中国激光

第10卷　第7期

激光打靶透镜的设计

李元康　王书泽　翁自强

（中国科学院上海光机所）

提要：本文介绍了激光打靶透镜的特点及用等光程原理求解非球面透镜的方法。

Lens design for target experiments

Li Yuankang, Wang Shuze, Weng Ziqiang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

Abstract: This paper presents the features of a lens designed for converging the laser beam onto the target and the solution of the aspherical lenses using equal optical path principle.

一、概　述

打靶透镜是用来将激光束聚焦在氘靶上，为使能量集中，要求相对孔径大，通常要做到1:1。这样大的相对孔径若用球面系统组合，则结构很复杂。为此我们采用非球面的单透镜。

二、设 计 要 求

1．相对孔径大

设器件发散角为 α，打靶透镜焦距为 f'，则聚焦点的光斑大小 $\Delta = f\alpha$，为使 Δ 小就要求 f' 小，当透镜口径 D 要求一定时，D/f 就大。

2．要求校正轴上球差及正弦差

因激光束的发散角一般很小（为几毫弧度），故除偏轴使用外，不需校正轴外象差，而校正轴上球差和正弦差，就能保证轴上点与邻近点的成象质量。

3．结构要求简单

为减少激光通过打靶透镜后由于镜面表面反射造成能量损失及由于各镜面的反馈聚焦而引起镜片的破坏，打靶透镜力求结构简单。

4．不需校正色差，但要给出 $\lambda = 6328\,\text{Å}$ 时的焦距与 $\lambda = 1.06$ 微米时焦距之差，并算出非球面坐标 x、y，以供加工、装配使用。

5．要考虑激光束反射后造成的破坏

根据报导[1]可在透镜上打中心孔及挖一

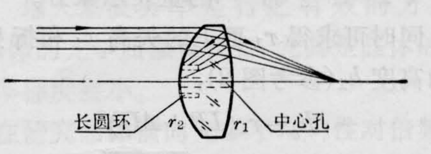

图　1

收稿日期：1982年8月28日。

圆的长孔，以消除激光束在镜面反射后造成镜片的破坏(见图1)。

三、设计步骤

1. 由打靶透镜的焦距f'及相对孔径D/f'的要求，可初步定出球面半径r_1与孔径角U。

$$1/f'=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right) \tag{1}$$

上式r_2为非球面顶点曲率半径。当$n=1.5$，$r_1=-6r_2$时，单薄透镜球差有极小值，这时非球面对着平行光(见图1)，由式(1)可求出球面半径r_1。在实际计算时往往在初值附近选一组r_1值，以使系统正弦差为极小。而孔径角是由$U=-\frac{1}{2}D/f'$求出，这里的D/f'为要求的打靶透镜的相对孔径。

2. 已知工作距L及孔径角U，可由Smith公式算出经球面r_1折射后的L'、U'，为求解非球面作准备。

公式组

$$\left.\begin{aligned}
&I=\frac{LU}{r_1}-U \quad 求\ I\\
&I'=\frac{n}{n'}I \quad 求\ I'\\
&L'U'-LU\\
&\quad=\frac{LU(I'-U)(I-I')}{\frac{1}{2}[(A'+B)(A+A')-(I'-U)(I-I')]}\\
&\qquad 求\ L'U'\\
&U'=I+U-I'+\frac{L'U'-LU}{r_1} \quad 求\ U'
\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

公式组中$I=\sin I$；$U=\sin U$；$A=\sqrt{1-I^2}$；$B=\sqrt{1-U^2}$。带“$'$”的量表示象方。

同时可求得r_1面上的矢高x_1和折射点处的高度h_1(参考图2)：

$$\begin{aligned}h_1&=r_1(IB+AU)\\ x_1&=r_1-\sqrt{r_1^2-h_1^2}\end{aligned} \tag{3}$$

3. 用等光程原理求解非球面系数

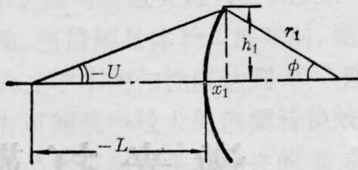

图 2

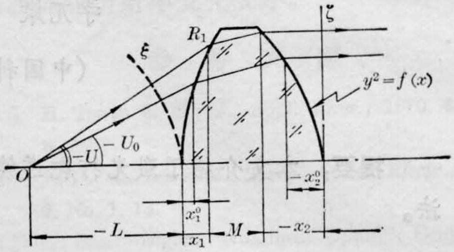

图 3

L—工作距离；U—最大孔径角；U_0—任意孔径角大小；x_1—最大孔径时球面矢高；x_1^0—任意孔径时球面矢高；x_2—最大孔径时非球面矢高；x_2^0—任意孔径时非球面矢高

设非球面方程式为：

$$y^2=2ax+(b-1)x^2+cx^3+dx^4+ex^5 \tag{4}$$

(4)式中a、b、c、d、e是要求解的非球面系数。

由物点O发出不同孔径的各条光线(物空间的球面波ξ)经球面r_1折射后，在非球面$y^2=f(x)$面出射时成平行光，过$y^2=f(x)$曲面顶点作一波面ζ，与平行光束垂直。所谓等光程就是入射波面为理想的球面波，经非球面透镜后的出射波面也是理想的平面波。从图3可见，任意光线所走的(由O点到波面ζ)光程OP：

$$\begin{aligned}OP=&(-L+x_1^0)/B_0+(x_1-x_1^0+M\\&-x_2+x_2^0)*n/B_0'-x_2^0\end{aligned} \tag{5}$$

上式中$B_0=\cos U_0$；$B_0'=\cos U_0'$，

当光线沿光轴穿过透镜时的光程：

$$OP=-L+n*(x_1+M-x_2) \tag{6}$$

当光线以最大孔径角入射时的光程：

$$OP=(-L+x_1)/B+n*M/B'-x_2 \tag{7}$$

由式(6)、(7)联立可以解出光程长度OP与x_2：

$$OP=[L(n/B-1)+n*x_1*(1-1/B)$$
$$+n*M*(1-n/B')]/(1-n) \quad (8)$$
$$x_2=x_1+M-(OP+L)/n \quad (9)$$

有了 OP、x_2 之值,我们就可分别写出五带光线所对应的光程方程，在五个方程中都用已知量 OP、x_1、x_1^0、x_2 及 M 表示 x_2^0 得:

$$x_2^0=[-OP+(-L+x_1^0)/B_0$$
$$+n*(x_1-x_1^0+M-x_2)/B_0']/(1-n/B_0') \quad (10)$$

同时可求出与 x_2^0 对应的高度 y_2^0:

$$y_2^0=h_1^0-(x_1-x_1^0+M-x_2+x_2^0)*U_0'/B_0' \quad (11)$$

当五带光线分别取 $U_0=U$、$0.85U$、$0.7U$、$0.5U$、$0.25U$，此时由公式(10)、(11)两式分别求得 y_2、$y_2^{0.85}$、$y_2^{0.7}$、$y_2^{0.5}$、$y_2^{0.25}$ 及 x_2、$x_2^{0.85}$、$x_2^{0.7}$、$x_2^{0.5}$、$x_2^{0.25}$，代入非球面方程式 $y_2^2=2ax_2+(b-1)x_2^2+cx_2^3+dx_2^4+ex_2^5$ 就可得到五个关于 a、b、c、d、e 的五元线性方程式，用主元素消去法就可求得非球面的系数。

4．焦距修正

由给定的工作距 L 确定了非球面系数 a、b、c、d、e 后还需进行近轴光焦度的计算，如下式:

$$\frac{1}{f'}=(n-1)\left(\frac{1}{r_1}-\frac{1}{r_2}\right)$$
$$+(n-1)^2d/(nr_1r_2) \quad (12)$$

当不符合所要求的焦距时，用下式进行修正:

$$L^*=L\times\frac{f^*}{f'} \quad (13)$$

上式 f^* 是所要求的焦距; f' 是由给定的 L 求得的焦距; L^* 是修正后的工作距。

以 L^* 作物距重新求出非球面系数 a、b、c、d、e，这时得到的非球面方程是满足焦距要求的。

5．进行光线追迹

设非球面方程 $y^2=2ax+bx^2+cx^3+\cdots$，并由下列方程:

$$\operatorname{tg}\phi=\frac{dx}{dy}=\frac{y}{a+bx+\frac{3}{2}cx^2+\cdots}$$

$$I=\varphi-U$$

$$I'=\frac{n}{n'}I$$

$$U'=I+U-I'$$

$$(L'-x)\operatorname{tg}U'=y$$

分别求出 ϕ、I、I'、U'、L'。接着计算球面，由 L'、U' 与近轴光线计算得到的 l' 与 u'，l_p' 得到

球差: $LA'=l'-L'$

正弦差 $OSC=\frac{U'}{\rho u'}\left(1-\frac{LA'}{l'-l_p'}\right)-1$

ρ 为孔径分割系数。

参考文献

[1] C. E. Thomas; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 6, 1268.
[2] 王之江著;"光学设计理论基础",科学出版社,1965年, p. 13.