

· 光学技术 ·

激光测距仪用非球面准直透镜优化设计

樊玉赢¹, 孙杰¹, 安亮¹, 陈平²

(1.天津理工大学 电子信息工程学院, 天津 300384; 2.天津理工大学 计算机与通信工程学院, 天津 300384)

摘要: 针对激光测距仪使用的650 nm激光二极管光源的远场发散角特点, 结合非球面光学设计理论, 使用ZEMAX软件模拟计算了非球面透镜准直系统成像像差并进行了最优化, 设计出非球面准直整形系统, 给出了系统数据、点列图、横向像差特性曲线和光程差仿真图。给出了一种采用非球面透镜准直系统对激光二极管的发散角进行压缩准直的设计。由计算结果可知, 准直整形后的最大发散角压缩为0.199 9 mrad, 相应的光斑更均匀, 能量利用率提高。给出的光学系统结构简单、制作方便、具有很好的球差校正能力、成像精度高且使用方便。

关键词: 激光测距; 非球面准直透镜; ZEMAX; 发散角

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)06-0022-04

Optimum Design of Aspheric Collimating Lenses in Laser Range Finders

FAN Yu-ying¹, SUN Jie¹, AN Liang¹, CHEN Ping²

(1. School of Electronics Information Engineering, Tianjin University of Technology; Tianjin 300384, China;

2. School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology; Tianjin 300384, China)

Abstract: According to the characteristics of divergence angles in far field from 650 nm laser diode light source used in laser range finders and integrated with the theory of aspheric optics design, the image aberration of the aspheric collimating lens is simulated and calculated by ZEMAX software and the optimum design is performed. The aspheric collimating and shaping system is designed. The system data, spot diagrams, characteristic curves of transverse ray aberration and simulation diagrams are given. A design method which uses the aspheric lens collimating system to compress and collimate the divergence angles of laser diodes is given. The calculation result indicates that the maximum divergence angle after collimated and shaped is compressed into 0.199 9 mrad. The relative light patch becomes more uniform and the energy efficiency is improved. The given optical system has the characteristics of simple structure, easy to produce, excellent spherical aberration correction ability, high imaging accuracy and easy to use.

Key words: laser ranging; aspheric collimating lens; ZEMAX; divergence angle

激光测距法具有精度高、分辨率高、探测距离远、抗干扰能力强等优点, 被广泛地应用于工业生产、航空航天控制、大地探测和机器人控制技术等领域。激光测距仪使用的光源常采用半导体激光二极管(LD), 但半导体LD输出的光束在垂直于结平面方向和平行于结平面方向是非对称的, 输出光束为像散椭圆高斯光束。光束截面分布不均衡, 给光电测量带来困难, 需对发散角进行准直整形, 才能满足测量仪器使用要求。目前有多种准直方法可减小光束

发散角, 比如望远镜系统的准直^[1]、光纤微透镜耦合系统的准直^[2]等。但是这些方法大都结构复杂, 不能满足仪器小型化、模块化要求。而参考文献[3]中提到的采用单透镜进行准直, 虽有利于小型化, 但存在严重的像差, 不利于激光测距仪的信号接收等, 无法满足精度的要求。为满足激光测距仪的便携式和高精度的应用需求, 提出了采用非球面透镜准直的方法, 减少了采用球面透镜产生的球差问题, 有效地改

收稿日期: 2012-10-08

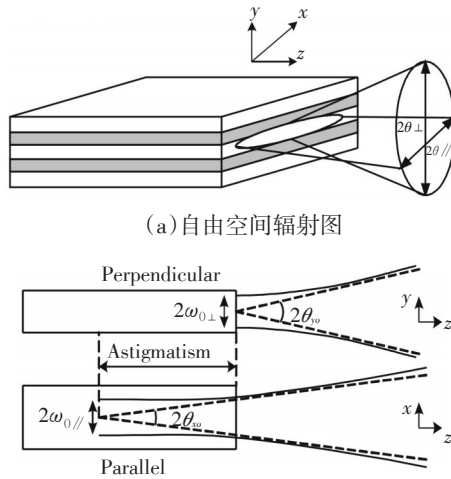
基金项目: 中国博士后科学基金(20090460691); 中国国家基础研究项目(9732010CB327801)

作者简介: 樊玉赢(1987-), 女, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 主要从事光电通信方面的研究。

善了光学系统像质。

1 半导体LD发射光束性质

半导体LD有源层很薄,在垂直于结平面和平行于结平面两个方向上的发光面尺寸不同,故LD发射光束的角度也随之不同。 y 方向发光面尺寸较小,对应较大的发散角; x 方向发光面尺寸较大,对应较小的发散角,即 $\theta_{y0} > \theta_{x0}$ 。因此,LD输出光束为具有一定像散的椭圆高斯光束,如图1所示。



(a)自由空间辐射图

(b)在相互垂直的两个方向上光束发散特性

图1 半导体LD的光束发散特性

高斯光束远场发散角 θ 的定义为:当 $z \rightarrow \infty$ 时(远场)高斯光束强度减小到中心最大值的 $1/e^2$ 处与 z 轴交点的夹角即^[4]

$$\theta_{rad} = \arctan\left(\frac{\lambda}{\pi\omega_0}\right) \approx \frac{\lambda}{\pi\omega_0} \approx \sqrt{\frac{2\lambda}{\pi b}} \quad (1)$$

又有

$$\omega = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, z_0 = \frac{b}{2} \quad (2)$$

其中, $b = \frac{2\pi\omega_0^2}{\lambda}$ 。

设快轴束腰位于LD的出射端面处,慢轴束腰位于LD内距离出射端面 a 处,由式(2)有

$$\omega_x(a) = \omega_{x0} \left[1 + \left(\frac{-a\lambda}{\pi\omega_0^2}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由式(3)可推得LD的像散值为

$$a = \frac{\pi\omega_0}{\lambda} \left[\omega_x^2(a) - \omega_{x0}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中, $\omega_x(a) = \frac{x \text{方向发光面宽}}{2}$ 。

半导体LD所发出的光束具有发散角大、在垂直于结平面方向和平行于结平面方向发散角不相等、远场光斑为椭圆形的特点。在激光测距仪中为了使发散角光能量集中、传播距离更远,因此需要利用发射光学系统对半导体LD发出的光束进行准直整形。有时,在设计光束整形系统时将LD近似看成一个无像散的点光源^[5],半导体LD输出光波的单色性较好,因此透镜的色差可以不必考虑,但在一般情况下,为了准确地设计系统,保证出射光束的质量,则不能忽略像散。

2 激光测距原理

2.1 测距目标

激光测距是将激光投射到目标物体表面,然后通过测量目标物体上反射光束到达目标物体的时间来计算出激光测距与目标物体之间的距离。所以,估算目标的反射截面是十分重要的。这里,采用微波雷达截面的概念来表征目标散射能力。定义目标截面 σ 为截取这样大小功率的面积,即当所有方向上的散射都相同时,该功率在接收口径产生的散射功率密度等于目标产生的散射功率密度

$$I_\sigma = I_r(4\pi z^2) \quad (5)$$

式中, I_σ 为入射到目标的信号强度; I_r 为在距离 z 处的散射强度; $4\pi z^2$ 为离开 z 处的球面积。

工程上根据目标物体光学特性,目标可以分为镜面目标、漫反射目标、朗伯面目标、点目标、扩展目标等几种。对于激光测距仪来说,通常目标为漫反射目标和镜面目标。

2.2 激光测距性能方程

激光测距性能方程通常用来测量在对某个目标接收功率,其标准形式为^[6]

$$P_R = \frac{P_T}{\Omega_T R^2} \times \rho A_r \times \frac{A_c}{\Omega_R R^2} \times T_a T_\lambda T^2 \quad A_c < \Omega_R R^2 \quad (6)$$

式中, P_R 为接收光功率; ρ 为目标物的反射率; P_T 为激光器发射光功率; T_a 为发射光学系统的透过率; T_λ 为接收透镜的透过率; T 为空间传输透过率; A_c 是接收有效孔径面积; A_r 是目标有效面积; Ω_T

是发射波束立体角; Ω_R 是目标反射波立体角。其中发射立体角 $\Omega_T = \pi(\frac{\theta}{2})^2$, 反射立体角 $\Omega_R = \frac{\lambda^2}{A_r}$ 。

在测距方程中可以看到: 随着目标距离 R 的增大, 激光测距系统接收到的目标回波功率迅速缩小; 当被测目标物体一定时, 为了保证一定的接收功率, 发射功率 P_T 与发散角 θ 成正比。因此, 为了保证有足够的回波接收功率, 需要对激光进行准直。

3 透镜设计

3.1 非球面方程

设光轴为 z 轴, 即非球面的对称轴, 坐标原点取在顶点。非球面的标准方程如下^[7]

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_{2i}r^{2i} \quad (7)$$

式中, $r^2 = z^2 + y^2$; Z 为镜面的凹陷度; r 为镜面的孔径半径(如图2); c 为曲率半径的倒数; A 为 r 的各阶系数; k 为曲面的圆锥系数; 当 $A=0$ 时, 方程变为二次曲面方程

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} \quad (8)$$

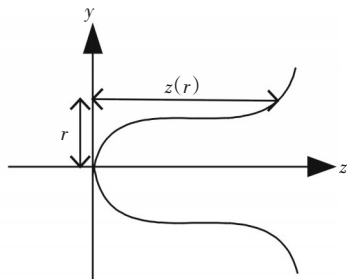


图2 镜面的凹陷度与半径 r 的示意图

3.2 透镜准直的计算方法

由高斯光束束腰的变换关系式可以得出高斯光束的发散角^[8]

$$\theta'_0 = \frac{2\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi\omega_0}{\lambda}\right)^2} \quad (9)$$

式中, l 为入射高斯光束束腰到透镜的距离; F 为透镜焦距; λ 为中心波长; ω_0 为入射高斯光束束腰。可以看出, 无论 F , l 取什么数值都不可能使 $\theta'_0 \rightarrow 0$, 这表明单透镜无法将高斯光束转换成平面波。但可以尽可能地改善高斯光束的方向性。 $l=F$ 时, 像方

高斯光束束腰 ω'_0 达到极大值: $\omega'_0 = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} F$, 从而可得发散角极小值^[8]

$$\theta'_0 = 2 \frac{\lambda}{\pi\omega'_0} = 2 \frac{\omega_0}{F} \quad (10)$$

这时, 通过透镜可以使发散角达到最小, 获得最好的准直效果。

采用的半导体 LD 型号为 L650P007, 中心波长为 650 nm, 输出功率为 7 mW, 垂直于结平面方向和平行于结平面方向发散角分别为 30° 和 8° 。

出射高斯光束束腰半径为

$$\omega_0 = \frac{2\lambda}{\pi\theta_0} \approx 0.7886 \mu\text{m} \quad (11)$$

式中, λ 为 650 nm; θ_0 为激光二极管出射的发散角 0.525 rad。若要求远场发散角达到 0.2 mrad, 则像方高斯光束束腰 ω'_0 必须大于 2.07 mm。

根据像方高斯光束束腰与单透镜焦距的关系式^[8]

$$\omega'_0 = \frac{\lambda}{\pi\omega_0} F \quad (12)$$

可以得到单透镜焦距 $F \geq 7.89 \text{ mm}$ 。

4 透镜成像仿真

采用光学设计程序 ZEMAX 来进行准直透镜的仿真模拟, 软件版本为 February 3, 2005。根据光路可逆的原理进行透镜设计: 即考虑一束准直光经过透镜后汇聚的问题。文中使用了 7.5~8.5 mm 焦距的 RMS 数值, 绘制出的焦距与 RMS 点列图的关系曲线如图3所示。RMS 点尺寸是径向尺寸的均方根, 数值越小说明聚焦效果越好。

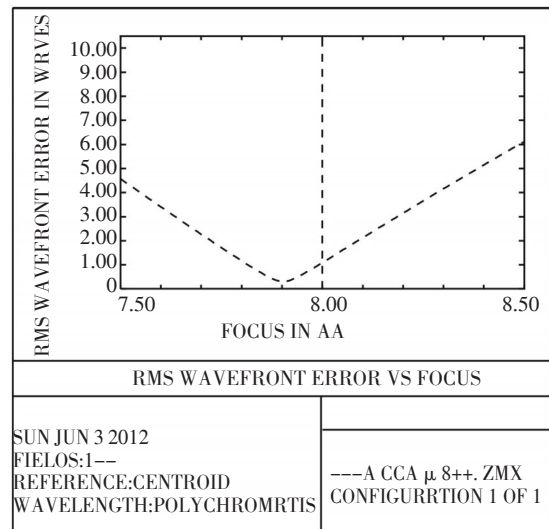


图3 焦距与 RMS 点列图曲线

由图3可以看出,焦距在7.890 004 mm时,RMS达到最小值,也就是聚焦效果最好,即此处准直效果可达到最好。

通过运用ZEMAX强大的优化函数,计算出系统焦距为7.890 004 mm,通光孔径为4 mm的非球面透镜的前后表面半径分别为6.370 712 mm和-9.996 805 mm,厚度为2 mm,透镜介质采用光学玻璃BK7,系统的结构图如图4所示,应用于激光测距仪准直时,应将光路倒置。

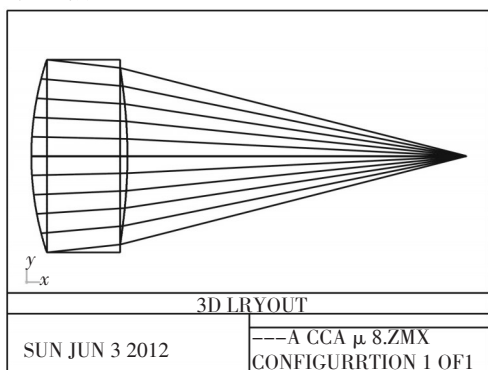
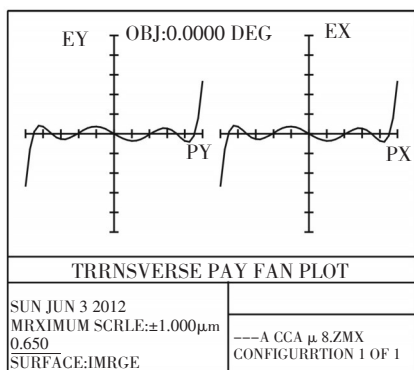
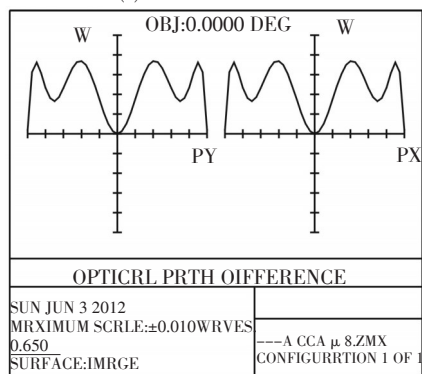


图4 准直透镜的结构图

优化后的像质分析图如图5所示,其中Ray的MAXIMUM SCALE为 $\pm 1 \mu\text{m}$,OPD的MAXIMUM SCALE为 $\pm 0.01 \text{ waves}$,且其点列图如图6所示,可见聚焦情况很好,像差控制很理想。



(a) 横向像差特性曲线



(b) 光程差

图5 像质分析图

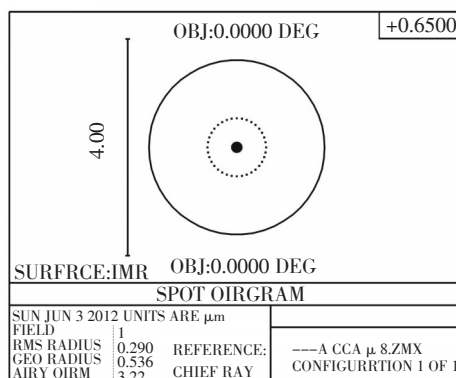


图6 点列图

通过ZEMAX软件的模拟,从Ray Trace Data中得出了设计光路中的发散角为 $28.515\ 853\ 066^\circ$,与选用的激光二极管的发散角度相近,因此可以用文中设计的透镜进行准直。

若采用球面透镜则会出现严重的像差问题,表1为球面透镜与非球面透镜像差分析图的数据比较,明显看出:球面透镜存在严重像差问题,不利于激光测距仪的信号接收等,无法满足精度的要求。而采用非球面透镜准直的方法,减少了采用球面透镜产生的球差问题,有效地改善了光学系统像质。

表1 球面透镜与非球面透镜像差分析数据比较

	Ray Fan-MAXIMUM SCALE/ μm	OPD Fan-MAXIMUM SCALE /waves	spot diagram-RMS RADIUS/ μm
球面透镜	± 100	± 5	34.509
非球面透镜	± 1	± 0.01	0.290

随着计算机数控研磨和抛光技术^[9]、光学玻璃透镜模压成型技术等加工技术的完善以及非球面检验技术的进步,非球面设计与加工将会变得相对成熟,易于推广,满足以轻、薄、短、小为特点的激光测距仪等产品的发展趋势。

5 结 论

介绍了采用非球面透镜对半导体激光二极管光束进行准直整形的方法,采用本方法使发散角压缩到了 $0.199\ 9 \text{ mrad}$,准直整形后的光斑更均匀,能量利用率提高,而采用球面透镜准直时只能使发散角压缩到 0.392 mrad ,且有严重的球差问题。非球面透镜准直在保证像差控制的同时满足了激光测距仪的使用要求,还解决了激光测距仪小型化、模块化、质量

(下转第37页)

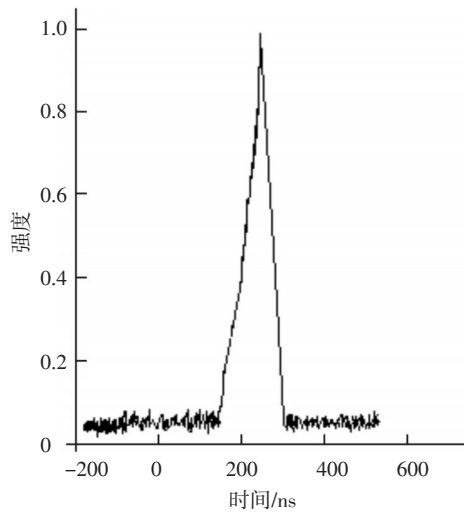


图4 输出 50 kHz 的激光脉冲波形

3 结束语

双包层光纤激光器在加工、军事、医学等领域具有广泛的应用价值。文中研究了双包层掺镱光纤工作原理及激光放大机理,并对双包层掺镱脉冲调Q光纤激光器进行了设计,将进一步开展提高光纤激光器转换效率和输出功率等方面的研究工作。

(上接第15页)

- [16] 杨深,石挺,唐效峰,等.无汞光源研究进展(下)[J].中国照明电器,2010(2):6-11.
- [17] 柴国生,杨正名,高光义,等.无汞金卤灯[J].灯与照明,2006,30(3):31-33.
- [18] 江珊.陶瓷金属卤化物灯技术发展概述[J].中国照明电器,2005(8):6-10.

(上接第25页)

轻等要求,保证了足够的接收功率。文中设计的单个非球面透镜适应当今时代科学技术的发展趋势,具有很强的实用性。

参考文献

- [1] Yagiu Y, Kumazawa T, Shimaoka M. New collimating lens system for laser diode package[C]//IEEE of proceeding-Electronic Componets and Technology Conference, 1993:1135-1138.
- [2] 韩肇邦.半导体激光器光纤微透镜耦合技术研究[D].长春:长春理工大学,2008.
- [3] 张璁,王雪洋,严高师.激光测距仪单透镜发射准直模块

参考文献

- [1] 郭玉彬,霍佳雨.光纤激光器及其应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 楼祺洪,周军,朱健强,等.高功率光纤激光器研究进展[J].红外与激光工程,2006,35(2):135-138.
- [3] C Ye, P Yan, L Huang, et al. Stimulated Brillouin scattering phenomena in a nanosecond linearly polarized Yb-doped double-clad fiber amplifier[J]. Laser Phys. Lett., 2007, 45: 376-381.
- [4] 姜培培,蔡双双,沈永行,等.掺镱脉冲光纤激光器抽运的高功率PPMgLN光参变振荡器[J].中国激光,2008,35(4):168-171.
- [5] 宁继平,张伟毅,尚连聚,等.掺镱包层光纤激光器的全光纤调Q技术[J].中国激光,2008,35(4):483-487.
- [6] P Roy, D Pagnoux, L Mouneu, et al. High efficiency 1.53 um all-fiber pulsed source based on a Q-switched erbium doped fiber ring laser[J]. Electron. Lett., 1977, 33(15): 1317-1318.
- [7] 聂秋华.光纤激光器和放大器技术[M].北京:工业出版社,1997.
- [8] 张晓娟.Tm脉冲激光器泵浦的中红外固体激光器研究[J].光电技术应用,2011,26(2):15-17.

- [19] 陈育明,刘洋.金属卤化物灯的现状 & 研究进展[J].中国照明电器,2011(4):1-5.
- [20] 李振华,陈国庆.金卤灯的科技发展趋势[J].中国高新技术企业,2011(1):17-18.
- [21] 岑继文,何明兴,李新军,等.紫外半导体电致发光器件研究进展,2005,19(1):90-96.

的优化设计[J].激光与红外,2009,33(4):383-385.

- [4] William S C Chang. Principle of Lasers and Optics[M]. England: Cambridge University Press, 2002.
- [5] Mert Serkan, Hulya Kirkici. Optical beam-shaping design based on aspherical lenses for circularization, collimation, and expansion of elliptical laser beams[J]. Applied Optics, 2008, 47(2):230-241.
- [6] 戴永江.激光雷达原理[M].北京:国防工业出版社,2001.
- [7] 勾志勇,王江,王楚,等.非球面光学设计技术综述[J].激光杂志,2006,27(3):1-2.
- [8] 周炳坤,高以智,陈倜嵘,等.激光原理[M].5版.北京:国防工业出版社,2007.
- [9] 王健,鄢定尧,李洁,等.非球面聚焦透镜数控加工技术研究[J].强激光与粒子束,2003,15(10):951-954.