

# 圆柱形光电探测器透镜聚光特性研究

胡亮<sup>1</sup>, 彭佑多<sup>1</sup>, 颜健<sup>1</sup>, 谭新华<sup>2</sup>

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护省重点实验室, 湖南 湘潭 411201; 2. 湘电集团 太阳能事业部, 湖南 湘潭 411101)

**摘要:** 运用透镜聚光原理, 以光线追迹法建立平行光偏转角  $\alpha$  与透镜焦距、光强分布的光学仿真模型, 模拟仿真得到随偏转角  $\alpha$  的变化焦平面聚焦光斑位置与光强分布图, 进一步研究分析光焦斑位置大小变化、焦距长度和光强分布特性。结果表明: 平行主光轴的入射光线经透镜后光斑区域集中、光强分布均匀, 并且随  $\alpha$  的增大, 焦斑中心位置偏离主光轴越大, 且焦斑区域的光强分布越不均匀。结论为光电探测器设计需要确定圆柱的高度和半径等参数提供了理论参考依据。

**关键词:** 透镜; 聚焦特性; 光电探测器

中图分类号: TH74

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2014)01-0033-04

## Investigation on focusing performance of cylindrical photoelectric detector lens

HU Liang<sup>1</sup>, PENG You-duo<sup>1</sup>, Yan Jian<sup>1</sup>, TAN Xin-hua<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Health Maintenance for Mechanical Equipment of Hunan Province,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Electric Group, Solar Energy Group, Xiangtan 411101, China)

**Abstract:** Based on principle of optical, Ray tracing method was used to set up model, which contained a parallel light deflection angle  $\alpha$  and lens focal length and light intensity distribution of optical. In order to simulate the different parallel to the deflection angle of the incident light, to get the focus spot location distribution of light intensity on the focal plane and determining the focal spot position change and the size of the focal length and light intensity distribution of properties further. The results show that the incident light paralleled to the main axis centralized in flare area, uniform intensity distribution, and along with the increase the anger of  $\alpha$ , the greater the focal spot center location deviated from the main optical axis. and the light intensity distribution of the focal spot area is not uniform, for designing a cylindrical probe need to determine the height of the cylinder and the radius parameter provides reference.

**Key words:** lens; focal spot; photo detector

探测传感器设计原理是依据光敏元器件电导率改变输出不同电信号, 电导率与电信号存在函数对应关系. 针对跟踪控制系统跟踪精度不高、系统不稳定情形, 国内外专家在这方面作了很多研究<sup>[1-3]</sup>. 研究发现, 程序跟踪技术运用相对成熟, 而光电跟踪技术还需进一步提高, 四象限跟踪技术是光电跟踪领域相对应用比较广.

在文献[4-6]中, 作者分别讨论了四象限跟踪传感器对光线的探测精度、灵敏度和误差, 但是没有引入光聚焦系统对光线会聚, 从而导致传感器的不能探测微弱光强信号, 探测效果不佳. 为了进一步提高探测器的探测性能效果, 文中以四象限跟踪理论为参考, 在圆柱顶端表面的4个方向安装4个大小、性能完全一致的圆形透镜, 首先建立圆柱

探测器光学模型,选取单个透镜探讨其聚焦、焦斑光强分布变化.最后,利用仿真软件对透镜聚焦焦斑、光强分布作了数值模拟,考察不同平行入射光线的偏转角度 $\alpha$ 对透镜聚光特性的影响,为四象限探测传感器的设计或使用提供技术支持.

## 1 圆柱探测器光学模型

透镜运用到光电跟踪控制系统中,以透镜聚光特性原理为理论指导,建立透镜聚光模型,为了实现跟踪控制系统高精度跟踪要求.

### 1.1 透镜光线聚焦模型

平行主光轴的太阳光经圆形透镜折射会聚形成焦斑;平行光与主光轴存在夹角为 $\alpha$ 时,在焦平面会聚形成偏移现象的焦斑.圆形透镜系统几何光路示意图如图1所示.

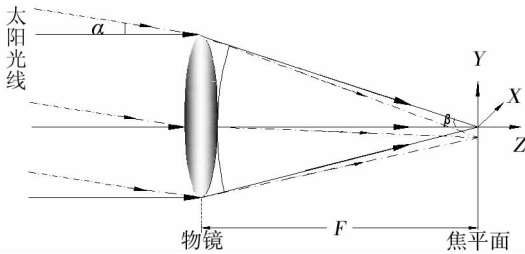


图1 透镜光路简易模型

透镜焦距公式<sup>[6]</sup>:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right). \quad (1)$$

其中, $r_1, r_2$ 是透镜在轴点处的曲率半径, $n$ 为透镜材料折射率.在焦平面形成一个光强较大的焦斑区域,这个区域是光敏元件检测区域,区域大小跟探测器光敏元件感光信号的输出有直接的联系.一旦平行入射光线发生角度 $\alpha$ 的偏转,其折射光线也会发生角度的偏转设为 $\theta$ ,薄透镜的轴向厚度可以忽略不计,由折射公式定理<sup>[7]</sup>:

$$n' \sin \alpha = n \sin \theta. \quad (2)$$

式中, $n'$ 为空气的折射率( $n' \approx 1$ ).根据几何关系可以得到:

$$\tan \beta = \frac{R}{f} \Rightarrow \beta = \arctan \frac{R}{f}. \quad (3)$$

式中,透镜半径为 $R$ ,焦距长度为 $f$ ,偏转角 $\theta$ 通过三角数学关系计算可以表示为

$$\theta = \arctan\left(\frac{l_1}{l_1 + l_2 + R} \cdot \beta\right) - \arctan\left(\frac{l_2}{l_1 + l_2 + f} \cdot \alpha\right). \quad (4)$$

式中, $l_1$ 为平行主光轴光线的光斑区域直径, $l_2$ 为与主光轴存在偏角的平行光线形成光斑区域直径,大小约等于光敏元件感光部分面积;将式(1)、式(2)、式(3)、式(4)整合得到以下表达式:

$$\sin \alpha = n \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{l_1}{l_1 + l_2 + R} \cdot \beta\right) - \arctan\left(\frac{l_2}{l_1 + l_2 + f} \cdot \alpha\right)\right). \quad (5)$$

### 1.2 透镜焦斑光强分布模型

光线强度经过透镜折射后会发生聚焦和衍射,会聚焦斑附近的光强分布直接影响探测器的探测灵敏度,光线穿过透镜,沿着 $x$ 轴和 $y$ 轴发生偏振,计算所使用的光学系统如图2所示.

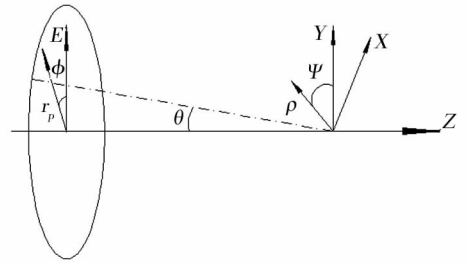


图2 透镜聚焦系统

光线经过透镜后的光场分布表达式为<sup>[8]</sup>

$$E(\rho, \varphi, z) = \frac{1}{\lambda} \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta} F_1(\rho, \varphi, z, \theta, \varphi) * F_2(\theta, \varphi) d\theta d\varphi. \quad (6)$$

其中, $F_1$ 为透镜聚焦的传输方程<sup>[9]</sup>,

$$F_1(\rho, \varphi, z, \theta, \varphi) = \{ [\cos \theta + \sin^2 \varphi (1 - \cos \theta)] \mathbf{i} + \cos \varphi \sin \varphi (\cos \theta - 1) \mathbf{j} + \cos \varphi \sin \theta \mathbf{k} \} \times \exp[-i \rho \sin \theta \cos(\varphi - \varphi)] \times \exp(-iz \cos \theta) \sin \theta. \quad (7)$$

公式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别为沿 $x, y, z$ 方向的单位矢量, $\rho, \varphi, z$ 为观察点的柱坐标, $\theta$ 是光线与透镜表面所成的偏转角, $\alpha$ 是透镜半径决定的最大偏转角.其中 $F_2$ 为非零非线性边界条件方程透镜的解的表达式<sup>[10]</sup>:

$$F_2(\theta, \varphi, \beta) = \alpha \cdot \frac{1 - \mathbf{u} \exp(-3 \mathbf{u} \beta) \times \exp(-\delta^2 \sin(2\beta) \sin \theta r_p \cos \varphi)}{-1 + \mathbf{u} \exp(\mathbf{u} \beta) \cdot \exp[-\delta^2 \sin(2\beta) \sin \theta r_p \cos \varphi]} \times \frac{-1 - \mathbf{u} \exp(\mathbf{u} \beta) \cdot \exp(-\delta^2 \sin(2\beta) \sin \theta r_p \cos \varphi)}{-1 + \mathbf{u} \exp(\mathbf{u} \beta) \cdot \exp[-\delta^2 \sin(2\beta) \sin \theta r_p \cos \varphi]}. \quad (8)$$

其中, $\beta$ 是透镜参数, $r_p$ 是透镜孔径半径,设定半径大小 $r_p = 10.5 \text{ mm}$ .将式(7)和式(8)代入式(6)就能分别得到光线在 $x$ 轴和 $y$ 轴聚焦的光场分布.最后得到透镜聚焦后相应的光强能量分布函数,表达式为<sup>[11]</sup>

$$I(\rho, \varphi, z) = E(\rho, \varphi, z) \cdot E^*(\rho, \varphi, z). \quad (9)$$

就可以得到焦点附近的光强能量特性分布.探测器需要检测不同位置之间光强的分布不同,为提高探测效率,通常会插入光学系统,而深聚焦系统由于其聚焦的光斑很小,可用光敏元器件来探测光斑的位置,故此本文通过聚焦系统的性质讨论透镜聚

焦.而透镜厚度有限,认为光强通过透镜聚焦系统时光强仍保持不变.通过式(9),可以计算出透镜聚焦后在焦平面内的强度分布.

## 2 数值模拟与结果分析

### 2.1 透镜聚焦模拟

薄透镜能够聚焦光线,光线经过透镜后在焦点附近会聚成光斑亮点,焦点处的亮点投影到探测器底端面板板上形成一个圆形的亮斑<sup>[12]</sup>,如图 3 所示.

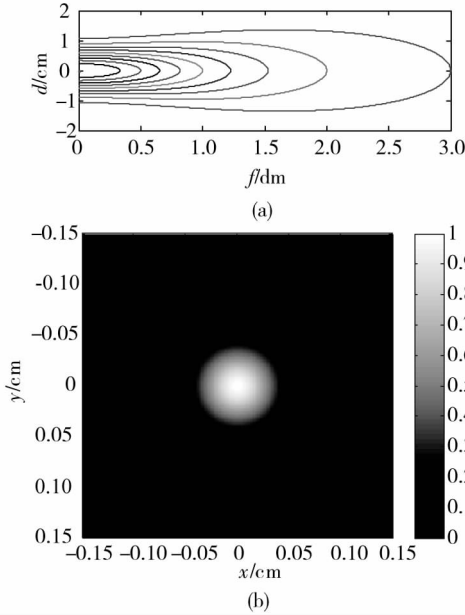


图 3 (a)透镜聚焦图;(b)透镜聚焦形成亮斑

图 3:(a)透镜不同直径  $d$  大小聚光效果差异,焦距长度变化;越接近焦斑,光强分布越集中,相应的光强度越大.(b)为透镜在焦平面挡板上模拟得到的亮斑.

亮斑附近放置光敏元器件,用来探测到光强度信号,产生一路光电压信号;同理其它 3 路的透镜聚光形成焦斑也会被光敏器件探测得到光电压信号,然后分别从二维方向来对电压信号作比较,比较器得到电压差信号后,输出偏差信号.光线聚焦亮斑的大小、光强分布与透镜直径、折射率以及波长、光线相干度等因素相关,焦斑强度大小、位置是本文研究重点.

### 2.2 透镜聚焦特性

入射光线与透镜主轴存在偏转角度  $\alpha$  的情况下,透镜折射会聚光线的分布和强度也有很大差异,主要体现在光聚焦的焦点位置、焦距  $f$  的大小与聚焦效果以及光强分布方面均有影响.如图所

图 5 中,选取了入射光与透镜主轴偏转角度分别为  $0^\circ, 0.5^\circ, 1.5^\circ, 2.0^\circ$  时光线会聚形成焦斑,强度模拟分布图.由图可知,透镜聚焦效果随着  $\alpha$  增大,焦斑位置和光强分布发生相应改变.

### 2.3 光线偏转角与焦斑分析

进一步验证圆形透镜聚光特性模型,根据公式(5)的函数数学关系,所选变量参数为:  $r_1 = 21.00, r_2 = 44.33, n = 1.497, R = 0.5 \text{ cm}$ ,其中  $l_2$  数值大小由光敏器件感光面积确定,选取  $0.5 \text{ cmDS}$  光敏电阻,  $l_2 \approx 0.5 \text{ cm}$ ,计算得到不同  $\alpha$  角和焦距的关系如图 4 所示.

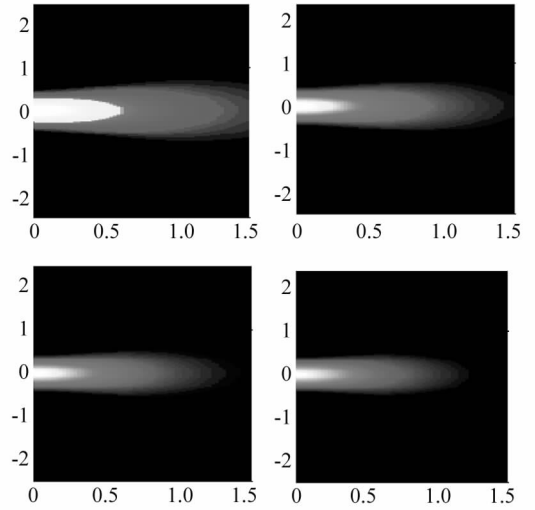


图 4 偏转角度  $\alpha$  分别为  $0^\circ, 0.5^\circ, 1.5^\circ, 2.0^\circ$  下光线会聚焦斑、光强分布模拟图

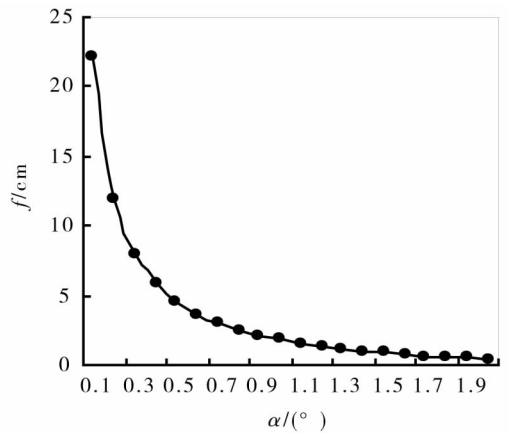


图 5 偏转角与焦距的关系图

入射光线与透镜主光轴平行,即  $\alpha = 0^\circ$  时,透镜聚焦效果最佳,会形成区域亮斑.随着偏转角度依次递增,在探测器底部形成光斑直径递减,如图 4 所示.但是光敏元器件是  $5 \text{ mm CDS}$  光敏电阻,就应该满足光斑区域直径不小于  $5 \text{ mm}$ ,因此偏转角度临界值为  $1.9^\circ \sim 2^\circ$  之间,在  $0^\circ \sim 2^\circ$  范围之内薄

透镜聚光形成的光斑符合光敏电阻的检测范围,超出范围不能正确检测光线的偏转.

### 3 结论

本文对圆柱探测器透镜的聚光特性作了研究分析,利用透镜光学理论,建立偏转角 $\alpha$ 跟焦距 $f$ 、光强分布的光学模型,得出以下结论:

1) 研究表明,随着平行光线偏转角 $\alpha$ 在 $0^\circ \sim 2^\circ$ 之间变化,聚焦点光斑直径递减且出现焦移现象,虽然探测器的探测范围虽小、但灵敏度较高,能够在很小的角度误差就能检测到偏差信号.

2) 建立数学模型,分析偏转角 $\alpha$ 与聚焦光斑半、直径、光强数学函数表达式,并在 MATLAB 软件中模拟仿真. 结果表明,随 $\alpha$ 增大焦斑中心位置偏离中心区域越大,且焦斑区域光强分布越不均匀.

3) 焦斑光强场中心轴附近分布密度大,偏离越远光强场越稀疏,依据透镜特性设计光电探测器光敏元器件确定高度和半径参数.

#### 参考文献:

[1] 马佳光,唐涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展[J]. 红外与激光工程,2013,42(1):218-227.  
 [2] 王建立,吉桐伯,高昕,等. 加速度滞后补偿提高光电跟踪系统跟踪精度的方法[J]. 光学精密工程,2005,13(6):681-685.

[3] 李引,李娟,李明树. 动态需求跟踪方法及跟踪精度问题研究[J]. 软件学报,2009,20(2):177-192.  
 [4] 赵馨,佟首峰,姜会林. 四象限探测器的特性测试[J]. 光学精密工程,2010,18(10):2164-2170.  
 [5] 赵馨,佟首峰,刘云清,等. 四象限探测器在空间激光通信中应用研究[J]. 光电子. 激光,2010,21(1):46-49.  
 [6] Wen T, Zhuang Z W, Wei J B, et al. A novel method to improve spatial resolution of acousto-optic deflector[J]. Optoelectronics Letters,2006,2(1):34-36.  
 [7] 寇培林. 设计不同用途菲涅耳透镜的基本公式[J]. 太阳能学报,1981,1:006.  
 [8] 吴逢铁,马亮,张前安,等. 聚焦高阶 Bessel-Gauss 光束重建的理论和实验研究[J]. 物理学报,2012,61(1):14202-014202.  
 [9] Pu J X, Wang T, Lin H C, et al. Propagation of cylindrical vector beams in a turbulent atmosphere[J]. Chinese Physics B,2010,19(8):089201.  
 [10] Lerman G M, Levy U. Tight focusing of spatially variant vector optical fields with elliptical symmetry of linear polarization[J]. Optics Letters,2007,32(15):2194-2196.  
 [11] Shu J H, Chen Z Y, Pu J X, et al. Tight focusing of partially polarized vortex beams by binary phase Fresnel zone plates [J]. Chinese Physics B,2011,20(11):114202.  
 [12] Zhang L H, Yang Y, Xia W B, et al. Linearity of quadrant avalanche photodiode in laser tracking system [J]. Chinese Optics Letters,2009,7(8):728-731.