

## 非球面变焦距曲面复眼的优化研究

郝永平<sup>1</sup>, 赵龙飞<sup>2</sup>, 张嘉易<sup>2</sup>

- (1. 沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 110159;
2. 沈阳理工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 提出了一种新型的非球面变焦距曲面复眼结构。整个结构将曲面基底分为三个类扇形区域, 每一区域微透镜阵列能够对一定物距的目标物成像, 使得人造复眼在一定范围内实现焦距调节; 根据微透镜所处的区域和位置, 计算出微透镜的基本尺寸, 并对微透镜进行了非球面优化。对所设计的曲面复眼进行了光线追迹, 仿真结果表明成像球差降低到初始值的近百分之一, 能够实现焦距调节, 并解决了每一个微透镜在边缘处的球差问题, 极大的提高了成像效果。

**关键词:** 曲面复眼; 变焦距; 非球面优化; 光线追迹

中图分类号: O439 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)01-0157-05

## Optimal research of aspherical zoom curved compound eye

Hao Yongping<sup>1</sup>, Zhao Longfei<sup>2</sup>, Zhang Jiayi<sup>2</sup>

- (1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

**Abstract:** A novel aspherical zoom curved compound eye structure was proposed. The curved substrate was segmented into three same sector areas, and the microlens array of every area could image the target object which had a certain distance to the compound eye. So the focal length can be controlled within certain scope. The focal length and the size of microlens were calculated by the area and the position, and the spherical surface of microlens were all optimized into aspheric surface. Finally, from the ray tracing simulated result of the new curved compound eye, the spherical aberration of microlens is decreased to about one percent compared with the initial model, the compound eye can realize focal length regulation and the problem of spherical aberration at the edge can solve effectively. So the performance of imaging is greatly improved.

**Key words:** curved compound eye; zoom; aspheric surface optimization; ray tracing

收稿日期: 2014-05-14; 修订日期: 2014-06-18

基金项目: 国防预研基金

作者简介: 郝永平(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微小引信技术及探测技术等方面的研究。Email: yphsit@126.com

## 0 引言

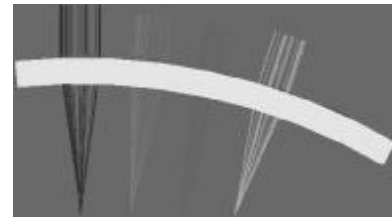
以蝇眼为代表的复眼在成像上有着  $360^\circ$  全视角,对高速移动的物体敏感等显著优点<sup>[1-2]</sup>,正是这些优点使得它在目标成像识别,探测制导等军事上有着巨大的应用价值,可以很好地实现探测器的全方位探测<sup>[3]</sup>,所以复眼在成像制导等领域得到了众多国家研究学者的重视。

目前为止,多种曲面人造复眼结构被提出。尤其作为人造复眼重要元件之一的微透镜及其阵列得到了深入的研究<sup>[4]</sup>。以往的曲面复眼多是均一性的曲面复眼,这样就使得各个微透镜无法在光探测平面清晰成像,这是由于微透镜的焦距要大于微透镜到光探测平面的距离<sup>[5]</sup>。中国科学院设计的单层非均一性曲面人造复眼在结构和中国科学技术大学设计的新型球面复眼结构克服了以上弊端,在成像效果上要比以往的曲面人造复眼要好,每个微透镜都可以在光探测平面上成像,而且成像视野上要比以往的平面人造复眼大的多。但是每个微透镜的成像效果和复眼的成像性能仍需提高<sup>[6-7]</sup>。

文中提出一种变焦距非球面微透镜阵列的人造复眼。通过 ZEMAX 对单独微透镜和复眼模型分别进行光线追迹,非球面优化后的微透镜球差大大降低,成像效果得到提高;复眼模型的整体成像性能相应得到了很大提高。

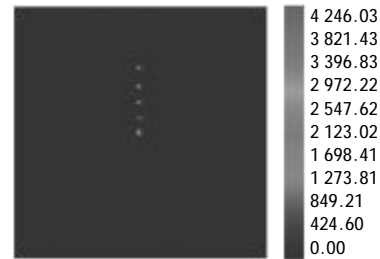
## 1 单层非均一性曲面人造复眼成像性能

对于曲面人造复眼的研究在近几年有了较深入的研究,最具有代表性的就是单层非均一性曲面人造复眼。目前光学成像的光探测阵列只能制作成平面的,所以曲面基底人造复眼上的不同位置的微透镜的中心到光探测平面的距离不相同,而微透镜阵列的非均一性设计可以很好的解决这个问题。如图 1 所示单层非均一性曲面人造复眼模型的光线追迹示意图,可以看出虽然微透镜阵列的成像面基本在同一平面,但是由于微透镜表面是球面结构,就使得每一个微透镜存在着较大的球差,严重影响其单独成像效果,进而影响将来的目标像重建效果,不利于目标的探测识别;所有微透镜都具有相同的“焦距”,不能变焦,只能对固定距离内和固定大小的物体成像。



(a) 光线追迹图

(a) Picture of ray tracing



(b) 检测器表面成像光线能量图

(b) Energy picture of image rays on detector surface

图 1 单层非均一性曲面人造复眼模型的光线追迹

Fig.1 Ray tracing for the single-layer non-homogeneous curved compound eye

## 2 变焦距曲面人造复眼的设计优化

目前为止,所设计的曲面人造复眼的“焦距”都是相同的,即只能对一定范围内的物体进行成像,不能实现焦距的调节,从一定程度上限制了复眼的成像性能。使用复眼进行探测一般是使用复眼的大视角进行全方位探测进而再使用一部分复眼进行目标跟踪。因此将曲面人造复眼设计成变焦距的以增强其探测性能。

### 2.1 整体结构设计

如图 2 所示是设计的变焦距曲面人造复眼的整体结构,将曲面基底平均分成三部分,每一部分的角度是  $120^\circ$ ,对应的“焦距”各不相同,在设计中分别取红色,黄色和绿色的区域的中心主小眼的焦距为  $2.227\text{ mm}$ ,  $1.927\text{ mm}$  和  $2.527\text{ mm}$ 。这样就可以在一定范围内实现变焦,增强人造复眼的成像性能。

曲面基底上的微透镜阵列最终都要在平面光探测阵列上成像,这就使得基底上不同位置的微透镜中心到光探测阵列的距离不同。而根据几何成像原理,微透镜的有效焦距长与微透镜中心到光探测阵列的距离相等,因此只有每一区域的相同位置的微透镜才具有相同的尺寸。结构中除了红色区域多一

个中心透镜外,三个区域的其他微透镜阵列相对位置和数量相同。

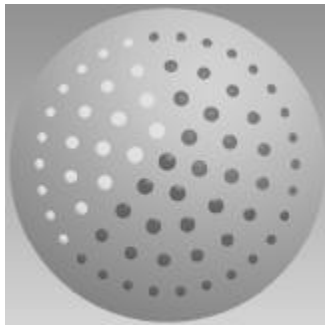


图 2 复眼整体结构

Fig.2 Whole structure of compound eye

整体结构参数如表 1 所示。

表 1 人造复眼的整体结构参数

Tab.1 Whole structure parameters of artificial compound eye

Material	Refractive index	Spheric radius/mm	Angle between two adjacent microlens/(°)	Angle between center to edge/(°)
Si	1.46	12	6	24

### 2.2 微透镜尺寸设计

要计算微透镜的尺寸,就要首先确定微透镜中心到光探测阵列的尺寸,这也是对应微透镜的有效焦距。以红色区域的微透镜阵列为例,如图 3 所示,根据微透镜所处视场角的大小将其分为 5 级,每一级上的微透镜到光探测阵列的距离相等,角度也相同,所以每一级上的微透镜尺寸相同。根据图中的几何关系可得要计应微透镜的有效焦距。以红色区域的微透镜阵列为例,如图 3 所示,根据微透镜的尺寸,就要首先确定微透镜中心到光探测阵列的尺寸,这也是第  $n(n \leq 4)$  级的微透镜中心对应的基底内表面到光探测平面的距离  $\lambda_n$  为:

$$\lambda_n = R - \frac{R - (\lambda_0 + h)}{\cos(n\theta)}, n=0, 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

根据薄透镜的制造方程<sup>[8]</sup>:

$$\frac{1}{f_n} = (n_i - 1) \left( \frac{1}{r_n} - \frac{1}{R} \right) \quad (2)$$

式中:  $f_n$  为第  $n$  级微透镜的焦距;  $n_i$  为所选择材料的折射率,  $r_n$  为第  $n$  级微透镜的表面曲率半径。由此可以计算出各级微透镜的初始值,红色区域的微透镜初始值如表 2 所示。

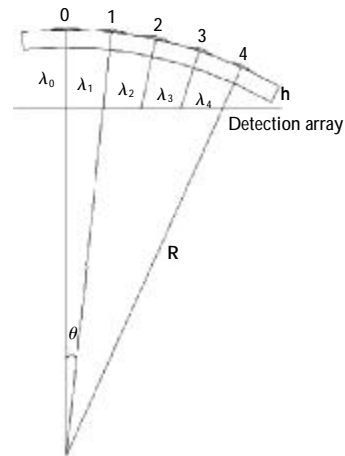


图 3 径向排列的各级微透镜结构

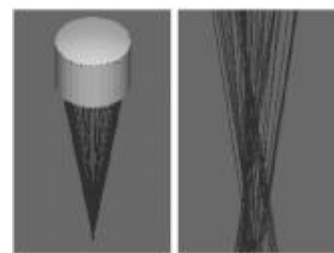
Fig.3 Structure of microlens on radius direction

表 2 红色区域微透镜初始值

Tab.2 Initial value of microlens on red area

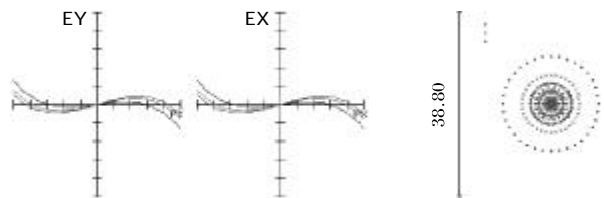
Group No. of microlens	0	1	2	3	4
$f_n$ /mm	2.227	2.173	2.009	1.724	1.302
$r_n$ /mm	0.946	0.894	0.829	0.709	0.528

根据所求微透镜的初始值在 ZEMAX 中建立了微透镜模型,并对其进行了光线追迹,如图 4(a)所示为第 1 级微透镜光线追迹,可以看出虽然微透镜可以成像,但是成像光线并不能较好的汇聚成一个点;从图 4(b)中可以看出存在较大的球差,且光线像差约为  $6 \mu\text{m}$ ;从图 4(c)中可以看出艾利(Airy)衍射斑



(a) 球面微透镜光线追迹

(a) Ray tracing of spherical microlens



(b) 球面微透镜 Ray Fan

(b) Ray Fan of spherical microlens

(c) 球面微透镜 Spot Diagram

(c) Spot Diagram of spherical microlens

图 4 球面微透镜的光线追迹结果

Fig.4 Ray tracing results for spherical microlens

弥散半径均方根半径是  $3.328\ \mu\text{m}$ , 比较分散, 影响微透镜的成像效果。

### 2.3 微透镜的非球面优化

对于球面的微透镜的球差可以使用非球面来消除。具体的优化步骤如下:

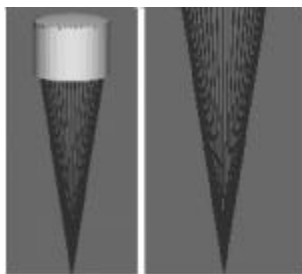
步骤 1 将理论计算出的数值输入到 ZEMAX 中, 建立初始模型;

步骤 2 将第 STO 面半径的求解类型修改为“Variable”以便进行初次优化;

步骤 3 建立“Merit Function”, 以计算出的有效焦距为评价目标, 将 STO 面设置成“Even Asphere”, 曲率半径置为变量, 将偶次项相关系数设置为变量, 进行优化;

步骤 4 对优化的微透镜进行光线追迹, 达到优化目标则结束优化; 否则返回到步骤 3。

图 5 所示是优化后的第 1 级非球面微透镜。图 5(a)所示为非球面微透镜的光线追迹, 成像光线经过微透镜后可以很好的汇聚成一个点; 从图 5(b)中可以看出球差得到了很大的改变, 且像差降低到约为  $2\ \mu\text{m}$ ; 从图 5(c)中可以看出艾利(Airy)衍射斑弥散半径均方根半径是  $1.519\ \mu\text{m}$ , 相对集中, 利于微透镜的成像效果。



(a) 非球面微透镜光线追迹

(a) Ray tracing of aspherical microlens

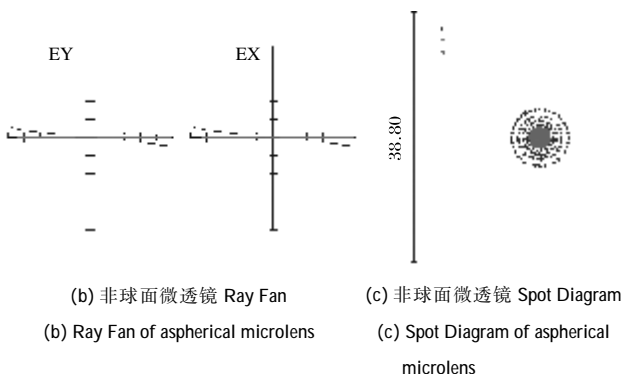


图 5 非球面微透镜的光线追迹结果

Fig.5 Ray tracing results for aspherical microlens

如表 3 所示为红色区域微透镜优化前后的球差值, 球差降低到了近百分之一。

表 3 微透镜优化前后的球差值

Tab.3 Value of spherical aberration before and after optimization

Group No. of microlens	0	1	2	3	4
Before optimization/ $\mu\text{m}$	2.911	3.174	2.955	2.662	2.205
After optimization/ $\mu\text{m}$	0.023	0.020	0.019	0.067	0.037

表 4 所示是优化后红色区域非球面微透镜的各个尺寸, 从 ZEMAX 中导出相应的模型后, 装配到曲面基底相应的位置, 即可构成具有三个“焦距”微透镜阵列。

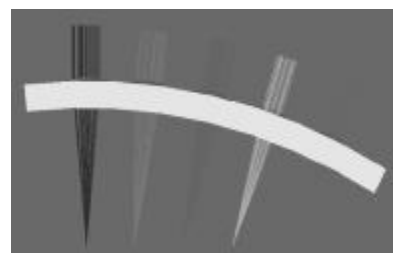
表 4 红色区域非球面微透镜的基本尺寸

Tab.4 Basic size of microlens on red area after optimization

Group No. of microlens	0	1	2	3	4
Focal length/mm	2.227	2.173	2.009	1.724	1.302
Curvature radius of surface vertex/mm	0.929 8	0.910 2	0.895	0.694	0.514 9
Aperture/mm	0.638	0.624	0.579	0.501	0.382
Height/mm	0.056 1	0.052 0	0.048 9	0.043 2	0.034 5

### 3 变焦距曲面人造复眼模型的光线追迹

对复眼模型进行整体光线追迹, 因每一区域的每一级的透镜具有相同焦距, 选取红色区域径向排列的 5 个透镜为例进行光线追迹。正如图 6 所示是变焦距曲面人造复眼的的光线追迹, 与图 1 相比, 可以看出成像光线不仅可以更好的在同一平面成像, 而且每一微透镜的成像光线能量集中, 可以更好的成像, 提高了单独的成像效果, 为今后曲面复眼制作以及将来的图像重建和拼接奠定了基础。



(a) 光线追迹图

(a) Picture of ray tracing



(b) 检测器表面成像光线能量图

(b) Energy picture of image rays on detector surface

图 6 变焦距曲面人造复眼模型的光线追迹

Fig.6 Ray tracing for the zoom curved compound eye model

## 4 结 论

(1) 与非均一性单焦距曲面复眼相比,变焦距曲面人造复眼可以更好的适应环境,对不同大小的目标物和不同距离的目标物均有一定的适应性,增强复眼的成像系能。

(2) 对微透镜进行了非球面的优化设计,极大地提高了微透镜边缘成像性能,同时复眼的整体成像性能得到增强,利于以后成像的重建与拼接。

### 参考文献:

- [1] Land M F. Compound eyes: old and new optical mechanisms [J]. Nature, 1980, 287: 681-686.
- [2] Kirschfeld K. The resolution of lens and compound eyes[J]. Neural Principles in Vision, 1976, 2: 354-370.
- [3] Horridge G A. The evolution of visual processing and the construction of seeing systems [J]. Proc R Soc Lond B,

1987, 230: 279-292.

- [4] He Jianhui, Zhan Zhenxian, Wu Yunliang, et al. Measurement on surface profile of aspherical liquid micro-lens [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 330-333. (in Chinese)  
何建慧, 詹珍贤, 吴云良, 等. 非球面液滴微透镜的轮廓测量方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 330-333.
- [5] 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)  
张宏鑫, 卢振武, 王瑞庭, 等. 曲面复眼成像系统的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 346-350.
- [6] Di Si, Du Ruxu. Optimal design of single-layer spherical compound eye imaging system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(2): 27-31. (in Chinese)  
邸思, 杜如虚. 单层曲面复眼成像系统的优化设计 [J]. 光电工程, 2010, 37(2): 27-31.
- [7] 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)  
曹兆楼, 詹珍贤, 王克逸. 用于运动目标探测的球面复眼透镜的结构设计 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (1): 70-73.
- [8] Richard D. Modern Geometrical Optics [M]. Zhan Hanjing, Transl. Changsha: Hunan University Press, 2004. (in Chinese)  
Richard D. 现代几何光学 [M]. 詹涵著, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 2004.