

文章编号 1004-924X(2014)09-2369-06

## 长焦距大口径连续变焦距光学系统

田铁印\*, 王 红

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所  
光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了实现对远距离目标的实时跟踪与测量, 设计了口径为 650 mm, 焦距为 5 000~2 000 mm 的连续变焦距光学系统。提出了牛顿式折反射光学系统与倒置的连续变焦距光学系统组合的设计方法, 实现了光瞳的合理匹配与对接。确定了合适的入瞳位置, 消除了变焦过程中像面容易产生的鬼像。通过合理匹配主系统和变焦距系统的光焦度, 使得二级光谱最小化。运用 CODE V 软件对各焦距位置的像差进行优化与平衡, 使变焦距光学系统在各焦距位置的像差均得到校正与平衡, 像面保持严格的一致性, 从而各焦距位置成像质量良好。实验显示该系统全视场平均传递函数均在 0.524 以上(Nyquist 频率: 35 lp/mm), 满足使用要求。

**关键词:** 连续变焦距光学系统; 折反射光学系统; 光学设计; 像质

**中图分类号:** V248.3; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2369

## Optical zoom system with long focal length and large aperture

TIAN Tie-yin\*, WANG Hong

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,  
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)  
\* Corresponding author, E-mail: tiantieyin@ciomp.ac.cn

**Abstract:** To accomplish the real-time track and measurement of remote distance objects, a continuous zoom optical system with an aperture of 650 mm and the long focuses of 5 000—2 000 mm was designed. The combinatorial design method of a Newton catadioptric system and a reverse continuous zoom system was adopted, and the pupil was matched and connected reasonably. A proper pupil position was determined, then, the ghost often appeared in the image plane in zoom process was eliminated. By reasonable matching the focal power of the main system and the zoom system, the secondary spectrum was minimized. By using the CODE V software to optimize and balance the aberration of every focal length, all the aberration of focal positions in the zoom optical system were corrected and balanced, and the image plane was consistency strictly. Thus, the imaging quality of each focus is favorable. Experiments show that the full field average Modulation Transfer Function (MTF) of each focus at the Nyquist frequency is over than 0.524, which meets the system requirements.

**Key words:** continuous zoom optical system; catadioptric optical system; optical design; image quality

收稿日期: 2013-09-13; 修订日期: 2013-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61108066)

## 1 引言

大型光电跟踪测量设备具有焦距长、口径大、跟踪精度高等特点,先进的电子技术及光电探测技术使其成为探测能力强、测量精度高、使用方便、可靠的新一代光电跟踪设备,但它对光学系统的成像质量要求也越来越高。

常规的大型光电跟踪测量设备的光学系统多采用两档或三档焦距。在跟踪测量过程中,为了计算脱靶量,采用固定焦距和视场不能同时满足目标位于近距离时大视场、小倍率的概观;远距离时对长焦距、小视场、大倍率详细观察的要求。因此为了进行实时跟踪、测量,具有连续变焦功能的现代大型光电跟踪测量设备被特别关注<sup>[1-6]</sup>。

目前国内外多种形式的连续变焦距镜头很多,但能够满足大口径、长焦距连续变焦高质量要求的设计还很少。

本文设计了口径为 650 mm,焦距变化为 5 000~2 000 mm 的连续变焦距光学系统。首先根据具体的参数要求,确定合适的光学系统结构,提出反射式主系统与倒置的机械补偿法的变焦系统组合设计的思想,保证 2 个系统对接后光瞳的准确对接,并将入瞳设置在合适的位置,在原理上解决了变焦过程中像面中心容易产生“黑斑”(鬼像)的问题。在初始设计时,通过主系统和变焦距系统光焦度的合理匹配,使得二级光谱最小化,运用 CODE V 软件对各焦距位置的像差进行优化与平衡设计,最终得到成像质量优良的光学设计结果。变焦距光学系统在各焦距位置像差均得到校正与平衡,像面保持严格的一致性,成像质量优良,满足技术指标要求。

## 2 光学系统设计

### 2.1 光学设计参数

口径:  $D=650$  mm; 焦距:  $f'=5\,000\sim 2\,000$  mm, 连续变焦; 视场角:  $2\omega=0.1\sim 0.25^\circ$ ; 波段为  $0.6\sim 0.8\ \mu\text{m}$ ; CCD 靶面:  $1\,024\times 1\,024$  (像元数);  $14\ \mu\text{m}\times 14\ \mu\text{m}$  (像元尺寸)。

### 2.2 结构型式的考虑

由于折射材料的限制,最大口径不超过 200 mm 的变焦距光学系统一般采用折射式结构。折射式系统对于长焦距时二级光谱的校正极

为不利,通常需要采用特殊色散的光学材料。对于口径超过 200 mm 的连续变焦距光学系统,采用折反射式比较合适<sup>[7-8]</sup>。

超大口径连续变焦光学系统采用二次成像折反射变焦方式,由主系统和变焦系统两部分组成。第一像面前的光学系统为主系统,第一像面后的成像系统为变焦系统。

#### 2.2.1 主系统

主系统通常采用牛顿式和卡塞格林式两种不同形式。图 1 所示为牛顿式光学系统,由主镜和折转平面反射镜组成,具有中心遮拦小、杂光少等优点。图 2 所示为卡塞格林系统,由主镜和次镜组成。设计的主系统采用牛顿式。

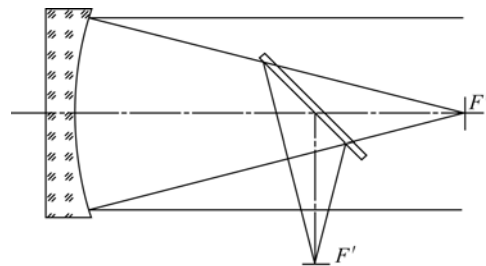


图 1 牛顿式光学系统结构

Fig. 1 Structure of Newton's optical system

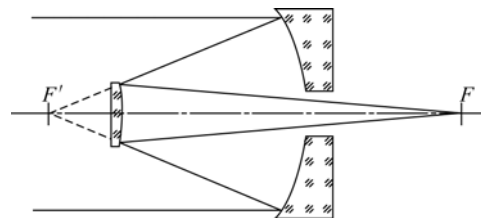


图 2 卡塞格林式光学系统结构

Fig. 2 Structure of Cassegran's optical system

#### 2.2.2 变焦距系统

变焦距系统通常有光学补偿和机械补偿两种方式。光学补偿法通过 2 组或 3 组透镜的线性联动实现变倍,但像面只有几个完全的补偿点,无法实现像面的完全补偿;机械补偿法由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组等构成,变倍组和补偿组是运动组元,变倍组做线性运动以实现焦距的连续变化,补偿组做非线性运动以实现像面的共焦,保证变倍过程中的像面稳定。机械补偿法的变焦距光学系统,采用凸轮机构实现 2 个运动组元的移动。凸轮加工的技术水平日益提高,使机械补偿法的变焦距系统应用日益广泛<sup>[9]</sup>。

机械补偿法按补偿组的光焦度不同,分为正组补偿和负组补偿。正组补偿长度较长,口径较小,前固定组焦距较长,对系统产生的二级光谱小,补偿曲线单调、平滑且变焦比增长快;负组补偿长度较短,口径较大,前固定组焦距较短,对系统产生的二级光谱大。根据光学系统的指标要求,变焦系统的结构为正组补偿方式,如图3所示。

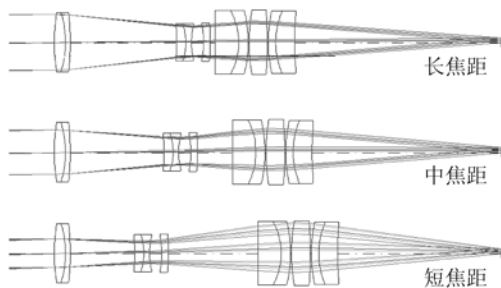


图3 正组补偿的变焦系统

Fig. 3 Zoom optical systems with positive compensation

将牛顿式光学系统与连续变焦距光学系统组合设计,实现大口径、长焦距连续变焦的目的。变焦系统采用机械补偿法的正组补偿方式,变倍组移动为线性,补偿组在  $m_2 = -1$  处换根,补偿组移动为非线性。光学系统如图4所示。

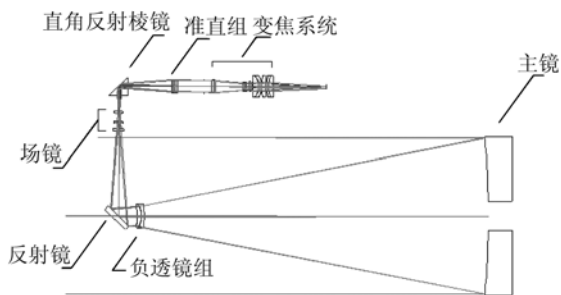


图4 光学系统结构图

Fig. 4 Configuration diagram of optical system

## 2.3 设计分析

### 2.3.1 光瞳匹配与对接的考虑

将牛顿式主光学系统与正组补偿的变焦距光学系统组合设计,实现超大口径、长焦距连续变焦。通过主光学系统后的第一次成像,经准直,与满足一定倍率的变焦系统对接,满足整体的变焦要求。

常规变焦距光学系统的光阑位于补偿组和后固定组之间,入瞳位置与孔径大小随焦距变化而

连续变化,相对孔径在变焦过程中保持不变,主系统如果直接与常规连续变焦距系统对接,将无法满足光瞳匹配的要求。为了充分利用主镜的口径,并使折反射变焦距光学系统在各焦距位置均有一个可用的中心遮拦比,将常规连续变焦系统倒置,将入瞳设置在合适的位置,可以有效避免在连续变焦时像面产生的黑斑(鬼像)。

在整个变焦过程中的光阑尺寸是连续变化的,相对孔径始终不变,以保证像面照度的稳定性,从而有利于电子学处理图像时提高跟踪精度。

### 2.3.2 二级光谱的校正

光学系统的变焦在  $5\ 000 \sim 2\ 000\ \text{mm}$ ,长焦时的焦距长,二级光谱的校正是主要问题,所以必须在初始设计时采用合适的光焦度分配,使长焦距时的二级光谱得以校正。

整个系统是以长焦距为主,利用负透镜来校正准直镜和长焦距变倍镜组的二级光谱,其关系式为:

$$h_{\text{negative}}^2 \cdot \varphi_{\text{negative}} + h_{\text{align}}^2 \cdot (\varphi_{\text{align}} + \varphi_{\text{variable}}) \approx 0, \quad (1)$$

式中:  $h_{\text{negative}}$ 、 $h_{\text{align}}$  分别为负镜组、准直镜及长焦距变倍镜组的轴上光线等效入射高度 ( $h_{\text{align}} = h_{\text{variable}}$ );  $\varphi_{\text{align}}$ 、 $\varphi_{\text{variable}}$ 、 $\varphi_{\text{variable}}$  分别为各镜组的光焦度。

得到各组满足要求的光焦度分配,系统全部采用普通光学玻璃,使长焦距位置时的二级光谱在第一像面处得到良好的校正。

### 2.3.3 像差的校正与平衡

由于系统结构复杂,为了便于加工、装调和质量控制,第一像面处需要校正好球差、彗差和色差。同时要保证准直组有较好的准直特性。

对于第一像面之后的变焦系统,利用前固定组校正长焦距的球差和正弦差,使之接近短焦距;利用变倍组和前固定组配合,校正长焦距的轴外宽光束像差(如轴外彗差、色彗差等);利用变倍组校正短焦距的轴外细光束像差(畸变、像散和倍率色差);利用前固定组校正长焦距的像散,使长短焦距的像散共同接近于中焦距的像散;利用补偿组校正中焦距的轴上点像差(球差、正弦差和高级色差),使之与长、短焦距像差相等;最终使整个变焦系统的像差得到校正和平衡。

最后用 CODEV 软件对各焦距位置进行结组优化设计,严格保证各焦距位置时的像面一致性,

得到各焦距位置成像质量优良的连续变焦距光学系统<sup>[10-14]</sup>。

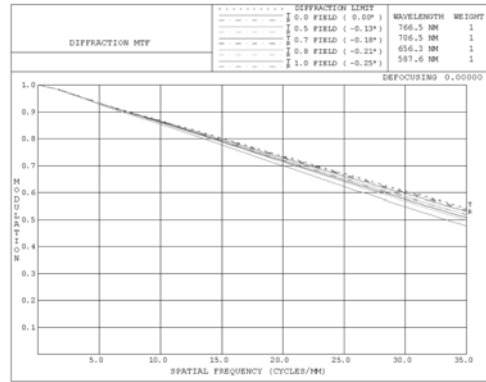
### 2.4 设计结果

光学系统设计结果为：

主系统第一像面位置的焦距为 4 000 mm,主镜为抛物面,半径为  $r=3\ 330$  mm;变焦系统之前,包括主系统和准直镜组的光学系统(相当于望远系统)的倍率为 12.94;变焦系统由前固定组、变倍组和补偿组组成,变焦为 154.80~386.39 mm,导程为 44.692 mm,补偿量为 45.799 mm;长焦时主镜利用其最大口径,为 650 mm,相对孔径为 1/7.7;短焦时主镜口径取为 260 mm,相对孔径为 1/7.7;光学中心遮拦比长焦为 1/6.5,短焦为 1/3。

### 3 光学系统成像质量分析与评价

图 5 所示为各焦距位置的传递函数曲线,表 1 所示为各焦距位置的传递函数值,图 6 所示为各焦距位置的能量集中度曲线,表 2 所示为计算得到的变焦距光学系统各视场弥散斑直径。



(c)短焦距光学系统传递函数曲线

(c) MTF of optical zoom system at short focus

图 5 各焦距位置的传递函数曲线

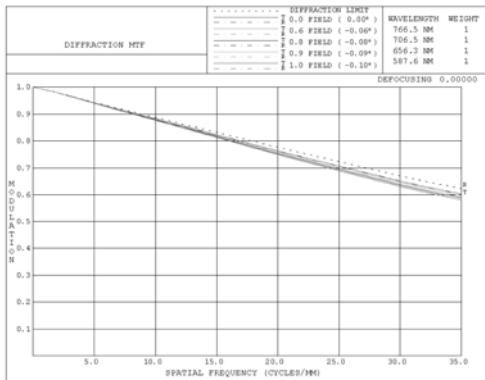
Fig. 5 MTFs of optical zoom system at different focuses

表 1 各焦距各视场的传递函数值

Tab. 1 MTF of each FOV at each focus

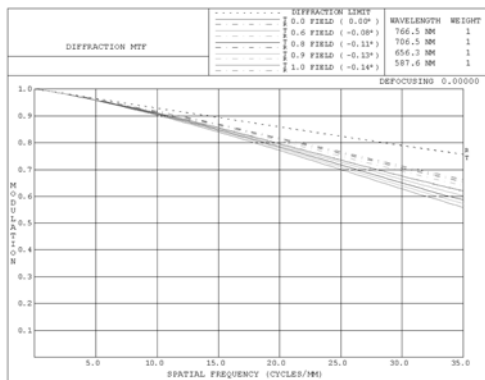
|              |   | (35 lp/mm) |            |           |
|--------------|---|------------|------------|-----------|
|              |   | Long EFL   | Middle EFL | Short EFL |
| $0\omega$    | T | 0.603      | 0.630      | 0.531     |
|              | S | 0.603      | 0.630      | 0.531     |
| $0.3\omega$  | T | 0.603      | 0.635      | 0.529     |
|              | S | 0.601      | 0.625      | 0.524     |
| $0.5\omega$  | T | 0.604      | 0.644      | 0.536     |
|              | S | 0.595      | 0.615      | 0.518     |
| $0.71\omega$ | T | 0.603      | 0.656      | 0.537     |
|              | S | 0.588      | 0.600      | 0.507     |
| $0.85\omega$ | T | 0.603      | 0.662      | 0.533     |
|              | S | 0.584      | 0.584      | 0.498     |
| $1.0\omega$  | T | 0.602      | 0.665      | 0.518     |
|              | S | 0.580      | 0.559      | 0.476     |
| 平均           |   | 0.598      | 0.625      | 0.524     |

由表 1 可知,各焦距位置的平均传递函数均在 0.524 以上(频率为 35 lp/mm)。



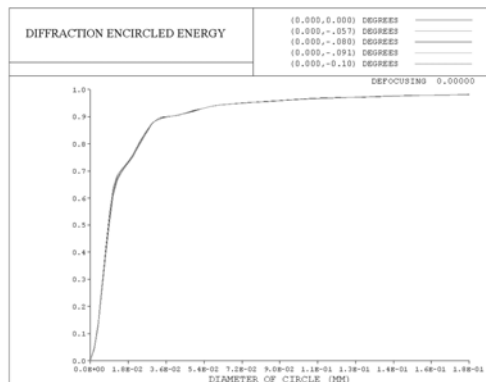
(a)长焦距光学系统传递函数曲线

(a) MTF of optical zoom system at long focus



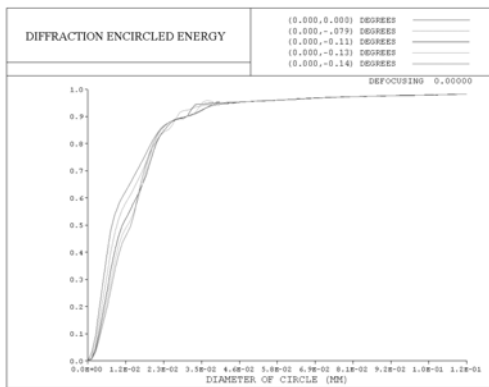
(b)中焦距光学系统传递函数曲线

(b) MTF of optical zoom system at middle focus



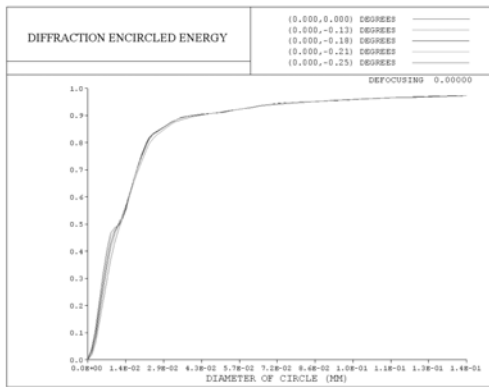
(a)长焦距光学系统能量集中度曲线

(a) Diffraction encircled energy of optical zoom system at long focus



(b)中焦距光学系统能量集中度曲线

(b) Diffraction encircled energy of optical zoom system at middle focus



(c)短焦距光学系统能量集中度曲线

(c) Diffraction encircled energy of optical zoom system at short focus

图 6 各焦距位置的能量集中度曲线

Fig. 6 Diffraction encircled energy of optical zoom system at any focus

表 2 光学系统各焦距视场弥散斑直径

Tab. 2 Dispersion circle diameter at each FOV of optical zoom system (mm)

|        | Long EFL | Middle EFL | Short EFL |
|--------|----------|------------|-----------|
| 0 ω    | 0.022    | 0.019      | 0.022     |
| 0.3 ω  | 0.022    | 0.019      | 0.022     |
| 0.5 ω  | 0.023    | 0.018      | 0.023     |
| 0.71 ω | 0.023    | 0.019      | 0.023     |
| 1.0 ω  | 0.023    | 0.019      | 0.024     |

参考文献:

[1] 赵学颜. 变焦距跟踪测量的应用[J]. 装备指挥技术学院学报, 2000(2):9-12.  
ZHAO X Y. Application for changing focal length in the process of tracking measurement [J].

从上述分析结果可知,变焦距光学系统在各焦距位置的成像质量优良,光学系统各焦距在 0.71 视场内,80% 的能量集中在弥散圆直径 0.023 mm 之内,小于 2 个像元尺寸。各焦距位置成像质量良好,满足使用要求。

需要强调的是,主镜的面形误差等是导致光学系统成像质量下降的主要因素,所以需要在光学设计、结构设计、材料选择、径厚比的确定及支撑结构等方面进行分析,给出合理的设计结果和公差要求。

4 结论

采用牛顿式折反射系统和倒置的变焦距光学系统进行组合设计,实现了超大口径、长焦距高质量的连续变焦光学系统。完成了光瞳的合理匹配和对接,保证了变焦部分光学系统具有合适的通光尺寸,使得光学系统具有合理的结构布局;确定了合适的入瞳位置,从原理上避免了变焦过程中像面“黑斑”(鬼像)的产生;通过可变光阑尺寸的控制,在保证变焦系统各焦距位置的中心遮挡的同时,改善了光学系统的成像质量,在整个变焦过程中相对孔径不变,保证像面照度始终稳定、均匀;由于光焦度的合理分配,有效地校正了由于焦距长而产生的二级光谱,光学系统材料均采用普通玻璃;变焦距光学系统在各焦距位置像差均得到校正与平衡,并且像面保持严格的一致性,各焦距位置的成像质量优良。本文的工作完全满足了技术指标的要求。

Journal of Institute of Command and Technology, 2000(2):9-12. (in Chinese)

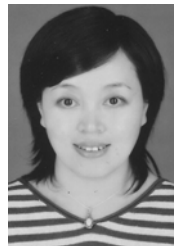
[2] 陈浩,宣丽,胡立发,等. 1 200 mm 望远镜开环液晶自适应光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):109-117.  
CHEN H, XUAN L, HU L F, et al.. Design of

- open-loop liquid crystal adaptive optical system for 1 200 mm telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):109-117. (in Chinese)
- [3] 胡际先. 长焦距大口径连续变焦距光学系统设计[J]. *应用光学*, 2007, 9(28):569-572.  
HU J X. Design of long focal length large-aperture optical zoom system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 9(28):569-572. (in Chinese)
- [4] 郭宁, 吕俊伟, 邓江生. 光电跟踪系统纯角度滤波器的设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7):1818-1824.  
GUO N, LU J W, DENG J SH. Design of Filter only by angle information in opto-electronic tracking system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7):1818-1824. (in Chinese)
- [5] 叶露, 武晓阳, 聂真威. 强激光与红外传感器光轴平行性测量仪器的研制[J]. *中国光学*, 2008, 1(1):100-104.  
YE L, WU X Y, NIE ZH W. Development of measuring instrument of optical axis parallelism for strong laser and infrared sensor [J]. *Chinese Optics*, 2008, 1(1):100-104. (in Chinese)
- [6] 王铭明, 陈涛, 王建立, 等. Mean-shift 跟踪算法及其在光电跟踪系统中的应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(2):332-338.  
WANG M M, CHEN T, WANG J L, et al.. Mean-shift tracking algorithm and its application in optoelectronic tracking system [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2):332-338. (in Chinese)
- [7] 田海霞, 杨建峰, 马小龙. 可见光变焦距电视光学系统设计[J]. *光子学报*, 2008, 37(9):1797-1799.  
TIAN H X, YANG J F, MA X L. Design for visible video zoom optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(9):1797-1799. (in Chinese)
- [8] 史光辉. 长焦距大视场折反射系统的光学设计[J]. *光学学报*, 1991, 11(7):651-655.  
SHI G H. Optical design of catadioptric lenses with long focal length and wide field of view [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(7):651-655. (in Chinese)
- [9] IAIN A NEIL. Optical design dependence on technology [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12):121706-1-12.
- [10] 刘峰, 徐熙平, 孙向阳. 高变倍比红外变焦距光学系统设计[J]. *应用光学*, 2009, 30(6):1020-1023.  
LIU F, XU X P, SUN X Y. Design of high zoom ratio thermal infrared zoom optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(6):1020-1023. (in Chinese)
- [11] 晏蕾, 贾平, 洪永丰. 变焦距镜头凸轮曲线形式的选择[J]. *应用光学*, 2010, 31(6):876-882.  
YAN L, JIA P, HONG Y F. Selection of cam curve for zoom lens [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(6):876-882. (in Chinese)
- [12] 田铁印, 王红, 冯晟杰. 三线阵测绘相机光学系统的杂光分析与计算[J]. *中国光学*, 2012, 5(6):583-589.  
TIAN T Y, WANG H, FENG SH J. Analysis and calculation on stray light of three line array mapping camera [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):583-589. (in Chinese)
- [13] WARREN J SMITH. *Modern Optical Engineering: the design of the optical system* [M]. Second Edition, McGraw-HILL, Inc, 1990.
- [14] ROBERT E FISCHER. *Optical System Design* [M]. McGraw-HILL, Inc, 2000.

#### 作者简介:



田铁印(1967—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪的研制工作,研究方向为光学总体及光学设计。E-mail: tiantieyin@ciomp.ac.cn



王红(1968—),女,吉林长春人,博士,研究员,主要从事光学遥感器与大型光电经纬仪的研制工作,研究方向为光学设计。E-mail: wanghong@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)