

# 单中心超广角手机镜头设计

郭智元<sup>1</sup>, 李建聪<sup>1</sup>, 陈大喜<sup>2</sup>, 伍雁雄<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>佛山科学技术学院物理与光电工程学院, 广东 佛山 528200;

<sup>2</sup>季华实验室, 广东 佛山 528200

**摘要** 为实现大视场、低成本、高解析力的高性能手机镜头光学系统, 基于 ZEMAX 软件设计了 2 个采用不同滤光方式的单中心超广角手机镜头光学系统, 匹配于曲面传感器。2 个光学系统分别由 4 片同心塑料透镜和曲面滤光片或红外截止膜构成, 系统  $F$  数均为 1.8, 视场角均为  $130^\circ$ , 系统焦距均为 2.64 mm, 系统总长均为 4.1 mm。中心视场的调制传递函数(MTF)值在奈奎斯特频率为 200 lp/mm 处大于 0.5, 在奈奎斯特频率为 400 lp/mm 处大于 0.2; 0.7 以内视场的 MTF 值在奈奎斯特频率为 400 lp/mm 处大于 0.2。全视场相对照度大于 0.42。最大均方根半径小于  $3.75 \mu\text{m}$ , 符合手机镜头成像要求, 实现了超广角、短焦、紧凑型光学系统设计, 可加工性强, 成像质量高。

**关键词** 光学设计; 手机镜头; 同心透镜; 超广角; 短焦

中图分类号 TB811

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.072204

## Design of Single-Center and Ultra-Wide-Angle Mobile Phone Lenses

Guo Zhiyuan<sup>1</sup>, Li Jiancong<sup>1</sup>, Chen Taixi<sup>2</sup>, Wu Yanxiong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong 528200, China;

<sup>2</sup>Ji Hua Laboratory, Foshan, Guangdong 528200, China

**Abstract** Herein, to achieve high-performance mobile phone lens optical system with a large view field, low cost, and high resolution, two single-center and ultra-wide-angle optical systems of mobile phone lens with different filtering methods are designed based on ZEMAX software, which are matched with a curved sensor. The two optical systems comprise four concentric plastic lenses, a curved surface filter, or an IR-CUT film with the system  $F$ -number of 1.8, view field of  $130^\circ$ , and focal and total lengths of the system of 2.64 mm and 4.1 mm, respectively. The modulation transfer function (MTF) value of the central view field is greater than 0.5 and 0.3 at 200- and 400-lp/mm Nyquist frequencies, respectively. The MTF value of less than 0.7 view field is greater than 0.2 at 400-lp/mm Nyquist frequency. The relative illumination of full view field is greater than 0.42. The maximum RMS radius is less than  $3.75 \mu\text{m}$ , which satisfies the requirements of mobile phone lens imaging. The design of an ultra-wide-angle, short focus, and compact optical system is accomplished with high machinability and high imaging quality.

**Key words** optical design; mobile phone lens; concentric lens; ultra-wide-angle; short focal

**OCIS codes** 220.3620; 220.4830; 220.3630

## 1 引言

手机镜头是决定一部手机成像质量的关键因素。随着手机镜头设计能力的提升与图像传感器制造技术的不断发展, 手机镜头的像素从 2000 年夏普 J-SH04 的 11 万像素<sup>[1]</sup>发展到如今主流的 1000 万级像素, 如 OPPO Reno Z 主摄采用索尼

IMX 586 4800 万超清像素镜头, 具有超高的图像解析能力。华为 P30 Pro 后置徕卡四摄, 最高 4000 万像素, 支持 50 倍数码变焦以及超大广角、超微距等摄影模式。黄耀林等<sup>[2]</sup>设计了一款全视场角为  $78^\circ$ ,  $F$  数为 2.0 的 1600 万像素手机镜头, 匹配于 Omnivision 公司的 OV16880 型 CMOS 图像传感器, 像素大小为  $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 。耿雨晴等<sup>[3]</sup>设计了

收稿日期: 2019-11-11; 修回日期: 2019-12-16; 录用日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61771139)、佛山科学技术学院高建科研项目(CGG07141)

\* E-mail: 364477424@qq.com; \*\* E-mail: 13680720796@163.com

一款光圈值为 2.2, 半视场角为  $35^\circ$ , 有效焦距为 3.6 mm, 系统总长为 3.6 mm 的 1300 万像素轻薄型手机镜头。戴付建等<sup>[4]</sup>设计了一款焦距为 5.676 mm, 入瞳口径为 2.02 mm, 全视场角为  $60^\circ$ , 光学总长小于 5.3 mm 的长焦手机镜头。手机镜头正朝着大视场、多摄、高解析力、微型化方向发展, 高性能手机镜头对于提高智能手机性价比、增强手机品牌竞争力具有重要意义。

同心光学系统为对称系统, 且物点都位于对称轴上, 匹配于曲面传感器, 只需矫正球差和轴向色差, 适用于大视场、大相对孔径光学系统, 如可见光空间相机<sup>[5]</sup>、广角监控摄像头<sup>[6]</sup>、混合仿生鱼眼-复眼的广角高清成像系统<sup>[7]</sup>、手机镜头<sup>[8]</sup>等。

现有的手机镜头光学系统全视场角大都在  $65^\circ \sim 80^\circ$  范围内, 系统总长为 4.5~6.5 mm, 且大都采用非球面设计, 加工制造成本高。为了增大手机镜头成像视场角, 减少非球面使用, 降低生产成本, 本文基于同心透镜成像特性, 设计了两个系统  $F$  数为 1.8 的单中心超广角手机镜头光学系统。两个系统分别采用后置曲面滤光片、镀红外截止膜, 以截止波长为 750~1100 nm 的近红外光, 系统焦距为 2.64 mm, 系统总长 4.1 mm, 全视场相对照度  $\geq 0.42$ , 可实现  $130^\circ$  超广角高像质成像。

## 2 同心光学系统

### 2.1 同心光学系统结构特点

同心透镜是两个光学折射面球心重合的凹、凸透镜, 具有负光焦度, 对光线起微弱的发散作用。同心光学系统具有单心性、高度对称性, 孔径光阑位于系统中心, 其像面是一个同心球面, 适用于大视场、大相对孔径光学系统设计。通过控制同心光学系统最内层两个对称半球透镜的曲率半径绝对值等于厚度, 再胶合, 可实现等同于球透镜的设计效果。同心光学系统中经过球心的不同视场主光线都可以视为光轴, 相当于物点都是轴上点, 不存在慧差、倍率色差等轴外像差, 不需要对场曲进行矫正, 仅需矫正球差和轴向色差<sup>[8]</sup>。

### 2.2 大视场同心光学系统成像条件

同心透镜所有折射面具有共同的曲率中心, 各视场角主光线经过第一、第二透镜到达球心时角度保持不变, 球心处主光线视场角为系统视场角(图 1)。假设同心透镜内层半球透镜采用 H-K9L 玻璃材料, 根据全反射公式<sup>[9]</sup>

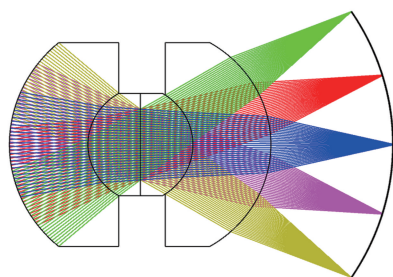


图 1 同心透镜示意图

Fig. 1 Schematic of concentric lens

$$\sin I_m = \frac{n'}{n}, \quad (1)$$

式中:  $I_m$  为全反射临界角,  $I_m = 41.245^\circ$ ;  $n'$  为空气折射率;  $n$  为 H-K9L 玻璃材料折射率。则全视场角的最大值为  $82.49^\circ$ 。若采用更高折射率材料, 则全视场角将小于  $82.49^\circ$ 。将同心透镜内层的两半球透镜采用胶合方式组合, 则可打破全反射限制, 实现超广角光学系统设计, 同时将外层透镜进行胶合也能使光线在透镜之间无缝传播, 降低设计难度。

### 2.3 同心光学系统像差特性

同心光学系统为对称光学系统, 光阑位于系统中心。系统对称部分的垂轴像差的像差系数  $S_{II}$  (慧差系数)、 $S_V$  (畸变系数)、 $C_{II}$  (倍率色差系数) 符号相反, 相互抵消; 轴向像差的像差系数  $S_I$  (球差系数)、 $C_I$  (轴向色差系数)、 $S_{III}$  (像散系数)、 $S_{IV}$  (场曲系数) 符号相同, 相互叠加。同心光学系统物点都位于轴上, 因此不用考虑像散、畸变等轴外像差, 存在的主要像差为球差、轴向色差。球差是最基本的像差, 是由不同倾角光线与光轴交于不同位置上, 相对于理想像点的位置偏离导致的, 球差会导致像面上形成弥散斑。图 2 为全胶合同心光学系统的光路图。其中:  $u_k$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) 是光线入射到各表面的物方孔径角;  $l$  是物距,  $l = \infty$  说明入射光为平行光;  $i_k$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) 为光线进入各表面的入射角;  $i'_k$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) 是光线经过各表面后的出射角;  $n_q$  ( $q=1, 2, \dots, 6$ ) 分别是光线所在各介质的折射率;  $\delta L' = L' - l'$  是实际光线与理想光线的像方截距之差, 用以表征球差。两个平面胶合在一起后, 两个内层平凸同心透镜相当于一个球透镜。光线经过折射面时, 已有物方球差, 该折射面也产生球差, 由近轴光线追迹公式<sup>[9]</sup>可推导得到

$$\begin{aligned} n'u' \sin U' \delta L' - nu \sin U \delta L = \\ - (L' \sin U' - L \sin U) ni, \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $n'$  为像方折射率;  $u'$  为近轴光线像方孔径角;  $U'$  为实际光线像方孔径角;  $n$  为物方折射率;  $u$  为近

轴光线物方孔径角;  $U$  为实际光线物方孔径角;  $L$  为实际光线物方截距。对于整个同心光学系统, 将每个折射面用(2)式相加, 可得

$$n'_k u'_k \sin u'_k \delta L'_k - n_1 u_1 \sin U_1 \delta L_1 = -\frac{1}{2} \sum_k S_k, \quad (3)$$

式中:  $S_k$  为各面的球差分布值; 下标  $k$  表示折射面的数量。对(3)式作近轴处理, 用弧度代替正弦, 以 1 代替余弦, 并以近轴量  $l'$  代替  $L'$ , 并作相关计算处理后得到系统初级球差, 即

$$\delta L'_0 = -\frac{1}{8} \sum_k S_{1,k} = -\frac{1}{8} \sum_k l'_k u_k n_k i_k (i_k - i'_k) (i'_k - u_k), \quad (4)$$

式中:  $S_{1,k}$  为第  $k$  个折射面的初级球差分布系数, 表征光学系统各折面对初级球差的贡献, 光学系统孔径越大, 球差越大;  $\sum_k S_{1,k}$  为初级球差系数, 也称第一赛德和数。

不同波长的光对轴上物点成像的位置有前后差异, 称为轴向色差。用近轴光线追迹公式<sup>[9]</sup>追迹图 2 所示的光路, 得到初级轴向色差为

$$\delta l'_{ch} = -\frac{1}{2} \sum_k C_{1,k} = -\frac{1}{2} \sum_k l'_k u_k n_k i_k \left( \frac{dn'_k}{n'_k} - \frac{dn_k}{n_k} \right), \quad (5)$$

式中:  $C_{1,k}$  为第  $k$  个折射面的色差;  $dn'_k$ 、 $dn_k$  分别是第  $k$  个折射面的像方和物方介质的色散。对于自然光, 需要计算 F 光(青光)、C 光(红光)的色差, 则  $dn'_k = n'_{Fk} - n'_{Ck}$ ,  $dn_k = n_{Fk} - n_{Ck}$ 。

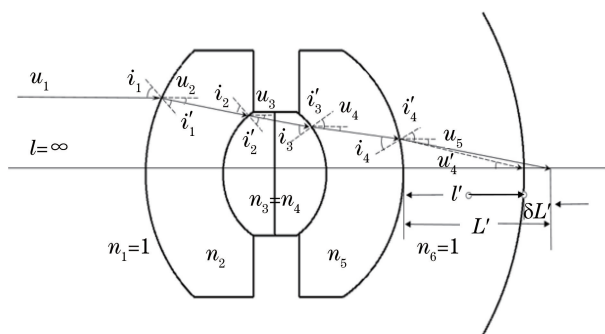


图 2 同心透镜光路图

Fig. 2 Light path of concentric lens

## 3 光学设计

### 3.1 传感器的选择

随着图像传感器研制技术的不断发展<sup>[10]</sup>, 曲面

传感器逐渐走向市场, 其应用范围广, 可用于手机镜头、单反相机以及汽车自动驾驶等领域。采用曲面传感器替代平面传感器, 可降低光学系统设计难度<sup>[11]</sup>, 减少非球面透镜、萤石镜片的使用, 降低生产成本, 解决大视场光学系统场曲、畸变较大的问题, 消除边缘暗角, 提升边缘像质。本研究结合像元大小为  $1.25 \mu\text{m} \times 1.25 \mu\text{m}$  的曲面传感器<sup>[12]</sup>, 设计出单中心超广角手机镜头光学系统。

### 3.2 设计参数

传统手机镜头的成像视场大都为  $65^\circ \sim 80^\circ$ , 成像范围有限, 本文设计出一个  $130^\circ$  超广角手机镜头光学系统, 像元大小为  $1.25 \mu\text{m} \times 1.25 \mu\text{m}$ , 曲面传感器的分辨率大小为  $4160 \text{ pixel} \times 3120 \text{ pixel}$ , 像面尺寸为  $5.2 \text{ mm} \times 3.9 \text{ mm}$ , 对应 1300 万像素, 具体参数如表 1 所示。

表 1 手机镜头设计参数

Table 1 Design parameters of mobile phone lens

Parameter	Value
Focal length /mm	2.6-2.7
F number	1.8
Central wavelength /nm	486, 587, 656
Field of view angle /( $^\circ$ )	130
Backfocal length /mm	>0.3
Total length of optical system /mm	<4.5

### 3.3 初始结构

光学系统初始结构选型方法主要有算法、经验法以及查资料法, 本文采用最直接的查资料法选取初始结构, 以 Igor Stamenov<sup>[13]</sup> 中的单中心全景成像光学系统结构为初始参考结构, 具体参数如表 2 所示。

输入初始结构参数后, 把物距改为无穷远, 将系统孔径选为近轴工作  $F$  数, 初始值设为 2.0, 并将输入的视场角设为  $120^\circ$ , 选择的可见光中心波长为 486 nm、587 nm 和 656 nm, 得到手机镜头初始结构如图 3 所示。

### 3.4 结构优化

在 ZEMAX 软件中输入相关参数获得初始结构后, 根据手机镜头的设计要求, 进行如下优化。

1) 调整系统参数以及初始结构。

2) 使用操作数 CVVA、CONS、DIVI、DIFF、SUMM、CTVA、CTGT、CTLT、OPGT、OPLT 等控制同心结构——第一和第四透镜、第二和第三透镜分别关于系统中心对称, 第二与第三透镜曲率半径绝对值等于厚度。

3) 将透镜曲率半径、透镜厚度设为变量, 并控制在合理范围——同心透镜两表面曲率半径之差的

表2 单中心全景成像仪结构参数

Table 2 Structure parameters of single-center panoramic imager

No.	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semidiameter /mm
OBJ	Standard	Infinity	$1.0 \times 10^{10}$ , 1000.000, 500.000		
1	Standard	9.06762	5.27607	S-LAH79(OHARA-JP)	9.06000
2	Standard	3.79155	3.79155	K-LASFN9(SCHOTT-GER)	3.79000
STO	Standard	Infinity	3.79155	K-LASFN9(SCHOTT-GER)	1.94188
4	Standard	-3.79155	5.27067	S-LAH79(OHARA-JP)	3.79000
5	Standard	-9.06762	2.92088, 3.06156, 3.20318		9.06000
IMA	Standard	-11.9885			11.0000

Note: S-LAH79(OHARA-JP) means that the Japanese glass with the glass brand of OHARA is used.

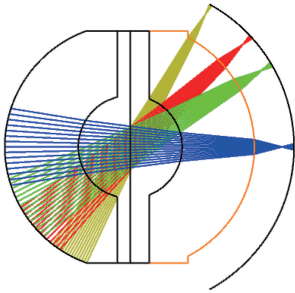


图3 所设计的手机镜头初始结构

Fig. 3 Initial structure of the proposed mobile phone lens

绝对值与透镜厚度相等,厚度在 0.5~1.5 mm 范围内。

4) 根据单步优化结果,结合设计指标调整操作数以及权重。评价函数与操作数、权重<sup>[14]</sup>的关系为

$$M_F^2 = \frac{\sum_i \omega_i (V_i - T_i)^2 + \sum_j \omega_j (V_j - T_j)^2}{\sum_i \omega_i}, \quad (6)$$

式中: $M_F^2$  为评价函数值; $\omega_i$ 、 $\omega_j$  为权重; $V_i$ 、 $V_j$  为目标值; $T_i$ 、 $T_j$  为实际操作数值。所有的  $i$  包括正权重的操作数,而所有  $j$  的总和包括拉格朗日操作数。

5) 将材料求解类型选为替代,并输入 Apell、Plastic、Osaka Gas Chemical 塑料库。

6) 在像面前设置一个虚拟面,将厚度设为变量,以寻找最佳像面。

7) 选择优化函数 RMS + Spot Radius + Centroid 进行光斑半径优化。

8) 使用对比度优化不同空间频率处的调制传递函数(MTF)值。

## 4 设计结果与分析

### 4.1 设计结果

传统滤光手机镜头由 4 片同心透镜加后置曲面

滤光片构成,手机镜头的结构参数、二维结构图如表 3 和图 4(a)所示;新型滤光手机镜头由 4 片同心透镜加第二透镜后表面上的红外截止膜构成,手机镜头的结构参数、二维结构图如表 4 和图 4(b)所示。两个手机镜头的系统焦距均为 2.64 mm,系统  $F$  数均为 1.8,全视场角均为  $130^\circ$ ,系统总长均为 4.1 mm。传统滤光手机镜头的后截距为 0.4740 mm,新型滤光手机镜头的后截距为 1.1519 mm,可实现短焦、超广角手机镜头光学系统设计。

两个单中心超广角手机镜头的孔径光阑均位于第二透镜后表面上,为光学系统的对称中心。第一、第二透镜分别与第三、第四透镜关于系统中心对称,曲率半径绝对值与厚度分别相等,且第二和第三透镜均为半球透镜,曲率半径绝对值等于厚度。生产加工时,第二和第三透镜可直接加工成两个完全相同的半球透镜,半球透镜平面上添加光阑。传统手机镜头的后置曲面滤光片为同心厚透镜,生产加工难度较大,本设计采用在半球透镜的平面上镀红外截止膜方式,提高可加工性,降低系统复杂度。

### 4.2 结果分析

MTF 是将空间点进行光学傅里叶变换、表征光学系统对不同空间频率的正弦光栅的传递和反映能力的函数,能对光学系统像质进行客观、综合评价<sup>[9]</sup>。2 个手机镜头匹配于像元大小均为  $1.25 \mu\text{m} \times 1.25 \mu\text{m}$  的曲面传感器,由  $N = 1000 / (2 \times \alpha)$  ( $N$  为奈奎斯特频率, $\alpha$  为像素尺寸)计算得到手机镜头的奈奎斯特频率为 400 lp/mm。由图 5 可知:当奈奎斯特频率为 200 lp/mm 时,2 个手机镜头光学系统中心视场 MTF 均大于 0.5;当奈奎斯特频率为 400 lp/mm 时,中心视场的 MTF 超过 0.2 且 0.7 以内视场 MTF 超过 0.2。对于摄像镜头,一般要求在 0.7 视场以内能够分辨清楚,轴外视场的分辨率允许一定程度的下降<sup>[15]</sup>。



表3 传统滤光手机镜头结构参数

Table 3 Structural parameters of traditional filtering mobile phone lens

No.	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Refractive index	Abbe number
OBJ	Standard	Infinity	Infinity			
2	Standard	1.3804	0.6955	APL5514ML	1.5449	55.930
3	Standard	0.6849	0.6849	PMMA	1.4918	57.441
STO	Standrad	Infinity	0.6849	PMMA	1.4918	57.441
5	Standard	-0.6849	0.6955	OKP-A2	1.6606	20.401
6	Standard	-1.3804	0.4414			
7	Standard	-1.7759	0.4	H-K9L	1.5164	64.134
8	Standard	-2.1759	0.4740			
IMA	Standard	-2.6419				

表4 新型滤光手机镜头结构参数

Table 4 Structural parameters of a new filtering mobile phone lens

No.	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Material	Refractive index	Abbe number
OBJ	Standard	Infinity	Infinity			
2	Standard	1.4848	0.7724	APL5514ML	1.5449	55.930
3	Standard	0.7124	0.7124	PMMA	1.4918	57.441
STO	Srandrad	Infinity	0.7124	PMMA	1.4918	57.441
5	Standard	-0.7124	0.7724	OKP-A2	1.6606	20.401
6	Standard	-1.4848	1.1519			
IMA	Standard	2.6367				

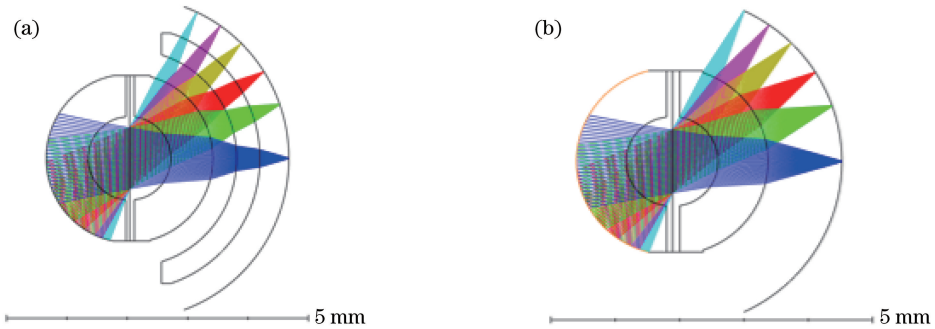


图4 手机镜头结构图。(a)传统滤光手机镜头;(b)新型滤光手机镜头

Fig. 4 Structural charts of mobile phone lenses. (a) Traditional filtering mobile phone lens; (b) new filtering mobile phone lens

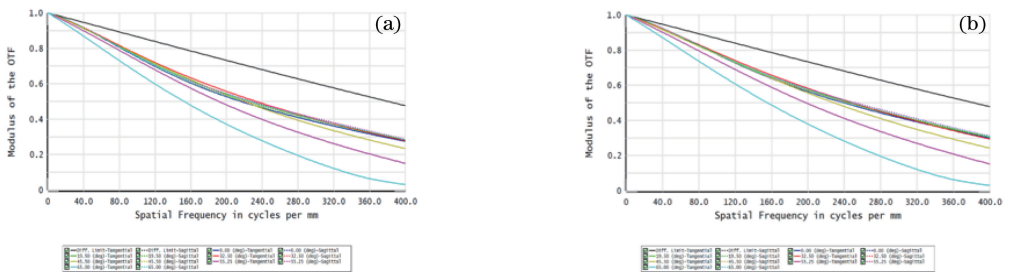


图5 手机镜头 MTF 曲线。(a)传统滤光手机镜头;(b)新型滤光手机镜头

Fig. 5 MTF curves of mobile phone lenses. (a) Traditional filtering mobile phone lens; (b) new filtering mobile phone lens

手机镜头允许的弥散斑半径<sup>[16]</sup>  $\Delta d$  不超过  $(1.5 \sim 1.2)/N_L$ , 其中  $N_L = 400 \text{ lp/mm}$ , 为手机镜头

光学系统的截止频率, 因此  $\Delta d = 3.75 \mu\text{m}$ 。如图 6 所示, 2 个手机镜头光学系统的艾里斑半径分别为

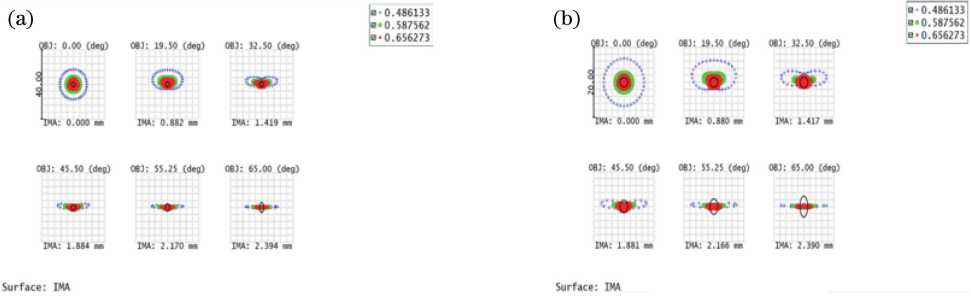


图 6 传统滤光和新滤光手机镜头点列图。(a)传统滤光手机镜头;(b)新型滤光手机镜头

Fig. 6 Spot diagrams of mobile phone lenses. (a) Traditional filtering mobile phone lens; (b) new filtering mobile phone lens

1.309  $\mu\text{m}$  和 1.305  $\mu\text{m}$ , 最大均方根(RMS)半径分别为 3.299  $\mu\text{m}$  和 2.512  $\mu\text{m}$ , 均满足手机镜头艾里斑半径小于 3.75  $\mu\text{m}$  的设计要求。

随着视场的增大,同心光学系统轴外视场光束的有效孔径光阑逐渐减小,由圆变成椭圆,导致轴外视场光束在像面的照度比中心视场小,且视场越大,该现象越明显,相对照度曲线的变化趋势也说明了这一特点。130°超广角手机镜头的理论边缘照度只有 3.2%,无法满足照度均匀性的要求。为了改善边缘视场的照度分布,本文基于对称式光学结构,通过增加光学系统的光阑慧差来增大边缘视场的入瞳口径,在保证像质的前提下提高了边缘视场的像面照度,全视场的照度均匀性达到 42% 以上。2 个超广角手机镜头在不同结构形式下可达到相同的相对照度,如图 7 所示,全视场相对照度均大于 0.42,符合超广角镜头成像要求。

### 5 公差分析

性能优异的光学系统不仅有较高的成像质量,而且能容忍一定的系统公差,在有限的加工制造、装

表 5 传统滤光手机镜头蒙特卡罗分析结果

Table 5 Results of Monte Carlo analysis of traditional filtering mobile phone lens

MTF value	0.20775894	0.21218751	0.21993363	0.22838909	0.23243247
Sampling probability / %	90	80	50	20	10

表 6 新型滤光手机镜头蒙特卡罗分析结果

Table 6 Results of Monte Carlo analysis of new filtering mobile phone lens

MTF value	0.29246095	0.29909312	0.30923128	0.31685867	0.31994738
Sampling probability / %	90	80	50	20	10

### 6 结论

基于同心透镜的成像特性,结合曲面传感器的发展趋势,利用 ZEMAX 软件设计了 2 个单中心超广角手机镜头。通过调整优化透镜半径及厚度,在

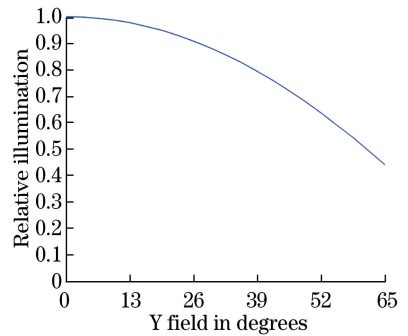


图 7 传统滤光和新滤光手机镜头相对照度图

Fig. 7 Relative illumination of traditional filtering and new filtering mobile phone lenses

调水平下仍具有较高的成像质量。在 ZEMAX 软件中设定表面曲率公差为  $\pm 1.5$  fringe, 表面厚度公差为  $\pm 0.002$ , 表面偏心公差为  $\pm 1^\circ$ ; 选用 S+A 不规则度, 光圈值为 0.2; 元件倾斜公差为  $\pm 1^\circ$ , 元件偏心公差为  $\pm 0.002$ , 测试波长为 550 nm; 选择衍射 MTF 平均值进行评价, MTF 频率为 400 lp/mm, 利用蒙特卡罗分析测试 200 次, 2 个手机镜头公差分析结果如表 5 和表 6 所示, 均满足生产要求。

成像共轭距失对称情况下实现了光学系统的对称设计, 采用两个完全一样的双胶合透镜校正所有像差, 以显著降低光学系统的复杂度。相对于现有手机镜头, 本研究设计的成像视场可提升到 130° 以上, 全视场照度均匀性优于 0.42。本设计重点考虑了单中

心超广角光学系统的制造可行性及制造难度的降低,光学系统在一定公差条件下具有良好成像质量,符合生产要求;同时创新性地提出在两个半球透镜之间设置光阑及镀滤光膜,避免了生产加工难度大的弯月形滤光片的使用,提高系统的可制造性。

## 参 考 文 献

- [1] Hu D D. Tracing the origin of "the first" camera phone in the name of photography [J]. Digital Communication, 2004, 31(14): 98-102.  
胡豆豆. 以照相的名义照相机“第一”溯源[J]. 数字通信, 2004, 31(14): 98-102.
- [2] Huang Y L, Wang M, Guo W K. Design of a 16 mega-pixel mobile phone lens [J]. Optical Instruments, 2018, 40(1): 39-43.  
黄耀林, 王敏, 郭王凯. 一款 1600 万像素手机镜头设计[J]. 光学仪器, 2018, 40(1): 39-43.
- [3] Geng Y Q, Zhao L F, Zhang X D, et al. Design of 13 mega-pixel mobile phone lens based on code V[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(2): 33-38.  
耿雨晴, 赵烈烽, 张向东, 等. 1300 万像素手机镜头设计[J]. 光电工程, 2018, 45(2): 33-38.
- [4] Dai F J, Zhang K Y, Li C. Optical system design for cell phone camera lens based on Delano diagram[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 092203.  
戴付建, 张凯元, 李闯. 基于 Delano 图的手机镜头光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 092203.
- [5] Chen X, Hu C H, Yan C X, et al. Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view[J]. Chinese Optics, 2019, 12(3): 678-685.  
陈醒, 胡春晖, 颜昌翔, 等. 大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制[J]. 中国光学, 2019, 12(3): 678-685.
- [6] Meng X Y, Wang Y, Zhang L, et al. Design of miniaturization and super wide angle monitor lens based on monocentric lens [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(12): 224-228.  
孟祥月, 王洋, 张磊, 等. 同心结构的小型化超广角监控镜头设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(12): 224-228.
- [7] Lu W W, Chen S Y, Zhai D D, et al. Biomimetic hybrid fisheye/compound eye imaging system with wide view and high resolution[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(2): 311-315.  
路文文, 陈善勇, 翟德德, 等. 混合仿生鱼眼-复眼的广角高清成像系统[J]. 应用光学, 2019, 40(2): 311-315.
- [8] Wang Y, Meng X Y, Zhang L, et al. Design of super-wide-angle mobile phone camera based on concentric lens [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1022001.  
王洋, 孟祥月, 张磊, 等. 基于同心透镜的超广角手机镜头设计[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1022001.
- [9] Li X T, Cen Z F. Geometric optics, aberration and optical design [M]. 3rd ed. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014.  
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 3 版. 杭州: 浙江大学出版社, 2014.
- [10] Wert O, Delabre B. The challenge of highly curved monolithic imaging detectors [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7742: 774227.
- [11] Gaschet C, Chambion B, Getin S, et al. Curved sensors for compact high-resolution wide field designs [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10376: 1037603.
- [12] Guenter B, Joshi N, Stoakley R, et al. Highly curved image sensors: a practical approach for improved optical performance [J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13010.
- [13] Stamenov I, Agurok I P, Ford J E. Optimization of two-glass monocentric lenses for compact panoramic imagers: general aberration analysis and specific designs [J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7648-7661.
- [14] Zhang Y M, Zhang H X, Jia D G. Applied optics [M]. 4th ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2015.  
张以谟, 张红霞, 贾大功. 应用光学[M]. 4 版. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [15] Li W J. Optical design of 5-mega pixel mobile phone lens [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(1): 56-59.  
李文静. 500 万像素手机镜头的光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(1): 56-59.
- [16] Yu D Y. Engineering optics [M]. 2nd ed. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006.  
郁道银. 工程光学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.