

文章编号: 1001-3806(2016)04-0500-06

手机镜头的光学系统设计及杂散光模拟

豆修浔^{1,2}, 朱佳巍², 丁桂林^{1*}

(1. 江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013; 2. 众盈光学有限公司, 中山 528441)

摘要: 为了满足现代手机镜头对高像素、小型化以及无杂散光的要求, 采用光学塑料非球面技术以及蒙特卡洛光线追迹法, 使用 CODEV 光学设计软件, 设计了1款三单元 5×10^6 像素的手机镜头。同时, 运用 LightTools 光学分析软件进行杂散光分析。结果表明, 该镜头的 F 数为 2.6, 全视场角为 72.9° , 系统总长为 3.1mm。最终组装产品的性能测试结果能满足设计要求, 且无可接受的杂散光。

关键词: 光学设计; 手机镜头; 光线追迹; 杂散光

中图分类号: TN202 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.04.010

Design of optical system of mobile phone lens and simulation of stray light

DOU Xiuxun^{1,2}, ZHU Jiawei², DING Guilin¹

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Zenith Optical Co. LTD., Zhongshan 528441, China)

Abstract: In order to meet the demand for high pixels, miniaturization and without stray light of a modern mobile phone lens, a three-unit 5×10^6 pixel optical system based on CODEV software was designed by optical plastic aspherical technology and Monte Carlo ray tracing method. Stray light was analyzed based on LightTools software. After theoretical analysis and experimental verification, the results show that the F number of lens is 2.6, the full field of view angle is 72.9° , the total length of system is 3.1mm. Performance test results of the final assembled products meet design requirements and have no unacceptable stray light.

Key words: optical design; mobile phone lens; ray tracing; stray light

引言

随着手机在现代生活中应用越来越广泛的趋势, 人们对手机的需求不仅是像素的提高, 还有手机镜头的尺寸, 要求做到更精小。现在手机镜头的镜片数从1片~6片不等, 根据像素的高低等而定, 一般1片~3片主要用于低端模组。本文中在理论分析和软件模拟的基础上^[1], 设计了1款三单元^[2] 5×10^6 像素手机镜头光学系统, 设计中采用非球面元件, 对像差校正有显著作用^[3]。

在现在光学手机镜头评测中, 除了对手机镜头的性能测试, 杂散光的测试也是一个非常重要的环节。对于手机镜头成像光学系统, 主要是可见光产生的杂散光, 是光学系统中非正常传输光的总称, 产生于漏光、透光光学表面的残余反射和镜筒内壁等非光学表面的残余反射, 以及由于光学表面质量问题产生的杂

散光^[4]。光学系统成像过程中, 若存在杂散光, 会引起图像的对比度和信噪比降低、清晰度变坏、颜色失真、限制高动态范围成像^[5-6], 因此, 对手机镜头成像系统的杂散光分析及控制非常重要。

1 手机镜头的光学系统设计

1.1 设计要点

本设计中所匹配的芯片为 Omnivision 公司生产的 OV5670 芯片, 其每个像素单元大小为 $1.12 \mu\text{m} \times$

Table 1 Main specifications of 5×10^6 pixel mobile lens

items	specification
effective focal length	3.0mm ~ 4.0mm
field of view	> 62°
F	2.6
distortion	< 2.5%
design spectrum	435nm ~ 656nm
relative illumination	> 40%
working distance	∞
optical total length	< 4.2mm
lens structure	4 pieces aspheric optics
sensor	OV5670/1. $12 \mu\text{m} \times 1.12 \mu\text{m}$

作者简介: 豆修浔(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事手机镜头光学系统设计及杂散光模拟方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: 643130017@qq.com

收稿日期: 2015-04-20; 收到修改稿日期: 2015-05-24

1. 12μm, 其有效阵列像素尺寸为 2595 × 1944, 成像区域大小为 2906μm × 2177μm。经计算对角线长度为 3.631mm。

5 × 10⁶ 像素的手机镜头光学设计的主要设计指标如表 1 所示。

1.2 设计结果评价

设计的光学系统如图 1 所示。

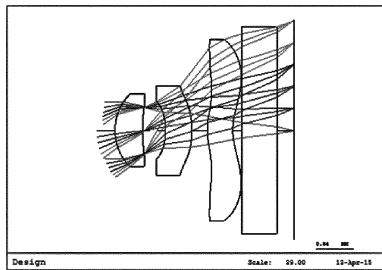


Fig. 1 Structure of lens assembly after optimization

该光学系统中使用到的非球面公式见下:

$$Z = X^2 / [R + \sqrt{R^2 - (1 - K)X^2}] +$$

Table 3 Asphere coefficients for initial structure

surface	1	2	4	5	6	7
K	0.149943	11.49728	-11.864969	1.949181	-8.936431	-5.094905
A ₄	-0.0475869	-0.0760495	-1.21495	-0.687423	-0.415060	-0.255292
A ₆	0.542253	0.733645	-0.7235	2.3419	0.28449	0.147717
A ₈	-3.14652	-0.138731 × 10 ²	0.234053 × 10 ²	-4.97549	-0.0413227	-0.0700419
A ₁₀	6.8952	0.830928 × 10 ²	-0.156237 × 10 ³	6.29106	-0.0211363	0.0163356
A ₁₂	6.72152	0.108913 × 10 ²	0.277846 × 10 ³	2.77861	0.438796 × 10 ⁻²	0.178799 × 10 ⁻⁴
A ₁₄	-0.553884 × 10 ²	-0.241976 × 10 ⁴	0.6195 × 10 ³	-0.144196 × 10 ²	0.133457 × 10 ⁻²	-0.377365 × 10 ⁻³
A ₁₆	0.606926 × 10 ²	0.728235 × 10 ⁴	-0.254402 × 10 ⁴	9.98786	-0.297687 × 10 ⁻³	-0.557236 × 10 ⁻⁴

该光学系统的总长为 3.1 mm, 焦距为 2.5261 mm, 视场角为 72.9°, 在设计指标要求内。

场曲和畸变如图 2 所示。场曲反应了整个光学系统像面弯曲的情况, 从图 2 中可知, 场曲校正 0.007396 mm 内, 边缘视场畸变为 1.8%, 在设计指标要求内。

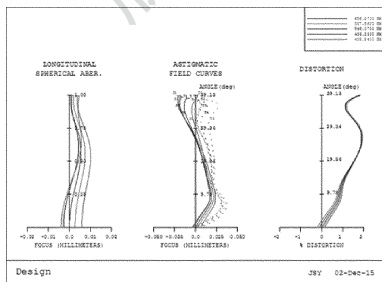


Fig. 2 Field curvature and distortion

系统调制传递函数^[7] (modulation transfer function, MTF) 是表示各种不同频率的正弦强度分布函数经过光学系统成像后, 其对比度 (即振幅) 的衰减程度。对于摄像系统来说其 MTF 阈值为 0.1^[8]。本文中使用的芯片对应的奈奎斯特频率为 1/(2pixel) =

$$A_4 X^4 + A_6 X^6 + \dots \quad (1)$$

式中, Z 为相应的垂直距离, X 为离非球面的轴的径向距离, R 为顶点曲率, K 为二次常数, A_n 为多项式系数。

该光学系统的具体结构参量表以及非球面系数表如表 2 和表 3 所示。

Table 2 Parameters of system structure

surface	type	radius/mm	thickness/mm	glass	semi-aperture/mm
object	sphere	∞	∞		0
1	asphere	0.8935	0.4769	A5514-2	0.6241
2	asphere	2.8714	0.0399		0.4208
stop	sphere	∞	0.3590		0.4021
4	asphere	-1.1418	0.4529	P-CARBO	0.4973
5	asphere	-1.8303	0.2671		0.7748
6	asphere	1.0483	0.4392	Z-E48R	1.4208
7	asphere	0.9833	0.1550		1.5716
8	sphere	∞	0.6100	BK7-SCHO	1.6689
9	sphere	∞	0.3000		1.7941
image	sphere	∞	0		1.9062

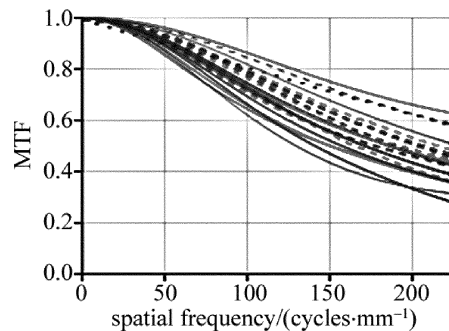


Fig. 3 MTF curves at 1/2 Nyquist frequency

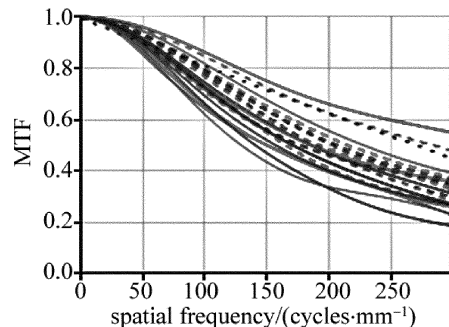


Fig. 4 MTF curves at 3/4 Nyquist frequency

447cycles/mm。如图3所示,横坐标代表1/2奈奎斯特频率值,纵坐标代表MTF阈值。在1/2奈奎斯特频率223cycles/mm处所有视场均大于0.3,如图4所示,横坐标代表3/4奈奎斯特频率值,纵坐标代表其阈值,在3/4奈奎斯特频率298cycles/mm处,所有视场均大于0.2,满足该系统的MTF阈值^[9-10]。

1.3 公差分析

对设计的光学系统进行公差分析,主要分析了开发的可行性,并为实际加工过程提供方向,有助于生产出高品质的产品。公差分析中主要针对半径、厚度、透过偏心以及系统倾斜等敏感度进行分析,在CODEV的公差和补偿编辑器中,插入默认公差,再对应实际的加工进行适当的公差值修改设定,其镜头设置如表4所示。

Table 4 Setting table of tolerance parameters

tolerance					
No.	type	value	No.	type	value
1	DLR S1	0.001V	23	TRX S2	0.0015V
2	DLR S2	0.001V	24	BTY S2..3	0.0015V
3	DLR S4	0.001V	25	BTX S2..3	0.001V
4	DLR S5	0.001V	26	DSY S2..3	0.001V
5	DLR S6	0.001V	27	DSX S2..3	0.002V
6	DLT S1	0.001V	28	TRY S4	0.002V
7	DLT S2	0.005V	29	TRX S4	0.0015V
8	DLT S3	0.005V	30	BTY S4..5	0.0015V
9	DLT S4	0.005V	31	BTX S4..5	0.001V
10	DLT S5	0.005V	32	DSY S4..5	0.001V
11	DLT S6	0.005V	33	DSX S4..5	0.002V
12	DLT S7	0.005V	34	TRY S6	0.002V
13	DLT S8	0.005V	35	TRX S6	0.0015V
14	DLN S2	0.005V	36	BTY S6..7	0.0015V
15	DLN S4	0.0003V	37	BTX S6..7	0.001V
16	DLN S6	0.0003V	38	DSY S6..7	0.001V
17	DLN S8	0.0003V	39	DSX S6..7	0.002V
18	DLV S2	0.0003V	40	TRY S8	0.002V
19	DLV S4	0.0003V	41	TRX S8	0.0015V
20	DLV S6	0.0003V	42	BTY S8..9	0.0015V
21	DLV S8	0.0003V	43	BTX S8..9	0.001V
22	TRY S2	0.0003V			

在软件默认命令中,S1~S8为光学系统中的光学面,DLR为半径增量;DLT为厚度增量;DLN为折射率增量;DLV为阿贝系数增量;TRX,TRY分别为x,y方向总体指示偏差量;BTX,BTY分别为x,y方向的镜筒弧度倾斜量;DSX,DSY分别为x,y方向的总体位移偏差量。

公差分析采用MTF进行分析,输入所需计算的MTF频率数值以及相位方向,其公差分析曲线如图5

所示,图中F₁~F₅表示根据视场角的大小进行分化的5个视场。由图可知,在1/4奈奎斯特频率即90cycles/mm下,最外视场的MTF值均可达到0.5以上;最大视场角的0.7倍视场的MTF值均可达到0.6以上,符合设计要求。

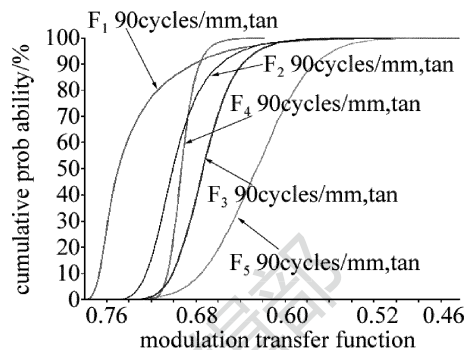


Fig. 5 Tolerance analysis

2 手机镜头的杂散光模拟

杂散光产生的原因很多,其表现形式也比较多样化,目前,对杂散光的测试或描述都还没有一个标准,比较难以量化。目前杂散光问题的研究主要有:杂散辐射理论、系统杂散光测试以及杂散光软件分析等^[11]。手机镜头杂散光分析中,一般主要考虑光学系统漏光、成像光学元件的透射面反射以及非成像元件的反射等。20世纪70年代以来,分析计算杂散光的方法就相继被开发,主要有蒙特卡洛法、区域法、光线追迹法、光线密度法以及近轴近似法等。其中,蒙特卡洛法是唯一相对成熟的方法^[12]。

根据本文中所设计的三单元结构的光学系统,模拟分析其整体镜头结构的杂散光。其成像视场角为70°,在这个系统中,可能会存在漏光、非光学元件反射以及光学元件投射面的反射。

杂散光分析可通过软件模拟进行分析。应用成像软件可以进行鬼影分析,如:ZEMAX, CODEV;照明软件也可以进行实际光线模拟,进行杂光分析,如:LightTools, ASAP等。本试验中使用LightTools进行杂光模拟分析以及结构优化。

本文中主要运用LightTools光学软件^[13]对手机镜头的光学系统进行杂光模拟仿真。LightTools属于一款光学建模软件,它可自带建模功能,比较灵活形象地分析光学系统,对比较复杂的实体模型,还可以与SolidWorks 3D建模软件结合运用。

下面是杂散光的分析实例。进行分析之前,需要建立完整的光-机系统的LightTools模型,先对镜头基本形状,包括镜筒、镜片等建立机械模型^[14],再定义机械元件的表面属性。3-D模型需要在SolidWorks中建

立,再导入到 LightTools 中进行表面属性定义。模拟中光源采用面平行光,接收器建立在焦平面位置。

在进行软件模拟之前,根据光学系统设定的分光束限制(视场、孔径、渐晕)的位置、大小以及长短,在手机镜头结构设计中,会在相应光阑孔径处增加挡光部件,模拟中需要进一步优化挡光部件的结构。

LightTools 中建立的光-机系统模型 2-D 示意图如图 6 所示。

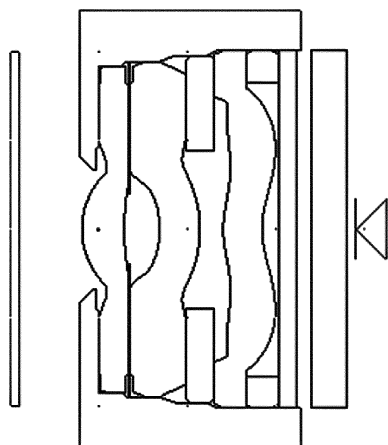


Fig. 6 2-D optical machine model of three-unit mobile phone lens

假定光学系统中各表面均未镀膜,反射率设定为 7%,忽略吸收损耗,透射率为 93%。除光学元件外其余部品面平行光的光通量设定为 1lm,本文中分析的 光学系统成像视场角为 70°,杂散光分析模拟主要针对 外视场光线,因此设定平行光入射角为 36°。

从模拟结果可见,挡光部件 1 的端面会引起很强的 反射杂散光,因此对挡光部件 1 进行结构优化,将其 斜面设定为一定角度的斜面,可以大大减轻该面上的 光线反射。但更多的光线可以越过挡光部件 1,在挡 光部件 2 的端面形成反射杂散光,因此,挡光部件的端 面也要同样设定为具有一定角度的斜面。挡光部件端 面反射引起的杂散光光线路径示意图如图 7 所示。

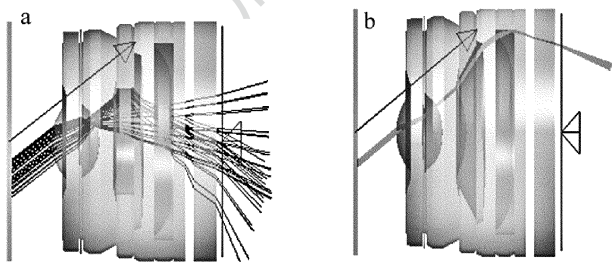


Fig. 7 a—stray light path caused by the blocking component 1 b—stray light path caused by the blocking component 2

优化后的光-机系统模型 2-D 示意图以及光线路径示意图如图 8 所示。

除了挡光部件的反射外,还有光学元件的透射面 存在表面反射,如图 9 所示。

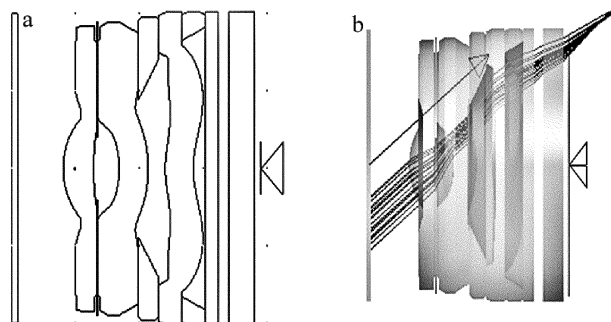


Fig. 8 a—schematic diagram of the optimized 2-D optical model system b—light path of the optimized system

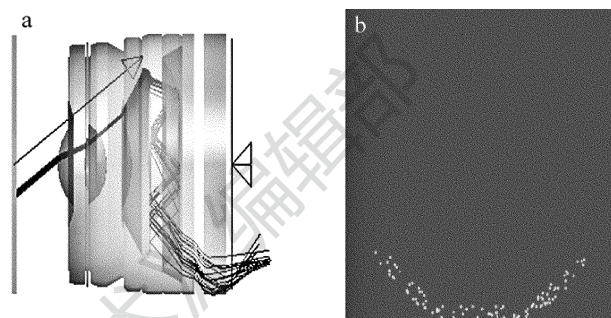


Fig. 9 a—light path of optical lens' transmission surface reflection b—illumination distribution of optical lens' transmission surface reflection

光学元件透射面的表面反射一般可以通过镀膜来改善,增加光学透射面的透射率,以减轻透射面的表面反射。

初始设定光学元件的透射率为 7%,该杂散光产生的光通量为 10^{-8} lm。一般镀增透膜后,透射面的反射率可以减小到 1% 以下。在光学元件的表面属性上增加膜层属性后,其反射率设定为 7%,此时光学元件透射面存在的表面反射大大减轻,该杂散光产生的光通量降低为 10^{-11} lm,其在焦平面的成像示意图如图 10 所示。

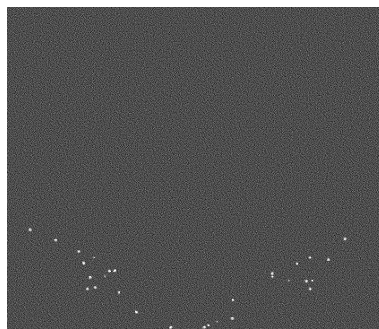


Fig. 10 Surface reflection from transmission surfaces of optical elements after stray light reduced

3 成品镜头的性能及杂散光评价

3.1 MTF 性能检测

MTF 检测是对镜头性能检测的一种方法,也称 PRO5 MTF 检测。主要通过一种检测仪器对镜头光学

系统的线性扩散函数进行检测,利用软件计算其光学传递函数 MTF,因此称为 MTF 检测。这种检测方式可以直接测试出镜头的空间频率,比较直观。图 11 为检测中使用的 MTF 机。

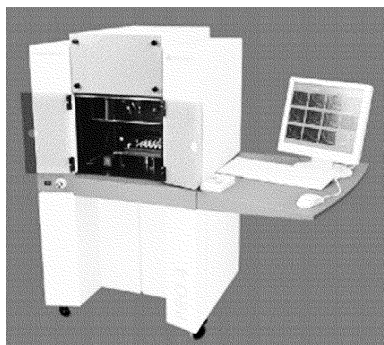


Fig. 11 Schematic diagram of MTF machine

图 12 为测试的 OK 镜头的 MTF 离焦曲线,图中横坐标为焦距,纵坐标为对应的 MTF 值。如图所示,各视场曲线都比较集中,曲线峰值达到 65,已经满足 5×10^6 像素的标准。

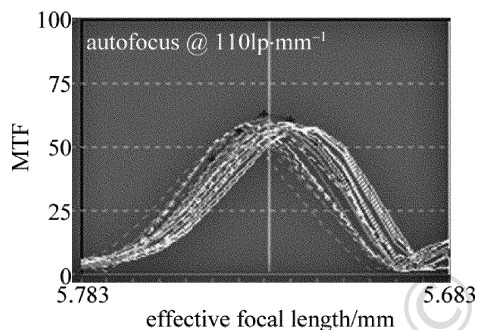


Fig. 12 MTF curve of the competed lens

3.2 杂散光检测

杂光性能检测以室外灯管拍摄为主。室外杂光拍摄时,要控制好曝光,要求芯片接收的曝光量低于饱和曝光量^[15],调整好曝光量后,将镜头对准灯管附近的天花板进行调焦,先从整体看各角度有无眩光、鬼影等杂光,再从各个角度看是否存在杂光现象,图 13 为室外灯管拍摄的边缘视场的图片,从图片中可以看出无明显的杂光。

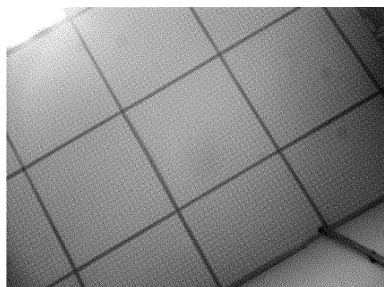


Fig. 13 Real shot picture of the edge field of view

除了在室外灯管测试杂光外,还会选择在暗室点

光源下对杂光进行测试。图 14 为暗室点光源下拍摄的图片,从图片中可以看出,光源四周有很多光斑,这些都是由芯片本身产生的反射鬼影。

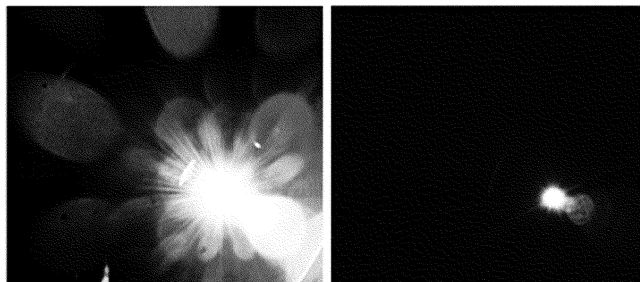


Fig. 14 Real shot pictures under a point light source in a darkroom

4 结 论

随着计算机技术的发展,运用软件辅助的光学系统设计,以及杂散光分析已经越来越重要。运用 CODEV 进行有针对性的设计优化,最终可以得到一款三单元 5×10^6 像素手机镜头的设计,在运用了较少镜片的条件下,同时满足了像素要求。运用 LightTools 进行杂散光模拟,复杂的蒙特卡洛光线追迹发挥了很大的分析功能。通过软件模拟手机镜头的杂散光种类及其产生原因,可以通过修改镜头挡光部件的结构以及镀膜等方法,达到减弱或消除杂散光的目的;也可以直接从软件中得到焦平面上的杂散光能量分布以及相对照度对比,形象且直观地看到杂散光产生及改善的结果。但杂散光产生的种类很多,目前软件分析还难以对应到所有情况,而且与实际的杂光的表现形式,在对应性上存在一定差异。

参 考 文 献

- [1] XIE H B, ZHU X Ch, LÜ E Y, *et al.* An emitting optical system design for laser panorama detection [J]. *Laser Technology*, 2013, 37 (2): 191-194 (in Chinese).
- [2] ZHU M, LI X Y, LI X M, *et al.* Phase shifting and shearing speckle interferometry system with retro-focus imaging [J]. *Laser Technology*, 2014, 38 (1): 49-53 (in Chinese).
- [3] YU Y H, WANG W Sh. Optical design of diffractive hybrid ultraviolet warning systems [J]. *Laser Technology*, 2012, 36 (3): 421-423 (in Chinese).
- [4] WANG P Y, XIA X L, TAN H P, *et al.* Simulation and analysis of stray light in CCD camera [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1999, 31 (5): 55-59 (in Chinese).
- [5] REINHARD E, WARD G, PATTANAIK S, *et al.* High dynamic range imaging-acquisition, display and image-based lighting [M]. San Francisco, USA: Morgan Kaufman Publishers, 2006: 504-593.
- [6] McCANN J J, RIZZI A. Veiling glare: The dynamic range limit of HDR images [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2007, 6492: 13-22.
- [7] HU S Y, XU Zh B. Design of objective lens with long focus depth for digital grayscale lithography [J]. *Laser Technology*, 2013, 37 (4): 464-468 (in Chinese).
- [8] SMITH A. *Modern optical engineering* [M]. New York, USA:

- McGraw-Hill,2000:347-392.
- [9] YIN Zh D,XIANG Y,GAO J,*et al.* Optical design of a 1300 megapixel phone camera lens optics designs[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2014,51(1):012202(in Chinese).
- [10] DONG J N,MU D, XU Ch Y, *et al.* Projection optical system design of infrared scene simulator based on DMD[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,2012,49(12):122202(in Chinese).
- [11] HAO Y C,XIAO SH Q,WANG L X. Status and development of stray light elimination technology for space-borne optical sensors[J]. *Chinese Space Science and Technology*,1995,15(3):40-50(in Chinese).
- [12] LIAO Sh. The study of stray light suppressing in optical system [D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China,2003:19-20(in Chinese).
- [13] HUANG W,WEI H Y,LI Y. Effect of relative position error in microlens arrays pair on beam homogenization[J]. *Laser Technology*,2013,37(1):11-15(in Chinese).
- [14] SHAO J,YE J F,HU Zh Y,*et al.* Design and implementation of a simulation platform based on optimal optical components[J]. *Laser Technology*,2011,35(4):511-513(in Chinese).
- [15] ZHONG J,WENG J D,LUO Zh X,*et al.* Study on stray facula of array CCD detector irradiated by laser pulse[J]. *Laser Technology*,2010,34(6):835-838(in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©