

激光标线器非球面柱透镜设计

肖孟超^{1,2}, 姜耀亮¹, 檀慧明¹, 钱龙生¹

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 针对基模能量高斯分布造成的激光标线器线斑能量分布不均匀的问题, 提出了一种非球面柱透镜的解决方法。该方法不同于传统的旋转对称整形系统的设计, 属于非对称整形系统的设计范畴。根据光束传输的能量分配守恒法则和折射定律建立方程组, 通过数学软件数值求解方程组, 解得非球面矢高表达式。光学软件模拟表明, 所设计的非球面柱透镜能使线斑能量均匀分布, 工作距离范围宽, 不仅适用于准直入射高斯光束, 而且适用于会聚入射高斯光束。

关键词: 激光标线器; 非球面柱透镜; 光学设计

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2007)04-0518-03

Optical design of aspheric column lens of laser beam line generator

XIAO Meng-chao^{1,2}, JIANG Yao-liang¹, TAN Hui-ming¹, QIAN Long-sheng¹

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China;

2.Graduate University of Chinese Academic of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Aimed at nonuniform line laser beam distribution caused by Gaussian distribution of incident fundamental mode, a method based on aspheric column lens is presented in this paper. The method is different from that of traditional revolving symmetrical design of shaping system. It is an asymmetrical design. The expression of aspheric surface is obtained by solving numerically equations based on law of conservation of energy and refraction law by mathematical software. Simulation by optical soft indicates that the aspheric column lens does well in averaging the line beam distribution and has a wide work distance. It not only can be applicable to incident collimate Gaussian beam, but also can be applicable to incident convergent incident Gaussian beam.

Key words: Laser line generator; Aspheric column lens; Optical design

0 引 言

世界上第一台激光器诞生于 1960 年, 我国于 1961 年研制出第一台激光器, 40 多年来, 由于激光单色性好、方向性强、相干性及亮度高等优点^[1], 激光技术与应用得到了迅猛发展, 已与多个学科相结合形成多个应用技术领域, 迅速推动着传统产业和新兴产业

的发展。目前, 市场上出现了一种激光标线器, 被广泛应用于工业机械、电动工具、建筑装璜等领域的机械板金标线、电锯锯物标线、木锯加工定位、切割机切割标线、石材切割定位、木工机械、玻璃加工机械、电子、印刷网版标线定位、纺织印染、成衣定位、轮胎定位校正等方面。这种激光器先是用红光波段的半导体激光器作为光源。后来半导体泵浦的固体激光器也涉足此

收稿日期: 2006-09-08; 修订日期: 2006-10-18

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2002AA311140)

作者简介: 肖孟超 (1980-), 男, 江西南昌人, 博士, 主要从事固体激光器的热分析及其稳定性的研究。Email: xiaomengchao@sohu.com

导师简介: 钱龙生 (1950-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光薄膜器件研制、薄膜特性测试、淀积后的激光处理及全光信息处理系统中的薄膜器件的研究。

领域。由它做成的激光标线器有更好的光斑质量(方向性好、线斑宽度窄)。文中以半导体泵浦的固体激光器为激光标线器的光源。

1 研究背景

激光标线器运行原理如图1所示,柱透镜将经过扩束准直系统的基模高斯光束在单方向上进行拉长,在远处形成线状光斑。激光标线器的光学设计请参阅参考文献[2]。文中只讨论在此类设计的基础上如何提高激光标线器线斑能量分布的均匀性。

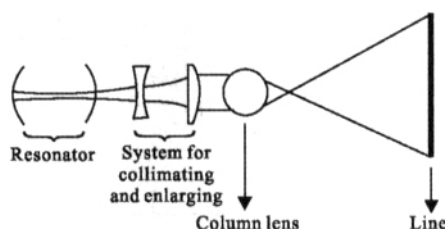


图1 激光标线器原理图(子午面)

Fig.1 Laser line generator principle figure (meridian plane)

由于基模高斯光束能量分布呈高斯分布,使得形成的线状光斑中心亮,两端暗,严重影响了线斑的质量和美观。如何将基模高斯光束整形成平顶光束(能量均匀分布的准直光束),已有很多专题的报道。整形方法有:几何光学整形^[3]、计算机全息图整形^[4]和傅里叶光学整形^[5]等。这些方法可给激光标线器的柱透镜提供平顶入射光,达到均匀分布线斑能量的目的。但由于这些方法需要两个或两个以上的非球面或全息干板、较高的安装精度,其使用受到限制。Shizhe shen提出了一种针对发散光源(只扩束未准直)的双柱面棱镜法。该方法所得作用视场只能达到单一柱面作用下的一半。文中提出了一种非球面柱透镜的方法,不同于参考文献[3]~[5]旋转对称整形系统的设计,属于非对称整形系统的光学设计。利用非球面柱透镜将距离系统某一作用距离处的线斑能量均匀分布。通过光学软件模拟显示,该作用距离的前后,线斑的能量分布略有变化,但变化缓慢,基本不影响线状光斑能量均匀性要求。且在改善线斑能量均匀性的同时,不会减小线斑的作用视场。

2 非球面柱透镜设计

设计参数定为:入射准直高斯光束束腰 $\omega_0=2\text{ mm}$;波长为 532 nm 。柱透镜用K9玻璃,半径为 3 mm 。 532 nm 的入射光束折射率 $n=1.516\ 374$;工作距离(线斑距离柱透镜前表面距离) $d=4\ 000\text{ mm}$;线斑半宽

$Y_{\max}=2\ 000\text{ mm}$;线斑Y向上光强 I_Y 为一常数。

如图2所示,入射准直高斯光束经非球面柱透镜后,其x向行进方向及能量分布不被作用,只在y向上被拉伸成一条能量均匀的线斑。

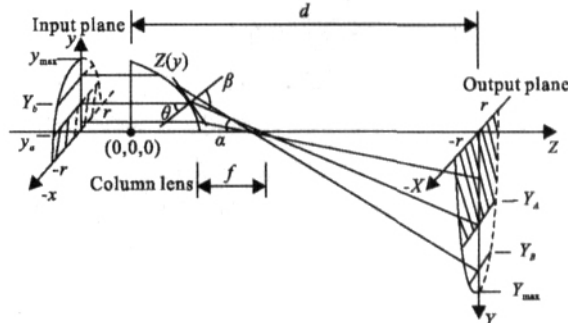


图2 能量分配图

Fig.2 Figure of energy distribution

入射圆斑y向上光强分布为:

$$I_y = \exp(-2y^2/\omega_0^2) \quad (1)$$

式中: I_y 为规一化的高斯光强分布,其规一化不会影响非球面的设计。如图2所示,根据能量分配守恒法则,入射平面y向上单位宽度内 y_a 以下部分的能量应与出射平面Y向上单位宽度内 Y_A 以下部分的能量相等。入射平面y向上单位宽度内 y_b 以下部分的能量应与出射平面Y向上单位宽度内 Y_B 以下部分的能量相等。由此能量分配方式,可建立如下关系式:

$$1 \times \int_0^y \exp(-2y^2/\omega_0^2) dy = I_y Y \times 1 \quad (2)$$

由公式(2)可得:

$$I_Y = \int_0^{y_{\max}} \exp(-2y^2/\omega_0^2) dy / Y_{\max} \quad (3)$$

式中: y_{\max} 为能进入柱透镜的高斯光束的最大口径,与柱透镜半径 3 mm 相等。公式(2)、(3)中的积分函数为高斯函数,不可积,须先进行多项式拟合,然后再积分。代入 $\omega_0=2\text{ mm}$,拟合得:

$$\begin{aligned} \exp(-2y^2/\omega_0^2) &= 0.000\ 286\ 7y^9 - 0.004\ 432y^8 + \\ &0.026\ 83y^7 - 0.074\ 12y^6 + 0.063\ 38y^5 + \\ &0.078\ 97y^4 + 0.019\ 64y^3 - 0.504\ 5y^2 + \\ &0.000\ 434\ 4y + 1 \end{aligned} \quad (4)$$

将 $y_{\max}=3\text{ mm}$, $y_{\max}=2\ 000\text{ mm}$ 及公式(4)代入公式(3)积分后得:

$$I_Y = 6.223\ 378\ 328\ 571\ 45 \times 10^{-4} \quad (W/\text{单位面积}) \quad (5)$$

将公式(4)和(5)代入公式(2)积分后得:

$$Y=4.606\ 8\times 10^{-6}y^{10}-7.912\ 7\times 10^{-5}y^9+5.463\ 3\times 10^{-4}y^8-1.703\ 2\times 10^{-3}y^7+1.703\ 2\times 10^{-3}y^6+2.538\ 8\times 10^{-3}y^5+7.873\ 5\times 10^{-4}y^4-0.027y^3+3.490\ 1\times 10^{-5}y^2+0.160\ 7y \quad (6)$$

公式(6)为根据能量分配守恒得到的能量分配关系式。为了表达简洁,式中的多项式系数只给出了前4位小数。在实际的计算中,为不影响精度,4位以后的小数并未舍弃。

$Z(y)$ 为非球面柱面的矢高, θ 为入射角,则有:

$$\frac{dZ(y)}{dy}=-\tan(\theta) \quad (7)$$

由折射定律得知:

$$n\sin(\theta)=\sin(\beta) \quad (8)$$

式中: β 为折射角。由三角关系得知:

$$\theta+\alpha+\pi-\beta=180^\circ \quad (9)$$

式中: α 为柱透镜的折射光线与光轴的夹角。根据图2,可得出如下关系式:

$$\tan(\alpha)=\frac{Y+y}{d-Z(y)} \quad (10)$$

由公式(7)~(10)可推出:

$$\frac{dZ(y)}{dy}=-\frac{\sin\left(\arctan\left(\frac{Y+y}{d-Z(y)}\right)\right)}{n\cos\left(\arctan\left(\frac{Y+y}{d-Z(y)}\right)\right)} \quad (11)$$

上式为由折射定律推出的含有非球面矢高函数在内的光路追迹表达式。它将与能量分配关系式(6)联立推得非球面矢高表达式。将公式(6)代入公式(11)进行数值微分(解析解不可求)可得非球面矢高表达式:

$$Z(y)=1.702-0.382\ 9y^2+0.064\ 19y^4-0.012\ 47y^6+0.001\ 678y^8-0.000\ 127y^{10}-0.000\ 004y^{12} \quad (12)$$

3 非球面柱透镜执行结果模拟

根据公式(12)的非球面矢高表达式,可用光学软件模拟非球面柱透镜执行情况。图3为不同条件下得到的线斑照度模拟图。曲线a为球面柱透镜所成线斑照度图,和入射高斯光束能量分布一样,线斑照度呈高斯分布。曲线b、c、d、e为非球面柱透镜所成线斑照度模拟图,线斑照度在线长范围内几乎为一正值,说明非球面的引入使线斑能量得到了均匀分布。曲线b、d、e分别为工作距离为2、4、6 m时测得的线斑

照度模拟图。线斑照度分布曲线都较平直。表明公式(12)适用于不同的工作距离。在设计激光标线器时,为了在工作距离处线斑较窄,柱透镜前的入射光束通常不是准直的光束,而是束腰在工作平面上的会聚高斯光束。曲线c形成的条件与d相同,同样是4 m的工作距离。只是曲线c的入射光束是束腰在4 m远的工作平面上的会聚高斯光束,而曲线d的入射光束是准直的高斯光束。曲线c的线斑照度分布曲线与曲线d一样平直,说明针对准直入射高斯光束设计的非球面柱透镜同样适用于会聚入射高斯光束。

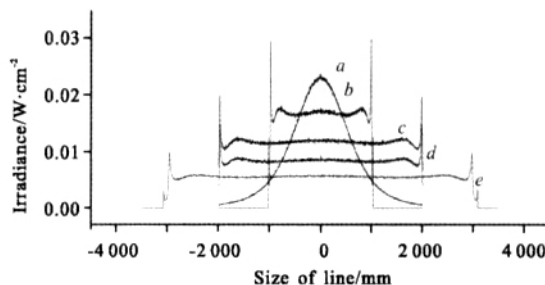


图3 线斑能量模拟图

Fig.3 Simulated figure of line irradiance

4 结 论

通过能量分配的守恒法则和光线折射定律建立方程组,求解得到了能使线斑能量均匀分布的非球面矢高表达式。通过光学软件模拟证实,非球面柱透镜法能使线斑能量得到很好的均匀分布。工作距离范围宽,适用于准直、会聚的入射高斯光束。较之先整形为平顶光束后用球面柱透镜拉伸的方法所用非球面少,更易装调。较之双柱面棱镜法整形效果好,能在短的工作距离上得到很长的线斑。不失为一种可行的方法。

参考文献:

- [1] MENG Xian-feng, LU Chun-hua, NI Ya-ru, et al. Application and protection of laser technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(2): 136-141. (in Chinese)
- [2] LI Yu-fei, HOU Xue-yuan, SUN Yu-ming, et al. Optical design of laser indicator [J]. Journal of Shandong University, 1999, 34(4): 441-444. (in Chinese)
- [3] SHEALYD L. Theory of geometrical methods for design of laser beam shaping systems [C]//Proceedings of SPIE, Laser Beam Shaping, 2000, 4095: 1-15.
- [4] HAN C Y, ISHII Y, MURATA K. Reshaping collimated laser beams with Gaussian profile to uniform profiles [J]. Applied Optics, 1983, 22(22): 3644-3647.
- [5] DICKEY F M, HOLSWADE S C. Gaussian laser beam profile shaping [J]. Opt Eng, 1996, 35(11): 3285-3295.