

doi: 10.7690/bgzdh.2018.12.005

激光测照器光学系统小型化的研究

贾颖娟¹, 于 洵¹, 姜 旭², 武继安², 齐 媛²

(1. 西安工业大学光电工程学院, 西安 710021; 2. 西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘要: 为解决传统激光测照器光学系统只实现光束准直、光束均匀度较差的问题, 对激光测照器光学系统小型化进行研究。对激光光束进行扩束, 利用盖师贝格-撒克斯通(Gerchberg-Saxton, GS)改进算法设计用于光束匀化和准直的二元光学元件 B_1 和 B_2 , 根据光功率恒定原理, 建立光束匀化的坐标变换公式, 在 ZEMAX 中编写宏指令设计非球面透镜组光学系统。结果表明: 该系统能使光束均匀度达到 96.2%, 发散角优于 0.25 mrad, 实现了光学系统的小型化(光学系统结构为 110 mm×42 mm×42 mm)。

关键词: 激光束整形; 光学系统小型化; 二元光学元件组; 非球面透镜组

中图分类号: TP27 **文献标志码:** A

Miniaturization of Optical System for Laser Illuminator

Jia Yingjuan¹, Yu Xun¹, Jiang Xu², Wu Ji'an², Qi Yuan²

(1. School of Optoelectronics Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to solve the problem that the traditional laser illuminator optical system only realizes the beam collimation and the beam uniformity is poor, the miniaturization of the laser illuminator optical system is studied. Expanding the laser beam, the binary optical elements B_1 and B_2 for beam homogenization and collimation are designed by Gerchberg-Saxton (GS) improved algorithm. According to the principle of constant optical power, the coordinate transformation formula of beam homogenization is established, and the macroinstruction is written in ZEMAX to design the optical system of aspheric lens group. The results show that the system can make the beam uniformity reach 96.2%, the divergence angle is better than 0.25 mrad, and realize the miniaturization of the optical system (the optical system size is 110 mm×42 mm×42 mm).

Keywords: laser beam shaping; miniaturization of optical system; binary optical element group; aspheric lens group

0 引言

目前, 激光技术在工农业、医药、科研和军事等领域得到广泛应用, 其中在军事应用尤为重要。激光制导的半主动末制导技术成为近些年许多国家大力研究的一个方向。在这些武器的准确制导中, 激光测照器起着至关重要的作用。激光测照器对目标进行照射并且测距时, 要求其发出光束的束散角尽可能小^[1], 但传统激光测照器发出的光束发散角较小, 光束均匀度较差(40%~50%)。某给定激光测照器在对目标进行照射时, 需要进行相应的激光编码, 不仅要求出射光束有较小的发散角, 而且要求其光束均匀性好, 所以需要提升光束均匀度。此激光测照器需整机装入光电吊舱, 必要时也可单兵携带, 对其小型化、轻量化提出了几乎完美的要求。

激光光束匀化方法有多孔径光束积分器^[2]、液

晶空间调制器^[3]、非球面透镜^[4]和二元光学元件^[5]等。上述方法中, 二元光学元件组和非球面透镜组能够实现光束匀化和光束准直, 并能很好地满足激光测照器光学系统小型化设计的要求; 因此, 笔者首先利用扩束系统对给定激光束进行扩束, 然后分别利用算法设计和 ZEMAX 编写宏指令的方法设计不同的整形系统, 以达到出射光束的要求。

1 光束整形设计原理

扩束系统能够改变光束的发散角和直径, 以便与不同的光学系统配合。如图 1 所示, 利用伽利略系统对高斯光束进行扩束, 入射高斯光束在 L_1 处的光斑半径为 d_1 、发散角为 θ_1 , 经扩束后光斑半径为 d_2 , 发散角为 θ_2 , 则高斯光束经扩束系统前后的放大率为

$$M = \frac{d_2}{d_1} = \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad (1)$$

收稿日期: 2018-10-06; 修回日期: 2018-10-23

作者简介: 贾颖娟(1992—), 女, 陕西人, 在读硕士, 从事光电仪器光学系统设计研究。

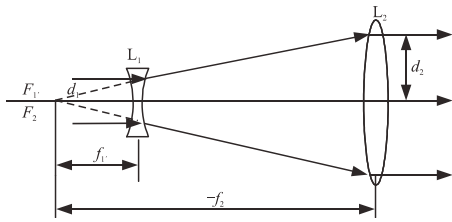


图 1 扩束系统原理

如图 2 所示，采用二元光学元件组 B_1 、 B_2 对扩束后的高斯光束进行匀化准直， r 为输入面极坐标， R 为输出面极坐标， d_2 、 R_0 分别为输入高斯光束和输出均匀光斑半径。第一片元件 B_1 改变激光振幅（光强）分布，使得光波传播 z 距离后到 B_2 前的光强均匀分布。第二片元件 B_2 校正相位，使出射光为平行光，可实现激光光束的匀化和准直。

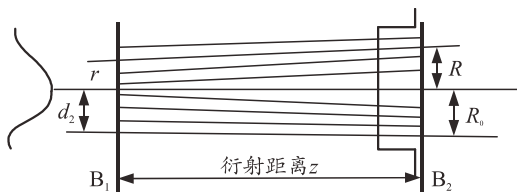


图 2 二元光学元件组整形

B_1 元件的设计过程：已知输入光束和目标光束的振幅分布，根据菲涅尔衍射公式构造一个非线性方程，并利用菲涅尔衍射和逆菲涅尔衍射的不断迭代求解这个非线性方程组。极坐标下菲涅尔衍射和逆菲涅尔衍射的公式如下：

$$u(R) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp(ik \frac{R^2}{2z}) F \left[g(r) \exp(ik \frac{r^2}{2z}) \right]; \quad (2)$$

$$g(r) = \exp(-ik \frac{r^2}{2z}) F^{-1} \left[\frac{i\lambda z}{\exp(ikz)} u(R) \exp(-ik \frac{R^2}{2z}) \right]. \quad (3)$$

式中： z 为衍射距离； $g(r)$ 、 $u(R)$ 为输入输出光场分布。求得 BOE 元件相位后，用衍射效率 η 、均方误差 e 和光强顶部不均匀度 σ 来衡量 BOE 元件的性能^[6]。

非球面透镜组整形是基于几何光线追迹和光功率恒定，原理如图 3 所示。其中， r 、 R 为极坐标， d_1 、 R_0 为输入输出面光斑半径， $I(r)$ 、 $I(R)=\sigma$ 为输入输出光强分布，根据光功率恒定可以求得任意一条光线与输入、输出面相交点的坐标关系^[7]。

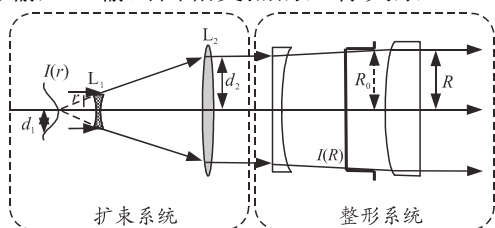


图 3 非球面透镜组整形

入射光强分布为

$$I(r) = \exp\left(\frac{-2r^2}{d_1^2}\right). \quad (4)$$

根据光功率恒定，可得

$$\int_0^r I(r) 2\pi r dr = \int_0^R I(R) 2\pi R dR. \quad (5)$$

积分可得到：

$$R(r) = \sqrt{\frac{d_1^2}{2\sigma} \left[1 - \exp\left(\frac{-2r^2}{d_1^2}\right) \right]}. \quad (6)$$

且 $r \rightarrow \infty$ 时，对应均匀光斑半径 R_0 ，则有

$$R_0 = \sqrt{\frac{d_1^2}{2\sigma}}. \quad (7)$$

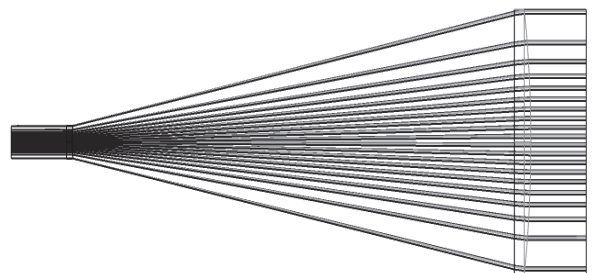
将式(7)代入式(6)可得追迹光线与输入、输出面交点的坐标关系：

$$R(r) = R_0 \sqrt{1 - \exp\left(\frac{-2r^2}{d_1^2}\right)}. \quad (8)$$

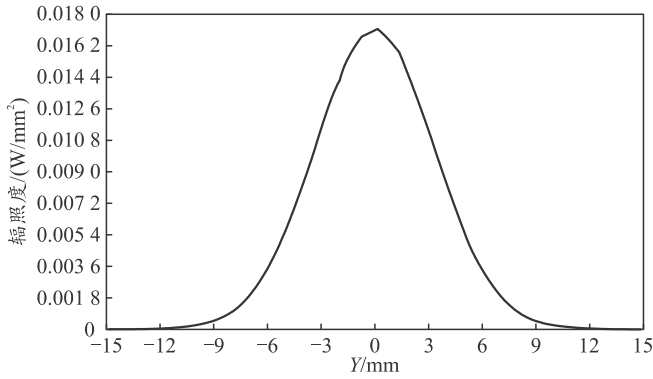
2 扩束系统的光学设计

利用 8 倍的伽利略系统对激光束进行扩束准直。以平凹腔固体激光器为例，主波长 $1.064 \mu\text{m}$ ，半发散角 2 mrad ，出射口为平面镜端，即高斯光束的束腰位置，束腰半径 $w_0=1.5 \text{ mm}$ 。在其后方 10 mm 处设计扩束系统，对高斯光束进行扩束。扩束系统的视场角为 2 mrad ；激光器出射口可视作扩束系统的入瞳，入瞳半径 1.5 mm ；光束分布类型为高斯型。

为简化扩束系统结构，采用平凹或平凸的球面透镜。操作数“RSCE”可控制几何像质心的斑点尺寸，“RWCE”可控制衍射质心的 RMS 波前差，利用“RSCE、RWCE”以及其他波前差操作数对系统进行优化，优化后的设计结果如图 4 所示。由设计结果可知：进行 8 倍扩束后高斯光束发散角为 0.25 mrad ，半径由 1.5 mm 增加至 12 mm ，仍为高斯光束，为后续高斯光束整形系统设计打下基础。



(a) 扩束系统结构



(b) 出射高斯光束能量分布

图 4 系统的设计结果

3 二元光学元件组的求解

3.1 匀化元件的设计算法

求解 BOE 元件相位最原始方法是 GS 算法^[8], 其算法如图 5 所示。其中: $A_0(x, y)$ 为输入光束的振幅分布; $u_{ideal}(\xi, \zeta)$ 为输出光束的理想振幅分布。通过菲涅尔变换和逆菲涅尔的不断迭代变换, 且每次将输出面振幅用理想振幅分布 $u_{ideal}(\xi, \zeta)$ 来代替 (引入的输出面限制), 输入面振幅用给定的光束输出振幅 $A_0(x, y)$ 来代替引入的输入面限制, 当输出面实际振幅 $|u(\xi, \zeta)|$ 与目标振幅 $u_{ideal}(\xi, \zeta)$ 的误差函数足够小时, 可求得 H1 元件相位 $\phi(x, y)$ 。

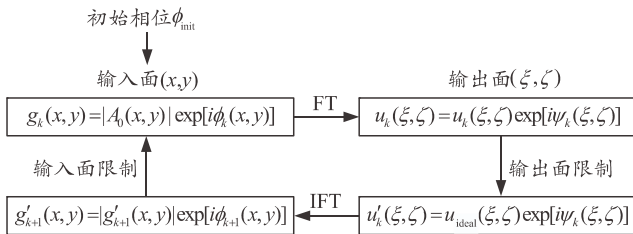


图 5 GS 算法

GS 算法编程简单、寻优效率高, 但其输出光束的不均匀度较高, 所以对 GS 算法的输出面改进算法振幅做出如下调整^[9]:

$$u'_k(\xi, \zeta) = |u'_k(\xi, \zeta)| \exp[i\psi_k(\xi, \zeta)]. \quad (9)$$

其中: $|u'_k(\xi, \zeta)| = |u_k(\xi, \zeta)| \left(\frac{|P_k(\xi, \zeta)|}{\bar{P}_k(\xi, \zeta)} \right)^\gamma$, $\bar{P}_k(\xi, \zeta) =$

$$\frac{u_{ideal}(\xi, \zeta)}{\sum_{\xi, \zeta} u_{ideal}(\xi, \zeta)}, \quad \bar{P}_k(\xi, \zeta) = \frac{|u_k(\xi, \zeta)|}{\sum_{\xi, \zeta} |u_k(\xi, \zeta)|}, \quad \text{参数 } \gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$$

为常数, 表征调整振幅接近理想振幅程度, 通过调整 γ 可有效控制下一次迭代的振幅。

同样对输入面的振幅调整进行改进, 其基本思

想为:

$$|g_{k+1}(x, y)| = \begin{cases} |g_k(x, y)| - \beta |g'_k(x, y)|, & x \in \chi \\ |g'_k(x, y)|, & x \notin \chi \end{cases}. \quad (10)$$

β 取值为(0~1)之间, χ 是输入面约束区域。此算法为输入光场分布引入了负反馈, 不但提升收敛速度, 而且收敛效果也比较显著。

输出面改进算法易于控制输出面振幅的振荡程度, 输出光束顶部均匀性较好; 输入面振幅调整算法收敛速度快。笔者结合 2 种算法的优势, 提出一种输入输出混合算法。输入输出混合算法先利用 GS 算法进行多次迭代, 将收敛后的相位作为输入输出混合算法的初始相位, 来提高输出光束的顶部均匀度并且加快收敛速度。

扩束后半径为 12 mm 的高斯光束, 入射到匀化 BOE 元件 B_1 上。 B_1 半径为 12 mm, 在衍射距离 50 mm 处得到半径 12 mm 的均匀圆光斑, 输入、输出面上的采样点数为 200×200 。由于输入的高斯光束发散角为 0.25 mrad, 等相位面可近似为平面波, 那么入射高斯光束复振幅分布为:

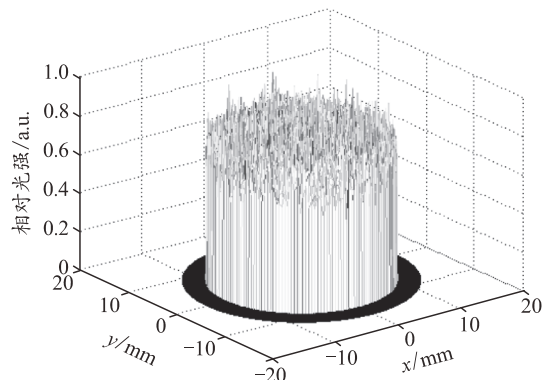
$$A_0(r) = \exp\left(\frac{-r^2}{d_2^2}\right). \quad (11)$$

式中 d_2 为 12 mm, 输出面光束振幅分布为:

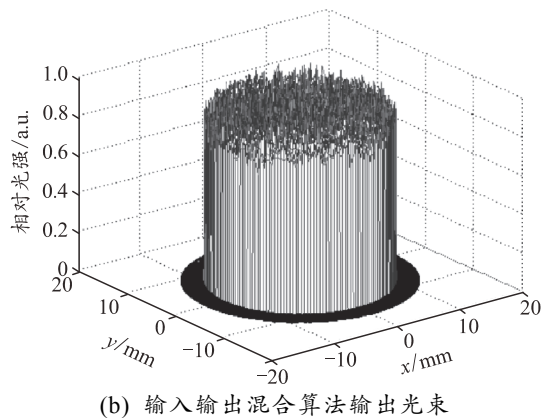
$$u_1(R) = u_0 \text{circ}\left(\frac{R}{R_0}\right). \quad (12)$$

其中 $R_0 = d_2$, 根据激光束光功率恒定, 得到 $u_0 = 0.707$ 。

分别利用 GS 算法和输入输出混合算法对入射高斯光束进行整形, 输出光束如图 6(a)、(b)所示。输出光束的质量评价如图 7(a)、(b)所示, 可看出输入输出混合算法的光束质量优于 GS 算法, 均匀度达到 95%, 且迭代 200 次时光束质量就趋于稳定, 可作为光束整形的一种有效算法。

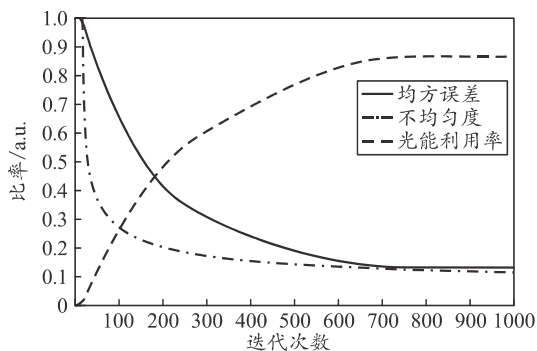


(a) GS 算法输出光束

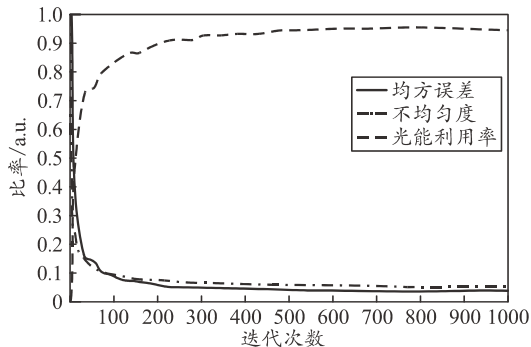


(b) 输入输出混合算法输出光束

图 6 输出平顶光束



(a) GS 算法评价



(b) 输入输出混合算法评价

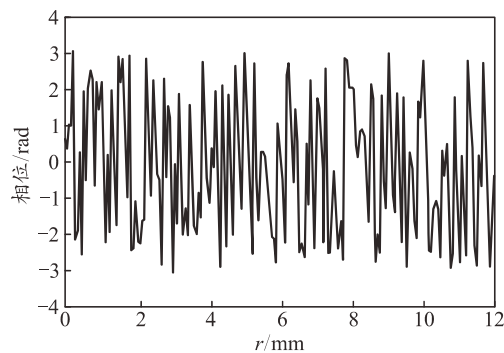
图 7 输出光束质量评价

3.2 匀化元件的求解

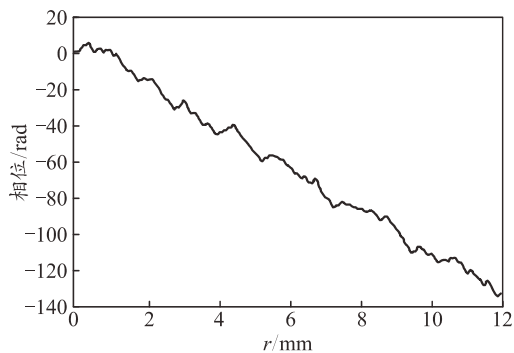
ZEMAX 软件中用径向相位分布函数来表示附加在某表面上的相位分布，一般取前 5 阶^[10]，得到相位函数如下：

$$\phi(r) = |A_1 r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8 + A_5 r^{10}| = -2\pi k. \quad (13)$$

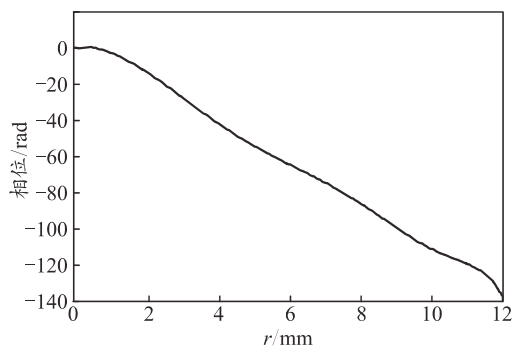
利用输入输出混合算法求取的 BOE 元件相位分布，是包裹在 $(-\pi, \pi)$ 之间的 BOE 3 维精确相位。BOE 元件为圆对称元件，选取其沿 r 方向的相位分布代表整体相位分布，接着进行相位解缠、相位拟合和相位重构，得到规律的 BOE 相位分布^[11]，结果如图 8 所示，相位拟合利用了 ZEMAX 中 5 阶相位函数的概念。



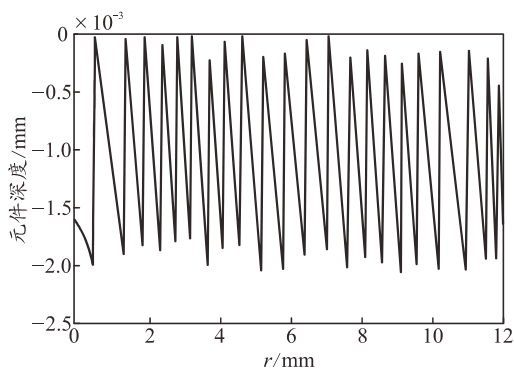
(a) B₁ 沿 r 方向的相位分布



(b) B₁ 解缠相位



(c) B₁ 拟合相位



(d) B₁ 面型结构

图 8 匀化元件 B1 求解过程

面形求解：根据光程差与相位的关系，可求得二元光学面矢高关于元件半径的方程：

$$z_1 = \frac{\lambda}{n-1} \frac{\phi_1(r) + \text{int}(\frac{\phi_1(r)}{2\pi})2\pi}{2\pi}. \quad (14)$$

其中波长 $\lambda=1.064 \mu\text{m}$ ，基底折射率 $n=1.5168$ ， $\phi_1(r)=-3.889r^2+0.098r^4-1.5\times 10^{-3}r^6+1.012\times 10^{-5}r^8-2.625\times 10^{-8}r^{10}$ ，可得 BOE 元件面形如图 8(d)所示。

用台阶深度 h 和最小台阶宽度 Δd 来衡量 BOE 元件的加工难度^[12]，表示如下：

$$h = \frac{\lambda / (n - 1)}{N}; \quad (15)$$

$$\Delta d = (r_k - r_{k-1}) / N. \quad (16)$$

式中： n 为元件折射率； λ 为波长； N 为每个环带内的台阶数。由 B_1 最大环带深度 $2 \mu\text{m}$ ，得 $N=8$ 时台阶深度为 $0.25 \mu\text{m}$ ，最边缘水平间隔 0.39mm ，则最小台阶宽度为 0.048mm ，目前的加工水平能够满足。

3.3 准直元件的求解

扩束后的高斯光束经过 B_1 元件后，在 B_2 前的相位分布为 $\psi(R)$ ，要使得 B_2 元件对光波进行相位矫正后得到平面波，则 B_2 元件的相位分布为 $-\psi(R)$ 。获得 B_2 元件的沿 r 方向的精确相位分布后，同样进行相位解缠、相位拟合和相位重构，最后获得 B_2 元件的面形方程，其结果如图 9 所示。

其面形方程为：

$$z_2 = \frac{\lambda}{n-1} \frac{\phi_2(r) + \text{int}(\frac{\phi_2(r)}{2\pi})2\pi}{2\pi}. \quad (17)$$

基底材料折射率 $n=1.5168$ ， $\phi_2(r)=-2.323r^2+0.064r^4-0.001r^6+7.585\times 10^{-6}r^8-2\times 10^{-8}r^{10}$ ， $N=8$ 时，台阶深度为 $0.25 \mu\text{m}$ ，最小台阶宽度为 0.04mm ，同样满足目前的加工水平。

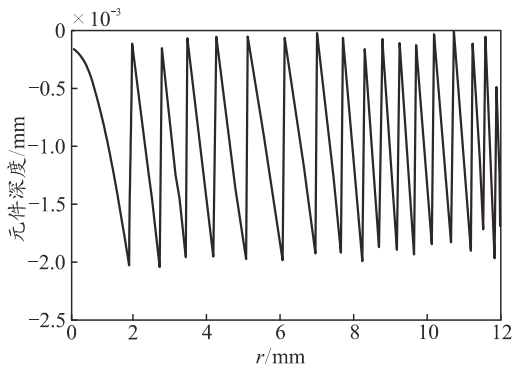


图 9 B2 元件面型结构

4 非球面透镜组的求解

整形非球面透镜组面型求解一般都采用 Kreuzer 提出的一种通用方法^[13]。首先根据选取的输入输出高斯光束类型推导非球面的系数方程，并得到非球面的面型方程。该方法计算比较复杂，且

需重复校正才可获得设计结果，故可利用 ZEMAX 光学设计软件自动优化设计非球面透镜组。

扩束系统后加入 2 个反射镜改变光路，缩小系统结构。入射高斯光束光斑半径 $d_1=1.5 \text{mm}$ ，此时平顶光束半径 $R_0=12 \text{mm}$ ，透镜材料为 N-SF8，采用双非球面透镜系统进行整形，第 1 片透镜起到匀化光束作用，第 2 片透镜起到准直作用，使得出射光束在长距离传播中保持良好的均匀性与准直性。

入射平面光线采样数为 80，当已知每条光线与输入面的交点坐标时，以式(8)为目标函数得到对应输出面的交点坐标，利用操作数“REAY”设定光线在输出面的坐标值。在此编写 ZPL 宏程序可以整体添加操作数，并且以目标函数计算的值为操作数目标来进行优化，最终得到合适的非球面结构实现激光光束整形。ZPL 程序流程如图 10 所示。

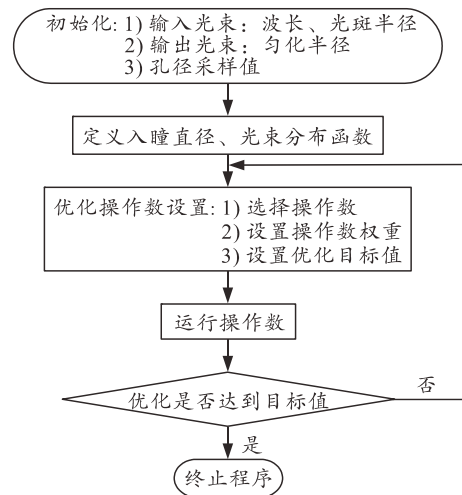


图 10 ZPL 程序流程

编写 ZPL 程序优化后的非球面透镜组参数如表 1 所示，其中非球面系数如表 2 所示，设计结果如图 11 所示。在此可以通过能量均匀度来评价光束的均匀性，定义如下：

$$\kappa = 1 - \frac{\sqrt{\sum (E_i - \bar{E})^2 / M}}{\bar{E}}. \quad (18)$$

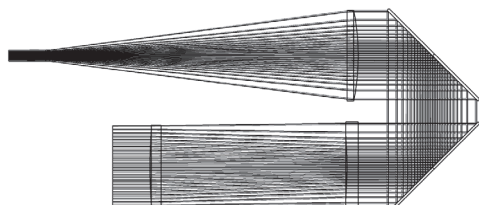
其中： E_i 为每个采样点处的能量； \bar{E} 为能量平均值； M 为采样点数，通过编写 zpl 程序可计算其均匀度为 96.2%，满足准直度的要求，可见非曲面透镜组实现了激光光束的匀化与准直。实现光束匀化准直的二元光学元件组 B_1 、 B_2 在系统结构中位于与非球面同样的位置，按照光路方向， B_1 位于第一个非球面位置处， B_2 位于第二个非球面位置处。

表 1 非球面透镜组参数

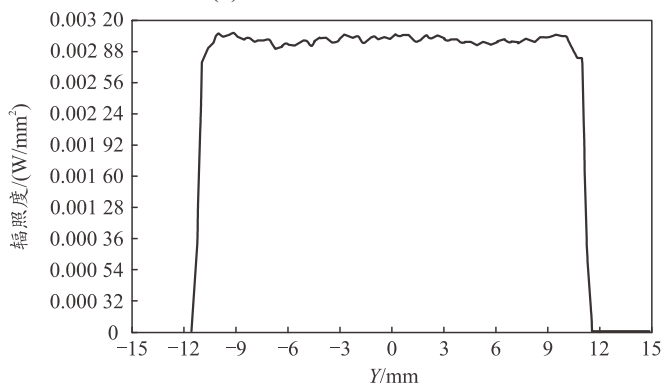
Surf.	Type	Radius	Thickness	Material
1	Standard	Infinity	3	N-SF8
2	Even Asphere	76.081	50	
3	Standard	Infinity	3	N-SF8
4	Even Asphere	-108.029		

表 2 非球面系数

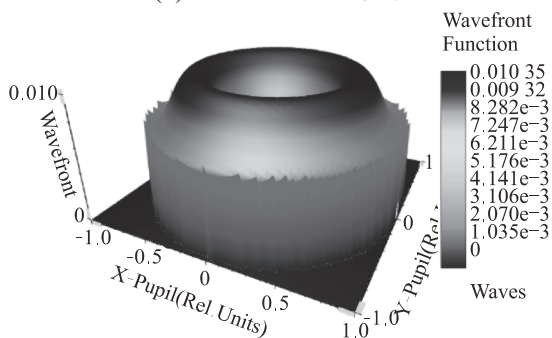
Surf.	Conic	4th/10 ⁻⁶	6th/10 ⁻⁸	8th/10 ⁻¹⁰	10th/10 ⁻¹²
2	-13.603	-3.184	0.3639	3.836	-1.063
4	-82.303	0.2169	3.638	-1.35	2.424



(a) 光学整形系统结构



(b) 出射光能量分布图



(c) 出射光波前图

图 11 激光束整形结果

5 结束语

笔者设计的二元光学元件组和非球面透镜组均能完成激光光束的匀化与准直，实现了光学整形系统的小型化设计。该方法使得现有激光测照器的光束均匀度大大提升，均匀度理论值至少为 95%，解决了激光测照器光束均匀性要求的问题，为激光测照器发射精确的编码激光提供了良好的光学系统，能够更加精确地探测目标、制导武器。另外，该方法实现了激光测照器光学系统的小型化、轻量化设

计，同时完成光束准直、光束匀化的光学系统结构为 110 mm×42 mm×42 mm，为小型化激光测照器提供了有效方法。

二元光学元件组整形后，输出光束的均匀度达到 95%；非球面透镜组输出光束均匀度达到 96.2%，且波前 PV 值为 0.01。二元光学元件组是单独元件的设计，不利于其整体系统的评判，且匀化元件 B₁ 的加工精度会直接影响 B₂ 元件的使用性能，会对整形光束的质量产生较大影响。非球面透镜组是在 ZEMAX 中整体系统的设计，可对其整形光束的均匀度和准直度作出评判，且非球面透镜的加工精度在允许范围内对整形光束的质量影响较小，能更加有效地实现高斯光束的匀化与准直，在激光测照器光学系统小型化设计中具有较为重要的应用价值。

参考文献：

- [1] 曾宪林, 李翔. 机载激光目标指示器发展综述[J]. 激光与红外, 2000, 30(1): 4-6.
- [2] JIANG X, ZHOU S, LIN Z. Improved uniformity of target illumination by combining a lens array and the technique of spectral dispersion[J]. Journal of applied physics, 2007, 101(2): 023109.
- [3] 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, 2005, 25(7): 959-964.
- [4] HOFFNAGLE J A, JEFFERSON C M. Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flattop beam[J]. Applied optics, 2000, 39(30): 5488-5499.
- [5] 金国藩, 严瑛白, 郭敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 89-95.
- [6] LIU J, THOMSON M J, TAGHIZADEH M R. Iterative algorithm for the design of free-space diffractive optical elements for fiber coupling[J]. Applied Optics, 2004, 43(10): 1996-1999.
- [7] 高璐含, 安志勇, 李娜娜, 等. 高斯光束整形系统的光学设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1464-1471.
- [8] 余浩, 黄林海, 饶长辉, 等. G-S 算法在光束近场场强控制中的应用[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1259-1264.
- [9] 林勇. 用于激光光束整形的衍射光学元件设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 36-37.
- [10] 李卫森, 吴登喜, 董光焰, 等. 基于 ZEMAX 的激光高斯光束匀化设计[J]. 光电系统, 2009, 34(1): 1-3.
- [11] 于晓晨, 胡家升, 王连宝. 提高激光束整形质量的新方法[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 229-234.
- [12] 农文捷, 金宁. 二元光学工艺参数计算[J]. 红外技术, 2004, 26(6): 13-16.
- [13] 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]. 1969-11-4.