

小型化同心反射式手机镜头设计

王 洋¹, 王 宁¹, 顾志远^{2*}, 张 磊¹, 付跃刚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: 基于现代社会对手机镜头高像素、小型化的要求, 基于同心透镜原理设计了同心反射式手机镜头。通过光路计算, 求解了系统的球差表达式, 进一步获得了系统的初始结构。利用光学设计软件设计了光学系统, 镜头采用像元大小为 $1.25\ \mu\text{m}$ 的曲面传感器, 光学系统的 F 数为 1.8, 焦距为 2.7 mm, 最大全视场角为 100° , 系统总长为 2.7 mm。设计结果表明, 在空间截止频率 400 lp/mm 处, 0.7 视场的调制传递函数均大于 0.34, 全视场的调制传递函数均大于 0.23, 各视场的弥散斑半径均小于艾里斑。在全视场内, 相对照度高于 0.64, 该设计满足手机镜头成像要求。

关键词: 光学设计; 手机镜头; 同心结构; 反射式; 曲面传感器

中图分类号: TB811 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210129

Design of miniaturization concentric reflective mobile phone lens

Wang Yang¹, Wang Ning¹, Gu Zhiyuan^{2*}, Zhang Lei¹, Fu Yuegang¹

(1. School of Optoelectronic 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: Based on the requirements of modern society for high pixels and miniaturization of mobile phone lenses, based on the principle of concentric lenses, a concentric reflective mobile phone lens was designed. Through optical path calculation, the spherical aberration expression of the system was solved, and the initial structure of the system was further obtained. The optical system was designed using optical design software, the lens adopted a curved sensor with a pixel size of $1.25\ \mu\text{m}$, the F number of the optical system was 1.8, the focal length was 2.7 mm, the maximum full field of view was 100° , and the total system length was 2.7 mm. The results show that at the spatial cut-off frequency of 400 lp/mm, the modulation transfer functions of the 0.7 field of view are all greater than 0.34, and the modulation transfer functions of the full field of view are all greater than 0.23. The radius of the diffuse spot in each field of view is smaller than the Airy disk. In the full field of view, the relative illuminance is higher than 0.64. This design meets the imaging requirements of mobile phone lenses.

Key words: optical design; mobile phone lens; concentric structure; reflective type; curved surface sensors

收稿日期: 2020-12-11; 修订日期: 2021-04-20

基金项目: 吉林省科技发展计划项目优秀青年人才基金 (20190103046JH); 吉林省科技发展计划 (20190302098G)

作者简介: 王洋, 女, 讲师, 博士, 主要从事光学设计和装调等方面的研究。

通讯作者: 顾志远, 男, 博士, 主要从事光学设计与像差理论等方面的研究。

0 引言

随着社会的发展和科技的进步,智能手机已经逐渐成为人类生活中不可或缺的一部分。2000年,日本夏普公司和移动运营商 J-PHONE 联合推出了 J-SH04 型手机^[1],将拍照功能与通讯设备结合在一起,此后,手机镜头的成像质量成为人们选购手机的重要参考。随着数字图像处理技术与非球面加工工艺的进步,图像传感器像元尺寸越做越小,人们对手机镜头成像性能的要求也不断提高。CMOS 技术的飞速发展诞生了曲面传感器技术并且日趋成熟。2017年,Guenter 等人研究出像素尺寸大小 $1.25\ \mu\text{m}$ 的曲面传感接收器,分辨率达到了 $4\ 880\times 3\ 680\ \text{pixel}$ ^[2]。2020年,法国 Curve 公司宣布研发出首款商业曲面传感器 Curve-One,实现量产规模,传感器大小为 $1/2.3\ \text{in}$ ($1\ \text{in}=2.54\ \text{cm}$),1200 万像素。目前 Curve-One 已经获得欧洲委员会以及欧洲航天局的支持,预计未来将应用于航天航空或智能手机等领域^[3-4]。2018年,孟祥月^[5]等人基于同心透镜设计了一款 1300 万像素的手机镜头,该镜头利用曲面传感器,焦距为 $3.3\ \text{mm}$, F 数(相对孔径的倒数)为 1.83,全视场角为 100° ,系统总长 $5.18\ \text{mm}$,实现了超薄手机镜头的设计。

随着人们对超薄手机的需求,市场对于手机镜头总长的要求也越来越高。在孟祥月等人的设计基础上,文中通过在镜头内部加入反射面,设计了一款更加轻小的手机镜头,系统总长比原设计减小近 $1/3$,系统 F 数为 1.8,焦距为 $2.7\ \text{mm}$,在大视场范围内可以获得较好的成像品质,预期未来可应用于超薄手机。

1 同心反射式透镜

图 1(a) 为一种典型的同心透镜结构,全部折射面的曲率中心重合于一点,其像面也是一个同心球面,该系统不产生轴外像差,不需要校正彗差、像散、场曲、畸变等,只需考虑球差和位置色差^[5]。在此基础上,将图 1(a) 中心孔径光阑处改为反射面,即同心反射式结构,如图 1(b) 所示。

同心反射式结构不仅保留了同心透镜的光学特性,而且减小了将近一半的体积,结构更加简单,降低了加工难度,在该结构中更容易加入孔径光阑。由图 1 可以看出,同心反射式结构竖直方向上的视场会有一部分减小,考虑到目前手机镜头一般配置三个或者更多的手机镜头,多镜头的配合使用可实现大视场范围

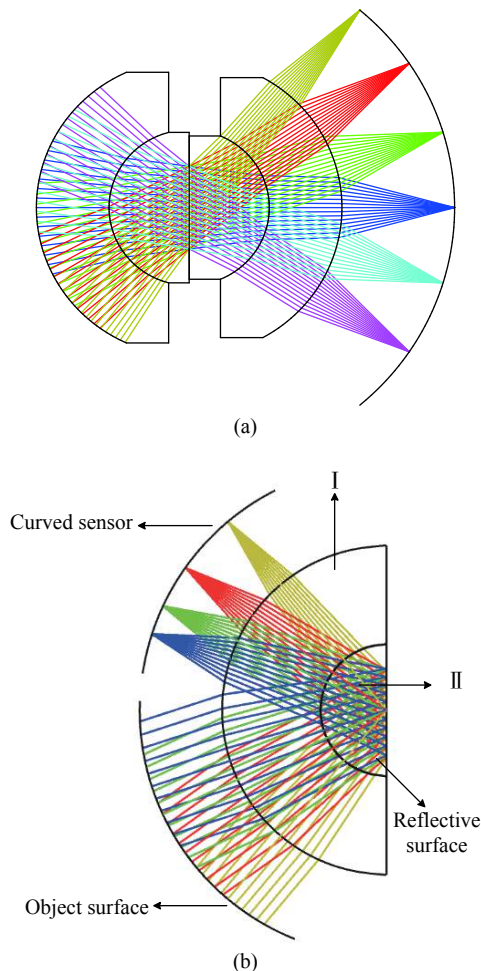


图 1 同心透镜

Fig.1 Concentric lens

内的清晰成像^[6-7]。

2 光学设计

2.1 参数选择

结合目前已经研发出的曲面传感器^[2]以及笔者课题组的前期设计^[5],选用像素尺寸大小为 $1.25\ \mu\text{m}$ 的曲面传感接收器,像面尺寸为 $5.2\ \text{mm}\times 3.9\ \text{mm}$,全视角为 100° ,奎奈斯特频率为 $400\ \text{lp/mm}$,表 1 为系统设计参数。

表 1 光学设计参数

Tab.1 Optical design prescription

Parameter	Value
Waveband/nm	486-656 (Visible light)
Relative aperture	1/1.8
Full field of view/(°)	100
Focal length/mm	2.7
Total length/mm	≤ 2.7

2.2 初始结构

由同心透镜的特性可知,同心反射式透镜结构主要需要对轴向球差和色差进行校正。文中利用参考文献 [8] 中的光路计算方法,结合像差理论,通过求

解同心反射式透镜的轴向球差的极小值计算系统的初始结构。

参考文献 [8] 中的同心透镜光路计算方法,同心反射式透镜的光路如图 2 所示。

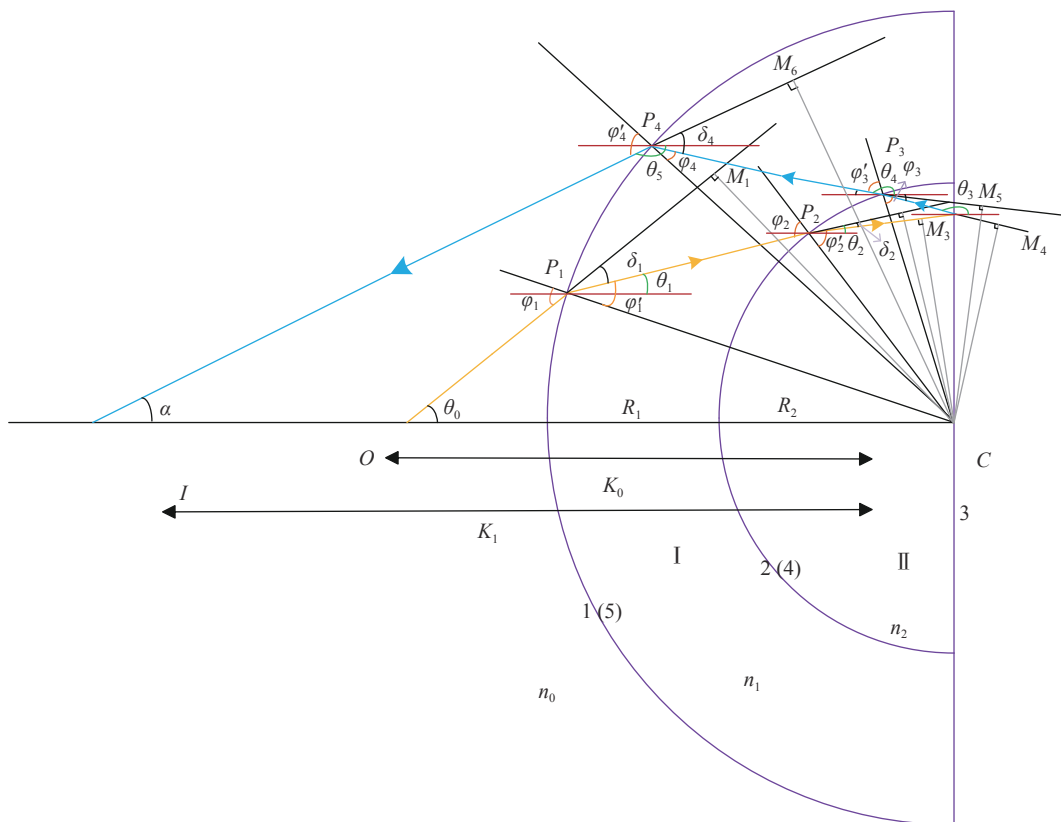


图 2 同心透镜的光路

Fig.2 Light path of concentric lens

设物点 O 为光轴上一点,各表面入射光线与水平方向的夹角分别为 $\theta_a (a = 0, \dots, 5)$, 符号逆时针为正, 顺时针为负; $\varphi_b (b = 1, 2, 3, 4)$ 分别为光线在各个面的入射角; $\varphi'_c (c = 1, 2, 3, 4)$ 分别为光线在各个面的折射角; K_0 与 K_1 分别定义为曲率中心 C 到 O 点和曲率中心 C 到 I 点的距离; $r_d (d = 1, \dots, 6)$ 分别为曲率中心 C 到出射光线和入射光线的直线距离, 即 CM_1 的距离为 r_1 , CM_2 的距离为 r_2, \dots ; $\delta_e (e = 1, \dots, 4)$ 分别为光线在折射面上偏折的角度; $M_f (f = 1, \dots, 6)$ 分别为曲率中心 C 点到各个光线的垂直交点; $P_g (g = 1, \dots, 4)$ 分别为入射光线与各个折射面的交点。设入射光线依次经过表面 1、2、3、4、5, R_1 、 R_2 分别为两个球面光学表面的曲率半径, n_1 、 n_2 分别为透镜 I、II 的折射率, 则系统的球差 L_s 可利用公式 (1) 进行计算:

$$L_s = \frac{1}{(K_1)_n} - \frac{1}{(K_1)_p} \quad (1)$$

式中: $(K_1)_n$ 、 $(K_1)_p$ 分别为实际光路计算和近轴光路计算结果。

由图 2 可知:

$$\delta_1 = \theta_0 - \theta_1 = \varphi_1 - \varphi'_1 \quad (2)$$

$$\delta_2 = \theta_1 - \theta_2 = \varphi_2 - \varphi'_2 \quad (3)$$

$$\delta_3 = \theta_4 - \theta_3 = \varphi'_3 - \varphi_3 \quad (4)$$

$$\delta_4 = (\theta_5 + \pi) + (\pi - \theta_4) = \varphi'_4 - \varphi_4 \quad (5)$$

由于表面 3 为反射面, $\theta_3 = \pi - \theta_2$, 可得:

$$\theta_5 = -\theta_0 + \varphi_1 - \varphi'_1 + \varphi_2 - \varphi'_2 - \varphi_3 + \varphi'_3 - \varphi_4 + \varphi'_4 - \pi \quad (6)$$

又由于 $\alpha = \theta_5 + \pi$,

$$\alpha = -\theta_0 + \varphi_1 - \varphi_1' + \varphi_2 - \varphi_2' - \varphi_3 + \varphi_3' - \varphi_4 + \varphi_4' \quad (7)$$

在 $\triangle CIM_6$ 中, 根据正弦定理:

$$K_1 = \frac{r_6}{\sin \alpha} \quad (8)$$

在 $\triangle CP_4M_6$ 中, 有 $\sin(\varphi_4') = r_6/R_1$ 。同理, $\sin(\varphi_4) = r_5/R_1$ 。由折射定律可知, $r_6 = r_5n_1/n_0$, 由此可得:

$$r_6 = r_5 \frac{n_1}{n_0} = r_4 \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{n_1}{n_0} = r_2 \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{n_1}{n_0} = r_1 \frac{n_0}{n_1} \cdot \frac{n_1}{n_2} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{n_1}{n_0} = r_1 \quad (9)$$

由公式 (7)~(9) 可得:

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{r_1} \sin(-\theta_0 + \varphi_1 - \varphi_1' + \varphi_2 - \varphi_2' - \varphi_3 + \varphi_3' - \varphi_4 + \varphi_4') \quad (10)$$

根据正弦定理和折射定律, 可将公式 (10) 中除 θ_0 外的角度值均由 r_1 和系统参数 (R_1, R_2, n) 表示, 此处省略。最终计算得到:

$$\frac{1}{K_1} = \frac{1}{r_1} \arcsin \left[2 \left(\arcsin \frac{r_1}{R_1} - \arcsin \frac{n_0 r_1}{n_1 R_1} + \arcsin \frac{n_0 r_1}{n_1 R_2} - \arcsin \frac{n_0 r_1}{n_2 R_2} \right) - \theta_0 \right] \quad (11)$$

当入射光线平行于光轴入射时, $r_1 = h$, h 为光线相对于光轴的入射高度, $\theta_0 = 0$ 。此时公式表示为:

$$\frac{1}{(K_1)_n} = \frac{1}{h} \arcsin \left[2 \left(\arcsin \frac{h}{R_1} - \arcsin \frac{h}{n_1 R_1} + \arcsin \frac{h}{n_1 R_2} - \arcsin \frac{h}{n_2 R_2} \right) \right] \quad (12)$$

当入射光线为近轴光线时, $\theta \approx \sin \theta$, $\theta_0 = r_1/K_0$, 在近轴光线中 K_0 也可视为无穷大。此时公式表示为:

$$\frac{1}{(K_1)_p} = \frac{2}{R_1} - \frac{2}{n_1 R_1} + \frac{2}{n_1 R_2} - \frac{2}{n_2 R_2} \quad (13)$$

结合公式 (1)、(12) 和 (13) 可以得到同心反射式结构的球差计算公式为:

$$L_s = \frac{1}{h} \arcsin \left[2 \left(\arcsin \frac{h}{R_1} - \arcsin \frac{h}{n_1 R_1} + \arcsin \frac{h}{n_1 R_2} - \arcsin \frac{h}{n_2 R_2} \right) \right] - \left(\frac{2}{R_1} - \frac{2}{n_1 R_1} + \frac{2}{n_1 R_2} - \frac{2}{n_2 R_2} \right) \quad (14)$$

式中: R_1 和 R_2 分别为同心透镜表面的曲率半径; n_1 和 n_2 为同心透镜的折射率; h 为入射光的高度, 即系统入瞳大小的一半。

将上述五个参数作为变量, 根据设计要求加入限制条件, 当系统球差 L_s 为极小值时求解系统初始结构。限制条件主要考虑以下几方面:

(1) 由表 1 可知, 在确定了系统 F 数和焦距之后, 可以求出系统入瞳大小, 即确定了 h 值大小;

(2) 根据常规手机镜头光学系统总长大小, 可以确定 $R_1 < 2.7$ mm;

(3) 为了避免透镜组交界处发生全反射现象, 尽量使 $n_1 > n_2$ 。手机镜头材料一般选用塑料材质, 由于材料种类有限, 可依据经验先确定两片透镜的材料, 在初始结构确定后, 选择折射率相近的材料进行替换, 然后通过光学设计软件优化进一步减小系统色差。

利用以上限制条件, 经过编制程序计算, 求出一组光学系统的初始结构如表 2 所示。

表 2 初始结构参数

Surface type	Radius/mm	Thickness/mm	Glass
OBJ	∞	∞	
1	1.885	1.047	1.66,20.4
2	0.832	0.830	1.59,30.9
STO	∞	-0.830	MIRROR
4	0.832	-1.047	1.66,20.4
5	1.885	-0.5	
IMA	2.385		

2.3 优化结果及像质分析

利用光学设计软件进行优化, 进一步提升了系统的成像质量, 得到了符合设计要求的手机镜头结构^[9-10]。优化后手机镜头为两片式结构, 系统 F 数为 1.8, 焦距为 2.7 mm, 系统总长为 2.7 mm, 全视场角为 100°, 材料选用日本塑料 OKP-A2 和具有热塑性的树脂 PS, 设计结构如图 3 所示。

图 4 为手机镜头的 MTF 曲线图, 在 200 lp/mm

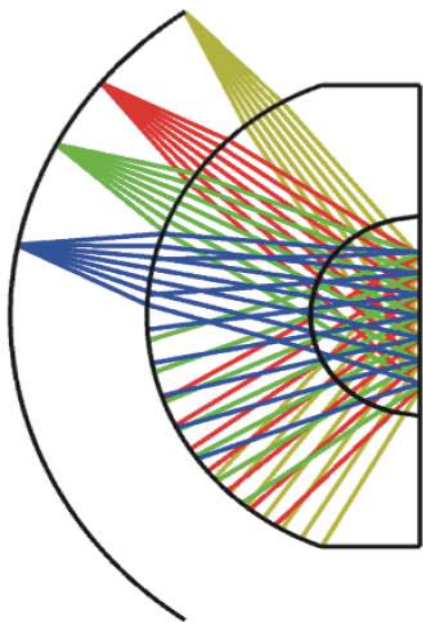


图 3 优化后的手机镜头结构

Fig.3 Mobile phone lens structure after optimization

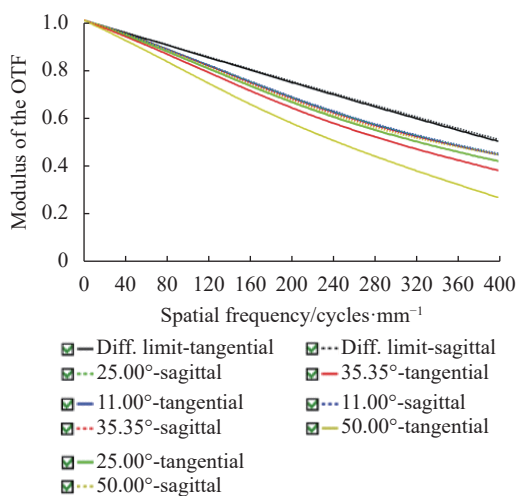


图 4 MTF 曲线图

Fig.4 MTF curves

处, 0.7 视场的 MTF 值分别大于 0.62, 全视场的 MTF 值均大于 0.55; 在 400 lp/mm 处, 0.7 视场的 MTF 值大于 0.34, 全视场的 MTF 值大于 0.23。

图 5 为系统的点列图, 由于同心透镜存在渐晕, 会引起艾里斑在渐晕处增大, 导致不同视场的像差不相同。手机镜头允许的最大弥散斑半径要最大不超过 $1.5/NR^{[1]}$, NR 为 CMOS 图像传感器的分辨率, 该设计选取的曲面传感接收器像元尺寸为 $1.25 \mu\text{m}$, 可以计算出像面允许的最大弥散斑半径为 $3.75 \mu\text{m}$ 。从图 5

中可以看出全视场 RMS 半径均小于 $1.2 \mu\text{m}$, 满足手机镜头成像要求。

图 6 为手机镜头的相对照度图, 手机镜头相对照度越低, 在光线微弱处拍出的照片就越不清晰^[12]。从图 6 中可以看出, 全视场相对照度均大于 0.64, 满足手机镜头成像要求。

为了获得手机镜头更好的成像质量, 需要在探测器前加入红外滤光片。随着光学镀膜技术的发展, 目前很多光学系统已经采用镀红外截止膜的方式实现红外滤光^[13], 可应用于文中设计的手机镜头; 也可以在探测器前加入球形红外滤光片^[5], 结构如图 7 所示。

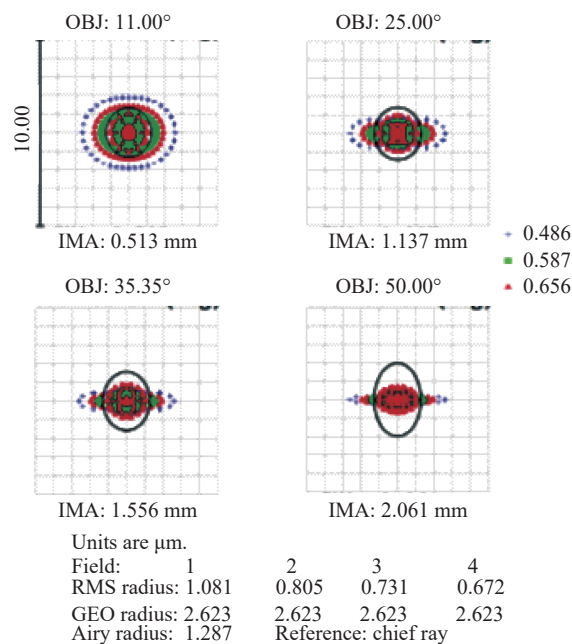


图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

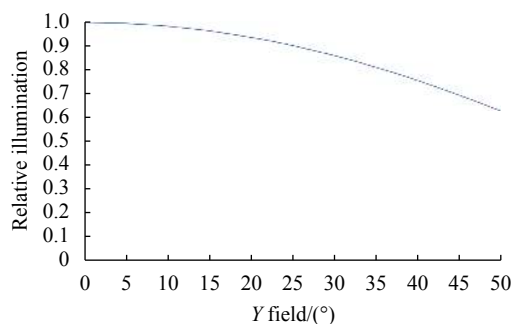


图 6 相对照度

Fig.6 Relative illumination

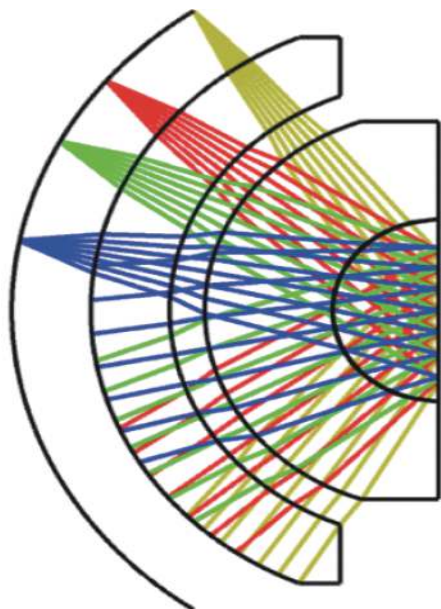


图 7 球形滤光片结构

Fig.7 Structure of spherical filter

3 公差分析

公差分析是光学系统设计的一个重要环节,如果公差要求过严,将对生产制造提出更高要求,增加制造成本,不利于手机镜头批量化生产。利用光学设计软件进行公差分析,表 3 为系统的公差设定值。 $TFRN$ 为各表面曲率半径的公差,用光圈表示; $TSDX$ 、 $TSDY$ 分别为两个方向的偏心; $TTHI$ 为元件的绝对位置和镜片厚度的公差; $TSTX$ 、 $TSTY$ 为光学元件的倾斜公差; $TEDX$ 、 $TEDY$ 为元件的偏心公差^[14]。

表 3 光学系统参数公差

Tab.3 Tolerance of the optical system

Item	Value
$TFRN$ /fringes	± 1.5
$TSDX$, $TSDY$ /mm	± 0.013
$TTHI$ /mm	± 0.013
$TSTX$, $TSTY$ ($^{\circ}$)	± 0.02
$TEDX$, $TEDY$ /mm	± 0.013
$TETX$, $TETY$ ($^{\circ}$)	± 0.02

将 MTF 值作为公差敏感度,运用蒙特卡洛法对公差进行分析,设定 500 组随机误差数,对截止频率处的 MTF 值进行分析^[15],分析结果表明 90% 以上的样本优于 0.20。通过以上分析说明,设计的手机镜头

公差要求宽松,采用直接装配的方式即可满足精度要求,适用于手机镜头的批量化生产。

4 结论

综上,文中在现有的手机镜头设计的基础上,结合同心透镜的应用以及曲面传感器发展现状及趋势,设计了一款基于同心反射式结构的超广角手机镜头。该手机镜头的主要参数为:焦距 2.7 mm, F 数 1.8,最大全视场角 100° ,总长 2.7 mm。与现有手机镜头相比,该设计同时实现了手机镜头的高像质以及小型化,具有广阔的市场前景。

参考文献:

- [1] Yin Zhidong, Xiang Yang, Gao Jian, et al. Optical design of a 1300 megapixel mobile phone camera lens optics designs [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 161-171. (in Chinese)
- [2] Guenter Brian, Joshi Neel, Stoakley Richard, et al. Highly curved image sensors: A practical approach for improved optical performance [J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13010-13023.
- [3] Gaschet Christoph, Jahn Wilfried, Chambion Bertrand, et al. Methodology to design optical systems with curved sensors [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(4): 973-978.
- [4] Mrozek F, Yu Ming, Henry D J, et al. Wide field of view monocentric lens system for infrared aerial reconnaissance camera systems: US, 20130076900[P]. 2013-03-28
- [5] Wang Yang, Meng Xiangyue, Zhang Lei, et al. Design of super wide-angle mobile phone lens based on concentric lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 296-301. (in Chinese)
- [6] Shen Yang. Research on super large field of view optical imaging technology based on concentric lens [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics), 2019. (in Chinese)
- [7] Mao Shanshan, Li Yanqiu, Liu Ke, et al. Optical design of high numerical aperture extreme ultraviolet lithography objective with freeform surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0814002. (in Chinese)
- [8] Elagha H A. Generalized formulas for ray-tracing and longitudinal spherical aberration [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(3): 335-343.
- [9] Cong Haifang. Camera design of 4P slim 8 megapixel lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3993-3997. (in Chinese)

- Chinese)
- [10] Geng Yuqing, Zhao Liefeng, Zhang Xiangdong, et al. Design of 1300 mega-pixel mobile phone lens based on code V [J]. *Optoelectronic Engineering*, 2018, 45(2): 38-43. (in Chinese)
- [11] Cao Yiqing, Shen Zhijuan, Zhang Ruihua. Design of high resolution mobile phone lens with large aperture [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2020, 31(6): 600-606. (in Chinese)
- [12] 李士贤, 郑乐年. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990: 284.
- [13] Guo Zhiyuan, Li Jiancong, Chen Taixi, et al. Design of single-center and ultra-wide-angle mobile phone lenses [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 277-283. (in Chinese)
- [14] Meng Xiangyue, Wang Yang, Zhang Lei, et al. Design of miniaturization and super wide angle monitor lens based on monocentric lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 1218002. (in Chinese)
- [15] Liu Qiang, Wang Xin, Huang Genghua, et al. Optical design of wide field view and large relative aperture off-axis three-mirror reflective system with tilted optical axis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 0322002. (in Chinese)