

文章编号: 0258-7025(2003)06-0494-03

# 高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计

郝沛明, 王 鹏, 王占山, 鲁鸿雁

(同济大学精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

**摘要** 高倍率及大孔径扩束器要求筒长短、口径大、轴上和轴外的像差都要很好地校正, 所以光学系统的设计是非常困难的。论述了高倍率及大孔径扩束器的光学系统设计方法, 给出了物镜通光口径为 200 mm, 焦距为 400 mm, 视场为 2 mrad, 放大倍率为 45 倍的扩束器的光学系统结构参数和像质评价结果。

**关键词** 光学技术与仪器; 大孔径扩束器; 高倍率, 像质评价

中图分类号 O 439 文献标识码 A

## Lens Design for High Power and Wide-aperture Beam Expander

HAO Pei-ming, WANG Peng, WANG Zhan-shan, LU Hong-yan

(Physical Department, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** It is hard to design for beam expander with high-power and wide-aperture required, because it is shorten length, larger aperture, as well as on-axis and off-axis aberration must be corrected properly. In this paper, a design method for high-power and wide-aperture beam expander is talked about. One beam expander is given with clear aperture of 200mm, focal length of 400 mm and field of view of 2 mrad. Image evaluation and system parameter are shown at same time.

**Key words** optical technique; wide-aperture beam expander; high-power; image evaluation

## 1 引言

在激光发射系统中, 为了增大作用距离, 就要提高发射系统的精度, 要达到此目的, 一方面要提高激光光束的发散角, 另一方面靠扩束器提高发射系统发散角的精度, 扩束器的倍率越高, 发射系统的精度也越高; 为了减小发射系统的体积和重量, 就要增大扩束器物镜的孔径角来压缩筒长, 就得要采用高倍率及大孔径扩束器, 这对光学系统的设计、加工和装配都是非常困难的。本文对激光器波长  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ , 放大倍率  $\Gamma = 45$ , 发散角  $\alpha = 2 \text{ mrad}$ , 口径  $\phi_0 = 200 \text{ mm}$ , 相对口径  $\phi_0/f' = 1/2$  的扩束器光学系统进行设计, 发射系统的精度要求波面像差优于  $\lambda/4$ 。对光学系统物镜和目镜的设计方法作了论述, 并且给出物镜和目镜组合系统的设计结构参数和各种像质评价的结果。

## 2 光学系统物镜的设计

采用球面光学系统是难以满足设计指标要求的, 因为发射系统的激光器是单一波长, 所以扩束器的光学系统设计不需要消除色差, 可以采用非球面系统<sup>[1]</sup>。采用单个非球面透镜是不能满足设计要求的, 所以, 采用一个非球面透镜和一个球面透镜组合的双透镜结构来实现, 设计方法简单叙述如下: 用等偏角和球差极小值的原则求解结构参数, 光学系统在归一化的条件下<sup>[2]</sup>

$$\begin{aligned} h &= h_1 = h_2 & f' &= 1 \\ \varphi &= \varphi_1 = \varphi_2 = 0.5 & J &= 1 \end{aligned}$$

其中  $h$  为系统口径半高度,  $f$  为系统焦距,  $\varphi$  为系统光焦度,  $J$  为拉格朗日不变量。三级像差的球差表示式为<sup>[3~6]</sup>

$$S_1 = h_1^4 \varphi_1^3 P_1 + h_2^4 \varphi_2^3 P_2 + h_1^4 K_1 \quad (1)$$

收稿日期: 2002-03-11; 收到修改稿日期: 2002-12-26

作者简介: 郝沛明(1940—), 男, 同济大学博士生导师。主要研究领域为光学系统设计、光学加工、光学检验、光学图像分析等, 尤其对非球面光学有更深入的研究和实践工作经验。E-mail: wangpengtongji@sina.com

非球面位于第一个面上，其中  $K_1 = -(e_1^2/r_1^3)(n-1)$ ，要消除球差，令  $S_1 = 0$ ，得出

$$e_1^2 = \frac{\varphi^3 r_1^3 (P_1 + P_2)}{n-1} \quad (2)$$

按等偏角和球差极小值的原则可以得出曲率半径  $c$

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{r_1} = \frac{1}{2(n-1)} + \frac{n+1}{n+2} = Q_1 + \frac{n}{n-1} \\ c_2 &= \frac{1}{r_2} = -\frac{1}{2(n-1)} + \frac{n+1}{n+2} = Q_1 + 1 \\ c_3 &= \frac{1}{r_3} = \frac{1}{2(n-1)} + \frac{3(n+1)}{n+2} = Q_2 + \frac{n}{n-1} \\ c_4 &= \frac{1}{r_4} = -\frac{1}{2(n-1)} + \frac{3(n+1)}{n+2} = Q_2 + 1 \end{aligned} \quad (3)$$

选择光学玻璃，确定折射率  $n$ ，根据公式(3)，求解  $c$  和  $Q$ ，根据  $Q$  求解  $P$

$$\begin{aligned} P_1 &= P_1^\infty = P_0^\infty + \left(1 + \frac{2}{n}\right) \left[Q_1 + \frac{3n}{2(n-1)(n+2)}\right]^2 \\ P_2 &= P_0^s + \frac{n+2}{n} \left[Q_2 + \frac{3n}{2(n-1)(n+2)} - \frac{2n+2}{n+2}v_2\right]^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} P_0^s &= P_0^\infty - \frac{n}{n+2}(v_2 + v_2^2) \\ P_0^\infty &= \frac{n}{(n-1)^2} \left[1 - \frac{9}{4(n+2)}\right] \\ v_2 &= \frac{u_2}{h_2 \varphi_2} \end{aligned}$$

得出  $P_1$  和  $P_2$  后，代入(2)式求解二次曲面的偏心率  $e_1^2$ 。在归一化参数的基础上缩放到实际要求的结构参数，进行光线追迹和像差平衡，从得出的设计结果可知，仅靠二次曲面是不满足设计要求的，在二次曲面的基础上再加高次项，这样的设计结果是可以满足设计要求的。高次方程的表示式为

$$X_1 = \frac{c_1 Y_1^2}{\sqrt{1 - (1 - e_1^2)c_1^2 Y_1^2}} + A_1 Y_1^4 \quad (5)$$

式中  $r_{01} = 1/c_1 = 291.042$ ， $e_1^2 = 0.6779888$ ， $A_1 = 4.050863E^{-10}$ 。

### 3 光学系统目镜的设计

物镜的参数为：通光口径  $\phi_0 = 200$  mm，焦距  $f' = 400$  mm，视场角  $2W = 2$  mrad，由于扩束器的放大倍率  $\Gamma = 45$ ，可以得出扩束器目镜的参数：轴上通光的口径  $\phi_e = 4.44$  mm，焦距  $f_e' = -8.88$  mm，

视场角  $2W_e = 90$  mrad，光阑位于物镜上，设计这样的目镜是很困难的。首先按 PW 法求解初始结构参数，然后，进行光线追迹和像差平衡，根据实际情况，进行系统的复杂化，最后达到设计要求，目镜设计最终的光路图如图 1 所示。

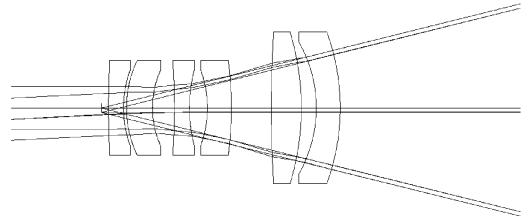


图 1 目镜光路图  
Fig. 1 Optical system of the eyepiece

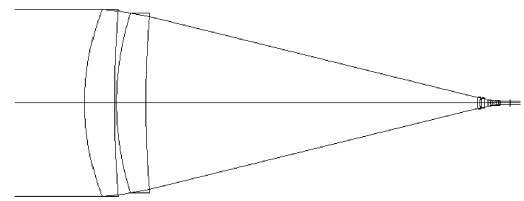
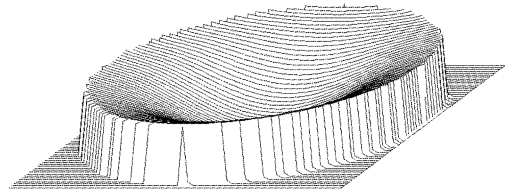


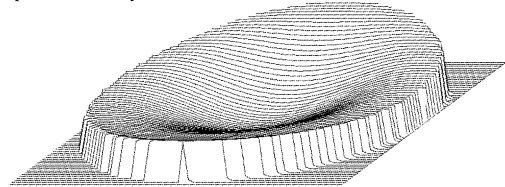
图 2 扩束器光路图  
Fig. 2 Optical system of the beam expander

0.6328  $\mu\text{m}$  at 0.0000 deg.  
peak to valley is 0.1275 waves.



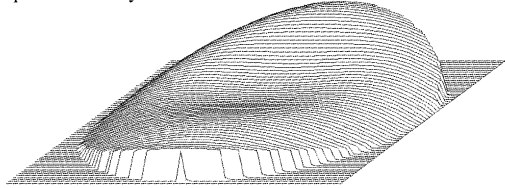
Wavefront function

0.6328  $\mu\text{m}$  at 0.0286 deg.  
peak to valley is 0.1328 waves.



Wavefront function

0.6328  $\mu\text{m}$  at 0.0572 deg.  
peak to valley is 0.2025 waves.



Wavefront function

图 3 不同视场波像差

Fig. 3 Wavefront function

#### 4 扩束器的光学系统设计

将已完成的扩束器物镜和目镜的设计进行对接,对接后的扩束器光学系统如图 2 所示,光学系统的结构参数如表 1,光学间隔总长度为 410 mm;三

个视场 0, 1 mrad, 2 mrad 的波像差和 MTF 传递函数曲线分别如图 3 和图 4 所示,从图 3 可以看出,在 2 mrad 的视场内,波像差均小于  $\lambda/4$ ,从图 4 的 MTF 传递函数曲线来看,也说明这个设计结果是非常好的。

表 1 光学系统结构参数

Table 1 Surface data summary

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Conic	4th
OBJ	Standard	Infinity	Infinity		0	
1	Standard	Infinity	100.0		0	
STO	Evenasph	291.042	30.0	K9	-0.6795885	4.050863E <sup>-10</sup>
3	Standard	1316.018	2.0		0	
4	Standard	331.655	30.0	K9	0	
5	Standard	1212.707	338.102		0	
6	Standard	24.40	2.4	K9	0	
7	Standard	14.737	1.5		0	
8	Standard	28.869	3.0	K9	0	
9	Standard	-141.138	4.0		0	
10	Standard	40.224	2.4	ZF2	0	
11	Standard	12.25	1.8		0	
12	Standard	-16.769	1.5	K9	0	
13	Standard	71.957	2.2		0	
14	Standard	-10.28	2.6	ZF2	0	
15	Standard	-12.30	0.3		0	
16	Standard	-12.30	1.5	K9	0	
17	Standard	-103.975	10.0		0	
18	Paraxial		100.0		0	
IMA	Standard	Infinity				

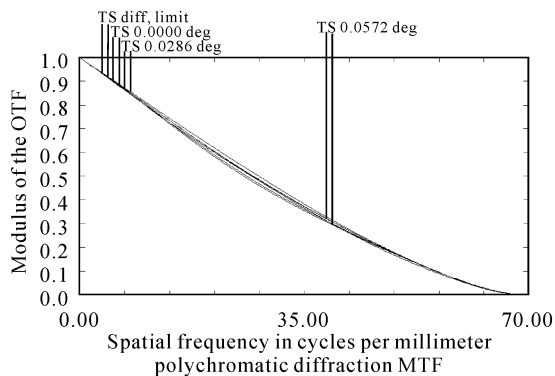


图 4 调制传递函数曲线

Fig. 4 Modulation transfer function

#### 参 考 文 献

1 Warren J. Smith. Modern Optical Engineering [M].

New York: McGraw, Hill Book Company, 2000. 439~447, 62~72

2 Editors group. Optical Design Manual [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1971. 217~226, 282~304 (in Chinese)

3 Hao Peiming. The eyepieces of aspherical surface [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(10):1389~1393 (in Chinese)

4 Lin Dajin. Optical Engineering System Design [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 1987. 41~71 (in Chinese)

5 Pan Junhua, Hao Peiming. A general study of the optical system with two aspherical mirrors [J]. *Acta Astronomica Sinica* (天文学报), 1965, **13**(1):46~56 (in Chinese)

6 Hao Peiming. Fabrication of a convex aspherical surface [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1991, **11**(10):931~937 (in Chinese)