

高功率激光装置主放大器的增益稳定性研究

李 平 梁 越 徐 冰 李 海 耿远超* 赵润昌 栗敬钦

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 高功率固体激光装置主放大器是能量提取最多的一个环节,它受环境影响因素较多,难以建立考虑各因素影响的微观模型。目前,国内外还没有主放大器增益的精确预测模型和实验数据分析报道,现有预测模型较为粗糙。从统计角度对高功率激光装置主放大器增益的变换规律进行了分析,指出宏观上 3 种不同特点的增益变化,分别为增益的低频演化规律、增益随日运行发次的变化规律及增益的高频稳定性特性;并由此建立了包含权重因子的主放输出预测模型。通过神光 III 原型装置的运行数据对建立的模型进行了考核,结果显示,与以往的单发次的递推模型相比,新模型对增益预测的准确性可提高 1 倍。研究结果对大型固体激光装置的高效运行具有指导意义。

关键词 激光器;高功率激光器;增益稳定性;主放大器;权重因子

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0102007

Study on Gain Stability of Main Amplifier in High Power Laser Facility

Li Ping Liang Yue Xu Bing Li Hai Geng Yuanchao Zhao Runchang Su Jingqin

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

Abstract Output energy of high power laser facility is mostly extracted from main amplifiers. Due to the circumstance complexity and diversity in practice, it is difficult to build a precise microcosmic model in consideration of various factors. However, the existing predicting model of gain is imprecise, and no accurate model and corresponding experimental results are reported so far. Statistical methods are proposed to analyze the gain stability of main amplifiers in high power laser facility. The varying rules of the gain are put forward, including low frequency change, variation by the sequence number in one day and high frequency stability. Based on above-mentioned rules, the gain prediction model with weight factor is built and verified by SG-III prototype operation data. The results show that the accuracy of gain prediction can be improved by one time in comparison with that of the old method, giving powerful directions for efficient operations in high power solid laser facility.

Key words lasers; high power laser; gain stability; main amplifier; weight factor

OCIS codes 140.3280; 140.3580; 140.3425

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)研究中,多路激光脉冲的能量平衡是物理实验对激光器的一个重要要求^[1~3]。能量平衡的实质是能精确预测每一路激光的能量并实现精密控制,这需明确激光装置各系统(前端、预放^[4]、主放^[5]、三倍频^[6])的输出稳定性。主放大器是固体激光装置提取能量最多、受环境影响因素也较多的一个环节,不易精确控制^[7,8]。

本文从统计的角度对大量的运行发次的主放增益特性进行了分析,指出高功率固体激光装置在运

行中,主放增益在低频缓变的趋势下,还存在着高频不稳定性,它是增益预测偏差的主要来源;进一步分析指出高频不稳定性包含与日运行发次相关的系统偏差,该影响主要来源于上发次中残余的热效应带来的激光退偏。针对神光 III 原型装置的运行数据,建立了与发次相关的权重因子,提出了以权重因子和日运行发次相关的主放能量输出的预测模型。最后通过神光 III 原型装置对建立的模型进行了实验考核,结果显示,与以往单发次递推模型相比,新模型对增益预测的不确定度从原来的约 4% 下降到 2%

收稿日期: 2011-08-10; 收到修改稿日期: 2011-09-20

作者简介: 李 平(1984—),男,硕士,主要从事高功率固体激光方面的研究。E-mail: liping1984@tsinghua.org.cn

* 通信联系人。E-mail: gengyc03@126.com

左右,准确性有近 1 倍的提高,这也为能量平衡带来相同程度的优化。该研究结果对大型固体激光装置的运行具有指导意义。

2 理论模型与相关参量

放大过程主要以 F-N 方程进行描述^[9],当输入脉冲通过放大器时,原子受到激励释放出存储的能量,可通过速率方程来计算放大过程。忽略荧光和抽运在脉冲持续时间内的影响,则反转粒子数 n 满足

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n c \sigma \phi, \quad (1)$$

式中 ϕ 为光子通量, σ 为发射截面, γ 为反转减少因子,当脉冲通过具有反转粒子数的介质时,光子传输方程为

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = c n \sigma \phi - \frac{\partial \phi}{\partial x} c, \quad (2)$$

(2)式说明光子密度的变化可分为两部分,第一部分体现为右边第一项,为受激发射过程产生的光子数,第二部分体现为右边第二项,为从该体积发射的光子数。为计算方便,假设输入到放大器中的为矩形脉冲,持续时间为 t_p ,初始光子密度为 ϕ_0 ,进入增益介质的位置为 $x=0$,解速率方程可得光子密度的解为

$$\frac{\phi(x,t)}{\phi_0} = \{1 - [1 - \exp(-\sigma n x)] \times \exp\{-\gamma \sigma \phi_0 [c(t - x/c)]\}\}^{-1}. \quad (3)$$

考虑光束通过长度为 l 的增益介质,能量增益为

$$G = \frac{1}{\phi_0 t_p} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(l,t) dt. \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式,并积分得

$$G = \frac{1}{c \gamma \sigma \phi_0 t_p} \ln \{1 + [\exp(\gamma \sigma \phi_0 \tau_0 c) - 1] \exp(n \sigma l)\}. \quad (5)$$

为与实际可测量的激光参量联系起来,定义以下几个参量:单位面积输入能量 E_{in} ,饱和能量密度 E_s ,小信号增益 G_0 ,其表达式分别为

$$E_{in} = c \phi_0 t_p h \nu, \quad (6)$$

$$E_s = \frac{h \nu}{\gamma \sigma}, \quad (7)$$

$$G_0 = \exp(n \sigma l). \quad (8)$$

将(6)~(8)式代入(5)式,可得

$$G = \frac{E_s}{E_{in}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{E_{in}}{E_s}\right) - 1 \right] G_0 \right\}, \quad (9)$$

对(9)式进行整理得

$$E_{out} = E_s \ln \left\{ 1 + \left[\exp\left(\frac{E_{in}}{E_s}\right) - 1 \right] G_0 \right\}. \quad (10)$$

(10)式表明了放大器对输入输出能量的关系,由(10)式可见,决定放大器输出水平主要受两个参量影响,分别为小信号增益 G_0 和饱和能量密度 E_s 。

忽略元器件损耗,四程放大带来增益恢复等问题,而将这些因素统归结于(10)式中,认为它们的稳定性决定了激光器整体增益的稳定性。

3 激光装置增益变化规律

3.1 激光装置增益变化的原因分解

F-N 方程中有两个参数会对增益稳定性造成影响,首先将对数据进行以下分析处理,确定在运行变化过程中,增益的变化是来源于增益的饱和和通量还是小信号增益。处理方法为固定饱和和通量和小信号增益,对实验数据进行拟合,拟合曲线的相关系数 R 作为评价参量,来比较小信号增益和饱和和通量对增益稳定的影响程度。图 1(a)是实验数据按照(10)式的拟合情况,其中 A 代表小信号增益, B 代表饱

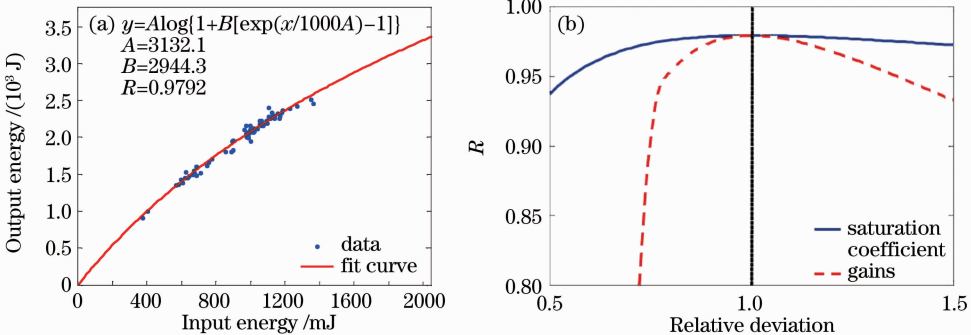


图 1 (a)激光装置主放实验数据的 F-N 曲线拟合;(b)相关系数 R 随饱和和通量 B 和小信号增益 A 的变化曲线
Fig.1 (a) Experimental data with F-N curve fitting; (b) correlation coefficient varied with saturation coefficient and small signal gain

和通量(其中包含对光束面积的乘积)。按照以上的方法分析小信号增益和饱和通量的改变对增益曲线的影响,如图1(b)所示,由图可见,小信号增益的变化对增益曲线的影响要敏感得多,而饱和通量几乎不影响曲线的拟合水平。因此下文的分析将固定饱和通量,认为小信号增益的变化作为造成主放增益变化的主要原因。

3.2 激光装置小信号增益的演化规律

以神光Ⅲ原型装置为例,固定激光装置饱和通量,对运行发次的小信号增益进行统计计算。图2是其中一路小信号增益数据随发次的关系(彩图见电子版),其中红线是滤去高频后的小信号增益随运行发次的演化曲线。

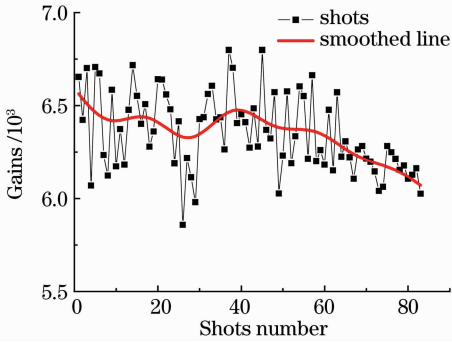


图2 主放小信号增益随运行发次的变化
Fig. 2 Small signal gain of main amplify varied with the operation number

由图2可见,小信号增益存在低频变化(红色曲线)和高频的扰动,可从统计角度将这两种表现分开。设系统增益 G 包含缓变项 G_0 和干扰项 G' , 那么

$$G = G_0 + G', \quad (11)$$

式中 G_0 表示宏观趋势,如图中红色线所示。可通过数据拟合分析给出数值表达式, G' 为叠加在 G_0 上

的干扰项。低频扰动整体上表现为下降的趋势,这是可以理解的:激光装置的运行会引起系统的透射率等系统特性的下降,这些让装置出现一定程度的增益下降;高频扰动反映为激光装置系统增益的稳定性,它受影响的因素较多,且成因复杂,较难建立健全严格的理论。因此,未对 G' 作细致分析时,以 G_0 作为系统增益可以提高对激光装置增益预测的准确性。通过数值计算表明, G_0 的应用对系统小信号增益的影响从均方根(RMS)值为 4% 降为 2.8%, 得到了较大幅度的提高。

但进一步分析可知,前发次因累计的热效应会造成系统退偏,它会影响系统的透射率从而影响实际表现出的系统增益,该影响在(11)式中表现为干扰项 G' ,但实际上它却被系统影响,可以通过修正模型来消除该影响。

仍以神光Ⅲ原型装置为例,对运行发次记录按照日发次序号进行统计,建立了小信号增益随日运行发次的关系,如图3所示(彩图见电子版)。其中图3(a)为神光Ⅲ原型装置各路归一化小信号增益(按各路小信号增益平均值进行归一化)随日运行发次的变化规律。由图可见,各路总体上有较一致的规律:前面发次累计的效应会降低下一发次的小信号增益,各路影响程度基本一致。图3(b)对8路归一化小信号增益进行了平均处理,并用同一系数来描述8路的该系统影响规律,以线性函数对其进行拟合。由图可见,数据点与拟合曲线比较吻合。将该系统规律引入到小信号增益的统计分析中,重新评估系统主放小信号增益的不稳定性,结果显示,引入该系统偏差,干扰项 G' 对系统小信号增益的影响从RMS值为 2.8% 降为 2.1%, 增益准确性提高了近 30%。

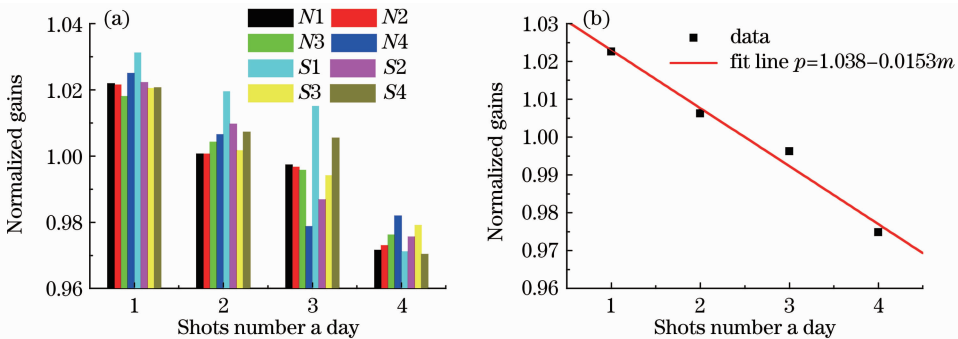


图3 (a)主放能量偏差与日运行发次序号的关系;(b)主放小信号增益与日运行发次序号的关系
Fig. 3 (a) 1W energy deviation varied with the sequence number of a day; (b) small signal gain of main amplify varied with the sequence number of a day

4 激光装置增益预测模型

从统计角度来看,小信号增益的不稳定性包含缓变项 G_0 和 高频扰动项 G' , 而 G' 又包含与日运行发次相关的系统偏差 G_1 和 高频项 G_2 。缓变项 G_0 反映了系统的小信号增益与最近的发次的小信号增益平均值较为接近, G_1 可通过引入与日运行发次相关的函数来表征, 而高频项 G_2 则需要通过大量发次的统计平均予以消除。因此, 为准确预测下一发的小信号增益, 基于以上的理论分析建立了新的主放增益预测模型, 相比以前的单一发次的递推预测模型, 它有如下改动:

- 1) 多发次的拟合平均, 设选取的发次数目为 n ;
- 2) 发次数据的拟合引入权重因子, 设权重因子

为 q_1, q_2, \dots, q_n ;

3) 用与日运行发次相关的函数对小信号增益进行修正, 修正系数为 $p(m) = a - b \times m$, 其中 m 为日运行发次, a, b 为拟合的常量。

其中 1) 表示为多发平均来获得 G_0 , 同时消除 G_2 的影响, 2) 的目的是因为 G_0 本身也存在低频演化, 离预测发次间隔较远的发次应具有较低的权重, 3) 是表征 G_1 的影响。

旧的预测模型取第 n 发次的小信号增益直接作为第 $n+1$ 发次的小信号增益, 即

$$G^{n+1} = G^n. \quad (12)$$

经过以上分析, 该模型可以改进为

$$G^{n+1} = \frac{1}{p[m(n+1)]} \frac{\sum_{i=1}^n \{G^i p[m(1)]q_1 + G^2 p[m(2)]q_2 + \dots + G^n p[m(n)]q_n\}}{\sum_{i=1}^n (q_1 + q_2 + \dots + q_n)}. \quad (13)$$

为对模型中发次数目 n 和权重因子 q 进行优化, 建立预测模型的评价方法: 通过对实际每一发小信号增益之前的历史数据分析预测该发的小信号增益, 并计算两者的偏差。以神光 III 原型装置为例, 其中一轮实验所有发次偏差的 RMS 值作为评价的一个手段。图 4 是不同的发次数目 n 及 3 种不同的权重因子条件下, 增益偏差的 RMS 值。

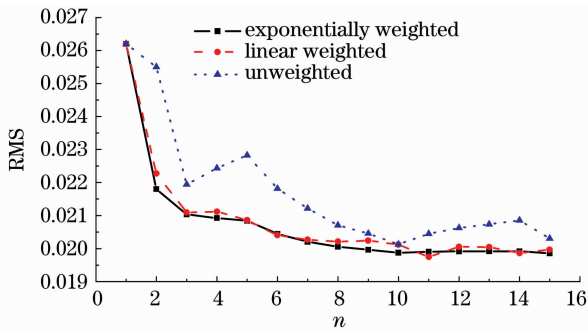


图 4 增益偏差的 RMS 值随模型的计算发次数目的变化
Fig. 4 Gain deviations' RMS varied with the number of operation data

由图 4 可见, 随发次数目的增加, 预测的准确性可得到提高, 但达到一定发次数目后, 再增加发次数目 n 意义不大, 图中反映消除高频干扰项所需的发次数目需 10 发左右; 权重因子的选择可提高收敛性, 图中显示未选择权重因子预测偏差有较明显的晃动, 而选择的线性和指数两种权重因子中, 指数权重因子有更好的收敛性。

经过优化参数的选择后, 利用预测模型对历史运行数据进行了检验。原计算模型为单一发次递推模型, 对一轮实验 150 发的运行数据进行了统计计算, 结果显示增益预测准确性的 RMS 值为 4.0%, 对比图 4, 新的预测模型在优化参数条件下的增益预测准确性 RMS 值为 2%, 可见其准确性提高约 1 倍。

5 结 论

从统计的角度分析了高功率固体激光装置的增益特性, 指出高功率固体激光装置在运行中, 增益在缓变的趋势下, 存在着高频的不稳定性; 并进一步对高频不稳定性中的系统因素进行了分析, 使增益的不稳定性得到了大幅下降, 并依据分析的结果建立了以权重因子和日运行的发次号为核心的主放能量输出的预测模型, 新的模型可大大提升激光能量的预测准确性。最后以神光 III 原型装置的大量发次数数据为例对模型进行了检验, 结果显示, 与以往单发次的递推模型相比, 新模型可使增益预测的准确性从原来的 4% 左右提升到 2% 左右, 这也为能量平衡带来相同程度的优化。同时, 该研究成果对未来大型固体激光装置的运行具有指导意义。

参 考 文 献

1 J. A. Caird, R. A. Lerche, R. B. Ehrlich *et al.*. Precision

- power balance[R]. ICF Quarterly Report, October~December, 1993, 18vc(1): 10~17, UCRL-LR-105821-94-1
- 2 J. Lindl. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(11): 3933~4024
- 3 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, 李阳春等. 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
- 4 Zhao Runchang, Tang Jun, Li Ping *et al.*. Precise energy control of preamplifier system output for laser facility prototype [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(9): 1335~1338
赵润昌, 唐军, 李平等. 激光原型装置预放能量的精密控制[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(9): 1335~1338
- 5 Tang Lijia, Cai Xijie, Lin Zunqi. Control of pulse shape in "Shengguang 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 Li Keyu, Jia Huaiting, Wang Chengcheng *et al.*. Output-ability analysis of high-intensity third harmonic generation system for ICF driver[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 903~909
李格宇, 贾怀庭, 王成程等. 惯性约束核聚变驱动器高强度三倍频系统输出能力分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 903~909
- 7 Yu Haiwu, Zheng Wanguo, He Shaobo *et al.*. Physical performance optimization for high power Nd: glass solid state laser amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(suppl.): 81~85
於海武, 郑万国, 贺少勃等. 高功率钕玻璃固体激光放大器物理性能优化设计[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(suppl.): 81~85
- 8 He Shaobo, Chen Yuanbing, Yu Haiwu *et al.*. Energy transmission in high power laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(suppl.): 276~280
贺少勃, 陈远斌, 於海武等. 高功率激光放大器中的能量传输[J]. *中国激光*, 2006, **33**(suppl.): 276~280
- 9 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang Transl. Beijing: Science Press, 2002, 133~138
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002, 133~138

栏目编辑: 宋梅梅