

文章编号 1004-924X(2008)10-1847-05

# 对重叠复眼进行简化模拟与分析的新方法

张红鑫, 卢振武, 刘 华

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**提出了一种对重叠复眼进行简化模拟与分析的新方法。通过对同一个小眼追迹多束相互倾斜的光线来分析不同小眼对感杆束上光强分布的影响,避免了在建模过程中大量计算各个小眼的三维坐标,大大简化整个建模过程。文中利用这种方法在 ZEMAX 软件中进行了实例模拟,对同一个小眼追迹 6 束光线,相对应探测器上得到的归一化光强分别为 0.782 3、0.784 7、0.773 3、0.480 5、0.109 5、0.001 93,分析结果证明这种方法能够对重叠型复眼进行准确的模拟与分析。

**关键词:**重叠复眼;灵敏度;ZEMAX 软件

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## Novel method to simulate and analyze superposition compound eye

ZHANG Hong-xin, LU Zhen-wu, LIU Hua

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** A novel method to simulate and analyze the superposition compound eye simply and easily was put forward. The effect of the different ommatidia on the light intensity distribution received by a rhabdom could be obtained by analyzing the different rays focused by one ommatidium. In this way, calculation working for 3D coordinate of each ommatidia could be simplified, so that the modeling process became much simpler. The simulation of a superposition compound eye was completed by this method in the ZEMAX software, simulation results show that the normalized intensity distribution on the corresponding detectors are 0.782 3, 0.784 7, 0.773 3, 0.480 5, 0.109 5 and 0.001 93 for one ommatium and six light beams, respectively. The result proves that the simulation and analysis completed by this method is accurate.

**Key words:** superposition compound eye; sensitivity; ZEMAX software

收稿日期:2008-01-28;修订日期:2008-03-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60577004)

## 1 引言

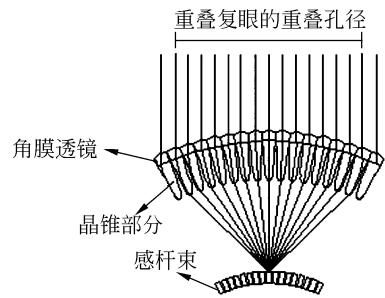
复眼具有体积小、质量轻、视场大、灵敏度高等优点,在生物和光学界得到了广泛重视,也一直是人们的研究热点。并列型复眼和重叠型复眼是生物界中已经发现的复眼中两种主要类型。20 世纪中后期, M. F. Land、G. A. Horridge、P. McIntyre 等人对复眼进行了深入细致的研究<sup>[1-8]</sup>,人们对复眼的认识也从早期的生物学角度转变为从光学的角度进行理解。并列型复眼结构简单,科学家们已经研制出了许多人工仿生并列复眼光学系统,并将其应用于许多领域<sup>[9-14]</sup>。与并列型复眼相比,重叠型复眼有更高的光能量利用率和更高的灵敏度,但是,重叠型复眼结构复杂,许多个小眼收集到的外界光线都会影响一个光接收器上的光线分布情况。这样,在建模过程中需要大量计算相互倾斜的多个小眼的空间位置坐标,特别是在对模型的结构进行优化时,任何一处改动都会带来大量的计算工作,所以对其进行模拟与分析都很十分困难。

本文提出了一种对重叠复眼进行简化模拟与分析的新方法,通过对同一个小眼追迹多束相互倾斜的光线来分析不同小眼对感杆束上光强分布的影响,这样避免了在建模过程中大量计算各个小眼的三维坐标,特别是在对模型的结构进行优化时,省去了大量不必要的工作,使整个建模过程大大简化。文中利用这种方法通过 ZEMAX 软件对重叠复眼进行了实例模拟,并把得到的分析结果转化为不同的小眼对同一个感杆束上光强分布的影响。通过将重叠复眼与并列复眼进行对比,得到了前者比后者有更高的灵敏度和光能量利用率的结论。通过本文所提出的方法,可以相对简单便捷地得到不同方位的小眼对不同感杆束上光强分布的影响,从而为重叠复眼的其它设计、分析、优化等方面奠定了基础。

## 2 新方法的提出

图 1 中,(a)为重叠型复眼的结构示意图,其特点是每一个感杆束可以接收到它上面对应的多个角膜透镜收集到的外界光线。不难想象,在建模软件中建立这样的模型是十分繁琐和困难的。

为了简化这一过程,本文提出了一种新的模拟与分析方法,如图 1(b)所示:把小眼之间的相互倾斜转化为光线之间的相互倾斜,分析一组倾斜的入射光线(光线之间的夹角与图 1(a)中小眼之间的夹角相同)经过同一个小眼后对多个感杆束(感杆束之间的夹角与图 1(a)中小眼之间的夹角相同)上光强分布的影响。显然,这样得到的分析结果又可以转化为图 1(a)中不同的小眼对同一个感杆束上光强分布的影响。



(a) 重叠型复眼的结构示意图

(a) Structure of superposition compound eye



(b) 逆向化分析原理示意图

(b) Principle of reverse analysis

图 1 重叠型复眼的结构及逆向化分析原理示意图  
Fig. 1 Structure of superposition compound eye and principle of reverse analysis

本文利用这种方法在 ZEMAX 软件中建立重叠复眼中一个小眼的光学模型,并通过对一组相互倾斜的入射光线进行追迹来分析这些光线对多个放置在不同感杆束位置的探测器上光强分布情况的影响,然后把得到的分析结果转化为不同的小眼对同一个探测器上光强分布的影响。

## 3 重叠复眼的模拟与分析

根据文献[6]中对生物重叠复眼的解剖和测算结果,在 ZEMAX 软件中构建了一个小眼的光学模型:

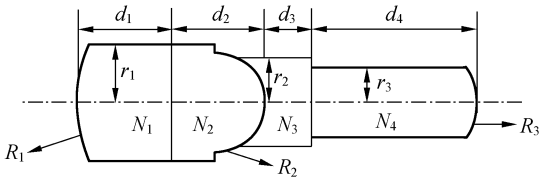


图 2 小眼的光学模型结构示意图

Fig. 2 Diagram of structure of ommatidium optical model

图 2 为小眼的光学模型结构示意图。 $R_1$  为角膜透镜前端面的曲率半径; $R_2$  为角膜透镜与晶锥接触面的曲率半径; $R_3$  为晶锥末端的曲率半径; $r_1$  为角膜透镜的截面半径; $r_2$  为晶锥前面部分的截面半径; $r_3$  为晶锥后面部分的截面半径; $d_1、d_2、d_3、d_4$  部分对应的介质的折射率为  $N_1、N_2、N_3、N_4$ , 其中,  $d_2、d_4$  部分为 GRIN 介质。 $R_1 = 48 \mu\text{m}; R_2 = -16 \mu\text{m}; R_3 = -20 \mu\text{m}; r_1 = 18.5 \mu\text{m}; r_2 = 15 \mu\text{m}; r_3 = 11.2 \mu\text{m}; d_1 = 30 \mu\text{m}; d_2 = 29.8 \mu\text{m}; d_3 = 15 \mu\text{m}; d_4 = 52.6 \mu\text{m}; N_1 = 1.53; N_3 = 1.47; N_2 = 1.53 - \frac{0.00017531}{\mu\text{m}} r^2, N_4 = 1.47 - \frac{0.001}{\mu\text{m}} r^2$ , 其中  $r$  为介质长度。

本文将小眼后面对应的感杆束近似成边长为  $20 \mu\text{m}$  的正方形探测器, 相邻探测器的夹角为  $3^\circ$ , 即小眼之间的夹角, 沿半径为  $440 \mu\text{m}$  的圆周排列。 $0^\circ$  倾角的探测器放置在距离小眼左端面  $320 \mu\text{m}$  的地方。对倾角为  $0、3、6、9、12、15^\circ$  的入射光线进行光线追迹, 结果如图 3 所示。

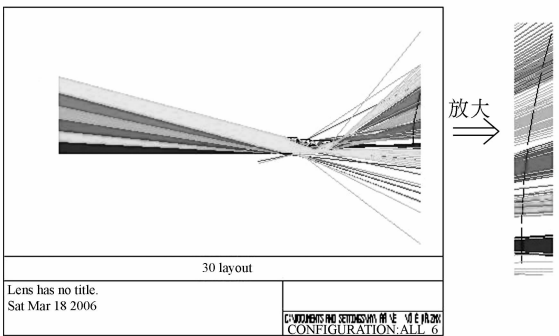


图 3 光线追迹结果

Fig. 3 Result of ray trace

由图 3 可以看出,  $0^\circ$  角的入射光全部到达  $0^\circ$  角的探测器;  $3^\circ$  倾角的入射光全部到达  $3^\circ$  倾角的

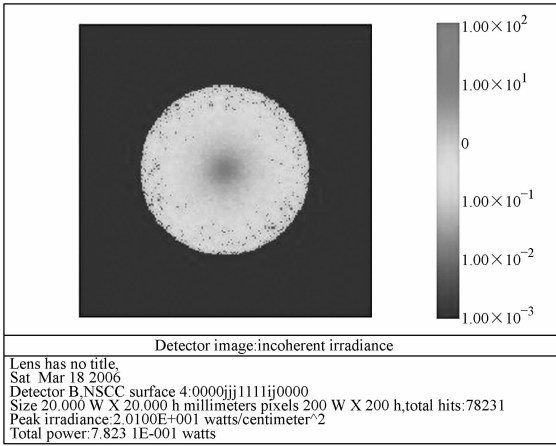
探测器;  $6^\circ$  倾角的入射光也几乎全部到达  $6^\circ$  倾角的探测器;  $9^\circ$  倾角的入射光部分到达  $9^\circ$  倾角的探测器;  $12^\circ$  倾角的入射光部分到达  $12^\circ$  倾角的探测器;  $15^\circ$  倾角的入射光不会到达  $15^\circ$  倾角的探测器, 同时本文也注意到  $15^\circ$  倾角的入射光在通过小眼后有全反射发生, 从而产生许多杂散光, 在生物的复眼中, 小眼与小眼之间充满了折射率  $> 1$  的液体和许多可以吸收杂散光的色素细胞, 这会使杂散光大大减少。

上述结果说明, 对应于图 1(a) 中的情况, 倾角为  $0^\circ、\pm 3^\circ、\pm 6^\circ$  的小眼会聚到的外界的光线几乎全部到达中心小眼所对应的探测器上; 倾角为  $\pm 9^\circ、\pm 12^\circ$  的小眼会聚到的外界的光线只有一部分到达该探测器上; 倾角  $\pm 15^\circ$  的小眼会聚到的外界的光线不会到达该探测器上。此时, 重叠孔径为这 9 个小眼构成圆弧的弦长  $354.53 \mu\text{m}$ , 在文献[7]中, 将复眼的灵敏度定义为:  $S = (\pi/4)^2 (A/f)^2 p^2 (1 - e^{-kx})$ 。其中,  $A$  为通光孔径, 这里即重叠孔径;  $f$  为焦距;  $p$  感杆束的横截面直径;  $k$  为感杆束的吸收系数;  $x$  为感杆束的长度。假设其他条件不变, 重叠复眼与并列复眼的灵敏度由  $A$  决定, 显然, 重叠复眼要比并列复眼的通光孔径大很多。此例中,  $A_{\text{superposition}} = 354.53 \mu\text{m}$ ; 若为并列复眼, 则  $A_{\text{parallel}} = 37 \mu\text{m}$ , 这时, 重叠复眼的灵敏度是并列复眼灵敏度的 91.8 倍。

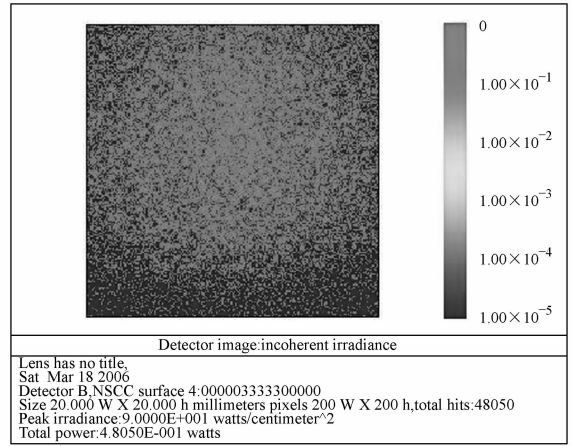
为了进一步了解不同入射角的光线对不同探测器上光强分布的影响程度, 本文在 ZEMAX 软件中分别对不同倾角的光线对相应倾角的探测器上光强分布情况的影响进行了分析, 结果如图 4 所示:

显然, 图 4(a)、(b)、(c) 中的光强分布比较集中, 探测器上接收到的总能量分别为  $0.7823、0.7847、0.7733$ ; (d)、(e) 中的光强分布比较分散, 探测器上接收到的总能量分别为  $0.4805、0.1095$ ; (f) 中几乎没有光强分布, 探测器上接收到的总能量为  $0.00193$ , 出现这些零散光线的原因在于光线追迹时的一些杂散光到达探测器。

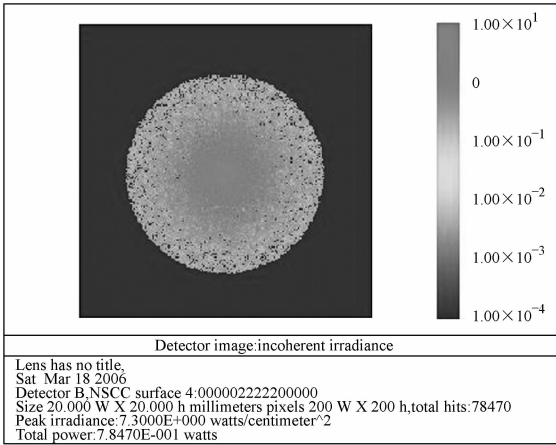
这也说明, 对应于图 1(a) 中的情况, 倾角为  $0^\circ、\pm 3^\circ、\pm 6^\circ$  的小眼对探测器上光强分布的影响很大; 倾角为  $\pm 9^\circ、\pm 12^\circ$  的小眼对探测器上光强分布的影响不大; 倾角为  $\pm 15^\circ$  的小眼对探测器上光强分布几乎没有影响, 即: 小眼倾角越小, 对探测器上光强分布的影响很大; 小眼倾角越大, 对探



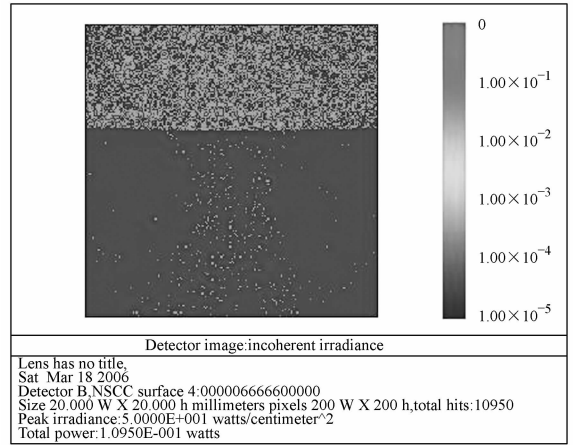
(a)



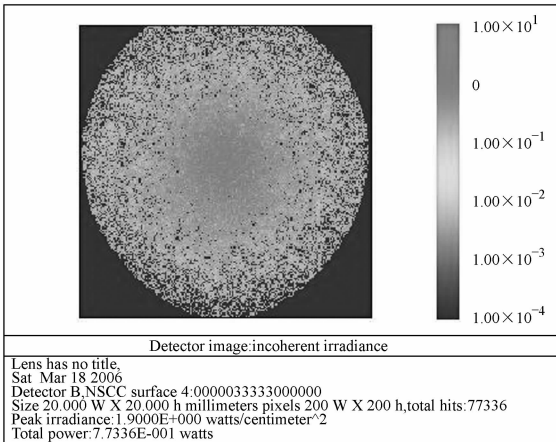
(d)



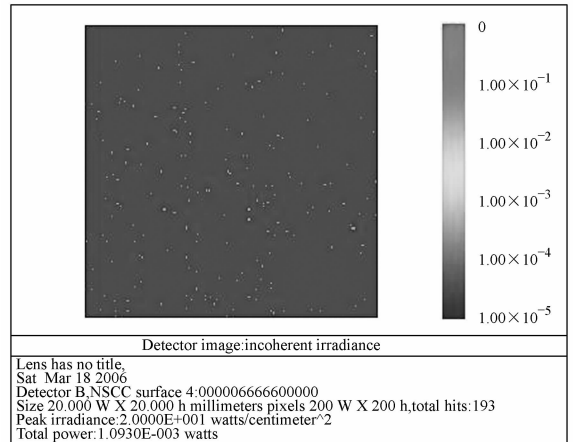
(b)



(e)



(c)



(f)

图 4 探测器上光强分布情况

Fig. 4 Light intensity distribution on detector

探测器上光强分布的影响越小。从探测器上接收到的总能量来看,与只能接收到一个小眼会聚到的

外界光线的并列复眼相比,由于重叠复眼增大了通光孔径,使其具有更高的光能量利用率。

## 4 结 论

仿照复眼结构研制的人工并列型复眼已经在诸多领域得到应用,并受到了广泛的关注。与之相比,重叠复眼有更高的光能量利用率和更高的灵敏度,但是重叠复眼的结构也更加复杂,在建模和对模型的结构进行优化时需要大量的参数计算工作,这使得对其进行模拟与分析变得复杂与繁琐。本文提出了一种对其进行简化模拟与分析的新方法,通过对同一个小眼追迹多束相互倾斜的光线来分析不同小眼对感杆束上光强分布的影

响。文中利用这种方法通过 ZEMAX 软件对重叠复眼进行了实例模拟,并通过对一组倾斜的入射光线进行追迹,分析了这些光线对不同倾角的探测器上光强分布情况的影响,并把得到的分析结果转化为不同的小眼对同一个感杆束上光强分布的影响。通过将重叠复眼与并列复眼进行了对比,得到了前者比后者有更高的灵敏度和光能量利用率的结论。结果证明这种方法能够对重叠型复眼进行准确的模拟与分析,整个过程简单易行,避免了在建模过程中大量计算多个小眼的三维空间坐标,使整个模拟与分析过程大大简化。

## 参考文献:

- [1] LAND M F. Superposition images are formed by reflection in the eyes of some oceanic decapod crustacea[J]. *Nature*, 1976,263:764-765.
- [2] HORRIDGE G A. The compound eye of insects[J]. *Scientific American*, 1977,237:108-120.
- [3] LAND M F. The optical geometry of euphausiid eyes[J]. *Jouranal of Comparative Physiology A*, 1979 ,130(1): 49-62.
- [4] LAND M F. Compound eyes: old and new optical mechanisms[J]. *Nature*, 1980 , 287:681-686.
- [5] WEHNER R. The world as the insect sees it[J]. *Insect Communication* , 1984(2):29-47.
- [6] MCINTYRE P. Graded-index optics are matched to optical geometry in the superposition eyes of scarab beetles[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* , 1985,311:237-269.
- [7] LAND M F. Variations in the structure and design of compound[J]. *Facets of Vision*,1989,3:30-73.
- [8] LAND M F. Variations in the structure and design of compound[J]. *Facets of Vision*,1989,5:90-111.
- [9] VOLKEL R. Microlens array imaging system for photolithography[J]. *Optical Engineering* , 1996,35(11):3323-3330.
- [10] TANIDA J. Thin Observation Module by Bound Optics(TOMBO): an optoelectronic image capturing system[J]. *SPIE*, 2000,4089:1030-1036.
- [11] DUPARRE J. Microoptical telescope compound eye[J]. *Optics Express*, 2005,13(3):889-903.
- [12] SANDERS J S. Design and analysis of apposition compound eye optical sensors[J]. *Optical Engineering* , 1995,34(1):222-235.
- [13] MURA F. Visual contral of altitude and speed in a flying agent[C]. *Animals to Animats*111 MIT Press , 1994: 91-99.
- [14] 张红鑫, 卢振武, 李凤有,等. 曲面复眼成像系统的研究[J]. 光学精密工程,2006,14(3):346-350.  
ZHANG H X,LU ZH W,LI F Y,et al.. Study on curved compound eye imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.* , 2006,14(3):346-350. (in Chinese)

作者简介:张红鑫(1978—),男,河北邯郸人,主要研究方向为微光学加工。E-mail: firsthongxin@163.com

通讯作者:卢振武(1955—),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为衍射光学。E-mail:luzw@ciomp.ac.cn