



·大科学装置运维·

大型激光装置脉冲波形调控技术*

黄小霞, 赵博望, 郭怀文, 周 维, 张 波, 田小程, 张 崑

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 精密高效的脉冲波形调控是大型激光装置满足惯性约束聚变实验需求的重要技术之一。脉冲波形生成原理是通过编辑任意波形发生器中每个子脉冲的电压值, 经电光调制器转换为光脉冲强度形成任意形状的激光脉冲轮廓。在电光转换过程中, 各子束响应过程并非线性且子束间存在个性差异。为实现此条件下精密高效的脉冲波形调控, 制定并开发了基于闭环迭代思路的激光脉冲波形快速调控方法。实验结果表明, 算法可在 10 min 内实现任意脉冲波形整形, 并具备 23:1 高对比度脉冲波形调控能力, 调控精度均优于 10% (rms), 满足常规物理实验运行条件下对激光参数调控的精度和效率需求。

关键词: 高功率激光装置; 脉冲整形; 迭代算法

中图分类号: O43

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220320

Autonomous pulse shaping method for high-power laser facility

Huang Xiaoxia, Zhao Bowang, Guo Huaiwen, Zhou Wei, Zhang Bo, Tian Xiaocheng, Zhang Kun

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Laser pulse shape is one of the most critical parameters for the success of inertial confinement fusion experiments. The ability to shape the laser pulse with accuracy, efficiency, and robustness is fundamental for high-power laser facility with individual characteristics and independent adjustability for each beam. An autonomous pulse-shaping method is established by employing an iterative algorithm and some strategies, solving the problem of nonlinear response in the pulse-shaping process, as well as improving the convergence rate. The test results indicate that it is capable of shaping an almost arbitrary pulse waveform at the accuracy of better than 10% (rms) of the deviances within 20 iterations or about 10 min, even a 23:1 high-contrast-pulse waveform can be done with high quality of pulse and measure condition. With this method, the precise control on the laser pulse shape and the operational efficiency can fully meet the experimental requirements.

Key words: high-power laser facility, pulse shaping, iterative algorithm

惯性约束聚变(ICF)采用激光装置产生的高能量激光脉冲作用于物质^[1-2]。不同实验的激光脉冲形状需求不同,且束间激光脉冲的一致性对精密物理实验成败至关重要^[3-6]。国外高功率激光装置,如美国国家点火装置(NIF)^[7-8]和法国兆焦耳激光装置(LMJ)^[9],均是由前端产生激光脉冲并进行时间轮廓整形,然后由预放大器和主放大器进行能量放大和空间扩束,最后经终端系统频率转换为三倍频光。为了实现所需的三倍频光时间脉冲轮廓,需要执行两步流程^[10]。首先,采用逆算模型从目标三倍频脉冲反演计算出预放段重频目标波形,然后在重频波形测量点与前端任意波形发生器之间进行闭环迭代。NIF 采用的闭环方式是在波形幅度调制系统中用任意波形发生器对 45 ns 方波进行雕刻,并在迭代过程中引入了一个基于电压调整量变化的调整因子来应对非线性响应带来的问题^[11]。当波形闭环连续 6 次迭代的标准偏差优于设定阈值时,则满足收敛要求停止闭环。NIF 子脉冲为 300 ps 的高斯电脉冲,为获得小于 100 ps 的上升沿,引入了方波调制器对激光脉冲边缘进行裁剪。此外, NIF 子束间具有良好的 consistency。通过开发软件、集成算法和策略, NIF 实现了 1 h 自动闭环 48 个脉冲波形的能力。

其他在建或建成的大型激光装置同样迫切地面临精密波形调控能力的建设以满足物理实验需求。由于各个装置的个性差异, NIF 装置的方式并不完全适用于其他装置。对于我国 ICF 激光装置来说, 每个子束独立可调且具有明显增益差异。此外, 任意波形发生器的子脉冲是 100 ps 的高斯电脉冲, 能天然地产生更陡峭的上升沿和下

* 收稿日期: 2023-02-14; 修订日期: 2023-04-16

联系方式: 黄小霞, wbsxiaoba@163.com。

通信作者: 郭怀文, guohw09@163.com。

降沿。针对我国装置的特性,需专门定制算法和策略,开发脉冲波形闭环软件。

本文介绍了我国 ICF 激光装置脉冲波形调控技术。在子束差异显著且电脉冲幅度转变为光脉冲幅度过程是非线性响应过程的场景下,通过开发算法、制定策略和软件,实现了适用于所有子束的高效率、高精度脉冲波形闭环调控能力。

1 脉冲波形整形原理

1.1 脉冲整形的响应原理和特性

脉冲波形整形过程是通过任意波形发生器产生许多脉宽为 100 ps 的单元电脉冲,电脉冲作用到电光调制器对光脉冲强度进行调节。当堆积不同数量、不同电压值的单元电脉冲时,即可产生不同形状的光脉冲^[12]。图 1 展示了电脉冲堆积与光脉冲输出的示意图。整形后的光脉冲再继续传输和放大。

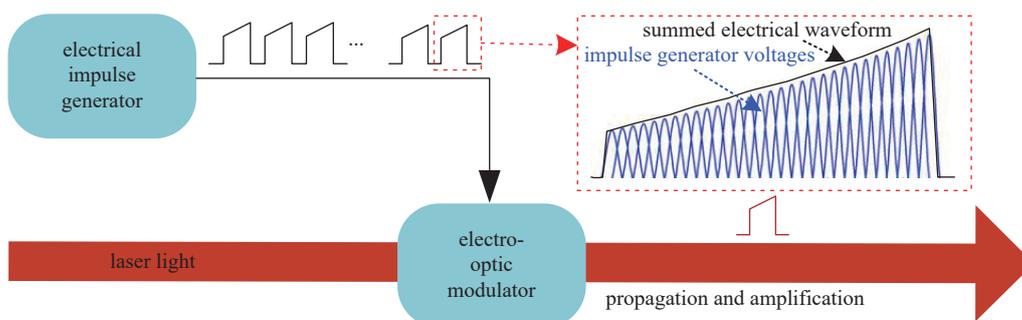


Fig. 1 Example of pulse generation by impulses summation

图 1 脉冲堆积实现波形轮廓整形

由于器件、预放重频增益的差异,各路所表现出来的响应曲线并不相同。测试发现,即使在同一路中,不同数量的电脉冲堆积所产生的电光幅度响应也不同,如图 2 所示。也就是说,电脉冲相互间存在着级联效应,即对邻近的幅度响应产生贡献。但其响应过程仍存在着非线性响应的共性特征,在低电压区响应迟钝,在高电压区出现饱和和效应。基于以上特性,很难用一个简单的响应函数来描述复杂的脉冲轮廓整形,因此,我们仍然采用基于闭环迭代的策略进行脉冲波形整形。

1.2 脉冲整形的流程设计和算法

图 3 是实现脉冲波形闭环整形的流程设计。首先,由任意波形发生器产生初始电脉冲序列,作用于电光调制器后生成初始光脉冲形状;初始脉冲经传输放大后在测量点由示波器捕获脉冲形状;之后由闭环软件计算目标波形和实测脉冲波形的差异;若此差异满足偏差要求,则输出该电压波形,若不满足,则根据差异完成电压调整,调整后的电压值再次加载到任意波形发生器上,直至实测脉冲波形满足要求。迭代流程中电压波形加载和计算时长通常在 5 s 内,脉冲波形采集时间通常可以控制在 20 s 内,则单轮流程可控制在 30 s 内,按最多迭代次数 20 轮计,通常 10 min 内可完成一个脉冲波形调控。

闭环流程的核心是迭代算法,其基本思路是补偿偏差。假设电脉冲作用于电光调制器的过程是线性的,则在

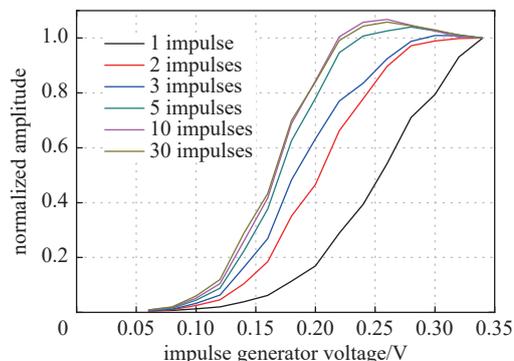


Fig. 2 Response curves with different amount of electrical impulses in a single beam

图 2 不同数量脉冲堆积的电光响应曲线

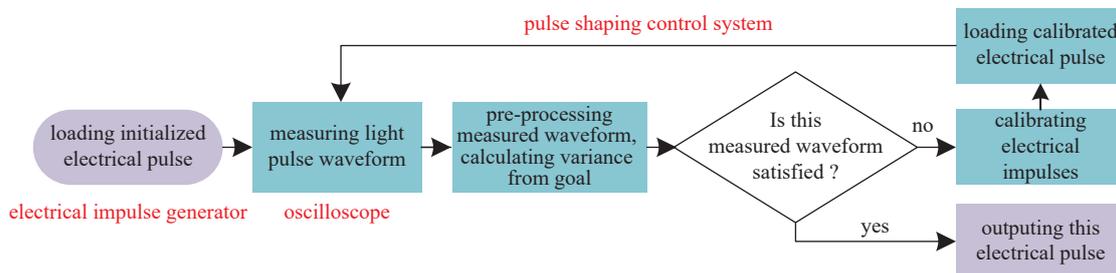


Fig. 3 Closed-loop feedback process

图 3 脉冲波形闭环流程

一个脉冲波形序列的第 i 个位置处应加载的电压为

$$V_i = V_{\max} G_i \quad (1)$$

式中: G_i 是归一化目标波形位于第 i 个取样点处幅值; V_{\max} 是任意波形发生器上最大可用电压; V_i 是该位置点处应加载的电压。实际上, 电光响应过程是非线性的, 再加上邻近子脉冲的级联响应, 其过程更为复杂。因此, 测量波形与目标波形之间会存在响应的偏差, 根据此偏差进行电压修正

$$\Delta V_i = k(G_i - M_i)V_{\max} G_i \quad (2)$$

式中: M_i 是归一化实测波形位于第 i 个取样点处幅值; k 是引入的一个调整因子, 用来提升迭代效率和精度。随着迭代结果逐渐逼近目标, 调整因子的值也是动态调整的。依据大量调整经验和效果获得了图 4 中黑线所示的阶梯调整因子, 其大多数时候使脉冲波形闭环迭代具有很好的收敛性, 但当实测脉冲波形与目标波形偏差处于阶梯处时, 收敛出现震荡。为此参考了图 2 的响应曲线, 考虑将响应曲线的趋势结合到阶梯调整因子中, 获得了图 4 中红线所示的优化后调整因子。且偏差量超过设定的图示范围时, 调整因子直接取最大值。

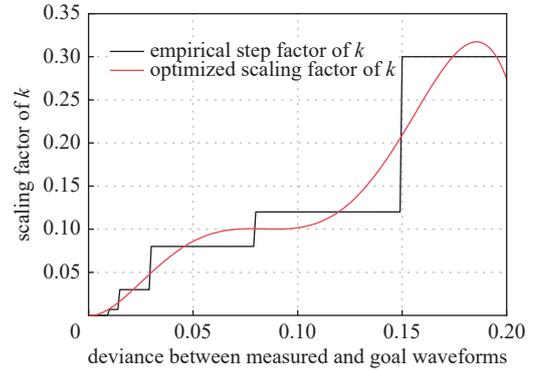


Fig. 4 Curves of scaling factor k

图 4 调整因子随偏差量的取值变化

1.3 迭代过程中的脉冲波形对齐

当计算测量波形与目标波形的偏差量时, 测量波形与目标波形之间必须实现一致的时序对齐, 否则将导致新一轮偏差计算错位, 进而打乱整个闭环流程。通常的波形对齐方式采用上升沿对齐、下降沿对齐或质心对齐。当脉冲波形没有陡峭的上升沿或者下降沿时, 上升下降沿对齐是无效的。而质心对齐对正在调整的、时间积分面积不断变化的波形来说也不适用。本闭环流程中采用添加一个时间基准脉冲的方式, 如图 5 所示, 在任意波形发生器上与整形脉冲下降沿间隔 1 ns 的位置增加一个电脉冲, 利用该电脉冲形成的高斯光脉冲的峰值确定整形脉冲波形时间窗口, 实现与目标波形稳定的时序对齐。当闭环流程完成后存储电压波形时, 去掉基准脉冲。

1.4 上升沿校正

不同电缆在传输电信号过程中, 响应性能不同, 导致信号上升沿坍塌, 在电光转换形成光脉冲轮廓时, 光脉冲轮廓上升沿出现相应的坍塌, 如图 6 所示。在闭环逼近目标波形的过程中, 上升沿需进行过量校正。在此过程中, 由于电脉冲序列首点左侧不存在其他电脉冲的级联耦合作用, 首个电脉冲将会过度修正而使上升沿形成尖峰。

为了避免首个电脉冲过度修正, 必须对其进行电压值干预。通过多次测试和优化, 每一次迭代计算后, 首个电脉冲的电压设置如下

$$V_1 = V_2 \quad (3)$$

式中: V_1 和 V_2 分别是第一、第二个子脉冲电压。

1.5 收敛判据

受限于光纤传输和空间光传输的各种效应, 如幅频效应^[13-15], 测量条件和算法整形能力、整形输出脉冲波形与

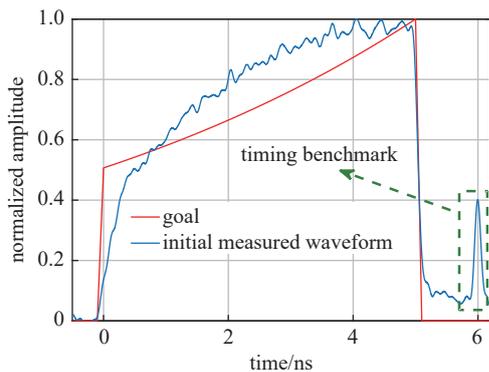


Fig. 5 Timing benchmark pulse is adopted to align to goal pulse during iterations

图 5 利用基准时序脉冲对齐测量脉冲与目标波形

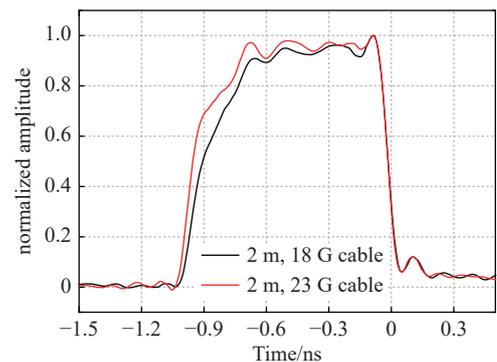


Fig. 6 Pulse shape by using different cables

图 6 电信号经不同电缆传输后产生不同光脉冲响应

目标不可能完全一致,且脉冲波形迭代收敛到一定程度后出现震荡。脉冲波形收敛程度以测量波形与目标波形之间偏差的均方根(式(4))来表征,其值越小,收敛度越好^[6]。此外,由于上升下降沿在测量上的响应度不足,连续脉冲波形的第一个点和最后一个点以及整形脉冲波形的台阶处不计入均方根计算。目前采用的策略为设置固定的闭环次数,到达设定次数闭环即停止。每次迭代计算的电压值、均方根(rms)值均暂时存储,待闭环结束后,从中自动挑出 rms 值最小的电压值作为最终闭环输出。

$$\sigma_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{M_i}{G_i} - 1 \right)^2} / N \quad (4)$$

2 实 验

根据以上算法和策略,我们在装置上开展了大量测试,并开发了软件平台,形成应用。在图3所示的闭环流程中,任意波形发生器的可调电压范围为0~0.35 V,电信号子脉冲脉宽100 ps,激光波长1053 nm,整形、放大后的重频脉冲采用光电探头和示波器测量。光电探头的波长响应范围为300~1100 nm,响应时间为60 ps,示波器采样率为8 GHz。闭环控制系统执行时,计算示波器测得的波形与目标波形偏差,通过式(2)修正后重新加载电压至任意波形发生器。闭环系统将重复此流程直至设定的闭环次数结束。图7是在装置三条不同子束中开展的不同形状

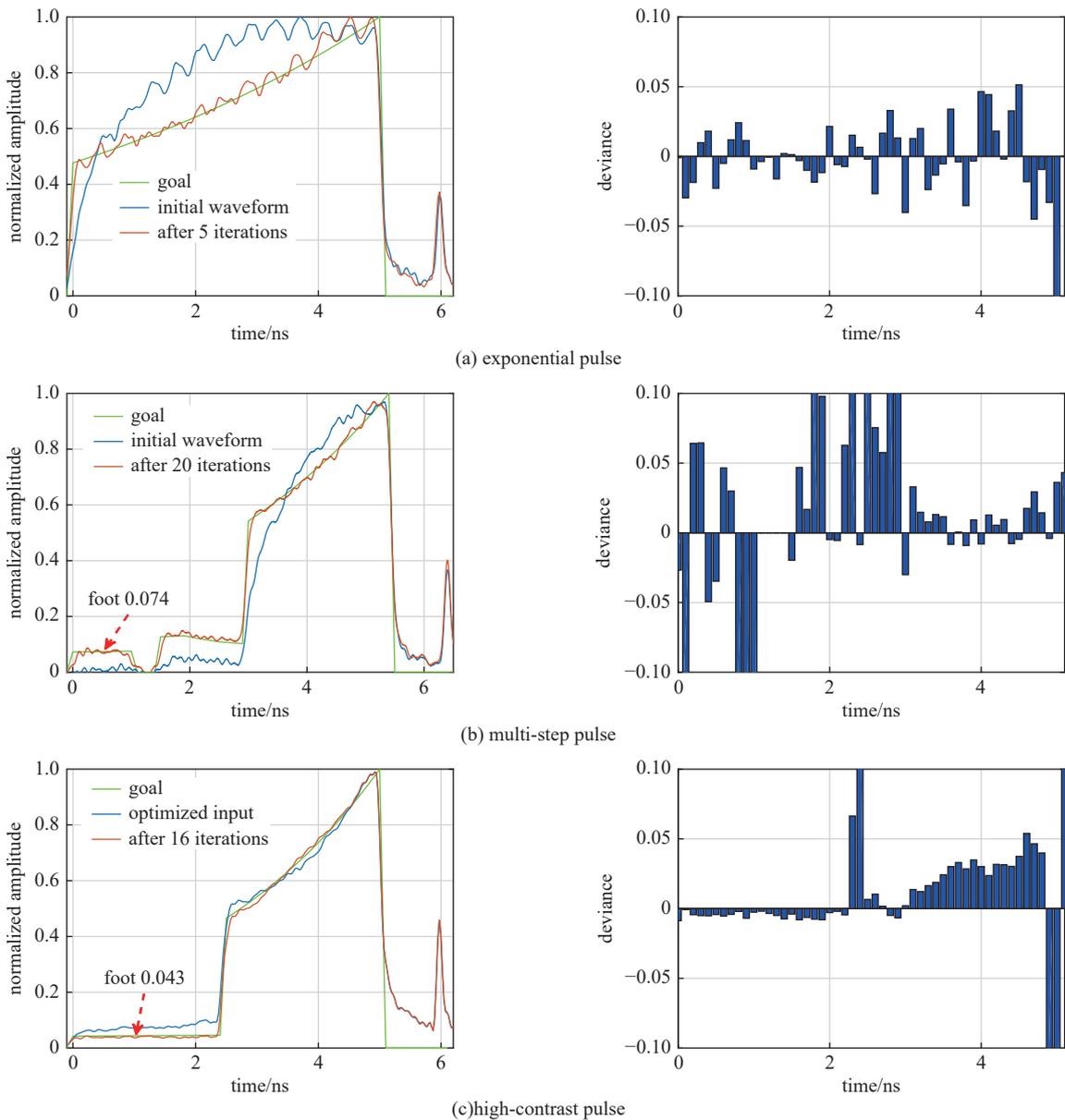


Fig. 7 Typical shaped waveforms
图7 三种脉冲波形的闭环结果

的脉冲波形闭环,分别是指数波、整形波形和 23:1 高对比度脉冲。每个脉冲波形设定了 20 次闭环,耗时约 8 min,闭环结束后自动从中输出最优闭环结果。三种脉冲波形的最优闭环结果分别出现在第 5 次用时 2 min、第 20 次用时 8 min 和第 16 次用时 6 min,其 rms 值分别是 2.98%、5.11% 和 8.29%。其中,指数波和整形波形是通过目标波形直接生成初始输入电压,测量噪声和幅频调制没有进行精密控制;而为了保障 23:1 高对比度脉冲波形的闭环精度和效率,初始输入电压采用历史类似脉冲波形的电压加载、测量噪声和幅频调制均控制到最低后才进入闭环流程。

从闭环结果来看,图 7(a)和图 7(b)都存在指数波形状部分,由于幅频调制的影响,图 7(a)指数波部分偏差大于图 7(b),图 7(b)和图 7(c)都存在脚平台部分,且图 7(c)的脚平台更低,但由于对图 7(c)的脉冲测量信噪比进行了优化,其脚平台偏差远远小于图 7(b)。通常,为了获得脉冲波形整体 rms 优于 10% 的整形精度,10:1 左右的普通脉冲信噪比应控制在 15:1 以上,幅频调制对比度需控制在 0.1 以下,20:1 以上高对比度脉冲波形应将信噪比控制到 40:1 以上并消除调制。而调控效率会受到调控灵敏度影响,在图 2 所示的低电压和饱和电压区,调控能力迟钝。因此整形波形闭环次数多于简单脉冲波形,越高对比度的脉冲波形需要的闭环次数则更多。为了减少迭代次数,可以优化初始加载电压,如使用历史类似脉冲波形电压、抬升低平台电压、建立机器学习等方式。图 7(c)的初始电压使用了历史类似脉冲波形的电压,大大减少了后续迭代次数。调控效率同时也受硬件、软件及使用策略的约束,如示波器采集时间、软件是否支持多子束并行等。软件和使用策略应基于操作可靠性和便捷性进行开发和制定,以实现高效脉冲波形整形。

3 结 论

基于 ICF 物理实验对激光参数多样性和复杂性的需求,以及装置各子路存在个性差异且独立可调的特点,本文中,开发了具有适应子束差异的波形迭代算法,可在 10 min 内实现 10:1 对比度左右的任意波形整形,并具备 23:1 高对比度波形调控能力,调控精度均优于 10% (rms)。但对于更高对比度脉冲波形整形,需提升波形质量和测量条件,优化算法。通过流程和软件控制,算法可满足多子束并行的自动波形调控。

参考文献:

- [1] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, et al. Laser compression of matter to super-high densities: thermonuclear (CTR) applications[J]. *Nature*, 1972, 239(5368): 139-142.
- [2] Moses E I, Lindl J D, Spaeth M L, et al. Overview: development of the National Ignition Facility and the transition to a user facility for the ignition campaign and high energy density scientific research[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 1-24.
- [3] Betti R, Zhou C D, Anderson K S, et al. Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal density[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98: 155001.
- [4] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. *Nature*, 2014, 506(7488): 343-348.
- [5] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. The high-foot implosion campaign on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 056314.
- [6] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- [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] Spaeth M L, Manes K R, Bowers M, et al. National Ignition Facility laser system performance[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 366-394.
- [9] Denis V, Beau V, Le Deroff L, et al. The Laser Megajoule facility: laser performances and comparison with computational simulation[C]//Proceedings of SPIE 10084, High Power Lasers for Fusion Research IV. 2017: 100840I.
- [10] Di Nicola J M, Bond T, Bowers M, et al. The National Ignition Facility: laser performance status and performance quad results at elevated energy[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 032004.
- [11] 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.
- [12] Hu Dongxia, Dong Jun, Xu Dangpeng, et al. Generation and measurement of complex laser pulse shapes in the SG-III laser facility[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13: 041406.
- [13] Rothenberg J E, Browning D F, Wilcox R B. Issue of FM to AM conversion on the National Ignition Facility[C]//Proceedings of SPIE 3492, Third International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion. 1999: 51-61.
- [14] Hocquet S, Penninckx D, Bordenave E, et al. FM-to-AM conversion in high-power lasers[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(18): 3338-3349.
- [15] Huang Xiaoxia, Deng Xuewei, Zhou Wei, et al. FM-to-AM modulations induced by a weak residual reflection stack of sine-modulated pulses in inertial confinement fusion laser systems[J]. *Laser Physics*, 2018, 28: 025001.
- [16] Renka R J. Nonlinear least squares and Sobolev gradients[J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2013, 65: 91-104.