

文章编号 2095-1531(2015)06-0957-07

# N. A. 0.75 平场复消色差显微镜光学设计

薛金来\*, 巩岩, 李佃蒙

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为解决普通生物显微镜视场小、场曲和色差严重的问题,本文利用光学软件 Code V 设计了一款  $20\times$  平场复消色差显微镜,通过合理的结构优化、光焦度分配及材料选择,使该物镜具有大视场、高数值孔径、平场复消色差的特点。设计分析结果表明,该物镜平场数为  $0.11\ \mu\text{m}$ ,最大焦移量为  $0.5\ \mu\text{m}$ ,满足显微镜国际标准的规定;光学传递函数(MTF)曲线与理论衍射极限接近,达到指标要求,该物镜在可见光范围内实现了平场复消色差设计。公差分析结果表明 RMS 波前差劣化至  $0.24\lambda$ ,能够满足加工和实际应用要求。

**关键词:**光学设计;显微镜;平场复消色差;大视场

中图分类号:O439 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20150806.0957

## Optical design of the N. A. 0.75 plan-apochromatic microscope objective

XUE Jin-lai\*, GONG Yan, LI Dian-meng

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: xuejinlaihrbeu@126.com

**Abstract:** To improve the common microscope objective with small field of view, poor field curve and chromatic aberration correction, A  $20\times$  plan-apochromatic microscope objective is designed in this paper by Code V software. This objective has a large field of view, high N. A., and plan-apochromatic characteristic designed by reasonable structure optimization, focal power distribution and material selection. The result shows that the objective is a plan-apochromatic lens in visible wide band. The plan field number is  $0.11\ \mu\text{m}$  and the largest focal shift is  $0.5\ \mu\text{m}$ , which meet the specification of the international standard for microscope objectives. The MTF curve is closed to the diffraction limit. The tolerance analysis shows that RMS wavefront error gets worse to  $0.24\lambda$  and the objective lens can be applied and manufactured actually.

**Key words:** optical design; microscope objective; plan-apochromatic; large field of view

收稿日期:2015-06-10;修订日期:2015-07-22

基金项目:吉林省重大科技攻关专项资助项目(No. 20140203001GX)

Supported by Jilin Provincial Major Scientific Research Special Project of China(No. 20140203001GX)

## 1 引言

显微物镜是光学显微镜中最重要的部件,通过显微镜得到的样品信息很大程度上取决于显微物镜的成像性能<sup>[1-2]</sup>。随着科学技术的发展,大孔径、高分辨率显微物镜在生物荧光显微镜、全内反射荧光显微镜(TIRF镜)以及共聚焦显微镜中有着重要的应用。显微成像技术的进步,对显微物镜提出了更大视场、更高像质的要求。平场复消色差显微物镜能够满足上述严格的系统要求,这类物镜兼有平场物镜和复消色差物镜的特点,能够严格地校正轴上点的位置色差、球差和正弦差,又可以校正二级光谱,同时还能克服场曲缺陷,提高视场边缘成像质量,是最理想的显微物镜<sup>[3-7]</sup>。显微镜最早发明于16世纪末,随后被用于观察细菌和细胞,直到20世纪才得到进一步发展,其结构更加复杂,分辨率越来越高。世界上著名的镜头制造公司如日本奥林巴斯、尼康和德国蔡司都已具有成熟的镜头设计和生产工艺<sup>[8]</sup>。显微物镜设计制造向着高数值孔径(N.A.)、大视场方向发展,其中共轭距离为无限远的显微物镜应用广泛<sup>[9-13]</sup>。这类物镜由于镜筒透镜和前置透镜之间是平行光束,具有间距自由、装配调整方便,以及可任意加用滤光片、棱镜等一系列优点。本文从显微物镜应用和发展趋势出发,通过优化结构及合理选择玻璃材料组合,利用光学设计软件Code V设计了一款N.A. 0.75, 20×平场复消色差显微物镜,并对其进行了公差分析。

## 2 设计原理

假设光学系统由在空气中的 $N$ 个薄透镜组成,且入瞳位置到系统距离为0,则系统的光焦度可由下式表述:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i = \sum_{i=1}^N (n_i - 1) \left( \frac{1}{r'_i} - \frac{1}{r_i} \right) = \sum_{i=1}^N (n_i - 1) K_i, \quad (1)$$

式中, $\varphi_i = \varphi_i(\lambda)$ 为薄透镜光焦度, $n_i = n_i(\lambda)$ 为第 $i$ 片透镜所用的玻璃材料折射率, $\lambda$ 为光波长, $r'_i$ ,  $r_i$ 为第 $i$ 片透镜的曲率半径。由高斯公式可知:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \varphi, \quad (2)$$

式中, $l$ 为光学系统物距, $l'$ 为光学系统像距。考虑不同波长对光学系统像距的影响,将式(1)和式(2)带入近轴横向像差式(3)中,可得式(4)和式(5):

$$\delta l'_\lambda = l'(\lambda + d\lambda) - l'(\lambda), \quad (3)$$

$$\delta l'_\lambda = M^2 \delta l_\lambda - l'^2 \sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i(\lambda_0)}{v_i}, \quad (4)$$

$$v_i = \frac{n_i(\lambda_0) - 1}{n_i(\lambda + d\lambda) - n_i(\lambda)}, \quad (5)$$

式中, $\delta l'_\lambda$ 为光学系统近轴横向像差, $n_i$ 为阿贝数, $\lambda_0$ 为光学系统中心波长, $M$ 为系统横向放大率, $M = M(\lambda_0) = l'(\lambda_0)/l(\lambda_0)$ , $\delta l'_\lambda$ 为物体的近轴横向像差。对于最常用的三色光 $C$ 、 $d$ 、 $F$ ,阿贝数 $v_d$ 和相对部分色散 $P_\lambda$ 可由下式表示:

$$v(\lambda_d) = v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}, \quad P_\lambda = \frac{n_F - n_\lambda}{n_F - n_C}. \quad (6)$$

考虑到薄透镜系统应在给定的波长范围内校正横向像差,将 $d$ 光作为光学系统中心波长,且物体处于无穷远处两项条件带入式(5)中,可得到消色差条件,如式(7)所示。

$$\sum_{i=1}^N \frac{\varphi_i P_{\lambda_i}}{v_i} = 0. \quad (7)$$

上式表明,为实现复消色差,须选用相对部分色散尽可能相等,而阿贝数的差值尽可能大的玻璃材料<sup>[14-17]</sup>。此外,进行设计时必须要考虑光焦度的合理分配,从而实现复消色差设计。

对于N.A. 0.75的物镜,为实现复消色差设计,还应考虑最大焦移与焦深之间的关系,其最大焦移量不应超过焦深的一半。焦深 $\delta$ 由Berek公式计算得出:

$$\pm \delta = \frac{w \times 250000}{N.A. \times M} + \frac{\lambda}{2(N.A.)^2}, \quad (8)$$

式中, $w$ 为肉眼分辨率,取其值为0.0014 rad(当光学角度为0.5°时), $M$ 为总倍率(物镜倍率 $\times$ 目镜倍率), $\lambda$ 为中心波长。

## 3 光学系统设计

### 3.1 光学系统结构优化

物镜是显微镜光学系统的重要组成部分,其

主要性能参数是数值孔径、视场和放大倍率。为了分辨物体的细微结构并确保最佳成像质量,除一定要在设计该物镜时所规定的机械筒长下使用外,还应有尽可能大的数值孔径,且其放大率需与数值孔径相适应。显微物镜在提高数值孔径时,除需要对初级像差严格校正外,还需要兼顾校正高级像差,因此为了实现平场复消色差性能,物镜结构往往比较复杂。此外,盖玻片的厚度和折射率在数值孔径较大时对成像质量是有影响的,高倍显微物镜尤为严重,因此显微物镜的像差校正必须与盖玻片一起平衡,同时还需考虑实际加工制造中的问题,如造价低、体积更小、结构更紧凑等设计要求。目前常用的光学系统设计方法是选择已有的光学系统结构做相应调整参量后进行优化,但对于平场复消色差显微物镜,对像差校正比普通显微物镜更加严格,而校正二级光谱的玻璃选择和系统的结构型式对校正像差有很大影响。因此仍然需要从基本的结构型式分析系统的特点进而求解其结构参量。结合实际项目应用需要及显微镜行业的国际标准,其主要设计指标如表1所示。

表1 物镜的设计指标

Tab.1 Design index of the objective

Spectral rang/nm	400 ~ 760
Field number/mm	26.5
N. A.	0.75
Magnification	20X
Focal length of objective/mm	9
Thickness of cover glass/mm	0.17
Work distance/mm	0.6
Total length/mm	45

本设计针对最常用的可见光波段显微镜,选择C光、d光和F光作为主要波长进行设计优化。在结构上,根据国家显微镜行业标准,规定齐焦距离为45 mm,因此为保证结构设计上的可行性,通常光学系统总长不宜超过齐焦距离。在进行玻璃选择时,通常选用双胶合镜用以实现消色差,而为实现复消色差设计,需用到三胶合镜片。根据式(7)中的结论,设计时应优先选用相对部分色散系数相接近,而阿贝数相差较大的玻璃组合,在本

设计中选择 $\text{CaF}_2$ - $\text{KZFS}_2$ - $\text{CaF}_2$ 的三胶合玻璃组合实现复消色差优化设计,其参数对比如表2所示,两种玻璃材料的相对部分色散仅相差0.001 2,阿贝数差值相差41.4,根据平场复消色差设计条件,可以作为复消色差的玻璃选择。此外,出于成本考虑,其它玻璃均可选用成都光明玻璃实现设计目标。

表2 玻璃参数对比表

Tab.2 Parameters comparison of the glasses

	$\text{CaF}_2$	$\text{KZFS}_2$
$n_d$	1.433 85	1.557 81
$v_d$	95.2	53.8
$n_F$	1.437 02	1.565 00
$n_C$	1.432 46	1.554 64
$p_\lambda$	0.695 2	0.694 0

通常情况下,复消色差物镜的结构型式采用阿米西型和阿贝型的复杂化结构,用以校正高阶球差和色球差。在靠近像方一端使用了一块厚弯月透镜,能够有效地减小匹兹伐场曲,便于使设计的物镜指标满足平场条件。在光焦度分布上采用了“-+--+”的分配原则,考虑到物镜总光焦度为0.11,且共有6组镜片,初始设计时采取匀化光焦度的设计原则,在深度优化中根据实际镜组的作用实时调整光焦度分配,进而完成光学系统设计。

### 3.2 设计结果

上述光学结构的调整、玻璃材料的合理选择以及像差校正过程,达到了本设计的目标要求。图1~图5给出了设计结果。图1为光学系统结构图,该物镜由6组10片镜片组成,其中第5、6、8片所用光学材料为特殊光学材料 $\text{CaF}_2$ ,第7片

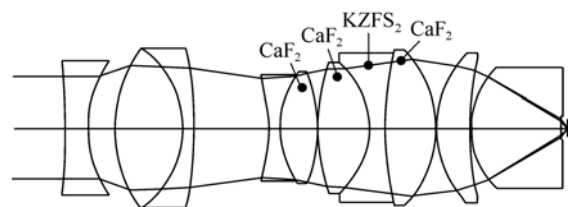


图1 光学系统结构图

Fig.1 Structural diagram of optical system

玻璃材料为肖特玻璃 KZFS<sub>2</sub>, 考虑到降低材料成本, 其余玻璃均采用使用频率较高的国产成都光明玻璃。根据实际加工制造要求, 设计过程中对镜片中心厚度、边缘厚度等都进行了严格控制, 以满足实际加工能力, 降低加工费用。其中, 镜片的最小中心厚度不能小于 1 mm, 边缘厚度不能小于 1 mm, 镜片中心之间最小空气间隙大于 0.1 mm。

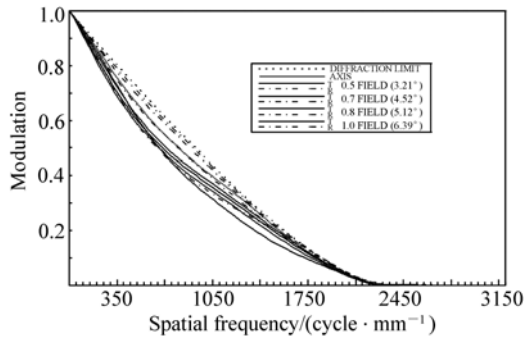


图2 光学传递曲线

Fig. 2 Curves of modulation transfer function

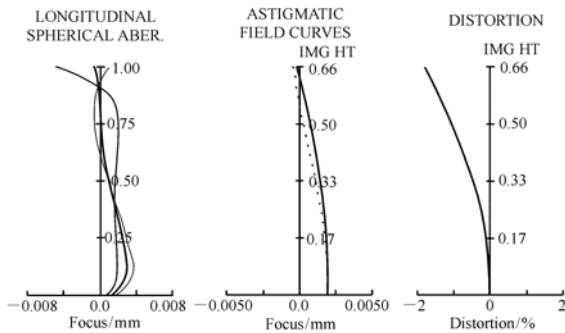


图3 色球差、像散、场曲及畸变曲线

Fig. 3 Spherochromatic, astigmatic, field curves and distortion curves

除了对镜片的几何形状做控制外, 还要考虑光线在镜片表面的入射角度和折射角度对镀膜的影响, 通常要求镜片光学表面的入射角度和折射角度不大于 60°。以上条件作为设计过程中遵守的设计准则, 进而完成该平场复消色差显微物镜的设计工作。

利用 Code V 光学软件对光学系统的 MTF、场曲、畸变等重要光学参数进行了分析。图 2 为物镜光学传递函数曲线, 截至频率为 3 086 cycles/mm, 图中黑色虚线为系统的衍射极限, 可以看到, 各视场子午方向和弧矢方向的 MTF 曲线均

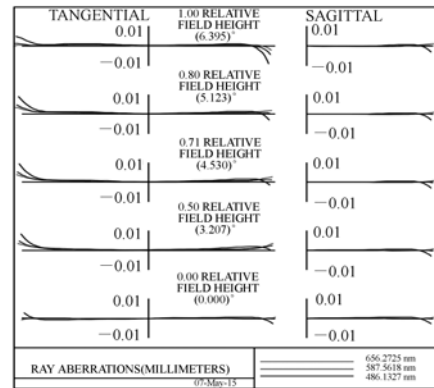


图4 像差曲线

Fig. 4 Ray aberration curves

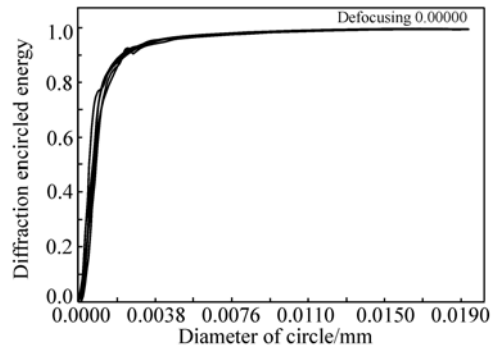


图5 衍射能量分布

Fig. 5 Distribution of diffraction energy

接近衍射极限, 能够很好地保证物镜的成像质量。由图 3 和图 4 可知, 该系统的二级光谱、场曲、像散、横向像差都得到了很好的校正。图 3 中二级光谱约为 2 μm, 且可以看出全孔径范围内, 色球差都得到了严格校正, 其中 C 光和 d 光近乎重合, f 光略大, 但不超过 2 μm。边缘视场处的场曲最大值不大于 2 μm, 可以看出初级像散得到了严格的校正 (约为 0.2 μm), 该光学系统最大畸变量在 2% 以内, 整个视场范围内的横向像差均小于 1 μm, 像差指标完全均满足显微系统指标要求。根据 ISO 显微物镜国际标准, 对于显微物镜的平场指标<sup>[18]</sup>, 有如下规定:

$$\Delta = \frac{(\tau_s + \tau_t)}{2}, \quad (9)$$

式中,  $\Delta$  指显微物镜的平场数 (plan field number, PFN),  $\tau_t$ 、 $\tau_s$  分别代表在子午平面内沿着光轴方向, 子午和弧矢方向到像面的距离。则对应的平

场条件为:

$$|\Delta| < \delta, \quad (10)$$

式中, $\delta$ 为式(8)中规定的显微物镜的焦深。

根据前面分析可得  $20\times, N.A. 0.75$  物镜的焦深为  $2.8\ \mu\text{m}$ , 而本设计中平场数  $\Delta$  最大值为  $0.11\ \mu\text{m}$ , 远小于式(10)中对于平场条件的规定, 说明本设计的显微物镜满足平场条件。同时在本设计中, 考虑其最大焦移量不能超过焦深的一半, 即  $1.4\ \mu\text{m}$ , 在设计波段范围内, 本设计焦移量最大值约为  $0.5\ \mu\text{m}$ , 远小于  $1/2$  焦深, 实现了复消色差设计。综上, 本物镜设计满足平场复消色差物镜的所有指标要求, 实现了  $N.A. 0.75, 20\times$  平场复消色差显微物镜设计。

表3为光学系统波前分析表, 其中波前差RMS值约为  $\lambda/14$ , 该物镜的各视场平均斯特列尔比大于0.8, 满足斯特列尔定律, 该物镜成像质量优良。其中轴外视场处斯特列尔比略小, 可以考虑通过合理的拦光, 降低杂散光的影响, 从而提高成像质量。

表3 波前分析表

Tab.3 Wavefront analysis

Field	RMS(waves)	SHIFT/mm	STREHL
0.00	0.050 256	0.000 000	0.905 101
0.50	0.076 851	0.000 468	0.792 023
0.71	0.072 705	0.000 565	0.811 653
0.80	0.066 949	0.000 576	0.837 821
1.00	0.090 095	0.000 523	0.725 824
Weighted RMS (waves)	0.072 638		0.811 964

图5为衍射能量分布, 由图可知, 弥散圆90%的能量集中在  $2.1\ \mu\text{m}$  的能量圆内, 能量集中度较高。除此以外, 系统点列图均方根半径分别为  $0.53, 1.2, 1, 0.86\ \mu\text{m}$ , 分辨率小于  $0.45\ \mu\text{m}$ , 镜片最大通光孔径不超过  $14\ \text{mm}$ 。

### 3.3 公差分配

在公差分配过程中, 对于显微物镜等对象质要求较高的光学系统, 仅仅依靠调整空气间隔来补偿加工和装调误差是不够的, 还需要考虑选择合适的补偿器来补偿同心度误差。通过灵敏度分析, 系统的加工公差和装调公差如表4所示。

表4 公差分配表

Tab.4 Tolerance distribution

Items	Value
Fringe power/ $\lambda$	2 ~ 5
Surface irregular/ $\lambda$	0.2 ~ 0.5
Thickness/mm	0.01 ~ 0.02
Airspace/mm	0.01 ~ 0.02
Tilt/( $'$ )	0.3 ~ 0.5
Decenter&Roll/mm	0.01 ~ 0.02
Refractive index	0.000 3 ~ 0.000 5
Abbe number	0.003 ~ 0.005

在进行公差分配时, 通常进行比较宽松的初始设定, 并在此基础上根据灵敏度分析结果, 实时地调整某一项或几项公差, 力求使得公差尽可能大, 以便于加工装调, 减少制造组装过程中的成本, 提高物镜制造的经济性。

通过设置合理的补偿方案, 可得到如图6所示的公差分析结果, 在现有加工装配技术能够满足制造公差和装配公差前提下, 系统波前差RMS值劣化至  $0.24\lambda$ 。

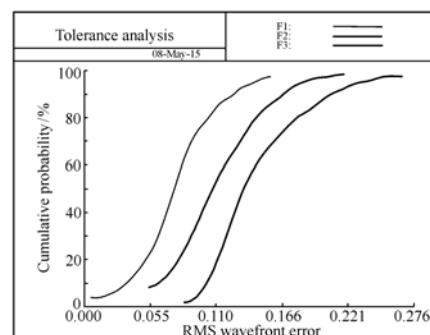


图6 公差分析曲线

Fig.6 Curves of tolerance analysis

## 4 结论

生物荧光显微镜、全内反射荧光显微镜和共聚焦显微镜的发展, 要求物镜要有更高的高数值孔径、更大的视场以及更严格的色差校正要求。针对上述要求, 本文设计了一款  $20\times$ , 视场数为  $26.5\ \text{mm}$ ,  $N.A. 0.75$  的平场复消色差显微物镜。该物镜在可见光波段实现了平场复消色差设计,

分辨率小于 $0.45\ \mu\text{m}$ 。光学系统结构采用全球面透射式光路,系统总长度为 $45\ \text{mm}$ ,体积小,结构紧凑。设计结果表明光学系统成像质量接近衍射极限,满足总体指标要求。

#### 参考文献:

- [1] MIKS A,NOVAK J. Analysis and synthesis of planachromats[J]. *Applied Optics*,2010,49(17):3403-3410.
- [2] REN D Q,JEREMY SMITH J R. Apochromatic lenses for near-infrared astronomical instruments[J]. *Optical Engineering*,1999,38(3):537-541.
- [3] SIGLER R D. Glass selection for airspaced apochromats using the Buchdahl dispersion equation[J]. *Applied Optics*,1986,25(23):4311-4324.
- [4] MIKS A,NOVAK J. Method for primary design of superachromats[J]. *Applied Optics*,2013,52(28):6868-6876.
- [5] 匡裕光. 平象场复消色差大视场显微物镜光学设计[J]. *光学学报*,1994,14(5):558-560.  
KUANG Y G. Lens design of flat field, apochromatic CF microscope objective[J]. *Acta Optica Sinica*,1994,14(5):558-560. (in Chinese)
- [6] 周庆才,王春艳,王鹏,等. 复消色物镜的波差法光学设计[J]. *吉林大学学报(工学版)*,2007,37(4):944-948.  
ZHOU Q C,WANG CH Y,WANG P,et al.. Optical Design of Apochromatic objective with wave disparity method[J]. *J. Jilin University(Engineering and Technology Edition)*,2007,37(4):944-948. (in Chinese)
- [7] 崔庆丰,匡裕光. 混合复消色差透镜组的设计原理[J]. *光学学报*,1995,15(4):499-503.  
CUI Q F,KUANG Y G. Design principles of the hybrid apochromats[J]. *Acta Optica Sinica*,1995,15(4):499-503. (in Chinese)
- [8] 王莉,蒋红,孙丽丽. 显微镜的发展综述[J]. *科技信息*,2009,11:117-119.  
WANG L,JIANG H,SUN L L. An overview of microscope objective[J]. *Science and Technology Information*,2009,11:117-119. (in Chinese)
- [9] 刘仲禹,张欣婷,吴倩倩. 高分辨率紫外/可见宽波段显微物镜设计[J]. *应用光学*,2013,34(4):575-578.  
LIU ZH Y,ZHANG X T,WU Q Q. High resolution ultraviolet/visible wide band microscope objective[J]. *J. Applied Optics*,2013,34(4):575-578. (in Chinese)
- [10] 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,2014.  
LI X T,CEN ZH F. *Geometrical Optics, Aberrations and Optical Design*[M]. Zhejiang:Zhejiang University Press,2014. (in Chinese)
- [11] 沃伦 J. 史密斯. 现代光学工程[M]. 北京:化学工业出版社,2011.  
SMITH W J. *Modern Optical Engineering*[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2011. (in Chinese)
- [12] 肖倩. 生物显微镜变倍物镜的光学设计[J]. *光学仪器*,2007,29(2):78-81.  
XIAO Q. Optical design of biological zoom microscope objective[J]. *Optical Instruments*,2007,29(2):78-81. (in Chinese)
- [13] 陈娇,焦明印,常伟军,等. 近紫外-可见光宽波段复消色差显微物镜设计[J]. *应用光学*,2011,32(6):1098-1102.  
CHEN J J,JIAO M Y,CHANG W J,et al.. Optical design of apochromatic microscope objective for near ultraviolet-visible wide spectrum[J]. *J. Applied Optics*,2011,32(6):1098-1102. (in Chinese)
- [14] 白清兰. 复消色差的短波红外望远物镜设计[J]. *光子学报*,2009,38(1):115-119.  
BAI L Q. Apochromatized design of teleobjective in short wave infrared band[J]. *Acta Photonica Sinica*,2009,38(1):115-119. (in Chinese)
- [15] 李航,颜昌翔. 800万像素手机广角镜头设计[J]. *中国光学*,2014,7(3):456-463.  
LI H,YAN CH X. Design of wide-angle lens for 8 mega-pixel mobile phone camera[J]. *Chinese Optics*,2014,7(3):456-463. (in Chinese)
- [16] 李蕊,刘永基,王肇圻. 基于个体眼光学结构的波前眼镜设计[J]. *中国光学*,2012,5(5):512-519.  
LI R,LIU Y J,WANG ZH Q. Design of wavefront-guided lens based on individual eye optical model[J]. *Chinese Optics*,2012,5(5):512-519. (in Chinese)

- [17] 张鑫,贾红光.大相对孔径红外消热差物镜设计[J].中国光学,2011,4(4):374-379.  
ZHANG X, JIA H G. Optical design of infrared athermalized objective with large relative aperture[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(4):374-379. (in Chinese)
- [18] International standard ISO 19012-1-2013, Microscopes-Designation of microscope objectives[S],2013.

#### 作者简介:



薛金来(1986—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,研究实习员,主要从事光学设计及检测等方面的研究。E-mail: xuejin-laihrbeu@126.com



李佃蒙(1988—),男,山东德州人,硕士,研究实习员,主要从事结构设计和系统装调等方面的研究。E-mail: dm-li1988@163.com



巩岩(1968—),男,吉林梅河口人,博士,研究员,主要从事短波光学、光机系统集成等方面的研究。E-mail: gongyi@sklao.ac.cn