

大视场光学系统像面照度均匀性优化

钟 兴 张 元 金 光

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 为提高大视场光学系统像面照度的均匀性,从理论上分析了光学系统像面照度的影响因素,提出使用中心遮拦产生的轴外斜光束截面积与轴上光束截面积之比对像面照度进行优化的思路。以理想系统建立数学模型,得到了中心圆形遮拦影响下不同视场角光束截面积比值的变化规律,并分析了遮拦对调制传递函数(MTF)的影响。进一步提出采用 Zemax 与 Matlab 软件动态数据交换(DDE)进行像面照度自动计算优化的方法。以某焦距 56 mm,相对孔径=1/5.6,视场角 $2\omega=80^\circ$ 的航测镜头为例进行了优化,通过在光学系统第 5 表面上增加半径为 4.384 mm 的中心遮拦,像面照度的不均匀性由优化前的 22.3% 降低至 3.5%,均匀性明显改善。在优化实例中讨论了 MTF 曲线的变化,指出采用中心遮拦后的传函指标仍满足 CCD 探测器成像使用要求。

关键词 光学设计;像面照度;中心遮拦;大视场光学系统

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0322004

Illumination Uniformity Optimization of Wide-Viewing-Field Optical System

Zhong Xing Zhang Yuan Jin Guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract To increase the uniformity of image illumination of wide-viewing-field optical systems, influencing factors are analyzed theoretically. Idea of optimizing image illumination uniformity by contrast of axial rays' section area and oblique rays' section area is raised. Mathematic model is established in ideal optical system. The law that ratio of rays section area changed with viewing-field angle influenced by central circular obscurations is acquired. Degeneration of modulation transfer function (MTF) caused by obscuration is analyzed. Optimization approach through dynamic data exchange (DDE) between software Zemax and Matlab is put forward. A focal length 56 mm, relative oparture 1/5.6, $2\omega=80^\circ$ air-survey camera lens is taken as an example to perform the optimization, and result shows its non-uniformity of image illumination decrease to 3.5% from 22.3% by adding a central obscuration on fifth surface, whose outer radius is 4.384 mm. The change of MTF is discussed in this example, and the MTF values with obscuration can satisfy the CCD imaging requirements.

Key words optical design; image illumination; central obscuration; wide-viewing-field optical system

OCIS codes 220.3620; 220.2945; 080.2740; 080.3620; 110.2945

1 引 言

大视场光学系统广泛应用于军事和民用领域^[1,2],对于提高光学仪器的工作效率,增加获取的图像信息量具有十分重要的意义。但在设计和使用中大视场光学系统需要面临的一个问题是像面照度的不均匀。一定的负畸变有利于改善光学系统的像

面照度,在鱼镜头等视场角 2ω 达到 120° 以上的镜头设计中一般都会采用这种方法。但畸变较大将引起轴外视场分辨率的退化,并且失真严重,影响应用效果^[3]。而在航空摄影测量等应用中,不仅要求光学系统传递函数高,畸变小,还要求其像面照度均匀,有利于后续图像处理^[4]。为了达到这一目的,一

收稿日期: 2011-08-15; 收到修改稿日期: 2011-10-31

基金项目: 国家 863 计划(2011AA7020103)资助课题。

作者简介: 钟 兴(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光学系统设计和空间光学等方面的研究。

E-mail: ciomper@163.com

般采用在远离光学系统孔径光阑的地方安装变密度中性滤光片的方法,使轴上视场透过率降低的幅度大于轴外视场。然而不论是连续式变密度还是阶梯式变密度的滤光片,其镀膜工艺都较为复杂,特别是在口径较大的情况下制作更加困难,并且很难达到理想效果。

为了使用更简单有效的手段解决大视场光学系统的像面照度均匀性问题,本文提出了在距离孔径光阑一定距离处,使用中心圆形遮拦优化方法引入渐晕,利用轴外斜光束截面积与轴上光束截面积之比对像面照度进行优化的方法。理论推导与实例设计结果显示,该方法可以有效地改善大视场光学系统的像面照度。

2 理论分析

2.1 光学系统的像面照度

光学系统轴上像点的经典照度公式^[5]为

$$E'_0 = \pi \tau B \left(\frac{n'}{n} \right)^2 \sin^2 u, \quad (1)$$

式中 τ 为光学系统的透过率, n, n' 为物空间和像空间折射率, U' 为轴上视场成像光束的像方孔径角。当物像空间介质相同时, $n = n'$, (1)式变为

$$E'_0 = \pi \tau B \sin^2 u, \quad (2)$$

利用几何光学进行推导,可以得到轴外角 ω 视场对应的像面照度按 $\cos^4 \omega$ 规律下降,即:

$$E' = E'_0 \cos^4 \omega, \quad (3)$$

当存在渐晕时,有

$$E' = K_a E'_0 \cos^4 \omega, \quad (4)$$

式中 K_a 为轴外斜光束截面积与轴上光束截面积之比。根据(4)式容易想到,如果 K_a 具有随 ω 增大而增大的特性,即轴外斜光束截面积大于轴上,就将有可能实现像面照度的改善。

2.2 中心遮拦对像面照度的影响

光学系统中的渐晕一般由透镜边缘产生,对轴外光瞳的遮挡面积大于轴上,即产生的轴外渐晕大于轴上,即视场角越大, K_a 越小。而与透镜边缘引起的渐晕相反,透镜的中心遮拦引起的渐晕其特征是轴上大于轴外^[6],正好符合视场角越大, K_a 越大的特点。因此,对其进行了进一步的研究。对无限共轭理想光学系统进行分析,如图 1 所示,中心遮拦在入瞳之前 l 距离处,中心遮拦的与视场角 ω 光束截面中心的距离为

$$d = l \tan \omega. \quad (5)$$

假设系统中不存在斜光束渐晕,即轴上与轴外

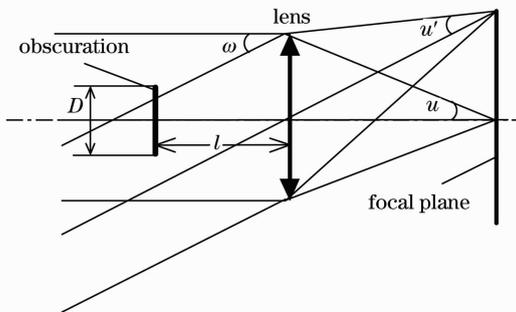


图 1 光学系统中的圆形中心遮拦

光束截面积相同,以视场角 ω 光束截面中心为 O 点建立直角坐标系,如图 2 所示。

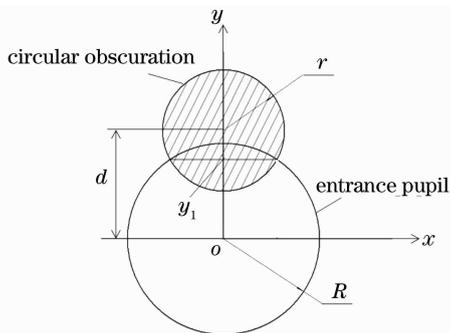


图 2 轴外光束的中心遮拦

Fig. 2 Central obscuration to oblique rays

显然,当 $d > R + r$ 时,圆形遮拦完全在光束截面外部, $K_a = 0$;当 $d < R - r$ 时,圆形遮拦完全在光束截面内,此时:

$$K_a = \frac{R^2 - r^2}{R^2}. \quad (6)$$

考虑 $R - r < d < R + r$ 的情况,首先联立方程组求解圆形遮拦与光束截面的交点坐标 y_1 :

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = R^2 \\ x^2 + (y - d)^2 = r^2 \end{cases}, \quad (7)$$

解得

$$y_1 = \frac{R^2 + d^2 - r^2}{2d}. \quad (8)$$

圆形遮拦与光束截面重叠部分的面积可表示为

$$S_1 = 2 \left[\int_{d-r}^{y_1} \sqrt{r^2 - (y-d)^2} dy + \int_{y_1}^R \sqrt{R^2 - y^2} dy \right], \quad (9)$$

此时轴外斜光束截面积与轴上点光束截面积之比为

$$K_a = \frac{\pi R^2 - S_1}{\pi R^2}. \quad (10)$$

通过联立式(5)~(10)式,在给定 R, r, l 的情况下,即可算得视场角 ω 对应的 K_a 值,并通过(4)式计算

其照度下降情况。以入瞳 $\Phi 50 \text{ mm}$ 的系统为例,假设圆形遮拦与入瞳距离 $l=40 \text{ mm}$,计算得到 K_a 在不同遮拦半径下与视场角的关系如图 3 所示,从图中可看出中心遮拦半径越大,轴上点的 K_a 就越小, K_a 值曲线连续变化的视场角跨度也越大。总的趋势是 K_a 随视场增加而增加。由此可知,圆形中心遮拦引起的像面照度下降轴上大于轴外,并存在一定规律,可对该特性加以利用实现大视场光学系统像面照度的优化。

2.3 中心遮拦对传递函数的影响

理想光学系统的光瞳函数可表达为

$$G(\xi, \eta) = \begin{cases} 1 & \text{in} \\ 0 & \text{out} \end{cases}, \quad (11)$$

式中 ξ 为光瞳函数的横坐标, η 为光瞳函数的纵坐标。

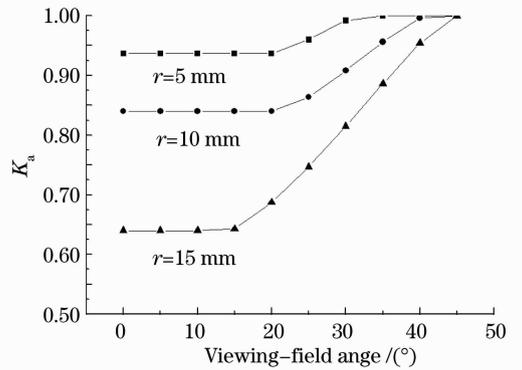


图 3 K_a 与视场角的关系

Fig. 3 K_a versus viewing-field angle

在非相干成像时,光学系统的光学传递函数是其光瞳函数的自相关^[7],经归一化后,光学传递函数可表达为

$$D(\nu_x, \nu_y) = \frac{\int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} G(\xi + \xi', \eta + \eta') G^*(\xi', \eta') d\xi' d\eta'}{\int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} |G(\xi', \eta')|^2 d\xi' d\eta'} = \frac{A}{A}, \quad (12)$$

式中 ξ' 为光瞳在横坐标方向错开的距离; η' 为光瞳在纵坐标方向错开的距离; $A = \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} d\xi' d\eta'$, 即光瞳面积。

光学传递函数式 $D(\nu_x, \nu_y)$ 的分子即为在光瞳错开此距离下的重叠面积, $D(\nu_x, \nu_y)$ 的分母即为光瞳面积。它们的比即为光学系统的调制传递函数(MTF)。可据此对遮拦情况下的传递函数进行计算^[8]。理想系统轴上视场的传递函数受中心圆形遮拦影响的计算结果如图 4 所示,其中纵坐标为传函,横坐标为归一化空间频率, k 为线遮拦比。可

以看出,受遮拦比影响下降幅度最大的是中频传递函数^[9]。因此,在使用中心遮拦对像面照度进行优化的过程中,必须结合使用要求对传递函数进行分析和评价。

3 利用 Zemax-Matlab 动态数据交换实现像面照度的优化

实际光学系统中,还存在斜光束渐晕、光瞳像差、畸变等因素均会对像面照度产生影响。因此,实际光学系统的像面照度计算一般在光学设计软件中用光线追迹的办法进行。要实现本文所设想的大视场光学系统像面照度优化,要结合实际能够放置中心遮拦的位置进行大量计算,因此,考虑使用计算机程序进行自动优化。

光学设计软件 Zemax 提供了基于 Windows 操作系统的动态数据交换功能(DDE),可以在不同的应用软件中共享数据^[10]。通过 DDE 链接,可将 Matlab 软件作为客户机程序按用户要求发送特定数据请求,获取 Zemax 计算结果,进行自动整理和显示,并实现优化。

由于光学系统具有旋转对称性,因此可按一维定义照度的不均匀性^[11~13]:

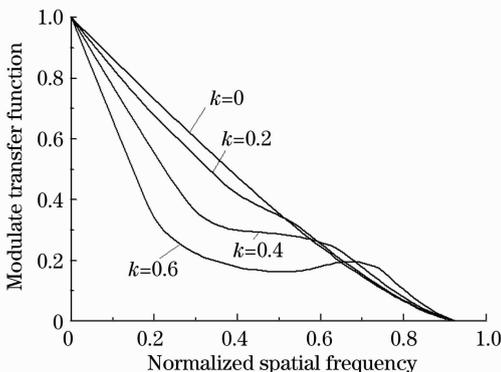


图 4 遮拦引起的光学传递函数下降

Fig. 4 MTF degeneration caused by obscuration

$$U_n = \frac{1}{V_{avg}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{avg})^2}, \quad (13)$$

式中 U_n 为不均匀性(一般用百分比表示), V_{avg} 为平均照度, V_i 为第 i 个视场点的照度, 在计算中可以直接使用 Zemax 计算得到的相对照度数值。因此, 在特定光学系统中将圆形中心遮拦的位置和尺寸作为变量, 将(13)式作为目标函数, 即可实现优化。

4 大视场光学系统像面照度优化实例

以实际镜头为例说明本文中心遮拦方法对像面照度的优化效果。如图 5 所示为某大视场航空测量相机的光学系统, 焦距 $f' = 56 \text{ mm}$, 相对孔径 $D/f' = 1/5.6$, 视场角 $2\omega = 80^\circ$, CCD 探测器的像元尺寸为 $13 \mu\text{m}$ 。

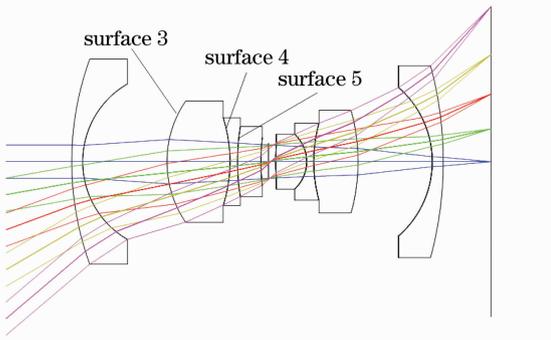


图 5 航空测量相机的大视场光学系统
Fig. 5 Wide viewing field optical system of air-survey camera

该光学系统采用复杂化双高斯型式, 以紧凑的外形实现了大视场角条件下的无渐晕设计, 传递函数高, 像质优良, 同时最大相对畸变不超过 0.1% 。并且镜头装调时只有 4 个光学元件(有两组镜片已经胶合), 工艺简单, 便于制造。但该镜头唯一的不足之处在于其像面照度的不均匀, 光学设计软件给出的相对照度曲线如图 6 所示, 根据该曲线计算得到照度的不均匀性 $U_n = 22.3\%$ 。

为了避免额外增加元件, 指定光学系统的第 3、第 4 和第 5 表面作为备选中心遮拦位置(在图 5 中进行了标注)。这样只需通过直接在透镜元件中心涂黑漆或者镀铬即可实现一定尺寸的中心遮拦, 具有工艺简单的优点。

在基于 Zemax 与 Matlab 动态数据交换的优化过程中, 对三个表面中心遮拦尺寸变化引起的像面照度不均匀性进行了监测, 结果如图 7 所示。当在第 5 表面上增加半径为 4.384 mm 的中心遮拦时, U_n 有最小值, 表明像面照度均匀性最好。图 8 是优

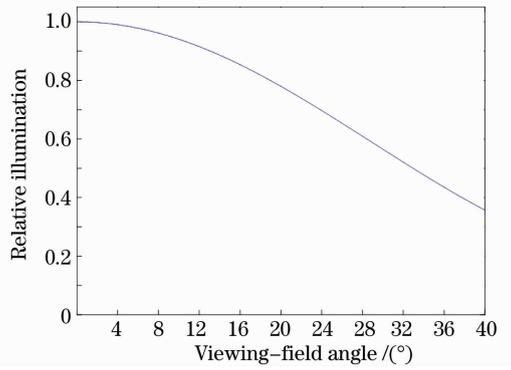


图 6 原始的相对照度曲线
Fig. 6 Initial relative illumination

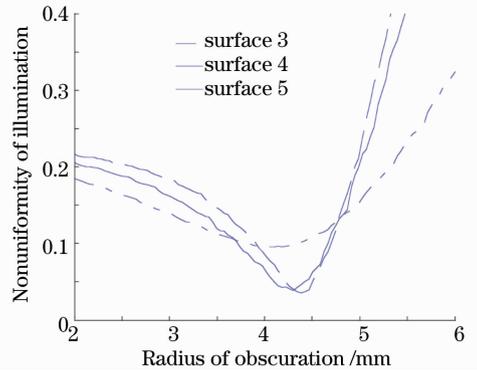


图 7 像面照度不均匀性变化曲线
Fig. 7 Non-uniformity of image illumination

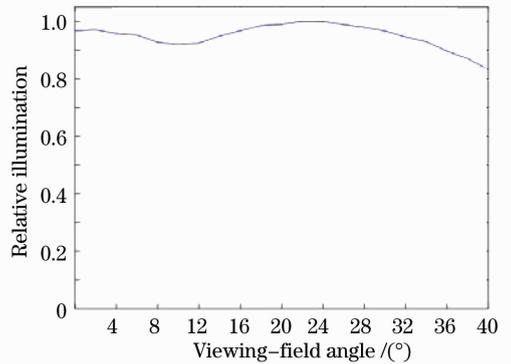


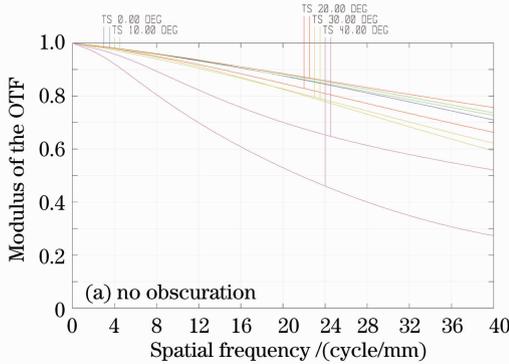
图 8 中心遮拦优化后的像面照度
Fig. 8 Relative illumination after optimized by central obscuration

化后得到的全视场相对照度曲线。通过优化, 照度不均匀性 U_n 降低为 3.5% 。

增加中心遮拦前后, 光学系统的传递函数如图 9 所示, 在 CCD 探测器 Nyquist 频率 38.46 lp/mm 处的传递函数均优于 0.3 , 可满足 CCD 传感器的成像要求。从图 9 曲线还可以看出, 增加中心遮拦后, 传递函数总的呈下降趋势, 但边缘视场子午方向的传递函数反而得到一定程度的提高, 这是因为在原系统

中,边缘视场的传函主要受子午场曲影响,根据场曲的像差和数表达式^[14]:

$$S_{IV} = \sum \frac{n' - n}{nm'r} (n'u'y')^2, \quad (14)$$



光瞳受到遮拦后,子午方向的光束孔径角 u' 减小,因此子午场曲变小,边缘视场传函升高。

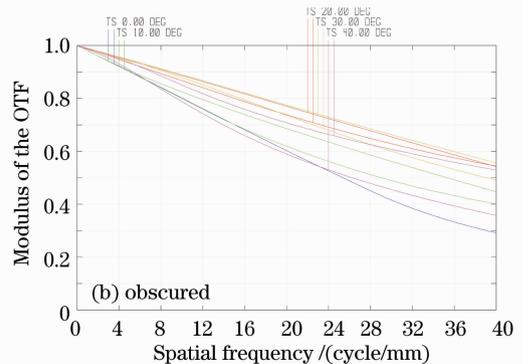


图 9 调制传递函数曲线

Fig. 9 Curves of modulate transfer function

由于大多数大视场光学系统都存在边缘视场子午场曲较大的特点^[15],因此上述特性对于提高边缘视场的像质是有利的。

5 结 论

大视场光学系统的像面照度不均匀是限制其使用效果的不利因素,以往多采用中性渐变滤光片的办法对各视场透过率进行调整,但存在工艺困难的问题。本文通过中心遮拦调整轴外斜光束截面积与轴上光束截面积之比的方法实现了像面照度的优化,制作时可以直接在现有镜片上实施,不用额外增加光学元件,工艺简单。给出的实例表明其像面照度不均匀性从 22.3% 下降为 3.5%,对提高均匀性的作用明显,同时传函值满足使用要求。本文提出的方法可给相关领域的研究者和工程人员提供像面照度优化的一种新思路,在投影、成像、光学传感和照明等应用大视场光学系统的领域都有潜在的应用可能。

参 考 文 献

- 1 Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong. Optical design of aerial digital camera based on large planar array CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622003
闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中. 大面阵 CCD 航空数码相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(6): 0622003
- 2 Lu Qiang, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of a fore continual zoom system with high speed [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2674~2679
陆 强, 季轶群, 沈为民. 大相对孔径连续变焦前置物镜的光学设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2674~2679
- 3 Gyeong-il Kweon. Fisheye lens for image processing applications [J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2008, **12**(2): 79~87
- 4 Lei Jie, Fu Jianping, Guo Qi. Correction of uneven illumination

on gun bore image [J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2011, **48**(6): 061002

雷 洁, 傅建平, 郭 琦. 火炮内膛图像照度不均匀的校正方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(6): 061002

5 Wang Yongzhong. Fish-Eye Lens Optics [M]. Beijing: Science Press, 2006. 61~64

王永仲. 鱼镜头光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 61~64

6 S. T. Yang, R. L. Hsieh, Y. H. Lee *et al.*. Effect of central obscuration on image formation in projection lithography [C]. *SPIE*, 1990, **1264**: 477~485

7 Han Changyuan. Fundamental Theory and Application of Information Optics [M]. Changchun: Changchun Press, 1989. 89~90

韩昌元. 信息光学基础理论及其应用 [M]. 长春: 长春出版社, 1989. 89~90

8 Qi Huaichuan, Huang Qiaolin, Hu Yongli. The study about the numerical calculation of diffraction-limited MTF of optical system with complex obstruction [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, **31**(1): 42~48

齐怀川, 黄巧林, 胡永力. 异形遮拦光学系统衍射限 MTF 数值计算方法研究 [J]. *航天返回与遥感*, 2010, **31**(1): 42~48

9 Zhang Ruirui, Shen Weimin. Long focal-length optical system using annular aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1140~1143

张蕊蕊, 沈为民. 环形孔径长焦距光学系统 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1140~1143

10 Zemax Optical Design Program User's Guide [M]. Zemax Development Corporation, 2009. 713~748

11 Shen Xiangheng, Yang Liang, He Gengxian *et al.*. Measurement of image plane illumination non-uniformity of optical system in photoelectric equipment [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **16**(12): 2513~2536

沈湘衡, 杨 亮, 贺庚贤 等. 光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测 [J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(12): 2513~2536

12 Wang Li, He Gengxian, Shen Xiangheng. A system for examining the image planes' illumination nonuniformity of image-forming system on photoelectric measuring equipment using CCD [J]. *Optoelectron. Technol.*, 2008, **28**(3): 212~215

王 力, 贺庚贤, 沈湘衡. 基于面阵 CCD 的光电测量设备光学系统像面照度不均匀度测量系统 [J]. *光电子技术*, 2008, **28**(3): 212~215

13 Ma Dongmei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Test of stray

- light coefficient vignetting coefficient and image surface illumination uniformity of optical system with large aperture and long focal length [J]. *J. Appl. Opt.*, 1998, **19**(5): 44~47
- 马冬梅, 张晓辉, 韩昌元. 大口径、长焦距光学系统杂光系数、渐晕系数、像面照度均匀性等参数的测试[J]. *应用光学*, 1998, **19**(5): 44~47
- 14 Yuan Xucang. *Optical Design* [M]. Beijing: Beijing University of Science and Technology Press, 1988. 79~85
- 袁旭沧. *光学设计* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. 79~85
- 15 Chang Lingying, Zhao Baochang, Yang Jianfeng *et al.*. Optical system design of a two-linear array stereoscopic mapping CCD camera [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0816001
- 常凌颖, 赵葆常, 杨建峰等. 两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0816001

栏目编辑: 谢 婧