

文章编号 1004-924X(2011)07-1464-08

高斯光束整形系统的光学设计

高琇含^{1*}, 安志勇¹, 李娜娜^{1,2}, 赵伟星³, 王劲松¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院 光电研究院 北京 100080;
3. 南京光科信息技术有限公司, 江苏 南京 210001)

摘要:研究了真实光线追迹优化光学系统的方法以简化高斯光束整形系统的光学设计。理论分析了高斯光束整形原理, 并选择超洛伦兹函数作为平顶光分布函数; 根据能量守恒原理, 推导了高斯光束整形系统中任意光线在入射面与出射面的坐标变换关系。针对该系统的特点, 使用 Zemax 编程语言 (ZPL) 编写计算坐标变换的 ZPL 宏指令, 并优化设计了高斯光束整形系统。最后, 利用金刚石单点车削法加工该非球面光学系统, 并利用光束分析软件对系统的整形效果进行了测试。测试结果表明, 利用该方法设计的非球面透镜实现了高斯光束的整形变换, 平顶光的均匀度为 87.1%。该方法简单实用, 计算量小, 可应用于实际工程设计。

关键词: 光学设计; 非球面透镜; 光束整形; 高斯光束; 平顶光束; 超洛伦兹函数

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111907.1464

Optical design of Gaussian beam shaping

GAO Yu-han^{1*}, AN Zhi-yong¹, LI Na-na^{1,2}, ZHAO Wei-xing³, WANG Jin-song¹

(1. *School of Optics and Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;*

2. *Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;*

3. *Nanjing Optotek Corporation, Nanjing 210001, China)*

* *Corresponding author, E-mail: gaoyuhan@126.com*

Abstract: A real ray tracing method was used to simplify the optical design of a Gaussian beam shaping system. The principle of shaping Gaussian beam was studied theoretically and the Flattened Lorentzian (FL) function was chosen as the distribution expression of the flattened beam. The relationship of coordinate transformation of arbitrary rays in an incident plane and an image plane was deduced based on the law of energy conservation. Then, according to the characteristics of this system, Zemax Programming Language (ZPL) was used to compile ZPL macro orders to calculate the coordinate transformation, and the real ray tracing method was adopted to design the optical Gaussian beam shaping system. Finally, the aspheric lens system was processed by single point diamond turning techniques and its shaping ability was tested by the optical analyzing software. Testing results indicate that the system can achieve the conversion from the Gaussian beam to the flattened beam, and the uniformity

收稿日期: 2010-07-06; 修订日期: 2010-11-16.

基金项目: 高功率半导体激光国家重点实验室自然科学基金资助项目 (No. 9140C310405); 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20080331, 20090555)

of flattened beam is 87.1%. The method is not only simple but also practical and has a significant engineering application value.

Key words: optical design; aspheric lens; beam shaping; Gaussian beam; flattened beam; flattened Lorentzian function

1 引言

在激光焊接、激光加工及医学等技术领域,激光能量分布不均匀会导致局部温度过高而破坏材料性能,影响激光与物质相互作用的效果。由于激光光束具有高斯型能量分布特征,因此,需要通过光束整形将高斯光束转换为能量均匀分布的平顶光束以消除温度不均匀引起的不良效果^[1]。所谓光束整形是将输入平面上光束的复振幅分布经光学系统调制后,变换为输出平面上符合要求的光束复振幅分布的过程^[2]。光束整形技术有孔径光阑整形、衍射光学元件(全息元件)整形、非球面透镜整形及微透镜阵列整形等^[4-7]。采用非球面透镜系统是实现高斯光束整形的有效方法,同其它整形技术相比,非球面透镜具有光能利用率高、耐高温、光束易于控制等优点,特别适合于高功率激光束的整形,具有广泛的工程应用前景。

1965年,M. F. Frieden首次提出利用非球面透镜将高斯光束转化为平顶光束的方法^[1]。以后,F. M. Dickey等人对透镜整形原理做了详细研究^[3]。随着研究的深入,非球面透镜整形在理论上已趋于完善,不过受当时计算机技术和非球面加工技术的限制,80年代以前,非球面透镜整形并未得到广泛应用。近年来,非球面加工工艺的进步为非球面整形技术带来了崭新的活力。目前,非球面整形系统已应用于激光加工和激光焊接领域。为进一步简化高斯光束整形系统的光学设计,本文研究了利用Zemax软件设计高斯光束整形系统的方法,并借助Zemax软件的宏语言(ZPL)功能实现了系统的自动优化。该方法简单,计算量小,具有实用价值。

2 光束整形原理

M. F. Frieden最早研究了利用非球面透镜组进行光束整形的理论,整形原理如图1所示。

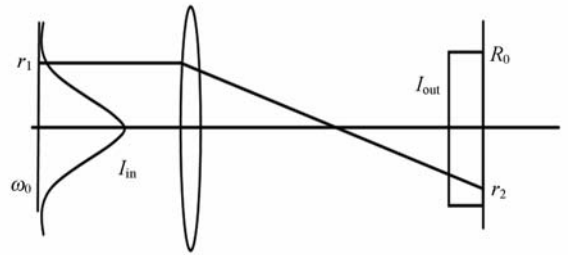


图1 光束整形原理示意图

Fig. 1 Scheme of beam shaping

其中 I_{in} 为入射光光强, I_{out} 为出射光光强, r_1 为入射面上任意一光线的坐标值, r_2 为与之对应的出射平面的坐标值, ω_0 为高斯光束的束腰, R_0 为平顶光半径。由能量守恒定律可知,包含在 r_1 范围内的能量与 r_2 范围内的能量相等,为分析方便,将入射光与出射光的能量做归一化处理,即:

$$\int_0^{\infty} 2\pi I_{in}(r_1/\omega_0)r_1 dr_1 = \int_0^{\infty} 2\pi I_{out}(r_2/R_0)r_2 dr_2 = 1. \quad (1)$$

设入射光的光强分布表达式为:

$$I_{in}(r_1/\omega_0) = \frac{2}{\pi_0^2} \exp\left[-2\left(\frac{r_1}{\omega_0}\right)^2\right]$$

出射光光强分布的选择对于高斯光束整形十分必要。可作为平顶光束能量分布的函数有:超高斯函数(Super-Gaussian, SG)、匀化高斯函数(Flattened Gaussian, FG)、超洛伦兹函数(Super Lorentzian, SL)及匀化洛伦兹函数(Flattened Lorentzian, FL)等^[7-10],其函数表达式如表1所示:

表 1 超高斯函数、匀化高斯函数、超洛伦兹函数及匀化洛伦兹函数的分布表达式

Tab. 1 Distribution expressions of SG, FG, SL, FL functions

Functions	Distribution expressions
SG	$\frac{4^{1/p}}{2\pi\omega^2\Gamma(\frac{2}{p})}\exp\left[-2\left(\frac{R}{\omega}\right)^p\right]$
FG	$\frac{2(N+1)}{\pi R_{FG}^2} \sum_{m,n=0}^N \left[\frac{m!n!2^{(m+n)}}{(m+n)!} \right] \exp\left[-2(N+1)\left(\frac{R}{R_{FG}}\right)^2\right] \times$ $\sum_{m,n=0}^1 \frac{1}{n!m!} \left[(N+1)\left(\frac{R}{R_{FG}}\right)^2 \right]^{m+n}$
SL	$\frac{q\sin(2\pi/q)}{(2\pi^2 R_{SL}^2)} \frac{1}{1+(R/R_{SL})^q}$
FL	$\frac{1}{\pi R_{FL}^2} \frac{1}{\left[1+\left(\frac{R}{R_{FL}}\right)^q\right]^{1+\frac{2}{q}}}$

通过对比可知,匀化洛伦兹函数不仅形式简单,且对其积分可以写成解析表达式形式,故本文采用匀化洛伦兹函数作为出射光的光强分布函数。

将入射光及出射光的表达式分别代入式(1),得:

$$\int_0^{r_2} 2\pi \frac{2}{\pi\omega_0^2} \exp\left[-2\left(\frac{r_1'}{\omega_0}\right)^2\right] r_1' dr_1' =$$

$$\int_0^{r_2} 2\pi \frac{1}{\pi R_{FL}^2} \frac{1}{\left[1+\left(\frac{r_2'}{R_{FL}}\right)^q\right]^{1+\frac{2}{q}}} r_2' dr_2', \quad (2)$$

积分得:

$$1 - \exp\left[-2\left(\frac{r_1^2}{\omega_0^2}\right)\right] = \left[1 + \left(\frac{R_{FL}}{r_2}\right)^q\right]^{-\frac{2}{q}}, \quad (3)$$

即入射光与出射光的映射关系为:

$$r_2 = \pm \frac{R_{FL} \sqrt{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r_1}{\omega_0}\right)^2\right]}}{q \sqrt{1 - \left\{1 - \exp\left[-2\left(\frac{r_1}{\omega_0}\right)^2\right]\right\}^{q/2}}}$$

在设计实际光学系统时,应考虑到由于透镜材料表面反射及吸收等因素引起的能量损失,(3)式需做如下修正:

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

其中 τ 为光能透过率。

3 非球面面型参数的求解

Kreuzer 在 1969 提出一种通用的非球面面型参数的解法^[11],其原理图(2)如图所示。设第一面和第四面为平面,第二面和第三面为非球面,图中 $z(r_1)$ 和 $z(r_2)$ 分别为非球面的面型参数函数, d 为两个非球面的间距, n 为材料的折射率。

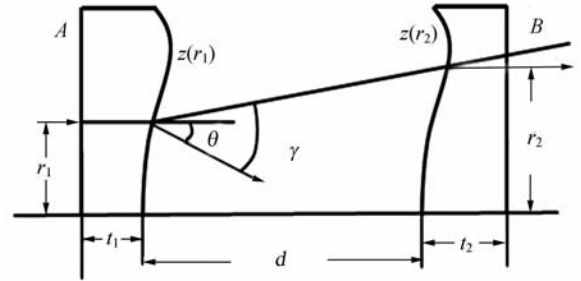


图 2 非球面形状计算原理图

Fig. 2 Principle of calculating aspherical planes

根据 Snell's 定律及能量守恒定律,可推导非球面的面型系数方程为:

$$\begin{cases} z_1(r) = \int_0^r \left\{ (n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{r_2 - r_1} \right] \right\}^{-1/2} dr_1 \\ z_2(r) = \int_0^r \left\{ (n^2 - 1) + \left[\frac{(n-1)d}{r_2 - r_1} \right] \right\}^{-1/2} dr_2 \end{cases} \quad (5)$$

将 r_1 与 r_2 的映射关系代入式(5),并对其求数值积分,即可求得非球面的面型系数。该方法计算量较大,设计结果需要反复校正,不利于采用光学软件进行自动优化设计。

4 整形系统自动优化设计

利用光学设计软件 Zemax 对整形系统进行自动优化设计。系统的工作波长为 532 nm,高斯光束束腰 ω_0 为 6 mm,平顶光束半径 R' 为 6 mm,透过率为 90%,介质材料选用硅玻璃,采用双透镜系统进行整形,第二片透镜起到二次整形兼准直的作用,使得出射光近似为平行光。

在入射平面上采样 200 条光线,根据式(4)算出每条光线在出射面投射高度,利用 Zemax 软件中的“REAY”操作数(控制出射光线的投射高度)

控制每条出射光的坐标值, 并对系统进行优化。由于逐一添加操作数会使操作非常繁琐。本文针对系统特点, 编写了 Zemax 软件宏语言程序, 自动计算每一条出射光线的投影坐标, 同时可以批量添加操作数, 宏语言程序框图如图 3 所示:

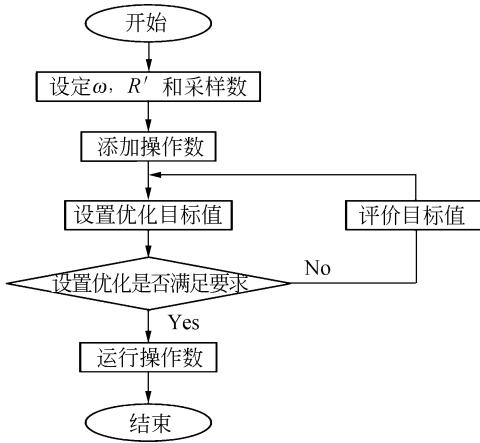


图 3 宏语言程序框图

Fig. 3 Flow chart of ZPL

ZPL 源代码如下:

```

W = 6
RL = 6
sample = 200
t=0.9
FOR I, 1, sample+1, 1
INSERTMFO I
# insert operand
SETOPERAND I, 11, "REAY"
# set operand type to REAY
SETOPERAND I, 9, 1
pupil_coord = I/sample
S=t * (1-EXPE(-2 * POWR(X,2)/POWR(W,2)))
T=1-POWR(S,50)
P=POWR(T,0.01)
R=RL * SQRT(S)/P
# same as the final equation
SETOPERAND I, 8, R
SETOPERAND I, 7, norm_pupil_coord
# Set Py column of the operand
SETOPERAND I, 2, NSUR()
# specify the image surface for the REAY value Calcula-
tion
    
```

借助 ZPL 语言优化的结果如表 2 所示:

表 2 系统的结构参数

Tab. 2 Parameters of shaping system

Surface type	Radius/	Thickness/	Glass
sto standard	Infinty	5	Silica
2 Even asphere	-22.306 9	138	
3 Even asphere	45.170 11	5	Silica
4 standard	Infinty		

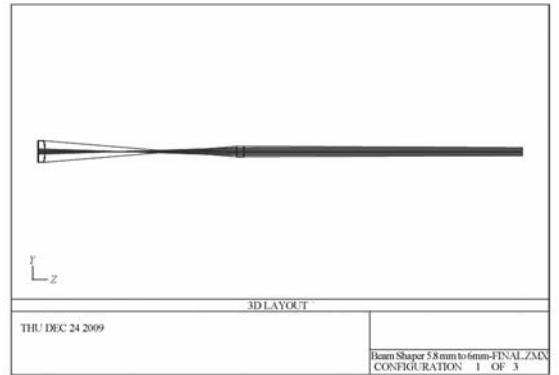
第二面和第三面的非球面系数如表 3 所示:

表 3 系统的非球面系数

Tab. 3 Aspheric coefficients of shaping system

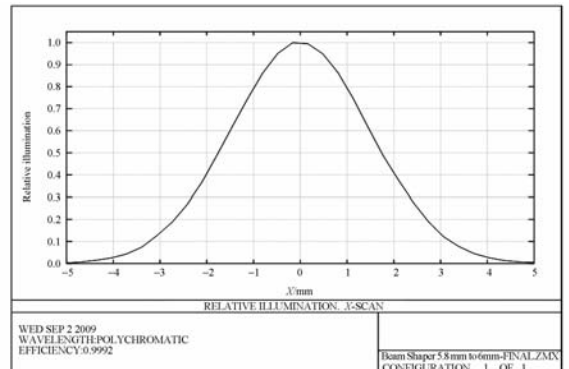
Conic	Orden term			
	4th/10 ⁻⁵	6th/10 ⁻⁷	8th/10 ⁻⁹	10th/10 ⁻¹¹
-57.6	-5.896 5	5.259 8	-3.033 24	7.895 1
103.1	-5.470 7	-106.38	1 143.9	-4 891.9

系统的设计结果如图 4 所示: 其中图 4(a) 为光学系统结构图, 图 4(b) 和 4(c) 分别为入射光



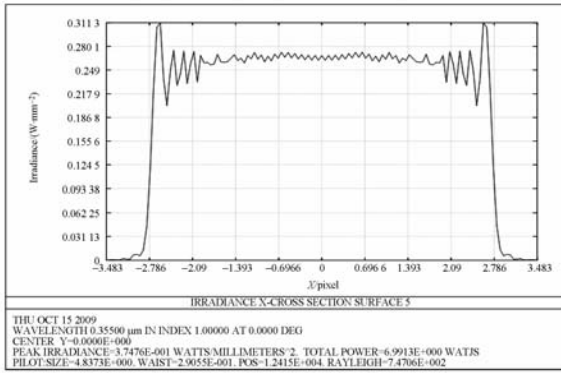
(a) 整形系统结构图

(a) Layout of shaper



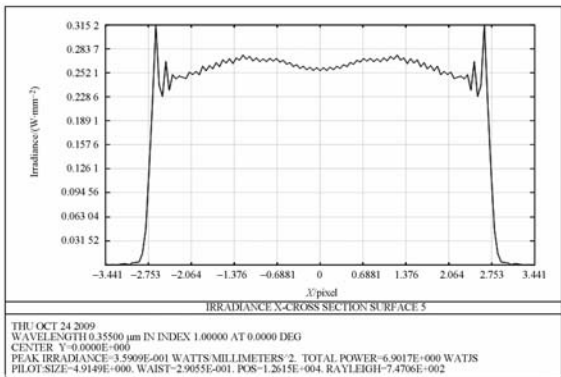
(b) 输入光能量分布图

(b) Energy distribution of input beam



(c) 输出光能量分布图

(c) Energy distribution of output beam



(d) 经公差分析后光能分布图

(d) Energy distribution of output beam after tolerance analysis

图 4 整形系统设计结果

Fig. 4 Design of shaping system

和出射光的能量分布图,图 4(d)为经公差分析后的出射光能量分布图,图中横坐标代表光斑坐标值,纵坐标代表归一化的能量密度。

由设计结果可知,经过整形系统变换后,高斯光束转变为平顶光束。这里引入能量均匀度来评价整形效果,能量均匀度定义为: $\gamma = 1 - \frac{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 / N}}{\bar{E}}$, 其中, E_i 表示各采样点处的能量值, \bar{E} 表示各采样点的平均值, N 为采样点的个数。通过编写 ZPL 语言计算图 4(c)和 4(d)的均匀度,计算结果分别为 96.4%和 90.1%。

5 通光孔径的选择

通光孔径的大小对高斯光束的传输具有重要

影响,高斯光束经过整形系统时,通光孔径的衍射效应导致平顶光的边缘出现较大能量波动。

高斯光束在圆形光阑中发生衍射时,光通量分布表达式为^[12]:

$$\frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{4a^2/\omega^2}{1 - \exp[-2(a^2/\omega^2)]} \cdot \int_0^{a_0} \left[\int_0^1 \frac{\exp(-a^2 r^2)}{\omega^2} J_0(ru) r dr \right]^2 u du$$

其中, Φ 为通过孔径的光通量; Φ_0 为总光通量; a 为光阑的半孔径, ω 为高斯光束的束腰, $J_0(x)$ 为 0 阶贝塞尔函数。 Φ/Φ_0 随 a/ω_0 的变化关系如表 4 所示:

表 4 Φ/Φ_0 随 a/ω_0 的变化关系Tab. 4 Relationship between Φ/Φ_0 and a/ω_0

a/ω_0	Φ/Φ_0
1.0	92.1
1.2	96.4
1.4	99.0
1.8	99.8
2.2	100

由表 4 可知,当 $a/\omega_0 > 1.5$ 时,光能通过率高达 99%,此时可以忽略衍射效应。

吕百达等人研究超高斯光束通过硬边光阑系统的传输特性时指出:当光阑孔径 D_0 及超高斯光束的束腰 ω 满足 $\frac{D_0}{2\omega} > 2$ 时,衍射效应可以忽略^[13]。

综上,在进行实际光学系统设计时,应保证 $D_0 > 2\omega_0$,以消除衍射效应引起的不利影响。

6 实验结果

目前,用于非球面加工技术主要有计算机控制表面成形(CCOS)、流体辅助光学加工(FAM)、超声波辅助抛光(UAP)、单点金刚石车削(SP-DT)等,其中单点金刚石车削技术具有效率高、精度高、成本相对较低等优点。本文采用单点金刚石车削来加工本系统,并用 ZYGO 干涉仪对元件进行面型检测,检测结果如图 5 所示:

由检测结果可知,光学元件的面型精度高于

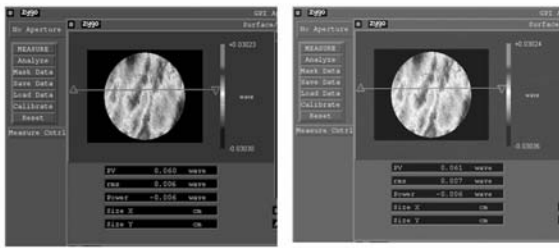


图 5 面型检测结果

Fig. 5 Results of surface topographic measurement

$\lambda/16$ 。面型精度对光学系统整形效果的影响可忽略。

对光学系统整形效果进行测试, 测试光路如图 6 所示。

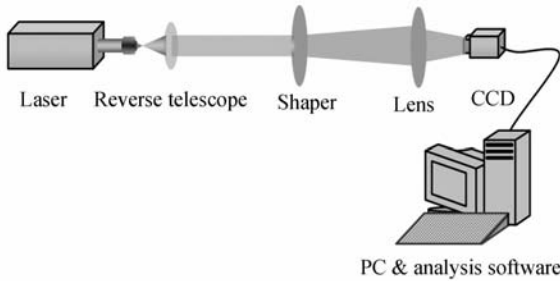
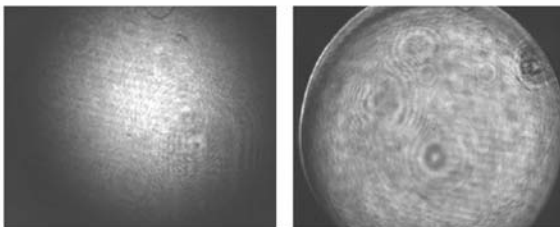


图 6 测试系统示意图

Fig. 6 Scheme of testing system

先将输入光经倒置望远系统按一定比例扩束准直。高斯光束经整形变换后, 成像于 CCD 像平面上, 分析软件可以对光束的光强分布进行测量。同时, 分析软件预留数据开发包, 可以通过二次编程对测量结果进行计算分析。



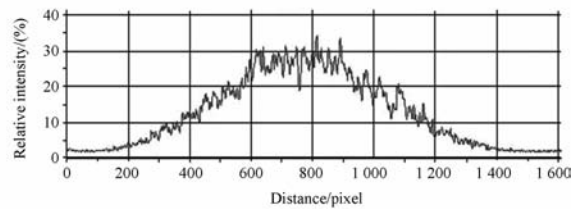
(a) 入射光束 (a) Input beam (b) 出射光束 (b) Output beam

图 7 入射光束与出射光束的对比结果 Fig. 7 Contrast of input beam and output beam

图 7(a)和 7(b)为 CCD 拍摄的入射光与出射光的光斑对比图, 图 8(a)和 8(b)为分析软件对

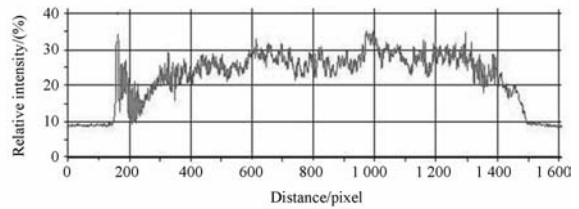
入射光与出射光能量分布的测量结果, 图中横坐标代表光斑所占 CCD 的像元尺寸, 纵坐标代表分析软件所测得的相对光强分布。通过输入光与输出光的对比可知, 高斯光束经整形系统变换后, 转变为平顶光束, 由于本系统增大透镜的通光孔径, 衍射效应并不明显, 同理论设计结果相比, 平顶光边缘部分能量波动较为平缓。

经分析软件计算, 平顶光束的能量均匀度为 87.1%, 入射光并非理想高斯光束, 导致出射光束的均匀度有所下降, 但该系统仍然满足普通光学加工的要求。



(a) 入射光束能量分布

(a) Energy distribution of input beam



(b) 出射光束能量分布

(b) Energy distribution of output beam

图 8 入射光束与出射光束的能量分布

Fig. 8 Energy distribution of input & output beams

7 结 论

本文利用 Zemax 软件设计了高斯光束整形系统。通过选择合适的平顶光能量分布函数, 推导出入射光束与出射光束的映射函数关系, 并通过编写 Zemax 软件宏语言程序自动优化设计结果, 使设计过程大为简化。测试结果表明: 利用该方法设计的整形系统, 平顶光束的能量均匀度为 87.1%, 满足普通光学加工的要求。

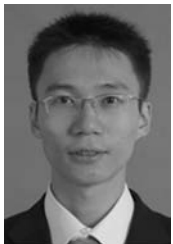
采用非球面光学系统可以有效地实现对高斯光束的整形,其途径简单实用,具有重要的工程应用价值。本文研究基模光束的整形变换,实际上

可以将高斯光束整形公式进行扩展,通过改变输入光波的参数并控制其在出射面上的位置坐标实现高阶模高斯光束整形变换。

参考文献:

- [1] DICKEY F M, HOLSWADE S C, *et al.*. Laser beam shaping[J]. *SPIE*, 2000,4095:1-216.
- [2] FRIEDEN R B. Lossless conversion of a plane laser wave to a planewave of uniform irradiance[J]. *Appl. Opt.*, 1965,4(11):1400-1403.
- [3] 李凤友,李红军,卢振武,等.激光直写系统焦斑整形的研究[J].*光学精密工程*,2001,9(1):14-18.
LI F Y, LI H J, LU ZH W, *et al.*. Focused spot shaping in laser writing system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001,9(1):14-18. (in Chinese)
- [4] 林勇,胡家升.激光光束的整形技术[J].*激光杂志*, 2008,29(6):14-18.
LIN Y, HU J SH. Laser beam shaping techniques[J]. *Laser Journal*, 2008,29(6):14-18. (in Chinese)
- [5] 姬扬,张静娟,姚德成,等.用于半导体激光器光束整形的衍射光学元件的设计研究[J].*物理学报*, 1996,45(6):2027-2034.
JI Y, ZHANG J J, YAO D CH, *et al.*. Diode-laser beam conversion with diffractive optical elements[J]. *Acta Physica Sinica*, 1996, 45(6): 2027-2034. (in Chinese)
- [6] 林勇,胡家升,吴克难.一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法[J].*光学学报*,2007,27(9):1682-1686.
LIN Y, HU J SH, WU K N. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007,27(9):1682-1686. (in Chinese)
- [7] SHEALY D L, HOFFNAGLE J A. Laser beam shaping profiles and propagation[J]. *Appl. Opt.*, 2003,45(21):5118-5131.
- [8] SCOTT P W, SOUTHWELL W H. Reflective optics for irradiance redistribution of laser beams: design[J]. *Appl. Opt.*, 1981,20(9):1606-1610.
- [9] SILVESTRI S D, LAPORTA P, MAGNI V, *et al.*. Unstable laser resonators with super-Gaussian mirrors[J]. *Opt. Lett.* 1988,13(3):201-203.
- [10] PARENT A, MORIN M, LAVIGNE P. Propagation of super-Gaussian field distributions[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1992,24(8):S1071-S1079.
- [11] KREUZER J L. Coherent light optical system yielding an output beam of desired intensity distribution at a desired equiphase surface; U. S. Patent 3,476,463[P]. [4-11-1969].
- [12] 张平,叶飞.激光光学系统的设计[J].*激光杂志*, 1990,11(1):14-18.
ZHANG P, YE F. Design of laser optical system [J]. *Laser Journal*, 1990,11(1):14-18. (in Chinese)
- [13] LV B D, ZHANG B. Propagation and focusing properties of apertured super-Gaussian beam[J]. *Optik*, 1996,104(1):201-203.

作者简介:



高禹含(1982—),男,吉林四平人,博士研究生,主要从事激光技术的研究。
Email:gaoyuhan@126.com



李娜娜(1978—),女,吉林长春人,博士,工程师,主要从事光电测控技术与仪器的研究。Email:lindali_2004@hotmail.com



赵伟星(1981—),男,黑龙江哈尔滨人,工程师,技术总监,主要从事光学系统设计的研究。Email: weixing@optotek.com.cn



王劲松(1973—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事光电测控技术与仪器的研究。Email: soldier_1973@163.com

导师简介:



安志勇(1943—),男,河北唐山人,教授,博士生导师,主要从事光电测控系统与仪器的研究。Email: an_zhiyong@126.com

● 下期预告

基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理机

贾建禄^{1,2},王建立¹,赵金字¹,王鸣浩¹,曹景太¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

针对自适应光学系统对波前处理机的计算量和实时性以要求以及大型地基高分辨率成像望远镜的自适应光学系统波前处理规模的提高,提出了基于 FPGA 的自适应光学系统波前处理机。在软件上,采用 FPGA 对整个系统进行数据配置和调控,实现多路 D/A 数据同时传输和转换,并将其作为波前处理运算中的图像预处理和波前子孔径斜率计算的核心器件。在满足波前处理精度的前提下,缩短了波前处理延时,提高了波前处理能力,可实现 2 000 frame/s 的实时波前处理。在硬件上,采用波前处理主板与可扩展的波前处理子板相结合的形式,提高了系统的输出能力。每块波前处理子板的校正量输出为 120 路,波前处理主板的最大扩展能力为 10 块,整个系统可实现 1 200 路校正量的输出。