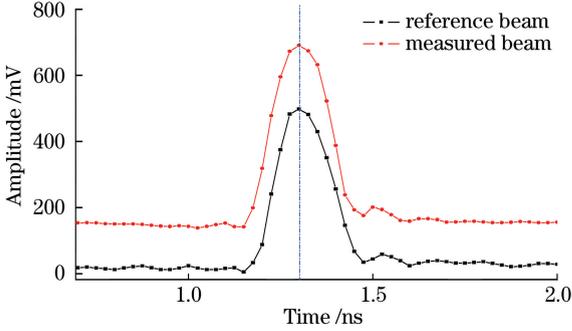


图 4 同步差测量结果($\Delta t=0$)

Fig. 4 Measurement results of synchronization difference ($\Delta t=0$)

采用本文方法进行时间同步测试,测量不确定度的来源主要为电缆延迟标定误差 δ_1 、实时示波器示值误差 δ_2 、高斯脉冲顶点读数误差 δ_3 ,以及光电管和定位基准处于非理想共轭状态所带来的测量误差 δ_4 (靶室中心监测仪为高倍率显微望远系统,靶点同步测量组件的定位偏差 $\leq 50 \mu\text{m}$,不产生明显的同步测量误差)^[13]。

电缆延时差 $\tau = \tau_2 - \tau_1$,可在标定时通过计算 $2\tau_2$ 与 $2\tau_1$ 的差值得到, $2\tau_2$ 和 $2\tau_1$ 的测量误差取决于采样示波器的分辨率,当采样示波器的时间分辨率为 3.75 ps 时, τ 的标定误差 $\delta_1 = \pm \sqrt{\delta_{2\tau_2}^2 + \delta_{2\tau_1}^2} / 2 = \pm \sqrt{(3.75/2)^2 + (3.75/2)^2} / 2 = \pm 1.33 \text{ ps}$;实时示波器示值误差主要与采样间隔 Δp 及脉冲时间间隔有关,可以表示为 $\delta_2 = \pm [0.06 \times \Delta p + 10^{-6} \times \Delta t]$ ^[14],实验中 $\Delta p = 25 \text{ ps}$, $\Delta t \approx 0$,求得 $\delta_2 = \pm 1.5 \text{ ps}$ 。高斯脉冲顶点读数误差主要是由于示波器的采样为有限采样,脉冲顶点无法准确采样造成的,实验中实时示波器采样率为 40 GSa/s,脉冲顶点判读误差为 12.5 ps,即 t_2 和 t_1 的测量误差 $\delta_{32} = \delta_{31} = \pm 12.5 \text{ ps}$,计算得到 $\delta_3 = \sqrt{\delta_{31}^2 + \delta_{32}^2} = \pm 17.67 \text{ ps}$;测试所用的同步测量组件中光电管与定位基准可能处于非理想共轭状态,如图 5 所示。以基准路为例,当光电管 1 的光敏面与理想共轭面的距离为 l ($l \leq 0.5 \text{ mm}$) 时所产生的同步测量误差 $\delta_{41} = \pm \frac{l_1}{c} = \pm \frac{l/\cos \alpha}{c} = \pm \frac{l/\sin \beta}{c}$,其中 β 的可能取值为 25° 、 49.5° 和 55° ,当 $\beta = 25^\circ$ 、光速 c 取 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 时, δ_{41} 的最大值为 $\pm 3.94 \text{ ps}$ 。同理,光电管 2 的光敏面与理想共轭面所产生的测量误差 $\delta_{42} = \pm 3.94 \text{ ps}$,因此 $\delta_4 = \sqrt{\delta_{41}^2 + \delta_{42}^2} = \pm 5.57 \text{ ps}$ 。以上 4 项误差 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 互不相关,时间同步测量误差 $\delta = \pm \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2} = \pm 18.86 \text{ ps}$ 。

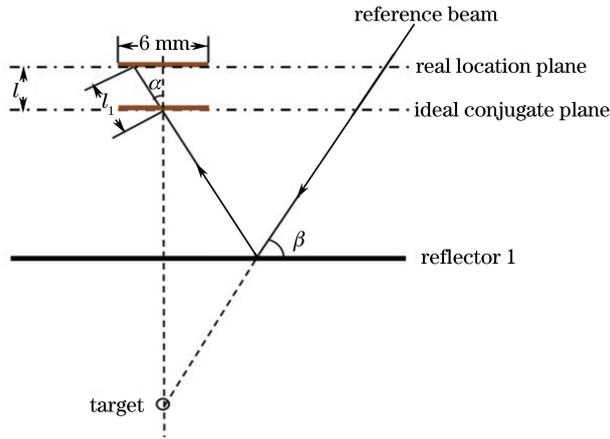


图 5 非理想共轭所导致的同步测量误差示意图

Fig. 5 Schematic of synchronization measurement error caused by non-ideal conjugation

4 结 论

提出了一种基于反射共轭原理的高功率激光装置脉冲同步测试方法,使用一对反射镜将靶点分别映射到距离靶点光程相同的两个共轭像点处,通过

测量光束到达两个共轭像点处的时间偏差来获得脉冲到达靶点的时间同步差,有效解决了靶点处激光脉冲时空高度重合引起的脉冲混叠问题,实现了靶点处激光脉冲时间同步差的精确测量。该方法通过搭载平台实现测量组件的快速准确定位,无需工作

人员进入靶室,具有操作简单、测试效率高等特点,已成功应用于高功率激光装置的多束激光时间同步测试及实时调节。

参 考 文 献

- [1] Sun Z H, Wang W Y, Liu H, *et al.* Power balance measurement technique of multi-beam laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(6): 1493-1497. 孙志红, 王文义, 刘华, 等. 多路激光功率平衡测量技术[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1493-1497.
- [2] Donaldson W R, Boni R, Keck R L, *et al.* UV power balance on the OMEGA laser[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3609: 121-128.
- [3] Yu T Y, Cai X J, Liu R H, *et al.* Study on the precision energy measurement system for high power laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(3): 267-270. 于天燕, 蔡希洁, 刘仁红, 等. 高功率激光精密小能量测量系统研究[J]. 中国激光, 2002, 29(3): 267-270.
- [4] Lerche R A. Timing between streak cameras with a precision of 10 ps [J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1346: 376-384.
- [5] Wouterghem B M V, Burkhart S C, Haynam C A, *et al.* National ignition facility commissioning and performance[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 55-66.
- [6] Liu H, Peng Z T, Xu L B, *et al.* The study on synchronization measurement for multi-beams laser [J]. Acta Metrologica 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.
- [7] Sun Z H, Dong J, Peng Z T, *et al.* The synchronization measurement of multi-beams for high power laser facility [J]. Chinese Journal of 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.
- [8] Zhang B, Peng Z T, Lü J K, *et al.* Multi-beams time-synchronization measurement for inertial confinement fusion laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0208003. 张波, 彭志涛, 吕嘉坤, 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, 2016, 43(2): 0208003.
- [9] Zong Z Y, Xu D P, Tian X C, *et al.* Laser pulse generation technology with high adjustment precision [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0105001. 宗兆玉, 许党朋, 田小程, 等. 高精度整形激光脉冲产生技术研究[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0105001.
- [10] Pan H F, Zhang L M. Application of time reference in high precision oscilloscope test [J]. Underwater Weapons Range, 2009, 36(1): 59-61. 潘海飞, 张丽梅. 时间基准在示波器高精度测试中的运用[J]. 水中兵器靶场, 2009, 36(1): 59-61.
- [11] Li B S. Study on wire-cable length precision measurement technology base on TDPR[D]. Xi'an: Xidian University, 2010: 7-17. 李保生. 基于时域脉冲反射原理的电线电缆精确测长技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010: 7-17.
- [12] Bernard H. Propagation delay measurements using TDR[J]. Application of Electronic Technique, 2010, 36(6): 107-110.
- [13] Feng B, Liu Y W, Jia H T, *et al.* Thermal analysis on inertial confinement fusion parallel target positioning system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(6): 0602007. 冯斌, 刘彦武, 贾怀庭, 等. 惯性约束核聚变并联靶定位系统热分析[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0602007.
- [14] Su S J. High precision time measurement and analysis with real-time oscilloscope [J]. Electronic Design and Application, 2008, 6(9): 92-95. 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, 6(9): 92-95.