

双脉冲双向传输放大构型波前特性

魏昊波, 魏晓峰, 王德恩, 张晓璐, 袁 强, 薛 峤, 张 鑫, 杨 英, 赵军普, 代万俊*, 胡东霞

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 双脉冲双向传输放大构型可对两束激光脉冲沿主放大器空间对称的两个方向同时进行传输放大, 有效增加了放大器的储能提取率, 在惯性约束聚变激光驱动器领域具有很大的应用价值。通过建立等效光路, 推导了两束激光脉冲在传输放大时波前畸变的叠加过程, 并对神光-III 主机装置中的实测数据进行了数值模拟。结果表明, 双向传输放大构型下两束激光脉冲的波前畸变存在一定差异, 波前像差集中在低频段, 且三、四程放大时空间滤波器小孔处的激光脉冲和输出激光脉冲的波前畸变较大。为保证输出光束质量和光束通过空间滤波器小孔, 必须对主放大器内的波前像差进行补偿控制。这些结论将为双脉冲双向传输放大构型的波前控制方案的设计提供理论指导。

关键词 激光光学; 高功率激光; 波前特性; 数值模拟; 双脉冲双向传输放大构型; 多程放大

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0305001

Wave-Front Characteristics of Amplification Configuration with Two-Pulse Bidirectional Propagating

Wei Haobo, Wei Xiaofeng, Wang De'en, Zhang Xiaolu, Yuan Qiang, Xue Qiao, Zhang Xin, Yang Ying, Zhao Junpu, Dai Wanjun, Hu Dongxia

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

Abstract A two-pulse bidirectional propagating amplification configuration, which employs two laser pulses to propagate along a main amplifier in two directions of symmetric space and amplifies the two-pulse, can effectively increase the extraction efficiency for the stored energy in the amplifier, and has great application value in the field of inertial confinement fusion laser driver. When we build the equivalent optical path, the wave-front distortion superposition process of the two laser pulses in the process of propagation amplification is derived, and the numerical simulation is carried out with the data measured by the Shenguang-III host device. The results indicate that the wave-front shapes of the two laser pulses in the bidirectional propagating amplification configuration are different. The wave-front aberration mainly concentrates in low frequency range. Moreover, the wave-front distortions of the output laser pulse and the laser pulse from the pinhole of spatial filter which is with three-pass and four-pass amplification are large. Thus, the wave-front aberration must be compensated and controlled to ensure the quality of output beam and the beam pass through the spatial filter pinhole. These conclusions provide theoretical guidance for the design of wave-front control scheme of two-pulse bidirectional propagating amplification configuration.

Key words laser optics; high power laser; wave-front characteristics; numerical simulation; two-pulse bidirectional propagating amplification configuration; multi-pass amplification

OCIS codes 140.3280; 140.3580

收稿日期: 2016-09-01; **收到修改稿日期:** 2016-10-28

作者简介: 魏昊波(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光器光束质量控制方面的研究。

E-mail: 1070264961@qq.com

导师简介: 魏晓峰(1960—), 男, 博士, 研究员, 主要从事高功率固体激光装置方面的研究。E-mail: xfwei@caep.cn

* **通信联系人.** E-mail: whbms4353@sina.com

1 引 言

可控核聚变技术具备全面解决人类能源问题的潜力,自上世纪起便受到全世界研究人员的广泛关注,高功率固体激光装置是惯性约束聚变(ICF)领域中最成熟、最具可行性的驱动技术^[1-4]。高功率激光在传输放大过程中受光学元件面形缺陷、装校误差等静态因素和抽运不均匀性、增益介质热残余等动态因素的影响,会产生波前畸变^[5-6]。对多程放大系统而言,激光在大量光学元件中的多次往返将导致波前畸变相干叠加,影响空间滤波器的安全过孔和束靶耦合效率,因此高功率固体激光装置需针对波前畸变进行补偿控制^[7-10]。

目前,我国已建成了 10^5 J 量级的神光-III 主机装置^[11],下一步将开展 10^6 J 量级激光装置的研制工作。为了满足 10^6 J 量级激光装置的需求,Zhang 等^[12]提出了一种双脉冲双向传输放大的多程放大构型。该放大构型使空间上对称的两束激光脉冲沿多程放大系统的两个方向同时进行传输放大,并使两束激光脉冲的腔内放大器和助推放大器互补,提高了系统运行时的等效通量,实现了对整个放大器储能的高效提取,降低了系统造价。与神光-III 主机装置相比,未来 10^6 J 量级的激光装置的单路激光输出能力将会有很大的提升,为保证更高通量条件下空间滤波器安全过孔、三倍频效率以及束靶耦合效率,必须对该构型下双激光脉冲的波前特性进行研究及评估。因此,围绕双向传输放大构型下两束激光脉冲的波前畸变问题,基于现有装置的实测数据进行模拟和分析,明确了双脉冲的输出波前特性。

2 双脉冲波前叠加过程分析

双脉冲双向传输放大技术的基本原理是引入对称传输的两束激光脉冲来提高放大器的等效通量,从而在保持单脉冲 B 积分与传统多程放大系统处于同一水平的前提下,提升整个系统的储能提取效率。图 1 为双脉冲双向传输放大系统的光路示意图,该构型在传统多程放大系统的基础上,利用腔镜(CM₁ 和 CM₂)、偏振片(P₁ 和 P₂)、等离子体电光开关(LPC₁ 和 LPC₂)、腔内空间滤波器(CSF)和组合式片状放大器(AMP₁ 和 AMP₂)共同组成 $4F$ (F 为透镜焦距)腔内放大系统。两束前级预放脉冲分别从传输空间滤波器(TSF₁ 和 TSF₂)小孔处注入,并通过传输反射镜(TM₁ 和 TM₂)和偏振片导入 $4F$ 放大系统。图中 L₁₋₁、L₁₋₂、L₂₋₁、L₂₋₂、L₃₋₁、L₃₋₂ 为透镜。图中 PA₁、PA₂、PA₃ 分别为 TSF₁、CSF、TSF₂ 的小孔。

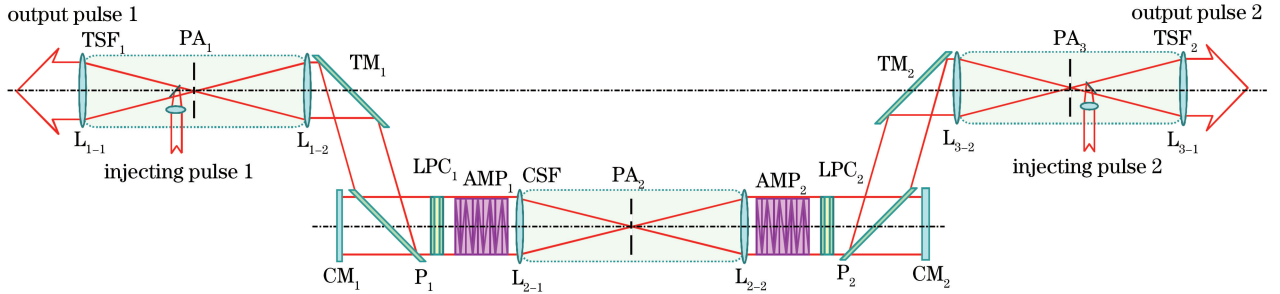


图 1 双脉冲双向传输放大构型的光路示意图

Fig. 1 Optical path diagram of two-pulse bidirectional propagating amplification configuration

等离子体电光开关采取升压运行模式,在脉冲注入前处于关闭状态,避免产生寄生振荡而消耗系统储能。等离子体电光开关控制时序如图 2 所示,开关在脉冲首次通过后打开,在第 8 次脉冲到达前关闭。以脉冲 1 为例,脉冲初始偏振方向与两块偏振片 P₁、P₂ 正交,所以脉冲能够被 P₁ 反射并进入 $4F$ 放大腔内;脉冲 1 第 1 次经过 LPC₁ 后,对两台等离子体电光开关施加半波电压,则脉冲 1 经过 LPC₂ 后偏振方向旋转 90°,旋转后的脉冲可透过 P₂;此后放大过程中,由于脉冲 1 同时经过两台等离子体电光开关,偏振方向旋转 180°,所以脉冲被封闭在 $4F$ 放大腔内往返振荡;最后一程放大过程中,当脉冲 1 经过 LPC₂ 后,撤去半波电压,则经过 LPC₁ 后脉冲的偏振方向共改变 90°,此时脉冲被偏振片 P₁ 反射,从放大腔导出脉冲。

图 3 为脉冲 1、2 的传输放大过程的等效光路图。由图可见,两束脉冲被注入 $4F$ 谐振腔后经过的光学元件不同,在放大过程中经过片状放大器、腔内空间滤波器和等离子体电光开关的次数完全相同。两束脉冲经过偏振片和腔镜的次数存在差异:脉冲 1 在偏振片 P₁ 上反射 2 次、透射 2 次,在偏振片 P₂ 上透射 4 次,在腔镜 CM₁ 上反射 1 次,在腔镜 CM₂ 上反射 2 次;脉冲 2 在偏振片 P₁ 上透射 4 次,在偏振片 P₂ 上反射 2 次、

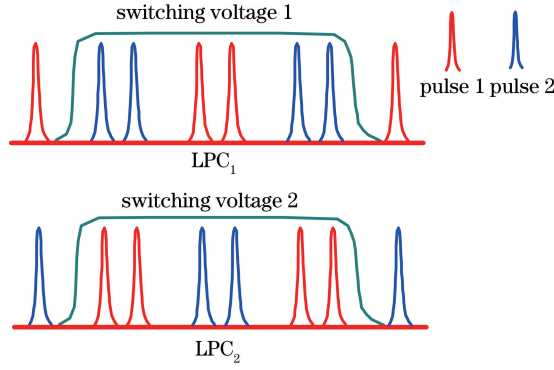


图 2 等离子体电光开关控制时序图

Fig. 2 Sequence diagram of plasma electro-optic switch control

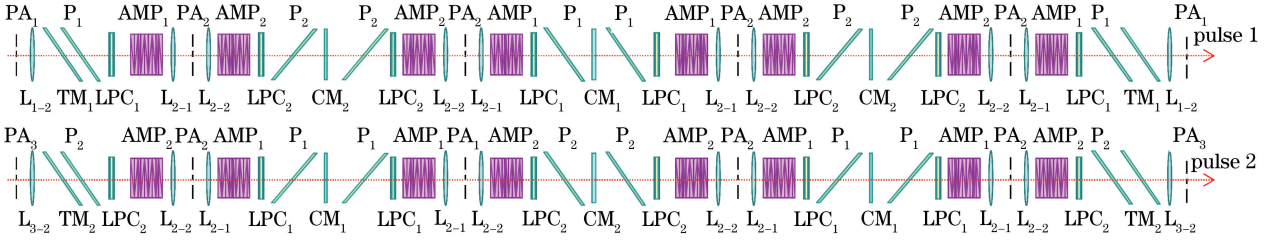


图 3 双脉冲传输放大过程等效光路图

Fig. 3 Diagram of equivalent optical path of two-pulse propagating amplification process

透射 2 次,在腔镜 CM_1 上反射 2 次,在腔镜 CM_2 上反射 1 次。

高功率固体激光装置中的光束波前畸变主要是由光学元件引起的,因此在忽略空气湍流等影响因素的前提下,可将每个光学元件所引入的波前像差作为一个独立参量,以分析两束脉冲波前畸变的叠加过程。 Q_1 、 Q_2 为前级注入时脉冲 1、2 携带的波前畸变, P_{1r} 、 P_{2r} 为脉冲 1、2 在偏振片上反射时所产生的波前畸变, T_{M1} 、 T_{M2} 为传输反射镜 TM_1 、 TM_2 引起的波前畸变, C_{M1} 、 C_{M2} 为 CM_1 、 CM_2 引起的波前畸变, L_{1-2} 、 L_{3-2} 为透镜 L_{1-2} 、 L_{3-2} 引起的波前畸变, Φ_1 为等离子体电光开关 LPC_1 、片状放大器 AMP_1 和透镜 L_{2-1} 引起的总波前畸变, Φ_2 为等离子体电光开关 LPC_2 、片状放大器 AMP_2 和透镜 L_{2-2} 引起的总波前畸变,其余光学元件引起的波前畸变均用光路中相应的名称表示。将空间滤波器小孔的位置作为计算脉冲波前像差时的节点,得到的双脉冲波前畸变叠加过程如表 1 所示。

表 1 双脉冲波前畸变叠加过程

Table 1 Two-pulse wave-front distortion superposition process

Optical element	Two-pulse wave-front distortion	
	Pulse 1	Pulse 2
PA1, PA3 (input)	Q_1	Q_2
PA2 (pass 1)	$Q_1 + L_{1-2} + T_{M1} + P_{1r} + \Phi_1$	$Q_2 + L_{3-2} + T_{M2} + P_{2r} + \Phi_2$
PA2 (pass 2)	$Q_1 + L_{1-2} + T_{M1} + P_{1r} + \Phi_1 + 2\Phi_2 + 2P_2 + C_{M2}$	$Q_2 + L_{3-2} + T_{M2} + P_{2r} + 2\Phi_1 + \Phi_2 + 2P_1 + C_{M1}$
PA2 (pass 3)	$Q_1 + L_{1-2} + T_{M1} + P_{1r} + 3\Phi_1 + 2\Phi_2 + 2P_1 + 2P_2 + C_{M1} + C_{M2}$	$Q_2 + L_{3-2} + T_{M2} + P_{2r} + 2\Phi_1 + 3\Phi_2 + 2P_1 + 2P_2 + C_{M1} + C_{M2}$
PA2 (pass 4)	$Q_1 + L_{1-2} + T_{M1} + P_{1r} + 3\Phi_1 + 4\Phi_2 + 2P_1 + 4P_2 + C_{M1} + 2C_{M2}$	$Q_2 + L_{3-2} + T_{M2} + P_{2r} + 4\Phi_1 + 3\Phi_2 + 4P_1 + 2P_2 + 2C_{M1} + C_{M2}$
PA1, PA3 (output)	$Q_1 + 2L_{1-2} + 2T_{M1} + 2P_{1r} + 4\Phi_1 + 4\Phi_2 + 2P_1 + 4P_2 + C_{M1} + 2C_{M2}$	$Q_2 + 2L_{3-2} + 2T_{M2} + 2P_{2r} + 4\Phi_1 + 4\Phi_2 + 4P_1 + 2P_2 + 2C_{M1} + C_{M2}$

3 数值模拟与分析

神光-III 主机装置作为目前国内最大规模的高功率固体激光器,抽运源为脉冲氙灯,采用单次单发的运

行模式,其基频光波长为 1053 nm,光束口径为 360 mm × 360 mm,光学元件通光口径为 400 mm × 400 mm,终端靶场透镜的焦距为 4000 mm。波前探测系统为中国科学院光电技术研究所研制的哈特曼-夏克传感器,位于主放大系统诊断包内。根据神光-III 主机装置中实际测量得到的预放输出脉冲波前像差、各类光学元件引起的静态波前像差和全能量抽运条件下测量并推算得到的动态波前像差,利用 Matlab 程序对双向传输放大构型下波前畸变的生长过程进行了模拟。其中,动态波前数据是由神光-III 主机装置全能量运行时主放诊断包测得的波前像差减去预放脉冲对主放大系统进行标定时所测得的静态波前像差得到的,图 4 为最终计算得到的两组片状放大器(各含 9 片钜玻璃片)单程放大所引起的动态波前畸变。

在高功率固体激光装置中,通常使用波前峰谷(PV)值来评价光束近场波前畸变的总体起伏,使用百分比能量对应的衍射极限(DL)倍数来评价远场光束质量^[13]。

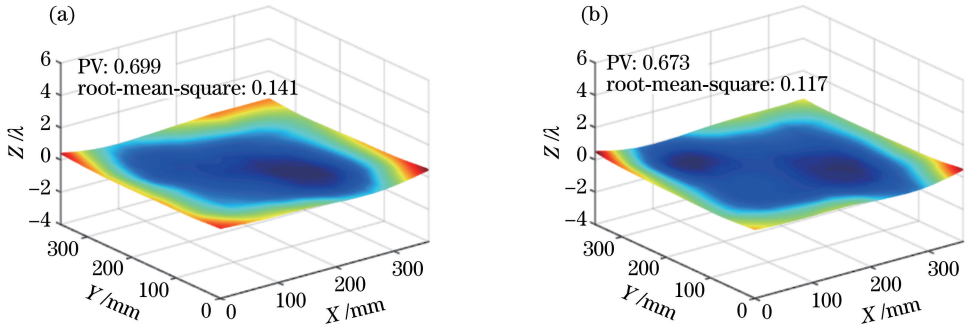


图 4 片状放大器动态波前畸变。(a)放大器 1;(b)放大器 2

Fig. 4 Dynamic wave-front distortion of slab amplifiers. (a) Amplifier 1; (b) amplifier 2

PV 值的表达式为

$$P_{PV} = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}, \quad (1)$$

式中 φ_{\max} 、 φ_{\min} 为光束近场的最大相位和最小相位。计算 PV 值时,直接将波前像差矩阵中最大项和最小项进行相减即可。

DL 倍数是指实际光场尺寸与艾里斑尺寸(一倍衍射极限)之比。在评价高功率激光聚焦特性时,通常将占总能量一定百分比的光场对应的范围作为评价标准。与方光束衍射极限倍数计算相关的公式有 3 个,即光束远场能量与近场相位关系式、环围能量比公式和方光束衍射极限公式,分别表示为

$$I = \{ \mathcal{F} [\sqrt{I_0} \exp(i\varphi)] \}^2, \quad (2)$$

$$R = \frac{I_r}{I}, \quad (3)$$

$$M_{DL} = \frac{2\lambda f}{d}, \quad (4)$$

式中 I 为远场光强, I_0 为近场光强, φ 为光束近场的相位, \mathcal{F} 为快速傅里叶变换, R 为环围能量比, I_r 为以光强最大处为原点、以 r 为半径的范围内光场的强度, M_{DL} 为衍射极限, λ 为波长, f 为透镜焦距, d 为方光束口径。

在远场模拟时,只需通过傅里叶变换对光束近场的波前像差矩阵进行数值求解即可得到能量分布情况。在求衍射极限倍数时,由于一般情况下不存在解析解,因此利用 Matlab 程序进行数值计算:先利用快速傅里叶变换求出聚焦后光场的强度分布情况,并计算出焦斑的总光强,再划定能量百分比节点(节点选为 95%);以光强最强点作为坐标原点,逐步增加半径 r 的取值,求出一系列以 r 为半径的光场强度与总光强的比值;选取最接近节点的比值所对应的半径 r ,求出相应的衍射极限倍数。模拟过程中,通过调整半径 r 的递增量,能将误差范围控制在可忽略的程度。

利用图 4 所示的动态波前和神光-III 主机装置中预放输出脉冲波前、各类光学元件引起的静态波前的实测数据,参照表 1 中两束脉冲输出波前的表达式和上文所述的计算方法,可通过 Matlab 程序模拟出如图 5 所示的双向传输放大系统输出激光的近场波前和远场能量分布情况。图中 D 代表衍射距离。两束激光脉冲的近场波前畸变大于 6λ 且波前形状具有一定差异,远场聚焦光斑 95% 能量分布范围分别对应 18.64 倍和

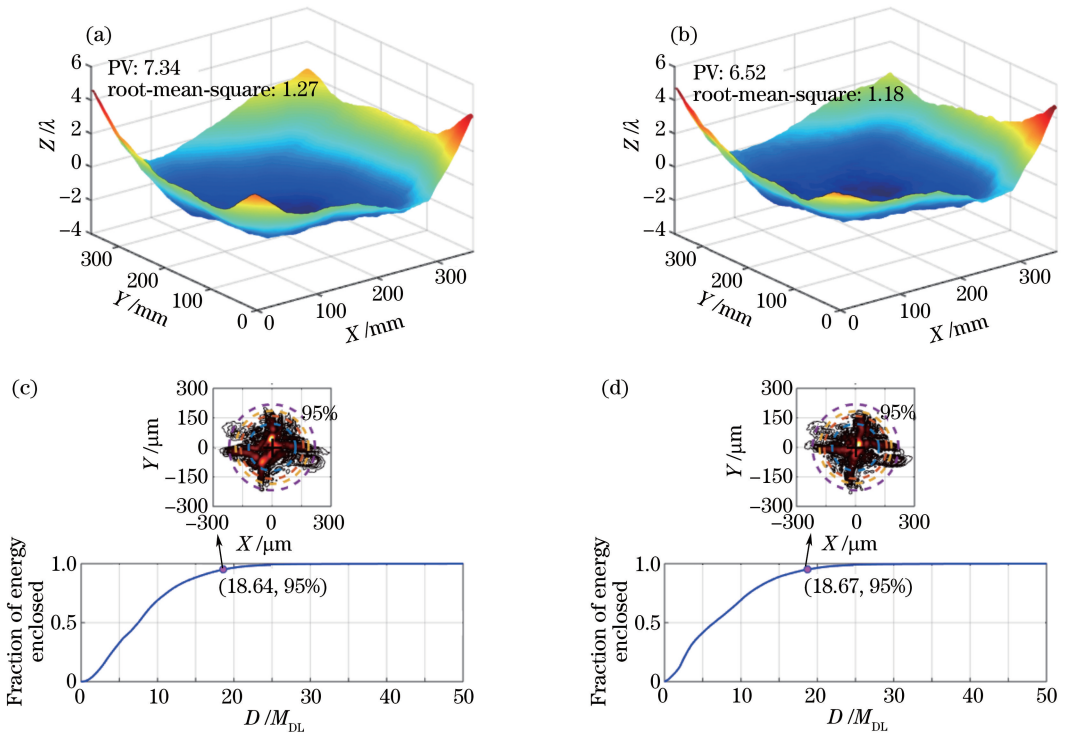


图 5 (a) 脉冲 1 波前;(b) 脉冲 2 波前;(c) 脉冲 1 的衍射距离与 M_{DL} 的比值为 18.64、能量百分比为 95% 时对应的远场能量分布;(d) 脉冲 2 的衍射距离与 M_{DL} 的比值为 18.67、能量百分比为 95% 时对应的远场能量分布

Fig. 5 (a) Wave-front of pulse 1; (b) wave-front of pulse 2; (c) far-field energy distribution of pulse 1 when rate of diffraction distance to M_{DL} is 18.64 and fraction of energy enclosed is 95%; (d) far-field energy distribution of pulse 2 when rate of diffraction distance to M_{DL} is 18.67 and fraction of energy enclosed is 95%

18.67 倍的衍射极限,远大于现有高功率固体激光装置对基频光输出所要求的 10 倍衍射极限的标准,因此必须采取波前控制手段进行校正,并且校正系统需具备同时补偿两种不同波前面形的能力。

利用 Zernike 多项式与波前像差的对应关系,对两束激光脉冲的波前畸变进行面形分解,取 1~36 阶模式,得到双脉冲波前像差的 Zernike 多项式分布如图 6 所示,波前像差主要分布在 10 阶以下,按空间频率特性划分,都属于低频像差。在高功率固体激光装置中,低频波前像差通常采用自适应光学系统进行校正。

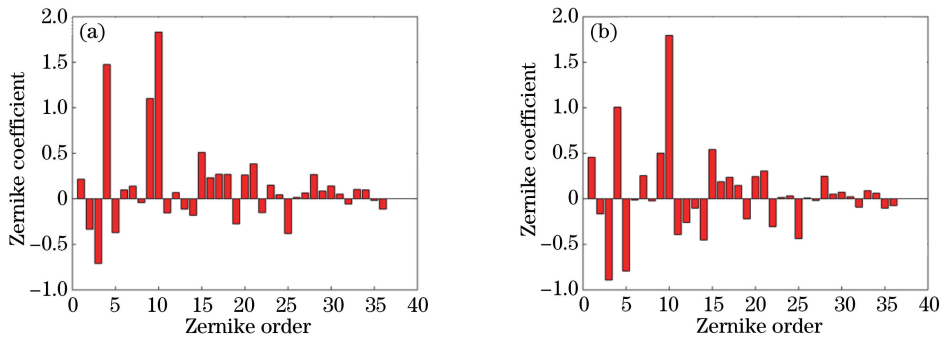


图 6 双脉冲波前像差 Zernike 多项式分布。(a) 脉冲 1;(b) 脉冲 2

Fig. 6 Zernike polynomial distributions of two-pulse wave-front aberration. (a) Pulse 1; (b) pulse 2

在高功率激光三倍频过程中,功率密度不同的情况下波前畸变对能量转换效率的影响也不同。基频光波长为 1053 nm,谱线宽度为 0.3 nm,当单路输出能量为 7.5 kJ 和 20 kJ 时,脉冲 1 的三倍频转换效率分别为 74.85% 和 77.92%,脉冲 2 的三倍频转换效率分别为 74.70% 和 77.84%,理想平面波的三倍频转换效率分别为 75.12% 和 78.62%。由图 7 可见,与 7.5 kJ 相比,虽然输出能量为 20 kJ 时脉冲 1 波前畸变对三倍频转换效率的影响从 0.27% 提高到了 0.70%,脉冲 2 波前畸变对三倍频转换效率的影响从 0.42% 提高到了

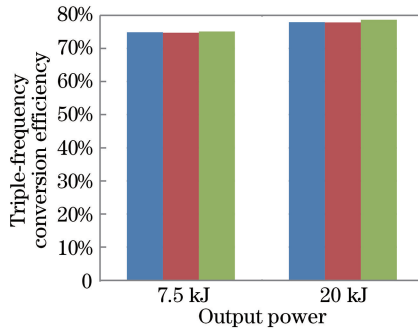


图 7 三倍频转换效率

Fig. 7 Triple-frequency conversion efficiency

0.78%，但仍可认为两束激光脉冲波前面形对三倍频转换效率的影响可以忽略不计。

高功率固体激光装置中,空间滤波器的主要作用之一是滤除放大过程中非线性增长过快的频率成分,理论上小孔尺寸越小,空间滤波效果就越好。在激光器实际运行过程中,如果空间滤波器小孔处聚焦光斑尺寸过大,将产生卡光现象,从而影响激光的能量过孔效率,甚至引起等离子体堵孔。此外,由于小孔尺寸还要兼顾系统光路准直的需求,所以聚焦光斑越小,空间滤波器小孔尺寸的设计空间就越大。图 8 为按表 1 模拟出的双脉冲在腔内空间滤波器和传输空间滤波器小孔处的远场焦斑能量分布情况,参考神光-III 主机装置所要求的焦斑能量为 $10M_{DL}$ (95% 能量) 的过孔标准,双向传输放大构型下双脉冲在三、四程过孔时极易发生卡光,因此必须采取一定的措施对两束激光脉冲在小孔处的波前像差进行控制。目前,常见的波前校正模式中,靶场末端补偿模式对空间滤波器过孔时脉冲的波前畸变没有影响,而输入脉冲预补偿模式将会导致波前畸变集中在前级脉冲注入时的传输空间滤波器小孔处和一程放大时的腔内空间滤波器小孔处。因此,在进行波前校正系统的设计时,不能只关注放大器末端输出像差的补偿,必须同时对各程像差进行有效控制。

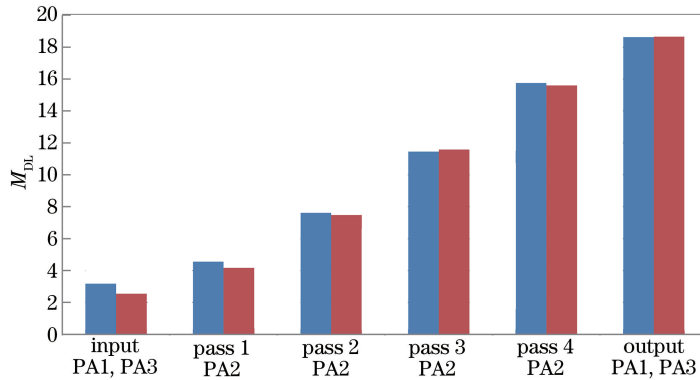


图 8 空间滤波器小孔处双脉冲的远场焦斑能量分布

Fig. 8 Two-pulse far-field focal spot energy distributions at positions of spatial filter pinholes

4 结 论

从双脉冲双向传输放大系统的构型特点出发,通过建立脉冲传输放大过程的等效光路,明确了两束脉冲波前畸变叠加过程的差异,并利用神光-III 主机装置中的实测数据进行数值模拟。结果表明,双脉冲输出波前畸变较大且面形具有一定差异,远场能量集中度无法满足打靶要求,必须进行波前校正,校正系统需具备同时补偿两种不同波前面形的能力;输出脉冲的波前畸变集中在低频段,可采用自适应光学系统作为主要的补偿控制手段;三、四程空间滤波器小孔处两束脉冲的波前畸变较大,为保证主放大系统的安全运行,必须在设计波前校正系统时对各程过孔时的波前像差进行有效控制。这些结论将为双脉冲双向传输放大构型下波前控制系统的设计提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, *et al.* Ignition and high gain with ultrapowerful lasers[J]. *Physics of Plasmas*, 1994, 1(5): 1626-1634.
- [2] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, *et al.* Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) applications[J]. *Nature*, 1972, 239: 139-142.
- [3] Xiao Kaibo, Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, *et al.* Research status of conceptual design of diode-pumped solid-state laser driver for LIFE[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040001.
肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 美国 LIFE 计划激光驱动器概念设计研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 040001.
- [4] Xiao Kaibo, Yuan Xiaodong, Jiang Xinying, *et al.* Research status of conceptual designs of diode-pumped solid-state laser driver for HiPER[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 080005.
肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 欧洲 HiPER 项目激光驱动器概念设计研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 080005.
- [5] Zhang Y D, Yang Z P, Duan H F, *et al.* Characteristics of wavefront aberration in the single beam principle prototype of the next generation ICF system[C]. *SPIE*, 2002, 4825: 249-256.
- [6] Spaeth M L, Manes K R, Widmayer C C, *et al.* The national ignition facility wavefront requirements and optical architecture[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(12): 2854-2865.
- [7] Salmon J T, Bliss E S, Byrd J L, *et al.* Adaptive optics system for solid state laser systems used in inertial confinement fusion[C]. *SPIE*, 1995, 2633: 105-113.
- [8] Dai Wanjun, Hu Dongxia, Zhou Wei, *et al.* Application of cavity deformable mirror in petawatt facility with U-turn reverser[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2920-2923.
代万俊, 胡东霞, 周 维, 等. 腔镜位置变形镜波前补偿与实验研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2920-2923.
- [9] Wang De'en, Hu Dongxia, Dai Wanjun, *et al.* Far field irradiance profile control in inertial confinement fusion drive facility with adaptive optics[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0312002.
王德恩, 胡东霞, 代万俊, 等. 惯性约束聚变驱动装置中焦斑整形的自适应光学方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0312002.
- [10] Mu Jie, Wang Xiao, Jing Feng, *et al.* Effect of wavefront distortion on coherent beam combination in high-power laser facilities[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0602010.
母 杰, 王 逍, 景 峰, 等. 高功率激光装置中波前畸变对相干合成的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602010.
- [11] Fan Dianyuan, Zhang Xiaomin. Laser fusion and high power laser: History and progress[J]. *Physics*, 2010, 39(9): 589-596.
范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光: 历史与进展[J]. *物理*, 2010, 39(9): 589-596.
- [12] Zhang X M, Wei X F, Li M Z, *et al.* Bidirectional amplifying architecture with twin pulses for laser fusion facilities [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(11): 115803.
- [13] Zhao Junpu. Study on high power solid-state laser beam quality diagnosis[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006: 13-15.
赵军普. 高功率固体激光光束质量诊断方法研究[D]. 成都: 四川大学, 2006: 13-15.