

文章编号: 0258-7025(2009)06-1493-05

# 多路激光功率平衡测量技术

孙志红 王文义 刘 华 夏彦文 彭志涛 徐隆波 傅学军 元浩宇

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 针对现在多路大功率激光器的功率平衡缺乏对评定参数计算方法的细致讨论, 提出了瞬时功率和激光装置束间功率不平衡度的详细数值计算方法。根据理论模拟结果, 选取平顶脉冲时间脉冲波形半峰全宽对应的中心位置作为时间波形的时间基准进行功率平衡计算。实验中, 用光电转换元件、示波器和能量卡计分别进行各路激光束到达靶点的时间同步、脉冲时间波形和能量测试, 计算得到多路激光瞬时功率和激光装置束间功率不平衡度, 并分析瞬时功率测试结果的不确定度, 从而给出多路激光功率平衡测量技术和方法。

**关键词** 测量; 激光功率; 功率不平衡度; 时间波形; 不确定度

中图分类号 O434.12 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093606.1493

## Power Balance Measurement Technique of Multi-Beam Laser

Sun Zhihong Wang Wenyi Liu Hua Xia Yanwen Peng Zhitao

Xu Longpo Fu Xuejun Yuan Haoyu

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

**Abstract** The calculation methods have been developed for estimating the power and power imbalance, for that there is no discussion on calculation method of power balance in detail currently. According to the results of theoretical simulation, the center position of temporal profile full width half maximum is fixed as the base point of power balance calculation for the flat-top pulse. Photo-electricity conversion component, oscillograph, and energy calorimeter are used to measure beam synchronization of arrive target, temporal profile and energy. Detailed results of the power and the power imbalance of laser facility from these calculations are proposed, and the uncertainty is analyzed. Consequently, the measurement technique and methods of multi-beam laser power balance are given.

**Key words** measurement; laser power; systematic power imbalance; temporal profile; uncertainty

## 1 引 言

功率平衡是指各路光束在靶室最终输出不但能量相同, 而且波形相同, 还要精确同步, 即瞬时功率平衡, 它是惯性约束聚变(ICF)的重要研究内容。ICF 不仅对辐照靶面的激光能量均衡性而且对任意时刻的功率均衡性都有很高的要求, 在强激光技术领域, 高精度功率诊断是实现功率平衡的基础。明确多路大功率激光器的功率平衡测量技术, 规范并完善功率平衡测量方法和测试结果评判对激光装置精密功率平衡非常重要。

为了满足惯性约束聚变的需要, 各相关实验室都纷纷致力于实现功率平衡的研究<sup>[1~7]</sup>。美国

NOVA 装置、日本新 GEKKO-XII 系统、美国利弗莫尔(LLNL)实验室的 NIF 装置等对功率平衡有很高的技术指标, 并采用不同的瞬时功率测试方法<sup>[8]</sup>。可能由于技术保密, 国外关于功率平衡测试技术和有关评定参数的数值计算方法没有见到相关报道。国内就强激光能量和时间脉冲波形测试和多路激光能量平衡开展了相关实验研究及评定工作<sup>[9~11]</sup>, 对于多路激光功率平衡测试技术研究可以见到的报道有中国科学院上海光学精密机械研究所开展“神光-II”角变反镜功率平衡控制应用研究<sup>[12]</sup>, 中国工程物理研究院开展组合式高功率多程放大固体激光装置束间功率平衡研究<sup>[13]</sup>, 他们主要是针对多路激光

收稿日期: 2008-04-23; 收到修改稿日期: 2008-10-07

基金项目: 高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室(9140C6803020703)资助课题。

作者简介: 孙志红(1965—), 女, 硕士, 副研究员, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: sunzh01@163.com

功率平衡控制开展的研究工作,但关于功率平衡测试有关数值计算方法的细致讨论甚少。本文给出瞬时功率和激光装置束间功率不平衡度的详细数值计算方法。

## 2 多路激光束间功率平衡测量原理与方法

激光瞬时功率属于间接测量物理量,测试系统

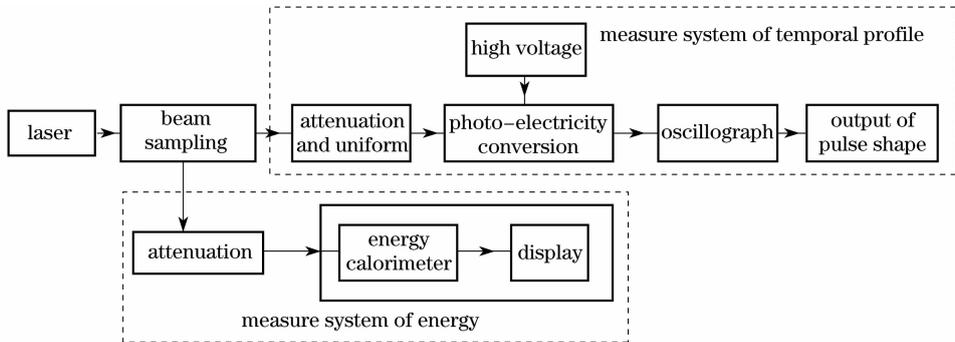


图 1 功率测量的原理框图

Fig. 1 Principle chart of laser power measuring

上,能量探测器将接收到的能量转化为一定的电压,经线性放大后,得到对应的电压值,在显示器上显示出来,从而完成激光脉冲能量的测量。同时测试激光装置不同子束输出的脉冲能量为: $E_j (j=1\sim N)$ 。同时,待测激光束经过光束取样后进行光强衰减、光束匀化后,以一定的光强辐照光电转换器阴极,它在一定的偏置电压下将激光的光强信号线性地转换为电压(电流)信号并输出。该电压信号经过电衰减器衰减后,以一定的幅值输入数字示波器。数字示波器对输入的信号进行采集、处理、存储并输出,从而得到脉冲波形分布。

在进行功率平衡计算时,难点是寻找多路脉冲波形时间基准,以便对各路波形根据时间基准进行对准。通常对时间波形进行比对时采用脉冲波形峰值强度 50% 的前沿半峰全宽(FWHM)位置为时间对准特征点,主要考虑多路时间波形测量中示波器设置相同的触发电压。为了在功率平衡计算中选取合适的时间基准,通过 SG99 光传输、放大程序<sup>[14]</sup>模拟计算不同能量输入脉冲与经过光传输模拟得到的输出时间波形,模拟结果如图 2 所示,计算中所取时间切片数为  $2\times 10^3$ 。

由于开展功率平衡的对象是平顶脉冲,模拟计算中主要考虑增益引起的时间波形变化。表 1 为模拟计算输出的时间脉冲波形的前沿半峰全宽点位置、后沿半峰全宽点位置和半峰全宽对应的中心位

包括能量测试系统和时间脉冲波形测量系统。在得到多路激光各束的能量和时间脉冲波形后,经数据处理后得到激光束瞬时功率和多路激光束间功率不平衡度值。图 1 给出了功率测量的原理图。

待测试激光束经过取样后进行光强衰减,能量探测器的接收面对准取样激光束,同时进行口径匹配;在能量测试之前完成能量测量系统在线标定;激光发射后,一定强度的激光入射到能量卡计吸收体

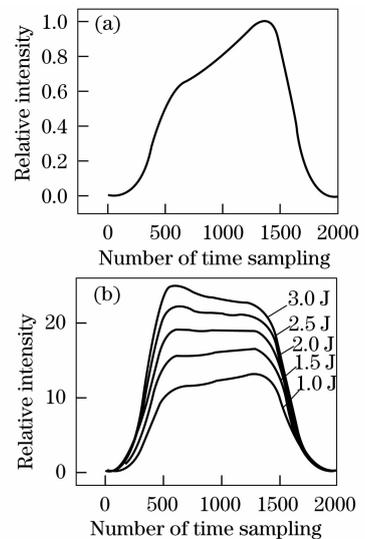


图 2 时间波形与输入能量的变化关系。(a)输入时间波形;(b)输出时间波形

Fig. 2 Calculation of the temporal profile as a function of laser energy for input (a) and output (b) pulse shape 置坐标变化与入射能量的关系。由表 1 可见,随着输入能量的加大,各点位置对应时间坐标发生移动,后沿半峰全宽对应的中心位置移动量最小,半峰全宽中心位置与后沿半峰全宽位置变化相差不是太多;考虑到对于实验测量的平顶脉冲功率平衡主要关心脉冲的平顶部分,实验测试中后沿往往产生拖尾现象,故选取半峰全宽对应的中心位置为时间基准进行功率平衡计算。

表 1 不同输入能量时输出的时间脉冲波形中  
3 种时间基准的位置变化

Table 1 Position of three kinds base time point  
of temporal profile versus input energy

Input energy /J	Position of front FWHM	Position of back FWHM	Position of center FWHM
1.0	405	1598	1002
1.5	387	1594	991
2.0	371	1590	981
2.5	366	1579	973
3.0	362	1569	966
Average error of position	14.2	9.6	11.0

根据得到的时间脉冲波形,计算得到每一子束脉冲波形对应积分面积为  $S_j (j=1 \sim N)$ ,由多路脉冲波形时间基准可以得到子束脉冲波形不同时间间隔  $\Delta\tau$  内的积分面积  $\Delta s_j$ ,则第  $j$  子束在时间间隔  $\Delta\tau$  内的子束脉冲能量为

$$E_j(t) = \frac{E_j}{S_j} \times \Delta s_j, \Delta s_j = \int_{t-\Delta\tau/2}^{t+\Delta\tau/2} I_j(t) dt, \quad (1)$$

式中  $I_j(t)$  为第  $j$  子束的脉冲波形振幅。子束  $t$  时刻瞬时功率  $P_j(t)$  用子束脉冲取样间隔  $\Delta\tau$  内的脉冲能量与其脉冲宽度的比值表示

$$P_j(t) = \frac{E_j(t)}{\Delta\tau} \quad (j=1 \sim N). \quad (2)$$

装置束间功率不平衡度  $\Delta P_{ib}(t)$  用装置输出的各子束脉冲瞬时功率起伏的均方根(RMS)值表示

$$\Delta P_{ib}(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[ \frac{P_j(t) - P_0(t)}{P_0(t)} \right]^2} \quad (j=1 \sim N), \quad (3)$$

式中  $P_0(t)$  为系统  $t$  时刻输出的参考功率或平均功率。

在多路激光功率平衡测试之前,首先利用快响应双平面二极管和宽频带数字示波器组成的测试系统对 8 束激光到达靶室窗口的时间同步进行测试。测试系统响应时间为 110 ps,采用重复频率输出的光源,输出高斯激光脉冲脉宽约 300 ps。将两个探测器同时放置在同一路的靶室窗口前,利用同一发次测试两探测器的响应及传输电缆的固有时间差,然后以其中一个探测器作为基准,另一个探测器分别置于其余几路靶室窗口前测试,给出多路激光到达靶室窗口的时间差。根据测试结果调整多路激光到达靶室窗口的时间同步,图 3 中曲线(a)和(b)分别表示作为基准的第一路和第二路到达靶点的时间

脉冲波形测试结果,可以看出经过第二路光程调节,两路到达靶点在数字示波器上显示为时间同步,两路时间波形的脉冲峰值和半峰全宽的中心位置一致。采用同样的步骤最终分别使 8 路激光到达靶室在数字示波器上达到“零”同步。采用这样的比对测试方法,多路激光同步测试测量不确定度主要来源有 5 项,其中,同步测试仪器系统的分辨率为 2.5 ps;测试用双平面二极管与靶室窗口固定的长度最大误差不会超过 1 mm,即 3.3 ps;预放同步调整镜架的分辨率为 12.5  $\mu\text{m}/\text{步}$ ,考虑该反射镜是双倍光程,即为 25  $\mu\text{m}/\text{步}$ ,相当于 0.0825 ps;原型装置靶室窗口(靶球)的同心度最大不会超过 2 mm,即 6.6 ps;实验用靶丸的瞄靶定位精度为 50  $\mu\text{m}$ ,考虑双倍光程,即相当于 0.33 ps;通过计算 8 束激光同步测试测量不确定度为 7.8 ps。

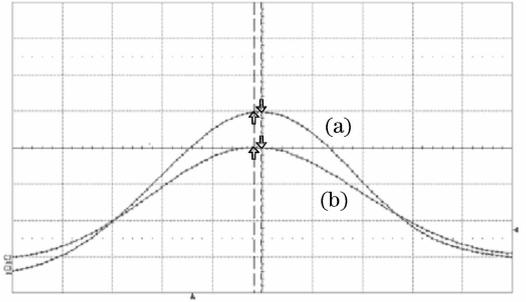


图 3 激光到达靶室窗口时间同步测试,(a)和(b)分别表示作为基准的第一路和第二路时间波形

Fig. 3 Beam synchronization testing. Temporal profile of standardized beam 1 (a) and beam 2 (b)

### 3 测试结果与不确定度分析

对 8 路激光输出的三倍频激光,采用上述实验方法测试可以得到每路的能量和时间脉冲波形,然后通过计算得到瞬时功率和激光装置束间功率不平衡度,并分析子束瞬时功率测试不确定度。

#### 3.1 子束瞬时功率

根据时间脉冲波形分布的强度统计分布,计算得到最大几率的强度值作为本底信号,时间脉冲波形分布图像整体减去该值去本底。在计算瞬时功率时,首先找出 8 路时间脉冲波形半峰全宽对应的中心位置,并将其对应的时间设为零,根据(1)式和(2)式计算得到 8 路子束的瞬时功率如图 4 所示,图中横坐标为时间,时间间隔取 5 ps,纵坐标为瞬时功率,8 路激光能量分别为 882 J,834 J,989 J,939 J,994 J,997 J,1009 J,871 J。

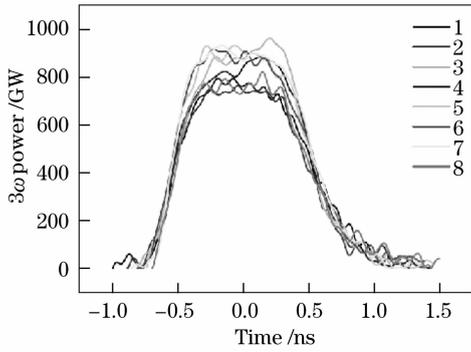


图 4 8 路子束的瞬时功率(选取半峰全宽的中心位置为时间基准)

Fig. 4 Instantaneous power of eight laser beams (the center position of FWHM is fixed as the time base point)

### 3.2 子束瞬时功率测试不确定度

瞬时功率的不确定度主要来源有:能量测量引入的不确定度分量和时间脉冲波形测试引入的不确定度分量。任一子束能量测试结果可以表示为

$$E_j \pm u(E_j) \quad (j = 1 \sim N), \quad (4)$$

式中  $u(E_j)$  为子束能量测量不确定度。时间波形测量不确定度用脉冲波形对应积分面积和时间间隔  $\Delta\tau$  内的积分面积  $\Delta S_j$  测量不确定度表示

$$S_j \pm u(S_j) \quad (j = 1 \sim N), \quad (5)$$

式中  $u(S_j)$  为子束脉冲波形面积测量不确定度。子束瞬时功率合成相对标准不确定度为

$$u_{\text{rel}}[P_j(t)] = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(E_j) + u_{\text{rel}}^2(S_j)}, \quad (6)$$

合成标准不确定度为

$$u[P_j(t)] = P_j(t) \times u_{\text{rel}}[P_j(t)], \quad (7)$$

取置信概率  $p=95\%$ , 查  $t$  临界值 ( $t_p$ ) 分布表得置信因子  $k_p=2$ , 则各子束瞬时功率扩展不确定度为  $U[P_j(t)] = k_p \cdot u[P_j(t)]$ , 各子束瞬时功率测量结果可表示为

$$P_j(t) \pm U[P_j(t)] \quad (j = 1 \sim N). \quad (8)$$

根据示波器检定证书所给出的时间波形幅度测试相对不确定度为  $0.2\%$ , 测试过程中, 光电管、电缆示波器系统响应不确定度为  $3.7\%$ ; 在三倍频脉冲波形测量过程中, 每两路信号耦合进数字示波器的一个通道, 示波器的时间档位分辨率设置为  $5 \text{ ns/div}$ , 采样率为  $20 \text{ G}$ , 采样间隔  $5 \text{ ps}$ , 因此, 示波器的档位分辨率引入的不确定度分量为  $0.5\%$ ; 示波器时标显示相对不确定度为  $1.2 \times 10^{-7}$ , 引入的测试误差可忽略。综合考虑以上误差影响因素, 时间波形测量不确定度为  $3.8\%$ ; 根据能量测试标定及测试过程环节误差分析, 能量测量不确定度为

$4.2\%$ 。作为算例图 5 给出第 6 路三倍频光束瞬时功率和其不确定度, 最大的瞬时功率为  $(916.1 \pm 51.8) \text{ GW}$ , 相对不确定度为  $5.6\%$ 。为表示清楚起见, 图 5 所给出的时间间隔取  $50 \text{ ps}$ 。

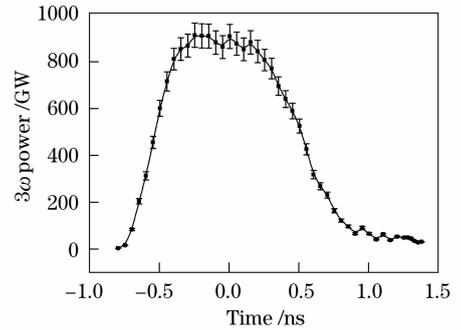


图 5 第 6 路子束瞬时功率及测试误差

Fig. 5 Instantaneous power and error of beam six

### 3.3 装置束间功率不平衡度

根据(2)式和(3)式计算得到的瞬时功率平均值和激光装置束间功率不平衡度, 如图 6 所示。实验测试的是脉宽  $1 \text{ ns}$  的平顶脉冲, 脉冲时间分布为具有一定平顶的脉冲, 通常定义脉冲  $10\%$  强度处与  $90\%$  强度处之间的时间间隔分别为脉冲前后沿, 将  $90\%$  强度之间的时间间隔当作平顶区域。按照此定义, 可计算得到多路平均强度的  $90\%$  强度之间对应时间间隔为  $690 \text{ ps}$  的平顶区域功率不平衡度均方根最大值为  $10.3\%$ , 脉冲前沿  $320 \text{ ps}$  内的功率平衡控制尚处于研究之中。

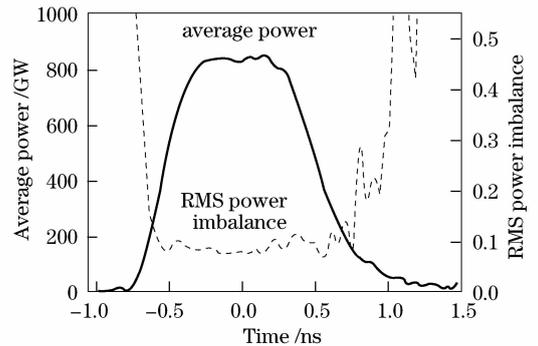


图 6 各子束瞬时功率平均值和激光装置束间功率不平衡度(选取半峰全宽的中心位置为时间基准)

Fig. 6 Average power and power imbalance as a function of time (The center position of FWHM is fixed as the time base point)

为了说明时间基准选取对功率平衡计算结果的影响, 同时也选取后半峰全宽位置为时间基准进行瞬时功率计算, 图 7(a) 为 8 路各子束瞬时功率; (b) 为激光装置束间功率不平衡度。图 7(b) 与图 6 的功率不平衡曲线形状相似, 在脉冲平顶部分两种

方法计算出的 8 路激光功率不平衡度 RMS 值基本相同,由图 7(b)可见在平顶区域对应的时间间隔为 670 ps,功率不平衡度 RMS 最大值为 10.7%。对于平顶脉冲波形,讨论功率平衡时选半峰全宽中心位置作为脉冲波形时间基准更合理。

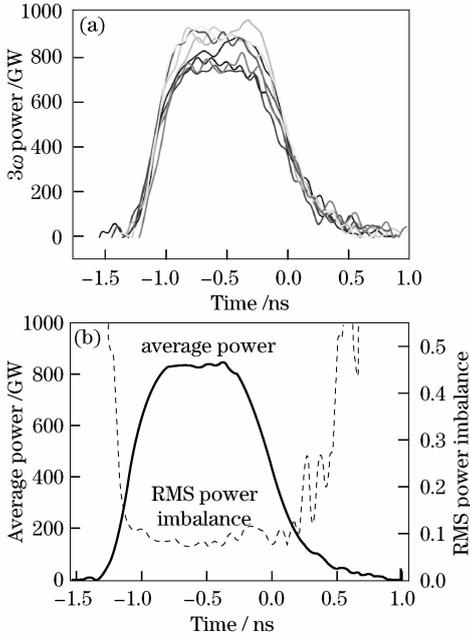


图 7 后沿半峰全宽位置为时间基准的功率平衡计算。(a) 8 路各子束瞬时功率;(b) 平均功率和功率不平衡度与时间的关系

Fig. 7 Calculations of power balance parameters (back edge of FWHM is fixed as the base point) with the instantaneous power (a) and the average power and power imbalance (b) as a function of time

## 4 结 论

针对多路大功率激光器的功率平衡测量技术,给出激光功率平衡测量中能量、时间波形和时间同步测试方法,明确功率平衡参数数值计算方法。在瞬时功率计算过程中,选取多路激光时间脉冲波形半峰全宽中央位置作为平顶脉冲功率平衡计算时间基准,计算每一路激光输出的三倍频光瞬时功率,求出装置的束间功率不平衡度,对瞬时功率测试结果不确定度进行分析。实验中采用光电转换元件、示

波器和激光能量卡计实现了对多路激光到达靶点时间同步和功率测试,同步测试多路时间波形的脉冲峰值和半峰全宽的中心位置一致。通过对多路激光器的功率测试和计算结果讨论,给出了高功率多路激光功率平衡的评判方法。

## 参 考 文 献

- 1 S. Thomas, B. Boyd, D. T. Davis *et al.*. Temporal multiplexing for economical measurement of power versus time on NIF[C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 700~706
- 2 S. Glenzer, O. Jones, D. R. Speck, *et al.*.  $3\omega$  power balance procedure on the NIF[R]. 2001, doi:10.2172/15013548
- 3 W. R. Donaldson, R. Boni, R. L. Keck *et al.*. UV power balance on the OMEGA laser[C]. *SPIE*, 1999, **3609**: 121~127
- 4 J. A. Caird, R. A. Lerche, R. B. Ehrlich *et al.*. Precision NOVA power balance[J]. *Quarterly Report*, 1993, **4**(1):10~17
- 5 P. Leclerc, V. Allouche. Temporal response diagnostic for the laser LMJ[C]. *SPIE*, 1998, **3492**: 843~850
- 6 O. S. Jones, D. R. Speck, S. W. Hann. The NIF power balance[C]. *SPIE*, 1998, **3492**:78~104
- 7 R. L. McCrory, R. E. Bahr, R. Betti *et al.*. OMEGA ICF experiments and preparation for direct drive ignition on NIF[J]. *Nuclear Fusion*, 2001, **41**(10): 1413~1422
- 8 P. Wegner, J. Auerbach, T. Biesiada *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 180~189
- 9 Huang Jie, Cai Xijie, Lin Zunqi. Primary energy balance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(11): 1553~1556
- 10 黄杰, 蔡希洁, 林尊琪. 初级能量平衡[J]. *光学学报*, 2000, **20**(11): 1553~1556
- 11 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(2):255~258
- 12 于永爱, 张玲玲, 唐前进 等. 激光束质量实时测量技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):255~258
- 13 Sun Zhihong, Peng Zhitao, Liu Hua *et al.*. Calculated methods of high power laser near field parameters[J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(4): 544~548
- 14 孙志红, 彭志涛, 刘华 等. 高功率激光近场空域计算方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 544~548
- 15 Zhou Huazhen. The applied research on "SG-II" power balance controlled by Angular variable mirror[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004
- 16 周华珍. "神光-II"角变反镜功率平衡控制应用研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2004
- 17 Xu Lan. Study on the built up high power multi-pass solid state laser system's power balance[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006
- 18 许兰. 组合式高功率多程放大固体激光装置束间功率平衡研究[D]. 成都: 四川大学, 2006
- 19 Jingqin Su, Wenyi Wang, Feng Jing *et al.*. The code SG99 for high power laser propagation and its application[C]. *SPIE*, 2005, **5627**: 527~531