



## 一种大视场高分辨率的复眼光学系统设计

习啸天 韩军 张岩

### Design of large field of view and high-resolution compound eye optical system

XI Xiaotian, HAN Jun, ZHANG Yan

引用本文:

习啸天, 韩军, 张岩. 一种大视场高分辨率的复眼光学系统设计[J]. 应用光学, 2024, 45(2): 314–320. DOI: 10.5768/JAO202445.0201006

XI Xiaotian, HAN Jun, ZHANG Yan. Design of large field of view and high-resolution compound eye optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(2): 314–320. DOI: 10.5768/JAO202445.0201006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201006>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 大视场航空相机光学系统设计

Design of optical system for large-field-of-view aerocamera

应用光学. 2019, 40(6): 980–986 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0601008>

#### 混合仿生鱼眼-复眼的广角高清成像系统

Biomimetic hybrid fisheye/compound eye imaging system with wide view and high resolution

应用光学. 2019, 40(2): 311–315 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0205002>

#### 基于DMD的大视场长出瞳距星模拟器光学系统设计

Design of optical system based on DMD for simulator with large field of view and long exit pupil distance

应用光学. 2020, 41(5): 891–897 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501003>

#### 高分辨率微型星载相机光学系统的设计及应用

Design and application of optical system for high-resolution micro space-borne camera

应用光学. 2020, 41(2): 235–241 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201001>

#### 大口径红外离轴三反光学系统设计及公差分析

Design and tolerance analysis of infrared off-axis three-mirror optical system with large aperture

应用光学. 2018, 39(6): 803–808 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601007>

#### 超大视场折反射全景光学成像系统设计

Design of catadioptric panoramic optical imaging system with ultra-large field of view

应用光学. 2021, 42(4): 608–613 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2024) 02-0314-07

# 一种大视场高分辨率的复眼光学系统设计

习啸天, 韩军, 张岩

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 针对传统无人机载成像系统无法实现大视场与高分辨率共存的问题, 设计了一款大视场高分辨率无人机载复眼相机系统, 该相机由曲面子眼阵列、光学中继系统和图像探测器三部分组成。中继系统使用了非球面设计, 减小了系统体积。单个子眼焦距为 20 mm, 视场角为 10°, 中继系统为一鱼眼透镜, 焦距为 7 mm, 可将子眼阵列所成焦曲面像转为平面像。总系统视场达到  $122^\circ \times 106^\circ$ ,  $F$  数为 3, 焦距为 3 mm, 在飞行高度 1 000 m 时对地分辨率为 0.8 m。仿真结果显示, 各个光学子通道调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 在 208 lp/mm 处均大于 0.3, 系统在给定的公差范围内像质能够满足要求。与现有无人机载复眼系统相比, 该文设计的系统视场更大, 分辨率更高, 且体积更小。

**关键词:** 大视场; 复眼相机; 光学设计; 公差分析

中图分类号: TN202; O439

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202445.0201006](https://doi.org/10.5768/JAO202445.0201006)

## Design of large field of view and high-resolution compound eye optical system

XI Xiaotian, HAN Jun, ZHANG Yan

(School of Opto-electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** To address the problem of traditional unmanned aerial vehicle (UAV) imaging systems being unable to achieve the coexistence of large field of view and high resolution, a large field of view and high-resolution UAV-borne compound eye camera system composed of a curved sub-eye array, an optical relay system and an image detector was designed. The non-spherical design was used for the relay system to reduce the system volume. Each sub-eye had a focal length of 20 mm and a field of view of 10°. The relay system used a fisheye lens with a focal length of 7 mm to convert the curved focal surface formed by the sub-eye array into a planar image. The overall system had a field of view of  $122^\circ \times 106^\circ$ , an  $F$ -number of 3, and a focal length of 3 mm, achieving a ground resolution of 0.8 m at a flying height of 1 000 m. The simulation results show that the modulation transfer function (MTF) of each optical sub-channel is greater than 0.3 at 208 lp/mm, and the image quality of the system meets the requirements within the given tolerance range. Compared to existing UAV-borne compound eye systems, the proposed system offers a larger field of view, higher resolution and smaller size.

**Key words:** large field of view; compound eye camera; optical design; tolerance analysis

## 引言

近年来, 随着科技的迅速发展, 无人机得到了广阔的应用, 不论是辅助交通、景区监管, 还是旅游航拍、商业表演, 都展现出了巨大的价值和魅

力。作为战略性新兴产业之一, 我国在无人机技术、产品、应用和市场上取得了重大突破和发展。但传统的无人机载相机<sup>[1-3]</sup>视场小, 且只能实现把三维世界的三维信息转换成二维投影, 无法实现

收稿日期: 2023-07-03; 修回日期: 2023-07-28

基金项目: 国家应用创新基金 (G20220621)

作者简介: 习啸天 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计研究。E-mail: [15797680900@163.com](mailto:15797680900@163.com)

通信作者: 韩军 (1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电测试技术, 光学薄膜技术研究。E-mail: [hanjun513@126.com](mailto:hanjun513@126.com)

测速与定位功能<sup>[4]</sup>, 为了弥补这一缺点, 部分科研工作者提出了多相机系统<sup>[5-6]</sup>, 但多相机系统体积大, 数据繁冗, 并且多相机系统工作时难以实现多个相机同步。

在自然界中, 节肢类动物拥有与哺乳动物单眼视觉系统不同的复眼视觉系统<sup>[7-8]</sup>, 相比于单眼视觉系统, 复眼视觉系统具有大视场、高灵敏度和快速跟踪与定位等优点。针对这些优点, 国内外科研工作者开始研究设计仿生复眼光学系统<sup>[9-13]</sup>。西安光机所的许黄蓉等人设计了一款焦距为 5 mm, 成像视场为 98°×98°的无人机载复眼相机<sup>[14]</sup>, 在 500 m 高度对地成像分辨率为 1 m, 整体系统体积为 123 mm×123 mm×195 mm, 虽然获得了大视场, 但在对地分辨率上略有不足。因此, 本文主要针对无人机载相机大视场和高分辨率的需求, 研究如何在获得大视场的情况下, 可以提高系统对地成像分辨率, 另外, 考虑到无人机载荷需要轻小型的问题, 在设计中引入了非球面, 减小了系统的整体体积与重量。

## 1 无人机载复眼系统设计

### 1.1 曲面仿生复眼工作原理

曲面仿生复眼原理如图 1 所示。在一曲率半径为  $R$  的曲面上, 按一定间隔排列着小孔径透镜阵列, 每个小孔径透镜称作复眼透镜的一个子眼, 其外径为  $D$ , 焦距为  $f$ , 相临子眼间隔距离为  $p$ , 子眼的光轴以夹角  $\Delta\phi$  将物空间分成若干个视场, 每个子眼视场角为  $2\omega$ , 所有子眼所成的像拼接在一起便可得到一幅完整的物空间像。相邻子眼间光轴夹角为

$$\Delta\phi = \arctan \frac{D+P}{R} \quad (1)$$

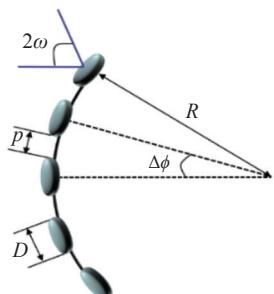


图 1 曲面仿生复眼原理图

Fig. 1 Schematic diagram of bionic compound eye for curved surfaces

相邻子眼在像面上所成的像有一定间隔, 但为

了避免相邻子眼间出现视野盲区, 两子眼间应该有一定的视场重叠, 重叠区域不宜过大, 否则会对后续图像处理带来很大的麻烦。根据曲面排布的微透镜阵列成像理论, 定义相邻透镜之间的视场重叠率为

$$\sigma = \frac{2\omega - \Delta\phi}{2\omega + \Delta\phi} \quad (2)$$

为了保证  $\sigma > 0$ , 则  $2\omega > \Delta\phi$ , 但当  $0 < \Delta\phi < \omega$  时, 在无穷远处, 3 个相邻子眼中中间子眼的视场将会被覆盖, 故  $\Delta\phi > \omega$ 。由此可得子眼视场角  $2\omega$  和相邻子眼光轴间夹角  $\Delta\phi$  关系为

$$\omega < \Delta\phi < 2\omega \quad (3)$$

### 1.2 子眼阵列排布设计

与平面型仿生复眼相比, 曲面型仿生复眼更接近生物界的复眼结构, 现有的曲面复眼结构主要有 3 种形式, 分别为圆周形排布、六边形排布和十字形排布。本文选用填充率较高的六边形排布方式<sup>[15]</sup>, 由于六边形是旋转对称的, 如图 2 所示, 故颜色相同的子眼各为一组, 每组中有 6 个子眼。

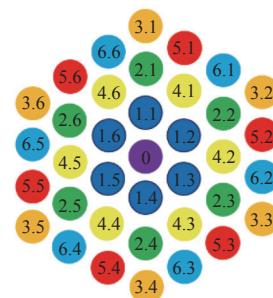


图 2 六边形曲面复眼平面图

Fig. 2 Planar graph of hexagonal curved compound eye

当把六边形阵列排布在曲面基底上时, 每一个子眼透镜的位置对于曲面复眼的建立至关重要。以曲面基底的球心作为原点, 中心子眼透镜的光轴作为 Z 轴建立直角坐标系, 如图 3 所示, 则每个子眼都在曲面基底上有其位置。

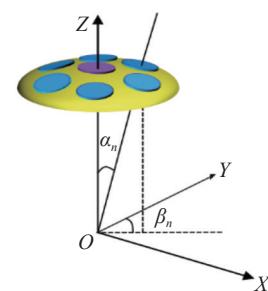


图 3 子眼透镜方位角

Fig. 3 Sub-eye lens azimuth

当子眼阵列以六边形排布时有 3 个主阵列, 选取其中一个主阵列中如子眼透镜 0、1.1、2.1、3.1 所在的方向为图 3 中的 Y 轴方向(见图 2 所示), 由于每一组中 6 个子眼与 Z 轴夹角相同, 在设计时只需要给出每组中一个子眼透镜的位置即可, 因此需要计算出每组第一个子眼的方位角。子眼透镜 0、1.1、2.1、3.1…位于 Y 轴方向上, 故其与 Y 轴的夹角为 0, 与 Z 轴的夹角为  $n\Delta\phi (n = 1, 2, 3, \dots)$ , 其余子眼透镜不在轴上, 可按照几何方法算出它们的方位角。

## 2 复眼光学系统设计

本文设计的仿生复眼光学系统由三部分组成, 分别是六边形排布的曲面透镜阵列, 把透镜阵列所成焦曲面像转成平面像的中继系统, 以及接收平面像的图像传感器。系统焦距可由下式决定:

$$f' = \frac{\mu H}{a} \quad (4)$$

式中:  $H$  为探测距离;  $a$  为地面分辨率;  $f'$  为总系统焦距;  $\mu$  为探测器单个像元尺寸。本文设计的无人机飞行高度 1 000 m, 地面分辨率 0.8 m, 采用 Sony 公司的 IMX383-AAQK 探测器, 像元个数为 5 640(H)×3 694(V), 单个像元尺寸 2.4  $\mu\text{m}$ , 将数据代入(4)式可得系统焦距为 3 mm。系统总体设计参数如表 1 所示。

表 1 无人机载复眼光学系统设计指标

Table 1 Design indexes of UAV-borne compound eye optical system

系统参数	设计指标
焦距/mm	3
波段/ $\mu\text{m}$	0.38~0.76
探测距离/km	1
目标尺寸/m	0.8
系统长度/mm	<200
像元尺寸/ $\mu\text{m}$	2.4
相邻子眼夹角/(°)	8
视场/(°)	122

由表 1 中探测器单个像元尺寸可以计算出复眼系统的奈奎斯特频率为

$$f_{\text{Nyquist}} = \frac{1000}{2\mu} = \frac{1000}{2 \times 2.4} = 208 \text{ lp/mm} \quad (5)$$

### 2.1 子眼光学系统设计

根据上述指标, 子眼透镜光学参数如表 2 所示。

表 2 子眼透镜光学参数

Table 2 Optical parameters of sub-eye lens

参数	指标
焦距/mm	20
$F^*$	4
视场/(°)	10

由于子眼焦距过长, 需采用多片镜面组合以减小像差。为了实现小型化, 使用曲面面型为双曲面的非球面进行处理, 最终子眼系统由 3 片镜面组成, 结构如图 4 所示。

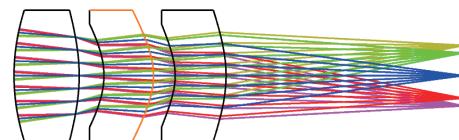


图 4 子眼系统结构光路图

Fig. 4 Optical path diagram of sub-eye system structure

由表 1 给出的系统设计指标, 得出子眼透镜主阵列方向上有 15 个子眼, 则该透镜阵列由 169 个子眼组成, 单个子眼所成的像占用探测器像元数为 130×130。阵列曲率半径为 82 mm, 子眼后截距为 14 mm, 故子眼所成像面为曲率半径为 68 mm 的焦曲面。

因子眼的焦曲面为中继系统的物面, 再结合中继系统的放大率为 0.2, 故可对子眼在截止频率为 42 lp/mm 处进行评价。

子眼系统的 MTF 曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 在截止频率 208 lp/mm 处, MTF 值大于 0.3, 满足成像条件。子眼系统的点列图如图 6 所示。从图 6 可以看出, 均方根 (root mean square, RMS) 半径均小于艾里斑半径, 成像质量良好。

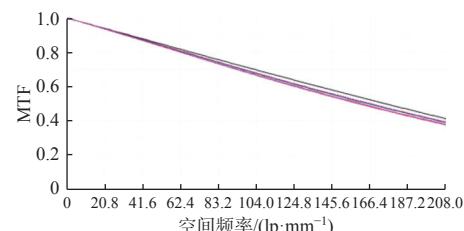


图 5 子眼系统 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves of sub-eye system

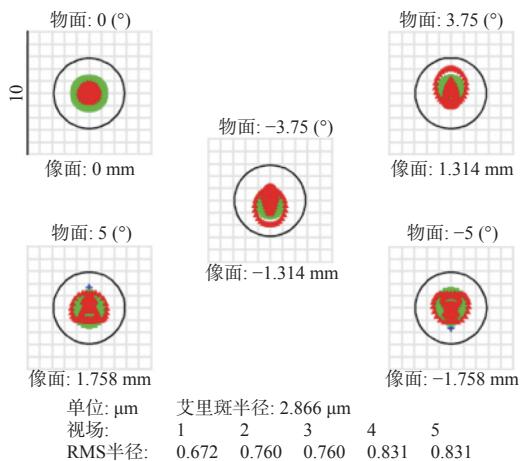


图 6 子眼系统点列图

Fig. 6 Spot diagram of sub-eye system

用 1.2 节中的方法计算出各个子眼的方位角后, 将设计好的子眼透镜按各自方位角进行排布, 如图 7 所示。

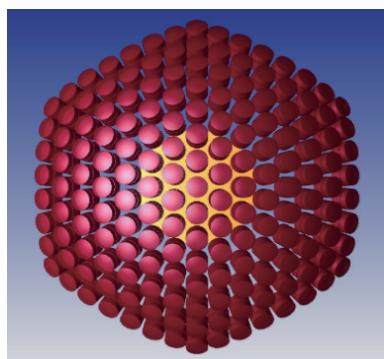


图 7 子眼透镜阵列排布图

Fig. 7 Diagram of sub-eye lens array arrangement

## 2.2 中继系统光学设计

中继系统是把子眼透镜阵列所成的焦曲面像转成平面像, 由于其承接视场大, 故可以当作一个近物距的鱼眼镜头来设计。为了保证所有子眼所成的像都可以被中继系统接收, 其视场必须  $\geq 97^\circ$ , 中继系统光学参数如表 3 所示。

表 3 中继系统光学参数

Table 3 Optical parameters of relay system

参数	指标
焦距/mm	7
视场/(°)	$\geq 97$
$F^*$	2.5

鱼眼镜头是具有大视场、大孔径的光学成像系统<sup>[16]</sup>, 一般前光组由 2~3 片负弯月透镜组成, 主

要起视场压缩的作用。当光束以较大的入射角入射到前光组的光学面上, 经光学系统成像后, 子午和弧矢平面内的聚光位置与波阵面参数可能完全不一致。因此, 传统的赛德尔像差理论不适用于此类光学系统的像差计算, 需要应用平面对称光学系统像差理论<sup>[17]</sup>对中继系统的初始结构进行求解。经过在 Zemax 软件上进行仿真, 发现该初始结构像差太大, 需要进一步进行优化。经分析, 在前光组增加了一片负弯月透镜, 以减小由于视场压缩过快而引起的像差, 同时, 给后光组也增加了一片正透镜, 增加了 Zemax 优化的可变量。另外, 将后光组的倒数第二片、第三片透镜进行双胶合, 有利于校正整体球差和色差。前光组共由 3 片负弯月透镜组成, 后光组由 5 片透镜组成, 各透镜均为球面镜, 结构如图 8 所示。

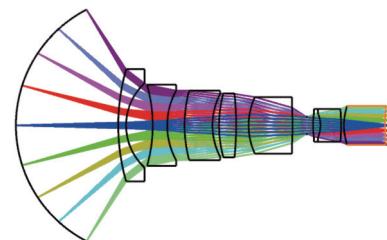


图 8 球面式中继系统结构

Fig. 8 Spherical relay system structure

为了减小无人机的载荷量, 在中继系统上使用了非球面, 最终得到的中继系统由 6 片镜面组成, 系统总长减小了 28 mm, 结构如图 9 所示。

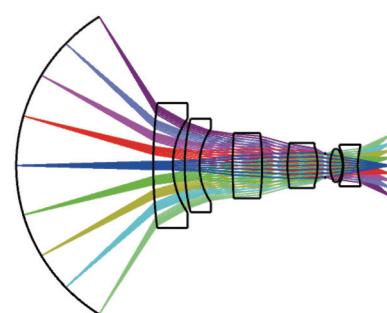


图 9 非球面式中继系统结构

Fig. 9 Aspherical relay system structure

该系统没有采用双胶合, 使用冕牌玻璃与火石玻璃相结合的方式减小系统色差。一般以 MTF 曲线作为评价一个光学系统成像质量好坏的标准, 中继系统的 MTF 曲线如图 10 所示。从图 10 可以看出, 在截止频率 208 lp/mm 处, 系统的 MTF 值大于 0.3, 成像质量良好。

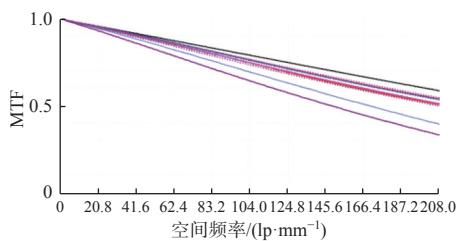


图 10 中继系统最终结构 MTF 曲线

Fig. 10 MTF curves of final structure of relay system

### 3 复眼光学系统像质评价

在子眼光学系统和中继系统分别设计完成后, 需要对其进行拼接以成为一个完整的复眼光学系统, 在拼接时必须遵循光瞳衔接原则, 即子眼系统的出瞳要与中继系统的入瞳位置重合在一起。拼接完成后, 复眼光学系统主阵列方向的光路图如图 11 所示, 在非序列模式下复眼光学系统的实体模型如图 12 所示。

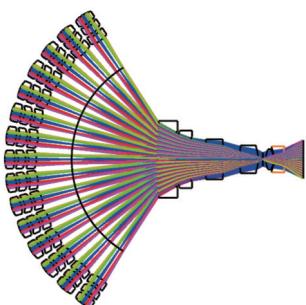


图 11 复眼光学系统主阵列方向光路图

Fig. 11 Directional optical path diagram of main array of compound eye optical system

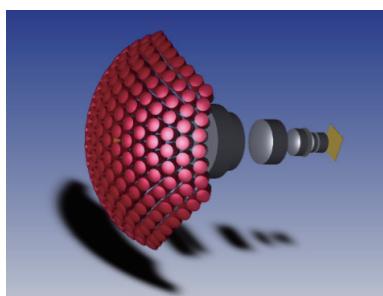
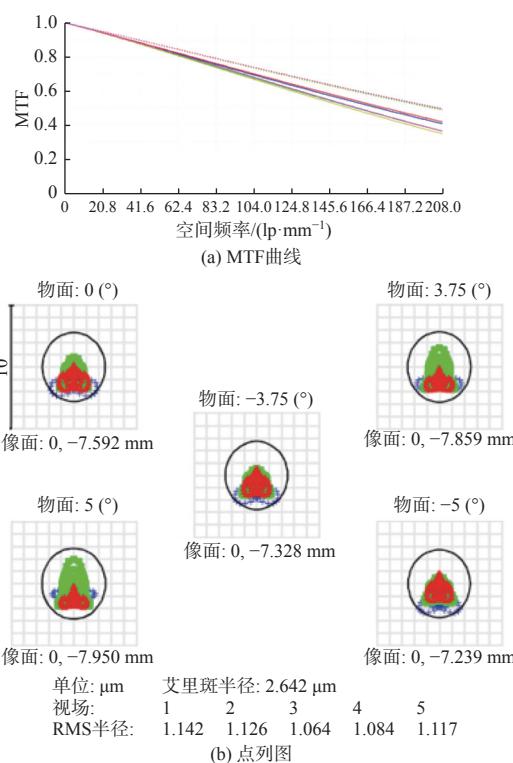


图 12 复眼光学系统实体模型图

Fig. 12 Solid model diagram of compound eye optical system

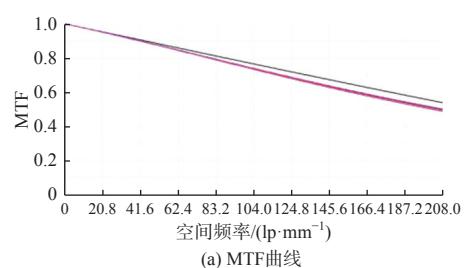
由于复眼系统视场较大, 且是由多个子眼拼接的光学系统, 故需要对每个子眼通道进行像质评价, 在此仅展示最边缘视场子眼通道和中心视场子眼通道的像质评价结果。 $\omega = 60^\circ$  处子眼通道的

MTF 曲线和点列图如图 13 所示。从图 13(a)可以看出, 该视场处子眼通道的 MTF 值在截至频率处大于 0.3; 从图 13(b)可以看出, 该子眼通道处光斑的 RMS 半径均小于艾里斑半径, 成像质量良好。

图 13  $\omega = 60^\circ$  处子眼通道的 MTF 曲线和点列图Fig. 13 MTF curves and spot diagram of sub-eye channel at  $\omega = 60^\circ$ 

$\omega = 0^\circ$  处子眼通道的 MTF 曲线和点列图如图 14(a)和图 14(b) 所示。从图 14 可以看出, 在  $\omega = 0^\circ$  处子眼通道的 MTF 接近 0.5, 相比于最边缘视场的 MTF 增幅大于 0.1; 另外, 此处的光斑 RMS 半径小于艾里斑半径, 且能量分布集中, 成像质量良好。

复眼光学系统中子眼通道的场曲和畸变如图 15 所示。从图 15 可以看出, 在  $\omega = 0^\circ$  和  $\omega = 60^\circ$  处子眼通道的场曲均小于  $20.0 \mu\text{m}$ , 在系统的最大焦深范围内, 在  $\omega = 0^\circ$  处畸变值为 0.5%, 在  $\omega = 60^\circ$  处畸变值小于 1.2%, 两视场处畸变均小于 4%, 满足系统设计要求。



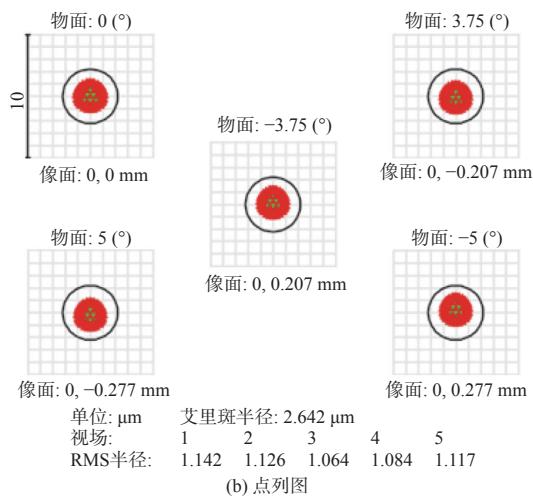
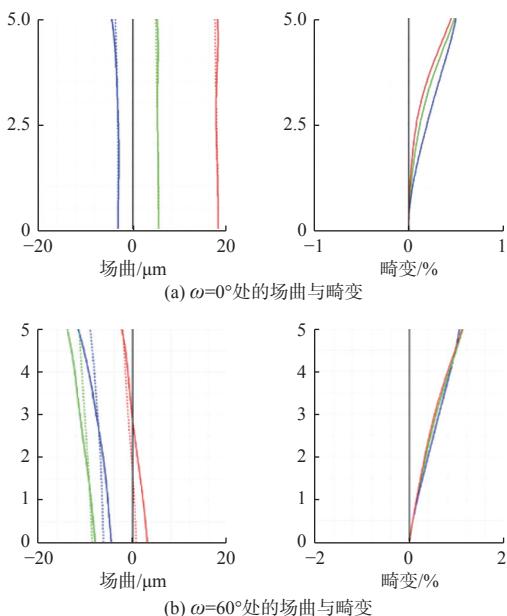
图 14  $\omega = 0^\circ$  处子眼通道的 MTF 和点列图Fig. 14 MTF curves and spot diagram of sub-eye channel at  $\omega = 0^\circ$ 

图 15 不同视场处子眼通道的场曲与畸变

Fig. 15 Field curvature and distortion of sub-eye channels with different fields of view

## 4 公差分析

当设计好一个光学系统之后,不仅要使其成像质量达到要求,还要使其能够满足现实中的加工要求,公差分析的目的就是确定给系统多大公差量时,使光学系统的性能仍能满足要求。本文选择了“几何 MTF 平均”的评价方法作为公差分配的成像标准,名义值为 0.426 852 76。采用灵敏度和 Monte Carlo 分析法对边缘子眼透镜通道分析了 200 组镜头数据,分析结果如表 4 所示。由表 4 可

知,由于加工和装调误差引起 MTF 下降后,仍有 90% 的产品 MTF 优于 0.301 439 25, 满足设计指标。

表 4 Monte Carlo 公差分析结果

Table 4 Monte Carlo tolerance analysis results

Monte Carlo 样本百分比/%	几何 MTF 平均值
90	0.301 439 25
80	0.338 416 92
50	0.362 761 53
20	0.376 347 59
10	0.405 936 71

## 5 结论

针对现有无人机载相机大视场和高分辨率的需求,设计了一款最大视场  $122^\circ$ , 在  $1000\text{ m}$  高空对地分辨率  $0.8\text{ m}$  的无人机载复眼相机, 该相机系统体积为  $123\text{ mm} \times 123\text{ mm} \times 125\text{ mm}$ , 质量为  $317\text{ g}$ , 与现有复眼相机相比, 体积更小, 质量更轻。对所设计的复眼系统进行像质评价与公差分析, 分析结果表明, 边缘子眼通道 MTF 在截止频率  $208\text{ lp/mm}$  处大于 0.3, RMS 光斑半径满足成像要求, 系统总体成像质量良好, 公差分配合理。该光学系统结构简单, 易于加工, 可应用于大视场成像, 军事目标探测与识别, 导航定位等多个领域。

## 参考文献:

- [1] 蒋宁, 贾继强, 金灿强, 等. 无人机载面阵数字相机光学镜头设计[J]. 装备制造技术, 2012(6): 35-37.  
JIANG Ning, JIA Jiqiang, JIN Canqiang, et al. Design for optical lens of UAV plane array digital camera on the aircraft[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012(6): 35-37.
- [2] 朱海滨, 张远健, 朱大略, 等. 小型无人机载高分辨率物镜设计[J]. 光电技术应用, 2016, 31(3): 4-8.  
ZHU Haibin, ZHANG Yuanjian, ZHU Dalue, et al. Design of high-resolution objective on small UAV[J]. Electro-Optic Technology Application, 2016, 31(3): 4-8.
- [3] 刘仲宇, 张涛, 李嘉全, 等. 超小型无人机相机系统关键技术研究[J]. 光电工程, 2013, 40(4): 80-85.  
LIU Zhongyu, ZHANG Tao, LI Jiaquan, et al. Research on key technology of ultra-small UAV camera system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(4): 80-85.
- [4] 檀立刚, 骆明伟, 李捷, 等. 无人机光电设备对地目标单

- 站无源定位方法[J]. *应用光学*, 2022, 43(4): 599-610.
- TAN Ligang, LUO Mingwei, LI Jie, et al. Method of single-station passive location to ground target by UAV photoelectric equipment[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 599-610.
- [5] WILBURN B, JOSHI N, VAISH V, et al. High performance imaging using large camera arrays[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2005, 24(3): 765-776.
- [6] AFSHARI H, POPOVIC V, TASCI T, et al. A spherical multi-camera system with real-time omnidirectional video acquisition capability[J]. *IEEE Transactions Consumer Electronics*, 2012, 58(4): 1110-1118.
- [7] HORRIDGE G A. The compound eye of insects[J]. *Scientific American*, 1977, 237(1): 108-120.
- [8] EGELHAAF M, KERN R. Vision in flying insects[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 2002, 12(6): 699-706.
- [9] JUN T, TOMOYA K, KENJI Y, et al. Thin observation module by bound optics (TOMBO): an optoelectronic image capturing system[J]. *SPIE*, 2000, 4089: 1030-1036.
- [10] SONG Y M, XIE Y, MALYARCHUK V, et al. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye[J]. *Nature*, 2013, 497(7447): 95-99.
- [11] XIAO J, SONG Y M, XIE Y, et al. Bio-inspired hemispherical compound eye camera[J]. *SPIE*, 2014, 8958: 12-18.
- [12] 付跃刚, 赵宇, 刘智颖, 等. 基于视场拼接方法的仿生复眼光学系统设计[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(2): 422-429.
- FU Yuegang, ZHAO Yu, LIU Zhiying, et al. Design of bionic compound eye optical system based on field stitching method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(2): 422-429.
- [13] SHI C, WANG Y, LIU C, et al. SCECam: a spherical compound eye camera for fast location and recognition of objects at a large field of view[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 32333-32345.
- [14] 许黄蓉, 刘晋亨, 张远杰, 等. 无人机载型曲面仿生复眼成像测速系统[J]. *光子学报*, 2021, 50(9): 232-238.
- XU Huangrong, LIU Jinheng, ZHANG Yuanjie, et al. UAV-borne surface biomimetic compound eye imaging speed measurement system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(9): 232-238.
- [15] 范晨, 刘钩, 高明, 等. 六边形环带排布的共光路复眼光学系统设计[J]. *中国光学*, 2022, 16(1): 158-173.
- FAN Chen, LIU Jun, GAO Ming, et al. Design of common optical path compound eye optical system with hexagonal ring belt arrangement[J]. *Chinese Optics*, 2022, 16(1): 158-173.
- [16] 刘海英, 王跃, 王英, 等. 大视场航空相机光学系统设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 980-986.
- LIU Haiying, WANG Yue, WANG Ying, et al. Design of optical system for large-field of view aerocamera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 980-986.
- [17] 吕丽军, 吴学伟. 鱼眼镜头初始结构的设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 105-114.
- LYU Lijun, WU Xuewei. Design of initial structure of fisheye lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 105-114.