

曲面复眼中对数型锥透镜成像特性研究

程 纯,王克逸,曹兆楼,马孟超

(中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系,安徽 合肥 230027)

摘 要: 提出利用对数型锥透镜的焦线特性解决球面复眼系统成像过程中球透镜离焦问题。设计锥透镜焦深范围满足复眼系统各个子眼通道成像。通过仿真分析,研究了对数型锥透镜的轴上与离轴成像特性;利用金刚石切削技术和翻模技术实现该锥透镜的批量制造。实验检测结果表明,锥透镜焦线范围内轴上成像光斑直径保持一致;离轴成像时产生的十字光斑,可以通过提取交叉点,确定复眼系统子眼通道离轴成像光斑中心位置。该设计方案可用于消除球透镜固有离焦发散现象,提高复眼中各子眼对其视场内各方向光线成像光斑中心的定位精度,有效改善复眼成像质量。

关键词: 对数型锥透镜; 离轴成像; 复眼系统; 目标探测

中图分类号: O435.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1284-06

Imaging characteristics of logarithmic axicon for application in compound eye system

Cheng Chun, Wang Keyi, Cao Zhaolou, Ma Mengchao

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Logarithmic axicon (LA) was proposed to overcome the defocus in the spherical compound eye imaging utilizing its focal line. The depth of field of LA was designed to meet the requirements of all the channels of the compound eye. On-axis and off-axis characteristics of LA were studied based on numerical simulation. Mass production of LA was achieved by diamond cutting and molding technology. Experimental results show that the on-axis point spread function (PSF) keeps constant along the propagation, while the off-axis PSF is cross-shaped. The intersection of the cross can be extracted and used to determine the spot centroid in off-axis imaging. The proposed method is helpful to eliminate the intrinsic defocus effects of spherical lens and improve the positioning accuracy and imaging quality of the spherical compound eye system.

Key words: logarithmic axicon; off-axis imaging; compound eye system; object detection

收稿日期:2014-08-11; 修订日期:2014-09-20

基金项目:国家自然科学基金(61275011)

作者简介:程纯(1988-),男,硕士生,主要从事微透镜设计制造及应用方面的研究。Email: ccheng@mail.ustc.edu.cn

导师简介:王克逸(1962-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事微光学和信息光学等方面的研究。Email: kywang@ustc.edu.cn

0 引言

生物复眼通常具有体积小、视场角大、多通道成像、对运动物体敏感等优点。这些特性在工程、医疗、军事等领域具有重要的实际应用价值^[1-3]。因此,随着仿生学的不断发展,对于生物复眼的仿生研究受到越来越多的关注。

目前国内外很多曲面复眼系统相关研究工作中都普遍存在两方面的难点。一是微透镜阵列的制作;二是复眼系统结构设计上存在失配。一般为了获得较大的视场角,复眼系统外形结构往往设计为球面,而图像传感器受当前制造技术所限,一般只能采用平面结构。这使得各子眼透镜到光探测器平面的像距不同,从而导致各子眼透镜难以同时在像平面上清晰成像。对于这种结构上的失配,已有人提出采用具有曲面场镜阵列的三层曲面复眼系统设计方案^[4],以改善边缘视场成像质量。但这无疑增加了系统的复杂性,且在实际应用中,多层曲面复眼系统的校准也是一个问题。

实验室研制了用于目标探测的球面复眼系统^[5-6],由于采用三角法测量原理,为了获得长焦距,要求子眼视场范围内的成像区域能够覆盖传感器的整个像面。当采用普通球透镜阵列时,由于复眼系统结构上的失配,各子眼都不同程度存在对离轴光线的离焦和光斑弥散,影响光斑中心位置的确定。

相比普通球透镜焦距固定而言,锥透镜具有长焦深的特性,能够使平行光经过透镜后转换成轴向范围内的连续焦线^[7]。在精度校准、三角测量以及光摄影技术中具有广泛应用^[8-9]。

文中提出了一种基于对数型锥透镜焦线特性的复眼系统成像质量改善方案,并通过仿真和实验,论证了该对数型锥透镜的轴向焦线特性和离轴成像特征。

1 复眼光学系统的结构与特点

实验室研制用于目标探测球面复眼系统,主要由金属球壳、子眼透镜、折转透镜和平面探测器等部分组成^[5-6]。图1为复眼系统结构二维示意图。

外金属球壳半径为60 mm,子眼通道口径为6 mm。折转透镜的外半径为50 mm,内半径为30 mm,偏心值为12 mm。如图1中,子午面上共有11个通道,相

邻子眼之间夹角为 9° ,每个通道的视场角为 $\pm 9^\circ$,整个系统的视场角为 90° 。各子眼球透镜焦距 $f=48.42$ mm。为了便于子眼透镜的标记,以球坐标系 (ρ, θ, γ) 为标准,其中 ρ 为半径, θ 为通道光轴与Z轴的夹角, γ 为通道光轴在 $x-y$ 平面上与X轴的夹角。由于子眼透镜均为球面分布,因而省略坐标半径 ρ ,图中1号透镜为 $(0, 0)$,2号透镜为 $(9, 0)$ ……6号透镜为 $(45, 0)$ 等。

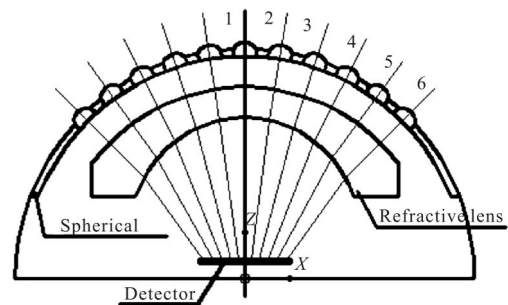


图1 复眼系统结构的二维示意图

Fig.1 2D schematic diagram of spherical compound eye

该复眼系统存在以下问题:首先,由于复眼结构上的失配,各子眼透镜到平面探测器的像距不一致;其次,倾斜入射光对子眼球透镜成像时像距变化较大,将产生离焦现象;最后,为了获得较大的视场角,导致平面探测器边缘的成像质量不理想。通过理论计算得出:当子午面内倾斜 9° 方向入射光对6号透镜成像时,产生的离焦量约为6.7 mm,成像效果较差。

为改善各子眼通道的成像质量,提出采用锥透镜替代球透镜,利用锥透镜的焦线特性,使得焦线范围涵盖各子眼通道的全部焦距值,从而解决各子眼通道的离焦现象。

2 锥透镜的设计及制造

锥透镜较为常见的种类有线性型锥透镜和对数型锥透镜。线性型锥透镜在焦线范围内轴上光强分布呈线性递增,对数型锥透镜则能保持轴上光强均匀分布。

根据复眼结构希望锥透镜的焦线范围涵盖各子眼透镜到探测器平面的像距,且能够保持锥透镜轴上光强一致,因此在设计过程中采用对数型锥透镜。

对数型锥透镜的径向相位分布形式^[10-13]满足方程:

$$\varphi(r) = -\frac{k}{2a} \ln(Z_1 + ar^2) + \text{const} \quad (1)$$

式中： Z_1 和 Z_2 为对数型锥透镜焦线的起始点和终止点； R 为透镜半径； $a = (Z_2 - Z_1) / R^2$ ， $k = 2\pi / \lambda$ 为波常数， λ 为入射光波长； r 为径向距离。

结合复眼系统结构的相关参数，设定： $Z_1 = 45 \text{ mm}$ ， $Z_2 = 60 \text{ mm}$ ， $\lambda = 650 \text{ nm}$ ， $R = 3 \text{ mm}$ 。透镜材料为 PMMA，折射率为 $n = 1.49$ 。图 2 为所设计出的锥透镜通光面面积形，横轴方向为锥透镜厚度 d ，纵轴方向为锥透镜的径向距离。

$$d = \varphi(r) / (n - 1) \quad (2)$$

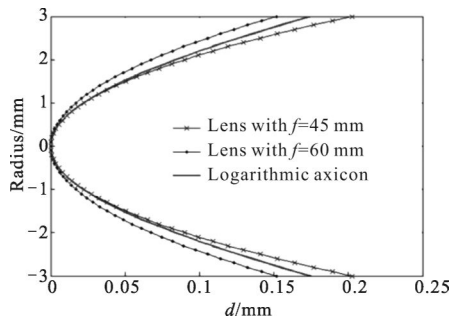


图 2 对数型锥透镜通光面面积形图 ($f = 45 \text{ mm}$ 和 $f = 60 \text{ mm}$)

Fig.2 Surface thickness versus radius of logarithmic axicon with $f = 45 \text{ mm}$ and $f = 60 \text{ mm}$

采用金刚石切削技术加工透镜模具，再进行注料翻模，批量制造出该对数型锥透镜。透镜实物图如图 3 所示。

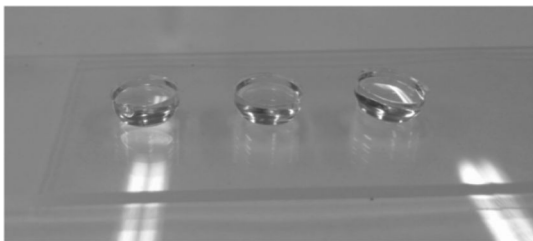


图 3 对数型锥透镜

Fig.3 Logarithmic axicon

3 锥透镜光学性能的仿真和实测

3.1 锥透镜轴向成像检测

利用衍射算法对锥透镜轴向成像光斑进行计算。仿真结果显示：对数型锥透镜能够确保在 $Z = 45 - 60 \text{ mm}$ 的焦线范围内，始终满足贝塞尔函数分布，中心光斑尺寸始终保持在 $10 \mu\text{m}$ 左右。能够很好地应

用于轴向成像的中心定位。图 4 为 $Z = 55 \text{ mm}$ 处的轴向光斑。图像尺寸 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 。

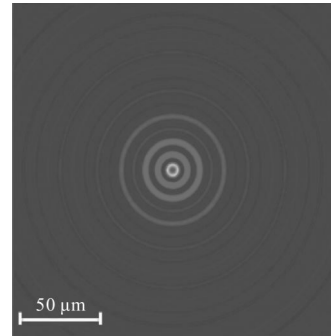


图 4 轴向成像仿真结果

Fig.4 Simulation results of on-axis imaging

对锥透镜进行轴向成像实际检测，实验示意图如图 5 所示。其中，半导体激光器波长 $\lambda = 650 \text{ nm}$ ，探测器 CCD 为敏通公司的 MTV-1881EX，总像素为 795×596 。单位像素尺寸为 $8.6 \mu\text{m}(\text{H}) \times 8.3 \mu\text{m}(\text{V})$ 。

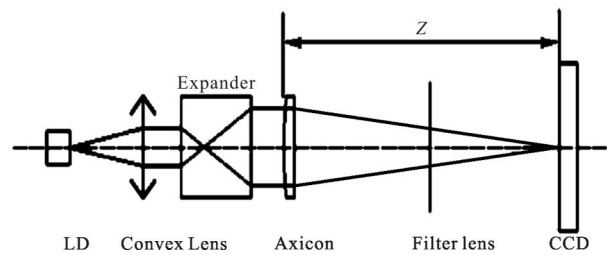
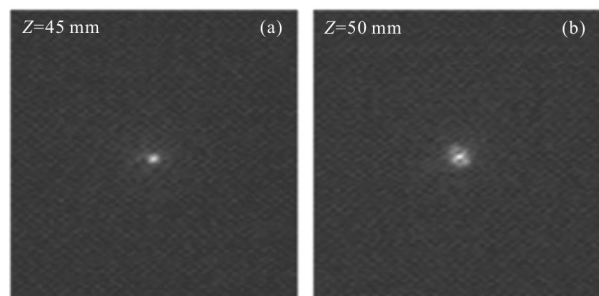


图 5 锥透镜轴向成像示意图

Fig.5 Schematic of on-axis imaging of axicon

实验中保持半导体激光器、准直透镜、扩束镜、锥透镜和衰减片的位置固定，在焦线范围内，沿轴向移动 CCD 的位置。图 6 为采集到的轴向光斑分布图。图 6(e)为放大 10 倍的 $Z = 55 \text{ mm}$ 处轴向光斑图。单个图像尺寸为 150×150 像素。

实验结果显示表明：平行光束经过锥透镜后近似满足贝塞尔函数分布，在锥透镜的焦线范围内，检测到的零级中心光斑直径保持一致，约为 $15 \mu\text{m}$ 。锥透镜轴向中心光斑直径分布如图 7 所示。



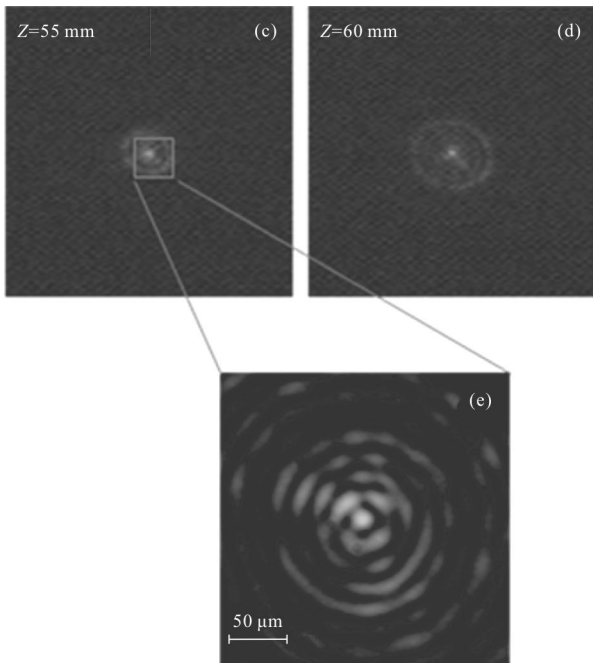


图 6 轴向光斑分布图

Fig.6 Distribution map of on-axis spot

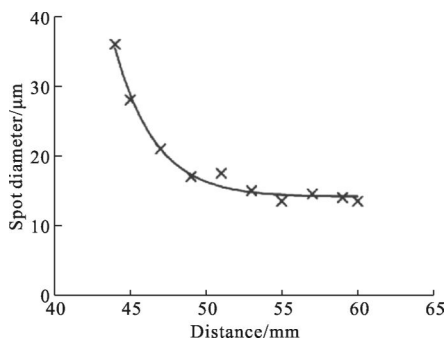


图 7 轴向中心光斑尺寸图

Fig.7 Central spot size of on-axis

3.2 锥透镜离轴成像检测

锥透镜离轴成像示意图如图 8 所示。

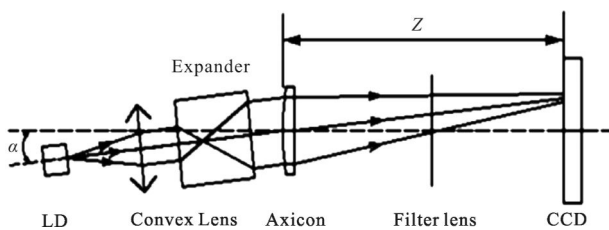


图 8 锥透镜离轴成像示意图

Fig.8 Schematic of off-axis imaging of axicon

仿真实验中设定平行光束倾斜入射角为 $\alpha=9^\circ$ ，在 $Z=45\sim 60$ mm 的焦线范围内，光斑成像如图 9 所示，图像尺寸为 $300\ \mu\text{m}\times 300\ \mu\text{m}$ 。仿真结果表明：离

轴 9° 倾斜入射的平行光经过锥透镜后，光斑中心呈现十字形状，且随着焦线 Z 的增大而增大。

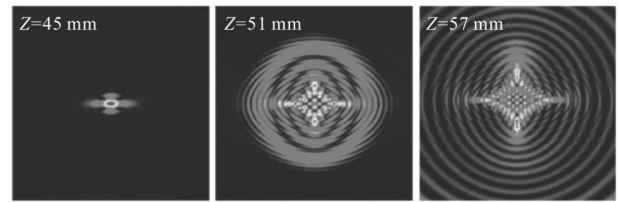


图 9 锥透镜离轴成像光斑仿真图

Fig.9 Spot simulation results of off-axis imaging of axicon

对锥透镜进行离轴成像检测实验，锥透镜入射光线与主轴夹角 $\alpha=9^\circ$ ，保持半导体激光器、准直透镜、扩束镜、锥透镜和衰减片的位置固定，在焦线范围内，沿轴向移动 CCD 的位置。采集到的离轴光斑如图 10 所示。单个图像尺寸为 150×150 像素。

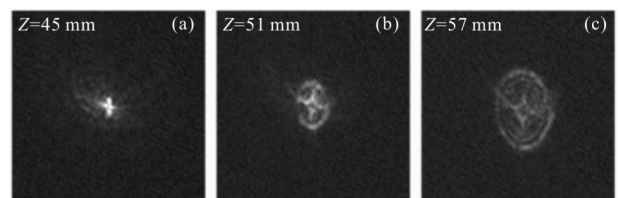


图 10 锥透镜离轴成像光斑实测图

Fig.10 Experiment results of off-axis imaging

锥透镜离轴成像光斑，实测和仿真结果相符合，光斑的十字特征明显，且随着 Z 值的增大而逐渐扩大，可用于光斑中心位置的计算。

3.3 锥透镜离轴斜面成像检测

在球面复眼系统结构中选取边缘子眼 6，进行锥透镜的离轴且像面倾斜成像检测，此时探测器像面相对于子眼 6 倾斜 45° ，实验示意图如图 11 所示。为了方便实测与仿真结果进行对比，移除了复眼系统中

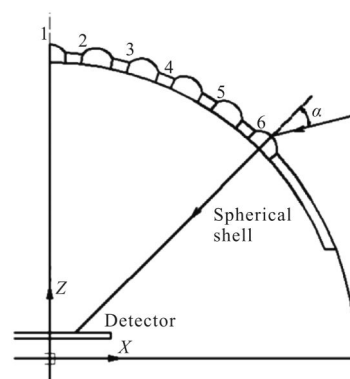


图 11 锥透镜离轴斜面成像示意图

Fig.11 Schematic of off-axis imaging with tilted CCD plane

的折转透镜。

设定子眼 6 在子午面内的入射光线与主轴夹角 α 分别为 0° 、 3° 、 4° 、 5° 、 6° 、 9° 。利用衍射算法进行仿真计算,同时利用实验平台进行实时检测,并将两者结果进行对比。

图 12 中(a)~(f)是通过衍射计算得出的成像光斑图,(a')~(f')为实际检测到平面探测器上的成像光斑图。实验过程中由于衰减片作用,使外围衍射圆环被除去,仅保留了中心光斑。对比实测和仿真结果,发现光斑的十字特征依然明显,只是由于 CCD 的倾斜造成了图像的纵向拉伸。

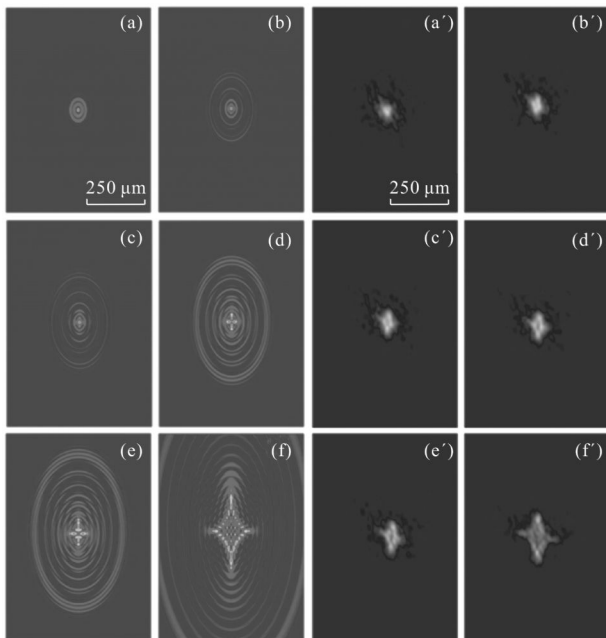


图 12 仿真和实测成像光斑图($\alpha=0^\circ$ 、 3° 、 4° 、 5° 、 6° 、 9°)

Fig.12 Simulation and experiment results of off-axis imaging($\alpha=0^\circ$ 、 3° 、 4° 、 5° 、 6° 、 9°)

通过对复眼系统边缘子眼透镜进行离轴斜面成像的仿真和实测,结果显示:锥透镜离轴斜面成像光斑始终呈现十字形状。

上述实验中,光线入射方向处于复眼子午面内,因此 CCD 上成像十字光斑夹角保持在 90° 。当入射光方向不在复眼子午面内,即处于空间任意方向时,可以根据其主光线和子眼透镜法线,构造一个新的子午面。此时 CCD 的法向已不与新的子午面平行,因而 CCD 上的成像十字光斑夹角将不再保持 90° 。将上述位置关系在图 13 中进行表示。文中以下的数学符号均以图 13 为参照。

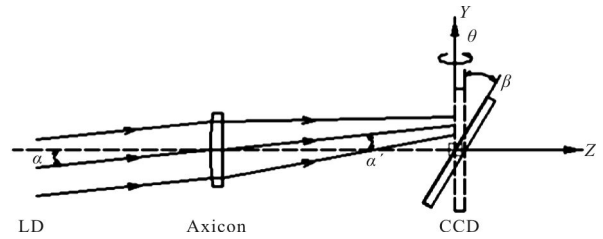


图 13 CCD 空间任意倾斜时的光路示意图

Fig.13 Schematic of off-axis imaging for CCD with arbitrary tilt

空间三维坐标轴原点(0,0,0)位于 CCD 像面中心,X 轴方向垂直于纸面内,Y 轴方向竖直向上,Z 轴方向水平向右。入射光方向与 Y-Z 平面平行,入射角为 α ,出射角为 α' 。将 CCD 平面沿 X 轴顺时针旋转角度 β ,再沿 Y 轴顺时针旋转角度 θ 。图 14 为两次旋转过后的 CCD 像面所处空间位置。如图 10 所示,锥透镜离轴成像形成的十字形状光斑在空间 Z 轴方向保持连续状态,因此可以将光斑十字的两个方向抽象成两个平面,处于空间任意倾斜状态的 CCD 探测到的光斑十字夹角即为这两个平面与 CCD 平面的交线夹角。

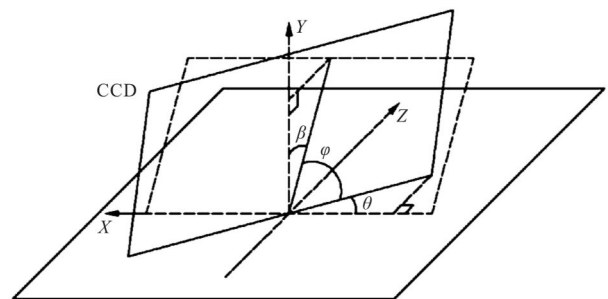


图 14 CCD 像面空间倾斜位置关系

Fig.14 Schematic of spatial relationship of tilted CCD plane

根据空间几何关系,此时 CCD 像面上的十字光斑夹角 φ 满足方程:

$$\varphi=f(\alpha',\beta,\theta) \tag{3}$$

CCD 像面和主光线方向夹角在 Y-Z 平面内分量为 $\alpha'+\beta$,在 X-Z 平面内分量为 θ 。考虑到入射光角度 α 较小,近似取 $\alpha=\alpha'$ 。由此推导出:

$$\varphi=\arccos \frac{\sin(\alpha+\beta)\sin\theta}{[\sin^2(\alpha+\beta)\sin^2\theta+\cos^2\theta]^{1/2}} \tag{4}$$

利用 TracePro 软件进行仿真验证,选取 $\alpha=9^\circ$, $\beta=40^\circ$, $\theta=30^\circ$ 。图 15 为 CCD 像面显示的光斑照度图。将上述参数代入公式(4),求得: $\varphi=66.5^\circ$ 。

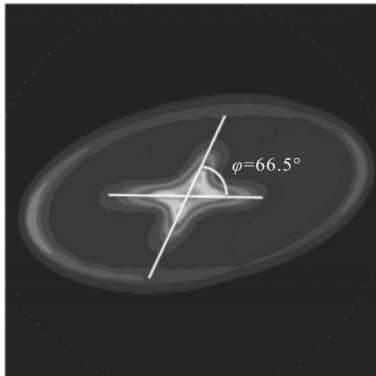


图 15 CCD 像面照度图($\alpha=9^\circ, \beta=40^\circ, \theta=30^\circ$)

Fig. 15 Illumination distribution on CCD plane($\alpha=9^\circ, \beta=40^\circ, \theta=30^\circ$)

根据仿真结果, CCD 像面照度图中十字光斑的实际夹角和理论计算值相同, 可由上述公式(4)近似计算得到。而外围椭圆环发生倾斜, 则是由于像面倾斜时, 外围圆环映射过程中椭圆长轴位置发生变化导致。

4 结 论

文中提出了一种基于对数型锥透镜焦线特性的复眼系统成像质量改善方案。在此基础上设计制造了锥透镜, 探讨了其光学性能以及在复眼系统中的具体应用。

文中对比仿真和实测结果, 验证了锥透镜的轴向焦线特性和离轴成像特征, 说明了在轴向和离轴成像状态下都能够得到中心强度合适的像斑。

实验结果表明: 锥透镜离轴成像时产生的十字光斑可用于复眼系统子眼通道离轴成像光斑中心位置的计算; 其次, 对于空间任意方向入射光的成像情形, 通过对成像光斑十字夹角的分析, 可进一步用于光线入射角的计算和子眼通道的判定。

参考文献:

[1] Jeong K, Kim J, Lee L. Biologically inspired artificial

compound eyes[J]. *Science*, 2006, 312(28): 557-561.

- [2] Duparre J, Radtke D, Tunnermann A. Spherical artificial compound eye captures real images [C]//SPIE, 2007, 6466: 1-9.
- [3] Lu L M, Wang G F, Zhang K, et al. Research on multi-mode missile based on ommateum [J]. *Infrared Technology*, 2001, 23(5): 9-10. (in Chinese)
- [4] Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, Wang Ruiting, et al. Study on curved compound eye imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(3): 346-350. (in Chinese)
- [5] Cao Zhaolou, Zhan Zhenxian, Wang Keyi. Structural design of spherical compound eye lens for moving object detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 70-73. (in Chinese)
- [6] Guo F, Wang K Y, Yan P Z, et al. Calibration of compound eye system for target positioning with large field of view[J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(5): 913-920. (in Chinese)
- [7] McLeod J H. The axicon: a new type of optical element[J]. *Opt Soc Am*, 1954(44): 592-597.
- [8] Arimoto R, Saloma C, Tanaka T, et al. Imaging properties of axicon in a scanning optical system [J]. *Appl Opt*, 1992, 31(31): 6653-6657.
- [9] Kim J A, Lee K I, Noh H R, et al. Atom trap in an axicon mirror[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(2): 117-119.
- [10] Davidson N, Friesem A A, Hasman E. Holographic axilens: high resolution and long focal depth [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(7): 523-525.
- [11] Sochacki J, Kolodziejczyk A, Jaroszewicz Z, et al. Nonparaxial design of generalized axicons [J]. *Appl Opt*, 1992, 31(25): 5326-5330.
- [12] Sochacki J, Bara S, Jaroszewicz Z, et al. Phase retardation of the uniform-intensity axilens[J]. *Opt Lett*, 1992, 17(1): 7-9.
- [13] Golub I, Chebbi B, Shaw D, et al. Characterization of a refractive logarithmic axicon [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(16): 2828-2830.