

# 偏心分孔径偏振成像光学系统的设计

贺虎成 季轶群\* 周建康 赵知诚 沈为民

(苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 详细介绍了分孔径光学系统初始结构参数确定和光学设计方法。分孔径光学系统是一种偏心系统,可分解为多个同轴子系统的组合,在给出其初级像差表达式的基础上,利用PW法及最小二乘法计算其初始结构参数。优化设计得到了适用于偏振成像的、焦距为40 mm、 $F$ 数为4.5的和在工作波长范围为450~650 nm的四孔径光学系统。该系统采用普通光学玻璃,光学总长为120 mm。镜头的成像性能接近于衍射极限,能够满足应用和指标要求。

**关键词** 光学设计;多通道成像;偏心光学系统;PW法

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0622005

## Optical Design of Decentered Aperture-Divided Polarization Imaging System

He Hucheng Ji Yiqun Zhou Jiankang Zhao Zhicheng Shen Weimin

(Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract** Design method of an aperture-divided optical system used for polarization imaging systems is introduced and discussed in detail. Aperture-divided optical system is a decentered optical system composed of several coaxial subsystems. Its primary aberrations are represented based on the primary aberration theory. The initial structure parameters are calculated with the PW method and least square algorithm. A four sub-aperture optical system with effective focal length of 40 mm,  $F$ -number of 4.5 and wavelength range from 450 nm to 650 nm is optimized. The system uses an ordinary optical glass with total optical length of 120 mm. Imaging performances of the designed system approach to diffraction-limited and can meet the application requirements of the polarization imaging.

**Key words** optical design; multi-channel imaging; decentered optical system; PW method

**OCIS codes** 220.4830; 300.6550; 220.1010; 300.6360

## 1 引言

可同时获取同一目标的多幅图像的多通道光学系统,是偏振成像及瞬时多光谱成像等光学系统中的关键部件<sup>[1,2]</sup>,在立体成像技术中也得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。目前用于多通道光学系统的分光技术主要有采用光栅、棱镜或分束器的分振幅技术<sup>[4,5]</sup>,在孔径上放置多路分光子系统的分孔径技术<sup>[6,7]</sup>及干涉型分光技术<sup>[8,9]</sup>等。其中,分孔径光学系统具有结构紧凑、简单,图像数据处理简便等优点,有着巨大应用潜力。文献[3,6]报道了采用在孔径处将各分光子系统偏心的分孔径系统,文献[7]报道了采用倾

斜沃拉斯顿棱镜分光的分孔径偏振成像系统。然而对于的分孔径光学系统为基于偏心或倾斜的离轴光学系统,现有的同轴光学系统初级像差理论不再直接适用,为其光学系统的设计带来了困难。人们提出多种用于分析离轴光学系统像差特性的理论方法<sup>[10~12]</sup>。这些方法主要用于分析反射或光栅面的像差,且都难以给出初级像差和系统几何参数之间的具体关系。

本文根据用于偏振成像的偏心分孔径成像系统的特点,将其看作多个同轴子系统的组合,给出其初级像差表达式,确定其结构型式,并利用PW法和最

**收稿日期**: 2013-02-06; **收到修改稿日期**: 2013-03-07

**基金项目**: 江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)资助课题。

**作者简介**: 贺虎成(1981—),男,博士研究生,主要从事偏振光学系统设计方面的研究。E-mail: he5ch@126.com

**导师简介**: 沈为民(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学设计、仪器光学和空间光学等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn(中国光学学会会员号: S0400200265)

\* **通信联系人**。E-mail: jiyiqun@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国期刊网 www.opticsjournal.net

小二乘法计算初始结构参数。然后根据偏振成像的需要和具体指标要求,进行优化设计,最后给出分孔径偏振成像光学系统的设计结果及其像质分析。

## 2 系统结构与指标参数

用于偏振成像的偏心分孔径光学系统由前共孔径、分孔径透镜组及偏振元件组成,其结构如图 1 所示。分孔径透镜组由 4 个子系统组成,通过在孔径光阑处分别将子系统光轴与中心轴偏心使整个光学系统分成 4 个通道。每个通道包含状态不同的偏振

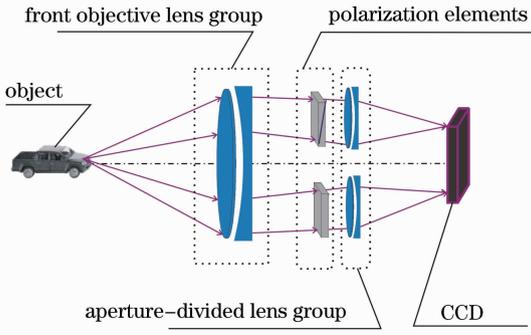


图 1 分孔径偏振成像结构示意图

Fig. 1 Diagram of aperture-divided polarization imaging system

元件,目标经 4 个通道成像在焦平面探测器上,即可同时获得 4 个不同偏振态的偏振图像,通过图像数据处理就可得到完整的斯托克斯 4 个分量图<sup>[1]</sup>。

要求研制的分孔径偏振成像系统的工作波长范围是 450~650 nm,处于可见光波段,焦距为 40 mm,  $F$  数为 4.5,视场角为  $\pm 2.5^\circ$ 。选用的焦平面探测器是像元尺寸为  $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$ 、有效像元数为  $752 \text{ pixel} \times 582 \text{ pixel}$  的 CCD 探测器。偏振元件选用宽波段偏振片和消色差  $\lambda/4$  波片,偏振片消光比优于  $100:1$ ,  $\lambda/4$  波片相位延迟精度在  $\lambda/100$  波长以内。

## 3 设计思想

### 3.1 理想成像分析

仅考虑成像系统,4 个分孔径镜头组光学结构相同,且对称分布于中心轴四周,设计时只需考虑其中一个分孔径镜头组和前共孔径镜头组组成的偏心光学系统。设前镜头组的焦距为  $f_1$ ,后分孔径组焦距为  $f_2$ ,两者间距为  $d$ 。以  $D$  代表系统入瞳直径,  $\Delta$  代表系统偏心量即偏心镜头组光轴与中心轴间距,  $\Delta'$  表示入瞳的偏心量,即入瞳中心与中心轴的间距,分析中用到的各符号意义如图 2 所示。

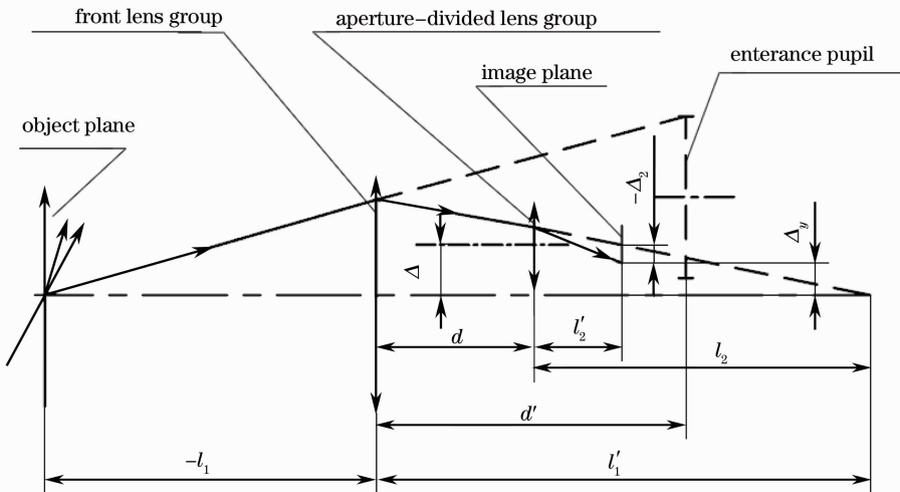


图 2 二组系统的结构参数示意图

Fig. 2 Structural diagram of double-group system

考虑前镜头组和分孔径组都为理想光学系统,偏心不改变焦面的位置,整个系统有效焦距  $f$  可由同轴光学系统的焦距公式求出:

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d}, \quad (1)$$

根据理想成像的物像关系,有:

$$\frac{1}{l'_1} - \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f'_1}, \quad \frac{1}{l'_2} - \frac{1}{l_2} = \frac{1}{f'_2}. \quad (2)$$

系统像面中心的偏移  $\Delta_y$  与偏心量  $\Delta$  满足下列关系:

$$\Delta_y = \Delta + \Delta_2, \quad \Delta_2 = -\frac{l'_2}{l_2} \Delta. \quad (3)$$

$D_1$  和  $D_2$  分别代表前镜头组和分孔径镜头组的孔径

直径。为使分孔径镜头组孔径不重叠,分孔径组的偏心量 $\Delta$ 须大于分孔径组的孔径直径 $D_2$ 的0.707倍。取极限情况,使 $\Delta$ 为 $D_2$ 的0.707倍。而偏心镜头组孔径与入瞳直径 $D$ 关系为

$$\frac{D_2}{-d} = \frac{D}{d'}, \quad \frac{1}{d'} - \frac{1}{-d} = \frac{1}{f_1}. \quad (4)$$

为有效利用像面,使像中心(即 $0^\circ$ 视场角对应的像点)偏移量等于像高的一半。根据(1)~(4)式,将设计要求 $f=40$  mm, $F=4.5$ 代入,并假设物在无穷远处,可以得到分孔径组偏心量、焦距、两组间距随前组焦距的变化关系,如图3所示。随着前组焦距的增大,分孔径组的焦距和偏心量减小,而两者间距增大。为同时满足像质和系统总长的要求,需选择合适的前组镜头焦距。如当前组焦距 $f_1=100$  mm,则后分孔径组焦距为 $f_2=35.36$  mm,偏心量 $\Delta=3.33$  mm,前后组之间间距 $d=46.96$  mm。

### 3.2 初级像差分析

为进一步确定初始结构参数,需要进行像差分析。该偏心系统可分解为两个同轴系统的结合,前共孔径透镜组是后置孔径光阑的结构,入瞳直径为 $2\Delta'+D$ ,物高和物距与整个系统相同;而后分孔径

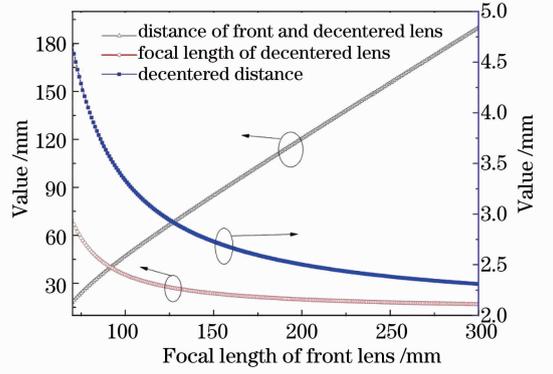


图3 分孔径组偏心量、焦距及两组间距与前组焦距的关系

Fig. 3 Decentered distance, focal length of decentered lens and distance between the two groups as functions of the focal length of front group lens

组孔径光阑与透镜组重合,入瞳直径为 $D_2$ ,对近物成像,物高相当于前组系统的像高与偏心量的和。各同轴系统的初级像差可用赛德尔和数形式表示,两同轴系统之间的像差传递公式可由空间光线经过单个折射面的初级像差公式导出<sup>[13]</sup>。考虑空间光线经过分孔径组的第一个面,以后标(1)、(2)分别表示前组镜头和后分孔径组的参数,轴向像差表达式:

$$n'u'^2 \Delta L'_{(2)} - nu^2 \Delta L_{(1)} = - \left[ \frac{1}{2} \frac{\eta^2 + \xi^2}{h^2} S_{\text{I}}^{(2)} + \frac{\eta}{h} S_{\text{II}}^{(2)} + \frac{1}{2} (S_{\text{III}}^{(2)} + S_{\text{IV}}^{(2)}) \right], \quad (5)$$

垂轴像差子午分量:

$$n'u' \delta Y'_{(2)} - nu \delta Y_{(1)} = - \left[ \frac{1}{2} \frac{\eta(\eta^2 + \xi^2)}{h^3} S_{\text{I}}^{(2)} + \frac{1}{2} \frac{(3\eta^2 + \xi^2)}{h^2} S_{\text{II}}^{(2)} + \frac{3}{2} \frac{\eta}{h} S_{\text{III}}^{(2)} + \frac{1}{2} \frac{\eta}{h} S_{\text{IV}}^{(2)} + \frac{1}{2} S_{\text{V}}^{(2)} \right], \quad (6)$$

垂轴像差弧矢分量:

$$n'u' \delta Z'_{(2)} - nu \delta Z_{(1)} = - \left[ \frac{1}{2} \frac{\xi(\eta^2 + \xi^2)}{h^3} S_{\text{I}}^{(2)} + \frac{\xi}{h^2} S_{\text{II}}^{(2)} + \frac{1}{2} \frac{\xi}{h} S_{\text{III}}^{(2)} + \frac{1}{2} \frac{\xi}{h} S_{\text{IV}}^{(2)} \right], \quad (7)$$

式中 $(\eta, \xi)$ 为入瞳面上的坐标, $u, u'$ 分别为物方和像方孔径角, $h$ 为第一近轴光线高度和物方截距, $S_{\text{I}}, S_{\text{II}}, S_{\text{III}}, S_{\text{IV}}$ 及 $S_{\text{V}}$ 为初级像差系数。

整个系统的像差由前镜头组与后分孔径组共同决定,考虑5种初级像差:

1) 球差:以 $0^\circ$ 视场边缘光线的轴向像差表示,边缘光线有4条,包括 $\pm x$ 和 $\pm y$ 向。其中只有 $+y$ 向边缘光线经过前组及后组孔径边缘,故选择 $+y$ 向边缘光线来计算球差,可以表示为

$$n'u'^2 \Delta L' = - \frac{1}{2} S_{\text{I}}^{(1)} - \left[ \frac{1}{2} S_{\text{I}}^{(2)} + \frac{1}{2} S_{\text{II}}^{(2)} + \frac{1}{2} (S_{\text{III}}^{(2)} + S_{\text{IV}}^{(2)}) \right]. \quad (8)$$

2) 彗差:子午彗差可通过先求子午面内上、下

和主光线的垂轴像差 $\delta Y'_a, \delta Y'_b$ 和 $\delta Y'_c$ ,且满足

$$K'_T = \frac{1}{2} (\delta Y'_a + \delta Y'_b) - \delta Y'_c, \quad (9)$$

式中,下标a、b、c代表上、下和主光线。偏心后视场是非轴对称的,彗差需要考虑4个边缘视场,在精度要求不高的初始结构计算中可仅考虑视场为(0, 1)的彗差,根据垂轴像差表达式求得该视场的子午彗差表达式:

$$K'_T = - \frac{1}{2u'} \left[ \frac{3}{4} \Delta' D_1^2 \left( \Delta' + \frac{D_1}{2} \right)^3 S_{\text{I}}^{(1)} + \frac{3}{4} D_1^2 \left( \Delta' + \frac{D_1}{2} \right)^2 S_{\text{II}}^{(1)} \right] + \frac{3}{2u'} S_{\text{II}}^{(2)}, \quad (10)$$

同理,求得该视场的弧矢彗差表达式:

$$K'_s = -\frac{1}{2u'} \left[ \frac{\frac{3}{4}\Delta'D_1^2}{\left(\Delta' + \frac{D_1}{2}\right)^3} S_{I}^{(1)} + \frac{\frac{1}{4}D_1^2}{\left(\Delta' + \frac{D_1}{2}\right)^2} S_{II}^{(1)} \right] + \frac{1}{2u'} S_{II}^{(2)}. \quad (11)$$

3) 初级场曲和初级像散: 简单考虑细光束像差和场曲, 则可以认为是两个同轴镜头组的细光束场曲和像散之和, 有

$$x'_{ts} = \frac{1}{u'_{2j}} \left( -\sum S_{III}^{(1)} \right) + \frac{1}{u'_{2j}} \left( -\sum S_{III}^{(2)} \right), \quad (12)$$

$$x'_p = \frac{1}{u'_{2j}} \left( -\sum S_{IV}^{(1)} \right) + \frac{1}{u'_{2j}} \left( -\sum S_{IV}^{(2)} \right). \quad (13)$$

4) 畸变为主光线的垂轴像差子午分量, 可以得到:

$$\delta Y' = -\frac{1}{2u'} \left( \frac{\eta_{1c}^3}{h_{11}^3} S_I^{(1)} + 3 \times \frac{\eta_{1c}^2}{h_{11}^2} S_{II}^{(1)} + 3 \times \frac{\eta_{1c}}{h_{11}} S_{III}^{(1)} + \frac{\eta_{1c}}{h_{11}} S_{IV}^{(1)} + S_V^{(1)} \right) + \frac{1}{2u'} S_V^{(2)}. \quad (14)$$

根据(5)~(14)式, 使各项初级像差为 0 可以得到 6 个方程, 若前后二组都为单组镜头, 以  $PW$  形式表示初级像差系数, 前后组共 4 个变量, 无法满足上述所有方程。考虑到前透镜组与后偏心透镜组相比, 相对孔径较大, 而视场较小, 系统选择佩茨瓦尔镜头结构作为前透镜组。而对于后分孔径组来说, 光轴与中心轴的偏移相当于增加了该透镜组的视场, 而分孔径组镜头组需要 4 组同样的镜头, 故宜选择较简单的结构。综合考虑选择三片式作为后分孔径组的初始结构。

## 4 设计结果与像质评价

### 4.1 初始结构及优化设计结果

将上述方程中像差系数以  $PW$  形式表示, 构建函数  $\phi$ , 使各项初级像差值绝对值最小。根据最小二乘法编写相关程序, 图 4 给出了程序计算各组分  $PW$  的流程图。输入由理想成像分析得到的参数, 求解物在无穷远时各组分的像差参量  $P^\infty$  和  $W^\infty$ 。

光焦度分配及各组分间距均会影响各组分的球差极小值  $P_0$ 。当共孔径组前后组之间的间距增大到与共孔径组焦距相当时, 前后组的球差极小值  $P_0$  均变小, 但考虑到光学系统结构长度不宜过长, 故应合理设置系统焦距分配及各组分间距<sup>[14]</sup>。经过反复调整焦距分配、阻尼系数  $P$  和权系数  $Q$ , 使解得的  $P^\infty$ ,  $W^\infty$  在合适的范围, 以保证透镜的胶合面半径较大, 同时球差极小值  $P_0 = P^\infty - 0.84(W^\infty - 0.14)^2$ , 接

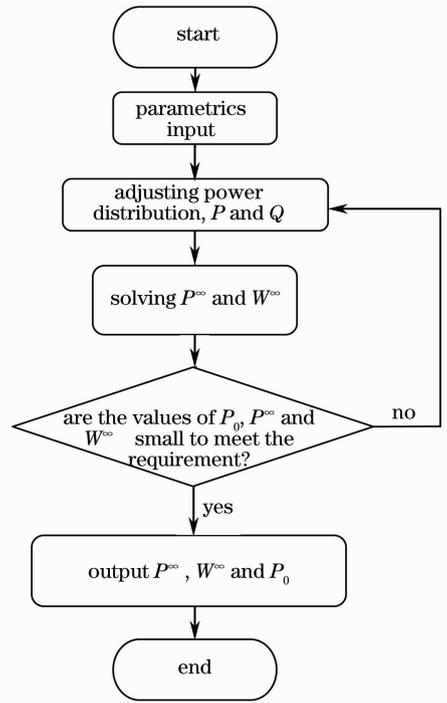


图 4  $PW$  法求解流程图

Fig. 4 Flowchart of solving  $PW$  method

近于 0。最终得到各组分的  $f$ ,  $P^\infty$ ,  $W^\infty$ , 球差最小值  $P_0$  如表 1 所示。

表 1 各组份的  $f$ ,  $P^\infty$ ,  $W^\infty$  和  $P_0$

Table 1  $f$ ,  $P^\infty$ ,  $W^\infty$  and  $P_0$  of all groups

Group	$f$ / mm	$P^\infty$	$W^\infty$	$P_0$
Front 1	192.561	0.1683	-0.0455	0.1394
Front 2	125.165	5.9143	2.4324	-0.5549
Rear decentered	32.659	7.4275	2.7837	-0.0172

根据双胶合及三片式透镜结构参量与基本像差参量的关系<sup>[14]</sup>, 可编写玻璃选择程序。程序中输入中国玻璃库, 根据选择的玻璃组合及焦距分配计算得到双胶合或三片式透镜的规范化色差  $C_1$  及球差最小值  $P'_0$ , 与  $PW$  法求解得到的球差最小值  $P_0$  比较, 若  $|P'_0 - P_0| < \Delta P$ , 即满足要求。最后根据结构参量与基本像差参量的关系计算得到各镜头组的玻璃组合及结构参数。得到前透镜组玻璃组合为(BAK2, ZF3)和(LAK1, LAK4), 后分孔径组的玻璃组合为(BAK6, F3)。初始结构示意图如图 5 所示。

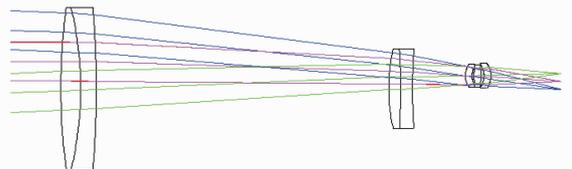


图 5 系统初始结构示意图

Fig. 5 Diagram of initial structure of the system

表 2 给出了初始结构参数的各项初级像差, 计算得到的初始结构初级像差均小于 0.01, 得到的初始结构合理。

为减小前组每块透镜的相对孔径, 将初始结构中双胶合透镜分离并在前透镜组前增加一个正透镜, 以

减小球差及其它高阶像差。利用光学设计软件设置合理优化参数, 设计得到的结果如图 6 所示。系统由前镜头组 5 片及后分孔径组  $3 \times 4$  片组成, 偏心量为 3.26 mm, 光学总长为 120 mm, 后工作距为 11.17 mm。采用了中国玻璃库 ZK9、ZK11、F1 及 ZF4 4 种玻璃。

表 2 初始结构初级像差

Table 2 Primary aberrations of initial structure

Spherical aberration	Tangential coma	Tangential astigmatism	Sagittal astigmatism	Distortion
0.0029	-0.0051	-0.0091	-0.0047	-0.00915

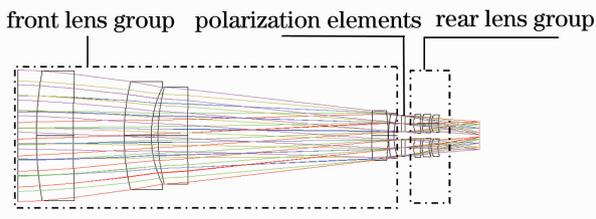


图 6 设计得到的偏振成像光学系统图

Fig. 6 Diagram of designed polarization imaging system

#### 4.2 像质评价

图 7 是系统的调制传递函数(MTF)曲线, 图中黑色曲线为衍射极限 MTF 曲线, 其他曲线分别为不同视场的 MTF 曲线, 实线为子午方向, 虚线为弧矢方向。在奈奎斯特频率(60.24 lp/mm)处, 系统的 MTF 值大于 0.75, 接近衍射极限, 像质良好。

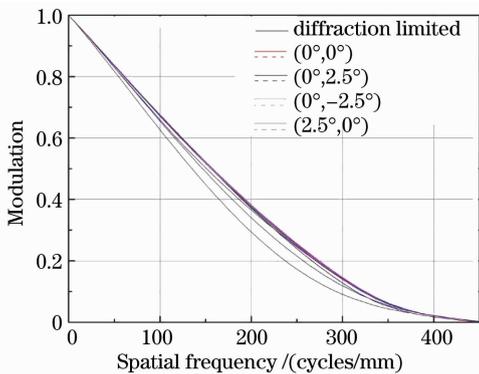


图 7 系统 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of the system

图 8 为光线追迹像平面上的点列图, 图中的方框代表探测器像元尺寸( $8.6 \mu\text{m} \times 8.3 \mu\text{m}$ )。点列图的均方根(RMS)半径值均小于  $2.1 \mu\text{m}$ , 各视场像点都能比较集中地落在单个探测器像元范围内。图 9 为衍射能量集中度曲线, 由图可得, 系统在单个探测器范围内的衍射能量集中度大于 0.85。

图 10 为系统畸变网格图, 其中黑色线为近轴像点位置, 而红色线为实际像点位置, 由图中可得到, 系统畸变主要为枕形畸变, 相对畸变小于 0.82%, 最大畸变量约 1 pixel, 满足偏振成像的要求。

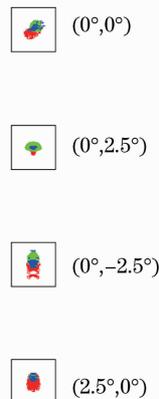


图 8 光线追迹点列图

Fig. 8 Spot diagram of light tracing

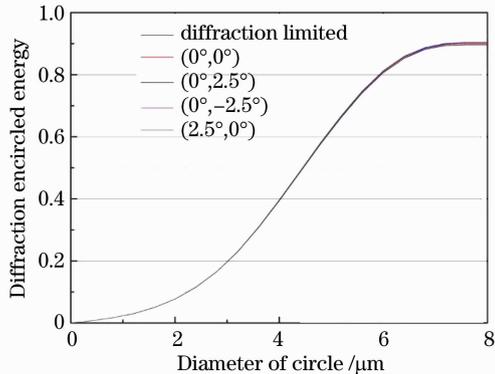


图 9 衍射能量集中度曲线

Fig. 9 Diffraction encircled energy curves

## 5 结 论

将分孔径光学系统分解为多个同轴子系统的组合, 利用同轴光学系统的赛德尔初级像差理论进行分析, 确定给出其初始结构。并根据偏振成像具体指标要求, 进行优化设计, 最后得到焦距为 40 mm、 $F$  数为 4.5 的分孔径四通道偏振成像光学系统设计结果, 该系统共采用了 17 片镜片(前组 5 片, 后组  $3 \times 4$  片), 总长 120 mm, 后工作距为 11.17 mm。利用 MTF 曲线、点列图、能量集中度和畸变等对其进行像质评价, 结果显示设计的系统具有良好的成像

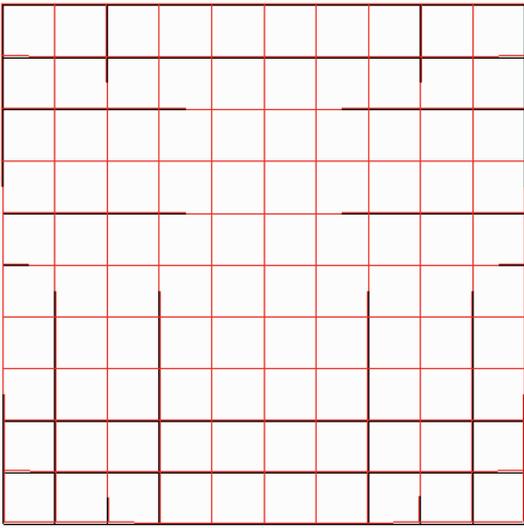


图 10 系统畸变图

Fig. 10 Distortion grid of the system

质量,能够满足偏振成像应用和指标要求。若选用工作波段更宽的  $\lambda/4$  波片,该偏振成像光学系统的工作波段可涵盖整个可见光波段,甚至扩展到近红外或红外波段。

## 参 考 文 献

- 1 J. S. Tyo, L. D. Goldstein, D. B. Chenault, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(22): 5453~5469
- 2 Alexander F. H. Goetz. Imaging spectrometry for remote sensing vision to reality in 15 years[C]. *SPIE*, 1995, **2480**: 1~13
- 3 H. W. Schreier, D. Garcia, M. A. Sutton. Advances in light microscope stereo vision[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, **44**(3): 278~288
- 4 K. Fujitaa, M. Nishidaa, Y. Itoha, *et al.*. Development of simultaneous imaging polarimeter [C]. *SPIE*, 2006, **6269**: 62693d
- 5 Yang Jin, Tang Yuguo, Bayanheshig, *et al.*. Design of Dyson concentric optical hyperspectral imaging system with achromatized Féry prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(11): 1130003  
杨 晋, 唐玉国, 巴音贺希格, 等. 基于 Dyson 同心光学系统的消色差 Féry 棱镜高光谱成像仪的设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(11): 1130003
- 6 J. L. Pezzaniti, D. B. Chenault. A division of aperture MWIR imaging polarimeter[C]. *SPIE*, 2005, **5888**: 58880V
- 7 Oliva E. Wedged double Wollaston a device for single shot polarimetric measurements [J]. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 1997, **123**(3): 589~592
- 8 K. Oka. Compact complete imaging polarimeter using birefringent wedge prisms[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(13): 1510~1519
- 9 Li Jianxin, Meng Xin, Zhou Wei, *et al.*. Image plane interferometric hyperspectral imaging based on re-imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1230001  
李建欣, 孟 鑫, 周 伟, 等. 基于二次成像的像面干涉高光谱成像方法[J]. *光学学报*, 2012, **32**(12): 1230001
- 10 M. P Chrisp. Aberrations of holographic toroidal grating systems [J]. *Appl. Opt.*, **22**(10): 1508~1518
- 11 T. S. Turner. Vector aberration theory on a spreadsheet: analysis of tilted and decentered systems [C]. *SPIE*, 1992, **1752**: 184~195
- 12 J. R. Rogers. Vector aberration theory and the design of off-axis systems[C]. *SPIE*, 1985, **554**: 76~81
- 13 Zhang Yimo. *Applied Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 1982: 275~282  
张以谟. *应用光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 275~282
- 14 Wang Zhijiang. *Handbook of Practical Optical Technique* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 22~42  
王之江. *实用光学技术手册*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 22~42

栏目编辑: 张 腾