

文章编号: 1001-5078 (2005) 07-0524-03

脉冲激光测距系统中非球面物镜的设计

陈安健, 郑 炜

(厦门大学机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 简要介绍了脉冲激光测距的工作原理及其光电特性。并以总体设计所确定的初始结构参数为基础, 应用薄透镜系统的初级像差理论的 P、W 法实现非球面物镜的优化设计, 给出了满足系统要求的非球面物镜的像差结果。

关键词: 非球面物镜; 像差

中图分类号: 0435. 2; TQ320. 66

文献标识码: B

The Design of Nonsphere Objective in Pulse Laser Range System

CHEN An-jian, ZHENG Wei

(Dept of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen Univ. Xiamen 361005, China)

Abstract: The working principle and photoelectricity characteristics of the pulse laser range system are introduced. On the basis of the initial structure parameters which is defined by general design, the optimize design of nonsphere objective can be come true by using the P, W method of elementary aberration theory of the thin lens system. The objective structure and optical aberration which satisfy the system's demand are given.

Key words: nonsphere objective; aberration

1 引言

在激光测距中, 承担激光束发射和接收所用的光学物镜是整个测距系统的共同光窗, 它的成像质量的优劣决定了系统测距精度和背景噪声的程度。而非球面物镜是当今红外光电系统备受关注的的一个重要光学部件。本文就其非球面物镜的设计中所涉及的相关问题进行了分析讨论, 介绍了设计过程, 给出了结构参数和像差结果。

2 测距原理及其光电特性

2.1 测距原理^[1]

由 Nd:YAG 激光器对被测目标发射一个光脉冲, 然后接收目标反射回程的光脉冲, 通过测量光脉冲往返所经历距离 $2L$ 的时间 t , 算出目标的距离, 即:

$$L = ct/2$$

式中, $c = 3 \times 10^8$ m/s, 为光速。脉冲激光测距主要由四部分组成, 即激光器、激光发射系统、激光接收系

统和计数显示系统, 如图 1 所示。

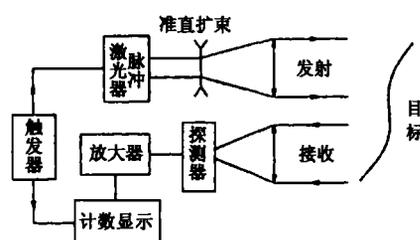


图 1 测距原理框图

激光发射系统的任务是发射峰值功率高(一般在兆瓦量级), 脉冲宽度窄(一般在几十纳秒量级), 发散角小(一般在 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ rad)的激光脉冲; 接收系统接收由目标漫反射回程的极弱的激光脉冲, 进入光电探测器, 把光信号转换为电脉冲信号并加以放大; 计数系统则对激光脉冲往返所经历时间进

作者简介: 陈安健, 男, 长期从事光学、光电及激光仪器的新光光学系统结构的研究, 开发设计与教学工作, 发表相关论文 23 篇, 现为厦门市仪器仪表学会, 机械工程学会会员。

收稿日期: 2004-10-08

行脉冲计数,进而显示所测距离。

2.2 光电特性

2.2.1 Nd YAG激光器

发射波长为 $1.06\mu\text{m}$,属近红外波段。由于激光器本身的结构特点,决定了激光束的光斑形状为具有长短轴的椭圆状。发射角一般为 $4 \sim 6\text{mrad}$ 左右,如此发散度的激光束是不能用于测距的,必须将激光束的发散角控制在 $0.5 \sim 1\text{mrad}$ 左右。故需有 10 倍光学天线予以压缩。

2.2.2 探测器

接收探测器的选用型号为 SPD - 052,它应满足二个条件:一是工作波段应与激光器的发射波长 $1.06\mu\text{m}$ 相匹配;二是接收漫反射的极弱回波光脉冲后,整形放大并转换为电脉冲信号的过程中噪声尽可能小。为此,其探测器光敏面的尺寸要小于聚焦光斑 2 。

3 非球面物镜总体设计

在绝大多数情况下,非球面均采用对光轴旋转对称的面形,即采用二次曲面。由 Nd YAG 的光电特性,可以得到非球面物镜^[2]的设计要求是:将从激光器发出的激光束(发光面积小,故可认为是点光源),经漫反射回程聚焦在硅雪崩光电探测器的敏感面上,要求光斑直径控制在 $1\mu\text{m}$ 以内。

当然对无像差系统而言,聚焦后的光斑直径亦不可能像几何光学所指出的为无穷小,而是受制于衍射极限的影响,由艾里斑大小所决定。

3.1 物镜焦距 f 的确定

激光束是 高斯光束,它的传播规律并不完全等同于几何光学,但在系统条件下,可认为用几何光学的近轴成像规律来近似的处理。由于通过物镜聚焦后的光斑直径,当在激光波长一定的情况下将正比于物镜焦距 f ,反比于通光孔径 D 。即由 $\frac{1}{z} - \frac{1}{z} = \frac{1}{f}$ 知,聚焦光点在 $z = f$ 的像方焦点上,虽然聚焦光点的大小是近似的,但实际应用中总有一定大小的光斑呈现。其光斑大小由式 $2 = -\frac{f}{z}$ 决定。因此,要获得系统高质量的聚焦光点,则一定要满足 $10 \sim 15\text{mm}$ 的短焦要求。同时,兼顾探测器光敏面与物镜的空间距离,又要顾及物镜所能承担的系统的发射和接收性能要求,故取焦距 $f = 15\text{mm}$ 。这时物镜

的工作距离(即与探测器光敏感面的距离)就可在 $10 \sim 15\text{mm}$ 的短焦下满足。

3.2 物镜相对孔径的确定

激光器所发出的高斯光束平行入射于物镜上,即入射光束的束腰远离物镜,也即此时 $z \rightarrow \infty$,经物镜聚焦后其聚焦光点在 $Z = f$ 的像方焦点上。但在实际设计中,聚焦光点不可能为 0,而呈现具有一定大小的光斑,亦即只有出射光束的束腰半径 $z = 0$,可获得高质量的高斯光束的聚焦光点,如图 2 所示。其束腰大小(即光斑直径)将由

$$2 = 2 \cdot f / \lambda < 1\mu\text{m}$$

决定。现取 $2 = 0.8\mu\text{m}$,将上述有关数据代入得到, $2 = 12.653\text{mm} = D$,物镜的相对孔径为 $2 / f = 1/1.18$ 。

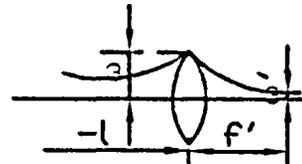


图 2 高斯光束的聚焦特性

3.3 激光束的整形及物镜的同轴要求

3.3.1 激光束的整形要求

由于 Nd YAG 激光器发出的激光束呈现 $1.0 \times 3.5(\mu\text{m})$,使得激光束的光斑形状为具短、长轴方向的椭圆,也即在短轴方向发散角约为 $\pm 5^\circ$ (0.0873rad),在长轴方向的发散角约为 $\pm 20^\circ$ (0.349rad)。因此不能直接发射这样品质的激光束,为获得一束在圆截面内有足够均匀幅值和相位的光束,激光束必须经过调制整形,即需通过伽利略或刻普勒式望远系统实现准直扩束,使发散角控制在 $\pm 5^\circ$ (0.0873rad) 以内,才能保证 $1\mu\text{m}$ 的聚焦光斑。

3.3.2 物镜的同轴要求

已知激光束的出射截面为 $1.0 \times 3.5(\mu\text{m})$,非常小,能量集中,可视为点光源。因此,物高及聚焦后的光斑直径大小对物镜的影响可不予考虑。但由于无法保证激光器的发光点正好位于光轴上;其次,由于物镜本身装配位置的倾斜,必然使光源点离轴。再者,由于光学冷加工工艺的缺陷,使物镜本体产生光学塔差。这些都使得光轴与机械轴不同轴,致使物镜将接收离轴光束。即轴外的成像光束对于非球面物镜在一定范围内所呈现出的轴外像差

必须重视。

3.4 非球面物镜的像差特性

由于相对孔径为 1.18 很大,担负的光束孔径角为 $u = \arcsin(0.42177)$,像高(聚焦光斑) $y = 0.4\mu\text{m}$,拉赫不变量 $J = nu y = 1 \times 0.42177 \times (4 \times 10^{-4}) = 1.7 \times 10^{-4} \text{mm}$ 。则有:

$$\bar{u} = u/h = 0.9995$$

$$\bar{w} = -2.35\bar{u} + 0.15 = -2.199$$

$$\bar{p}_{\text{min}} = S_{\text{min}} = p_0 - 0.4(\bar{u}^2 + \bar{w}) = p_0 - 0.7994$$

可见,球差较大,需重点校正。由于考虑到物镜对一定轴外点的光束成像及物镜的偏斜等因素,故还需校正慧差和轴外像差。即实际设计应将弥散斑直径控制在 $0.1\mu\text{m}$ 以下。

由于对非球面物镜的成像质量要求很高,因此,非球面的面形系数要选取准确,才能保证其面形精度。一般在像差设计中,用波像差来描述并控制在 0.25 以下必然完善成像。

3.5 非球面物镜的光学设计

从手册中选取一组初始结构参数,并在此基础上根据上述对物镜的设计要求进行具体设计。由于物镜工作在激光器发射波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的红外波段,故应选取与之相适应的 ZnSe 作为物镜的透射材料,折射率为 2.4,色散系数为 30.8。由式:

$$f = n\bar{r}_1 \bar{r}_2 / (n-1) [n(\bar{r}_1 - \bar{r}_2) + (n-1)d]$$

经适当计算,得到:

(1) $\bar{r}_1 = 21$, 代入解得 $r = (n-1)f = 21$;

(2) $\bar{r}_1 = -\bar{r}_2$, 将其代入上式,并考虑到 $2 = 12.653\text{mm} = D$ 的条件,解得 $\bar{r}_1 = -\bar{r}_2 = 40.799$ 。

计算表明, $r = 21$ 和 $r = 40.799$ 都能符合要求。为利于像差校正,宜取较大值 $r = 40.799$ 。为此,将初始结构参数按系统要求进行实际光线追迹计算,结果可知,要达到聚焦光斑为 $1\mu\text{m}$ 的设计要求,其球面系统的像质将受制于轴上点和轴外点的弥散斑。显然,球面物镜在系统情况下是无法使用的。若采用单透镜作物镜,必须将球面改为非球面,经计算证明达到了使用要求。因为球面只有一个参数 r 决定其面形,故此校正像差有很大局限性,同时又不希望过多的球面去满足较多的像差要求时,只能由非球面来承担。这是因为非球面的面形系数是由多个自由变量决定,因而能自动地校正慧差和象散,获得精确聚焦光点。

轴对称的二次曲面常作为非球面面形系数的首选,其坐标原点设在曲面顶点,非球面方程为:

$$x = \frac{(y^2 + z^2)}{1 + \sqrt{1 - k^2(y^2 + z^2)}} + \sum_{i=2}^n a_{2i}(y^2 + z^2)^i$$

式中, $k = 1 - e^2$ 为二次曲面系数; e^2 为离心率; k 为曲面顶点的曲率; a_{2i} 为高次曲面系数。实际设计中,常用其子午截线方程,即 $Z = 0$,则有:

$$x = \sum_{i=1}^n A_i y^{2i}$$

其中,同次数的 y 的系数有如下转换关系,即:

$$A_1 = 1/2r, A_2 = k/8r^3, A_3 = k^2 - r/10r^5, \dots$$

设计一般用到前二项系数,就可获得精确的非球面面形。通过对像差的设计、计算和控制并经多次迭代,最后将有关非球面结构参数进入非球面像差校正光路,并进行追迹计算,最后得到非球面物镜像差校正结果如下:

边缘球差: $L_m = 0.00183$

带光球差: $L_{0.707} = 0.000913$

子午场曲: $x_t = 0.038$

弧矢场曲: $x_s = 0.0411$

像差校正特性曲线如图 3 所示。轴上点弥散斑直径最大在 $1.08\mu\text{m}$ 以内,轴外点(即离轴)弥散斑直径也在 $0.92\mu\text{m}$ 左右,满足系统设计要求。

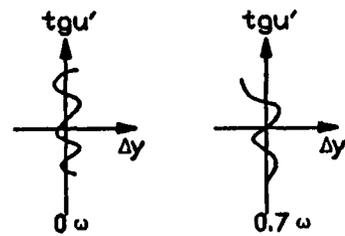


图 3 像差校正结果曲线

4 结 语

本文从激光测距原理、Nd:YAG 激光的光电特性,以及光接收探测器的性能要求出发,以薄透镜系统的初级像差理论的 P.W 法来实现非球面物镜的设计。结果完全满足系统要求。

参考文献:

[1] 陈安健,路晓东.一种新型军用激光测距系统的设计与研究[J].激光与红外,2001.2
[2] 袁旭沧,等.光学设计[M].北京:北京理工大学出版社,1988