

基于虹膜识别的小畸变手机镜头设计

于雪莲^{1*}, 郭冰梅¹, 李秀芳^{1,2}, 沈涛¹

¹哈尔滨理工大学理学院黑龙江省量子调控重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;

²大恒新纪元科技股份有限公司光电研究所, 北京 100085

摘要 为了获得高质量的虹膜图像,采用光学设计软件 ZEMAX 设计了一款手机虹膜识别镜头,该镜头由 4 片塑料非球面透镜组成,工作距离为 200~330 mm,总长为 4.09 mm, F 数为 2.4。设计结果显示,工作距离为 275 mm 时,镜头在 $1/2$ 奈奎斯特频率处的调制传递函数大于 0.4,光学畸变小于 0.6%,相对照度大于 83%。通过像质评价及公差分析可知,该光学系统的畸变小,可变工作距离大,像质优异且性能稳定,可以满足虹膜识别镜头的加工要求。

关键词 光学设计;手机镜头;ZEMAX;虹膜识别;小畸变

中图分类号 O435.2; O434.3 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP57.012204

Design of Small Distortion Phone Lens Based on Iris Recognition

Yu Xuelian^{1*}, Guo Bingmei¹, Li Xiufang^{1,2}, Shen Tao¹

¹Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Quantum Manipulation & Control, School of Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China;

²Institute of Optoelectronics, Daheng New Epoch Technology, Inc., Beijing 100085, China

Abstract To obtain high-quality iris images, a phone iris-recognition lens is designed using the optical design software ZEMAX in this study. The phone lens comprises four plastic aspheric lenses. The total working distance, total length, and F number of the phone lens are 200–330 mm, 4.09 mm, and 2.4, respectively. In the design results, the modulation transfer function at 275 mm exceeds 0.4 at one-half the Nyquist frequency of the lens. The distortion is lower than 0.6%, and the relative illumination exceeds 83%. Image evaluation and tolerance analysis confirm that the system has small distortion, a large variable working distance, excellent image quality, and stable performance, thus meeting the processing requirements of iris recognition lenses.

Key words optical design; phone lens; ZEMAX; iris recognition; small distortion

OCIS codes 220.1250; 080.2740; 220.4830

1 引言

生物识别技术因具有普遍性、安全性与便捷性而被广泛应用于手机移动终端的安全防护上,例如指纹识别^[1]、人脸识别^[2]与虹膜识别^[3-5]等。虹膜具有唯一性、天然防伪性、终生不变性和非接触性等独特优势^[6]。1993年,Daugman教授^[7]提出了一款虹膜识别系统,该系统展现出的超高安全性吸引了诸

如剑桥大学、卡耐基梅隆大学以及中国科学院自动化研究所等多所国内外研究机构的关注。世界各国政府和国防部门已将虹膜识别技术应用于国家安全部门、军队门禁、银行、监狱安全管理监测等领域,且均取得了良好的应用效果。

良好的用户体验是手机虹膜识别镜头的基本要求,为了满足用户对手机轻薄化以及舒适度的要求,镜头的总长要尽可能短,且灵活性要足够高,即要求

收稿日期: 2019-06-14; **修回日期:** 2019-06-24; **录用日期:** 2019-07-05

基金项目: 国家自然科学基金(51677044)、黑龙江省自然科学基金(E2018047)、哈尔滨市优秀青年创新基金(2017RAYXJ022)

* **E-mail:** yuxuelian@hrbust.edu.cn

在缩短镜头总长的基础上,提供足够的可变工作距离,使用户不需要反复调整距离便可以完成采集过程。准确度是虹膜镜头质量的重要评价标准,因为虹膜的唯一性体现在它的纹理细节特征上,所以需要尽可能减小光学畸变对纹理细节特征的影响,提高虹膜识别的准确度。工业界的首款虹膜识别手机是日本富士通在 2015 年推出的 ARROWS NX F-04G,三星 Galaxy Note 7 也安装了虹膜镜头,它们的可变工作距离均在 100 mm 左右。学术界的研究人员也推动了虹膜镜头设计的发展,如,刘雅丽等^[8]设计了一款光学畸变仅为 0.15% 的高精度虹膜镜头,该镜头选用四片式结构,总长为 150 mm,工作距离固定为 130 mm,该镜头的结构较长,只能应用于机器视觉系统。针对虹膜识别镜头体积和质量较大的问题,吴锦昇等^[9]于 2017 年使用 ZEMAX 光学设计软件设计了一款总长为 4.43 mm 的三片式手机虹膜识别镜头,其可变工作距离为 80 mm,光学畸变在 2% 以内;同年,高永锋等^[10]使用 Code V 软件设计了一款总长仅为 4.0mm 的三片式手机虹膜识别镜头,其可变工作距离为 50 mm,光学畸变在 1.2% 以内。需要指出的是,以上这两款镜头的灵活性以及光学畸变等都还有优化空间。针对上述两个主要问题,本文设计了一款四片式手机虹膜识别镜头,该镜头具有总长短、可变工作距离大、光学畸变小等优点,可以满足高质量虹膜成像要求。

2 光学设计

2.1 传感器的选择

根据国际标准 ISO/IEC 19794-6 对虹膜采集的相关要求,高质量的虹膜图像要求虹膜区域采集到的像素点要达到 200 个,计算得到对应的有效像素应不低于 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 。本设计选用 Omnivision 公司生产的 OV2744 型 CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 传感器,其参数如表 1 所示。

表 1 CMOS 参数

Table 1 Parameters of CMOS

Item	Parameter
Effective pixel number / (pixel × pixel)	1920 × 1080
Image size / (μm × μm)	2688 × 1512
Min pixel size / (μm × μm)	1.4 × 1.4
Image height / mm	3.08

依据瑞利准则,当光学系统的理论分辨率大于芯片的奈奎斯特频率 N_R 时,设计才能实现。

CMOS 像元大小为 $P=1.4 \mu\text{m}$,则有 $N_R = \frac{1000}{2 \times P} = 357 \text{ lp/mm}$,因此该镜头能够解析的空间频率为 357 lp/mm。

2.2 材料的选取

本设计镜片选取非球面光学塑料作为材料,采用非球面可有效控制像差。非球面的边缘一般较薄,这样有助于中央与边缘的光线聚集在同一个位置,进而有效地减小球差,提高系统的光学性能,因此本设计中 4 片透镜的 8 个面均设为非球面。光学塑料具有质量轻、透光性好、成本低,以及能够满足特殊面型的设计要求等优点,常被用作手机镜头的材料^[11]。第一、第三、第四片透镜选择 E48R 透明塑料材料,其折射率为 1.531160,阿贝数为 56.0438,吸水率小于 0.01%,有利于产品的轻量化,该材料具有低双折射、不易吸附静电、外形容易保持的特点,已被广泛用于制作手机镜头。第二片透镜选择流动性好且具有超低双折射的 EP5000 透明塑料材料。近红外滤光片采用 BK7 材料,其作用是滤除可见光,只允许近红外光通过。

为了满足用户对高质量图像的采集要求,手机镜头经历了从使用像质较差的单片透镜到设计多片透镜组以呈现更优像质的发展过程,随着用户对像质要求的不断增加,设计难度不断增大,因此,在镜头设计中增加透镜数量即是增多自变量,这样有利于提高设计的效率。此外,透镜数量的增加还可以减小镜头组表面曲率的绝对值,减小光线的入射角,从而减少高级像差的出现^[12],提高采集图像的质量。因此,本设计在初始结构为三片透镜的基础上改为四片。四片式的常见组合有两种:正正正正和正负正负。前一种组合方式不仅能有效控制各种像差的发生,还能使光学系统获得更高的分辨率;后一种组合方式可以保证光线以小的角度入射到 CMOS 上,防止暗角的出现。本设计选用的是前者。此外,本设计的光阑位于第一片与第二片透镜之间,这种结构可有效限制各透镜尺寸的增大,有利于结构小型化^[13]。

2.3 初始结构的选择

通过求解像差理论获取初始结构的方式计算量过大,为了提高光学设计的效率,一般通过查阅相似的专利文献来获得合适的初始结构,此类结构基本上都能满足设计的需要^[14]。

本设计选择一款三片式虹膜识别镜头作为初始结构,初步优化后的结构图与调制传递函数 (MTF)

曲线如图 1、2 所示。

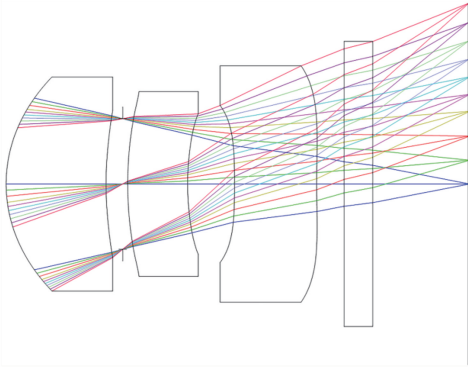


图 1 初始结构
Fig. 1 Initial structure

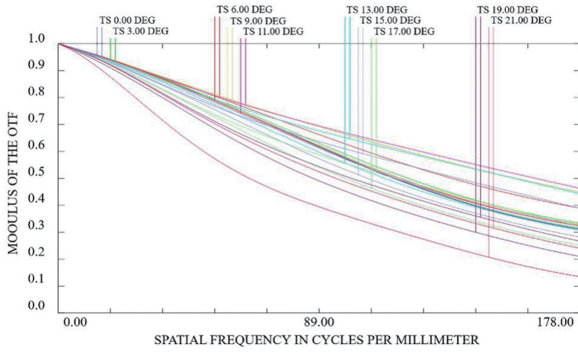


图 2 初始结构的 MTF 图

Fig. 2 MTF curves of initial structure

选取 F 值是设计虹膜识别镜头的重要步骤。

表 2 设计指标

Table 2 Design parameters

Total length /mm	F number	Field of view /($^{\circ}$)	Back focal length /mm	Relative illumination	Optical distortion	MTF	
						$s=89 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$	$s=178 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$
<4.2	2.4	<44	>0.7	$>65\%$	$<3\%$	>0.5	>0.2

2.5 结构优化

对光学系统进行优化设计就是根据系统各个结构参数对像差的影响,通过修改对像差有校正作用的所有结构参数,使像差得到优化。阻尼最小二乘法(DLS)作为最小二乘法中的一种改进算法,是光学系统优化常用的方法之一,同时也是本研究使用的 ZEMAX 光学设计软件的基本优化方法。ZEMAX 中的目标函数又称为评价函数,可以用来评价系统优化设计的目标。评价函数的表达式为

$$\varphi = \sum_{j=1}^m \mu_j \left[f_j - \left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} \Delta x_n \right) \right]^2 + p \sum_{i=1}^n \Delta x_i^2, \quad (1)$$

式中: φ 表示评价函数; f_j 表示广义像差; m 表示广义像差的个数; n 表示结构参数的总数量; μ_j 表示

一方面,若使镜头在距人眼一定距离内都可以拍摄到清晰的虹膜图像,景深应尽可能大,根据景深公式 $\Delta L = \frac{2f^2 F \delta L^2}{f^4 - F^2 \delta^2 L^2}$ (δ 为像元允许的弥散斑直径, f 为焦距, L 为拍摄距离, F 为镜头的光圈值)可知,要获得大景深需要增大 F 值。另一方面,为了获得合理的照明水平和曝光时间,光学系统的 F 值应该相对较小。因此必须选取适当的 F 值,以平衡两种需求^[15]。人眼最舒适的明视距离为 250 mm,因此本设计将 F 值设为 2.4,并将镜头的对准距离设为 250 mm。

虹膜识别镜头采集的主要目标是虹膜,因此,为了滤除虹膜以外的其他细节信息,应该选取较小的视场角。但是,由公式 $y = \tan \theta \times f$ 可知,当 f 值固定时,视场角 θ 越大,像高 y 越大,即对应的传感器尺寸越大,则感光面积越大,成像效果越好。本设计为了兼顾视场范围和成像效果两方面要求,选取视场角为 42° 。

使用 700~900 nm 波段的近红外光束照射人眼,可以增加瞳孔与虹膜之间的对比度,并且近红外光对人眼的刺激较小,基本不会引起瞳孔的收缩与扩张,因此光源选择近红外波段 700~900 nm 之间的波段,主波长为 852 nm。

2.4 设计指标

根据虹膜识别镜头的设计要求给出的设计指标如表 2 所示,其中 s 为空间频率。

权重因子; p 表示阻尼因子,且 p 是一个适当的正数; Δx_i 表示参数修改量,它被减小的程度由阻尼因子 p 的大小决定。选择适当的阻尼因子 p 可以有效地控制 Δx_i ,使之在像差的线性范围内,从而可以很好地防止评价函数出现早期发散。

采用 ZEMAX 建立默认的评价函数,并通过添加合适的评价函数进行优化,初次优化时设置的评价函数如下:

- 1) 将初始结构的半径、厚度、偶次非球面系数设为变量;
- 2) 根据设计要求,需要控制总长在 4.2 mm 以内;
- 3) 为了满足加工要求,设定边界条件,使镜片的中心厚度与边缘厚度之比小于 2;

4) 所选芯片的半像高为 1.54 mm, 系统的半像高应稍大于图像传感器的有效成像面对角线半径, 以防止 CMOS 形成暗角。

首先设置默认评价函数, 采用高斯求积法进行优化, 然后判断结构是否合理, 是否满足像差要求; 若不满足, 再添加对应的评价函数, 直到满足设计要求。

3 设计结果

优化后的四片式透镜组结构如图 3 所示, 该结构紧凑且易加工, 满足设计指标。根据优化后的结果, 分别用 4 种评价结果对光学系统的成像质量进行评价。

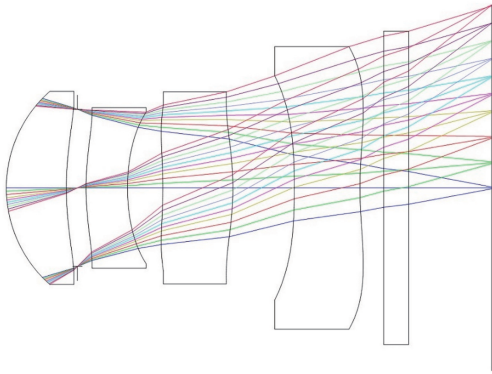


图 3 优化后的结构外形图

Fig. 3 Optimized structure layout

3.1 MTF

MTF 是综合评价镜头成像特性和像质的标准^[16], 一个镜头的综合光学品质可以用 MTF 图的

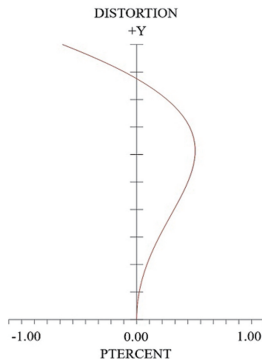
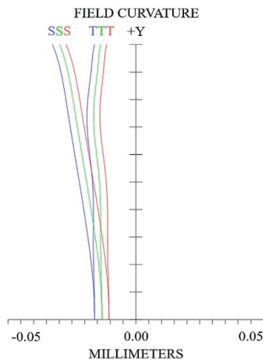


图 5 场曲和光学畸变

Fig. 5 Field curvature and optics distortion

3.3 相对照度

为了防止镜头采集的虹膜图像出现边缘暗角, 本设计要求全视场内的相对照度大于 50%^[18]。如图 6 所示, 本设计全视场内的相对照度大于 83%, 满足相对照度的要求。

曲线与纵、横坐标围成的面积确定, 面积越大, 光学品质越好。图 4 给出了 1/2 奈奎斯特频率处工作距离在 160~500 mm 的 MTF 分布图, 可以看出工作距离为 200~330 mm 时, MTF 均在 0.25 以上。图 4 中 TMTF(子午方向的 MTF) 与 SMTF(弧矢方向的 MTF) 相交于 275 mm 处, 此时像散最小, 即工作距离为 275 mm 时, 子午方向的 MTF 与弧矢方向的 MTF 相同, 均在 0.4 以上, 透镜组的成像效果最佳。

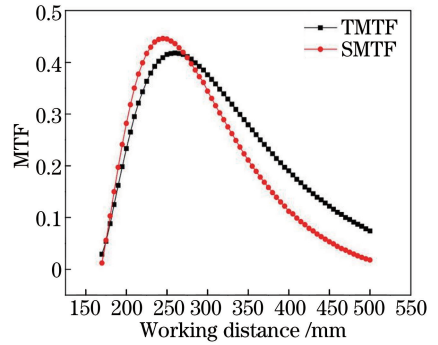


图 4 工作距离为 160~500 mm 时 1/2 mm 奈奎斯特频率下的 MTF

Fig. 4 MTF at 1/2 Nyquist frequency with working distance of 160-500 mm

3.2 场曲与光学畸变

为了满足镜头高质量成像的要求, 手机镜头设计的一般标准^[17]如下: 场曲小于 0.1, 光学畸变小于 3%, 因为符合该标准的镜头可以使人眼对像的变形不敏感。由图 5 可以看出, 场曲小于 0.03, 光学畸变小于 0.6%, 说明本设计充分满足高质量成像镜头设计的一般标准。

4 公差分析

ZEMAX 设计中的公差分析是通过设置某些参数的公差范围, 分析这些参数对系统成像质量影响的大小, 从而为实际加工提供参考。本设计设置的

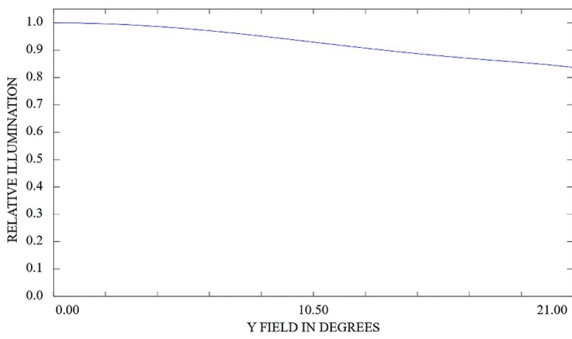


图 6 相对照度曲线

Fig. 6 Relative illumination curve

部分公差参数如表 3 所示,经过 500 次蒙特卡罗分析模拟后,公差扰动造成的 MTF 的变化如图 7 所示,图 7 中蒙特卡罗公差分析模拟的产品良品率在表 4 中给出。本设计的 Nominal MTF 为 0.690726048。由表 4 可以看出,在 1/4 奈奎斯特频率处,该手机镜头 90% 以上的 MTF 模拟结果达到了 0.623181071,说明本产品可以达到批量加工生产的要求。

表 3 公差参数设置表

Table 3 Setting table of tolerance parameters

Type	Value
Radius /mm	0.002
Thickness /mm	0.003
Decenter /mm	0.002
Tilt /($^{\circ}$)	0.15
S+A Irreg	0.1
Abbe /%	0.5

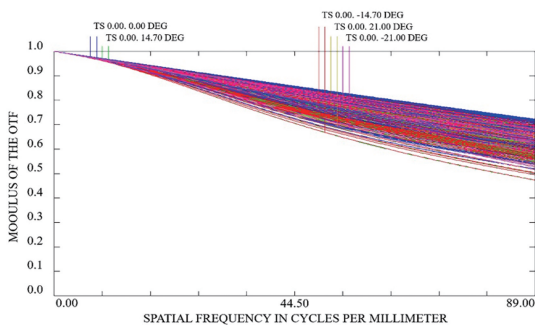


图 7 公差分析的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves obtained by tolerance analysis

5 结 论

一款好的镜头成像质量尤为关键,同时也要具有简单的结构、简易的加工工艺和稳定的性能等优势。本文采用 ZEMAX 光学设计软件优化了镜头的初始结构,设计了一款结构为四片式透镜组的手機虹膜识别镜头,通过像质分析和公差分析可以得

表 4 蒙特卡罗公差分析模拟的产品良品率

Table 4 Product benign rate obtained by Monte Carlo tolerance analysis

Benign rate	MTF value
$\geq 98\%$	0.596468620
$\geq 90\%$	0.623181071
$\geq 50\%$	0.675887200
$\geq 10\%$	0.702037880
$\geq 2\%$	0.707773626

知该款镜头充分满足设计指标,其总长为 4.09 mm,可变工作距离为 130 mm,光学畸变小于 0.6%,相对照度大于 83%,很好地满足了虹膜识别镜头的要求,可以为用户提供良好的产品体验。

参 考 文 献

- [1] Jain A, Hong L, Bolle R. On-line fingerprint verification [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(4): 302-314.
- [2] Bledsoe W W. The model method in facial recognition[R]. California: Technical Report PRI: 15, 1964.
- [3] Flom L, Safir A. Iris recognition system: US4641349 [P/OL]. 1987-02-03 [2019-06-13]. <https://patents.glgoo.top/patent/US4641349A/en>.
- [4] Wildes R P, Asmuth J C, Green G L, et al. A machine-vision system for iris recognition [J]. Machine Vision and Applications, 1996, 9(1): 1-8.
- [5] Daugman J. How iris recognition works [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(1): 21-30.
- [6] Cheng Y Q. Research on iris recognition algorithms for personal identification [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2010: 5-6.
程宇奇. 用于身份鉴别的虹膜识别算法研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2010: 5-6.
- [7] Daugman J G. High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1993, 15(11): 1148-1161.
- [8] Liu Y L, Wang M, Huang M W. Iris identification optical lens with high precision [J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 575-579.
刘雅丽, 王敏, 黄木旺. 高精度虹膜识别光学镜头的研制[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 575-579.
- [9] Wu J S, Lin F. Design of 5 mega-pixel imaging lens for iris recognition [J]. Journal of Applied Optics,

- 2017, 38(2): 292-297.
- 吴锦昇, 林峰. 500万像素虹膜识别镜头设计[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 292-297.
- [10] Gao Y F, Zhang B, Song G H, et al. Optical design of iris recognition lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 012204.
- 高永锋, 张变, 宋光辉, 等. 虹膜识别镜头的光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 012204.
- [11] Cong H F. Camera design of 4P slim 8 megapixel lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(12): 3993-3997.
- 丛海芳. 4P超薄800万像素镜头设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 3993-3997.
- [12] Liu Y. Design and manufacture of vehicle panoramic fish-eye lens [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016: 15-17.
- 刘言. 车载全景鱼眼镜头的设计与制造[D]. 镇江: 江苏大学, 2016: 15-17.
- [13] Yang Z, Yang H M, Ding G L. An ultra-thin eight-mega-pixel mobile phone lens[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(3): 413-419.
- 杨周, 阳慧明, 丁桂林. 一款超薄800万像素手机镜头的设计[J]. 应用光学, 2013, 34(3): 413-419.
- [14] Yang Z, Ding G L. Design of mobile phone camera lens based on CODE V[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 051101.
- 杨周, 丁桂林. 基于CODE V的手机摄像镜头光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 051101.
- [15] He Y Q, Cui J L, Tan T N, et al. Key techniques and methods for imaging iris in focus [C]//18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR '06), August 20-24, 2006, Hong Kong, China. New York: IEEE, 2006: 9164303.
- [16] Ye W W, He L P, Lin F. Design of optical system for multimode recognition based on fingerprints and veins[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 092201.
- 叶文炜, 何丽鹏, 林峰. 指纹静脉多模识别光学系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 092201.
- [17] Dong Y S. Research on design and technology of high-definition mobile phone lens [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017: 31-33.
- 董永圣. 高清手机镜头设计及工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017: 31-33.
- [18] 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.