

# 基于 CODE V 的手机摄像镜头光学设计

杨 周 丁桂林

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 为了满足市场对微型、简单化手机摄像镜头的需求,运用光学设计软件 CODE V,结合非球面透镜理论,设计出用于可见光波段且符合结构简洁、生产成本低的要求的手机定焦镜头。该镜头  $F$  数为 2.05,视场角为  $62^\circ$ ,半像高为 2.4 mm,系统总长度为 5.59 mm。为了使结构紧凑并且最大限度地降低生产成本,在结构设计中采用非球面的塑料镜片。设计结果显示:镜头的适应像素尺寸是  $1.1\ \mu\text{m} \times 1.1\ \mu\text{m}$ ,相应的尼奎斯特频率为 454 lp/mm,在  $1/2$  尼奎斯特频率处绝大部分视场调制传递函数(MTF)值大于 0.4,各个视场的横向像差均小于  $9.26\ \mu\text{m}$ ,均方根(RMS)半径都在艾里斑之内,畸变小于 1%,获得良好的成像效果。

**关键词** 成像系统;光学设计;手机镜头;CODE V;非球面透镜

**中图分类号** TB851.1; TN942.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.051101

## Design of Mobile Phone Camera Lens Based on CODE V

Yang Zhou Ding Guilin

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** Combining the aspherical lens principle, a fixed-focus lens with compact structure and low cost is designed with the optical system design software CODE V to meet the requirement of the mobile communication on miniaturization and simplification of camera lenses. For the designed lens, the  $F$  number is 2.05, the angle of vision is  $62^\circ$ , the half image height is 2.4 mm, and the total length of the system is 5.59 mm. The aspherical lens made of plastic is used to reduce the size and save production cost in the structural design. The design result shows that the pixel size of the lens is  $1.1\ \mu\text{m} \times 1.1\ \mu\text{m}$ , the corresponding Nyquist frequency is 454 lp/mm, the modulation transfer function (MTF) values of most FOV at half Nyquist frequency are more than 0.4, transverse aberration of all FOV is less than  $9.26\ \mu\text{m}$ , the root-mean-square (RMS) radii are less than Airy disk, and the distortion is less than 1%. The designed lens has an excellent imaging performance.

**Key words** imaging systems; optical design; mobile phone lens; CODE V; non-spherical lens

**OCIS codes** 110.2960; 110.4100; 120.4820

## 1 引言

近年来,随着拍照手机的流行,对于紧凑型成像镜头的需求在不断增加,其特点是体积小、成像质量好、成本低以及质量轻。而目前光学塑料已经代替了光学玻璃在手机摄像镜头上的应用,如 Chen 等<sup>[1,2]</sup>的美国专利,相对于 Yamakawa<sup>[3]</sup>的玻璃镜头,具有质量轻、结构紧凑和成本低等优点。另外,光学镜头模块体积的大小与图像传感器尺寸大小是相关的。半导体技术促进感光元件快速发展,其像素尺寸由原先的  $5\ \mu\text{m}$  以上发展到现在的  $1.1\ \mu\text{m}$ <sup>[4]</sup>,相同像素的手机镜头的体积可以做得比以前小得多,将 800 万像素的镜头集成到手机上已不是问题。为了充分使用高分辨率的图像感测元件的分辨能力,现有技术常采用 4 透镜元件<sup>[5]</sup>。鉴于此,在光学软件 CODE V 的辅助下,本文设计了一款大孔径、结构简洁和超薄的 800 万像素手机镜头,并就设计结果进行了分析。

**收稿日期**: 2012-11-29; **收到修改稿日期**: 2013-02-17; **网络出版日期**: 2013-04-12

**作者简介**: 杨 周(1986—),男,硕士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: yanghome123@126.com

**导师简介**: 丁桂林(1957—),男,博士,教授,主要从事光学设计和激光传输与控制等方面的研究。

E-mail: guilinding@yahoo.com.cn

## 2 感光器件的选取

目前常用的感光器件有电荷耦合器件(CCD)和互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器两种。相对于 CCD, CMOS 具有集成能力强、体积小、工作电压单一、功耗低、动态范围宽、抗辐射、制造成本低和质量轻等优点<sup>[6,7]</sup>,故拍照手机上大多采用 CMOS 传感器。同时 CMOS 芯片尺寸越做越小,相应的像素尺寸也越来越小,分辨率越来越高。

本设计采用 OmniVision 公司一款型号为 OV8850<sup>[8]</sup>的 800 万像素的  $\frac{1}{4}$  inch(1 inch=25.4 mm) CMOS 作为设计镜头的配套传感器,每个感光单元的最小像素尺寸为  $1.1 \mu\text{m}$ ;解析度为  $3280 \text{ pixel} \times 2464 \text{ pixel}$ ;像面大小为  $3.296 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ ,对角线长度为  $4.14 \text{ mm}$ 。为了防止加工装配的误差导致像面的上下偏转,本设计取半像高为  $2.4 \text{ mm}$ 。

根据尼奎斯特抽样定理<sup>[9]</sup>,图像感测组件所能显示的最大空间频率需受尼奎斯特采样频率的限制,即一个空间周期至少有两个像素,故此图像传感器所要搭配的光学镜头需要能解析  $1000/(2 \times 1.1) \text{ lp/mm} = 454 \text{ lp/mm}$ 的空间频率。

## 3 镜头结构的设计指标

市场上 800 万像素手机的视场角(FOV)在  $60^\circ$ 左右,光圈值在 2.4 左右,镜头总长度一般小于  $1 \text{ cm}$ 。后工作距应保持适当大小,防止造成 CMOS 损伤,对于手机镜头,后工作距通常大于  $0.3 \text{ mm}$ 即可<sup>[10]</sup>。由于视场角  $2\omega$ ,有效焦距  $f$  和半像高  $y$  满足关系式  $y = -f \tan \omega$ ,可根据已知的视场角和半像高来确定光学系统的有效焦距。另外,当光学总长度和图像传感器的有效成像面对角线一半的比值等于 1 或者更大时,能够保证光学镜头结构紧凑<sup>[1]</sup>,依此来判断镜头光学总长度。

手机物镜所允许的弥散斑直径为  $2\Delta d = 2 \times (1.5 \times 1.2) / N_L$ ,式中  $\Delta d$  为弥散斑半径,  $N_L$  为手机物镜的分辨率。由于手机镜头的分辨率  $N_L$  应大于接收器的分辨率  $N_d$ ,假设  $N_L = N_d = 454 \text{ lp/mm}$ ,代入上式得  $\Delta d = 3.3 \sim 2.6 \mu\text{m}$ ,所以像面上弥散斑的半径最大不能大于  $3.3 \mu\text{m}$ 。手机镜头对于畸变也有严格要求,通常畸变应当小于  $2\%$ 。为了获得好的成像质量,摄像系统在最大空间频率  $454 \text{ lp/mm}$ 处  $0.7$  视场的调制传递函数(MTF)值应大于 0.13,全视场的 MTF 值大于  $0.1$ <sup>[11]</sup>。总的设计指标如表 1 所示。

表 1 镜头的主要技术指标

Table 1 Main specifications of lens

Project name	Specification
Visible-light wavelength /nm	486.1; 587.6 (main wavelength); 656.3
Total length /mm	<6
F number	2.05
FOV /( $^\circ$ )	$62^\circ$
Back focal length /mm	>0.3
Relative illumination /%	>50
Distortion /%	<2
MTF	>0.25(317 lp/mm), >0.4(227 lp/mm), >0.13(454 lp/mm for 0.7 FOV)
Principal-ray exit angle /( $^\circ$ )	<28

## 4 设计思想及过程

### 4.1 设计思想

根据不同设计需求,手机镜头模块通常包括 2 片、3 片、4 片、5 片或者更多的透镜。当系统要求有高的成像质量时,相对于 2 片或 3 片透镜的光学镜头,4 片以上透镜的光学镜头有利于像差的校正和对 MTF 的调制,能够提供更好的成像质量<sup>[2]</sup>。为了满足使用者需求,光学镜头不仅要有好的像差校正、高的分辨率以及高的成像质量,还要求总长度较小,而 5 片以上透镜的光学镜头其总长度不能够满足小型电子产品的需

求<sup>[12]</sup>。故手机镜头通常包括4片透镜,既能确保成像质量好,也能有小的光学总长度。

从透镜材质方面考虑,现在手机镜头通常采用塑料材质。相对于光学玻璃而言,光学塑料具有密度小、质量轻、耐冲击、抗温度骤变能力强、透光性好、制造过程简单、制造成本低和装配成本低等优点。许多注模塑料制成的透镜元件具有精确的弯曲度和高度磨光表面,而且成型过程要求低,而玻璃材质透镜元件必须采用独立的注模、磨光来完成<sup>[13,14]</sup>,因此塑料材质应用于手机镜头,既减轻了镜头的重量,还大大降低了生产成本。

从透镜结构上考虑,本文设计的镜头采用非球面,之所以采用非球面是因为和球面相比,非球面可以提高系统的相对口径比,扩大视场角,在提高光束质量的同时透镜数比球面构成的少,镜头尺寸可微型化,也可减轻系统质量等<sup>[13]</sup>。另外非球面透镜从中心到边缘曲率连续发生变化,理论上为设计提供了无限个自由度,可以更好地消除球差、彗差、像散和场曲,减少光能损失,从而获得高质量的成像效果和好的光学特性。本次设计采用偶次非球面,满足等式<sup>[15]</sup>

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + Er^{12} + \dots,$$

式中 $Z$ 为以各非球面与光轴交点为起点,垂直于光轴方向的轴向值,即非球面的矢高,因为所选透镜的形状均为轴对称式透镜,故该非球面公式均取偶次项; $c$ 为镜面中心曲率, $c = 1/R$ ,其中 $R$ 为非球面顶点的曲率半径; $k$ 为二次曲面常量; $r$ 为离非球面轴的径向距离; $A, B, C, D, E, \dots$ 为非球面系数。

## 4.2 设计过程

### 4.2.1 初始结构选取

照相物镜属于大相对孔径和大视场的光学系统<sup>[11]</sup>,需要校正的像差也大大增加,结构也比较复杂,所以照相物镜设计的初始结构一般都不采用初级像差求解的方法来确定,而是根据要求从已有文献中找出一个和设计比较接近的系统作为原始系统。在选择初始结构时,不必找到和要求相近的焦距,一般只需相对孔径和视场角能达到要求,再将此初始结构进行整体缩放得到要求的焦距值。本文选择 Chi Tang<sup>[5]</sup>设计的结构作为初始结构,该镜头由4片非球面塑料透镜和1片滤波片组成,其 $F$ 数为2.05,视场角为 $62^\circ$ 。

### 4.2.2 优化过程

利用 CODE V 软件对初始结构进行优化<sup>[16]</sup>。首先将各个透镜的厚度、间隔、半径、偶次非球面系数设成可变量,接着设定评价函数,将所要达到的目标值与权重建立于其中。CODE V 提供的优化计算方法基于阻尼最小二乘法,对于优化变量并没有严格的控制,实际上往往许多变量在一定程度上是相关的,相关的程度还与权重有关,权重的选择会影响优化的质量。为了满足实际光学加工的需求,优化时应注意光学材料的厚度及曲率半径不能太小,塑料非球面镜片的中心和边缘厚度都需要大于0.35 mm,曲率半径通常大于2 mm<sup>[17]</sup>。

本镜头采用逐步修改权重、增减操作数以及同时监控优化情况的设计方法,经过反复的修改和调试,并综合考虑像差的平衡问题和加工工艺问题,最终得到一款满足要求的手机镜头。

## 5 设计结果

优化后镜头结构及相关参数值如图1、表2和表3所示。该镜头的特征在于:第一透镜为双凸双面非球面塑料正透镜;第二透镜为凸向像方双面非球面塑料负透镜;第三透镜为凸向像方双面非球面塑料负透镜;第四透镜为凸向物方双面非球面塑料正透镜。该镜头光学总长度为5.59 mm,焦距和后工作距离分别为3.9943 mm和0.31 mm,视场角为 $62^\circ$ ,像高为 $2.4 \times 2 = 4.8$  mm,大于CMOS对角线长度,主光线最大出射角(CRA)小于 $26^\circ$ ,满足CMOS耦合的条件。

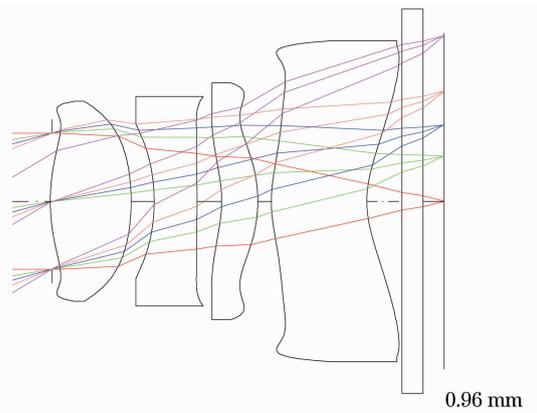


图1 优化后镜头结构

Fig. 1 Structure of lens assembly after optimization

表 2 系统结构参数  
Table 2 System structure parameters

Surface	Type	Radius of curvature /mm	Thickness /mm	Material	Semi-aperture /mm
Object	Sphere	Infinity	Infinity		
Stop	Sphere	Infinity	-0.021404		0.974220
2	Asphere	2.735692	1.151812	1.544;55.9	1.024351
3	Asphere	-3.025976	0.328269		1.164366
4	Asphere	-2.480748	0.610582	1.632;23.4	1.106785
5	Asphere	-8.465950	0.349395		1.171400
6	Asphere	-1.740133	0.514296	1.544;55.9	1.252133
7	Asphere	-2.012867	0.192242		1.346000
8	Asphere	1.913225	1.359125	1.53;55.8	1.710689
9	Asphere	1.481056	0.50000		2.222135
10	Sphere	Infinity	0.30000	1.517;64.2	2.241036
11	Sphere	Infinity	0.308828		2.291902
IMA	Sphere	Infinity	-0.008828		2.400018

表 3 非球面系数  
Table 3 Aspheric coefficients

Surface	Conic	A	B	C	D	E	F	G	H	J
2	0.02739	-0.02233	-0.00191	-0.03062	0.019117	0.002687	-0.014612	$3.3 \times 10^{-23}$	0.003	
3	0	-0.02317	-0.04830	0.03055	-0.01547	0.007911	-0.00497	0.001271		
4	-8.2543	-0.01331	-0.11510	0.095547	-0.01848					
5	-28.322	0.156331	-0.19199	0.108798	-0.03501	0.007884	$-1.2 \times 10^{-23}$	-0.0003		
6	-11.475	0.095261	-0.07827	0.045206	-0.00959	0.00018				
7	-0.4159	-0.01997	0.05655	-0.00468	0.007019	-0.00298	-0.00008			
8	-7.0719	-0.12681	0.072051	-0.01321	-0.00531	0.00335	-0.000579	$6 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-6}$	$1.8 \times 10^{-7}$
9	-4.3928	-0.05184	0.02412	-0.00747	0.001285	-0.00009				

## 5.1 球差、场曲和畸变

图 2(a)反映了系统轴向球差和轴向色差,可看出两者均被校正到 0.02 mm 以内,符合设计要求。场曲反映了整个像面的弯曲情况,对于手机镜头,场曲小于 0.1 mm 即可。从图 2(b)可以看出,场曲校正到 0.05 mm 以内,完全满足要求。畸变一般要求在 2% 以内,从图 2(c)可以看出,畸变小于 1%,完全符合要求。

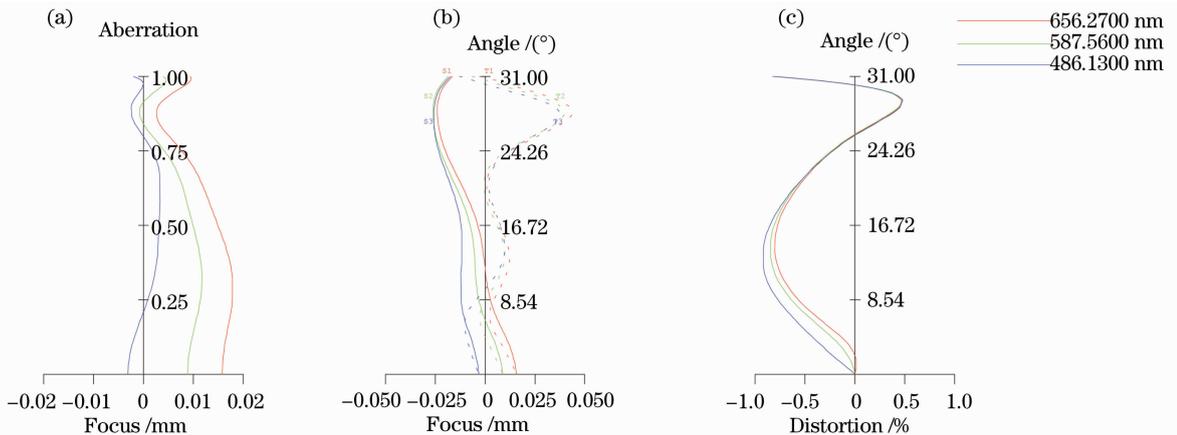


图 2 (a)球差、(b)场曲和(c)畸变图

Fig. 2 (a) Spherical aberration, (b) curvature of field and (c) distortion

## 5.2 像差曲线

垂轴几何像差用不同孔径子午、弧矢光线在理想像面上的交点和主光线在理想像面上的交点间的距离来表示。垂轴几何像差直接给出了光束在像面上的弥散和像点大小情况,因而更直观地显示了系统的成像质量。如图3所示,5个视场的像差都被校正到 $9.26\ \mu\text{m}$ 以内,可见镜头的像差得到了较好的校正。

## 5.3 点列图

图4显示了该镜头的点列图。点列图是由一点发出的许多光线经过光学系统后,因像差使其与像面的交点不再集中于同一点,形成了一个分布在一定范围的弥散图形,并且点的分布能够近似地代表点像的能量分布,因此点列图中点的密集程度可以衡量系统成像质量的优劣。从图4可知,从下到上各视场均方根(RMS)半径分别为 $0.95$ 、 $1.6443$ 、 $1.421$ 、 $1.4$ 、 $1.727\ \mu\text{m}$ ,远小于艾里斑直径 $2.5\ \mu\text{m}$ ,并满足弥散斑半径不大于 $3.3\ \mu\text{m}$ 的条件,符合设计要求。

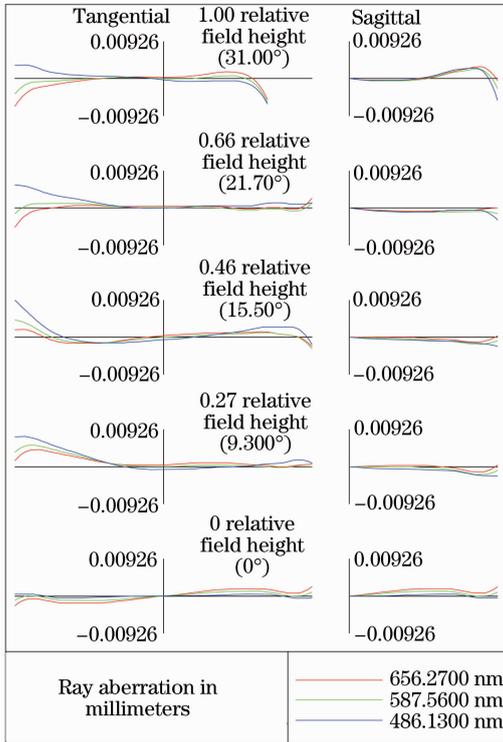


图3 像差曲线图

Fig. 3 Curves of aberration

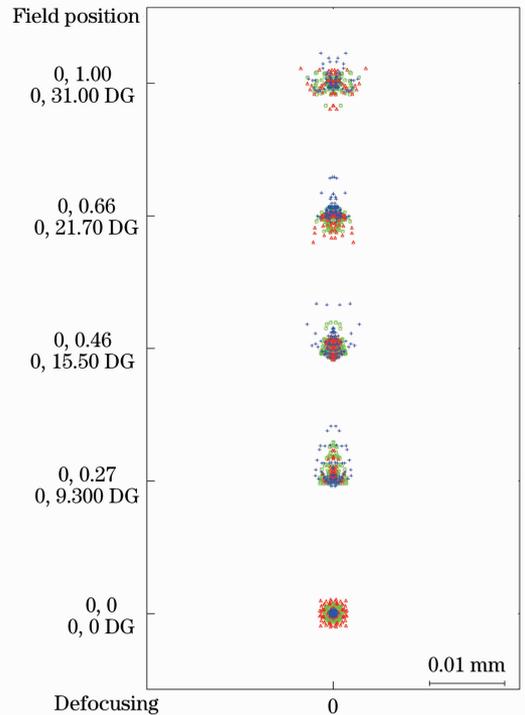


图4 点列图

Fig. 4 Spot diagram

## 5.4 相对照度

相对照度即边缘照度和中心照度的比值,对于拍照手机镜头,一般认为相对照度大于 $50\%$ 即可。如果照度太低,边缘视场的光线会较暗,画面容易形成暗角,人眼很容易察觉,从而影响图片的整体一致性。从图5所示像面相对照度图可以看出相对照度大于 $60\%$ ,完全满足要求。

## 5.5 光学调制传递函数

MTF是综合评价光学系统成像过程、特性和像质的标准。由于像差不能校正到完全理想的程度,对于摄像镜头,一般要求在 $0.7$ 视场以内能够分辨清楚就可以了,轴外视场的分辨率允许一定程度的下降。该镜头的最高分辨率为 $454\ \text{lp/mm}$ ,从图6的MTF曲线中可以看出,在频率 $454\ \text{lp/mm}$ 时, $0.7$ 视场以内MTF值均大于 $0.13$ ,全视场的MTF值为 $0.17$ 。在频率 $227\ \text{lp/mm}$ 时,大部分视场处MTF值都大于 $0.4$ ,说明该镜头有较高的成像质量。

## 6 结论

利用CODE V设计出可用于手机等便携式装置的定焦透镜系统。该镜头结构相对于传统镜头和初始

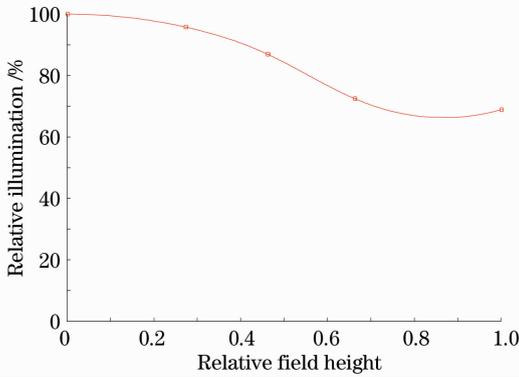


图 5 相对照度图

Fig. 5 Relative illumination

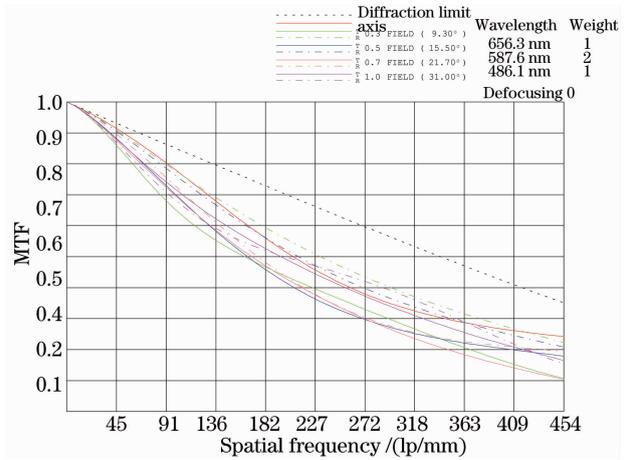


图 6 MTF 曲线图

Fig. 6 MTF curves

结构,具有以下优点:

1) 相对于传统镜头,该优化系统选择非球面塑料透镜镜头代替了玻璃塑料混合镜头或者全玻璃镜头,非球面塑料透镜应用于手机镜头,不仅成本低、重量轻,而且还简化了系统的结构,提高了成像质量。

2) 初始结构中的球差范围为 $-0.1\sim 0.1$  mm,像散为 $-0.2\sim 0.2$  mm,畸变为 $-3\%\sim 3\%$ ;优化后系统球差范围为 $-0.02\sim 0.02$  mm,像散为 $-0.05\sim 0.05$  mm,畸变为 $-1\%\sim 1\%$ ,可见该镜头在像差范围方面比初始结构小得多,提高了成像质量。

3) 本镜头是大孔径、大视场角的光学系统,其 $F$ 数为2.05,视场角为 $62^\circ$ ,焦距为3.9943 mm,后焦距为0.31 mm,光学总长度5.59 mm,符合手机镜头微型化的要求。中心厚度和边缘厚度均大于0.35 mm,有利于加工制造。

4) 初始结构中只是提到这个镜头适用于 CCD 或 CMOS 型传感器,但没有说明满足多大像素的要求;本系统实现了较高的分辨率,可匹配 $\frac{1}{4}$  inch、800 万像素的 CMOS。

5) 本镜头的孔径光阑位于物方空间,置于第一透镜上,可直接利用孔径光阑的开孔大小控制进光量,同时由于孔径光阑离 CMOS 较远,有利于减小前透镜的直径和出瞳的延长度,避免了孔径光阑置于透镜之间的种种问题,在一定程度上降低了系统整体的制造成本。

## 参 考 文 献

- 1 Chun Shan Chen, Hsiang Chi Tang, Tsung Han Tsai. Image Capturing Lens Assembly [P]. US Patent, 8179470, 2012-05-15
- 2 Tsung Han Tsai. Image Pickup Optical Lens Assembly [P]. US Patent, 8179614, 2012-05-15
- 3 H. Yamakawa. Imagery Lens System [P]. US Patent, 5493449, 1996-02-20
- 4 Pierre Magnan. Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2003, **504**(1-3): 199~212
- 5 Hsiang Chi Tang, Tsung Han Tsai. Imaging Lens Assembly [P]. US Patent, 8089704, 2012-01-03
- 6 An Yuying, Liu Jifang, Li Qinghui. Photoelectronic Technique [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. 178~189
- 安毓英, 刘继芳, 李庆辉. 光电子技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009. 178~189
- 7 Li Lijuan, Gao Yuhan, Lin Xuezhu *et al.*. Optical designing and optimizing technique on CCTV monitor lens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(4): 042203
- 李丽娟, 高禹含, 林雪竹 等. 闭路电视监控镜头光学设计及优化技术[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(4): 042203
- 8 Omnivision. Technologies, Inc.. OV8850 8-Megapixel Product Brief [EB/OL]. <http://www.ovt.com/products/category.php?id=12>
- 9 Cheng Qiansheng. Digital Signal Processing [M]. Beijing: Peking University Press, 2010. 40

- 程乾生. 数字信号处理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010. 40
- 10 Li Jingzhen. Handbook of Optics [M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1986. 174~177
- 李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科技出版社, 1986. 174~177
- 11 Yu Daoyin. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2008. 198~199
- 郁道银. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008. 198~199
- 12 Cheon Ho Park, Moon Sik Jung. Imaging Optical System [P]. US Patent, 7710665, 2010-05-04
- 13 Cui Jianying. Fundamentals of Optical Mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 6~54
- 崔建英. 光学机械基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003. 6~54
- 14 Xin Qiming. Manufacturing Technology of Plastic Aspheric Lens [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005. 42~45
- 辛企明. 光学塑料非球面制造技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005. 42~45
- 15 Haul Qin. Aberration correction of a single aspheric lens with particle swarm algorithm [J]. *Optics Communicatons*, 2012, **285**(13-14): 2996~3000
- 16 Optical Research Association. CODE V 9.5 Introductory User's Guide [M]. Pasadena: Optical Research Associates, 2004. 44~73
- 17 Li Shixian. Optical Design Manual [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 103~118
- 李士贤. 光学设计手册[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 103~118