

Schmidt 结构的改进型龙虾眼光学透镜研究

欧阳名钊¹, 朱万彬², 付跃刚¹, 高天元¹, 董科研¹, 崔承坤¹, 姜苏伦¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 龙虾眼光学是解决大视场高能射线聚焦的关键技术。从成像光学的视角考察了龙虾眼光学系统的成像原理, 制作完成了基于 Schmidt 结构的改进型龙虾眼光学透镜原理样机, 并对该系统在可见光波段的性能进行了测试。该龙虾眼透镜由厚度为 300 μm 的抛光铝板作为反射工作面, 反射面成扇形排布, 并具有完全对称的球形结构; 反射面间夹角由特殊加工的角间距 27.6' 的楔板保证。原理样机的有效焦距为 65 mm, 中心张角为 $17.48^\circ \times 17.48^\circ$, 其在空间各个方向上的成像能力几乎相同, 可以满足空间大视场探测系统的任务需求。

关键词: 龙虾眼透镜; 大视场探测; 全反射成像; 可见光测试

中图分类号: TH743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3610-05

Improved lobster eye lens based on Schmidt geometry

Ouyang Mingzhao¹, Zhu Wanbin², Fu Yuegang¹, Gao Tianyuan¹, Dong Keyan¹,
Cui Chengkun¹, Jiang Sulun¹

(1. School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The lobster eye optics is the key technology that could achieve high energy ray imaging with a large field of view. The focusing principle of the lobster lens was explained in the viewpoint of optical imaging. The improved lobster eye lens prototype which was based on the Schmidt geometry was made, and the testing of this system within visible light was finished. The reflection working surfaces of this lobster lens prototype were made of polished aluminum plates with 300 μm thickness. And the reflectors were arranged into fan shape; the whole lobster eye lens prototype was completely spherical symmetric structure. The angle 27.6' between reflectors were generated by the special wedge plates. The focal length of the prototype is 65 mm and center angle is $17.48^\circ \times 17.48^\circ$. The imaging ability of the system on every direction had much the same effect. It can meet the required of the large field detection task in space.

Key words: lobster eye lens; large view detection; total reflection imaging; visible light testing

收稿日期: 2015-04-05; 修订日期: 2015-05-10

基金项目: 吉林省自然科学基金(201215131); 应用光学国家重点实验室开放基金

作者简介: 欧阳名钊(1983-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计分析方面的研究。Email: oymz68@163.com

通讯作者: 付跃刚(1972-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事光学设计方面的研究。Email: fuyg@cust.edu.cn

0 引言

高能射线龙虾眼光学系统是一种基于掠入射原理的 X 射线聚焦系统,相比于其他 X 射线聚焦装置,龙虾眼聚焦系统具有它们无法企及的大视场探测能力^[1-2],可以实现对周天区域高能射线暴的实时监视。对于深空高能射线暴的探测可以为天文学研究提供有价值的信息,例如欧洲航天局提出的 Lobster-ISS 计划^[3-4]。同时,龙虾眼光学系统在安全检查仪器领域也具有潜在的应用价值,目前美国物理光学公司正在积极研制基于龙虾眼光学系统的便携式 X 射线安检设备,有望应用于港口安检^[5-7]。此外,人们也在尝试应用龙虾眼聚焦系统的改良结构用于紫外聚焦^[8-9]。Schmidt 与 Angel 型是两种不同结构的龙虾眼聚焦系统:Schmidt 结构便于对反射表面进行提高反射效率的处理,比较适合于大型、高集光面积的系统,Angel 结构相对复杂,但具有更高的分辨率,适合于小型轻便的系统^[10]。文中以成像光学的视角,探索了龙虾眼光学系统的聚焦特性,并在可见光波段实现了带有曲率的 Schmidt 改进型龙虾眼光学系统的演示实验,为实现龙虾眼聚焦装置的进一步研究提供理论支持。

1 龙虾眼透镜的聚焦机理分析

生物龙虾眼睛表面密布矩形方孔的小眼通道,这些小眼通道的截面为矩形,侧面为梯形。每个小眼就是一个单独的“镜盒”,侧壁上覆盖高反射率材料^[11]。当光线经过小眼通道时会在相互垂直的通道壁上发生反射,而折转向焦点处。此时小眼通道构成一种“角反射器”,光线无论以何种角度入射,都将以反方向的平行光线出射(图1(a))。当光线通过小眼通道

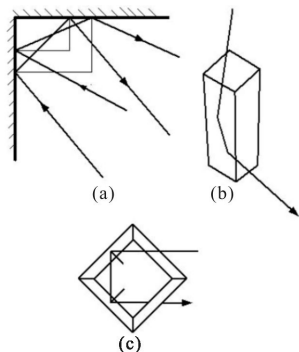


图 1 龙虾眼透镜的“角反射器”原理

Fig.1 "Corner reflector" principle of the lobster eyes lens

时,虽然入射光线和反射光线并不在一个水平面内,但从中心对称轴的方向看去,光线路径完全符合“角反射器”的作用(如图 1(b)、(c)所示)。当每个“角反射器”按照自身中心对称轴指向球心的形式构成三维结构体时,整个龙虾眼透镜没有中心对称轴,因而它与昆虫复眼结构一样可以具备很大视场^[12]。

龙虾眼透镜的反射成像机理决定了其无色差,同时其完全对称的空间结构决定了其无轴外像差,因此对于龙虾眼透镜而言主要考虑其轴上点像差。从一维方向上看,龙虾眼透镜的成像光路可以简化成图 2 所示。

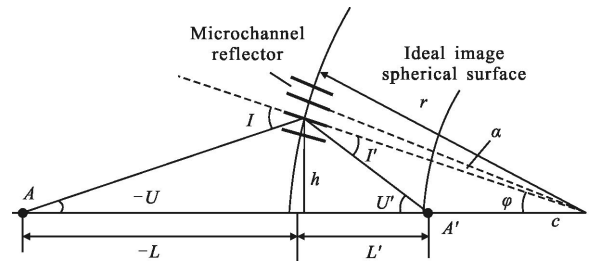


图 2 龙虾眼透镜的光线折转

Fig.2 Lobster eye lens light reflex

由于龙虾眼透镜的微通道反射壁存在一定的长度,其反射光线不仅会在物点与曲率中心形成的光轴上存在沿轴球差,同时存在由反射壁长度引起的光带弥散。假设入射光线为近轴区域内的光线,不存在反射壁遮挡问题,且光线只经过一次反射,对于物点 A 所发出的不同高度入射光线。设近轴区域内龙虾眼透镜的理想像点位置 $l'=R/2$ 处形成的沿轴像距偏差公式为:

$$\Delta L = R/2 - r \left(1 - \frac{\sin(U + \varphi)}{\sin(U + 2\varphi)} \right) \tag{1}$$

$$r \in (R - t/2; R + t/2)$$

式中: U 为物方孔径角; φ 为球心角; 球心角 φ 代表了反射工作面的空间角度位置,是锥顶角 α 的整数倍。该公式描述了物距为 $-L$ 的点物所发出的光线经过球心角为 φ 的反射壁反射后产生的沿轴弥散斑偏差,其中物方孔径角 U 是反射球面半径 r 的函数。此时求得物方孔径角 U 的表达式为:

$$U = \arcsin \left(\frac{r}{H} \sin \varphi \right) \tag{2}$$

式中: $H = \sqrt{r^2 + (L+r)^2 - 2r(L+r)\cos\varphi}$ 。

通过以上公式可以计算出特定结构参数的龙虾眼透

镜的每个反射单元对于物点 A 的沿轴弥散斑偏差分布。

同时, 可以求出在理想像平面上所形成的弥散斑的径向半径分布公式为:

$$\Delta S = \Delta L \tan(U + 2\varphi) \quad (3)$$

从上述公式中可以得出如下结论: 对于结构参数确定的龙虾眼透镜, 曲率半径 R 、锥顶角 α 、及通道深度 t 为确定值。其弥散斑偏差值是对应于球心角 φ 与物距 $-L$ 的函数, 而球心角 φ 表示了通道单元的方位角度及参与成像通道的范围, 可以通过逐一计算每个通道的弥散斑半径分布求出点物 A 在理想像平面上所成弥散斑 $2\Delta S$ 。

当龙虾眼透镜应用于 X 射线聚焦时, 入射微通道内壁的 X 射线需满足掠入射角小于全外反射角 θ_c 的情况才能工作, 这实际上限制了龙虾眼透镜中参与成像光束的口径。

2 龙虾眼透镜的模型设计加工

龙虾眼聚焦装置主要结构形式分为 Schmidt 型与 Angel 型, 如图 3 所示。虽然 Angel 型龙虾眼聚焦装置的结构更接近于生物龙虾眼睛的结构形式, 但其球形排布的锥形微通道管制作困难, 并很难保证内壁的光洁度。因此, 该原理样机仍然采用 Schmidt 的基本结构形式, 但在 Schmidt 结构的基础上, 将装置前端面设计成球型表面, 这样更接近于 Angel 型的外形结构, 有利于提高系统的成像质量。

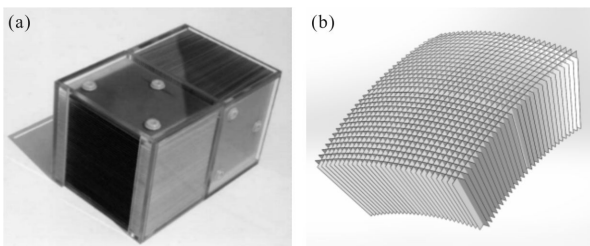


图 3 Schmidt 结构龙虾眼装置(a)与 Angel 结构龙虾眼装置(b)

Fig.3 Schmidt geometry lobster lens(a) and Angel geometry lobster lens (b)

该原理样机采用前、后两组件贴合夹持的基本结构形式, 每一组件由 38 片堆叠放置的反射镜片构成, 完成一维方向的聚焦。镜片采用进口抛光镜面铝板制作, 厚度为 $300 \mu\text{m}$ 。镜片间的锥顶角和空间距离由楔形隔板保证每两片反射镜单元之间的角度要求 $27.6'$ 。楔形隔板使用同一胎具制作, 保证了每个

楔形隔板厚度及角度的一致性; 第一组件的前、后端面均为球面, 如图 4(a)所示, 半径分别为 136 mm 和 130 mm ; 第二组件的前、后端面分别为半径 130 mm 和 124 mm 的球面, 两组件中半径为 130 mm 的表面为两组件的贴合面。两组件通过外部固定部件进行夹持, 保证前后组件的正交贴合, 图 4(b)所示为制作完成的龙虾眼透镜 LP-65 原理样机, 主要设计参数及外形尺寸分别如表 1 和表 2 所示。

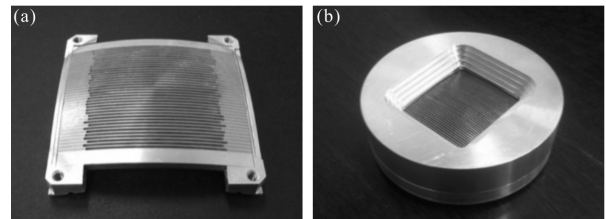


图 4 龙虾眼透镜的前组件实物图(a)和龙虾眼透镜完成装配实物图(b)

Fig.4 Front element of lobster eye lens (a) and the finished real prototype (b)

表 1 龙虾眼透镜 LP-65 原理样机的主要设计参数
Tab.1 Main design parameters of the lobster lens LP-65 prototype

Parameters	Values
Median radius R/mm	130
Thickness of the first group t_1/mm	6
Thickness of the second group t_2/mm	6
Field angle $C/(\circ)$	17.48×17.48
Cone apex angle $\alpha/(')$	27.6
Thickness of the aluminum based mirror $d/\mu\text{m}$	300

表 2 龙虾眼透镜 LP-65 原理样机外形尺寸
Tab.2 Size of lobster lens LP-65 prototype

Parameters	Values
External diameter/mm	110
Thickness/mm	42
Effective window/mm	50.4×46.5

3 龙虾眼透镜原理样机的实验测试

采用 632.8 nm 波段平行光管作为光源对该原理

样机进行测试,平行光口径为 $\phi=100\text{ mm}$ 完全覆盖龙虾眼透镜样机。因为像面尺寸很大,焦臂长度约为 20 mm ,很难找到如此大的 CCD 相机作为像面接收器,故使用硫酸纸作为像接收屏,距离原理样机 65 mm 处放置。

图 5(a)是对 LP-65 样机进行焦斑测量实验得到的焦面光强分布,图 5(b)是使用 Fred 软件对 LP-65 样机模型仿真得到的焦面照度分布。通过网格纸上的刻度对所得光场分布进行定量测量,中心像点尺寸约为 $3\text{ mm}\times 5\text{ mm}$;横向及纵向空间分辨率约为 2.78° 和 4.41° 。造成光场两个方向上的失对称性的主要原因是前、后组件的加工不一致性所导致,前组件的局部镜面铝板边缘产生不规则变形致使水平方向聚焦效果变差。通过网格纸上的刻度对所得光场分布进行定量测量,中心像点尺寸约为 $3\text{ mm}\times 5\text{ mm}$;横向及纵向空间分辨率约为 2.78° 和 4.41° 。造成光场两个方向上的失对称性的主要原因是前、后组件的加工不一致性所导致,前组件的局部镜面铝板边缘产生不规则变形致使水平方向聚焦效果变差。

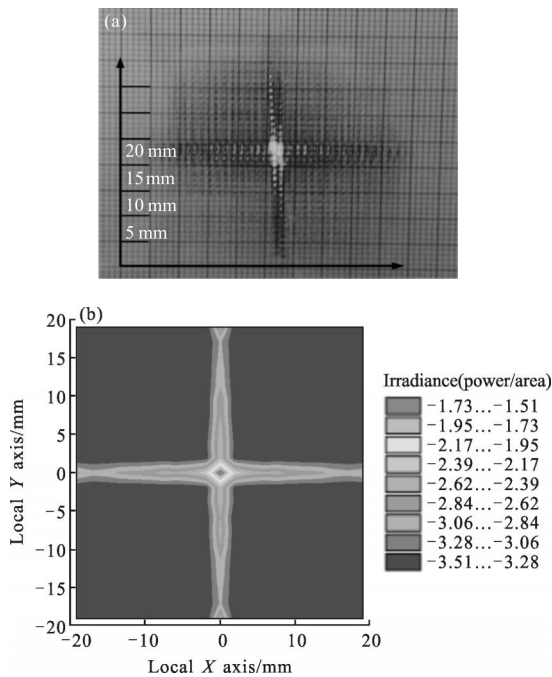


图 5 实验测得结果(a)和模拟分析结果(b)

Fig.5 Experiment (a) and simulation (b) result of the lobster lens prototype

该原理样机具有同 Angel 型龙虾眼结构一样的空间对称性,因此其轴外点的聚焦能力要比 Schmidt 型龙虾眼结构的轴外聚焦能力更好。此时的光轴由

原理样机中心与接收屏中心连线决定。图 6 是龙虾眼透镜原理样机做轴外点连续偏转时所得观察屏上的光强分布,轴上点和轴外点几乎具有相同的成像质量。

龙虾眼透镜原理样机在可见光波段完成了测试实验,如果将本原理样机的结构应用于 X 射线波段,当应用掠入射原理聚焦时,其全口径的光束并不能全部参与成像,只有口径小于 $\theta_c \times R$ 的反射镜能够参与成像。此时为了获得较高的能量必须减小反射镜组间的角距离。随着 X 射线多层膜技术的发展,大于全外反射角入射的射线也可以以较高的反射率参与聚焦。但随着参与成像单元的增加,分辨率受球差以及反射镜组投影偏差的影响将越发严重。

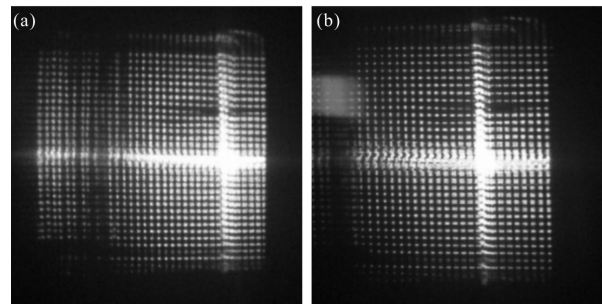


图 6 3°(a)和 6°(b)旁轴可见光实验

Fig.6 Visible light test with 3° (a) and 6° (b)

另外,龙虾眼透镜样机中楔板的制作是保证获得高空间分辨率的关键,本样机的楔板长度为 6 mm ,前后端面的厚度差为 $60\text{ }\mu\text{m}$,其制作的一致性误差直接影响系统分辨率。

4 结论

龙虾眼光学聚焦装置是实现大视场 X 射线成像技术的关键,如何提高其成像是急待解决的问题。本文制作了具有完全空间对称结构的 Schmidt 型改进型龙虾眼光学聚焦装置,并在可见光波段完成了性能测试,实验表明 Schmidt 改进型结构具有大视场成像的明显优势,其轴上点和轴外点的聚焦性能基本相同,可以满足大视场空间探测系统的需要。

参考文献:

[1] Philip E, Kaaret, Phillip Geissbuehler. Lobster-eye X-ray optics using microchannel plates[C]//SPIE, 1992, 1546: 82.
 [2] Rene Hudec, Ladislav Pina, Adolf Inneman, et al. Innovative

- technologies for future astronomical X-ray mirrors[C]//SPIE, 2004, 5488: 875.
- [3] Rene Hudec, Adolf V Inneman, Ladislav Pina, et al. Lobster-eye X-ray telescopes: recent progress[C]//SPIE, 2003, 4851: 578.
- [4] Amati L, Frontera F, Auricchio N, et al. The gamma-ray burst monitor for Lobster-ISS [J]. *Science Direct Advances in Space Research*, 2006, 38(7): 1333–1337.
- [5] Michael Gertsenshteyn, Tomasz Jansson, Gajendra Savant. Staring/focusing lobster-eye hard X-ray imaging for non-astronomical objects[C]//SPIE, 2005, 5922: 59220N.
- [6] Paki Amouzou P, Gertsenshteyn M, Jansson T, et al. Inelastic scattering measurements of low energy X-ray photons by organics, soil, water, wood, and metals [C]//SPIE, 2006, 6319: 63190V.
- [7] Michael Gertsenshteyn, Victor Grubsky, Tomasz Jansson. Hard X-ray devices for target detection at longer distances [C]//SPIE, 2006, 6319: 63190F.
- [8] Tomasz Jansson, Andrew Kostrzewski, Michael Gertsenshteyn. Animal eye in Homeland Security systems [C]//SPIE, 2007, 6538: 65381R.
- [9] Andrzej Bartnik, Henryk Fiedorowicz, Roman Jarocki, et al. Response of inorganic materials to laser-plasma EUV radiation focused with a lobster eye collector [C]//SPIE, 2007, 6586: 65860A.
- [10] René Hudec, Ladislav Pina. EUV and X-ray optics: synergy between laboratory and space II[C]//SPIE, 2011, 8076: 80760C.
- [11] Yang Xiajun, Mu Bozhong, Yi Shengzhen, et al. Study on lobster-eye X-ray optical system based on parallel Schmidt geometry [J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(5): 0069–0070. (in Chinese)
- [12] Ouyang Mingzhao, Fu Yuegang, Hu Yuan, et al. Elimination of stray light for lobster eyes lens with absorbing coating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (5): 1499–1504. (in Chinese)
- [13] 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)