

## 三分离式消热差制冷型中红外物镜的设计

张 营,丁学专,杨 波,张宗存,刘银年

(中国科学院上海技术物理研究所,上海 200083)

**摘 要:** 为了满足多种复杂环境的使用需求,红外光学系统需要适应较大的工作温度范围。介绍了一种三分离式消色差消热差制冷型中红外物镜的设计方法。改进了三分离式结构物镜的孔径光阑位置,使物镜实现 100%冷光阑效率,同时将这种结构与消热差模型相结合,推导出三分离式消热差物镜的初始光焦度分配关系,并给出透镜材料的组合原则。利用该方法设计了工作波段为 3~5  $\mu\text{m}$ ,焦距为 88 mm,相对孔径为 1:2 的红外物镜,各视场弥散斑半径均小于 5  $\mu\text{m}$ ,调制传递函数 MTF 达到 0.75@17 lp/mm,获得了很好的成像质量。该物镜在 -20  $^{\circ}\text{C}$ ~+70  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内保持焦距、像面和像质很好的稳定,验证了三分离式消热差光学系统的设计方法。

**关键词:** 光学设计; 消热差; 三分离式结构

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0418005

## Design of three-lens athermalized and cooled midwave infrared objective

Zhang Ying, Ding Xuezhuan, Yang Bo, Zhang Zongcun, Liu Yinnian

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Infrared optical systems usually work at a large temperature range due to complex environment. Method of designing three-lens athermalized infrared objective has been introduced. The location of three-lens objective stop was changed to achieve 100% cold stop efficiency. This structure was combined with athermalization model to deduce distribution of the initial focal power. Method of lens materials selection was also given. An example of infrared objective with a 88 mm focal length was designed by this principle. Its wavelength range is 3–5  $\mu\text{m}$  and  $F$  number is 2.0. The objective has a perfect image quality. The RMS spot diameter is less than 5  $\mu\text{m}$ , while the MTF reach 0.75@17 lp/mm. The focal length, focal plane and image quality keep steady at temperature range from -20  $^{\circ}\text{C}$  to +70  $^{\circ}\text{C}$  which shows the feasibility of the design method.

**Key words:** optical design; athermalization; three-lens structure

收稿日期:2015-08-11; 修订日期:2015-09-03

基金项目:国家 863 计划(2014AA123202)

作者简介:张营(1988-),女,博士生,主要从事光学设计、红外光学系统方面的研究。Email:ahuzying@126.com

导师简介:刘银年(1971-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事光电遥感技术方面的研究。Email:ynliu@mail.sitp.ac.cn

## 0 引言

红外光电系统可以非接触地探测物体自身的热辐射,并反演物体表面的温度或辐射特性,在多个领域具有广泛的应用。通常其使用环境复杂多样,需要适应较大的温度范围<sup>[1]</sup>。当温度变化时,光学元件的多个参数随之而变,导致整个光学系统的焦距发生变化,造成像面漂移,成像质量下降<sup>[2]</sup>。因此,红外光学系统在设计之初,就需要将温度对系统成像质量的影响考虑进去,并想办法消除影响,使系统能在大的温度范围内保持成像质量不变,这种设计方法就称之为无热化设计。

光学系统的无热化设计主要分为三类:机械被动式、机电主动式、光学被动式<sup>[3-4]</sup>。其中,光学被动式因其结构简单质量小,整个系统无运动部件可靠性高,成为该领域研究的热点。光学被动式无热补偿是指在光学系统中使用具有不同热特性的光学材料,并与镜筒材料热特性进行匹配以消除热差。目前报道较多的是将摄远型或匹兹伐型物镜结构与消热模型相结合实现消热差<sup>[5]</sup>,但针对高性能要求的制冷型中长波红外相机,为抑制背景辐射杂光,常常需要将物镜设计成 100%冷光阑效率,这些结构往往不能满足使用要求。

文中介绍了一种 100%冷光阑效率的三分离式结构消色差消热差制冷型中波红外物镜的设计方法,并给出了透镜材料的选取原则。根据这种设计方法,设计了一款工作波段为 3~5 μm,焦距为 88 mm,相对孔径 1:2 的红外物镜。该物镜实现冷光阑效率 100%,在 -20~+70 °C 温度范围内保持焦距、像面和像质很好的稳定。最后对物镜进行成像测试,获得了非常高的成像质量。

## 1 设计思想

### 1.1 结构型式

随着高折射率低色散的晶体材料生产工艺的成熟,各种结构形式的折射式物镜被应用于红外光电系统中。由两块正透镜和一块负透镜组合而成的三分离物镜,也称为 Cooke 三分离物镜,是 Harold Dennis Taylor 在 1894 年设计的,该物镜结构简单、性能良好,可满足大视场、大孔径、高像质红外成像

要求。三分离物镜系统的全部结构参数为六个曲率半径,三个透镜厚度,两个空气间隔和三种透镜材料,有足够的自由度以校正各级像差。

三分离结构形式的物镜孔径光阑通常位于第二片负透镜上。但对于选用制冷型探测器的中长波红外光电系统,常将光学系统的出瞳设置在探测器的冷屏位置上,以实现 100%冷光阑效率,达到抑制背景辐射杂光的要求<sup>[6]</sup>。实现出瞳位于冷屏位置的方法有两种:一是直接将孔径光阑作为出瞳设置在冷屏位置;二是将孔径光阑通过中继系统的成像作为出瞳设置于冷屏位置<sup>[4]</sup>。针对三分离式物镜的结构型式,采用直接将孔径光阑设计在冷屏位置的方法,这相当于在对光学系统的设计求解过程中,另加入了一维约束条件。把三分离物镜近似当作一个薄透镜系统,其光路原理如图 1 所示,系统的孔径光阑位于焦面前冷屏位置处,第二近轴光在孔径光阑位置的高度为 0。

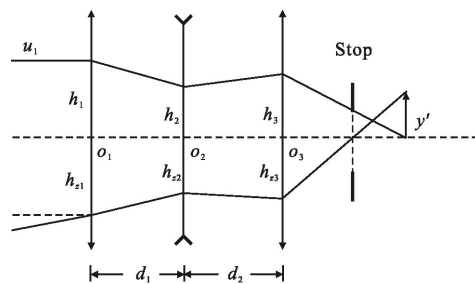


图 1 三分离式物镜结构图

Fig.1 Structure of three-lens objective

### 1.2 消热差设计

环境温度对红外光学元件有着极为严重的影响,光学元件的曲率半径,厚度,间隔,甚至材料的折射率都将随着温度的变化而改变。由温度变化引起的成像差异统称为热差,消热差设计主要是通过不同热特性材料的合理组合,利用光学材料热特性之间的差异来消除温度影响。

热差又可以分为位置热差和倍率热差,其产生的机理与色差类似。位置热差是指轴上物点在温度变化前后成像位置的差异,倍率热差是指成像倍率变化导致所成像大小的差异<sup>[5]</sup>。由定义可以看出,倍率热差并不影响成像的清晰度,因此在确定初始结构阶段,消热差设计通常只考虑如何消除位置热差。为表示光学材料的热特性和色散特性,引入热差系

数  $T$ , 色差系数  $C$ ,  $T$  和  $C$  可以表示为如下形式:

$$T = \frac{dn/dt}{n_{\lambda_0} - 1} - \alpha_0$$

从上式可以看出, 热差系数  $T$  由透镜材料的折射率, 折射率温度系数  $dn/dt$  以及热膨胀系数  $\alpha_0$  共同决定, 而色差系数在数值上等于阿贝数的倒数, 它们都是只与材料光学特性有关的量。通过合理搭配不同  $T$  值和  $C$  值的材料, 可以实现光学系统的色差和热差同时消除, 这时光学系统的光焦度分配需要共同满足光焦度, 消色差和消热差三个方程<sup>[6]</sup>, 如下所示:

$$\begin{cases} \varphi = \sum_{i=1}^k h_i \varphi_i \\ C = \sum_{i=1}^k \frac{h_i^2 C_i \varphi_i}{\varphi} = 0 \\ L = \sum_{i=1}^k \frac{h_i^2 T_i \varphi_i}{\varphi} = \alpha_m L \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\varphi$  为系统的总光焦度;  $h_i$  指轴上近轴光线在各透镜上的入射高度;  $\alpha_m$  为镜筒材料的线膨胀系数;  $L$  为系统结构总长度。将三分离式薄透镜系统结构与上述方程组结合, 按物体位于无穷远处, 对近轴光线的入射高度及总光焦度进行归一化, 有  $h_1=1; \varphi=1$ 。上述方程可以改写为:

$$\begin{cases} \varphi_1 + h_2 \varphi_2 + h_3 \varphi_3 = 1 \\ C_1 \varphi_1 + h_2^2 C_2 \varphi_2 + h_3^2 C_3 \varphi_3 = 0 \\ T_1 \varphi_1 + h_2^2 T_2 \varphi_2 + h_3^2 T_3 \varphi_3 = \alpha_m L \end{cases} \quad (2)$$

解上面的方程组, 得出光焦度分配的方程组:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \frac{\alpha_m L \cdot (h_3 C_3 - h_2 C_2) + h_2 h_3 (C_2 T_3 - C_3 T_2)}{h_2 (C_1 T_2 - C_2 T_1) + h_2 h_3 (C_2 T_3 - C_3 T_2) + h_3 (C_3 T_1 - C_1 T_3)} \\ \varphi_2 = \frac{\alpha_m L \cdot (C_1 - h_3 C_3) + h_3 (C_3 T_1 - C_1 T_3)}{h_2^2 (C_1 T_2 - C_2 T_1) + h_2^2 h_3 (C_2 T_3 - C_3 T_2) + h_2 h_3 (C_3 T_1 - C_1 T_3)} \\ \varphi_3 = \frac{\alpha_m L \cdot (h_2 C_2 - C_1) + h_2 (C_1 T_2 - C_2 T_1)}{h_2 h_3 (C_1 T_2 - C_2 T_1) + h_2 h_3^2 (C_2 T_3 - C_3 T_2) + h_3 (C_3 T_1 - C_1 T_3)} \end{cases} \quad (3)$$

### 1.3 材料选择

与可见光光学材料相比, 可供选择的具备理想性能的红外光学材料非常有限, 符合中波波段使用要求的更是寥寥无几。锗是最常用的红外材料, 其折射率值较大, 有利于校正像差。它的另一个重要的光学特性就是折射率温度系数非常大, 因此随温度的变化锗透镜会产生非常大的焦移, 不利于系统的热稳定性, 需与其他材料搭配使用。硅是中波红外波段

另一种常用的材料, 折射率值在 3.4~3.6 左右, 在中波波段硅材料有非常好的透过率。硫化锌和硒化锌都是透射波段范围很宽的材料, 它们的折射率在 2~2.5 左右, 硒化锌与硫化锌相比最显著的优点是吸收系数小。这几种中波红外光电系统最常用材料的光学特性和热特性如表 1 所示。

表 1 常见红外光学材料的光学特性和热特性

Tab.1 Optical and thermal properties of infrared material available

Material	Si	Ge	ZnS	ZnSe
Refractive index	3.425	4.001	2.253	2.435
Abbe number	238	103	110	177
Temperature coefficient	159	396	44	63
Dilatation coefficient	3.9	6.1	7.2	7.1

合理的材料搭配, 不仅能实现消热差消色差, 还应使单透镜光焦度的绝对值尽量小, 从而减轻系统消除单色像差的难度。理论上, 折射率值大的材料有利于校正像差, 消色差系数  $C$  值相差大的材料组合有利于消色差, 消热差系数  $T$  值相差较大的材料组合有利于消热差<sup>[6]</sup>。考虑到中波波段较宽, 是可见光波段范围的数倍, 首先选择消色差较优的材料组合。Si 和 Ge 是中波红外波段消色差效果最好的材料组合, 而且其折射率值较大, 热差系数相差也较大, 对校正像差以及消热差都是有利的。因此三分离结构的前两片透镜材料就选用 Si 和 Ge。消热差设计通常需要选择三种或三种以上材料搭配, 但结合镜筒材料考虑机械热差时, 两种透镜材料实现无热化设计成为可能。根据中波红外光学材料的热光学特性, 最后一块透镜材料选用 Si、ZnSe、ZnS 都是合理的。三分离式结构型式的物镜采用 Si-Ge-Si 材料搭配更偏重于消除系统的色差及单色像差, 采用 Si-Ge-ZnSe 或 Si-Ge-ZnS 搭配更偏重于消除热差。

## 2 系统设计

### 2.1 指标参数

系统采用制冷型中波红外焦平面阵列, 探测器面阵大小 320×256, 像元大小 30 μm×30 μm, 是法国 SOFRADIR 公司生产的一款经典产品, 该探测器杜瓦窗口距离焦平面阵列约 20 mm。光学系统的技术指标参数如表 2 所示。

表 2 中红外物镜技术指标参数

Tab.2 Technology parameters of the midwave infrared objective

Parameter	Value
Spectral range/ $\mu\text{m}$	3.0-5.0
Field angle/ $^\circ$	5 $\times$ 6.25
Focal length/mm	88
F number	2.0
Total length/mm	<100

2.2 设计结果

针对设计实例,为追求更好的像质效果,透镜材料选用 Si-Ge-Si 搭配,镜筒材料选用膨胀系数较小的 304 不锈钢,通过透镜材料与镜筒材料的搭配实现消热差。在初始光焦度分配阶段,结合已选定材料的热差和色差系数,根据经验进行插值,代入消热差光焦度分配方程组(3),将各透镜焦距进行适当缩放,获得一组初始解。但这是高斯光学计算的理论结果,采用的简化模型与实际情况是有一定差别的,如果对计算出的光焦度严格加以控制将会导致单色像差难以校正。因此,利用光学软件进行优化时,还需要结合透镜的实际厚度对光焦度予以调整<sup>[9]</sup>。

由于整个系统约束条件很多,系统消除单色像差的难度很大,需要引入新的自由量继续优化以消除像差。使用非球面可使系统的球差、慧差、像散和畸变减小,并有可能进一步缩小温度变化后热差的大小<sup>[10]</sup>。对于口径不大的单透镜,二阶非球面就能得到很好的效果。在负透镜的凹面引入非球面,再次优化透镜组,很快将整个系统的像差很好地校正。最终设计的红外物镜光路图如图 2 所示,整个系统由三片分离的透镜组成,光阑位于探测器前 20 mm 处,结构非常简单。弥散斑图如图 3 所示,其半径值远小于衍射极限,系统各级像差均得到了很好的校正。

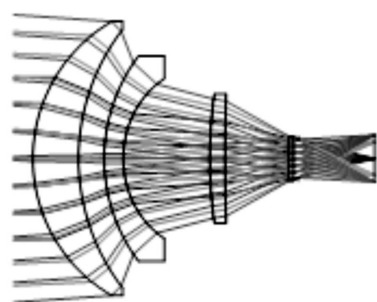


图 2 中红外物镜光路图

Fig.2 Light path diagram of midwave infrared objective

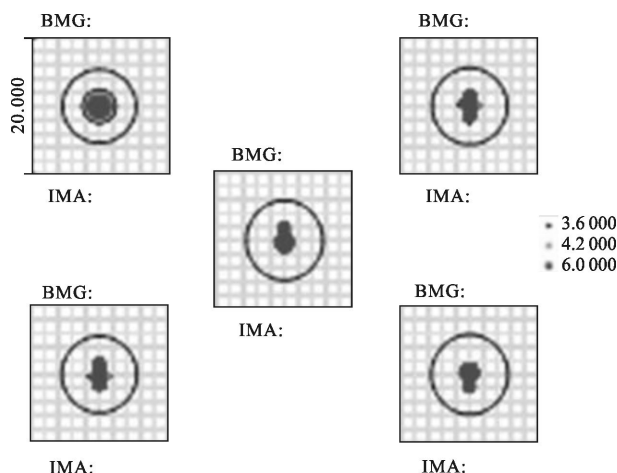


图 3 中红外物镜弥散斑图

Fig.3 Disc of confusion of infrared objective

2.3 系统评价

当环境温度变化时,系统的最佳像面位置会随之发生变化,像面位置变化在系统的焦深范围以内都是被允许的。假设允许物镜的弥散斑直径约等于艾里斑的话,对无穷远成像的焦深公式为  $\Delta z = 4.88\lambda (F/\#)^2$ 。根据技术指标要求,该物镜的焦深约为  $78 \mu\text{m}$ 。在  $20^\circ\text{C}$  时,系统的最佳像面位置在 0 处,最佳像面向后漂移为正,向前漂移为负。随着温度的变化,物镜的离焦量如表 3 所示。从表中可以看出,当温度在  $-20\sim 70^\circ\text{C}$  范围内变化时,系统的离焦量均在焦深范围内。

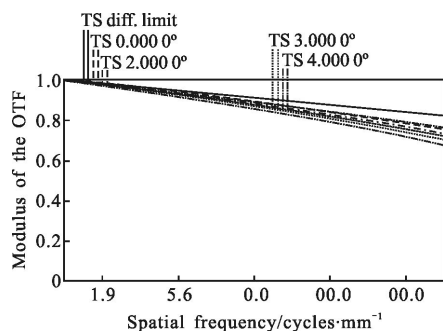
表 3 光学系统随温度变化的离焦量

Tab.3 Defocusing amount variation along with the temperature changes

Temperature/ $^\circ\text{C}$	Defocusing amount/ $\mu\text{m}$
-20	37
-10	28
0	20
10	11
20	0
30	6
40	14
50	22
60	31
70	39

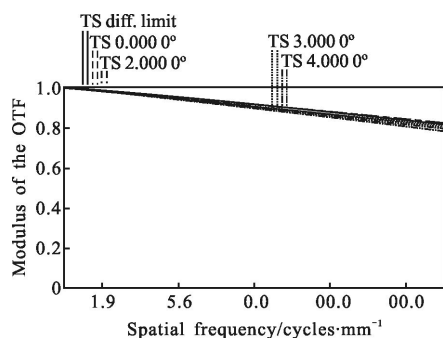
调制传递函数 MTF 是光学系统另一个重要的评价手段,系统在  $-20^\circ\text{C}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$  的 MTF 曲线如

图 4(a)~(c)所示。可以看出,随着温度的变化,系统 0 视场、0.7 视场和全视场的 MTF 曲线在奈奎斯特频率处均始终大于 0.65, 非常接近衍射极限, 波动很小。这就说明该系统满足消热差要求, 具有很好的热稳定性, 在  $-20\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内像质基本保持稳定。



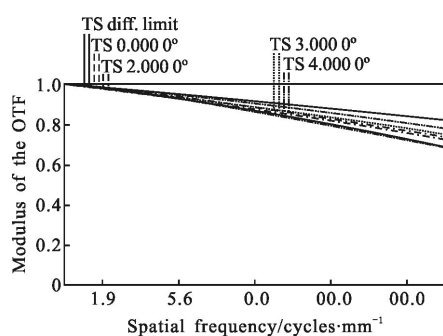
(a)  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时系统 MTF 曲线

(a) MTF of infrared objective in  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b)  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时系统 MTF 曲线

(b) MTF of infrared objective in  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c)  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  时系统 MTF 曲线

(c) MTF of infrared objective in  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 4 不同温度的 MTF

Fig.4 MTF under different temperatures

### 3 热成像实验

根据设计结果加工装调好的红外物镜实物如图 5 所示, 镜头长度为 95 mm, 口径为 75 mm。利用黑

体作为光源, 多缝靶标作为目标物, 在平行光管前对相机的 MTF 进行了实测, 测得相机的各个视场的 MTF 均大于 0.4, 中心视场甚至达到 0.45 以上。利用该相机进行外景成像功能测试, 获得的图像如图 6 所示, 窗户、阳台、空调线甚至倒影都清晰可见, 说明该中波红外相机具有非常高的成像质量。

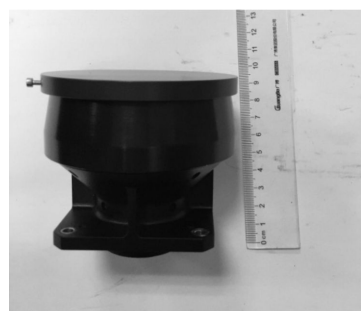


图 5 红外相机实物图

Fig.5 Real photo of infrared objective



图 6 中红外相机外景成像图

Fig.6 Exterior image of midwave infrared objective

### 4 结论

文中针对三分离式且孔径光阑作为出瞳的光学结构, 根据消色差消热差方程组, 推导了物镜的初始光焦度分配。通过计算机软件辅助分析, 设计了一款成像性能非常优良的消热差红外物镜。该物镜实现了冷光阑效率 100%, 在  $-20\sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内物镜像面漂移量在焦深范围内, 满足消热差要求。并利用相机对外景进行成像, 获得了非常高的成像质量。该物镜光学镜片少, 加工难度小, 透射率高且结构简单紧凑, 非常适合运用于机载轻量化光电系统。

### 参考文献:

[1] Meng Qingchao, Pan Guoqing, Zhang Yunqiang, et al. Design of athermalizing infrared optical system [J]. *Infrared and*

- Laser Engineering*, 2008, 37(S2): 723–725. (in Chinese)  
孟庆超, 潘国庆, 张运强, 等. 红外光学系统的无热化设计 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S2): 723–725.
- [2] Gao Duorui, Fu Qiang, Zhao Zhao, et al. Athermalized telephoto objective design for 8–12  $\mu\text{m}$  infrared wavelength [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (11): 3838–3039. (in Chinese)  
高铎瑞, 付强, 赵昭, 等. 摄远型红外 8–12  $\mu\text{m}$  波段消热差物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3838–3039.
- [3] Liu Lin, Chen Xinhua, Shen Weimin. Development of an athermalizationmidwave infrared telescopic-objective with fast speed[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(4): 418–421. (in Chinese)  
刘琳, 陈新华, 沈为民. 消热差大相对孔径中波红外望远物镜的研制[J]. 光学技术, 2011, 37(4): 418–421.
- [4] Chang Hong. Research on key techniques of thermo-optical stability for refractive infrared system [D]. HarBin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)  
常虹. 透射式红外系统热光学稳定性关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [5] Zhang Xin, Jia Hongguang. Optical design of infrared athermalized objective with large relative aperture [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(4): 375–376. (in Chinese)  
张鑫, 贾宏光. 大相对孔径红外消热差物镜设计 [J]. 中国光学, 2011, 4(4): 375–376.
- [6] Yu Linyao, Wei Qun, Zhang Xin, et al. Design of compact integral structure of two-mirror system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 562–563. (in Chinese)  
虞林瑶, 魏群, 张鑫, 等. 一体式紧凑型折反光学系统设计 [J]. 光学 精密工程, 2013, 21(3): 562–563.
- [7] Zhang Xin, Jia Hongguang, Zhang Yue. Optical design of athermalized infrared telephoto objective [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 178–183. (in Chinese)  
张鑫, 贾宏光, 张跃. 远距型红外消热差物镜设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 178–183.
- [8] Wu Xiaojing, MengJunhe. Approach of athermalizing infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(6): 573–574. (in Chinese)  
吴晓靖, 孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 573–574.
- [9] Bai Yuzhuo, Mu Rui, Ma Lin, et al. Design of infrared optical system with super-long focal length and dual field-of-view[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 632–633. (in Chinese)  
白玉琢, 木锐, 马琳, 等. 超长焦距红外双视场光学系统设计 [J]. 中国光学, 2014, 7(4): 632–633.
- [10] Cui Jicheng. Design of large aperture refractive zoom lens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16 (11): 2087 – 2088. (in Chinese)  
崔继承. 大口径折反射式变焦距物镜的设计 [J]. 光学 精密工程, 2008, 16(11): 2087–2088.