

基于同心透镜的超广角手机镜头设计

王洋^{1*}, 孟祥月¹, 张磊¹, 付跃刚¹, 顾志远²

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 设计了一款基于同心透镜的 1300 万像素超广角手机镜头, 得到符合工业生产要求的手机镜头参数。该镜头由 4 片同心透镜组成, 焦距为 3.3 mm, F 数为 1.83, 视场角为 100° , 总长 5.18 mm。研究表明, 在奈奎斯特频率为 223 lp/mm 处, 0.7 视场的调制传递函数 (MTF) 值均大于 0.58, 全视场的 MTF 值均大于 0.50; 在 446 lp/mm 处, 0.7 视场的 MTF 值均大于 0.30, 全视场的 MTF 值均大于 0.17。各个视场的弥散斑半径均小于 $2.3 \mu\text{m}$ 。全视场内相对照度值均大于 0.65。

关键词 光学设计; 同心透镜; 超广角; 1300 万像素; 手机镜头

中图分类号 TB811

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1022001

Design of Super-Wide-Angle Mobile Phone Camera Based on Concentric Lens

Wang Yang^{1*}, Meng Xiangyue¹, Zhang Lei¹, Fu Yuegang¹, Gu Zhiyuan²

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract One kind of 13 mega-pixel and super-wide-angle mobile phone camera is designed based on concentric lens and the parameters of the mobile phone camera that meet the industrial production requirements are obtained. This camera is composed of 4 concentric lenses with a focal length of 3.3 mm, a F -number of 1.83, a field of view (FOV) of 100° , and a total length of 5.18 mm. The research results show that, at the Nyquist frequency of $223 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$, the modulation transfer function (MTF) value is larger than 0.58 in the 0.7 FOV and that in the whole FOV is larger than 0.50. At $446 \text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$, the MTF value is larger than 0.30 in the 0.7 FOV and that in the whole FOV is larger than 0.17. The root-mean-square (RMS) radius of each FOV is less than $2.3 \mu\text{m}$ and the relative illumination value is larger than 0.65 in the full FOV.

Key words optical design; concentric lens; super-wide angle; 13 mega-pixel; mobile phone camera

OCIS codes 220.3630; 220.3620; 220.4830

1 引 言

随着技术的发展,手机镜头的技术指标不断提升^[1-4]。2014年,尹志东等^[5]设计了一款1300万像素的手机镜头,焦距为3.59 mm, F 数(相对孔径的倒数)为2.2,全视场角为 77° ,系统总长5 mm; 2017年,谢志宏等^[6]设计了一款2100万像素的手机镜头,焦距为3.5 mm, F 数为2.4,全视场角为

68° ,系统总长4.8 mm; 2017年上市的OPPO R11s手机配置2000万像素的摄像头, F 数为2.0,前置摄像头像素尺寸为 $5184 \text{ pixel}\times 3880 \text{ pixel}$; 苹果手机iPhone X采用1200万像素广角及长焦双镜头摄像头,最高可达10倍数码变焦。随着人们对超薄手机的需求不断增加,小型化、高像质的大视场手机镜头是未来的发展趋势之一。

同心透镜的全部折射面的曲率中心重合于一

收稿日期: 2018-04-12; 修回日期: 2018-04-25; 录用日期: 2018-05-08

基金项目: 吉林省科学技术厅大型科学仪器共享共用(20150623024TC)、吉林省教育厅“十三五”科学研究规划项目(JJKH20181113KJ)

* E-mail: wangyang11.17@163.com

点,像面也是一个同心球面,因此可应用于小型化、高像质、大视场的光学系统。同心透镜的整个系统为对称结构,不存在彗差等轴外像差,仅需校正球差和轴向色差,因此可用于制备照相机镜头、手机镜头等大视场光学镜头,但同心透镜的像面是曲面,这在一定程度上限制了同心透镜的应用^[7]。

随着互补金属氧化物半导体(CMOS)技术的发展,曲面传感器成为目前的研究热点之一。将曲面传感器应用于光学系统中,可有效抑制大视场光学系统的场曲,改善视场边缘像质,并简化镜头结构。2011年,索尼公司申请了曲面传感器的专利^[8];2015年,苹果公司申请了形成曲面传感器的方法和系统的专利^[9]。随着曲面传感器技术的发展,曲面传感器也将产品化。

基于曲面传感器的发展现状与趋势,结合同心透镜的特点与相关应用,本文设计了一款视场角(FOV)为 100° 的1300万像素超广角手机镜头。相比于目前已有的手机镜头,本文所设计的手机镜头可在大视场范围内保持优良的像质。

2 同心透镜

图1所示为典型的同心透镜结构,图中不同颜色线代表不同视场的光线,其全部折射面的曲率中心重合于一点,像面是一个同心球面。如果将同心透镜的孔径光阑设置在球心处,通过孔径光阑中心的光线都可以作为光轴。由于同心透镜具有对称性,球像面不产生彗差或像散等轴外像差,仅受到中央孔径光阑的渐晕限制,故同心透镜仅需要校正球差和轴向色差,这大大降低了设计的难度。

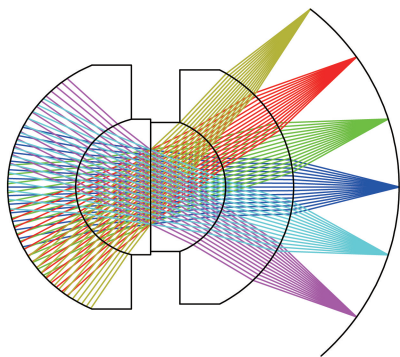


图1 同心透镜的结构

Fig. 1 Structure of concentric lens

3 光学设计

3.1 传感器的选取

近年来,曲面传感器成为研究热点,其加工成型

技术也在不断更新。曲面传感器有利于离轴像差的校正^[10],同时可简化光学系统。Dinyar等已经研制出像面尺寸为 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 、曲率半径为 1 cm 的弯曲硅片(不带有传感器)^[11];现有技术已经得到像素尺寸为 $1.25\ \mu\text{m}\times 1.25\ \mu\text{m}$ 、像素间距为 $1.25\ \mu\text{m}$ 的小型曲面传感器^[12]。结合曲面传感器发展现状及未来趋势,这里的设计选取像素尺寸为 $1.12\ \mu\text{m}$ 的曲面传感器。

3.2 设计参数

现有的手机镜头多采用非球面设计,视场角在 $60^\circ\sim 80^\circ$ 之间。参考尹志东等^[5]设计的1300万像素手机镜头及谢志宏等^[6]设计的2100万像素手机镜头的参数,所设计的手机镜头的焦距为 3.3 mm ,像素为1300万。

根据手机镜头的像素要求以及像素大小可知,曲面传感器的分辨率应达到 $4164\text{ pixel}\times 3122\text{ pixel}$,像面尺寸为 $4.66\text{ mm}\times 3.50\text{ mm}$,对角线长度为 5.83 mm 。同心透镜整个系统的焦距即为最后一个面(像面)的曲率半径,因此手机镜头的视场为 $81^\circ\times 61^\circ$ 。在光学设计、优化、分析时,视场可用对角线视场表示,计算得知对角线视场为 101° 。本设计的指标参数见表1。

表1 光学设计参数

Table 1 Optical design parameters

Parameter	Value
Waveband /nm	486-656(visible light)
Relative aperture	1/1.83
FOV /($^\circ$)	100
Focal length /mm	3.3
Total length /mm	≤ 5.2

3.3 初始结构

应用初级像差理论,计算光学系统的初始结构,同心透镜只需对球差和轴向色差进行校正。如图2所示,同心透镜组所有透镜有相同球心 O ,并且完全对称。 A 点为物体所在位置; u_b ($b=1, \dots, 5$)为各表面的物方孔径角; n_b ($b=1, \dots, 5$)为各物像空间折射率,其中 n_1, n_5 为空气折射率,且已知 $n_2=n_4$; h_g ($g=1, \dots, 4$)为入射高度; r_1 和 r_2 为同心透镜两表面曲率半径,且 $|r_1| > |r_2|$; d_t ($t=1, \dots, 3$)为各表面间距,且 $d_1=r_1-r_2$; $d_2=2r_2$; $d_3=r_1-r_2$; i_g ($g=1, \dots, 4$)为各表面入射角。当物体位于无限远时,即第一表面的物距 $l_1=-\infty$,此时 $u_1=0$,设物体的半高度为 h_1 ,则此时的入射角 i_1 可由 $i_1=$

h_1/r_1 表示。

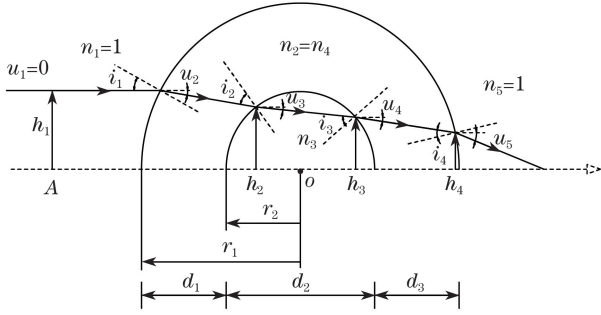


图 2 同心透镜的光路

Fig. 2 Light path of concentric lens

用近轴光线追迹公式计算系统的初级像差^[13], 初级球差 W_{040} 和初级轴向色差 $\delta_\lambda W_{020}$ 可表示为

$$\begin{cases} W_{040} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^k S_1 = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^k l u n i (i - i') (i' - u) \\ \delta_\lambda W_{020} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k C_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k l u n i \Delta \frac{dn}{n} \end{cases}, \quad (1)$$

式中 l 为物距; u 为物方孔径角; n 为折射率; i 为入射角; i' 为出射角; C_1 为初级位置色差分布系数, $\Delta \frac{dn}{n} = \frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n}$ 。对于可见光谱, 在实际计算过程中, 通常用 D 光 (589.3 nm) 的折射率 n_D 和阿贝数 ν_D 来表示可见光范围内的折射率和阿贝数, 即 $n_D = n, \nu_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$, 其中 n_F, n_C 分别为材料的 F 光 (486.1 nm)、C 光 (656.3 nm) 折射率^[13], 故

$$\Delta \frac{dn}{n} = \frac{dn'}{n'} - \frac{dn}{n} = \frac{n'_F - n'_C}{n'_D} - \frac{n_F - n_C}{n_D} = \frac{n'_D - 1}{\nu'_D n'_D} - \frac{n_D - 1}{\nu_D n_D}. \quad (2)$$

设评价函数 $M = |W_{040}| + |\delta_\lambda W_{020}|$, 光学系统的初始结构求解过程即为评价函数的极值求解过程。编制相关程序, 将评价函数 M 用光学系统的结构参数 ($r_1, r_2, n_2, n_3, h_1, \nu_2, \nu_3$) 表示, 其中各物像空间阿贝数分别为 $\nu_b (b=1, \dots, 5)$, 空气阿贝数分别为 ν_1, ν_5 。求解过程中, 变量由以下几个方面限定。

1) r_1, r_2, n_2, n_3 取值组合。光学系统的焦距计算公式为 $f' = \frac{h_1}{u'}$ (u' 为像方孔径角), 通过光线追迹的方法可得出 f' 的表达式为

$$f' = \frac{n_2 n_3 r_1 r_2}{2(n_2 r_1 - n_3 r_1 + n_3 r_2 - n_2 n_3 r_2)}. \quad (3)$$

考虑手机镜头的工业加工生产需求, 取 $1.6 \leq$

$r_1 \leq 3$ 。通过相关程序即可求出满足手机镜头焦距数值的 r_1, r_2, n_2, n_3 的组合形式。

2) h_1 值。由手机镜头光学设计参数 (相对孔径及焦距) 可知 h_1 值。

3) ν_2, ν_3 取值限定。已知 $\nu_2 = \nu_4$, 故只需限定 ν_2, ν_3 。手机镜头的材料一般采用塑料, 可限定光学系统的 ν_2, ν_3 取值范围。

利用以上限制条件, 求得一组 M 取极小值时的 $r_1, r_2, n_2, n_3, h_1, \nu_2, \nu_3$ 作为光学系统的初始结构, 此时, $M=0.00073$ 。将初始结构输入 Zemax 软件, 见表 2, 表中第一列是透镜表面类型, 其中 OBJ 代表物面, STO 代表光阑位置, IMA 代表像面。

表 2 初始结构参数

Table 2 Initial structural parameters

Surface type of lens	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	
			Refractive index	Abbe number
OBJ	∞	∞		
1	1.87	1.02	1.60	23.0
2	0.85	0.85	1.50	40.0
STO	∞	0.85	1.50	40.0
4	-0.85	1.02	1.60	23.0
5	-1.87	1.42		
IMA	-3.29			

3.4 结构优化

利用 Zemax 软件进行优化设计, 优化的步骤如下。

- 1) 调整所设计镜头的初始结构。
- 2) 限制透镜的间隔、系统总长、焦距、后截距、 F 数。考虑手机镜头尺寸以及光学加工技术的限制, 透镜厚度设置为大于 0.3 mm。后截距设置为大于 0.5 mm。
- 3) 设置同心结构及变量。
- 4) 利用操作数 RAID 以及 OPLT 控制入射角以减小渐晕。
- 5) 将孔径光阑设置在球心处。为了方便加工生产, 将同心透镜的中心球透镜设计成两个半球形式。实际生产加工时, 根据孔径光阑位置设计相应模具, 使塑料透镜在成型后有相应的凹槽, 然后在凹槽处涂上消光漆或者装上环形挡片, 最后将两片半球镜作胶合处理。
- 6) 添加胶合面, 以方便实际加工装调。

3.5 材料的选取

受尺寸和加工技术的限制, 手机镜头的材料一

般选用塑料^[14]。所设计的手机镜头由4片同心透镜组成,第一片透镜采用环烯烃共聚物材料 APL5514ML($n_D=1.54, \nu_D=56.11$);第二片和第三片透镜采用具有高透明性能、高耐热的新世代光学材料 ARTON-FX4726($n_D=1.52, \nu_D=52.97$);第四片透镜选用具有高折射率、低色散系数等特点的 OKP-1 材料($n_D=1.64, \nu_D=22.4$)。目前,这几种光学材料已广泛应用于手机、数码相机等镜头镜片的工业化生产中。最后一片透镜用 H-K9 材料,可通过镀膜处理,将其作为过滤波长为 700~1000 nm 的近红外滤光片。

4 设计结果分析

4.1 镜头结构

优化后手机镜头各个透镜的中心和边缘厚度均

表 3 详细结构参数

Table 3 Detailed structural parameters

Surface type of lens	Radius /mm	Thickness /mm	Glass material	Photosensitive adhesive	
				Refractive index	Abbe number
OBJ	∞	∞			
1	1.8847	1.0474	APL5514ML		
2	0.8373	0.005		1.59	35.0
3	0.8323	0.8298	ARTON_FX4726		
4	∞	0.005		1.59	35.0
STO	∞	0.8298	ARTON_FX4726		
6	-0.8323	0.005		1.59	35.0
7	-0.8373	0.8250	OKP-1		
8	-1.6623	0.05			
9	-1.7123	0.6	H-K9		
10	-2.3104	0.9896			
IMA	-3.3000				

4.2 设计分析

同心透镜的渐晕是由孔径光阑在垂直于轴外主光线方向上的投影引起的,即对于轴外光而言,其实际入瞳为一椭圆,长轴长度为轴上视场入瞳直径 D ,短轴长度为轴上视场入瞳直径 $D \cos \omega$,其中 ω 为视场角,如图 4 所示,其中 0° 、 25° 、 50° 视场的入瞳短轴分别对应为 $D \times 100\%$ 、 $D \times 91\%$ 、 $D \times 64\%$ 。

由于光学系统轴外光的照度为中心视场照度的 $\cos \omega$ 倍,故用相对照度曲线来评价光学系统的渐晕。手机镜头的相对照度一般要求在 0.7 视场内高于 70%,总体相对照度大于 50%,否则边缘会有明显暗角产生^[1,15]。图 5 所示为优化后手机镜头的相对照度图,可以看出,优化后的手机镜头满足使用要求。

大于 0.4 mm,满足实际的光学加工技术要求。透镜之间采用胶合方式连接。初始结构和优化后手机镜头结构如图 3 所示。表 3 为优化之后的详细结构参数。

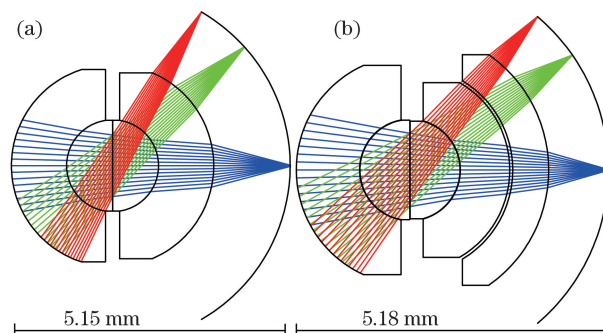


图 3 系统结构。(a)初始结构;(b)优化后手机镜头

Fig. 3 System structure. (a) Initial structure; (b) mobile phone camera after optimization

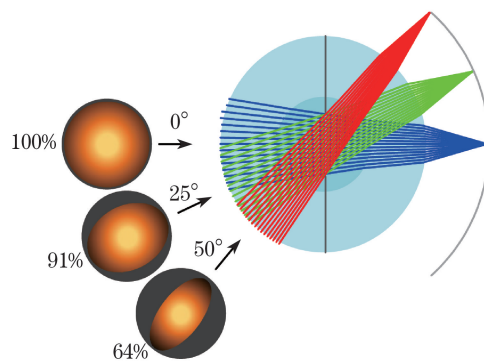


图 4 同心透镜的渐晕示意图

Fig. 4 Schematic of concentric lens vignetting

同心透镜存在渐晕,渐晕处艾里斑的尺寸较大,导致不同视场的像差不相同。图 6 所示为点列图,

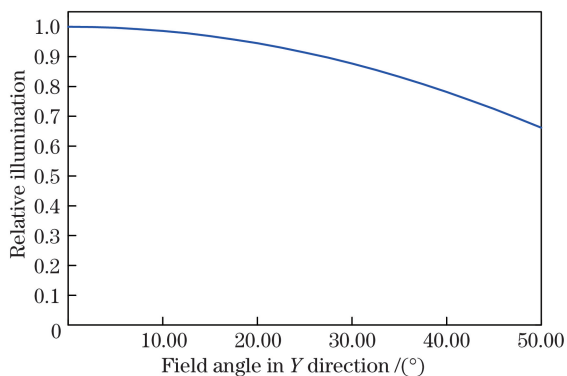


图 5 相对照度曲线

Fig. 5 Curve of relative illumination

所设计的曲面传感器尺寸为 $1.12 \mu\text{m}$, 根据手机镜头的弥散斑半径尺寸要求^[2], 本设计的均方根(RMS)半径需控制在 $3.36 \mu\text{m}$ 之内。由 $N = 1000 / (2 \times \alpha)$ (N 为奈奎斯特频率, α 为像素尺寸) 得到手机镜头的奈奎斯特频率为 446 lp/mm 。图 7 所示为调制传递函数(MTF)曲线图。可以看出, 在奈奎斯特频率为 223 lp/mm 处, 0.7 视场内的 MTF 值均大于 0.58 , 全视场的 MTF 值均大于 0.50 ; 在 446 lp/mm 处,

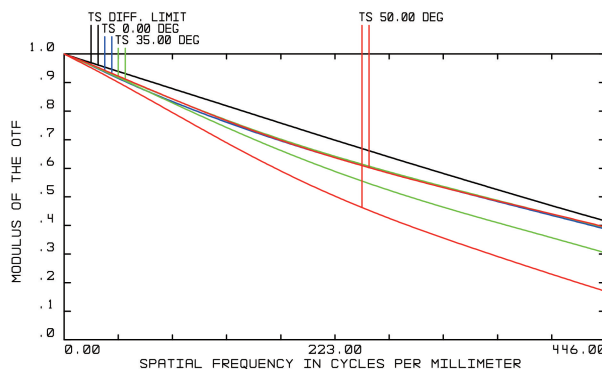


图 7 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves

0.7 视场内的 MTF 值均大于 0.30 , 全视场的 MTF 值均大于 0.17 。因为手机镜头在 0.7 视场范围外的像质允许一定程度的下降^[3], 所以所设计的手机镜头的成像质量满足工业生产要求。

5 公差分析

光学系统在成像质量良好的同时, 还要满足现有的加工制造水平要求。现有的手机塑料加工技术已经非常成熟, 利用机械加工得到所需模具, 然后利用注射成型技术进行大批量生产。利用 Zemax 软件的公差分析功能, 将系统的 MTF 值作为公差敏感度, 得到公差分析最终结果: 镜头各表面的曲率半径公差为 ± 1.5 fringes; 各表面的偏心公差为 $\pm 0.006 \text{ mm}$; 各表面的厚度公差为 $\pm 0.006 \text{ mm}$; 各表面的倾斜公差为 $\pm 0.18^\circ$; 元件的偏心公差为 $\pm 0.006 \text{ mm}$; 元件的倾斜公差为 $\pm 0.18^\circ$, 满足现有的实际加工水平。

利用蒙特卡罗分析法, 设定 500 组随机误差数。结果表明, 引入误差后该手机镜头 80% 以上的蒙特卡罗样本 MTF 值大于 0.21 , 符合工业生产要求, 见表 4。

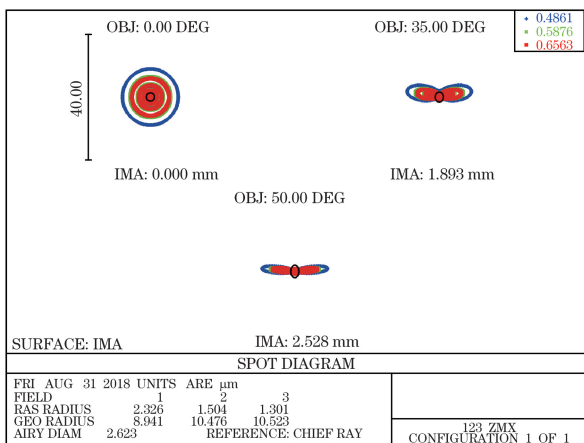


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

表 4 蒙特卡罗分析结果

Table 4 Results of Monte-Carlo analysis

MTF value	0.19268630	0.21118133	0.24302036	0.29404811	0.31284273
Sampling probability	90%	80%	50%	20%	10%

6 结 论

在现有的手机镜头设计的基础上, 结合同心透镜以及曲面传感器发展现状及趋势, 利用初级像差理论, 编制相关程序, 计算得到系统的初始结构, 并利用光学设计软件 Zemax 进行优化, 设计出一款 1300 万像素的超广角手机镜头。该手机镜头的焦

距为 3.3 mm , F 数为 1.83 , 全视场角为 100° , 总长 5.18 mm 。本设计同时满足高像质以及超广角的技术要求, 符合手机镜头的发展趋势, 可广泛应用于未来手机成像系统。

参 考 文 献

[1] Zhang P, Wang C, Song D F, *et al.* Design of lens

- for 5 mega-pixel mobile phone cameras[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(6): 934-938.
- 张萍, 王诚, 宋东璠, 等. 500 万像素手机镜头设计[J]. *应用光学*, 2009, 30(6): 934-938.
- [2] Li H, Yan C X. Design of wide-angle lens for 8 mega-pixel mobile phone camera[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2014, 7(3): 456-461.
- 李航, 颜昌翔. 800 万像素手机广角镜头设计[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 456-461.
- [3] Li G, Wang J Y, Zhang Y. Design of 8 mega-pixel mobile phone camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(3): 420-425.
- 李广, 汪建业, 张燕. 800 万像素手机镜头的设计[J]. *应用光学*, 2011, 32(3): 420-425.
- [4] Gao X Y, Chen P B. A 13 million pixels mobile phone lens based on ZEMAX[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 36(4): 284-288.
- 高兴宇, 陈朋波. 基于 ZEMAX 的 1300 万像素手机镜头[J]. *桂林电子科技大学学报*, 36(4): 284-288.
- [5] Yin Z D, Xiang Y, Gao J, *et al.* Optical design of a 1300 megapixel mobile phone camera lens optics designs[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 012202.
- 尹志东, 向阳, 高健, 等. 1300 万像素手机镜头设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 012202.
- [6] Xie Z H, Wang S, Yan Z Q, *et al.* Optical design of a 2100 megapixel mobile phone camera lens based on ZEMAX[J]. *Electronic Test*, 2017(20): 37-39.
- 谢志宏, 王顺, 闫宗群, 等. 基于 ZEMAX 的 2100 万像素手机镜头设计[J]. *电子测试*, 2017(20): 37-39.
- [7] 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.
- [8] Yamano H. Lens optical unit and imaging device: JP2013-61476[P]. 2011-09-13.
- [9] Huang L L, Hong C Z, Zhong Z Z. Method and system for forming a curved touch sensor: 102541345B[P]. 2015-12-09.
- 黄丽丽, 洪承载, 仲正中. 形成曲面触摸传感器的方法和系统: 102541345B[P]. 2015-12-09.
- [10] Gaschet C, Chambion B, Gétin S, *et al.* Curved sensors for compact high-resolution wide field designs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10376: 1037603.
- [11] Iwert O, Delabre B. The challenge of highly curved monolithic imaging detectors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7742: 774227.
- [12] Guenter B, Joshi N, Stokley R, *et al.* Highly curved image sensors: A practical approach for improved optical performance[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13010-13023.
- [13] Zhang Y M, Zhang H X, Jia D G. *Applied optics*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- 张以谟, 张红霞, 贾大功. *应用光学*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [14] Xue L T, Lin F. Design of thin and wide-angle lens for 8 mega-pixel mobile phone camera[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 102204.
- 薛雷涛, 林峰. 800 万像素超薄广角手机镜头设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 102204.
- [15] Dong Y S, Cong J Z, Li Y H, *et al.* Optical system design and tolerance analysis of ultra-thin HD mobile phone lens[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 40(04): 33-37.
- 董永圣, 丛京洲, 李艳红, 等. 超薄高清手机镜头光学系统设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(04): 33-37.