

时域控制精度对多脉冲叠加效果的影响

曹劭文, 石会财, 张蓉竹, 孙年春

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要: 为了克服大口径激光系统目前面临的困难, 提出使用多束中小口径激光在靶面实现能量叠加的方式。为满足靶面辐照均匀性与对称性的要求, 对多束激光的同步控制精度及脉宽控制精度对叠加光束的影响进行分析。研究表明, 多脉冲辐照的同步性会影响靶面中心辐照的能量分布。当单束脉冲延时大于等于两倍脉宽时, 靶面中心光强峰值将降至 75%, 两束脉冲延时大于等于两倍脉宽时, 靶面中心光强峰值将降至 50%。当一个光束的脉宽增加到其他参与叠加的光束的两倍时, 靶面中心光强峰值将降至理想叠加情况的 87.5%。

关键词: 靶面能量分布; 脉冲时延; 脉宽

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0306004

Effects of the time domain control precision on multiple-pulse superposition

Cao Shaowen, Shi Huicai, Zhang Rongzhu, Sun Nianchun

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: In order to overcome the difficulties of the large aperture laser system, combining the output energy of multiple laser beams with small aperture at the target surface was a feasible scheme. To meet the target surface requirements for the uniformity and symmetry of the irradiation, the synchronous control precision of multi-pulse was analyzed in detail. The results show that multi-pulse irradiation affects the synchronization of the energy distribution center in far-field directly. While one single beam pulse delay is greater than or equal to 2 times of the pulse width, the peak value of the light intensity on the target surface will fall down to 75%. If the control errors of two pulses are occurred with the same degree peak value of light intensity will fall down to 50%. Otherwise, when the control error of the pulse width is twice as large as the ideal pulse width, the peak value of the intensity on the target surface will drop to 87.5%.

Key words: target surface energy distribution; pulse delay; pulse width

收稿日期: 2016-07-10; 修订日期: 2016-08-20

基金项目: 国家高技术发展计划(2012AA8042038); 四川省教育厅创新团队资助项目(13TD0048)

作者简介: 曹劭文(1993-), 女, 硕士生, 主要从事激光传输方面的研究。Email: CSW_Monica@163.com

通信作者: 孙年春(1961-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事高功率固体激光技术等方面的研究。Email: 8178137@163.com

0 引言

ICF 系统为实现点火需要高能量的激光脉冲,且对从不同方向辐照到靶面的光能量的对称性及均匀性有极高的要求^[1-3]。当前驱动系统主要通过增加单个大口径、高功率的固体激光器来提高激光的总体输出功率^[4-5]。然而,大口径的光学器件在装配各类光学元器件、制作工艺以及控制热效应等方面都遇到了相当大的困难^[6]。因此,可以考虑采用多个小口径激光器组直接在靶面上进行能量叠加,从而降低研制成本^[7-8]。但是,多束激光的靶面叠加可能会由于每束激光的不同步而导致靶面能量分布的均匀性及对称性的下降^[9]。

目前,关于多路激光在同步控制方面的研究多集中在激光测距时间间隔测量系统、激光发射同步延时触发控制系统、激光成像同步控制系统^[10]等方面。但直接针对于脉冲时域控制精度对光束叠加远场的影响的相关讨论还较少。因此,为了给出更精确的时域控制参数,文中建立了一套多路脉冲光束同步控制分析模型,通过改变高斯脉冲及超高斯脉冲的脉冲间隔和脉宽,对靶面中心光强进行了详细地分析。对单束脉冲和多束脉冲时域控制误差对靶面中心光场均匀性的影响进行了对比,以期对实际的工程项目提供一定的理论指导作用。

1 模型及理论分析

将高斯光束作为叠加光束的基本脉冲,其光场分布表达式为:

$$E(x,y,t)=A(t)\exp\left[-\frac{x^2+y^2}{w_0^2}\right] \quad (1)$$

式中: $A(t)$ 为脉冲信号的时间波形; w_0 为 $1/e$ 的束腰宽度,径向距离 $r^2=x^2+y^2$ 。

脉冲信号 $A(t)$ 的表达式为:

$$A(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\tau}}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right]\exp(-i\omega_0 t) \quad (2)$$

式中:中心频率 $\omega_0=2\pi c/\lambda_0$, λ_0 为中心波长; τ 为脉宽。

令 $r=0$,即轴上脉冲强度 $I(t)$ 的表达式为:

$$I(t)=|E|^2=E \cdot E^* \quad (3)$$

n 个波形相同且不相干的高斯脉冲在远场靶面上叠加后的靶面中心光强可表示为:

$$I(n,t)=\sum^n |A(t-nt_0)\exp[-i\omega_0(t-nt_0)]|^2 = \sum^n |A(t-nt_0)\exp[-i\omega_0 t + in\omega_0 t_0]|^2 \quad (4)$$

式中: t_0 为相邻高斯脉冲间的时间差; n 为叠加脉冲个数。

当输入模拟信号为超高斯脉冲时,其脉冲信号的时间波形为:

$$U(t)=\exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{2m}\right] \quad (5)$$

式中: m 为超高斯脉冲的阶数,文中将 m 值置为 12。

2 数值模拟及讨论

2.1 脉冲同步控制对远场光强分布的影响

为分析多光束在靶面中心的能量分布情况,以四束光束叠加为例,选取四束参数完全一致的光束进行远场叠加,即将公式(4)中 n 取为 4。每一束激光的参数为: $\omega_0 t_0=(2n+1)\pi/2$,脉宽 $\tau=10$ ns,束腰宽度 $w_0=0.03$ mm,中心波长 $\lambda_0=1064$ nm。

图 1(a)给出高斯脉冲 I_1, I_2, I_3 同时到达靶面,但 I_4 到达靶面的时间 t 相对于 I_1, I_2, I_3 的时延 t_0 分别为 0、1.0、2.0、5.0 ns 时的远场光强分布变化情况,图 1(b)

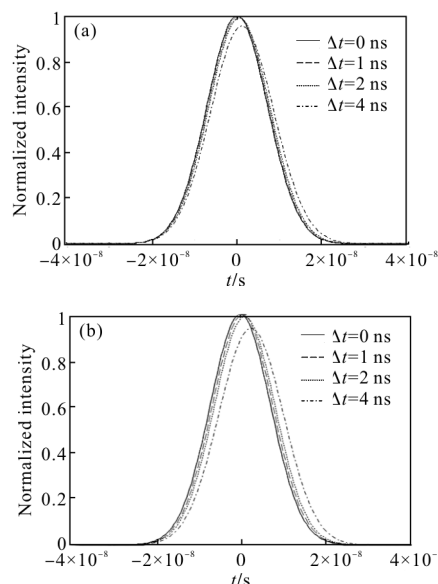


图 1 单束高斯脉冲(a)及两束高斯脉冲(b)延时 $t=0, 1, 2, 5$ ns 对叠加光束的影响

Fig.1 Effect of the single beam Gaussian(a) and two beams Gaussian(b) pulse delay on superposition beams, $t=0, 1, 2, 5$ ns

则给出光束 I_1, I_2 脉冲同步, 但 I_3, I_4 相对于 I_1, I_2 的时延 t_0 分别为 0、1.0、2.0、5.0 ns 的归一化后叠加光束光强的变化。

图 1 中的纵轴为叠加光束的归一化光强, 横轴为时间轴。可看出, 随着脉冲时延间隔逐渐增大, 靶面中心辐照脉冲的强度逐渐降低。

为更好地说明高斯脉冲时域延时间隔对叠加光束光强峰值的影响, 笔者给出了靶面中心光强分布随辐照脉冲间隔变化的三维图, 如图 2 所示。

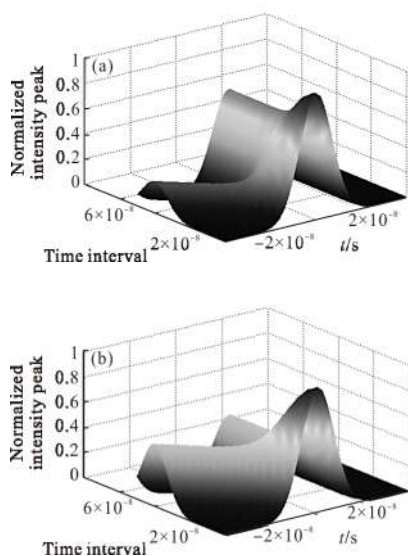


图 2 单束高斯脉冲(a)及两束高斯脉冲(b)延时间隔对叠加光束光强峰值的影响

Fig.2 Effect of the time interval of single beam Gaussian(a) and two beams Gaussian(b) pulse delay on the peak of superposition beams

图 2 中的 Z 轴为远场光束的归一化光强, X 轴为时间间隔, Y 轴为时间。可以得出随着同步控制误差的增加, 远场光强的峰值降低, 且两束高斯脉冲延时变化对靶面中心光强的影响比单束高斯脉冲延时变化的影响更剧烈。

接下来取四束参数完全一致的超高斯脉冲进行叠加。图 3(a)给出超高斯脉冲 I_1, I_2, I_3 同时到达靶面, 但 I_4 的到达靶面的时间 t 相对于 I_1, I_2, I_3 的时延 t_0 分别为 0、1.0、2.0、5.0 ns 时的远场归一化光强分布变化情况, 图 3(b)则给出光束 I_1, I_2 脉冲同步, 但 I_3, I_4 相对于 I_1, I_2 的时延 t_0 分别为 0、1.0、2.0、5.0 ns 的归一化后靶面中心光强的变化图。

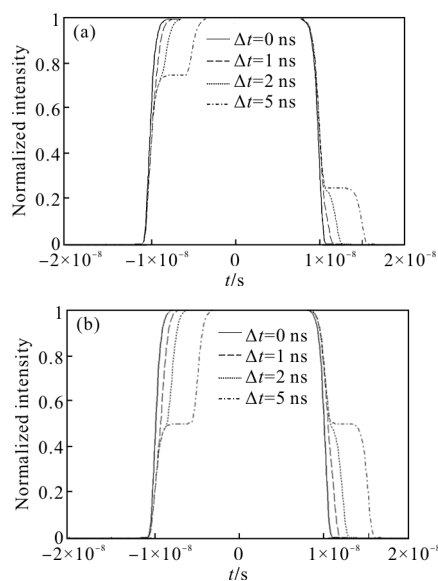


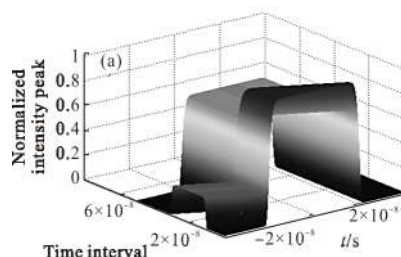
图 3 单束超高斯脉冲(a)及两束超高斯脉冲(b)延时 $t=0, 1, 2, 5$ ns 对叠加光束的影响

Fig.3 Effect of the single beam super-Gaussian(a) and two beams super-Gaussian(b) pulse delay on superposition beams, $t=0, 1, 2, 5$ ns

图 3 中的纵轴为叠加光束的归一化光强, 横轴为时间轴。随超高斯脉冲到达靶面的时间间隔的增大, 靶面中心光强峰值降低并产生旁瓣, 波形发生畸变。

为进一步地分析超高斯脉冲延时间隔对远场光束的影响, 扩大时间间隔的取值范围, 观察其波形特征, 图 4 给出超高斯脉冲延时间隔与远场光束归一化光强峰值之间关系的三维图。

图 4 中的 Z 轴为远场光束的归一化光强, X 轴为时间间隔, Y 轴为时间。可以直观地看出, 超高斯脉冲延时变化对叠加光束光强的峰值的影响规律与高斯脉冲类似。两束超高斯脉冲延时变化对叠加光束的影响比单束超高斯脉冲延时变化的影响更剧烈, 单位时延间隔内叠加光束光强降低幅度更大。



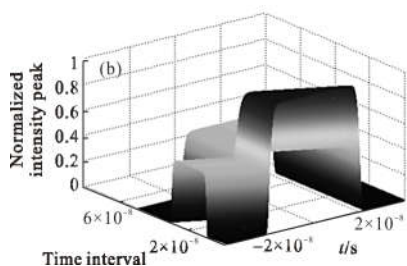


图 4 单束超高斯脉冲(a)及两束超高斯脉冲(b)延时间隔对叠加光束光强峰值的影响

Fig.4 Effect of the time interval of single beam super-Gaussian(a) and two beams super-Gaussian(b) pulse delay on the peak of superposition beams

为了更直观地分析脉冲延时与靶面中心光强归一化的峰值的关系,表 1 给出了脉冲延时不同时高斯脉冲及超高斯脉冲的靶面中心光强归一化的峰值。

表 1 中, Δt 为第四束脉冲相对于其他三束脉冲的延时间隔, A 为脉冲延时变化后归一化后远场光强的峰值。

从表 1 中可以知道, 随脉冲时延间隔的逐渐增大, 靶面中心光强峰值降低。当单束脉冲延时间隔 Δt 大于等于脉宽 τ , 叠加光束光强峰值将降至 75%, 当两束脉冲延时间隔 Δt 大于等于脉宽 2τ , 远场光强峰值将降至 50%。相较于高斯脉冲, 由于

表 1 脉冲延时 t 与靶面中心光强归一化的峰值的关系

Tab.1 Relationship between the pulse delay t and the normalized peak of superposition beam intensity

Δt		0 ns	0.5 ns	1.0 ns	5.0 ns	10 ns	20 ns
Gaussian pulse	Single beam time delay A	1	0.999 4	0.997 5	0.763 1	0.75	0.75
	Two beam time delay A	1	0.998 8	0.997 5	0.939 4	0.778 8	0.509 9
Super-Gaussian pulse	Single beam time delay A	1	1	1	1	1	0.75
	Two beam time delay A	1	1	1	1	0.999	0.50

超高斯脉冲波形在中心点处变化较为缓慢, 结合表 1 可以看出, 当时延变化率小于 50% 时, 超高斯脉冲的远场光强能量峰值基本不变。同时也说明这类平顶分布的脉冲在同步控制上其容差特性会更好。

2.2 脉宽变化对叠加光束的影响

另外, 脉冲宽度对靶面中心光强的能量分布也是具有直接影响的, 因此对入射光束的控制除了同步精度控制之外, 还需对脉宽精度进行控制。

为了分析脉宽变化对远场光强能量分布的影响, 在保持四束脉冲同步的情况下, 以第一束脉冲光束 I_1 为基础光束, 将光束 I_1, I_2, I_3 脉宽置 τ 为 10 ns。

图 5(a) 给出高斯脉冲 I_4 相对于 I_1, I_2, I_3 的差值 τ_0 分别为 0、1、5、10 ns 时, 即 I_4 的脉宽大于等于初始脉宽 10 ns 时叠加光场光强分布变化情况, 图 5(b) 则给出光束 I_3, I_4 相对于 I_1, I_2 差值 τ_0 分别为 0、1、5、10 ns, 即 I_3, I_4 的脉宽 τ 大于等于初始脉宽 10 ns 时归一化叠加光场光强的变化。

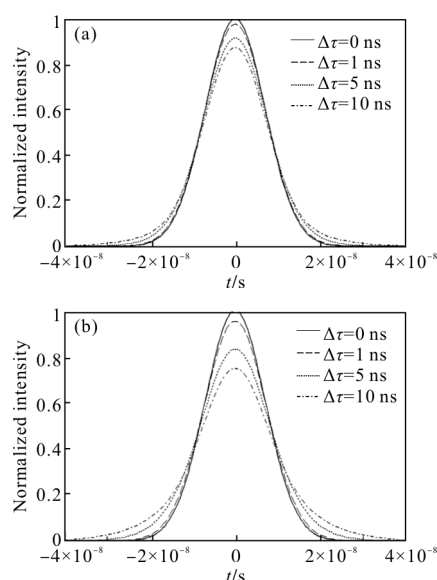


图 5 单束高斯脉冲(a)及两束高斯脉冲(b)脉宽 $\Delta\tau=0, 1, 5, 10$ ns 对叠加光束的影响

Fig.5 Effect of the single beam Gaussian(a) and two beams Gaussian(b) pulse width on superposition beams, $\Delta\tau=0, 1, 5, 10$ ns

图 5 中的纵轴为叠加光束的归一化光强，横轴为时间轴。

为更好地分析高斯脉冲脉宽变化对远场光强以及波形的变化趋势,对 $\Delta\tau$ 的取值范围扩大,并对单束高斯脉冲脉宽改变引起的叠加光束光强的变化及两束高斯脉冲脉宽改变引起的叠加光束光强的变化进行比较,如图 6 所示。

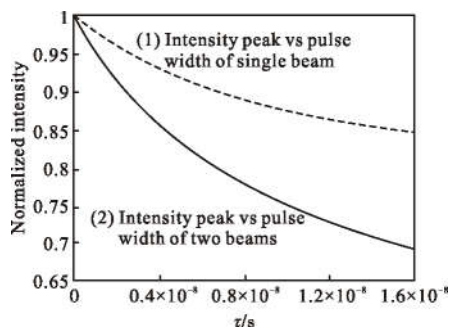


图 6 高斯脉冲脉宽变化对叠加光束光强峰值的影响

Fig.6 Effect of pulse width of Gaussian beams on the normalized peak of superposed beams intensity

图 6 中的纵轴为归一化光强,横轴为脉宽取值。曲线(1)为单束高斯脉冲脉宽变化对叠加光束光强峰值的影响,曲线(2)为两束高斯脉冲脉宽变化对叠加光束光强峰值的影响。

从图 6 中可以看出,光强随高斯脉冲脉宽的增大而减小,并且两束高斯脉冲脉宽变化对叠加光束的影响比单束高斯脉冲脉宽变化引起叠加光束光强的影响更明显,下降幅度值也越大。

进一步地分析脉宽变化对超高斯脉冲远场光强的影响,图 7(a)给出超高斯脉冲 I_1, I_2, I_3 脉宽 τ 置为 10 ns,但 I_4 的脉宽 τ 相对于 I_1, I_2, I_3 的差值 τ_0 分别为 0、1、5、10 ns 时,即 I_4 的脉宽 τ 大于等于初始脉宽 10 ns 时的叠加光场光强分布变化情况,图 7(b)则给出了光束 I_3, I_4 的脉宽 τ 相对于 I_1, I_2 差值 τ_0 分别为 0、1、5、10 ns,即 I_3, I_4 的脉宽 τ 大于等于初始脉宽 10 ns 时的归一化叠加光场光强的变化。

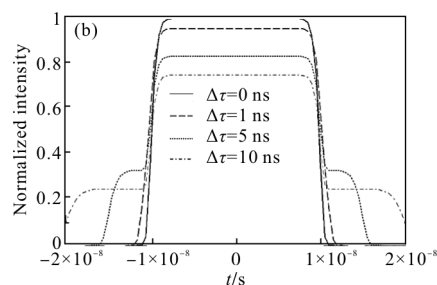
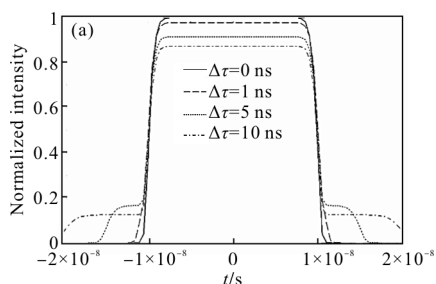


图 7 单束高斯脉冲(a)及两束高斯脉冲(b)脉宽 $\Delta\tau=0, 1, 5, 10$ ns 对叠加光束的影响

Fig.7 Effect of the single beam super-Gaussian(a) and two beams super-Gaussian(b) pulse width on superposition beams, $\Delta\tau=0, 1, 5, 10$ ns

图 7 中的纵轴为叠加光束的归一化光强,横轴为时间轴。

为了讨论超高斯脉冲脉宽变化对远场光强峰值的影响,扩大 $\Delta\tau$ 的参数范围,并对单束超高斯脉冲脉宽改变引起的靶面中心光强的变化与两束超高斯脉冲脉宽改变引起的靶面中心光强的变化进行对比,如图 8 所示。

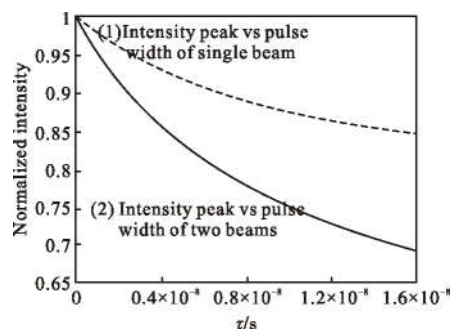


图 8 超高斯脉冲脉宽变化对叠加光束光强峰值的影响

Fig.8 Effect of pulse width of super-Gaussian beams on the normalized peak of superposed beams intensity

图 8 中的纵轴归一化光强,横轴为脉宽取值。曲线(1)为单束超高斯脉冲脉宽变化对叠加光束光强峰值的影响,曲线(2)为两束超高斯脉冲脉宽变化对叠加光束光强峰值的影响。

从图 8 中可以看出,两束超高斯脉冲脉宽变化对叠加光束的影响比单束超高斯脉冲脉宽变化引起叠加光束光强的影响更明显,叠加光束的光强下降幅度更大。

根据图 6 和图 8 可得出结论,当单束脉冲脉宽等于两倍脉宽时,高斯脉冲及超高斯脉冲远场光束峰值将降至 87.5%。当两束脉冲脉宽等于两倍脉宽

时,远场光束峰值将降至 75%。同时,从图 6 和图 8 中可以看出,脉宽变化对高斯脉冲及超高斯脉冲的远场光强分布的影响较为一致。

3 结 论

多束激光在靶面中心进行能量叠加的过程中,严格地控制延时间隔以及脉宽大小对远场光束的质量起着重要的作用。文中通过分析高斯脉冲及超高斯脉冲关于时延以及脉宽大小的解析方程,从理论上得出远场光强与多束脉冲时延以及脉宽大小的关系,并对理论研究进行模拟仿真。

其结果表明:随多束脉冲延时增大,脉宽增加,远场的光强逐步降低,波形发生畸变。当单束脉冲时延间隔变化率小于 5% 时,高斯脉冲远场光强降至 76.31%,超高斯脉冲远场光强则基本不变,当两束脉冲时延间隔变化率小于 5% 时,高斯脉冲远场光强降至 93.94%,超高斯脉冲远场光强仍基本不变。当单束脉冲脉宽等于两倍脉宽时叠加光束峰值将降至 87.5%。当单束脉冲脉宽变化率小于 50% 时,高斯脉冲及超高斯脉冲的远场光强均降至 91.67%。当两束脉冲脉宽变化率小于 5% 时,高斯脉冲及超高斯脉冲远场光强均降至 83.33%。研究显示此结论对 ns 量级及 fs 量级的高斯脉冲和超高斯脉冲模型均适用。因此,脉冲延时和脉宽变化相比,脉冲延时变化对合成脉冲远场的影响更大,在实际的工程试验中应当对脉冲同步控制的精度要更为关注。

参考文献:

- [1] Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality [J]. *Chinese Journal Of Lasers*, 2009, 36(7): 1643-1653. (in Chinese)
冯国英,周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1643-1653.
- [2] Atzeni S. Laser driven inertial fusion: the physical basis of current and recently proposed ignition experiments [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2009, 51 (12): 124029.
- [3] Arnold R C, Meyertervehn J. Inertial confinement fusion driven by heavy ion beams [J]. *Plasma Physics & Controlled Fusion*, 1987, 31(10): 1613.
- [4] Aikens D M, Bissinger H D. Overview of small optics for the National Ignition Facility [C]//SPIE, 1999, 3782: 476-487.
- [5] Jiang Shaoen, Ding Yongkun, Liu Shenye, et al. Advances in laser fusion experiments and diagnosis devices SG Series [J]. *Physics*, 2010, 39(8): 531-542. (in Chinese)
江少恩,丁永坤,刘慎业,等. 神光系列装置激光聚变实验与诊断技术研究进展[J]. 物理, 2010, 39(8): 531-542.
- [6] Zhou Shouhuan. Solid-state laser thermal management [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22 (4): 497-509. (in Chinese)
周寿桓. 固体激光器中的热管理[J]. 量子电子学报, 2005, 22(4): 497-509.
- [7] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2005, 11(3): 567-677.
- [8] Peng Longyao, Zhao Yahui, Zhang Rongzhu. Effect of alignment accuracy on focal spot during beam superposition process [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 25(5): 1120-1124. (in Chinese)
彭龙瑶,赵雅慧,张蓉竹. 激光能量叠加过程中对准精度对焦斑的影响[J]. 强激光与粒子束, 2003, 25(5): 1120-1124.
- [9] Dong Hongcheng, Tao Chunxian, Zhao Yuanan. et al. Synthesis characteristic Gaussian beam analysis [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21 (2): 171-176. (in Chinese)
董洪成,陶春先,赵元安,等. 高斯光束的合成特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 171-176.
- [10] Jiang Junmin, Liu Jinyuan, Liu Baiyu, et al. Research of the new-system digital pulse generator in the prototype of laser system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(3): 381-383. (in Chinese)
蒋军敏,刘进元,刘百玉,等. 用于激光打靶装置中的新型同步系统的研究[J]. 光子学报, 2002, 31(3): 381-383.