

高功率激光多程放大系统中的快速波形预测

张艳丽¹ 张军勇¹ 尤科伟¹ 马伟新² 朱 俭² 刘德安¹ 朱健强¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800

²中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 对高功率激光多程放大系统中脉冲强度的三维时空变化特性进行了详细的数值分析, 理论计算表明具有一定时空分布的光束在放大过程中会产生复杂的时空演化畸变, 给脉冲功率的整形预测带来了一定的难度。提出了输入输出积分能量曲线拟合的方法, 实现对多程放大系统输入脉冲波形的高精度反演预测, 对于方波和复杂多台阶波形输出都能得到很好的预测结果, 方波预测相对功率偏差低于 0.032%, 三台阶脉冲相对功率偏差为 0.78%, 另外还实现了更为复杂 Haan 脉冲的反演预测, 相对功率偏差为 0.13%。该方法不仅精度高, 而且计算快速、适用性很强。

关键词 激光光学; 多程放大; 时空畸变; 波形预测; 功率平衡

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0714001

Fast Shape Prediction in Multi-Pass Amplifier of High Power Laser System

Zhang Yanli¹ Zhang Junyong¹ You Kewei¹ Ma Weixin²

Zhu Jian² Liu Dean¹ Zhu Jianqiang¹

¹National Laboratory on High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Shanghai Institute of Laser Plasmas, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract Three-dimensional spatio-temporal variation characteristics of pulse intensity is numerically simulated in detail in multi-pass amplifier of high power laser system. Theoretical calculation indicates that the complicated spatio-temporal distortion occurs as the pulse with specific spatio-temporal distribution passes the amplifier. This change imposes some difficulties on shaping prediction of the pulse power. The curve fitting method of input-output integral energy is proposed to achieve the inverse prediction of inject pulse shape for multi-pass amplifier system with high precision. The better prediction result is achieved not only for square pulse shape but also for multiple-steps complex pulse output, the relative power deviation reaches up to 0.032% for the square pulse output, and 0.78% for multiple-steps complex pulse output. In addition, the inverse prediction of more complicated Haan pulse is achieved. The relative power deviation is 0.13%. This method has not only high precision but also rapid computation and strong applicability.

Key words laser optics; multi-pass amplifier; spatio-temporal distortion; shape prediction; power balance

OCIS codes 140.3280; 140.3580; 190.2620; 160.4330

1 引 言

惯性约束聚变物理对高功率激光装置提出了十分严格的要求, 波形控制和功率平衡是其中十分关键的一环。大型激光装置包含成千上万个光学元器件, 其中任意一个元器件指标、放大增益、光学传输损耗和频率等任何环节的差异^[1-2], 可能导致最终产生光束输出能量和功率波形的不稳定性, 这就迫切需要自动的运算程序, 来预设每一束和每一发次的输入边界条件, 确保整个庞大复杂系统的稳定运行和高准确性。现今最大的激光驱动器是美国国家点火装置(NIF)^[3], 192束激光依靠激光性能运行模型

收稿日期: 2015-10-13; 收到修改稿日期: 2016-03-02

作者简介: 张艳丽(1981-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事高功率激光传输及放大等方面的研究。

Email: zhangyl@siom.ac.cn

(LPOM)^[4]实现装置高性能稳定运行,LPOM的激光参数设置模块为其核心,利用不同的反馈策略实现基频段和频率转换段的波形反演,指导输入波形的参数设定。基频放大段由于涉及元件众多,波形畸变最为严重,波形反演的难度更高。以往对基频段波形反演的研究主要集中在时间一维度^[5-7]和空间分布为平面波^[8-9]的情况,文献[10]虽利用反复迭代算法在输出脉冲时空分布已知的情形下,给出多程放大系统的注入脉冲分布,但得到的注入脉冲时空分布不能分离,这相对控制系统而言难度较高。有必要研究注入脉冲具有一定空间分布的波形反演问题。

本文以此为出发点,分析放大过程中的时空演变,提出了快速高精度波形反演方法,以有效指导高功率激光放大系统的波形控制。详细分析了具有空间分布的光束在多程放大系统中的变化特性,发现空间分布的注入光束产生了复杂的时空畸变。根据放大过程的本质,提出输入输出积分能量曲线方法,实现了对注入脉冲波形的反演预测,结果表明,该方法不仅快速而且精度很高,普适性很强,适用于注入有空间分布且任何复杂波形的情况。

2 放大结构及理论模型

多程放大系统如图1所示,此结构在高功率激光放大构型中最为典型,美国NIF装置及神光II-UP装置均采用了这一先进的技术方。光束由传输空间滤波器(TSF)小孔注入到助推放大器(AMP2)中进行放大,依次经过反射镜M3和偏振片P,大口径开关(PEPC),腔空间滤波器(CSF)进入腔放大器(AMP1)进行放大,通过PEPC的偏振旋转,实现腔内的四程放大^[11],通过偏振片反射导出进入AMP2进行二程放大。钕玻璃片状放大器采用11+5配置,腔内片放数目为11,助推片放数目为5。该多程放大系统实现了四个量级的能量放大,有效提高了系统效率,减少了成本。脉冲在此系统的传输放大特性用F-N方程来表征,可利用脉冲分割模型和集中损耗近似^[12]方法进行求解。

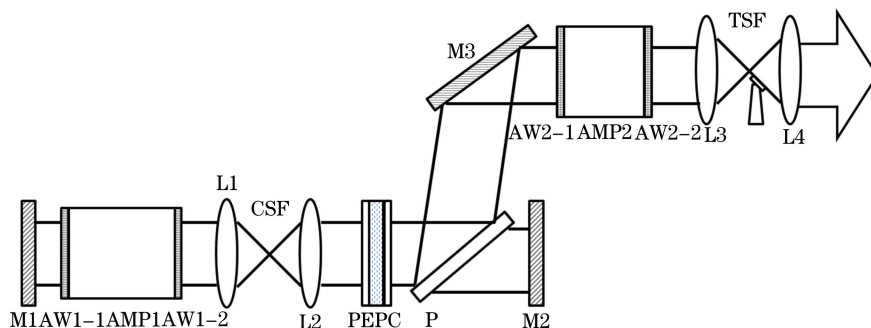


图1 多程放大系统结构简图

Fig. 1 Configure diagram of multi-pass amplifier system

3 数值模拟分析和波形预测

模拟计算所采用的参数为初始小信号增益系数 $g_0 = 0.05 \text{ cm}^{-1}$,饱和能流密度 $E_s = 4.7 \text{ J/cm}^2$,放大器动态吸收系数 $\alpha = 0.004 \text{ cm}^{-1}$,放大介质厚度 $L = 4 \text{ cm}$ 。全反射镜反射率为 0.998,元件透射率为 0.996,偏振片的透射率为 0.98,偏振片反射率为 0.99,开关晶体透射率为 0.934,滤波孔的透射率为 0.98;注入光束强度的空间分布为 11 阶超高斯,口径为 $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$,多程放大系统中光束口径为 $37.5 \text{ cm} \times 37.5 \text{ cm}$ (零强度);选取光束传输方向为 z 方向,光束沿着 x, y 方向分布, x, y 方向计算窗口为 39 cm,采取点为 128×128 ,光束中心设为坐标原点,时间方向切片为 50。

若注入波形选为方波,注入能量为 1.3 J,可得到输出脉冲能量为 17.2 kJ,输出脉冲的强度分布如图2所示,可以看出输出脉冲强度发生了复杂的时空变化,脉冲的时空不能分离。脉冲在不同的空间位置(x, y)处的波形如图2(a)所示,可见由于粒子数反转的逐渐消耗和增益饱和效应,脉冲的后沿低于前沿,脉冲在中心点(0, 0)脉冲波形畸变最大,前后沿对比度为 0.083,而在空间位置(-14.6, 0)和(-16.5, 0)处的前后沿对比度分别为 0.1, 0.175,相对较小,显然这是因为两个位置处对应的注入脉冲的强度较小,粒子数反

转的消耗要小于中心点。输出脉冲的强度在不同时刻的空间分布如图 2(b)所示,可见脉冲在不同的时刻,空间分布仍为超高斯分布,但是超高斯边缘的陡峭度以及平顶区大小不同,脉冲后沿时刻空间分布的边缘最陡,脉冲平顶区最大,长度约为 31.2 cm(99%最大强度区,下同);而脉冲中心时刻的空间分布的边缘相对较缓,平顶区尺寸相对较小,其长度约为 27.4 cm;脉冲前沿时刻的空间分布的边缘最为平缓,平顶区尺寸较小,仅为 22.4 cm。产生这种不同的原因主要是增益饱和效应的不同,在脉冲后沿的增益饱和效应最为突出,空间边缘点和中心点的增益大小相差较大。实际应用中,最为关注的是功率波形(同时刻的空间积分),以及通量密度分布(同空间位置的时间积分)。对应图 2 输出脉冲的功率波形和通量密度分布如图 3 所示,可以看出功率波形十分接近于 $(-14.6, 0)$ 位置处的波形和中心点位置的波形有一定的差别,与边缘位置 $(-16.5, 0)$ 波形差别最大,时空畸变的不同给脉冲整形的预测带来了一定的难度,若预期得到输出功率为方波的脉冲,必须采取有效的方法进行逆向反演。图 3(b)显示通量密度分布也为超高斯分布,边缘变化较平缓,其平顶区长度为 24.2 cm。

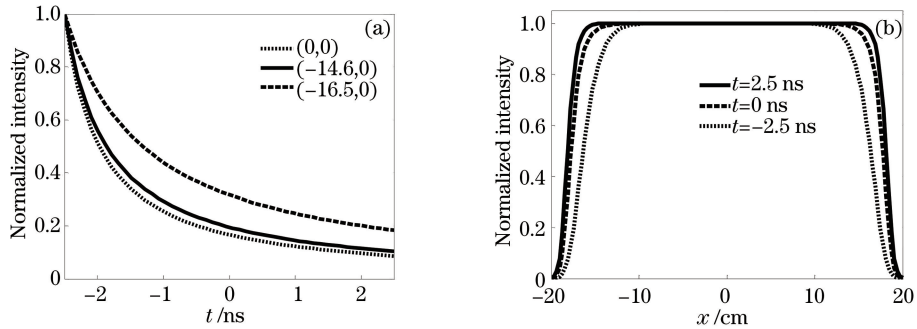


图 2 归一化强度的时空分布。(a) 不同坐标点的时间波形; (b) 不同时刻的一维空间分布
Fig. 2 Spatial and temporal distribution of normalized intensity. (a) Time shape for different coordinate points; (b) one-dimensional spatical distribution for different time points

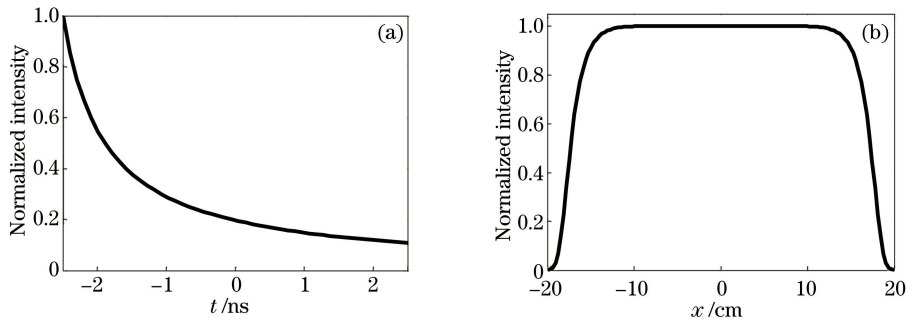


图 3 (a) 归一化功率波形; (b) 归一化一维通量密度分布
Fig. 3 (a) Normalized power shape; (b) normalized one-dimensional fluence density distribution

脉冲功率波形的反演预测一般采用增益通量曲线(GFC)或采取反复迭代的方法进行求解。增益通量曲线方法的理论基础是在输入能量、脉宽相同时窄带脉冲的能量放大过程与脉冲波形无关,根据相同输入条件下,任意波形的 GFC 曲线求解相同输出能量下的注入脉冲波形。反复迭代算法适用于输出波形为方波的情况,通过持续改变指数型注入脉冲的对比度,进行反复迭代计算得到方波脉冲输出。GFC 曲线一般适用于输入空间分布为平面波的情况,对于有空间分布的情况效果不佳,且在过饱和的多程放大系统中有一定的相对误差。反复迭代方法适用范围更为局限,且计算十分费时。在此提出利用输入输出积分能量曲线拟合的方法,实现输入脉冲的波形预测,其理论基础是相同输入输出能量条件下,输入输出积分能量曲线与脉冲波形无关。根据文献[6]中的公式,光脉冲在增益介质中的传输放大方程的解可写为

$$\eta = F(R, \sigma_0) - F(R_0, \sigma_0), \quad (1)$$

式中 $R = \int_{-\infty}^{\tau} I(\tau') d\tau'$, 为光脉冲在 $(-\infty, \tau)$ 区间内的积分能量密度, 则有 $I(\tau') = \frac{\partial R}{\partial \tau}$, σ_0 为初始反转粒子数

密度, $\eta = \frac{x}{c}\gamma$, 为与介质长度 x 和损耗系数 γ 有关的量, F 表示特定函数。从公式可以看出, 脉冲放大的过程通过确定的函数关联着输入和输出积分能量密度, 同理也可得到某时刻对应的输入积分能量 E_{τ_0} 和输出积分能量 E_{τ} (积分能量密度在垂直传输方向的两维空间积分) 只与脉冲放大系统参数配置有关, 而与脉冲波形的具体输入形状无关。因此以某一任意波形作为输入, 正向放大传输得到输出波形, 即可得到 E_{τ_0} 与 E_{τ} 的拟合曲线, 而这条曲线在输入能量、脉宽、放大系统相同时是固定的, 其他输入 (已知输出波形) 或输出波形 (已知输入波形) 皆可根据此曲线通过关系 $P(\tau) = \frac{\partial E_{\tau}}{\partial \tau}$ 而获得。具体的输入波形的反演求解过程为对于给定的放大系统输入任意波形 $P_0(\tau)$, 将其离散化分为 N 个序列, ΔT 为时间采样间隔, 其各个时刻 $\tau(i)$ 积分能量等于该时刻与之前各个时刻的能量和 $E_{\tau_0} = \sum_{k=1}^i P_0(k) \Delta T$, 将该波形带入传输放大方程数值求解可得到 $P(\tau)$, 即可得到对应时刻的输出波形的积分能量 $E_{\tau} = \sum_{k=1}^i P_0(k) \Delta T$, 利用多项式拟合获得输入输出积分能量曲线 $E_{\tau_0} - E_{\tau}$, 这个拟合曲线就是在相同输入输出能量条件下遵循的固定曲线。若预期得到同样输出能量下功率波形 $P_{OR}(\tau)$, 其 $\tau(j)$ 时刻积分能量为 $E_{OR}(\tau)$, 时间序列为 M , 时间间隔为 ΔT_R , 根据上面求得的输入输出积分能量曲线关系可得到对应时刻的注入脉冲的积分能量 $E_{IR}(j)$, 注入脉冲的功率波形通过积分能量 E_{IR} 微分除以时间间隔得到, 即 $P_{IR}(\tau) = \frac{\Delta E_{IR}}{\Delta T_R}$ 。此方法只需通过一次正向数值计算得到的积分曲线, 即可得到其他波形的注入波形, 计算快速。此方法和增益通量曲线的理论前提虽然相同, 但是更具普适性, 因为它体现了放大过程的基本内涵——能量提取过程, 即波形的畸变程度与累积能量提取程度相关, 此方法对于有空间分布的注入脉冲整形预测十分有效。而 GFC 曲线的瞬时功率增益在不同的注入波形下会有百分之几的差异^[13], 一个重要的原因是增益-通量曲线进行曲线拟合时, 会由于采样低而产生一定的差别。

对应图 2 中的计算参数即注入能量为 1.3 J, 输出能量为 17.2 kJ, 注入脉冲为方波的条件下得到的输入输出积分能量曲线如图 4 所示, 若预期得到方波的功率输出, 利用图 4 的曲线可通过上述方法反向计算得到注入脉冲波形, 如图 5(a) 所示。把注入脉冲带入整个放大系统进行数值模拟计算, 得到的功率波形如图 5(b) 所示。图 5(b) 中显示了由输入输出积分能量曲线以及指数型反复迭代方法得到的功率波形和理想预期波形的对比,

可见输入输出积分能量曲线方法得到的输出功率波形基本接近方波, 用相对功率偏差 $\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^n \left(\frac{P_j - P_0}{P_0} \right)^2}$ 来描述预测精度, P_j, P_0 为预期和理想波形的瞬时功率, 根据公式得到的相对功率偏差为 0.032%, 而反复迭代方法得到的波形却与理想预期方波相差较大, 相对功率偏差为 0.27%。同样采用图 4 的输入输出积分能量曲线, 得到三台阶脉冲输出的注入波形如图 6(a) 所示, 输出功率波形如图 6(b) 所示, 可见和理想预期波形符合得很好, 相对功率偏差为 0.78%。复杂脉冲的注入波形如图 7(a) 所示, 输出功率波形如图 7(b) 所示, 可见波形预测结果和理想预期波形基本重合, 相对功率偏差为 0.13%。综上所述, 利用输入输出积分能量曲线方法进行波形反演预测, 适用于任何复杂波形, 且匹配精度很高, 避免了利用 GFC 曲线法中采用相似波形的环节^[14]。

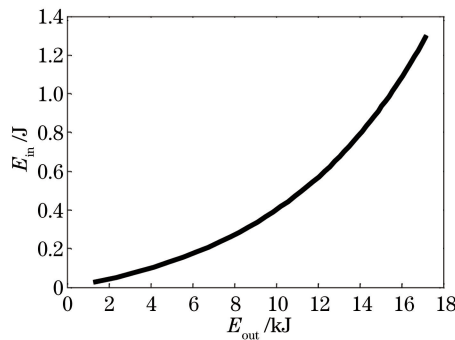


图 4 输入输出积分能量曲线
Fig. 4 Input-output integral energy curve

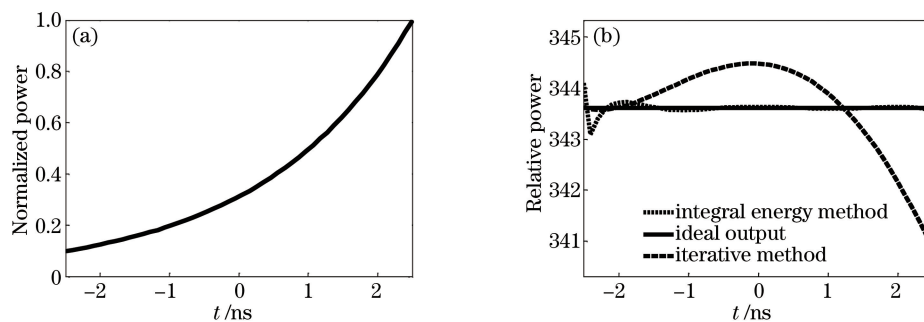


图 5 (a) 方波输出反演得到的注入脉冲波形; (b) 输出功率波形

Fig. 5 (a) Inject pulse shape for square pulse output; (b) output power shape

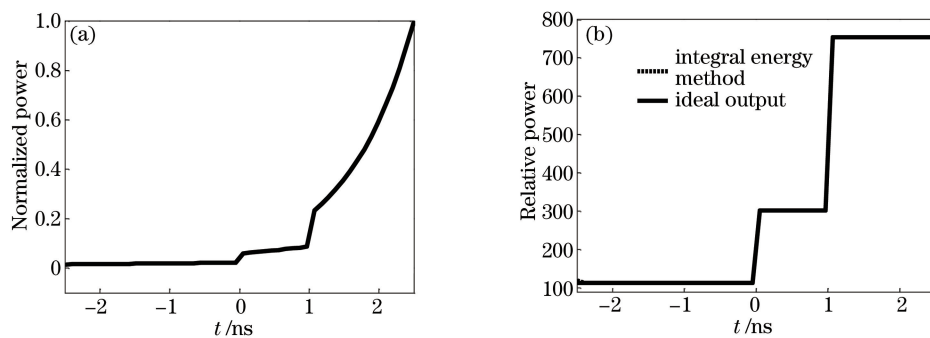


图 6 (a) 三台阶波形输出反演得到的注入脉冲波形; (b) 输出功率波形

Fig. 6 (a) Inject pulse shape for three steps pulse output; (b) output power shape

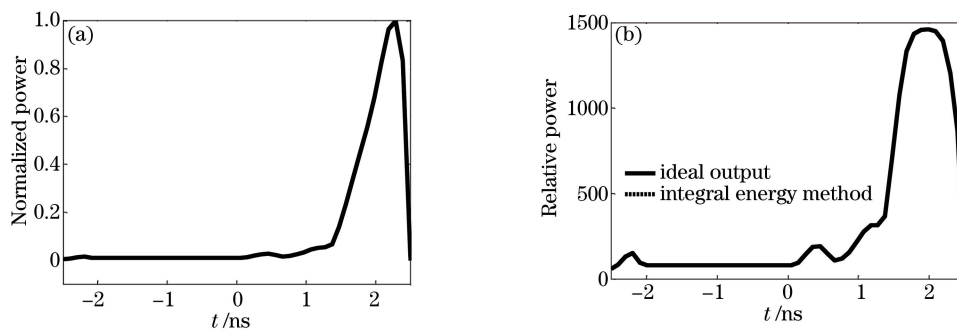


图 7 (a) 复杂波形输出反演得到的注入脉冲波形; (b) 输出功率波形

Fig. 7 (a) Inject pulse shape for complicated pulse output; (b) output power shape

4 结 论

系统地分析了具有一定空间分布的脉冲在放大过程中强度的三维时空变化特性,由于脉冲在空间平顶区和边缘区放大程度的不同,造成了不同的时间波形畸变,在平顶区畸变最大,在边缘区畸变较小。功率波形由于空间的积分效应呈现了特殊的形状,给脉冲的反演预测带来了一定的难度。回归到放大过程的本质,提出了输入输出积分能量曲线的方法,以实现快速反演,该方法适用于任何复杂波形,且匹配精度很高。所得到的方波输出相对功率偏差为 0.032%,三台阶脉冲预测的输出功率波形和理想预期波形符合的很好,相对功率偏差为 0.78%,另外还实现了更为复杂脉冲的反演预测,相对功率偏差为 0.13%。

参 考 文 献

- 1 Peng Jiaqi, Hu Xiaochuan, Chen Lixia, *et al.*. Effect of structural parameters of deformable mirrors on phase characteristics of high-power laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0514001.

- 彭家琪, 胡小川, 陈丽霞, 等. 变形镜结构参数对高功率激光相位特性的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0514001.
- 2 Ren Lei, Zhao Dongfeng, Zhu Jianqiang. Advances intarget and beam alignment unit technologies of high power laser drivers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 080001.
任 磊, 赵东峰, 朱健强. 高功率激光驱动器靶定位瞄准单元技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080001
- 3 Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. Appl Opt, 2007, 46(16): 3276-3303.
- 4 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]. SPIE, 2015, 9345: 93450E.
- 5 Tang Lijia, Cai Xijie, Lin Zunqi. Control of pulse shape in "Shen Guang II" main amplifiers[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(6): 1075-1079.
唐立家, 蔡希洁, 林尊琪. "神光 II" 主放大器中的波形控制[J]. 物理学报, 2001, 50(6): 1075-1079.
- 6 Liu Renhong, Cai Xijie, Yang Lin, *et al.*. Study on gain fluence curve of a laser pulse amplifier[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(7): 3140-3143.
刘仁红, 蔡希洁, 杨 琳, 等. 激光脉冲放大器的增益通量曲线研究[J]. 物理学报, 2005, 54(7): 3140-3143.
- 7 Liu Renhong, Cai Xijie, Yang Lin, *et al.*. Numerical simulation of output pulse shape for "Shengguang II" [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(12): 4189-4193.
刘仁红, 蔡希洁, 杨 琳, 等. "神光 II" 装置激光输出波形的数值模拟[J], 物理学报, 2004, 53(12): 4189-4193.
- 8 Wang Wenyi, Zhao Runchang, Su Jingqin, *et al.*. High-power solid-state laser performance simulation model[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(s1): 23-27.
王文义, 赵润昌, 粟敬钦, 等. 高功率固体激光性能仿真模型[J]. 光学学报, 2008, 28(s1): 23-27.
- 9 Zhang Junyong, Zhang Yanli, Ma Weixin, *et al.*. High-precision inversion method of pulse shape at SGII facility[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0414004.
张军勇, 张艳丽, 马伟新, 等. 神光 II 全链路脉冲波形的高精度反演[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0414004.
- 10 Zhang Bin, Lü Baida. An inverse problem of multistage and multipass pulsed-laser amplifiers[J]. Chinese J Lasers, 1997, 24(6): 495-500.
张 彬, 吕百达. 多级和多程脉冲激光放大器的逆问题[J]. 中国激光, 1997, 24(6): 495-500.
- 11 Tang Shiwang, Zhu Haidong, Guo Ailin, *et al.*. Study of simulation and experiment of the prompt pump-induced wavefront of the four-pass amplification high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(7): 0702005.
唐仕旺, 朱海东, 郭爱林, 等. 四程放大高功率激光驱动器动态波前模拟与实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0702005.
- 12 Zhang Bin, Lü Baida. Changes in high-power laser beams passing through a pulsed-laser amplifier[J]. Chinese J Lasers, 1996, 23(12): 1061-1066.
张 彬, 吕百达. 高功率激光通过脉冲放大器的变化[J]. 中国激光, 1996, 23(12): 1061-1066.
- 13 Wang Wenyi, Su Jingqin, Li Yangchun, *et al.*. Power-balance integrated analytic model of high-power solid-state laser [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(s1): 33-39.
王文义, 粟敬钦, 李阳春, 高功率固体激光功率平衡综合分析模型[J]. 中国激光, 2009, 36(s1): 33-39.
- 14 Wang Wenyi, Zhao Runchang, Su Jingqin, *et al.*. Preliminar laser-pulse-shaping experiment on technical integration line [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1051-1054.
王文义, 赵润昌, 粟敬钦, 等. 神光 III 原型装置初步的激光脉冲整形实验[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1051-1054.