

基于球面-非球面柱透镜的圆光斑高斯光束整形

常颖¹, 王狮凌²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072

摘要 设计了一块球面-非球面柱透镜,用于将高斯圆斑整形为平顶线斑。通过编写 Zemax 编程语言批量添加操作数与设置默认优化函数优化结合的方法完成设计,并与性能参数相同的非球面透镜-柱透镜组进行比较,同时分析了球面-非球面柱透镜最后一面到像面距离的不同对线斑长宽比和平顶度的影响。与非球面透镜-柱透镜组相比,线斑尺寸相同但平顶度一般(边缘处约下降 10%),在一定范围内调整最后一面到像面的距离可使平顶度变好(可达到 90%),但会使长宽比变小(由 88.33 降至 20.38)。所得结果表明,若要获得能量均匀分布的线斑,在长宽比可调整的范围,球面-非球面柱透镜的设计可以简化光束整形系统结构,满足轻量化的要求,是一种可行的方法。

关键词 几何光学; 激光光束整形; 非球面透镜设计; 非成像光学系统

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.060801

Gaussian Beam Shaping of Round Spot Based on Spheric-Aspheric Cylindrical Lens

Chang Ying¹, Wang Shiling²

¹Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract To convert Gaussian spot into flat line spot, a spheric-aspheric cylindrical lens is designed. The design is accomplished by using Zemax programming language to set operands and default optimization function. The design is compared with the aspheric lens-cylindrical lens group with the same performance parameters. The influence of the distance from the last surface to the image surface of the spherical-aspherical cylindrical lens on the length-width ratio of the linear spot and the flatness of the line-focused is analyzed. Compared with the aspheric lens-cylindrical lens group, the line spot size is the same but the flatness is normal (about 10% decline at the edge). Adjusting the distance from the last surface to the image surface in a certain range can make the flatness better (can reach 90%), but the aspect ratio is reduced (from 88.33 to 20.38). The results show that, in order to obtain the line spot with uniform distribution of energy, in the adjustable range of length-width ratio, the design of spheric-aspheric cylindrical lens can simplify the structure of beam shaping system and meet the requirements of lightweight. It is a feasible method.

Key words geometric optics; laser beam shaping; nonspherical lens design; nonimaging optical systems

OCIS codes 080.3620; 140.3300; 080.4225; 080.4295

1 引言

目前,激光已广泛应用于焊接、加工、刻槽、光学信息处理、存储和记录、医疗等领域^[1-3],而这些领域,往往都对激光光束的能量均匀性和光斑形状有较高的要求。通常激光要经过整形才能被利用,这是由于激光能量具高斯分布的特点,这种能量分布

的不均匀性会导致在所照射面积内局部温度过高,材料性能被破坏,影响激光与物质间的相互作用并造成一定的能量损失,而且圆形光斑在很多情况下也不适用。

本研究的目的是通过设计整形透镜获得能量均匀分布的线型光斑,从而用于光学相干层析(OCT)系统,完成对样品的照明或扫描,基于这种情况,需

收稿日期: 2017-11-29; 收到修改稿日期: 2017-12-16

作者简介: 常颖(1992—),女,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: 1577972740@qq.com

要通过光束整形的方法将高斯圆斑整形成能量均匀分布的线型光斑以满足实际应用需求。近年来,有很多光束整形方法能有效地将能量呈高斯分布的光束转变为能量均匀分布的平顶光,如:非球面透镜组^[4-5]、微透镜阵列^[6]、液晶空间光调制器^[7]、衍射元件^[8]等方法。相比之下,非球面透镜组结构简单,只需两片透镜,光能损失少,方便加工,整形效果也较好,但是无法将高斯光束的形状改变。史光远等^[9]设计了一种非球面柱透镜组激光束整形系统,该系统采用一组正交放置的非球面柱透镜实现对高斯光束的整形,能够获得较大长宽比(约为 30)以及等光强分布的矩形光束输出。在优化高斯光斑形状和能量分布研究方面,史光远等的研究取得了一定成果,但长宽比有待提高,透镜组比较复杂。

本文提出一种基于一块非球面柱透镜的光束整形系统,用于将光强呈高斯分布的激光圆斑整形成光强均匀分布的线型光斑(长宽比约为 88.33),运用 Zemax 编程语言(ZPL)自动优化和默认优化函数优化结合的方式完成整个设计。

2 圆光斑高斯光束整形理论

所讨论的圆光斑高斯光束整形理论主要包括两部分,一部分是采用非球面透镜实现高斯光束变为平顶光束的整形理论,另一部分是采用柱透镜实现圆斑变为线斑的理论。

近几年,在 OCT 领域,实时高速成像成为国内外研究人员关注的一个方向,提高 OCT 系统的成像速度可以通过提高扫描机构的扫描速度来实现,但是扫描机构的引入势必会影响系统的精度和准确性,为此,金霞^[10]提出以线聚焦模式代替传统点聚焦模式以减少在样品上的一维扫描机构,从而提高了精度并简化了结构。由于所设计的正是用于 OCT 系统中的照明部分,因此也采用线聚焦模式。

对于线斑的获取,通常选用柱透镜来完成,这是由柱透镜的成像特点所决定的,当一束平行光自左向右入射平凸柱透镜时,弧矢面内的光线没有偏折,因为对于透镜而言,这个方向的截面相当于薄平行平板截面,且光线垂直截面入射,因此不发生偏折,而在子午面内,半径为一定值,相当于普通球面透镜,在这个平面内,光线会聚在焦点处,因此,平行于光轴方向的截面为圆形的入射光束经过平凸柱透镜后将会聚为一条长度与光束截面直径相同、平行于柱透镜母线的线斑。

对于平顶光的获取,采用一块非球面透镜来完

成,整形原理为

$$\int_0^r 2\pi I_{\text{in}}(r_1/\omega_0)r_1 dr_1 = \int_0^R 2\pi I_{\text{out}}(r_2/R_0)r_2 dr_2, \quad (1)$$

式中 I_{in} 为入射光光强, I_{out} 为出射光光强, r_1 为入射面上任意光线的坐标值, r_2 为与之对应的光线在出射平面上的坐标值, ω_0 为高斯光束束腰, R_0 为平顶光半径, r 为入射光束半高宽, R 为对应出射光束半高宽。由能量守恒定律可知,入射面的总能量与出射面的总能量应该相同[(1)式]。

利用基模高斯光束的表达式作为入射光光强分布的表达式,即:

$$I_{\text{in}}(r_1/\omega_0) = \frac{2}{\pi\omega_0^2} \exp\left[-2\left(\frac{r_1}{\omega_0}\right)^2\right], \quad (2)$$

出射光的表达式选择平顶洛伦兹函数,为

$$I_{\text{out}}(r_2/R_0) = \frac{1}{\pi R_0^2} \frac{1}{[1 + (r_2/R_0)^q]^{1+2/q}}, \quad (3)$$

式中 q 为阶数($q=1, 2, 3, \dots$), q 值越大,平顶程度越高。该表达式简单,可表示出具体解。将(2)、(3)式分别代入(1)式左右两边,可得入射光与出射光对应坐标关系为

$$r_2 = \pm \frac{R_0 \sqrt{1 - \exp[-2(r_1/\omega_0)^2]}}{\sqrt[q]{1 - \{1 - \exp[-2(r_1/\omega_0)^2]\}^{q/2}}}, \quad (4)$$

当 $q \rightarrow \infty$ 时,有

$$r_2 = R_0 \sqrt{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r_1}{\omega_0}\right)^2\right]}. \quad (5)$$

结合以上两部分理论,采用一块球面-非球面柱透镜,一面为球面,一面含有非球面系数,运用 ZPL 在 Zemax 中批量添加操作数 REAY 以得到能量均匀化的光斑,再通过自动优化调整球面半径得到线斑,最后通过手动调整球面-非球面柱透镜最后一面到像面的距离来控制线斑的长宽比和平顶度。

3 球面-非球面柱透镜设计过程及结果

在编写 ZPL 时,设置好出射光束半径及光束束腰半径,取样数为 800,第一步实现高斯分布变为平顶能量分布,用 ZPL 宏语言批量添加操作数 REAY,其中 REAY 取值的高度由编写特定公式[(5)式]给出,权重批量设置为 1,取所设计透镜的第二面(设置为 Toroidal)的 conic 系数及二阶、四阶非球面系数和半径为变量,写入 OPTIMIZE 来实现对以上变量的自动优化,优化后查看系统像面相对照度图,此时 X、Y 应有一个方向实现平顶能量分布,另一个方向基本呈高斯分布,如果两个方向都没

有较好地实现能量均匀分布,可增添非球面六阶及更高阶系数重新完成此步优化;第二步实现圆斑向线斑的转化,对刚设置过的变量保留设置,增添该透镜第一面球面半径为变量,选择 Merit function 中默认均方根(RMS)优化函数,在批量添加的操作数 REAY 基础上增添默认操作数,再进行优化,结果表明透镜第二面的相关系数较第一次优化仅有微量变化。经过上述两步可得到能量接近均匀分布的线斑,若要对线斑的长宽比及平顶度进行微小调整(以期获得良好的平顶度及长宽比略小的线型光斑),可

通过适当调整像面到透镜第二面的距离来实现。优化流程如图 1 所示,依据 OCT 系统的具体要求设置波长范围,由于 OCT 系统应用在生物医学领域,考虑到生物体对水等吸收特性,在近红外窗口中选择了中心波长为 1310 nm 的光源,即可调谐激光光源(TSL-510 型,Santec 公司,日本),该光源可以在宽带光源范围内快速调节产生窄带光,在 OCT 系统中用单一光电探测器即可探测到不同波长光的干涉信号,而后可实现光谱分析。所设计的整形透镜的具体参数指标如表 1 所示。

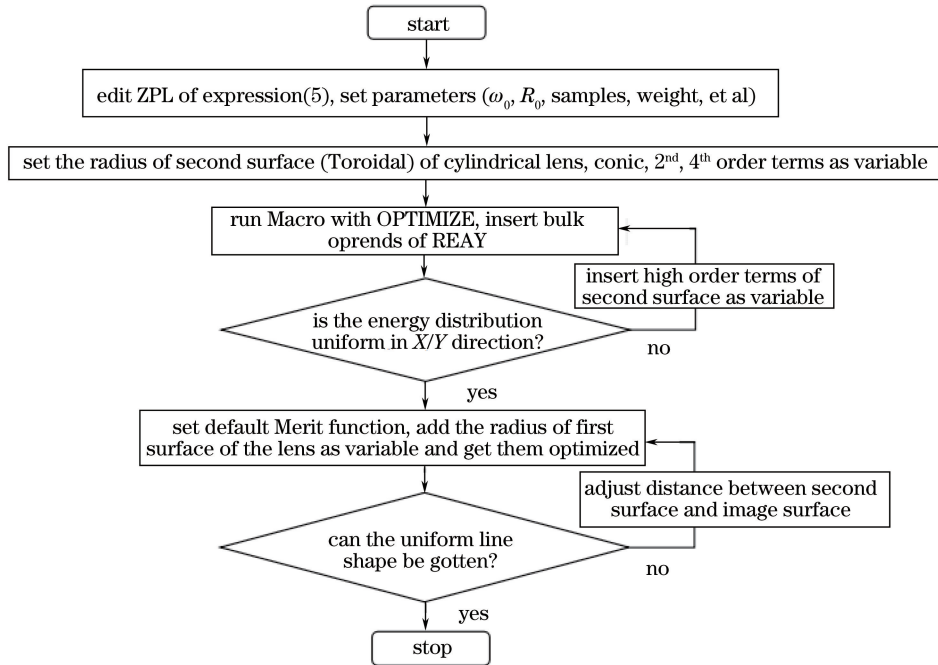


图 1 设计流程图

Fig. 1 Flow chart of the design

表 1 柱透镜设计指标

Table 1 Parameters of cylindrical lens design

Parameter	Value
Wavelength range	1.26-1.36 μm
Entrance pupil diameter D	8.6 mm
R_0	5.3 mm
ω_0	3.9 mm
Line width	$\leq 200 \mu\text{m}$
Distance between last surface and image surface	$\leq 60 \text{ mm}$

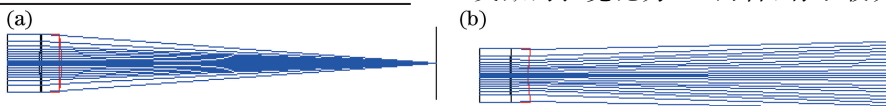


图 2 球面-非球面柱透镜 3D 设计结果图。(a)弧矢面系统结构;(b)子午面系统结构

Fig. 2 3D layout of spheric-aspheric cylindrical lens design. (a) System structure in sagittal plane;

(b) system structure in tangential plane

得到的设计结果见图 2,所得到的线长约为 10.6 mm,线宽 120 μm ,最后一面到像面的距离为 58.5 mm,均符合设计要求。在图 2 中,给出了非球面柱透镜子午面与弧矢面的系统图,可以看到,在子午面上的光线相当于经过了负透镜,得到的光线是发散的,在弧矢面上的光线相当于经过了正透镜,得到的光线是会聚的,此时才能获得线光斑,线光斑长度由 ZPL 控制,宽度依据柱透镜面型变化。较之前文献的长宽比为 30 而言,有了较大提高,在图 3 中

可以看出线斑的长宽比($10.6/0.12=88.33$)较好,但平顶度不够好(边缘处平顶度约为80%),不过较高斯分布而言已有了很大改善,下面将分析影响平顶

度和线光斑长宽比的因素。透镜材料为Lak28,最终使用了二阶(-0.042)和四阶非球面系数(1.29×10^{-14}),二次曲面系数为 -3.045 。

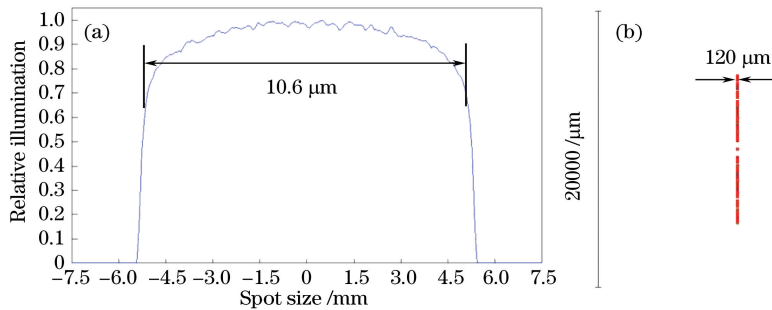


图3 Y方向相对照度及点列图。(a) Y方向相对照度图;(b)系统点列图

Fig. 3 Relative illumination in Y-scan and spot diam. (a) Diagram of relative illumination in Y-scan; (b) spot diagram of the system

4 球面-非球面柱透镜设计结果分析

4.1 非球面透镜-柱透镜组与球面-非球面柱透镜的设计结果比较

对于上述设计,除了用一块非球面柱透镜可以实现外,还尝试用4块透镜来完成,具体原理图见图4,图中给出了系统在X方向和Y方向上的系统图,前两块透镜为一块平凹非球面透镜和一块平凸非球面透镜,后两块透镜为平凸柱透镜,透镜材料均为Lak28,光源为 $1.26 \sim 1.36 \mu\text{m}$ 的激光,由于具备高斯分布的特点,光束经过两块非球面透镜变为能量呈凹陷型分布的光束,再经过两块平凸柱透镜可变为平顶光,柱透镜为普通柱透镜,不添加非球面系数作为变量,所有技术指标要求同表1,为使通过非球面透镜的光束能量呈凹陷分布,先对两块非球面透镜运行ZPL批量添加操作数REAY,语言编辑同上,运行后得到平顶光,通过适当改变两块非球面镜

之间距离,变成凹陷分布的光束,再添加柱透镜设置默认优化函数即可得到平顶光。系统设计结果见图5,分别为X和Y两个方向的结构光路图,线斑方向由柱透镜结构决定。图6对比了非球面透镜-柱透镜组及球面-非球面柱透镜设计结果,图中1、2、3、4分别代表球面-非球面柱透镜最后一面到像面距离为:58.5,60.0,61.5,63.0 mm时所得的线斑。二者所得到的线斑在长度和宽度方面都基本相等,但对于能量分布而言,如图7所示,采用4块透镜即非球面透镜-柱透镜组所得到的平顶度更好,图中设置样本均为 256×256 ,光线数设置为100万,可得以下结论:利用一块球面-非球面柱透镜可以基本达到非球面透镜-柱透镜组4块透镜的整形结果(线斑长度相同,平顶度边缘下降约10%),一块透镜既节省了空间也减小了重量,同时达到了线光斑和能量均匀分布的两个要求,且透镜形状、厚度都较为合理,具有一定实际意义。

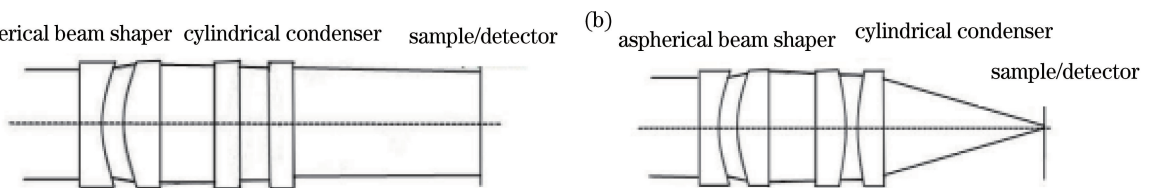


图4 系统原理图。(a) X方向;(b) Y方向

Fig. 4 Schematic diagram of system. (a) X direction; (b) Y direction

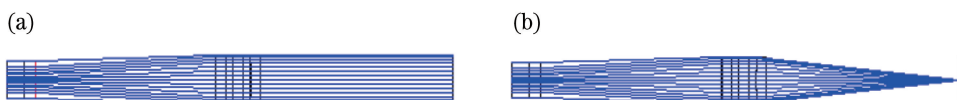


图5 非球面透镜-柱透镜组3D设计结果图。(a) X方向;(b) Y方向

Fig. 5 3D layout of aspheric lens-cylindrical lens system. (a) X direction; (b) Y direction

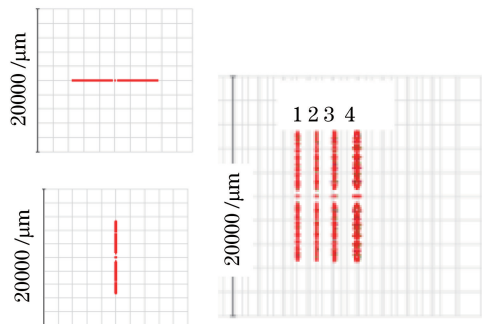


图6 两系统点列图。(a)非球面透镜-柱透镜组点列图；
(b)球面-非球面柱透镜点列图；
(c)像面处于不同距离时所获得的线斑

Fig. 6 Spot diagram of two systems. (a) Spot diagram of aspheric lens-cylindrical lens system; (b) spot diagram of spheric-aspheric cylindrical lens system; (c) line spot with different distances between image surface and last surface of cylindrical lens

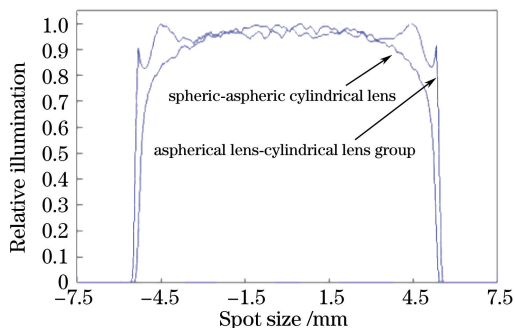


图7 两系统相对照度图

Fig. 7 Relative illumination diagram of two systems

4.2 对球面-非球面柱透镜所得线光斑长宽比以及平顶度特性的讨论

在对非球面柱透镜设计的过程中发现,在线斑长度不变的情况下,改变球面-非球面柱透镜最后一面到像面的距离可以改变线斑的宽度,进而改变长宽比,图6及图8给出了距离不同(分别为58.5 mm, 60.0 mm, 61.5 mm, 63.0 mm)时所得的能量分布和线宽的比较结果,当距离越大时,平顶效果越好,但长宽比会减小,如图6中点列图所示,1, 2, 3, 4的长宽比分别为88.33, 85.00, 33.12, 20.38。这说明用该方法实现高斯能量分布变为均匀能量分布只针对像面在某一位置时效果最好,其他位置的效果会差一些,所以,当对线斑长宽比要求不是很严格时,可适当改变球面-非球面柱透镜最后一面到像面的距离使平顶效果达到更好,同时减少能量损失,但是,若长宽比很小,则为矩形光斑而不是线斑。因此要依据系统技术指标要求,视情况而定。

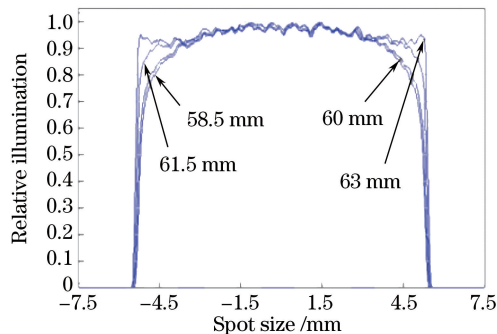


图8 非球面柱透镜的相对照度

Fig. 8 Relative illumination of aspheric cylindrical lens

5 结 论

采用一块球面-非球面柱透镜完成了高斯圆斑向平顶线斑的转化,通过编辑和运行ZPL控制非球面系数及半径等参数使光斑能量在一个方向上达到均匀化,同时利用柱透镜在子午面和弧矢面上成像性质不同的特点,设置默认优化函数,优化第一面球面半径,最终得到了能量分布较均匀的线斑,并与性能参数基本相同的非球面透镜-柱透镜组进行比较,线斑长度及长宽比基本相同,4块透镜平顶效果更好,但采用非球面柱透镜时重量更减轻、系统更简单,同时,比较了球面-非球面柱透镜最后一面到像面距离不同对线斑平顶度及长宽比的影响,在一定范围内调整距离可以使平顶度变好,但线斑长宽比会变小,即线斑变宽。综上所述,若要获得能量均匀分布(平顶)的线斑,设计一块非球面柱透镜是有效且可行的解决方案,在长宽比要求可调整的情况下,整形效果更佳。

参 考 文 献

- [1] Zhang X P, Peng Y, Zhu Y M. Terahertz radiation mechanism from filament induced by monochromatic ultrafast laser pulses[J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(5): 28-34.
张秀平, 彭滢, 朱亦鸣. 单色超快激光成丝产生太赫兹辐射机理[J]. *光学仪器*, 2017, 39(5): 28-34.
- [2] Zhou X K, Mi G Y, Liu S, *et al.* Laser lap welding of 304 stainless steel/T2 red copper ultra-thin sheets [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0802006.
周学凯, 米高阳, 刘森, 等. 304 不锈钢/T2 紫铜超薄板激光搭接焊[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0802006.
- [3] Wang Y P, Hu Y H, Lei W H, *et al.* Aircraft target classification method based on texture feature of laser

- echo time-frequency image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1128004.
- 王云鹏, 胡以华, 雷武虎, 等. 基于激光回波时频图纹理特征的飞机目标分类方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1128004.
- [4] Ma H T, Liu Z J, Jiang P Z. Improvement of Galilean refractive beam shaping system for accurately generating near-diffraction-limited flattop beam with arbitrary beam size [J]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13105-13117.
- [5] 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.
- 尚健力, 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.
- [6] Gao H F, Liu Q X, Liu P, *et al.* Illuminating system for single color filter LCoS panel micro-projector [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(3): 100-104.
- 高慧芳, 刘钦晓, 刘鹏, 等. 单片式微型滤色膜 LCoS 的照明系统设计 [J]. *光电工程*, 2011, 38(3): 100-104.
- [7] Yu X C, Hu J S, Wang L B. Laser beam shaping based on liquid-crystal spatial light modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0514001.
- 于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形 [J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0514001.
- [8] Pang H, Ying C F, Fan C J, *et al.* Design diffractive optical elements for beam shaping with hybrid algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(6): 977-981.
- 庞辉, 应朝福, 范长江, 等. 用于光束整形的衍射光学元件的混合算法 [J]. *光子学报*, 2010, 39(6): 977-981.
- [9] Shi G Y, Yang X P, Liang Y M. Gaussian beam shaping based on aspheric cylindrical lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(S1): 0122001.
- 史光远, 杨晓苹, 梁艳梅. 基于非球面柱透镜的激光束整形 [J]. *光子学报*, 2014, 43(S1): 0122001.
- [10] Jin X. Research of line-focus optical coherence tomography [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004: 37-46.
- 金霞. 线聚焦光学相干层析术的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004: 37-46.