



·激光传输与控制·

高稳定激光脉冲波形精密调控技术研究与应用*

宗兆玉^{1,2}, 赵军普¹, 李森¹, 梁越¹, 姚轲¹, 田小程¹,
黄小霞¹, 陈波¹, 郑万国¹

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 100088)

摘 要: 提出了基于激光脉冲波形精密调控和能量稳定性控制的双回路同步闭环设计方法, 进而在任意波形发生器与预放大系统输出处建立脉冲波形闭环控制系统, 在保偏大模场光纤放大器和再生放大器间建立能量稳定性闭环系统。依托大口径高通量实验平台, 实现了激光脉冲波形的快速高稳定精密调控, 脉冲波形闭环精度优于 2%(RMS), 脉冲能量稳定性优于 5%(PV)。该技术成功应用到物理实验正式发射中, 常规整形脉冲波形的功率准确度优于 2%, 相关结果有力支撑了 ICF 激光驱动器激光参数精密调控设计。

关键词: 高功率激光装置; ITB 平台; 功率准确度; 光束调控; 脉冲精密整形

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210288

Precise laser pulse shaping technology and application with high energy stability

Zong Zhaoyu^{1,2}, Zhao Junpu¹, Li Sen¹, Liang Yue¹, Yao Ke¹, Tian Xiaocheng¹,
Huang Xiaoxia¹, Chen Bo¹, Zheng Wanguo¹

(1. Laser Fusion Research Center, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: Double circuit synchronous closed-loop design based on precise laser pulse waveform shaping and energy stability control was introduced. A pulse shaping closed-loop control system was established between arbitrary waveform generator and the output of preamplifier system, and an energy stability closed-loop system was established between polarization large-mode-area fiber amplifier and the regenerative amplifier. The laser pulse's precise shaping with high energy stability was demonstrated based on the Integration Test Bed. And the closed-loop accuracy of the pulse waveform was better than 2% (RMS), and the energy stability was better than 5% (PV). The results were successfully applied to the formal launch of physical experiments, and the power accuracy of the conventional shaping pulse waveform was better than 2%. The successful demonstration of the double circuit synchronous closed loop system strongly supports the precise control design of the laser parameters of laser driver for ICF.

Key words: high power laser facility, Integration Test Bed, power accuracy, beam control, pulse precision shaping

大型高功率激光装置可以在实验室环境创造前所未有的强电场、强磁场和高压强等极端物态条件, 在惯性约束聚变(ICF)、高能量密度物理、天体物理等诸多前沿科学技术领域发挥着不可替代的作用^[1-4]。ICF 要求高功率激光装置具备输出时域形态精密可控的高稳定激光脉冲以满足功率平衡的要求^[5-8]。依托不同的高功率激光装置, 研究人员对激光脉冲波形的精密调控技术开展了广泛的研究。依托神光 II 激光装置, 范薇等人通过在预放大系统再生放大器和前端系统任意波形发生器(AWG)间建立脉冲波形闭环系统, 通过动态迭代算法将 Hann 脉冲的底部平台区波形闭环精度控制在 10% 左右, 峰值区控制在 3% 左右^[9]。李平等人通过建立历史发次数据模型和采用矩阵算法关联电光响应关系等措施将某原型装置功率平衡指标提升到 10%, 满足了不同物理实验的需求^[10-11]。依托

* 收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(62075201, 61805223)

联系方式: 宗兆玉, zongzhaoyu1st@163.com。

通信作者: 郑万国, wgzhen_gcaep@sina.com。

美国 Omega EP 激光装置, Guarfalben 等人研究指出再生放大器时域响应的微小变化将导致实际打靶波形严重偏离目标波形, 为此需要调整注入的 AWG 电脉冲波形^[12]。Shaw. M 等人基于国家点火装置(NIF)同样在 AWG 与再生放大器间建立了脉冲波形闭环系统^[7, 13]。为弥补再生放大器处于欠饱和放大状态, NIF 装置在目标脉冲波形后添加了一个 2.5 ns 的方波后缀脉冲, 进而实现了高精度脉冲波形调控^[14]。然而, 由于电光开关隔离比的限制, 后缀脉冲不易完全去除, 可能会影响物理实验效果。

为研究与解决 ICF 驱动器单束关键科学技术问题, 大口径高通量实验平台(ITB)于 2016 年设计建造完成^[15-16]。ITB 平台主体光路由前端系统、预放大系统、主放大系统和谐波转换系统组成, 目前可实现数万焦耳的高能量输出。为满足未来重频工作模式, ITB 平台预放大系统采用 LD 泵浦的甚多程放大构型^[17-18]。甚多程放大构型使得预放大系统的脉冲波形和能量均呈现非线性响应关系, 且脉冲波形与能量之间相互影响。采用传统的脉冲波形闭环设计无法应对这种非线性响应, 脉冲波形的闭环精度将变差, 严重时甚至导致脉冲波形闭环失败。

为满足激光脉冲波形精密调控的需求, 本文巧妙利用 ITB 平台前端系统和预放大系统的构型和性能参数, 提出了调控激光脉冲波形和能量稳定性的双回路同步闭环设计方法, 进而实现了高稳定脉冲波形的精密调控, 并成功应用在物理实验正式发射中, 有力支撑了 ICF 驱动器激光参数精密调控设计。

1 预放大系统的非线性时域响应特性

ITB 平台预放大系统的主体光路由再生放大组件和离轴八程放大组件组成。前端系统注入的约 100 nJ 激光脉冲在再生腔中往返放大 112 程后输出能量可达 25 mJ, 经离轴八程高增益放大后, 预放大系统可输出 1 J/1 Hz 空域时域高精度调控的激光脉冲。激光脉冲在再生放大组件和离轴八程放大组件中分别历经 112 程、8 程, 有效累积增益光程高达 12800 mm。这种甚多程放大构型虽然可以提供高达 10^7 的增益, 但是表现出强烈的非线性时域响应效应。

图 1 为预放大系统的非线性时域响应特性。如图 1(a) 所示, 不同脉宽的激光脉冲表现出不同的方波畸变度。这里的方波畸变度是指当注入激光脉冲为方波时, 输出激光脉冲的前沿幅值与后沿幅值之比。方波畸变度是衡量激光放大系统非线性时域响应的重要参数。从图 1(a) 可以看出, 随着激光脉宽的增加, 方波畸变加剧, 但是当脉宽超过 5 ns 后, 方波畸变又呈现出下降趋势。当脉宽在 5~18 ns 之间时, 方波畸变变化较小, 随着脉宽的进一步增加, 方波畸变又呈现上升趋势。同样可以看出, 不同注入能量下方波畸变的变化趋势基本相同, 但是高能量注入下的方波畸变更严重, 符合激光放大动力学规律。图 1(b) 为相同激光参数配置下, 激光脉宽变化对预放大系统输出能量的影响。由图 1(b) 可知, 激光能量随着脉宽的增加而增加, 至脉宽约 2 ns 时, 激光能量到达峰值, 随后激光能量随着脉宽的增加而下降。在短脉宽区间(0.1~2 ns), 激光能量随着脉宽增加而增加是由于提取的激光储能逐渐增多, 随着储能的逐渐消耗, 损耗大于增益, 在长脉宽区间(3~25 ns)激光能量开始下降。上述激光脉冲对方波畸变和能量的非线性响应源于预放大系统的甚多程放大构型, 非线性响应特性与多种因素有关, 很难简单地从脉宽、注入能量等因素中将响应关系解耦出来, 这种复杂的响应特性对激光脉冲的精密波形闭环带来了挑战。

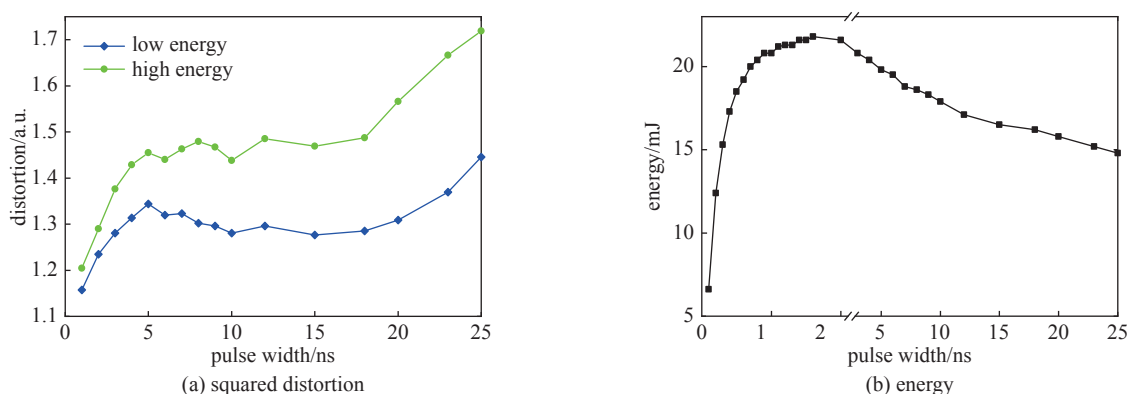


Fig. 1 Nonlinear temporal response function of preamplifier system

图 1 预放大系统的非线性时域响应特性

此外, 再生放大器的不同工作状态也将对预放大系统输出产生非线性影响(如图 2 所示)。图 2(a)为再生放大器腔镜一侧采集的激光脉冲波形包络, 图中横坐标读数表示不同程数激光脉冲出现的时间, 分立的脉冲串表示不同程数的脉冲包络。简单起见, 将脉冲幅值最高的工作状态(饱和状态)定义为 0 态, 0 态右侧不同程数的工作状

态分别定义为-1、-2、-3...态, 0态左侧不同程数的工作状态分别定义为1, 2, 3...态。由图2(a)可知, 当再生放大器工作在1~5态时, 输出激光能量较大且能量变化梯度较小。由图2(b)可知, 当再生放大器工作在3~5态时, 激光脉冲的方波畸变变化较平稳, 且方波畸变度数值较小, 脉冲整形裕量较大。综合激光脉冲的增益能力、能量稳定性和脉冲波形的方波畸变度, 优选再生放大器工作在过饱和状态(3~5态)。

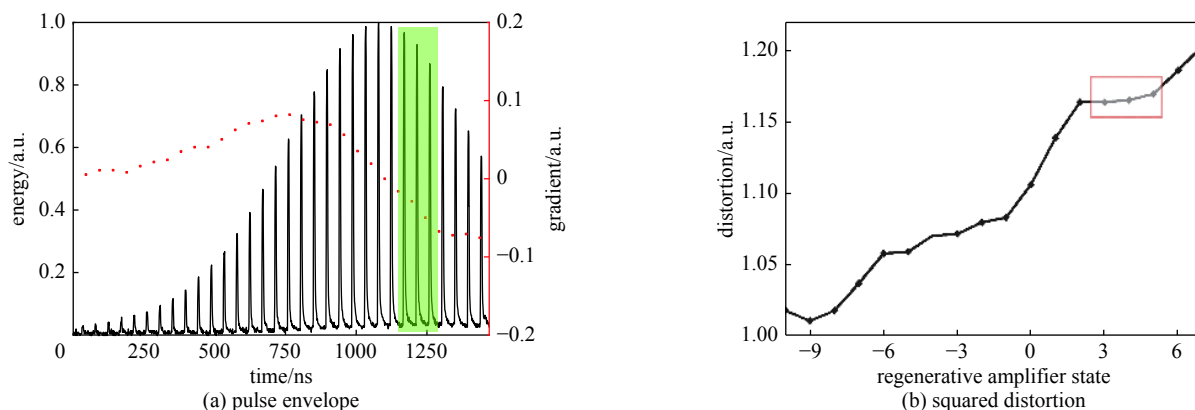


Fig. 2 Dependence of regenerative amplifier state on output of preamplifier system

图2 再生放大器的不同工作状态对预放大系统输出的影响

再生放大器的工作状态受多种因素的影响, 包括钨玻璃棒的小信号增益系数、放大程数、再生腔的损耗和注入能量。注入能量较低时, 再生放大器工作在欠饱和状态, 注入能量较高时, 再生放大器工作在过饱和状态。因此, 通过调节前级放大器的注入能量可以直观有效地改变再生放大器的工作状态, 进而控制预放大系统的输出特性。

2 双回路同步闭环设计

预放大系统的甚多程放大构型不仅使得注入与输出激光脉冲的时域和能量响应均呈现非线性关系, 而且脉冲波形和能量之间相互影响。为满足高功率激光装置功率平衡需求, 需要建立激光脉冲波形的高稳定精密调控能力。

基于前端系统和预放大系统的性能参数和构型优势, 本文提出了一种双回路同步闭环设计方法, 即在前端任意波形发生器与预放大系统输出端建立脉冲波形调控闭环回路、在前端末级大模场线性放大器与再生腔腔镜漏光监测端建立能量稳定性闭环回路, 进而实现脉冲波形和能量稳定性的同步精密调控。

2.1 脉冲波形精密调控闭环设计

首先根据高功率激光装置的系统能流分布, 开展激光脉冲波形的闭环设计。对于三倍频目标打靶波形, 首先由谐波转换曲线反演出基频波形, 然后根据主放大系统的增益特性进一步反演出预放大系统输出端的脉冲波形。由于ITB平台预放大系统具备1 Hz重频工作模式, 将闭环反馈点设置在预放大系统输出端有利于提升闭环效率。将闭环反馈点设置在预放大系统输出端相比于其他高功率激光装置将闭环反馈点设置在重频放大段、前端系统输出端^[10, 14], 消除了光学链路盲区, 闭环更加准确。

图3为脉冲波形精密调控闭环设计的原理示意图。脉冲波形闭环设计利用ITB平台现有参数测量组件, 无需添加额外设备。如图3(b)所示, 基于差值迭代反馈原理设计了闭环流程。首先以反演推算到预放大系统输出端的脉冲波形

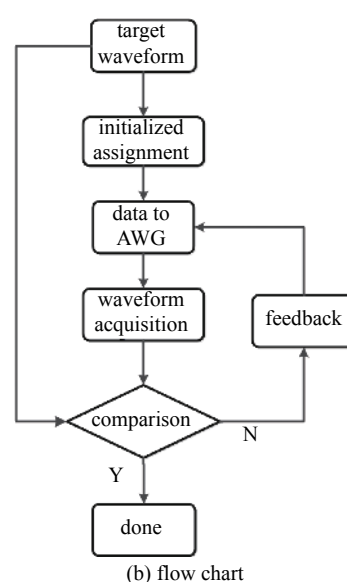
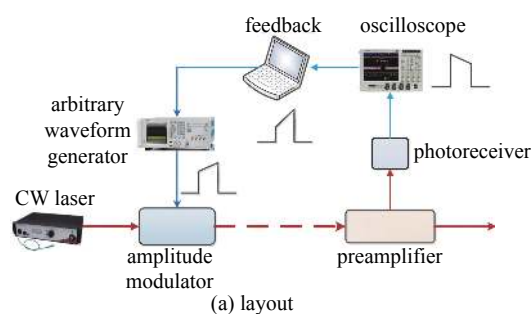


Fig. 3 Schematic of laser pulse precise shaping closed-loop feedback system

图3 脉冲波形精密调控闭环设计的原理示意图

为目标波形,根据测量得到的非线性电-光幅值响应关系曲线,计算出初始电脉冲波形。任意波形发生器将初始电脉冲波形加载到幅度调制器上,幅度调制器将连续波激光斩波为初始整形激光脉冲,初始整形激光脉冲经光学放大链路传输到预放大系统输出端。此时,由于激光系统的增益饱和和光谱透过率不均匀特性等,初始整形激光脉冲发生一定的畸变。利用高带宽光电管采集预放大系统输出的激光脉冲,而后将脉冲波形显示在高带宽示波器上。对比分析采集的实际波形与目标波形,基于差值迭代反馈算法反演出修正电脉冲波形。循环往复,不断迭代,直至实际波形满足评价标准,此时预放大系统输出高精度整形的激光脉冲。

然而,在脉冲波形闭环迭代的初始阶段,激光脉冲的时域形态变化剧烈,导致激光脉冲的等效脉宽不断发生变化。由于预放大系统对脉冲波形和能量的非线性响应特性,注入激光等效脉宽的变化将导致再生放大器的工作状态发生改变,严重影响系统的能量稳定性和时域响应特性。即使在采集端采用多次平均降噪法,脉冲波形闭环精度也将变差,严重时甚至导致波形闭环失败。此外,物理实验要求激光装置具备输出从 0.1~25 ns 脉宽范围内任意整形激光脉冲的能力。

因此,为满足宽等效脉宽范围内高精度时域整形的需求,采用甚多程放大构型的高功率激光装置的脉冲波形闭环系统对激光能量稳定性也提出了严格要求。

2.2 能量稳定性闭环设计

为应对脉冲波形精密闭环过程中激光能量稳定性面临的挑战,本文巧妙利用 ITB 平台前端系统和预放大系统的构型优势和性能参数,建立激光脉冲能量稳定性闭环系统。

ITB 平台前端系统采用全光纤放大体系,末级光纤放大器采用长度为 3 m,纤芯直径为 10 μm 的保偏大模场光纤,其有效模场面积达 12 μm^2 ,饱和能量为 92.2 μJ ^[19-20]。前端系统在方波畸变度小于 1.05 的情况下输出能量大于 1 $\mu\text{J}/5\text{ ns}$,较预放大系统的注入工作点 100 nJ 有十倍的裕量。因此,可以调节保偏大模场放大器(PLMA)的增益倍数直观有效地控制再生放大器的工作状态,进而主动调控预放大系统的输出特性。

图 4 为激光脉冲能量稳定性闭环控制的原理示意图。偏振态为 P 态的激光脉冲经前端系统保偏大模场放大器放大后,经偏振片 P1、45°转子和法拉第隔离器后入射到偏振片 P2 上。其中,45°转子和法拉第隔离器用于隔离再生放大器返回的反激光。偏振片 P2 将激光脉冲导入再生腔中,当激光脉冲首次往返通过 $\lambda/4$ 波片和电光开关后偏振态旋转 90°变为 S 态。此后电光开关加载 $\lambda/4$ 电压以维持腔内振荡所需的 S 偏振态,待放大到 112 程后,电光开关退电,激光脉冲最后一次通过 $\lambda/4$ 波片后偏振态转为 P 态。偏振态为 P 态的激光脉冲经偏振片 P2、法拉第隔离器、45°转子后由偏振片 P1 反射输出。光电管采集腔镜 M1 处漏出的甚多程激光脉冲包络(如图 2(a)所示)。通过判读再生腔脉冲包络处于欠饱和状态还是过饱和状态,进而增加或者降低保偏大模场放大器的泵浦电流,使再生腔工作在过饱和状态(3~5 态),保持激光脉冲的能量稳定性和方波畸变度。

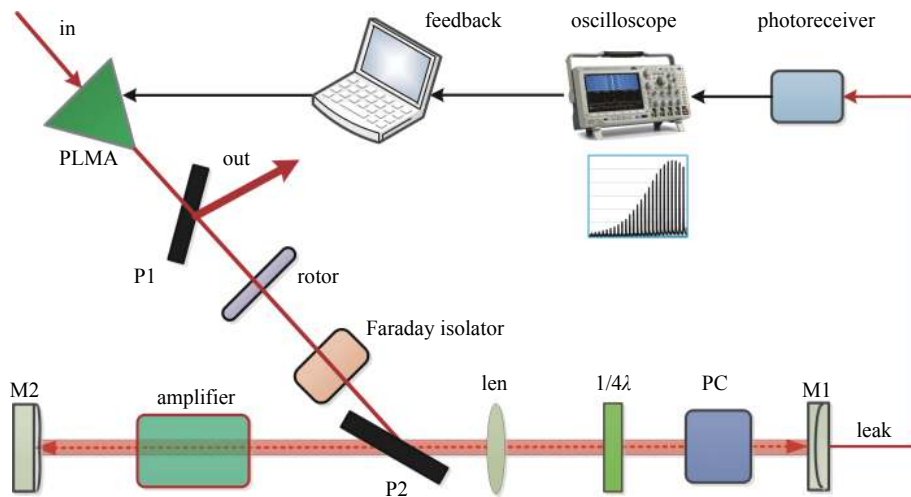


Fig. 4 Schematic of laser pulse energy closed-loop control system

图 4 激光脉冲能量稳定性闭环控制原理示意图

将能量稳定性闭环终点设置在再生放大器处,其原因主要有两点。一是脉冲波形闭环过程中等效脉宽的变化主要通过影响再生放大器的工作状态进而降低预放大系统的输出能量稳定性,通过主动调控再生放大器的工作状态,可以较好地稳定预放大系统的输出能量和时域响应关系。二是再生放大器的脉冲包络易监测,通过包络形态

变化可以直观地反映出再生放大器的工作状态。

因此,结合保偏大模场放大器的线性放大特性和再生放大器的响应特性,通过腔镜漏光监测实时反馈的方式,调节保偏大模场放大器的增益倍数可以实现激光脉冲的能量稳定性闭环设计。

3 实验结果

基于“前端系统任意波形发生器+预放大系统脉冲波形测量”、“前端系统大模场放大器+再生腔镜漏光监测”的双回路同步闭环设计,在ITB平台上实现了高稳定激光脉冲波形的精密调控,并成功应用在物理实验正式发射中,助力物理实验团队取得了预期实验结果。

脉冲波形闭环采用差值反馈原理,并引入慢变松弛因子,由测量的实际波形与目标波形的残差大小动态调整松弛因子,保证收敛的有效性。图5为采用双回路同步闭环设计后激光脉冲波形的闭环过程。为满足高精度波形闭环要求,这里采用带宽约8 GHz,数据采样率大于20 GSa/s的高带宽示波器。从图5(a)中可以看出,第1次迭代的脉冲波形与目标波形的差异较大,经过3次迭代后,实际波形与目标波形间的差异迅速缩小,经过10次迭代后实际波形与目标波形已经十分接近。基于脉冲波形和能量稳定性控制的双回路同步闭环过程收敛速度较快,一般来说,整个过程的闭环迭代时间小于5 min,满足高功率激光装置实验参数快速精密调控的要求。图5(b)为激光脉冲波形闭环对应的任意波形发生器输出电脉冲的迭代过程,从图中可以看出初始电脉冲波形和最终电脉冲波形的差异较小,表明电-光幅值响应关系较敏感,优化设计幅度调制器的电光响应关系可进一步提升波形闭环精度。

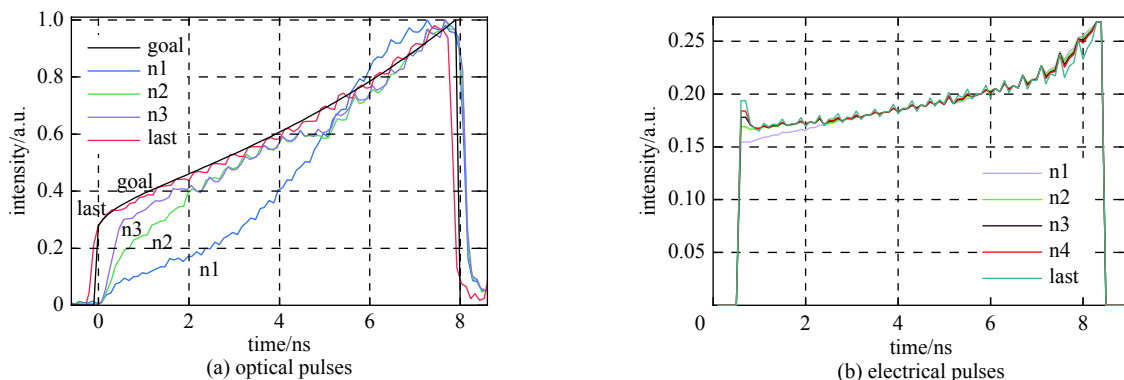


Fig. 5 Closed-loop iterative process of laser shaping pulse

图5 激光脉冲波形的闭环过程

综合物理实验需求和高功率激光装置的经济性等,参考高功率激光装置功率平衡分解到预放大系统的功率平衡RMS指标(1.5%),目前脉冲波形精密调控闭环回路的迭代判据一般设定为1.5%(RMS)。此外,这里定义脉冲波形闭环精度为多次反馈迭代后,闭环反馈点处实际波形相对于目标波形的各点功率偏差。图6所示为采用双回路同步闭环设计后激光脉冲波形的精密调控结果,其中目标波形为背光源物理实验反演到预放大系统输出处的推算波形。需要说明的是,为避免脉冲波形顶部幅频效应等周期性波动对PV值和RMS值计算结果的影响,这里对原始波形数据进行了卷积平滑滤波。由于ITB平台前端系统采用约2.5 GHz的相位调制,对应的调制周期为400 ps,

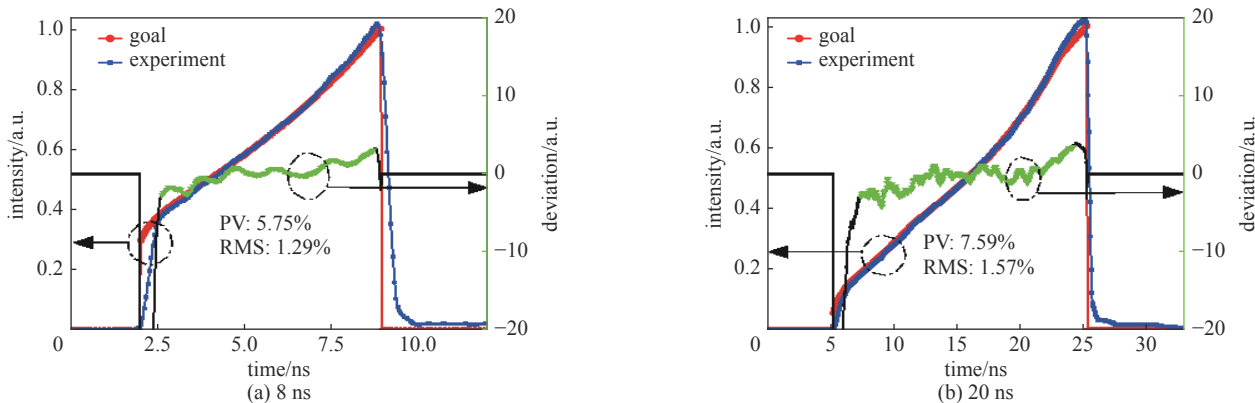


Fig. 6 Closed-loop result of laser shaping pulses

图6 激光脉冲波形的闭环调控结果

引入 400 ps 的平滑积分窗口后幅频调制对脉冲波形 PV 值和 RMS 值计算的影响基本可忽略。如图 6(a) 所示, 对于 8 ns 指数波, 脉冲波形闭环精度的均方差 RMS 为 1.29%, 峰谷值 PV 为 5.75%, 远小于高功率激光装置脉冲波形精密调控闭环回路的设定判据, 此时脉冲波形闭环效果较好。如图 6(b) 所示, 即使针对 20 ns 低功率长脉冲波形, 脉冲波形闭环精度的均方差 RMS 也可达到 1.57%, 接近迭代判据指标。由于单路激光脉冲波形闭环精度指标相对于多路激光功率平衡指标更为严苛, 因此低功率长脉冲激光脉冲波形的闭环精度实际上也满足功率平衡要求。

为进一步研究采用双回路同步闭环设计后预放大系统的输出能量稳定性, 本文同步测量了再生放大器和预放大系统输出处的能量稳定性。如图 7 所示, 再生放大器输出的激光脉冲经离轴八程放大器饱和和放大后, 可将激光脉冲稳定性由 PV 值 10.88% 进一步提升到 4.55%, 满足能量平衡需求。综合激光脉冲波形闭环精度和能量稳定性数据, 采用双回路同步闭环设计可以实现高稳定激光脉冲波形的精密调控。

最后, 本文将双回路同步闭环设计应用到背光源物理实验正式发射中。在高功率激光装置中, 脉冲波形功率准确度一般表示末级系统输出处, 实际波形相对于目标波形的各点功率偏差的均方根值^[6,14]。图 8 为物理实验正式发射中采集的实际波形与目标波形的对比图。从图中可以看出, 正式发射实际波形与目标波形吻合度较好。对于常规的物理实验需求, 脉冲波形功率准确度可达 2% 左右。对于低功率长脉冲目标波形, 实际波形偏差 RMS 约为 6% 左右, 也远低于背光源物理实验功率平衡 10% 的指标要求。

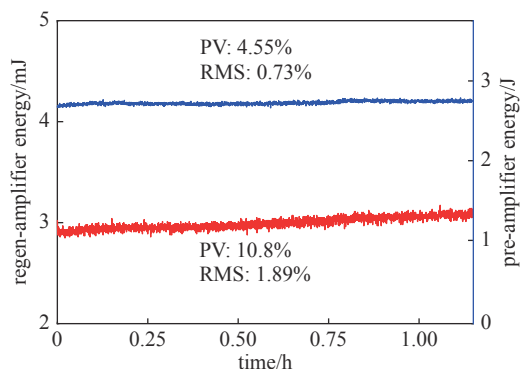


Fig. 7 Energy stability result of laser shaping pulse
图 7 整形激光脉冲的能量稳定性

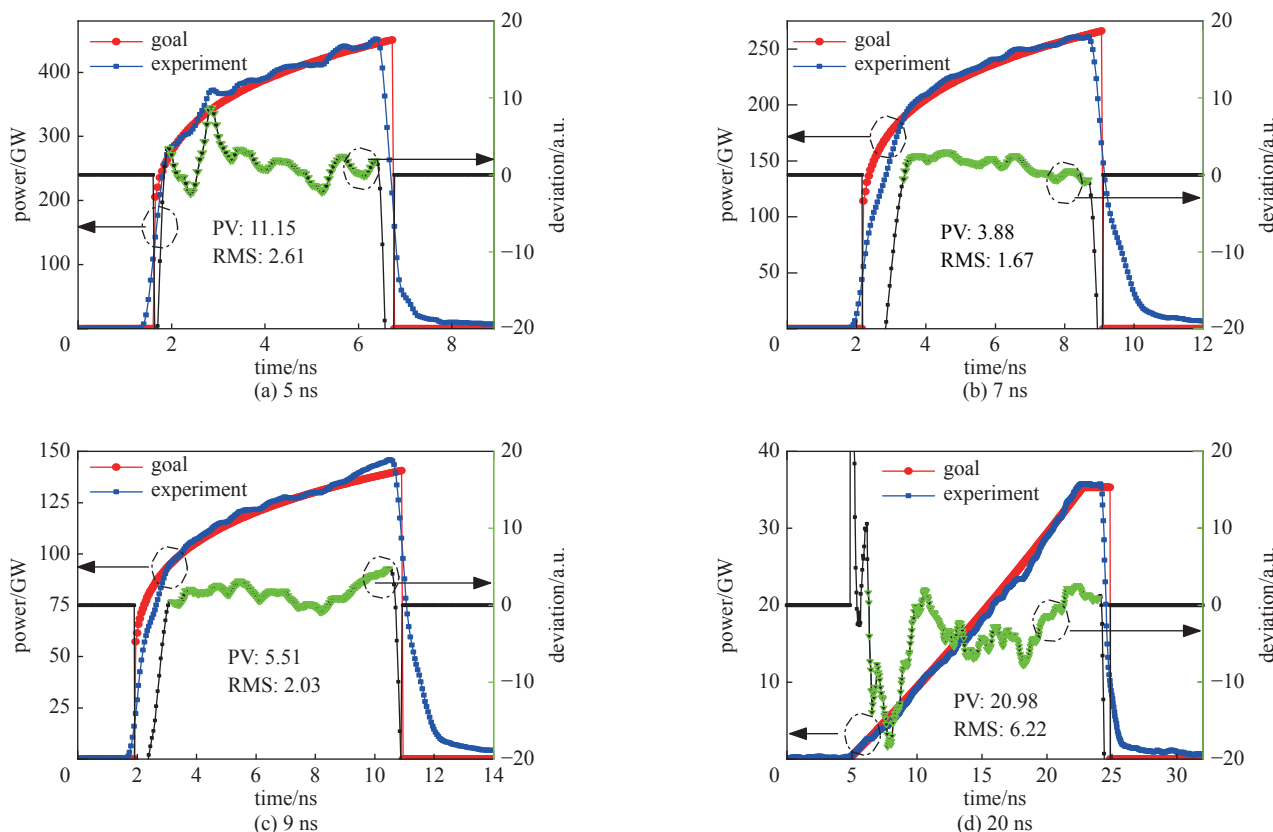


Fig. 8 Laser shaping pulses applied to physical experiments
图 8 物理实验正式发射测量的实际脉冲波形

4 结 论

本文巧妙利用前端系统和预放大系统的构型和性能参数, 基于脉冲波形和能量稳定性的双回路同步闭环设计成功实现了高稳定激光脉冲波形的精密调控, 常规整形脉冲波形的功率准确度优于 2%, 指标参数远优于高功率激

光装置功率平衡要求。技术成果应用到物理实验正式发射中,实验结果有力支撑了ICF激光驱动器激光参数精密调控设计。

参考文献:

- [1] Zhang F, Cai H B, Zhou W M, et al. Enhanced energy coupling for indirect-drive fast-ignition fusion targets[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(7): 810-814.
- [2] Gopalaswamy V, Betti R, Knauer J P, et al. Tripled yield in direct-drive laser fusion through statistical modelling[J]. *Nature*, 2019, 565(7741): 581-586.
- [3] Jing Longfei, Jiang Shaoren, Kuang Longyu, et al. Comparison of three hohlraum configurations with six laser entrance holes for indirect-drive inertial confinement fusion[J]. *Nuclear Fusion*, 2018, 58: 096017.
- [4] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12(5): 435-448.
- [5] 郑万国, 李平, 张锐, 等. 高功率激光装置光束精密调控性能研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 011003. (Zheng Wanguo, Li Ping, Zhang Rui, et al. Progress on laser precise control for high power laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 011003)
- [6] Zheng Wanguo, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua, et al. Laser performance upgrade for precise ICF experiment in SG-III laser facility[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2017, 2(5): 243-255.
- [7] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF Laser[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.
- [8] 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: 0105001. (Zong Zhaoyu, Xu Dangpeng, Tian Xiaocheng, et al. Laser pulse generation technology with high adjustment precision[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0105001)
- [9] Fan Wei, Jiang Youen, Wang Jiangfeng, et al. Progress of the injection laser system of SG-II[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e34.
- [10] Li Ping, Wang Wei, Jin Sai, et al. The shaped pulses control and operation on the SG-III prototype facility[J]. *Laser Physics*, 2018, 28: 045004.
- [11] 李海, 梁樾, 赵润昌, 等. 高功率激光整形脉冲波形控制技术[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(9): 2377-2380. (Li Hai, Liang Yue, Zhao Runchang, et al. Waveform control technique of high power laser pulse shaping[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2377-2380)
- [12] Guardalben M J, Barezys M, Kruschwitz B E, et al. Laser-system model for enhanced operational performance and flexibility on OMEGA EP[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8: e8.
- [13] Shaw M, House R. Laser performance operations model (LPOM): the computational system that automates the setup and performance analysis of the National Ignition Facility[C]//Proceedings of SPIE 9345 High Power Lasers for Fusion Research III. 2015: 93450E.
- [14] Brunton G, Erbert G, Browning D, et al. The shaping of a national ignition campaign pulsed waveform[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2012, 87(12): 1940-1944.
- [15] Zhao Junpu, Liang Yue, Li Sen, et al. Beam nonuniformity compensating by the programmable spatial shaper for the integration test bed[C]//Proceedings of the SPIE 11052 Third International Conference on Photonics and Optical Engineering. 2019: 110521R.
- [16] Zhao Junpu, Wang Wenyi, Fu Xuejun, et al. Recent progress of the Integration Test Bed[C]//Proceedings of the SPIE 9266 High-Power Lasers and Applications VII. 2014: 92660X.
- [17] Yao Ke, Gao Song, Tang Jun, et al. Off-axis eight-pass neodymium glass laser amplifier with high efficiency and excellent energy stability[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(29): 8727-8732.
- [18] Yao Ke, Xie Xudong, Tang Jun, et al. Diode-side-pumped joule-level square-rod Nd: glass amplifier with 1 Hz repetition rate and ultrahigh gain[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 32912-32923.
- [19] Zhang Rui, Tian Xiaocheng, Zhou Dandan, et al. Single-mode millijoule fiber laser system with high pulse shaping ability[J]. *Optik*, 2018, 157: 1087-1093.
- [20] Xu Dangpeng, Tian Xiaocheng, Zhou Dandan, et al. Temporal pulse precisely sculpted millijoule-level fiber laser injection system for high-power laser driver[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2661-2666.