

基于 Delano 图的手机镜头光学系统设计

戴付建^{1*}, 张凯元¹, 李闯²

¹舜宇光学科技(集团)有限公司研发部, 浙江 宁波 315400;

²长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 手机镜头朝着高分辨率、大孔径、超薄化的发展方向。根据手机镜头的设计要求,研究了设计要求参量与 Delano 图的相关约束条件和目标函数的转换关系,结合蒙特卡罗-粒子群优化(PSO)混合算法,实现了手机镜头初始结构的快速求解生成。使用所提出的方法设计了一款 5 片式 2000 万高像素的超薄长焦手机镜头,结果表明,在 1/4 奈奎斯特设计频率 125 lp/mm 下,0.8 之内所有视场的调制传递函数(MTF)的值均大于 60%,与采用前期 PWC 法求得的初始结构所设计开发的具有相同规格参数的 6 片式镜头相比,边缘视场的模拟良率提升了近 10%。将所设计的 5 片式 2000 万像素镜头进行加工及 TV line 实拍测试,在中心和 0.8 视场分别得到了 2300 LW/PH 和 1700 LW/PH 的解像能力。设计和加工后的实拍验证结果表明,基于 Delano 图的手机镜头初始结构的求解方法能够明显提高设计效率,且可以得到更高的良品率。

关键词 光学设计;手机镜头;Delano 图;初始结构

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.092203

Optical System Design for Cell Phone Camera Lens Based on Delano Diagram

Dai Fujian^{1*}, Zhang Kaiyuan¹, Li Chuang²

¹Research and Development Department, Sunny Optics Technology (Group) Co., Ltd.,
Ningbo, Zhejiang 315400, China;

²School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun,
Jilin 130022, China

Abstract Nowadays, cell phone lens is developing towards high resolution, large aperture and ultra-thin thickness. According to the design requirement of cell phone lens, we study the relationship between the design parameters and constrain conditions and objective function in Delano diagram. With the Monte Carlo-particle swarm optimization (PSO) hybrid optimization algorithm, the automatic generation of the cell phone lens initial configuration is realized. Taking the proposed method, we design a 5 pieces-twenty million pixels and ultra-thin tele-lens of cell phone. The design results show that the modulation transfer function (MTF) is greater than 60% within 0.8 field of view at the 1/4 Nyquist frequency 125 lp/mm. Compared with the 6 pieces lens with the same design requirement parameters, which is based on PWC method, the yield rate is increased by 10% at the edge of view by the tolerance simulation. By the TV line test of the 5 pieces-twenty million pixels lens after the fabrication, the resolving power of 2300 LW/PH and 1700 LW/PH at the centre and the 0.8 field of view are obtained. The outcome of design, manufacturing and TV line test show that, the solving method of initial configuration for cell phone lens based on Delano diagram can help to improve the design efficiency and get higher yield.

Key words optical design; cell phone lens; Delano diagram; initial configuration

OCIS codes 220.3620; 220.4830; 220.1250

1 引言

自第一款具备拍照功能的手机推出之后,围绕手机镜头的改进设计从未停止,而手机镜头也在市场和消费者的追求与推动下,不断地朝着高分辨率、大孔径、超薄的发展方向。镜头的大孔径和高分辨率在本质上是光学系统拉赫不变量的增大。从设计上来看,所有终端市场的需求推动镜头朝着设计难度增大的方向发展,设计难度体现为更高的调制传递函数(MTF)需求和相同加工公差下更高的良率要求。基于此,本文主要研究 Delano 图在手机镜头初始结构设计中的应用。

1963年,Delano^[1]提出了 Delano 图,用轴上视场通过光瞳边缘的光线在自由空间各个位置处的高度 y ,以及边缘视场通过光轴中心的主光线在空间各个位置处的高度 \bar{y} 作为光学系统一阶量的独立变量,来研究光学系统的其他所有一阶量。由于 Delano 图可以简洁地将其他所有一阶光学参量描述出来,大量的光学设计研究人员研究了其在不同光学系统中的应用;Shack 等^[2-3]研究了 Delano 图的重要特性及其在激光光学系统中的应用;Lopezlopez 等^[4-6]对 Delano 图在其他光学设计中的应用展开了长期研究,其中包括 Delano 图在多层共轭自适应(MCAO)光学系统光路设计中的应用;Zhuang 等^[7]最早对 Delano 图的应用展开了深入研究,他结合 Delano 图和三阶像差理论,成功地实现了三组元照相机镜头和显微镜头的自动生成;Zhang 等^[8-9]对 Delano 图在多种不同类型(有限远共轭、无限远共轭、多子系统拼接、光栅光谱仪系统等)光学系统设计中的应用进行了深入研究,得到了多种常用光学系统的设计要求在 Delano 图中的约束条件式的转换关系,实现了常用光学系统初始结构的自动生成,并运用其进行了多种光学系统的设计。

针对手机镜头使用需求的特殊性而导致设计上的超薄、大孔径、小尺寸等要求,本文研究了 Delano 图在手机镜头设计中的应用,并得到了一般性的更符合手机镜头初始结构求解的 Delano 图求解模型,该模型包含针对手机镜头初始结构求解的目标函数和约束条件。

2 手机镜头的初始结构求解与 Delano 图对应模型

2.1 Delano 图与其他光学一阶量的关系

结合光学系统的拉赫不变量,Delano 图可以将

光学系统中所有其他的一阶量进行简洁的描述,这些一阶量包括组员的光焦度分布、各个组员间距,以及多个组员组合之后系统的焦距等。因此,对于一个已知的 Delano 图,完全可以对其所代表的光学系统进行近轴追迹,从而分析近轴光线在各个光学组员中的特性(入射高度、偏转角度等)。对于任意两个相邻的组员,其轴向光学间隔为

$$d_{i,i+1} = \frac{(\bar{y}_{i+1}, y_{i+1}) \times (\bar{y}_i, y_i)}{Q}, \quad (1)$$

式中: Q 为系统的拉赫不变量。对于任意一个非远心光路中的第 i 个光学组员,其光焦度可以由第 $i-1$ 个、第 i 个、第 $i+1$ 个相邻组员的坐标决定,即:

$$\varphi_i = \frac{Q(k_{i-1,i} - k_{i,i+1})}{(y_i - k_{i-1,i}\bar{y}_i)(y_i - k_{i,i+1}\bar{y}_i)}, \quad (2)$$

式中: $k_{i,i+1} = y_{i+1} - y_i / \bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i$ 。通过(1)~(2)式的关系可知,在 Delano 图中,对任意一个已知物面信息的光学系统,可以通过近轴追踪解得边缘视场主光线和中心视场的边缘光线在空间各个位置上的高度和角度信息。

2.2 手机镜头初始结构设计的 Delano 图模型

一般,无限远物距的光学系统的 Delano 图如图 1 所示, J 为无限远物面, M 为像面, P 为主面, S' 为入瞳位置, S'' 为出瞳位置。对于一般的无限远物距的光学系统来说,需要通过约束 Delano 图中的物面信息及像面信息来约束系统焦距 f' 、视场角(FOV) θ 及入瞳口径 D 的解析。对于入瞳的限制,可以使用 Delano 图中的物面坐标 \bar{y}_J, y_J 进行约束;对于视场角,可以用物面的边缘视场和中心视场的孔径角 \bar{u}_J, u_J 进行约束;对于系统的组合焦距,可以用 Delano 图中的像面坐标信息 \bar{y}_M, y_M 进行约束^[8-10],即:

$$\begin{cases} \bar{y}_J = -\infty \\ y_J = \frac{D}{2} \\ \bar{u}_J = \theta \\ u_J = 0 \\ \bar{y}_M = f' \tan \theta \\ y_M = 0 \end{cases}. \quad (3)$$

在实际设计中,对于手机镜头的大视场角的光学系统^[11-12],除了一般的焦距、视场角和入瞳口径的限制外,还有一些与终端使用特性相关的参数要求,其中最重要的一个限制为总长(TTL)尺寸的限制。在设计终端产品时,会严格限制搭配镜头的高度。在应用 Delano 图进行一阶量及初始结构的求解时,若不考虑 TTL 的限制,可能得到的结构像质及敏

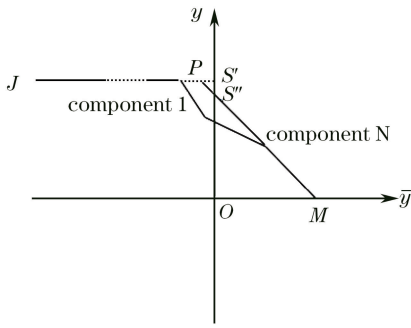


图1 无限远物距共轭系统的 Delano 图

Fig. 1 Delano diagram of infinite distance conjugated system

感度都非常优秀但 TTL 相差较远的初始解。手机镜头一般都使用较高阶的非球面,从一个 TTL 指标相差较远的非球面状态优化到所需要的 TTL 目标值,通常会陷入一个局部最优解而得不到一个较好的全局解。手机镜头的另外一个重要特点,尤其是区别于小视场天文望远镜的特点,是其大的物方视场特性,且像面的弯曲程度随着视场的增加而迅速增大。因此,手机镜头的场曲问题在应用 Delano 图设计阶段应加以考虑,并通过对光焦度的分配来加以严格控制。

综合考虑,建立了针对手机镜头初始结构的一般性的 Delano 图评价函数:

$$O(y_i, \bar{y}_i) = W_1 \sum_{i=1}^N (|u_{i1} - u_{i0}| + |\bar{u}_{i1} - \bar{u}_{i0}|) + W_2 \left| \sum_{i=1}^N \frac{(\bar{y}_{i+1}, y_{i+1}) \times (\bar{y}_i, y_i)}{Q} - l_{\text{TTL}} \right| + W_3 \sum_{i=1}^N \varphi_i, \quad (4)$$

式中: l_{TTL} 为光学系统总长; u 为边缘光线孔径角; \bar{u} 为主光线孔径角; φ 为元件光焦度; N 为系统总的元件数。(4)式中包含了独立的 3 个子部分, W_1 、 W_2 和 W_3 为这 3 部分的权重分配,可在优化中根据这 3 部分的贡献大小适当调整。 $\sum_{i=1}^N (|u_{i1} - u_{i0}| + |\bar{u}_{i1} - \bar{u}_{i0}|)$ 控制了主光线和边缘光线在各个面的偏转角度,进而可以控制各个面的低阶像差的贡献量,在一定程度上可以降低系统在初始阶段像差平衡的难度和降低系统的敏感程度,提高系统的可加工性^[13]。系统敏感性的控制是一个较为复杂的工作,此方法在设计初始阶段可以在一定程度上控制系统的敏感性,在后期的优化中,还有多种方法可用以优化控制^[14-16]。评价函数第 2 个子部分

$$\left| \sum_{i=1}^N \frac{(\bar{y}_{i+1}, y_{i+1}) \times (\bar{y}_i, y_i)}{Q} - l_{\text{TTL}} \right|$$

为 Delano 图对

应系统的实际总长与目标总长的加权差值,通过控制此部分的目标函数的贡献率,可以有效地控制系统总长接近设计的目标总长。第 3 部分 $\sum_{i=1}^N \varphi_i$ 为初始阶段通过光焦度分布来控制的场曲。上述 3 部分的权重可以根据实际结构的需要来调节,使初始设计阶段可在系统的紧凑性和像质感度之间做出平衡。

通过优化(4)式所示的目标函数,以(3)式为约束条件,便可以得到一组满足焦距、入瞳口径及视场的一阶量解,并且各组员像差贡献率尽可能的小,从而可以得到设计总长与目标 TTL 在最大程度上接近初始要求且场曲经过初始阶段控制的一组解。与 Zhang 等^[8-9]前期的模型原理一样,通过优化 Delano 图,将手机镜头初始结构的求解转化为一个 Delano 图的有约束的优化问题,所不同的是根据手机镜头的实际要求对模型的目标函数进行了修正,使所得初始结构满足终端客户要求的设计参数,这样可以有效降低后期的优化工作量和提升系统的设计效率。

对于(4)式所示的多维空间的优化问题,为了在优化中找到更优秀的解,设计者应该设法避免陷入局部极值。对于局部极值的跳出及全局最优值的搜索,一种途径是使用全局优化算法,如遗传算法、退火算法及光学设计中使用较多的鞍形搜索法;另外一种途径是使用混合优化算法。对于一个优化问题,可以切换使用多种优化算法,一种优化算法到达一个局部最优值后更换为其他优化算法。由于搜索路径的差异性,会找到新的误差函数下降的方向,进而跳出局部最优值。

本研究采用蒙特卡罗和粒子群优化(PSO)算法结合的混合优化算法。对于优化的问题,首先生成 10000 组初始随机解,再通过蒙特卡罗优化算法迭代 50 次标记出前 20 组最优解,再将这 20 组最优解作为 PSO 的优化起点,再通过 PSO 多次迭代到变化目标函数变化值小于阈值(阈值 $T=0.00001$)作为最终的输出解。

3 基于 Delano 图的超薄长焦手机镜头设计实例

3.1 初始结构的生成及最终设计结果

双摄像头的工作模式主要有 3 种:一种为广角+广角模式,用来实现测距及背景虚化;一种为广角+长焦模式,通过图像融合来实现变焦功能;另一

种为红绿蓝(RGB)广角+单色广角,主要来实现低照度下暗光补偿及信噪比的提升。本小节所设计的镜头为终端双摄模组所需要的一颗5片式2000万像素的长焦镜头,其主要的参数为:焦距 $f' = 5.676 \text{ mm}$;入瞳口径 $D = 2.02 \text{ mm}$;半视场角 $\theta = 30^\circ$;光学总长 $l_{\text{TTL}} < 5.3 \text{ mm}$;与芯片的CRA(chief ray angle)匹配到 2° 之内,像元尺寸 $1 \mu\text{m}$ 。

以(4)式为目标函数,在(3)式的约束下,在MATLAB中编写并调用蒙特卡罗-PSO混合优化算法,可以得到5片式长焦镜头初始结构的Delano图坐标及其他一阶量,如表1所示。

表1 5片式2000万像素长焦镜头初始结构的Delano图坐标及其他一阶量

Table 1 Delano diagram coordinate of initial configuration of telephoto lens with 5 pieces-twenty million pixels and other first-order parameters

Parameter	\bar{y}/mm	y/mm	Focal length /mm	Thickness /mm
Object plane	$-\infty$	1.01	0	$+\infty$
Component 1	0	1.01	7.71	1.18
Component 2	0.68	0.86	12.70	1.71
Component 3	1.58	0.52	-37.11	0.62
Component 4	1.94	0.40	-30.49	1.35
Component 5	2.79	0.17	28.16	0.95
Image plane	3.29	0	0	0

在得到表1所示的光学系统的一阶量之后,通过该组初始解进一步用CODE V实现镜片实体非球面化的初始结构,如图2(a)所示。在图2(b)中可以看到初始结构各个视场点图的均方根(RMS)基本集中在2个像素之内。在图2(c)中可以看到各个表面的初级像差贡献较低,说明其有较好的感度和优化潜力。在图2(d)所示的包围圆能量图中,各个视场的表现比较接近,说明各个视场的等晕性较好(F_n 表示第 n 个视场取样点)。

通过图2(a)可以知道,第一个组员的边厚和第二个组员的中心厚度,对于目前的加工能力来说近乎极限,因此需要进一步调整才可以得到最终可以加工生产的结构。通过对图2(a)中的结构进行进一步优化,以及对高阶非球面参数设计自由度的进一步释放,各个视场的像质及敏感性得到了进一步平衡。为了进一步提升光学系统的性能和感度,在优化的最后阶段,将设计的非球面型切换为Q-con型^[17-21],得到了最终的设计结果,如图3所示。

图3(a)所示为最终结构的光路图,可以看到各个元件的非球面度都得到了合理的控制,能够有效地保

证其可加工性和生产的敏感性。图3(b)为设计的光学系统的畸变图,可以看到畸变被合理地控制在1%以内,符合目前主流终端的软件调试对畸变的要求。图3(c)为各个视场在考核频率下传递函数的分布,从分布曲线可以知道从内视场到外视场传递函数的过度较为平滑,在125 lp/mm的考核频率下,0.8之内所有视场的MTF值均大于60%。此外,不同视场的差异较小,说明系统的等晕性较好。系统良好的等晕性来自于初始结构的合理的像差贡献率,将系统的像差合理地平衡分担在各表面上。

图4为5片式长焦手机镜头Delano图的初始解和应用初始解得到的最终可加工的光学方案的Delano图,可以看到两条曲线的像面和第一个光学组员都满足由(3)式确定的约束关系。(3)式的约束保证了系统的组合光焦度、入瞳大小及视场角都符合设计要求,这两个约束条件所做的约束在光学设计中属于硬边界条件,在设计中是不允许改变的。应用所研究的手机镜头初始结构生成的方法,已经开发并量产了多款包含长焦、大孔径和广角的主流手机镜头产品。该方法所研究的约束和目标函数的合理性,保证了初始解的主要参数(焦距、 F 数、TTL、视场等)与目标值一致。

3.2 公差分配及最终镜头的实拍结果

在完成如图3(a)的设计之后,需要在CODE V中进行多次公差分配尝试来确定合理的成型和装配精度,使光学系统在满足解像能力的前提下,尽量以宽松的装配精度进行装配。在公差分配的尝试阶段,主要考虑的误差源为实际面形与理论面形之差的峰谷值(PV)、塑料非球面成型的面偏心误差以及元件厚度误差源。在公差分配的开始阶段对各个元件施加相同的公差量,然后通过多次模拟,在加工能力范围内将敏感面的公差逐步收紧,将不敏感元件的公差逐步放宽,这样可以获得较低的装配成本和较高的良率。在模拟中,以1/4奈奎斯特频率(125 lp/mm)为考核判据,在系统引入不同的失调和面型误差源之后,考核视场(0、0.6FOV、0.8FOV)的MTF均大于当前主流的2000万像素手机镜头的考核规格(0.65,0.5,0.4),经过多轮调整可以得到最终的公差分配,如表2所示。

在表2所示的公差分配下,在CODE V中经过良率模拟可以得到如图5(a)所示的良率分布。对应考核视场(0、0.6FOV、0.8FOV)的考核值为(0.65,0.5,0.4),进而可以知道轴上视场的良率在

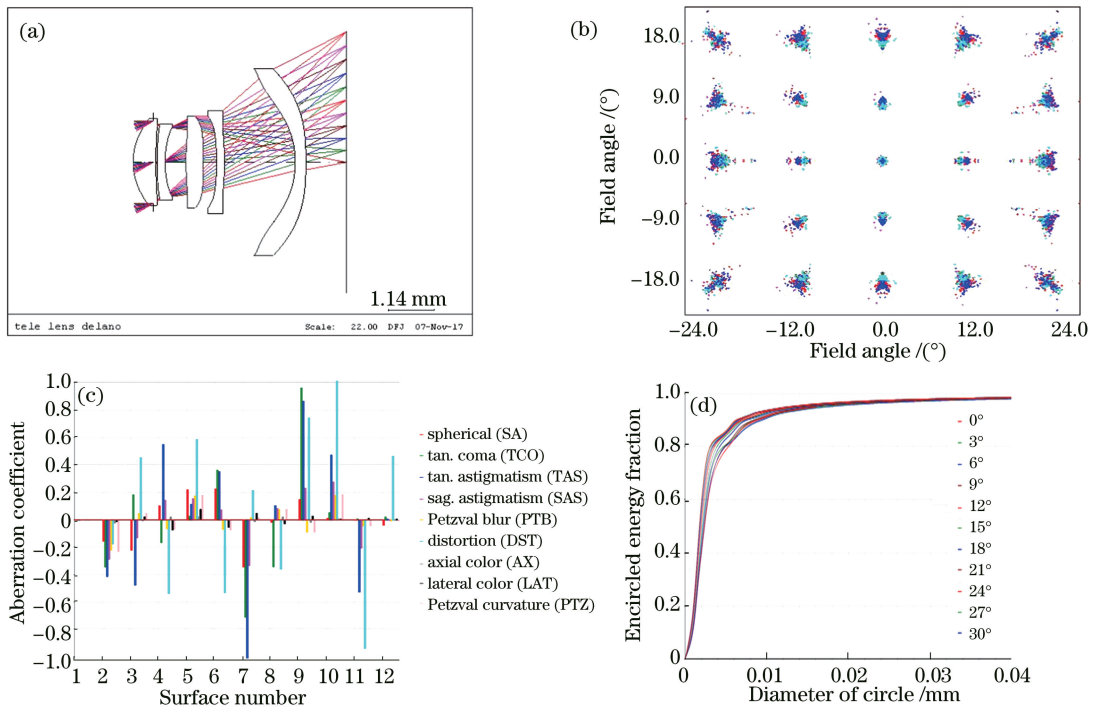


图2 应用表1中数据得到的5片式2000万像素镜头的初始结构。(a)初始结构的光路图;(b)点列图;(c)初级像差分布图;(d)包围圆能量图

Fig. 2 Initial configuration of 5 pieces-twenty million pixels cell phone lens substantiated from the table 1.

(a) Optical layout of initial configuration; (b) spot diagram; (c) distribution diagram of first-order aberration; (d) encircled energy distribution diagram

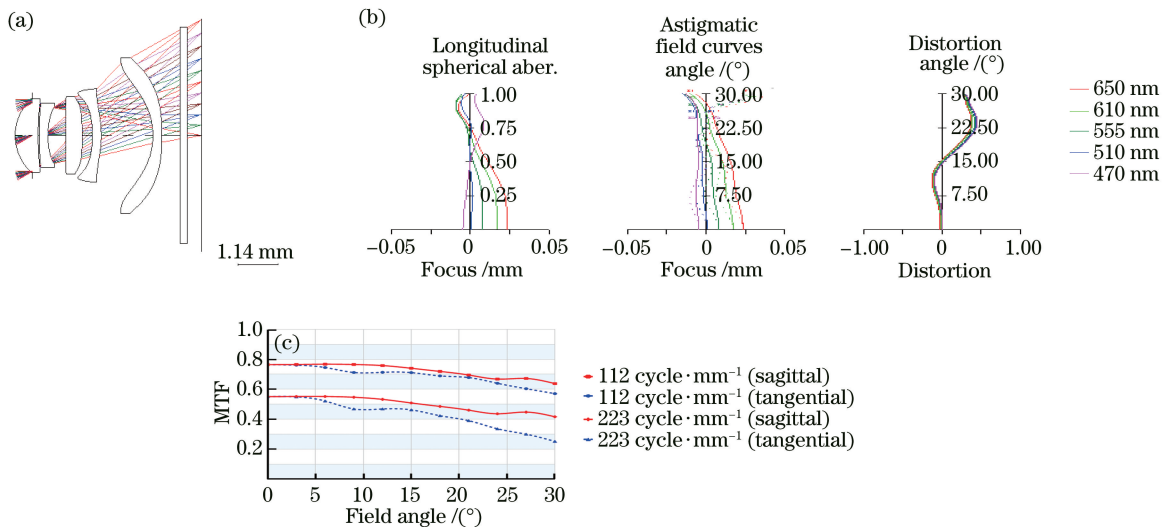


图3 5片式2000万像素手机镜头的最终设计方案。(a)最终方案的光路;(b)最终方案的轴向球差、场曲和畸变;(c)1/4奈奎斯特频率和1/2奈奎斯特频率的MTF

Fig. 3 Final configuration of the 5 pieces-twenty million pixels cell phone lens. (a) Optical layout of final configuration;

(b) longitudinal spherical aberration, field curves and distortion of final configuration; (c) MTF performance at 1/4 Nyquist frequency and 1/2 Nyquist frequency

90%以上,而0.6FOV和0.8FOV的良率分别在80%和75%之上。因此,各视场的综合良率在55%

左右。图5(b)为前期用PWC法求得初始结构而开发的相同设计规格镜头的良率模拟。对两者进行对

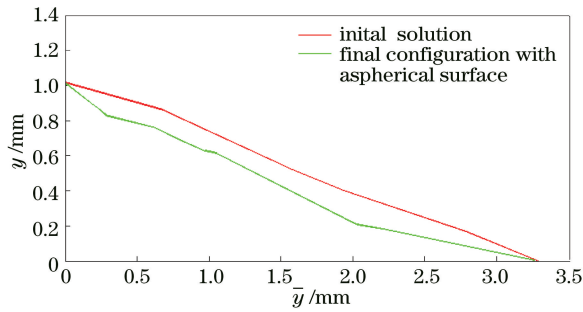


图4 5片式2000万像素手机镜头Delano图初始解和非球面化后的对比

Fig. 4 Initial solution and final configuration with aspherical surface of Delano diagram for 5 pieces-twenty million pixels cell phone lens

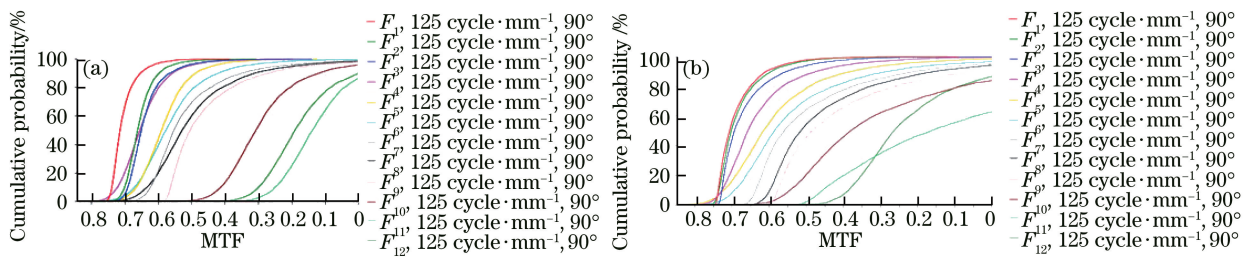


图5 (a) 5片式2000万像素手机镜头良率模拟; (b) 6片式2000万像素手机镜头良率模拟

Fig. 5 (a) Simulation of the yield rate of 5 pieces-twenty million pixels cell phone lens; (b) simulation of the yield rate of 6 pieces-twenty million pixels cell phone lens

对于一个光学系统来说,光线在各个表面的偏转角度在很大程度上决定了初级像差的贡献率,也决定了光学系统各个组员的敏感程度。对于系统中的任一光学表面而言,若球差和慧差等与孔径相关性较强的像差的贡献率较大,则系统存在偏心失调时,该表面因失调误差而引入的像差会更强烈,进而使得像质退化更明显,对实际生产中良率的影响将更加明显。因此在建立的求解初始结构的模型中,将各个面的偏转角度进行了量化约束,以便在求解初始结构的阶段就可以对良率等进行控制。图6对比了应用所提模型求解的结构和传统PWC法求解结构边缘视场的主光线在各个表面的偏转角度。通过对比可以知道,所提模型求解的结构各光学表面上光线的偏转角度明显优于传统PWC法求解的结构,这也是图5中所提方法求解的结构在良率上优于传统方法的原因。

综述,通过所提模型生成的手机初始结构得到的最终光学系统有良好的感度分布。在实际生产中,通过面型调试工艺的优化和组立工艺的调整,可以使实际生产的良率稳定在78%左右。随机抽取实际组立后通过MTF考核的镜头进行TV line的

表2 5片式2000万像素手机镜头光学结构的公差分配
Table 2 Distribution of tolerance parameters of 5 pieces-twenty million pixels cell phone optical configuration

Parameter	Surface	Decenter	Thickness
	error / μm	error / μm	error / μm
Component 1	0.40	0.80	1.00
Component 2	0.40	0.80	1.00
Component 3	0.30	1.00	1.25
Component 4	0.60	1.00	1.25
Component 5	1.20	1.25	2.00

比分析后可知,与更多设计自由度的6片式结构相比,运用本研究方法生成的5片式结构的良率感度较高,在保持内视场水平相当的情况下,外视场0.8 FOV的良率约提升了10%。

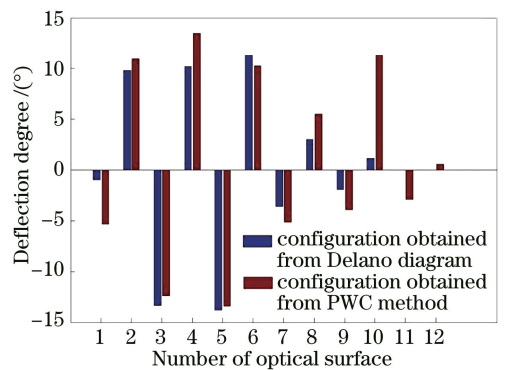


图6 边缘视场主光线在元件各表面的偏转角度
Fig. 6 Deflection angle of chief ray in each optical surface at the edge of view

实拍测试,结果如图7所示,使用的TV line标板是ISO 12233的4X增强型标板。在中心视场上,设计的手机镜头的解像能力达到了2300 LW/PH,在边缘视场上,解像能力达到1700 LW/PH。

4 结论

针对当前手机镜头大视场、大孔径、超薄化的设计需求,研究了基于Delano图的手机镜头初始结构求解模型。将设计要求参数转化为Delano图中对

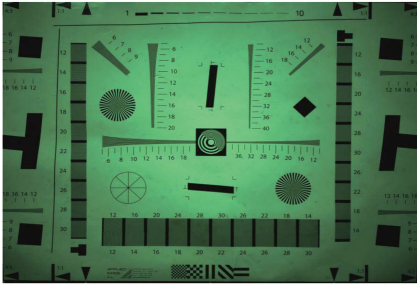


图7 5片式2000万像素手机镜头TV line照片

Fig. 7 Picture of TV line for the 5 pieces-twenty million pixels cell phone lens

应的约束边界条件及目标函数,提出了针对手机镜头的一般性模型,该模型可以高效地求解并生成所需要的手机镜头初始结构。通过使用混合优化算法可以在较大程度上避免陷入局部极值,从而可以以更大的概率找到全局最优解。使用提出的 Delano 图模型设计了一款超薄型长焦手机镜头(2000 万像素),该镜头具有良好的感度和像质,中心视场实拍得到了 2300 LW/PH 的解像能力,边缘得到了 1700 LW/PH 的解像能力。实际产品的设计和加工生产表明,在手机镜头的设计中,尤其是在大像面超薄型手机镜头的设计中,提出的 Delano 图模型具有很明显的优势,表现为求解的高效性及实际产品生产的高良率和高成像品质。

参 考 文 献

- [1] Delano E. First-order design and the y, \bar{y} diagram [J]. *Applied Optics*, 1963, 2(12): 1251-1256.
- [2] Shack R V. Analytic system design with pencil and ruler—the advantages of the $y-\bar{y}$ diagram [J]. *Proceedings of SPIE*, 1974, 39: 127-141.
- [3] Kessler D, Shack R V. y, \bar{y} diagram, a powerful optical design method for laser systems[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(15): 2692-2707.
- [4] Lopezlopez F J. The application of the Delano y, \bar{y} diagram to optical design [D]. Tucson: The University of Arizona, 1973.
- [5] Bauman B J. Optical design for extremely large telescope adaptive optics system[D]. Tucson: The University of Arizona, 2002.
- [6] Melbur E. First-order optical design on the Tektronics 4051 graphics calculator by means of the $y-\bar{y}$ diagram [D]. Tucson: The University of the Arizona, 1977.
- [7] Zhuang S L, Zheng Q, Yu F T S. Automatic generation of prototype lenses [J]. *Optics Letters*,

1982, 7(12): 581-583.

- [8] Zhang K Y, Yuan X Y, Cui X Q. Automatic generation of optical initial configuration based on Delano diagram [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, 16(1): 59-66.
- [9] Zhang K Y. The study of optical design based on Delano diagram and antarctic near infrared telescope [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2016. 张凯元. 基于 Delano 图方法的光学设计及南极近红外巡天望远镜的研究[D]. 南京:中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 2016.
- [10] Bentley J, Olson C. Field guide to lens design[M]. [S. l.]: SPIE, 2012.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Deng P H, Lin F. Method of tolerance sensitivity reduction of optical design [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(11): 112202. 邓桦湖, 林峰. 光学设计中降低公差灵敏度的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(11): 112202.
- [14] Isshiki M, Douglas S, Seiichi K. Lens design, global optimization of both performance and tolerance sensitivity[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6342: 63420N.
- [15] Kim J W, Ryu J M, Kim Y J. Tolerance analysis and compensation method using Zernike polynomial coefficients of omni-directional and fisheye varifocal lens[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2014, 18(6): 720-731.
- [16] Rogers J R. Using global synthesis to find tolerance-insensitive design forms [J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6342: 634220M-2.
- [17] Li C, Xue C X, Yang H F, *et al.* Optical system design of electronic endoscope objective with Q-type aspheres [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 062200. 李闯, 薛常喜, 杨红芳, 等. 基于 Q-type 非球面的电

- 子内窥镜物镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 062200.
- [18] Zhou X D, Bai J. Small distortion panoramic annular lens design with Q-type aspheres [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0722003.
周向东, 白剑. Q-type 非球面小畸变全景环带光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0722003.
- [19] Forbes G W. Manufacturability estimates for optical aspheres[J]. Optics Express, 2011, 19(10): 9923-9941.
- [20] Ma B, Sharma K, Thompson K P, *et al.* Mobile device camera design with Q-type polynomials to achieve higher production yield[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 17454-17463.
- [21] Ma B, Li L, Thompson K P, *et al.* Applying slope constrained Q-type aspheres to develop higher performance lenses [J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21174-21179.