

文章编号: 1001-3806(2023)03-0340-05

基于非球面镜组的大口径激光匀化技术研究

张 浩,樊红英,赵 琦,蒋泽伟,孟庆安,欧阳刚,陈 好
(西南技术物理研究所,成都 610041)

摘要: 为了优化对大口径激光探测组件灵敏度、角度参数等特性的测量能力,减小因高斯光束光强分布中间强、边缘弱的特点造成的测量值差异,基于小口径非球面镜组光束整形及高倍率扩束技术,设计了大口径均匀激光光束产生装置,提出了基于光强分布、非球面镜非球面度、光线光程差的综合优化整形方法。结果表明,设计的开普勒型非球面整形镜组非球面度小于 20 μm ,工作束宽 5 mm,输出平顶光束均匀性为 92.8%;设计的 40 \times 高质量扩束系统,与非球面镜组相匹配可实现 2 m 距离内 150 mm 口径均匀光束,可获得优于 94.2%的 \varnothing 150 mm 大口径均匀光束输出。该研究对激光测量与标定系统的工程化设计是有帮助的。

关键词: 激光技术;平顶光束;大口径光束整形;均匀性;非球面镜组

中图分类号: TN249 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.03.009

Large aperture laser shaping research based on aspheric homogenizer

ZHANG Hao, FAN Hongying, ZHAO Qi, JIANG Zewei, MENG Qing'an, OUYANG Gang, CHEN Hao
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to optimize the measurement of the responsibility and angle parameters of the large-aperture laser detector, and to reduce the discrepancy generated from the central-peak weak-edge profile of gaussian beam, a large-aperture flat-top laser beam generator was designed based on aspheric lens shaping and high-magnification collimating systems. A comprehensive shaping technology based on intensity distribution, aspheric coefficients, and optical path difference was presented. The results show that the aspheric coefficient of a Kepler aspheric lens is less than 20 μm , effective width is 5 mm, and the energy uniformity of the flat-top output beam is greater than 92.8%. And a 40 \times high quality collimating system was designed to match the aspheric lens to realize a flat-top beam of 150 mm aperture in 2 m distance. The measurement results show that the energy uniformity of the 150 mm flat-top beam is greater than 94.2%. This research is helpful to the engineering design of laser measurement and calibration system.

Key words: laser technique; flat-top beam; large-aperture beam shaping; energy uniformity; aspheric lens

引 言

激光以其高亮度、高准直性、窄线宽的优点,自 20 世纪 60 年代诞生以来,广泛应用于工业、通信、医学、航天航空、军事及科学研究领域,并扮演着越发重要的角色。特别是配合激光探测应用,激光可广泛用于目标发现、定位、跟踪、测量等等应用。

在对激光探测系统进行考核时,通常会考核其响应灵敏度、角度测量值等参数^[1]。激光探测系统实际接收的光通常是漫反射回光,光强分布比较均匀。而

如果用未经整形的激光束作为测试光源时,激光束通常呈现为高斯光束分布,结果可能与实际情况有所偏差;另一方面,各个测试系统的光束分布形式不一致,有可能造成其结果的差异,而无法定量评估。因此,为了得到不确定度更高的测量值,需要尽可能将激光束整形为均匀光束。

目前,使用较多的整形方法主要有匀光棒、微纳光学元件^[2-6]、可调液晶^[7]、长焦深光学器件^[8]、多边形匀化光纤、折射式透镜组^[9]、连续自由曲面、高次非球面透镜组等^[10-16],不同整形技术各有优劣。匀光棒、多边形匀化光纤用于相干光时将产生散斑,匀化质量低;微纳光学元件整形技术制作工艺复杂,并且衍射效率不理想;非球面透镜组的方法整形效果好、能量利用率高、结构简单,但无法对多模激光束进行整形。

针对 2 m 距离内大口径均匀光强分布的工程需

作者简介:张 浩(1987-),男,高级工程师,现主要从事激光控制与整形技术的研究。

E-mail: zhh1412@163.com

收稿日期:2022-04-20;收到修改稿日期:2022-08-18

求,本文作者采用小口径非球面镜组光束整形结合高倍率扩束的设计方案,整形非球面镜组设计时将光强分布、非球面度、光线光程差作为评价函数进行综合优化,优化结果光强均匀性对位置更不灵敏,且能更好地满足生产要求。搭建了实验装置,对最终整形效果进行了测试,结果达到了预期整形目标。

1 基本原理

非球面透镜组整形系统基本原理为利用非球面控制光线分布,通常由两片非球面镜组成,前片改变入射光束分布,后片将光束准直输出。系统主要分为开普勒型和伽利略型,考虑到开普勒型非球面相对容易加工,并且激光功率不高,本文中采用开普勒型非球面整形系统。

非球面镜整形系统结构示意图如图 1 所示,理论基于几何光线追迹及能量守恒定律。入射光束的光强记为 $f(r)$,光束中任意一条光线,光线在两非球面上的坐标记为 (r,z) 和 (R,Z) , r,R 代表光线相对光轴的距离, z,Z 代表与原点的轴向距离。光束经整形系统后,在出射面的光强表示为 $g(R)$ 。根据能量守恒定律,入射光束与出射光束间满足下式:

$$\int_0^r f(r) r dr = \int_0^R g(R) R dR \quad (1)$$

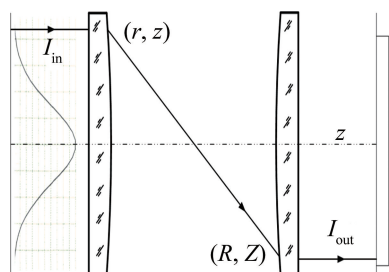


图 1 非球面镜组结构示意图
Fig. 1 Schematic of aspheric lenses

对于(1)式, r 和 R 一一对应,给定任意 r 值只能得到唯一的 R , r 与 R 的函数关系表示为 $R=h(r)$ 。入射面上的高斯光束光强分布函数可表示为:

$$f(r) = \frac{2}{\pi w_0^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \quad (2)$$

式中, w_0 为高斯光束的束宽半径。

选择结构形式比较简单的费米-狄拉克函数作为输出平顶光束,输出光束光强分布表示为:

$$g(R) = I_0 \left\{ 1 + \exp\left[\beta\left(\frac{R}{R_0} - 1\right)\right]\right\}^{-1} \quad (3)$$

式中, R_0 是光强曲线半峰全宽; I_0 为归一化光强系数; $\beta=R_0/W$, W 为光强下降指数。

将输入光强和输出光强代入(3)式,利用数学关系,可得到以下结果:

$$\frac{dR}{dr} = \frac{2r}{\pi w_0^2 I_0 R} \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \left\{ 1 + \exp\left[\beta\left(\frac{R}{R_0} - 1\right)\right]\right\} \quad (4)$$

$$r = \sqrt{-\frac{w_0^2}{2} \ln\left(1 - 2\pi I_0 \int_0^R x \left\{ 1 + \exp\left[\beta\left(\frac{x}{R_0} - 1\right)\right]\right\}^{-1} dx\right)} \quad (5)$$

通过数学推导,两片非球面镜面函数表达式为:

$$z(r) = \int_0^r \frac{dx}{\sqrt{(n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{h(x) - x}\right]^2}} \quad (6)$$

$$Z(R) = \int_0^R \frac{dx}{\sqrt{(n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{h^{-1}(x) - x}\right]^2}} \quad (7)$$

式中, n 表示透镜的折射率; d 表示两片非球面镜之间的间隔; x 表示相对光轴距离的坐标变量。分别将 $R=h(r)$ 与 $r=1/h(R)$ 代入(6)式~(7)式中,即可得到 $z(r)$ 和 $Z(R)$ 的数值解。

2 整形系统设计

本文作者设计整形系统如图 2 所示。测试激光由单模光纤引入匀化扩束系统,1 级光纤准直器将单模激光扩束到 3.5 mm 口径;2 级变倍扩束器倍率为 3^\times ,可将 3.5 mm 光束扩束到 3.5 mm~10 mm 之间,以匹配光束整形器的工作口径;以非球面镜组构成的光束整形器是匀化技术的核心部件,在其出口处形成 5 mm 口径的平顶高斯光束,即均匀光束,实现光束在一定距离内的匀化传输;最后激光束由 40^\times 三级扩束器准直输出,形成大于 150 mm 的均匀光斑分布。

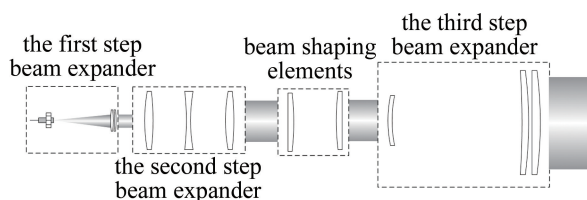


图 2 整形系统结构示意图

Fig. 2 Schematic of beam shaping system

2.1 变倍扩束系统

本文作者设计非球面整形系统的有效工作口径为 5 mm,入射光束与非球面系统工作口径的不匹配将严重影响平顶光束均匀性,针对此问题设计了连续变倍扩束系统。连续变倍扩束系统由变焦组、固定组和补

偿组组成,通过精密调节3组透镜间相对距离来实现连续变倍。设计变倍扩束系统变倍范围为 $1\times\sim 3\times$,利用多重结构设计,保证不同倍率下的光学质量,结构布局图如图3所示。光学参数如表1所示。变焦组与固

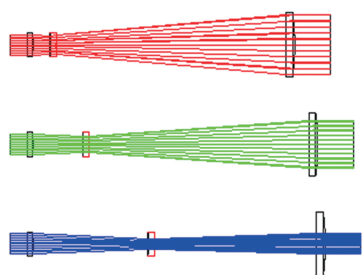


图3 变倍扩束器布局图

Fig. 3 Layout of variable beam expander

定组间距离变化范围为8 mm~32 mm,固定组与补偿组间距离变化范围为56 mm~79 mm。图4为不同倍率下的波像差图,不同扩束倍率下波像差均小于 $\lambda/30$ (λ 为波长),扩束系统对光束质量的影响可忽略。

表1 变倍扩束系统结构数据

Table 1 Structure data of variable beam expander

surface No.	radius/mm	thickness/mm	aperture radius/mm	glass
1	76.21	2.1	6	H-K9L
2	-56.75	8~32	6	air
3	-20.99	1.8	6	H-K9L
4	20.51	56~79	6	air
5	111.17	2	6	H-K9L
6	-116.95		6	air

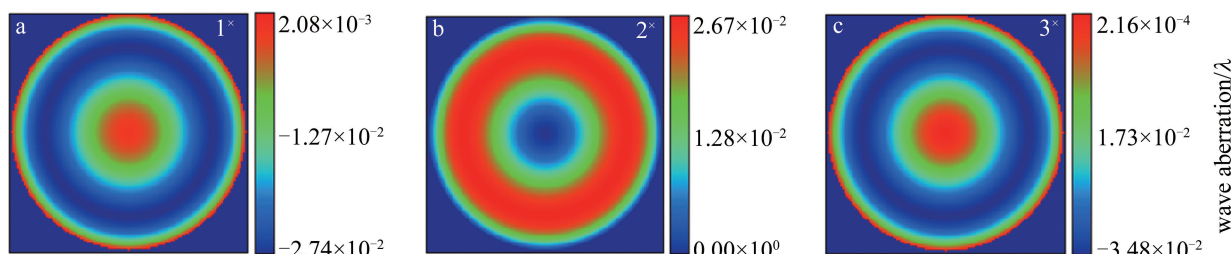


图4 变倍扩束器波像差图

Fig. 4 Wave aberration of variable beam expander

2.2 非球面透镜组

考虑整形匀化光束传输特性受非球面透镜组波像差影响严重,低波差系统对应整形匀化光束能在更远的传输距离上保持均匀性。在利用光学设计软件 ZEMAX 进行优化时,性能评价函数不仅包含出射面光强分布均匀性,还将光线光程差及影响非球面加工难易的非球面度引入评价函数进行综合优化。设计系统入射高斯光束束宽为5 mm,出射平顶光束的半峰全宽为5 mm,选择两非球面镜间距为300 mm,材料选择易于加工的 CaF_2 玻璃。根据入射光束光强分布,选取至少100条光线进行光线追迹,由费米-狄拉克函数计算输出面上光线高度值,利用软件操作数“Reay”控制出射光线的坐标值,利用操作数“OPDC”控制出射光线光程差,同时编写ZPL宏语言将非球面度作为限制条件

对系统进行优化。反复调节评价函数比重,经过多次优化,非球面选择为偶次高次非球面,非球面透镜组参数如表2所示。表中, A_4, A_6, A_8 和 A_{10} 表示非球面的高次项系数。组成无焦系统的波像差如图5所示。由图5可知,系统波像差均方根(root mean square, RMS)

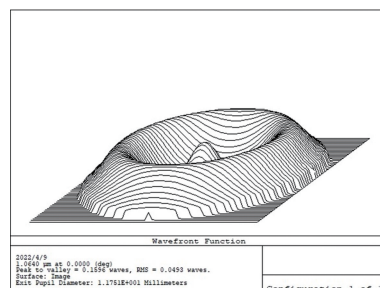


图5 非球面整形系统波像差图

Fig. 5 Wave aberration of aspheric lenses

表2 非球面透镜组结构数据

Table 2 Structure data of aspheric lenses

surface type	radius/mm	thickness/mm	glass	conic	A_4	A_6	A_8	A_{10}
standard	infinity	2	CaF_2					
asphere	-56.66	301.403	air	-41.1258	1.771×10^{-4}	-9.478×10^{-6}	2.515×10^{-7}	-2.669×10^{-9}
asphere	76.64	2	CaF_2	-452.360	3.195×10^{-4}	1.683×10^{-6}	-2.627×10^{-6}	2.618×10^{-9}
standard	infinity	1.5	air					

小于 0.05λ 。

对高斯光束经非球面系统的物理光学传播过程进行了仿真,图 6 和图 7 分别为仿真入射光和出射光沿径向的相对能量分布图。仿真结果表明整形效果较好,同时非球面镜非球面度为 $16\ \mu\text{m}$,满足加工水平。

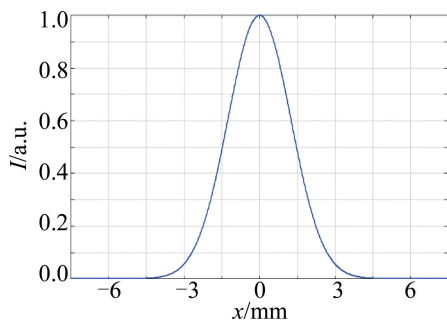


图 6 入射光束能量分布图

Fig. 6 Intensity distribution of incident beam

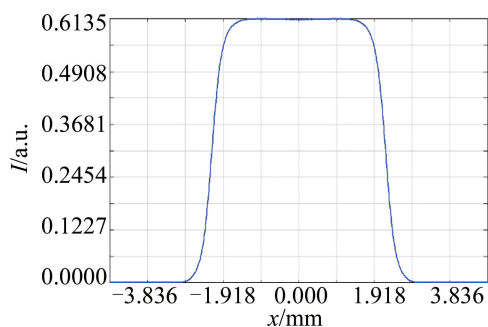


图 7 整形后出射光束能量分布图

Fig. 7 Intensity distribution of flat-top beam

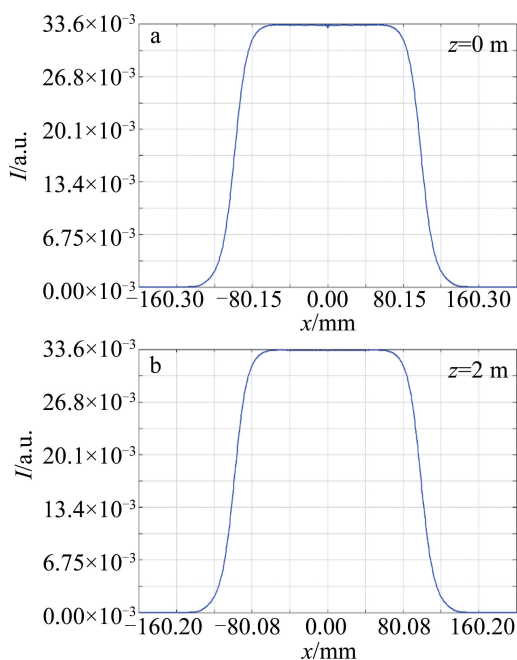


图 8 出射平顶光束

Fig. 8 Emergent flat-top beam

2.3 2 级扩束系统

为了获得大口径光束,需将平顶光束进一步扩束,设计伽利略望远系统进行准直扩束。系统放大倍率为 $40\times$,波像差均方根小于 $\lambda/4$ 。

利用软件对高斯光束经非球面系统及 2 级扩束系统的物理光学传播过程进行了仿真,分别仿真了出口位置及距离 2 m 位置输出平顶光束光强相对分布图如图 8 所示。

3 实验及结果

根据设计结构,搭建了如图 9 所示的实验装置,工作波长为 $1.064\ \mu\text{m}$,在非球面镜组整形后端采用 CCD 相机直接采集光斑分布图,光斑分布图如图 10 所示。图中,整形后光斑均匀性为 92.8%。

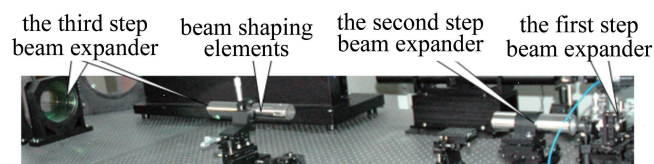


图 9 实验装置图

Fig. 9 Layout of experimental equipment

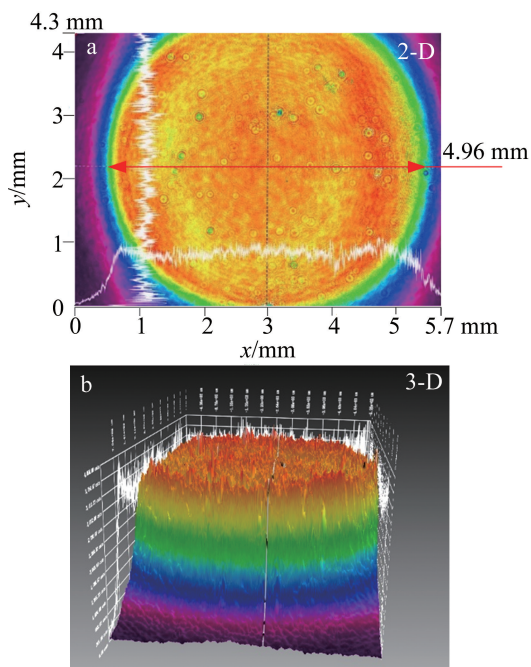


图 10 光斑分布图

Fig. 10 Intensity distribution of laser spot

以(8)式定义光斑均匀性,即:

$$J = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^m (I_j - \bar{I})^2 / m}}{\bar{I}} \quad (8)$$

式中, J 为光斑均匀性; m 为光斑采样点数; I_j 为光斑上第 j 点位置光强; \bar{I} 为采样光强平均值。采用2维扫描装置,用功率计对以20 mm×20 mm间距对输出光斑150 mm口径范围内进行了扫描测试,将功率计结果代入(8)式。计算可得,再经3级扩束后的光斑均匀性为94.2%。

4 结论

以大口径均匀光束输出为设计目的,基于非球面镜组的光束整形方案,在小口径非球面镜组光束整形技术的基础上,将非球面镜非球面度及光线光程差列入评价函数,完成综合优化整形,优化结果工作口径5 mm,波像差均方根为 0.05λ ,非球面度为16 μm ,光强均匀性对传输距离更不敏感,且非球面镜面形直接满足实际加工需求。设计40×高倍率扩束系统对匀化光束进行扩束,最终获得大口径匀化光束。加工完成后,对系统进行精密装调并实验验证了光束整形效果,实验结果表明:设计整形系统在2 m范围内保持高均匀性,150 mm口径内均匀性为94.2%。下一步将对系统进行工程化设计,以推广到激光探测系统的测量与标定。

参 考 文 献

- [1] YANG X J, ZHOU B, YING J J, *et al.* Test method of detection sensitivity of starring laser detecting systems[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(1): 132-134(in Chinese).
杨晓杰,周冰,应家驹,等.凝视激光探测系统的探测灵敏度测试方法[J].*激光技术*, 2010, 34(1): 132-134.
- [2] DONG M F, SONG X X, LI Sh. The designation and experiment of the DOE applied to shape the laser beam to square frame shape[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2): 169-171(in Chinese).
董梅峰,宋新祥,李慎.激光束整形为正方形光束的DOE的设计及实验[J].*激光技术*, 2005, 29(2): 169-171.
- [3] PANG H, YING Ch F, FAN Ch J, *et al.* Design diffractive optical elements for beam shaping with hybrid algorithm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(6): 977-980(in Chinese).
庞辉,应朝福,范长江,等.用于光束整形的衍射光学元件设计的混合算法[J].*光子学报*, 2010, 39(6): 977-980.
- [4] YU X Ch, HU J Sh, WANG L B. New methods for improving the quality of laser beam shaping[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0116001(in Chinese).
于晓晨,胡家升,王莲宝.提高光束整形质量的新方法[J].*中国激光*, 2012, 39(1): 0116001.
- [5] LOU Y Y, ZHENG X L, ZHANG Sh Ch, *et al.* Flat-top beams spatial shaping with digital micromirror device[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(6): 916-920(in Chinese).
娄艳阳,郑贤良,张世超,等.基于数字微镜阵列的平顶光束空间整形[J].*激光技术*, 2016, 40(6): 916-920.
- [6] DOU R Sh, LIN H, HU J Ch. Programmable lens and lenslet array by operating a liquid crystal device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(7): 1107-1111(in Chinese).
窦任生,林海,胡继承.控制液晶器件产生的程控透镜和微透镜阵列[J].*光学学报*, 2005, 25(7): 1107-1111.
- [7] YU X Ch, HU J Sh, WANG L B. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 35(5): 0514001(in Chinese).
于晓晨,胡家升,王莲宝.基于液晶空间光调制器的激光束整形[J].*光学学报*, 2012, 35(5): 0514001.
- [8] YAO X, WEN L Sh, SU J Q, *et al.* Design of long focal-depth optical element for plasma diagnostic system in ICF drivers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(8): 1292-1296(in Chinese).
姚欣,温林胜,栗敬钦,等.应用于ICF等离子体诊断系统的长焦深光学元件设计[J].*强激光与粒子束*, 2006, 18(8): 1292-1296.
- [9] YANG X T, FAN W. Spatial laser beam shaping using birefringent lenses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1668-1674(in Chinese).
杨向通,范薇.利用双折射透镜组实现激光束空间整形[J].*光学学报*, 2006, 26(11): 1668-1674.
- [10] HUANG Sh, DENG L M, YANG H, *et al.* Homogenization design of laser diode based on ZEMAX[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(4): 522-526(in Chinese).
黄珊,邓磊敏,杨焕,等.基于ZEMAX的半导体激光器匀光设计[J].*激光技术*, 2014, 38(4): 522-526.
- [11] LIU C, ZHANG S. Study of singular radius and surface boundary constrains in refractive beam shaper design[J]. *Optics Express*, 2008, 16(9): 6675-6682.
- [12] SHANG J L, ZHU X, CHEN P, *et al.* Refractive optical reshaper that converts a laser gaussian beam to a flat-top beam[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(10): 2543-2549(in Chinese).
尚建立,朱晓,陈鹏,等.一种折射式激光高斯光束平顶整形器[J].*中国激光*, 2010, 37(10): 2543-2549.
- [13] LI D J, LIANG S Y, CAO J J. Spatial laser beam shaping using aspheric Galilean beam expansion system[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(4): 427-429(in Chinese).
李殿军,梁思远,曹建建.非球面伽利略扩束系统实现激光束空间整形[J].*激光技术*, 2008, 32(4): 427-429.
- [14] FAN Z M, LI Zh, QIAN L X. Aspherical lens laser beam shaping system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 353-357(in Chinese).
范增明,李卓,钱丽勋.非球面透镜组激光光束整形系统[J].*红外与激光工程*, 2012, 41(2): 353-357.
- [15] FENG K, LI J S. Design of aspherics lenses shaping system on Gaussian beam[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(5): 127-132(in Chinese).
冯科,李劲松.高斯光束非球面镜整形系统的设计[J].*光电工程*, 2013, 40(5): 127-132.
- [16] CHEN K, CHEN M, LI G, *et al.* Numerical simulation and analysis of convex two-aspheric mirror system that converts a Gaussian to a flat-top beam[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1043-1047(in Chinese).
陈凯,陈檬,李港,等.高斯光束整形为平顶光束的双凸非球面镜的数值模拟与分析[J].*激光与红外*, 2010, 40(10): 1043-1047.