

激光准直扩束光学系统研究

李成江 陆 鸣

(哈尔滨工业大学, 哈尔滨, 150006)

摘要: 结合高斯光束的传播特性, 本文提出了一种激光准直扩束光学系统设计参数的确定方法, 并给出了自校整空间位移测量仪中准直扩束系统的设计结果。

The study of optical system for aligning and enlarging a laser beam

Li Cheng jiang, Lu Ming

(Harbin Institute of Technology)

Abstract: Combined with the propagation property, a new method of deciding design parameters of an optical system for aligning and enlarging a laser beam is proposed in this paper, and a design result of an optical system in the self-proofreading instrument for measuring spacial displacement is given.

一、引

随着激光技术的发展, 激光由于具有光能量集中、方向性和单色性好等特点, 被广泛用作光学干涉计量的光源。光学干涉仪中由激光器出射的激光需经过准直扩束才能满足要求。但是, 一方面激光光束既不是平面波, 也不是球面波, 在凹型激光谐振腔中是一种所谓高斯分布的光波; 另一方面, 由于高斯光束的干涉将产生一个附加位相差^[1], 在光学干涉仪中需要用对激光进行准直扩束、压缩远场发散角的方法来减小因该附加位相差引起的测量误差。因此, 对激光准直扩束光学系统设计参数的确定方法提出了较高的要求, 不能简单地用普通光学系统设计参数来代替激光准直扩束系统的设计参数, 更不能采取实验室中常用的倒置望远镜系统来达到对激光准直扩束的目的。本文结合高斯光束的传播特性, 提出了一种激光准直扩束系统设计参数的确定方法, 并给出了自校整空间位移测量仪^[2]中激光准直扩束光学系统的设计结果。

二、高斯光束通过光学成像系统的变换^[3]

如图 1, 设在物方 s_0 处有一等相面为平面, 腰斑半径为 w_0 的高斯光束。经一传播矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$$

的光学系统后, 仍为高斯光束, 但在象方 s_1 处有新的腰斑半径 w_1 。由矩阵光学可以推导出下列公式

$$s_0 m_{11} + s_1 m_{22} + s_0 s_1 m_{21} m_{12} = - \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda} \right)^2 \frac{m_{21} (m_{11} + s_1 m_{21})}{m_{22} + s_1 m_{21}} \quad (1)$$

$$w_1 = w_0 |m_{11} + s_1 m_{21}| \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda} \right)^2 \frac{m_{21}^2}{(m_{22} + s_1 m_{21})^2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中, λ 为激光波长。(1)式为在一般情况下高斯光束的成像公式, 当传播矩阵 M 为已知时, 它给出象距 s_i 和物距 s_o 间的函数关系。(2)式为高斯光束的物象比例公式, 它给出了 w_o 和 w_i 间的函数关系。

当光学系统为一焦距为 f 的薄透镜时, 传播矩阵可表示为

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix}$$

将 M_1 代入(1), (2)式中, 得到高斯光束经单薄透镜成像公式和物象比例公式

$$\frac{1}{s_i} = \frac{1}{f} - \frac{s_o - f}{z_o^2 + s_o(s_o - f)} \quad (3)$$

$$w_i = w_o \frac{f}{[z_o^2 + (s_o - f)^2]^{1/2}} \quad (4)$$

式中, z_o 为瑞利长度, 且

$$z_o = \pi w_o^2 / \lambda \quad (5)$$

三、激光准直扩束光学系统设计参数的确定方法

1. 高斯光束参数的确定

激光器的激光管腔长 l , 两反射镜半径分别为 R_1, R_2 (出射面半径), 由激光光学可知

$$w_o^4 = \frac{\lambda^2}{\pi^2} \lim \frac{l(R_1 - l)(R_2 - l)(R_1 + R_2 - l)}{(R_1 + R_2 - 2l)^2} \quad (6)$$

束腰距出射面的距离为

$$r = \lim \frac{l(R_1 - l)}{R_1 + R_2 - 2l} \quad (7)$$

当薄透镜焦距 f 一定时, 将(4)式对 s_o 求一阶偏导数, 得到

$$\frac{\partial w_i}{\partial s_o} = \frac{w_o f (f - s_o)}{[z_o^2 + (s_o - f)^2]^{3/2}} \quad (8)$$

由(8)式可以得出结论, 当 $s_o > f$ 时, w_i 随 s_o 的减小而单调增加; 当 $s_o < f$ 时, w_i 随 s_o 的增大而单调增加; 当 $s_o = f$ 时, w_i 达到极大值, 由(4)式可求出

$$w_{i, \max} = \frac{\lambda f}{\pi w_o} \quad (9)$$

将 $s_o = f$ 代入(3)式, 得: $s_i = f$

另外, 对远场发散角 θ_0 与准直扩束后激光在距离 z 处的光斑直径 D 有

$$\theta_0 = \lambda / (\pi w_i) \quad (10)$$

$$D = 2w_i \sqrt{1 + (z/z_o)^2} \quad (11)$$

可见, 如将高斯光束中入射光束和出射光束的束腰比作几何光学中傍轴光线的聚焦点, 高斯光束经透镜变换后的聚焦特性与普通几何光学中傍轴光线的聚焦特性的差异是很大的。当

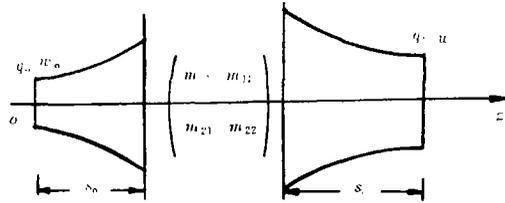


Fig. 1 The transformation of Gaussian beam via an optical system

入射高斯光束的束腰位于透镜左方焦点附近时,出射高斯光束的束腰并不在无穷远,而是位于透镜右方焦点附近; w_1 达到极大值时,远场发散角 θ_0 达到极小值,是理想的准直扩束条件。

2. 光学系统参数的确定

为方便起见,以下设计时将准直扩束光学系统进行倒置计算,即将物方与象方互相颠倒计算。

① 物方孔径角 U_0

因为准直扩束后激光光束近似地可以视为平行光,故取

$$U_0 = 0 \quad (12)$$

② 光线在物方入射参考面上的半高度 H_1

当由设计要求确定准直扩束后激光束腰斑半径 $w_{1,max}$ 之后,取

$$H_1 = w_{1,max} \quad (13)$$

③ 光学系统焦距 F

由高斯光束参数的确定公式(9)可知

$$F = \frac{\pi}{\lambda} w_0 w_{1,max} \quad (14)$$

④ 视场角 UPO

$$UPO \approx \frac{\text{光源直径}}{2 \times \text{焦距}} \quad (15)$$

四、设计实例

自校整空间位移测量仪中双频氦氖激光(波长 λ 为 $0.6328\mu\text{m}$)光束经单模保偏光纤(芯径为 $2.5\mu\text{m}$)耦合光学系统^[4]聚焦并由光纤端面出射后其束腰为 $1.12\mu\text{m}$,要求准直扩束后进入干涉仪时激光光斑直径为 6mm ,在空间传播 31m 距离后光斑直径不大于 8mm 。

由此可以确定高斯光束参数为

$$w_0 = 1.12\mu\text{m}, w_{1,max} = 3\text{mm}, z = 31\text{m}, D \leq 8\text{mm}, \lambda = 0.6328\mu\text{m}.$$

将上述参数代入光学系统设计参数的确定公式得到

$$U_0 = 0, H_1 = 3\text{mm}, F = 16.83\text{mm}, UPO = 0.004^\circ (\text{实际设计时取 } 0.1^\circ)$$

将该组参数代入(10),(11)式,得到:高斯光束准直扩束后的远场发散角 $\theta_0 = 6.7 \times 10^{-6}$ rad;高斯光束在空间传播 31m 距离后光斑直径 $D = 7.30\text{mm}$ 。可见经准直扩束后激光束近似为平行光,且光斑直径小于 8mm ,满足设计要求。

设计准直扩束光学系统时,因为光源为单色光源,无需校正色差,只需校正球差、慧差和波差。表1为双分离光学系统自动优化设计后的结构参数。

Table 1 The structural parameters of an optical system for aligning and enlarging a laser beam

surface number	radius	axial interval	name of glass	half of clear aperture
1	9.94	0.00		3.00
2	-15.76	4.50	ZF1	2.52
3	-11.16	0.60		2.34
4	-42.59	1.40	ZF7	2.22
5	0.00	12.12		0.03

图2为象差曲线。可见,光学系统球差、慧差、波差均满足使用要求。

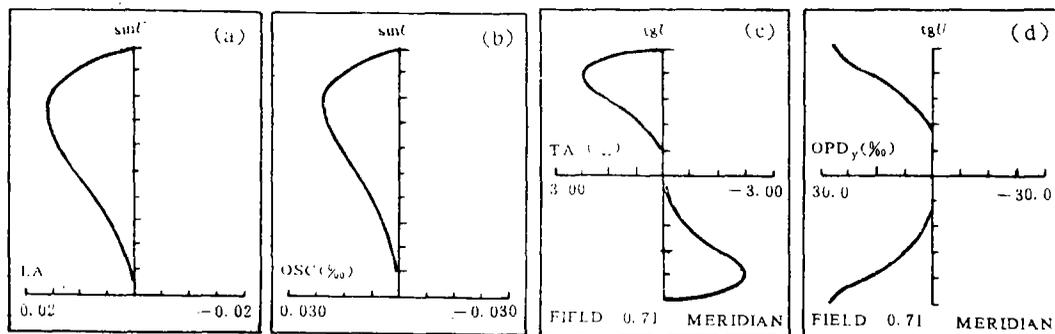


Fig. 2 The aberration curves

a—spherical aberration b—comatic aberration c—lateral aberration d—wave aberration

Table 2 The centered tolerances

SUR	RADIUS	RADIUS TOL	FRINGES POW/IRR	THICKNESS	THICKNESS TOL	GLASS
1	9.6359	0.0385	6.8/0.22			
2	-15.7593	0.0583	2.8/0.22	4.5000	0.0819	ZF1
3	-11.1641	0.0249	1.9/0.18	0.6000	0.0098	
4	-42.5914	1.1256	5.3/0.18	1.4000	0.3982	ZF7

表2为准直扩束光学系统公差容限表,可以看出该双分离透镜系统对加工公差容限要求并不高,说明设计是实用的。

参 考 文 献

- [1] 叶声华. 激光在精密计量中的应用. 北京:机械工业出版社, 1980
- [2] 李成江. 自校整空间位移测量仪精度分析及耦合光学系统设计. 长春光机学院硕士论文, 1989
- [3] 吕百达. 激光光学. 成都:四川大学出版社, 1986
- [4] 李成江. 单模保偏光纤光学耦合系统设计. 长春光机学院学报, 1991, 14(2)

* * *

作者简介:李成江,男,1962年出生。助理研究员。现从事科研工作。

陆 鸣,女,1963年出生。讲师。现在哈尔滨工业大学管理学院从事教学工作。

收稿日期:1993年1月4日。

· 产品简讯 ·

准直的可见光激光器组件

已准直的小型可见光激光器组件系统可由应用激光系统公司(Applied Laser System)提供,其尺寸为 $\varnothing 0.375'' \times 0.710''$ 。组件包括一个5mW的二极管激光器(670nm),准直光学系统和全集成的面板安装的驱动电路。VLM-3型光束指向精度在组件轴向上15弧分以内,是为节省空间的应用而设计的,如条形码扫描器、激光目标指示、X射线定位系统、机床等。

译自 L & O, 1993; 12(4): 19 邹福清 译 刘建卿 校