文章编号:1002-2082(2010)01-0034-05

基于ZEMAX的手机摄像镜头设计

宋东璠，张 萍，王 诚，张韧剑，任兆玉，白晋涛
（西北大学 光子学与光子技术研究所，陕西 西安 710069）

摘 要：在光学工程软件ZEMAX的辅助下，配套采用像元大小为1.75 μm的CMOS图像传感器，设计了一款500万像素的手机镜头，镜头视场角60°，F/#2.8，半像高2.87 mm，镜头总长为6 mm，镜头为3P1G结构，第1、3、4片镜片采用非球面塑料，第2片镜片采用球面透镜。各个视场的横向像差均小于20 μm，均方根半径（RMS Radius）都在艾利斑之内，在1/2奈奎斯特频率处绝大部分视场MTF值都大于0.6，可以获得优质的成像效果。

关键词：手机镜头；ZEMAX；500万像素；调制传递函数；像差校正
中图分类号：TN942.2；O439 **文献标志码**：A

Design of mobile phone camera lens based on ZEMAX

SONG Dong-fan，ZHANG Ping，WANG Cheng，ZHANG Ren-jian，
REN Zhao-yu，BAI Jin-tao
(Institute of Photonics & Photo Technology，Northwest University，Xi'an 710069，China)

Abstract：By the aid of optical engineering software ZEMAX，a five mega pixel mobile phone camera lens matched with one CMOS image sensor of 1.75 μm pixel size was designed，whose FOV is 60°，F number is 2.8，half image height is 2.87 mm，total length is 6 mm and structure is 3P1G. Aspheric plastic was used for the first，third and fourth lenses. Sphere glass was used for the second lens. Transverse aberration of all the FOVs is less than 20 μm，RMS radius are less than Airy disk，and MTFs of most FOVs at half the Nyquist frequency（285 lp/mm）of CMOS are greater than 0.6. This lens assembly has an excellent imaging performance.

Key words：mobile phone lens；ZEMAX；5 mega-pixel camera；MTF；aberration correction

引言

从手机开始配备拍照功能以来，手机摄像头的像素以很快的速度上涨，从最初的10万像素到30万像素、100万像素、200万像素、300万像素、500万像素，再到现在的800万像素，1000万像素。09年6月三星推出了全球首款1200万像素手机Pixon12（M8910）[1]，采用1200万像素CMOS图像传感器及28 mm广角镜头，提供了足以媲美数码相机的拍照等多项功能，可见手机大有将时尚卡片DC取而代之的劲头。不过据调查，虽然像素一直在涨，但是500万以上像素手机由于价格比较高，市场占有率很低，现在200万像素和300万像素仍是摄像手机市场主流，而500万像素的市场增长速度已显著增加。本文在合理选取初始结构的基础上，优化设计了一款500万像素的手机镜头。

1 镜头结构的设计指标

现在市场上，手机镜头的视场在60°左右，F/#约为2.8，由于手机的小型化体积，使得镜头总长有一定限制，一般要小于1 cm，照相物镜的视场角和

收稿日期：2009-08-27； **修回日期**：2009-11-05
基金项目：陕西省重大科技创新项目(2008ZKC01-14)；西北大学研究生科研实验类项目(09YSY14)
作者简介：宋东璠(1986－)，女，陕西大荔人，西北大学光子学与光子技术研究所硕士研究生，主要从事光学设计和固体激光器方面的研究。E-mail：songdf2003@yahoo.com.cn

有效焦距决定了摄入底片或图像传感器的空间范围,镜头所成的半像高 y 可用公式 $y=-f\tan\omega$ 计算,其中 f 为有效焦距,2ω 为视场角。半像高 y 应稍大于图像传感器CCD或CMOS的有效成像面对角线半径,防止CMOS装调偏离光轴而形成暗角[2]。通过计算我们选择Aptina的一款型号为MT9P013的500万像素CMOS,尺寸为0.794 mm(1/3.2英寸),每个感光单元的最小像素尺寸为1.75 μm。对角线长5.68 mm,与像高基本吻合。

像元大小决定了分辨率,它们满足关系 $f=1/2R$,其中 f 为分辨率,R 为像元大小,可以计算得到该CMOS分辨率为285 lp/mm。MTF曲线所围的面积等于像差中心点亮度值,MTF所围的面积越大,表明光学系统所传递的信息量越多,光学系统成像质量越好,图像越清晰[3]。为了获得优秀的成像质量,摄像系统在最大空间频率285 lp/mm处的0.7视场的MTF值应大于0.3,全视场的MTF值应大于0.2。总的设计指标如表1所示。

表1　设计指标

Table 1　Design indexes

视场	60°
F/#	1/2.8
后焦距	0.5 mm
有效焦距	5 mm
光学总长	6 mm
相对照度	>65%
畸变	<2%
像元大小	1.75 μm×1.75 μm

2　设计过程

2.1　初始结构的选择

照相物镜属于大视场大孔径系统,因此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,而是根据要求从手册、资料或专利文献中找出一个和设计要求比较接近的系统作为原始系统。在选择初始结构时,不必一定找到和要求相近的焦距,一般在相对孔径和视场角达到要求时,我们就可以将此初始结构进行整体缩放得到要求的焦距值。

为了保证成像质量,需要校正全部7种初级像差。球面透镜从中心到边缘只有一个恒定的曲率,在设计过程中只有一个设计自由度,如果仅用球面透镜来校正像差,常常需要采用多个透镜组合的复杂结构。非球面透镜镜头中心到边缘曲率连续发生变化,理论上说有无限个设计自由度[4],因此采用非球面可以很好地消除像差。

我们选择了一个3P1G手机镜头的专利作为初始结构,镜头F/# 为2.8,视场角60°,焦距为4.8 mm,将焦距缩放至5 mm,结构如图1所示。这个镜头包括5个镜片,第1、3、4个镜片采用非球面塑料480R,折射率是1.525,第2个镜片采用球面火石玻璃材料SF1,折射率是1.717,第5个为BK7材质的滤光片,滤掉(700～1000)nm的近红外光[5],光圈安装在第1个镜片之前。

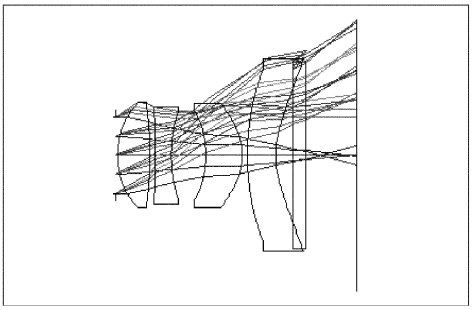

图1　初始结构

Fig. 1　Initial strcture

2.2　ZEMAX 像差校正

利用ZEMAX得到初始结构的MTF曲线如图2所示。可看出成像质量很差,因此需要校正像差。我们将镜头的像差校正分成3个阶段:校正基本像差,校正高级像差,像差平衡。

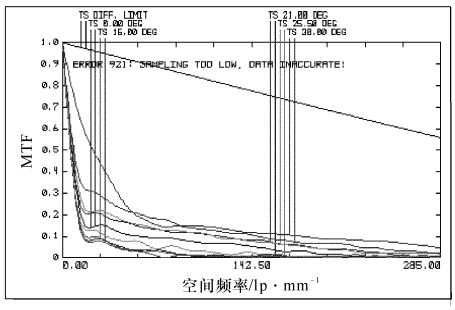

图2　初始结构的MTF曲线

Fig. 2　MTF curves of initial structure at different FOV

2.2.1　基本像差校正

在照相物镜设计中,基本像差一般指全视场和全孔径的像差,选取合适的优化函数用ZEMAX进行优化时还要注意控制镜头长度。

1) 用LONA和SPHA控制轴上点边缘光线的球差。

2) 用LACL控制全视场的垂轴色差。

3) 用DIMX控制光学畸变,如果光学畸变严

重,会使影像扭曲变形。

4) 用操作数TRAY定义全视场的一对上下光线,用SUMM (oprand #1,oprand #2)控制彗差大小。

5) 用FCGS和FCGT分别控制全视场的弧矢弯曲和子午弯曲。

6) 用操作数TOTR将整个镜头长度控制在6 mm以内。

2.2.2　高级像差校正

在完成基本像差校正的基础上,需要全面分析系统像差的校正情况,找出最重要的高级像差,利用上述操作数针对具体的视场控制最重要的高级像差,在校正过程中某些本来不大的高级像差可能会增大起来,这时必须把它们也加入校正,或者在无法同时校正的情况下采取这种方案,使各种高级像差得到兼顾。同时将第4块玻璃的SOLVE类型设置为Substitute进行玻璃优化。

2.2.3　像差平衡

在完成第二校正阶段后,各种高级像差已满足要求,可以用MTF曲线查看成像质量,这时如果各种像差分布不平衡,就会导致成像质量不高,MTF曲线不能达到要求。根据系统在整个视场和整个光束孔径内像差的分布规律,改变各个像差校正的操作数权重,重新进行像差校正和平衡,同时使用操作数MTFT和MTFS对镜头的综合MTF曲线在子午和弧矢方向进行控制,使得奈奎斯特频率处MTF值均高于0.2,在1/2奈奎斯特频率处MTF值高于0.5。

2.3　设计结果

设计结果如图3所示,镜头焦距为5 mm,后焦距为0.494 mm,最大视角为60°,光线经过透镜的最大口径为2.67 mm,半像高2.87 mm,略大于CMOS对角线一半,可以实现与CMOS很好地匹配,镜头总长为6 mm。第1、3、4片镜片为偶次非球面塑料,相对于初始结构,我们将第4片镜片采用折射率为1.525,阿贝常数为55.9的塑料材质480R,更换成折射率为1.543 396,阿贝常数为56的APL5014DP,适当提高折射率可以得到较好的成像质量。

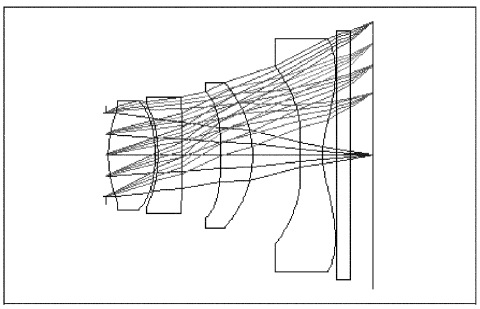

图3　优化后结构

Fig. 3　Optimized structure

我们可以用多种方法来判断像质的好坏,图4从不同方面展示了系统的性能。畸变仅由主光线的光路决定,它只引起像的变形,对像的清晰度并无影响。因此,对于一般的光学系统,只要感觉不出像的变形(光学畸变<3%),这种像差就无妨碍,图4显示了本手机镜头的畸变和场曲。畸变控制在−2%～2%之内,且子午和弧矢场曲都控制在−0.05 mm～0.05 mm之内,像散控制在0～0.015 mm之内。图5给出了球差大小,球差属于过校正,但被控制在−0.02 mm～0.02 mm范围内。手机镜头的相对照度一般随着视场的增大而减小,通常使相对照度大于60%较为理想,如图6所示。从图6相对照度看出,各个视场相对照度都大于65%。

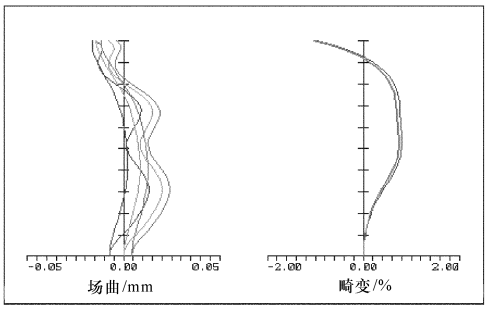

图4　场曲和畸变

Fig. 4　Curvature and distortion of astigmatic field

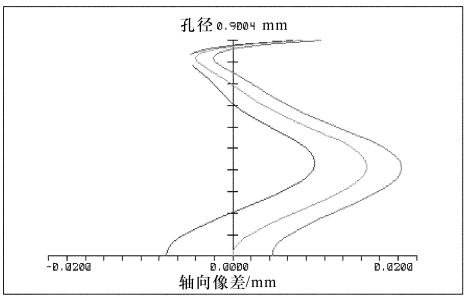

图5　球　差

Fig. 5　Longitudinal spherical aberration

考虑色差的问题,具有高阿贝系数的正透镜1和低阿贝系数的负透镜2组合成分离的消色差透镜,大大消除了色差,如图7和图8所示。从图7和图8看出,位置色差大小为11.6 μm,垂轴色差小于0.5 μm,完全小于一个像素1.75 μm,说明不会使画面色彩变晕。

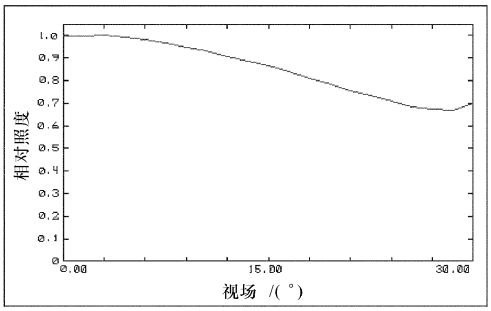

图6　相对照度

Fig. 6　Relative illumination

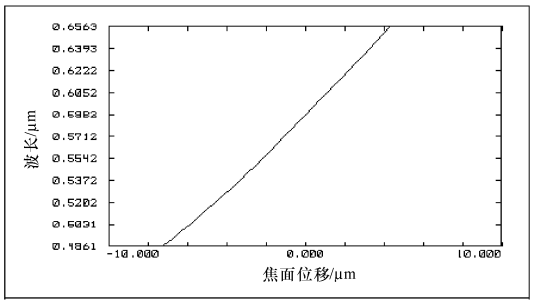

图7　位置色差

Fig. 7　Chromatism of position

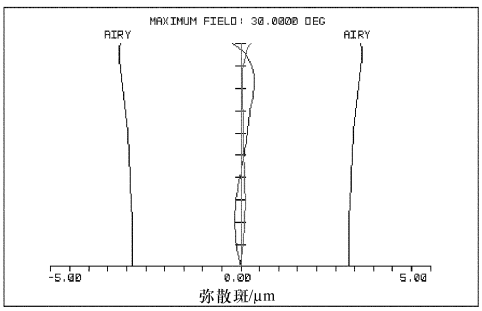

图8　垂轴色差

Fig. 8　Lateral chromatism

图9给出了5个视场:0°,15°,21°,25.5°,30°下的横向像差曲线,前4个视场像差特别小,全视场仅在边缘孔径处出现较大的像差,总体都控制在20 μm之内。从1点发出的许多光线经光学系统后,因像差使其与像面的交点不再集中于同一点,而形成了一个散布在一定范围的弥散图形,即点列图[6]。使用RAM Radius和GEO Radius评价成像质量,RAM Radius均方根半径是弥散斑各个点坐标参考中心点进行坐标平方和后除以点数的量,然后开方的值,这个值的半径可以近似反映弥散质量。然而点列图忽略了衍射效应,在系统像差非常小时,点列图往往比实际效果好一些,这时MTF曲线对像质的评价更准确。弥散斑半径可以准确地反映大像差系统的像差分布大小,如图10所示。从图10可

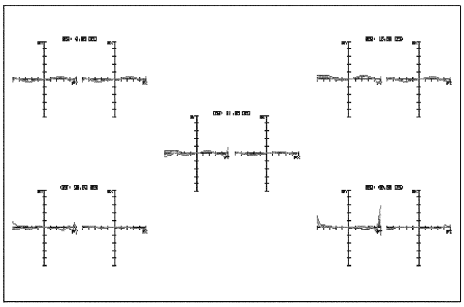

图9　横向像差曲线

Fig. 9　Curves of transverse aberration

以看出,均方根半径都小于艾利斑半径,说明像质很好。

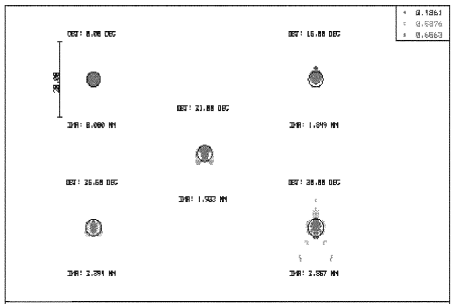

图10　点列图

Fig. 10　Spot diagram

MTF是综合评价光学系统成像过程、特性与像质的标准。当MTF值>0.3时,我们认为像质可以清楚辨认,由于像差不能校正到完美无缺的理想程度,对于普通的摄像物镜,0.7视场以内是比较重要的成像区域,必须确保0.7视场内的成像质量,而0.7视场以外的区域仅是像面一角,其像质的相对重要性可以较低些,如图11所示。从图11看出,中心视场在285 lp/mm时,MTF=0.372 20,在140 lp/mm时,MTF=0.652 40,中心视场MTF值已很接近衍射极限。0.7视场在285 lp/mm时子午MTF=0.279 19,弧矢MTF=0.363 69,在140 lp/mm时子午MTF=0.603 86,弧矢MTF=0.658 41,完全可以获得优质的像质。

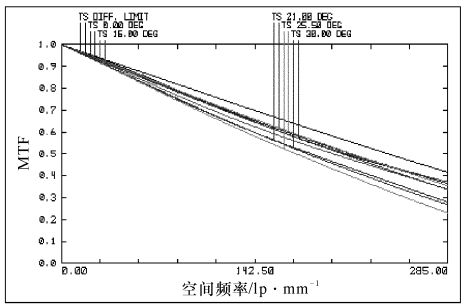

图11　MTF曲线图

Fig. 11　MTF curves at different FOV

3　结论

本文配套一款奈奎斯特频率285 lp/mm 的500万像素CMOS 传感器进行500 万像素手机镜头的设计。采用3 片非球面塑料,1 片球面玻璃透镜和1块BK7 滤光片,在ZEMAX 中使用合适的优化函数和权重对像差进行校正,逐步消除了基本像差、高级像差,并进行了像差平衡,获得了像质较好的500万像素手机镜头,各个视场相对照度达到0.65 以上,MTF 曲线也比较理想,镜头总长为6 mm。该镜头不仅体积小,结构紧凑,而且像质非常好。

参考文献:

[1] 萧萧.三星推出全球首款1200万像素触屏手机Pixon 12[OL]. http://news.mydrivers.com/1/136/136067.htm. 2009-09-16.
XIAO Xiao. Samsung releasing the first wordwide 1200 hundred-pixel phone Pixon 12 with touch screen[OL]. http://news.mydrivers.com/1/136/136067.htm. 2009-09-16. (in Chinese)

[2] 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.
LI Wen-jing. Optical design of 5-mega pixel mobile phone lens[J]. Laser & Optoe Ectronics Progress, 2009, 46(1): 56-59. (in Chinese with an English abstract)

[3] 萧泽新.工程光学设计[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
XIAO Ze-xin. Engineering optical design[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)

[4] 张前平,邓冈锋,曾阳素.照相镜头设计中非球面的应用[J].邵阳学院学报,2008,5(1):70-74.
ZHANG Qian-ping, DENG Gang-feng, ZENG Yang-su. Application of asphere in the design of the camera lens[J]. Journal of Shaoyang University, 2008, 5(1): 70-74. (in Chinese with an English abstract)

[5] 刘茂超,张雷,刘沛沛,等.300万像素手机镜头设计[J].应用光学,2008,29(6):944-948.
LIU Mao-chao, ZHANG Lei, LIU Pei-pei, et al. Design of lens for 3 mega-pixel mobile phone camera[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(6): 944-948. (in Chinese with an English abstract)

[6] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 浙江:浙江大学出版社,2007.
LI Xiao-tong, CEN Zhao-feng. Geometrical optics · aberrations and optical design[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2007. (in Chinese)