

大功率固体激光装置的 B 积分判据探究

黄晚晴*, 张颖, 孙喜博, 耿远超, 王文义, 刘兰琴

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 B 积分判据自从建立后, 一直是大型激光驱动器控制非线性效应的基本设计判据。综述了针对国家点火装置建立两个 B 积分判据的实验过程和模拟过程, 解释了 B 积分判据的原理和产生条件, 指出了 B 积分判据的适用性以及存在的问题, 得出了两个 B 积分判据并不完善的结论。要准确地确定适用于当前大型大功率固体激光装置的 B 积分判据, 应当综合考虑当前激光装置的实际条件, 开展相应的实验和模拟。

关键词 激光光学; 非线性效应; B 积分判据; 光束质量; 焦斑

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.121403

B-Integral Criteria for High Power Solid-State Laser Facility

Huang Wanqing*, Zhang Ying, Sun Xibo, Geng Yuanchao, Wang Wenyi, Liu Lanqin

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

Abstract Since the establishment of the B-integral criterion, it has been a basic design criterion for the nonlinear effect control in large laser drivers. Through an overview of the experimental and simulation processes for establishing two B-integral criteria in the national ignition facility, we explain the principle and the creation conditions of the B-integral criteria, and point out the applicability and the existing problems of the B integral criteria. It is concluded that the two B-integral criteria are imperfect. In order to accurately determine the B-integral criteria applicable to the current large high power solid-state laser devices, the actual conditions of the current laser devices should be comprehensively considered and the corresponding experiments and simulations should be conducted.

Key words laser optics; nonlinear effect; B-integral criterion; beam quality; focal spot

OCIS codes 140.3280; 190.3270; 140.3460

1 引言

用于惯性约束聚变(ICF)研究的大型激光驱动器中, 强激光的非线性自聚焦效应会引起光场中的中高频调制迅速增长, 造成波前畸变和近场调制, 导致光束质量下降, 甚至出现成丝, 使得光学元件损伤。因此, 非线性效应一直是限制 ICF 装置输出能力提升的重要因素。美国劳伦斯-利弗莫尔实验室(LLNL)在研制美国国家点火装置(NIF)过程中提出了两个 B 积分判据。B 积分指的是激光在传输过程中通过非线性效应获得的附加相位。NIF 提出级

间 B 积分 ΔB 要小于 1.8 rad, 全光路 B 积分 ΣB 要小于 3.5 rad。这两个判据成为了大型激光驱动器控制非线性效应的基本判据。美国 NIF、法国兆焦耳装置(LMJ)以及中国的一系列大型大功率激光装置, 都参考了这两个判据^[1-5]。

本文梳理了 B 积分判据的来源, 明确了 B 积分判据的适用条件, 旨在澄清认识 B 积分判据是针对 NIF 装置, 在特定条件下得出的特定结果。任何脱离了具体装置条件, 对判据本身数值的讨论都无太大意义, 通过多种方法可以改变装置条件, 从而放宽这两个判据。

收稿日期: 2018-11-11; 修回日期: 2018-12-26; 录用日期: 2019-01-17

基金项目: 四川省学术和技术带头人培养资金资助

* E-mail: huangwq@caep.cn

2 B 积分的定义

B 积分定义为

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int I(z) \gamma(z) dz, \quad (1)$$

式中： γ 为非线性介质的非线性折射率； I 为光束截面上的平均激光光强； λ 为激光波长； z 为光在非线性介质中传播的距离。B 积分的内涵为光束通过非线性效应获得的附加相位。

图 1 为 NIF 光路示意图。 ΔB 也叫级间 B 积分,为两级空间滤波器(SF)小孔之间累积的 B 积分,一般讨论的是类 NIF 型高功率固体激光装置(激光多程通过两级放大器)光路中,最后一级助推放大过程中累积的 B 积分,如图 1 中 SF2 到 SF3。

ΣB 也叫全光路 B 积分,为激光传输经过所有非线性介质的 B 积分的累加,一般从激光注入主放大段开始计算。

因此,对 ΔB 的限制,本质上是限制了两级空间滤波器小孔之间的介质厚度与激光光强。对 ΣB 的限制,是对整个激光链路上介质厚度与激光光强的限制。B 积分判据,是装置设计的核心判据之一。由于要同时满足 ΔB 和 ΣB 的要求,在设计装置的构型和能流分布时,对装置上非线性介质的厚度、所在位置,以及激光光强,都存在一定限制。

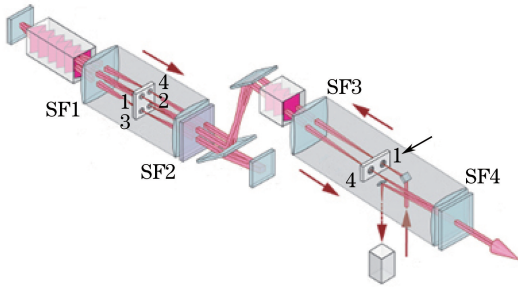


图 1 NIF 光路示意图

Fig. 1 Schematic of light path in NIF

3 B 积分判据的建立

3.1 ΔB 判据的建立

$\Delta B < 1.8$ rad 的判据来自于 LLNL 实验室 1998 年在 NIF 的原型——Beamlet 装置上完成的实验^[6]。该实验同时确立了 NIF 对 ΔB 和滤波小孔尺寸的要求。在该实验之前,即 1996 年时,LLNL 对 NIF 的 ΔB 的设计值还是 2.2 rad。

这轮实验的目的是测量近场对比度(C)随 ΔB 变化的增长曲线。其中, ΔB 为腔内放大器(CSF)第

4 孔到助推放大器(TSF)第 4 孔之间的 B 积分,即最后一段助推放大的 B 积分。近场对比度 C 分别测量了 TSF 输入透镜(SF3)处的近场(这块元件损伤风险最大)和基频段输出像传递面上的近场。近场对比度 C 是一个衡量光束近场质量的基本指标,其定义为光束横截面内,光强的方均根误差值除以平均光强,其值越小,说明光束质量越好。

需要注意的是,在实验中为避免在近场测量时,积分效应掩盖真正的近场调制分布,采用了 200 ps 脉宽的短脉冲,功率等效 20 ns 脉宽的点火脉冲,这样才能获得近场的“瞬时”分布。同时为了模拟点火脉冲尾部经历的低增益与高非线性的情况,大部分发次静态通过助推放大器来实现。

SF3 处测量的近场分布如图 2 所示,包含不同 ΔB 时的近场分布(作图区域为近场中心 24.4 cm 区域)。为了测量此处近场,TSF 未加小孔。可见,在高 ΔB 条件下,近场已经出现了分裂,如图 2(b)所示。

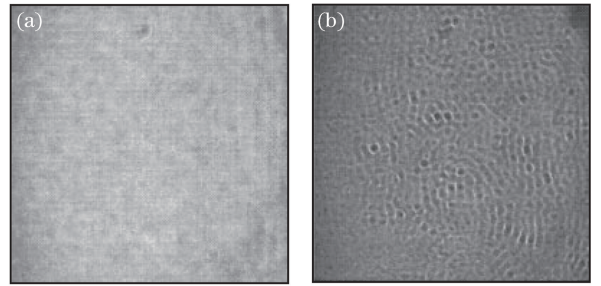


图 2 不同 ΔB 下的近场光束调制图。

(a) $\Delta B = 0.9$ rad; (b) $\Delta B = 2.6$ rad^[6]

Fig. 2 Near-field beam modulation at different ΔB .

(a) $\Delta B = 0.9$ rad; (b) $\Delta B = 2.6$ rad^[6]

图 3(a)为 C 随 ΔB 变化的曲线图,其中, D_c 表示 CSF 的第 4 孔的尺寸,空心点为实验数据,实心点为模拟数据,线为模拟数据的连线。

可见,小孔的尺寸较大时,光束质量退化的 ΔB 阈值低。在 $\Delta B \approx 2$ rad、 D_c 为 200 μ rad 时, C 已经开始迅速增长了,而 D_c 为 130 μ rad 时,对应的 C 还在缓慢变化。因此,在 $\Delta B < 2$ rad、 D_c 小于 200 μ rad 时,孔的尺寸是可以接受的。对于更小的孔,滤波效果更好, ΔB 可以更大。

图 3(b)为基频输出像传递面上的测量结果,其中 D_T 表示 TSF 的第 4 孔的尺寸。图中实验数据(空心点)和模拟数据(实心点)差别较大,LLNL 认为原因是没有考虑预放段引入的噪声。可见,对于 $D_c = 130$ μ rad, $D_T = 100$ μ rad 的孔,即使 ΔB 超过 3 rad,光束质量都保持得很好,此时 $C < 0.05$ 。

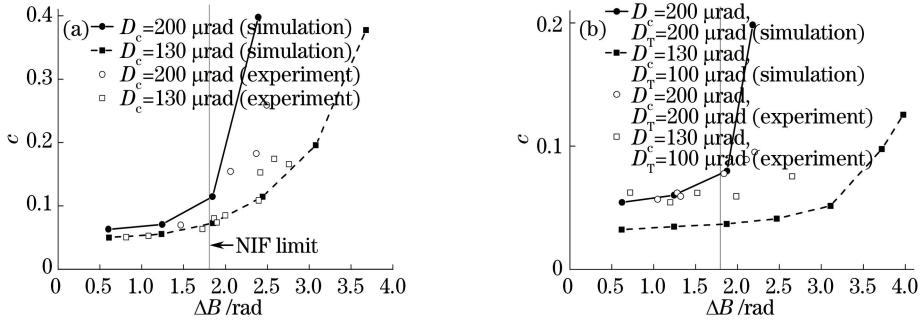


图 3 C 在不同的小孔配置下随 ΔB 变化的曲线图。(a) $D_c=130 \mu\text{rad}$ 和 $D_c=200 \mu\text{rad}$; (b) $D_c=130 \mu\text{rad}$, $D_T=100 \mu\text{rad}$ 和 $D_c=200 \mu\text{rad}$, $D_T=200 \mu\text{rad}$ ^[6]

Fig. 3 C versus ΔB for different hole configurations. (a) $D_c=130 \mu\text{rad}$ or $D_c=200 \mu\text{rad}$; (b) $D_c=130 \mu\text{rad}$ and $D_T=100 \mu\text{rad}$, or $D_c=200 \mu\text{rad}$ and $D_T=200 \mu\text{rad}$ ^[6]

所以 LLNL 认为,减小滤波孔尺寸有利于放宽 ΔB ,但同时会提高长脉冲堵孔的风险,两者必须进行权衡。由图 3(b)可见,当 $\Delta B < 1.8 \text{ rad}$,两种孔配置的 $C < 0.08$ 。由于两种孔配置的实验结果在 $\Delta B < 1.8 \text{ rad}$ 时部分重合,认为在 $\Delta B < 1.8 \text{ rad}$, $D_c < 200 \mu\text{rad}$ 且 $D_T < 200 \mu\text{rad}$ 时, C 对孔的尺寸不敏感,且可限制在 0.08 以下。考虑一定余量,LLNL 确定了基频光(1ω)对比度 $C \leq 0.1$ 的指标要求,以及 $\Delta B < 1.8 \text{ rad}$ 的判据。

3.2 ΣB 判据的建立

$\Sigma B < 3.5 \text{ rad}$ 的判据,来自 LLNL 在 1998 年对 1 ns 方波脉冲的基频光(1ω)焦斑和三倍频光(3ω)焦斑的传输模拟^[7]。模拟中采用 PROP92 程序计算基频传输,THG403 程序计算频率转换。模拟时,光路采用 NIF 构型(图 1),小孔为 $100 \mu\text{rad}$ (半角);放大器增益为 35 cm ,口径内平均小信号增益为 $5\% \cdot \text{cm}^{-1}$, 40 cm 口径内平均小信号增益为 $4.9\% \cdot \text{cm}^{-1}$;计算分辨率为 512×512 ($50 \times 50 \text{ cm}$ 内);元件透反率设置如表 1 所示。模拟时,加入元件的低频波前梯度方均根(GRMS)指标和中频段(Waviness-1 段)的波前方均根(RMS)指标的配置如表 2 所示。

在模拟时,考虑了抽运波前畸变、累积热致波前畸变、元件波前以及变形镜。特别需要注意几点:

1) 模拟中没有采用元件的实际低频波前,而是自行构造高斯型随机相位板,按照 GRMS 指标要求对其进行缩放。随机相位板构造时的特征尺度对结果有一定影响,特征尺度越大,越容易被变形镜校正。但当时 LLNL 还没有对元件低频波前的特征尺度的统计结果,因此是比较粗略地选取了一个特征尺度。

表 1 元件的透射率和反射率参数设置

Table 1 Parameter settings for transmission and reflectivity of components

Optic	Transmission / reflection	Optic	Transmission / reflection
Laser slab	0.9945	Diagnostic window	0.99
Spatial filter lens	0.99	Polarizer-transmission	0.98
Final focus lens	0.98	Polarizer-reflection	0.97
Mirror	0.99	Diff.opt. plate1	0.977
Switch crystal	0.934	Diff.opt. plate2	0.97
Switch window	0.99	Debris shield	0.98
Target chamber window	0.99		

表 2 元件的指标配置

Table 2 Index configuration of components

Case	GRMS / (nm · cm ⁻¹)	RMS of Waviness-1 / nm
1	9	1.7
2	7.5	1.7
3	7.5	1.3
4	5	1.3

2) 在构造元件中频波前时,LLNL 只使用了一块钜玻璃片的测量结果,按照中频段的 RMS 指标进行缩放。同时由于分辨率的限制(只能算到 512×512),中频段的一部分以及高频部分都无法计算。因此元件波前实际只包括了低频段和部分中频段。

3) 在考虑变形镜的校正作用时,采用了简化模型,即将各种来源的波前畸变按一定权重叠加后,直

接最小化其 RMS,同时没有考虑变形镜驱动单元的行程上限(3.75 μm),因此,对低频波前的校正结果偏理想化。

计算 ΣB 时,从主放大段统计到频率转换模块之前,即 ΣB 只计算了 1ω 段。模拟获得的主要结论如下。

1) 在低功率或低 ΣB 下,对比加了元件波前和未加元件波前的 1ω 焦斑。发现由于变形镜的作用,当只有其他低频波前畸变(抽运畸变、热畸变)时, 1ω 焦斑接近理想焦斑。而有元件波前时,由于变形镜校正不了元件带来的中频波前畸变,因此焦斑明显增大。LLNL 由此得出结论:焦斑尺寸主要由元件的抛光和均匀性导致的中频波前畸变决定。

2) 在低功率或低 ΣB 下,对比 1ω 焦斑和 3ω 焦斑的大小,焦斑尺寸基本一致。这是因为变形镜完美校正了低频波前畸变,光束接近平面波,由于波长变短 3 倍,衍射极限焦斑尺寸应该减小 3 倍。但由于频率转换过程中的模式混合,焦斑主瓣的尺寸增大,且因元件代入的中频波前畸变,无法被校正,其功率谱强度增长了 9 倍,故焦斑旁瓣尺寸增大。综合这几个效应的效果, 1ω 焦斑和 3ω 焦斑尺寸基本一致。另外,由于全光束自聚焦的作用,焦斑出现 X 型分布。当功率提升或 ΣB 增大时,由于非线性效应的作用,中频波前畸变在传输中增长,因此 3ω 焦斑的旁瓣大小明显增长。

另外,文献[7]计算了在代入不同指标的元件波前时,三倍频晶体损伤比例、 3ω 激光能量、焦斑的大小(80%能量集中度)随 ΣB 的变化。通过计算,LLNL 得出结论, ΣB 对 1ω 焦斑尺寸影响较小,但对 3ω 焦斑尺寸影响大; $\Sigma B < 4$ rad 时, 3ω 焦斑尺寸基本随 ΣB 的变化线性增长,一旦超过 4 rad 时,焦斑的尺寸迅速增长。同时,当 ΣB 超过 3.5 rad 时,晶体的损伤比例迅速增大。因此,LLNL 明确指出三倍频晶体的损伤比例确定了 ΣB 判据,即 $\Sigma B < 3.5$ rad。由 $\Sigma B < 3.5$ rad 确定了对应的焦斑尺寸(3ω 焦斑半径:14~22 μrad ; 1ω 焦斑半径:12~18 μrad)和到靶功率(700 TW,1 ns 方波脉冲)。

4 对 B 积分判据的讨论

LLNL 确定了这两个判据后,其后的类似装置设计都将其视为准则。但确定 ΔB 判据的实验和确定 ΣB 判据的数值模拟都是在 1998 年完成的,由于年代久远,结果并不完善,同时还有一些需要注意的细节限制了这两个判据的适用性。

从另一个角度看待这两个判据有助于理解其内涵。在装置中,由于非线性作用,相位畸变(输入)影响了近场光束质量以及远场焦斑(输出), ΔB 和 ΣB 在这个过程中衡量非线性效应的大小,可看作系统响应。因此,一组具体的 ΔB 和 ΣB 值,一定对应一组具体的输入-输出。LLNL 在获取 ΔB 和 ΣB 判据时,实际含有很明确的输入-输出。因此,在讨论这两个判据时,如果脱离了具体的条件是没有意义的。如果输入条件改变或对输出的要求改变,都会导致 ΔB 和 ΣB 的改变。下文将对这些问题展开讨论。

4.1 ΔB 判据的对应条件

对于确定 $\Delta B < 1.8$ rad 的实验结果,如图 3(b)所示。在小尺寸的孔配置下, $D_c = 130 \mu\text{rad}$, $D_T = 100 \mu\text{rad}$,等效约 $D_c = 53 D_L$, $D_T = 40 D_L$ (衍射极限, D_L),在 $\Delta B = 1.8$ rad 附近没有实验数据点,但从趋势来看 C 远小于 0.1,约在 0.06 附近。即使采用大尺寸的孔, $D_c = 200 \mu\text{rad}$, $D_T = 200 \mu\text{rad}$,等效约 $D_c = 81 D_L$, $D_T = 81 D_L$,在 $\Delta B = 1.8$ rad 附近, C 也小于 0.08,直到 ΔB 接近 2.2 rad 左右时, C 才接近 0.1。从实验结果本身来看, $\Delta B < 1.8$ rad 的判据,留有很大余量。

同时,对应这个判据的输入为:1) Beamlet 装置的元件加工水平对应的波前畸变;2) CSF 第 4 孔($D_c = 200 \mu\text{rad}$)先对光场空间滤波。对应这个判据的输出为:光场经过 TSF 第 4 孔($D_T = 200 \mu\text{rad}$)空间滤波后的近场对比度 $C \leq 0.1$ 。

因此,如果元件波前的加工水平高于 Beamlet 时期或者 D_c 或 D_T 小于 200 μrad ,满足以上任意一条则可以放宽 $\Delta B < 1.8$ rad 的判据。

在 Beamlet 初期大口径元件的实测 GRMS 值约 $8 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。1998 年,NIF 将大口径元件的 GRMS 指标统一确定为 $7.5 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$ [8-9]。随后,随着元件加工水平的提升,该指标进一步修订为 $7 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$ [10]。而在 2004 年时,NIF 的元件水平已经极大提升,优于 $7 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的指标。图 4 为 NIF 的光路上,逐片叠加的元件的低频波前 GRMS,上面的线为指标值,而下面的线为实测值[10],横坐标代表经过的光学元件编号。可见,元件的加工水平较 Beamlet 时期有非常大的提升。

同时,文献中孔的尺寸均为 200 μrad ,而在 2014 年时,NIF 的 CSF 孔的第 4 孔尺寸 D_c 保持为 200 μrad ,而 TSF 的第 4 孔尺寸 D_T 为 100 μrad 。 D_T 比该模拟使用的孔缩小了一半[11]。

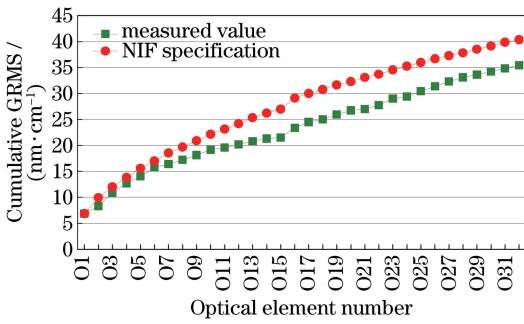


图4 第4个通道中的叠加低频波前 GRMS^[10]

Fig. 4 Cumulative GRMS of low frequency wavefront in the fourth pass^[10]

因此,综合考虑当时实验本身预留的余量、元件加工水平的提升以及滤波孔的缩小, $\Delta B < 1.8$ rad 的判据有一定的放宽余地。

4.2 ΣB 判据的对应条件

对于确定 $\Sigma B < 3.5$ rad 的模拟存在几个问题。

1) LLNL 没有完全采用真实的波前数据。低频波前是采用自行构造的高斯型随机相位板所测的波前数据;中频波前是采用一块钽玻璃元件所测的波前数据并对其进行缩放。这说明当时 LLNL 还没有累积足够多满足指标的元件波前数据。

2) 模拟时采用了简化的变形镜模型,这个模型偏于理想化,校正了所有的低频波前畸变。但在实际的装置中,变形镜要考虑前级过孔,是不可能将所有低频波前畸变校完。由于采用了这个简化模型,模拟中的焦斑尺寸完全由中频波前畸变决定,因此 LLNL 得出结论:焦斑尺寸主要由元件的抛光和均匀性导致的中频波前畸变决定。但这个结论只能在这种情况下成立。实际光路中,低频波前畸变的幅值远大于中频(这是相位畸变分布的本征特性),焦斑的尺寸主要由未校正的低频波前畸变决定。由于模拟中只有中频波前畸变决定了焦斑,而非线性效应对中频畸变又有很强的增益,导致模拟中焦斑尺寸随 ΣB 的变化出现明显增长。实际上即使中频畸变增长了,相比低频畸变也是一个小量,焦斑尺寸并不会随 ΣB 的变化出现明显拐点。

3) 对 $\Sigma B < 3.5$ rad 的判据,来自三倍频晶体损伤比例的限制。要注意的是这个模拟不包含损伤模型,实际计算的是近场光强超过晶体损伤阈值的比例,可看作损伤风险,也可以理解为近场光束调制度的反映。因此,近场的光强调制和晶体损伤阈值共同限定了 $\Sigma B < 3.5$ rad。

对应这个判据的输入为:1) 中频段的波前畸变

RMS 指标为 1.7 nm;2) 光路中滤波小孔尺寸为 100 μ rad(对应 40 D_L)。对应这个判据的输出为:三倍频晶体上近场调制光强超过损伤阈值的比例。

因此,只要满足以下三个条件中的一条:1) 元件的中频波前畸变中频段的 RMS 指标优于 1.7 nm;2) 全链路中任意小孔尺寸小于 100 μ rad(对应 40 D_L);3)三倍频晶体的损伤阈值比 Beamlet 时期水平有所提升,则可以放宽 $\Sigma B < 3.5$ rad 的判据。

同样地,根据 NIF 在 2004 年的报道,其中频段的 RMS 指标也远远优于指标要求(1.7 nm)。图 5 为 NIF 的光路上逐片叠加的元件的中频段的 RMS 值,上面的线为指标值,下面的线为实测值^[10],横坐标代表经过的光学元件编号。可见,元件的加工水平较 Beamlet 时期的 1.7 nm 有较大提升。

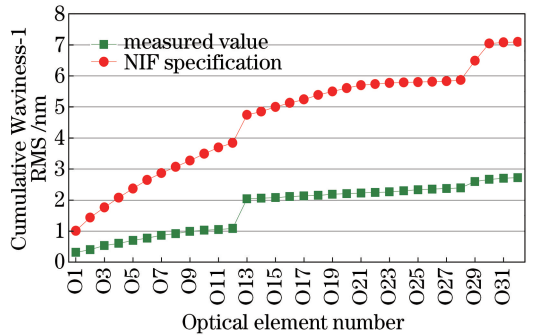


图5 第4个通道中叠加波前的中频段 RMS^[10]

Fig. 5 Cumulative waviness-1 RMS of intermediate frequency wavefront in the fourth pass^[10]

同时,在损伤方面 NIF 投入了大量的研究,三倍频晶体的损伤阈值相比 Beamlet 时期有极大提升。据 NIF 在 2016 年的报道,对晶体采用预处理措施,在 NIF 装置的运行通量和发次下,晶体的初始损伤点数目少,增长缓慢,一些晶体元件虽已工作多年但无需更换^[12]。

综合考虑元件的中频波前畸变水平和三倍频晶体的损伤阈值的提升, $\Sigma B < 3.5$ rad 的判据有一定的放宽余地。如果光路中有滤波小孔小于 40 D_L , ΣB 的判据还可进一步放宽。

5 结 论

通过分析 LLNL 建立两个 B 积分判据的实验和模拟,明确了 B 积分判据的内涵、建立时的条件以及模拟中存在的问题。这两个判据是针对 NIF 装置在 1998 年通过实验和模拟建立的,受当时的条件所限,建立的过程并不完善,总体来说,这两个判

据可认为是针对 NIF 装置在特定条件下得出的特定结果。因此可以有多种方法来改变条件,从而放宽判据。对于 $\Delta B < 1.8$ rad,综合考虑当时预留的余量、元件加工水平的提升以及滤波孔的尺寸的缩小,该判据可以放宽。对于 $\Sigma B < 3.5$ rad,综合考虑元件加工水平、晶体损伤阈值的提升以及滤波孔的尺寸,也有放宽的余地。要准确地确定适用于当前大型高功率固体激光装置的 B 积分判据,应当综合考虑当前激光装置的实际条件,开展相应的实验和模拟。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] André M L. The French megajoule laser project (LMJ) [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, 44: 43-49.
- [3] Zhou Y, Shao P, Zhao D F, *et al.* Research on the system of the nanosecond target aiming and positioning of the SG-II updated laser facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1208002. 周洋, 邵平, 赵东峰, 等. 神光 II 升级装置纳秒靶瞄准定位技术研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208002.
- [4] Wang F, Peng X S, Yan Y D, *et al.* Backscattered light diagnostic technique based on Shen Guang-III laser facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0902011. 王峰, 彭晓世, 闫亚东, 等. 基于神光 III 主机的背向散射光诊断技术 [J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0902011.
- [5] Li W Y, Wang P, Zhang J W, *et al.* Three-dimensional visualization for numerical simulation data of laser transmission [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111410. 黎万义, 王鹏, 张军伟, 等. 激光传输数值模拟数据的三维可视化研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111410.
- [6] Wegner P, Burkhart S. Special issue: laser technology for the national ignition facility [J]. *Inertial Confinement Fusion*, 1998, 9(1): 44-46.
- [7] Williams W H, Auerbach J M. The NIF's basic focal spot for temporally flat pulses [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3492: 22-38.
- [8] Lawson J K, Auerbach J M, English R E, *et al.* NIF optical specifications: the importance of the RMS gradient [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3492: 336-344.
- [9] NIF performance review [R]. 1998, UCRL-ID-138120-98.
- [10] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, *et al.* NIF optical materials and fabrication technologies: an overview [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5341: 84-102.
- [11] 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.
- [12] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, *et al.* Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 146-249.