

双波段消热差红外鱼眼光学系统设计

付跃刚, 黄蕴涵, 刘智颖

(长春理工大学 测控分析中心, 吉林 长春 130022)

摘要: 双波段鱼眼红外光学系统可以获取中波和长波两波段的图像信息, 同时由于其大视场的特性, 可以大大增加目标信息获取范围。根据光学系统的设计要求对光学系统进行了设计, 全视场 196° , $4.4\sim 5.4\ \mu\text{m}/7.8\sim 8.8\ \mu\text{m}$ 波段内清晰成像, 考虑到冷光栏的制冷效应, $F\#$ 严格与冷光栏匹配, 达到 100% 的冷光栏效应。推导了大视场被动消热差公式, 通过对玻璃材料的优化选择, 达到了双波段消热差, 所设计的光学系统结构相对简单, 成像质量较好, 系统各个波段在 $-40\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 的工作温度下实现了消热差, 满足使用需求。

关键词: 鱼眼透镜; 双波段; 消热差; 光学设计

中图分类号: TN216 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)10-3329-05

Design of dual-band athermal infrared fisheye optical system

Fu Yuegang, Huang Yunhan, Liu Zhiying

(Monitoring and Analysis Center, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The dual-band infrared optical system can track the band information stretch from mid-wave infrared to long-wave infrared, which can greatly improved the information acquisition. A dual-band infrared optical system based on the compact principle was designed, the optical system can imaging clearly continuous from $4.4\sim 8.8\ \mu\text{m}/7.8\sim 8.8\ \mu\text{m}$, the $F\#$ strictly matched with cold light bar that the cold light bar effect reached 100%. While the system using the passive athermal methods to get rid of temperature compensation problem and finally realized the dual-band of athermalization. The result shows that: the design of the system structure is relatively simple, and can get stable good imaging quality in continuous bands from $-40\ ^\circ\text{C}$ to $60\ ^\circ\text{C}$, satisfying the requirements of a standard infrared thermal imager.

Key words: fisheye lens; dual-band; athermalization; optical design

收稿日期: 2014-02-20; 修订日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61108044)

作者简介: 付跃刚(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学设计及检测技术方面的研究。Email: Fuyg@cust.edu.cn

0 引言

鱼眼镜头是一种焦距极短且视场大于 180° 的镜头,相对于扫描式透镜,鱼眼透镜可以更快速、便捷地获取到全景信息,红外光学系统在现代目标识别与探索领域具有不可替代的作用,红外鱼眼探测器的出现,将会扩大对不同类型目标的探测能力以及对目标的探测范围。而红外探测环境的复杂多变又对红外镜头的热差特性提出了新的要求,所以,红外消热差鱼眼透镜的设计研究具有重要的意义^[1]。目前,国内现有的光学系统已经出现了鱼眼红外镜头,但并未涵盖双波段与消热差设计,国外文献显示已经有双波段的光学系统,但并未涉及鱼眼透镜以及温度像质变化特性^[2-4]。

文中所设计的 196° 双色消热差红外鱼眼光学系统共由 7 片透镜组成,采用一个非球面,结构简单,像面均匀性好,各个视场结构下成像质量好,各个视场相对照度均保证在 91% 以上,接收器采用法国 Sofradir 公司研制的双色量子阱探测器,工作波段为 $4.4\sim 5.4\ \mu\text{m}/7.8\sim 8.8\ \mu\text{m}$, $F\#$ 为 2.68。通过对透镜形式的合理选择及透镜之间的合理搭配,考虑到冷光阑匹配,使用前置光学系统加中继系统结构来实现,透镜口径小,结构简单,环境适应性强。

1 设计思路

在光学设计时一般要保证 F 数一直保持不变,与冷光阑严格相匹配,所以无论实现哪一个视场,均要保证 F 数不变^[5]。

鱼眼透镜面临的一个问题就是相对照度不高,在这里,鱼眼透镜起到折转光路的目的。一般鱼眼透镜前面透镜的作用相当于负透镜,而相对照度不好的关键原因在于光线通过前面负透镜的作用后,到达光瞳时产生巨大的慧差,使光线严重变形,光能继而大量缺失,如图 1 所示。因此文中在设计前组透镜时,在光阑前部加入负透镜进行矫正。

光学被动消热差是指在满足系统成像质量要求的同时,利用热膨胀系数之间的差异合理地分配光焦度,并使光学系统像面产生的离焦由镜筒材料产生的离焦相互补偿^[6]。

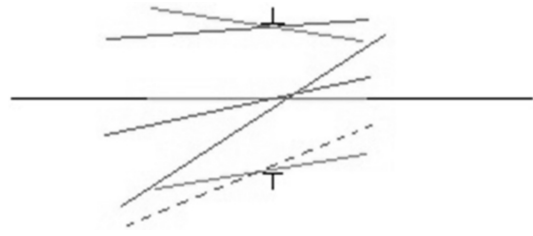


图 1 光线进入光阑时的形态

Fig.1 Status when light entry the pupil

在鱼眼透镜消热差的过程中,所面临的问题与小视场光路不同,大视场光路的轨迹与小视场之间的差异很大,当光学系统在小视场附近达到消热差时,大视场的消热差特性并不容易满足。所以,利用公式推导使光学系统同时满足大小视场消热差^[7]。

1.1 大视场消热差公式推导

设前置鱼眼系统分成 3 个组元,在不同视场时所遵循的光路也是不同的。

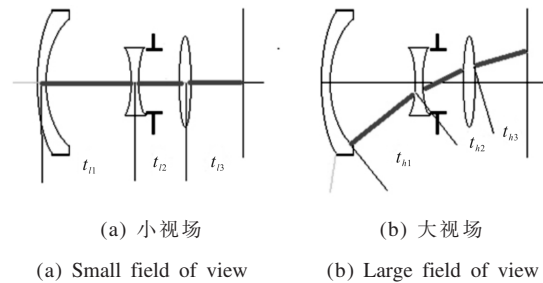


图 2 前置鱼眼系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of front fisheye optical system

根据焦距的组合公式: $\Phi_l = \Phi_{l2} + \Phi_{l3}(1 - \Phi_{l1}t_{l1} - \Phi_{l2}t_{l2})$,其中 $\Phi_{l(12)} = \Phi_{l1} + \Phi_{l2}(1 - \Phi_{l1}t_{l1})$,下角标 l 代表小视场,(12)代表第 1 组元与第 2 组元的组合。

对其进行温度求导, $\frac{d\Phi_l}{dT} = \chi_l \Phi_l$,导出两个必须满足的分别对应于大小视场的热差方程:

$$\left(\frac{f_1 - t_{l1}}{t_{l1}}\right) \left(\left(1 - \frac{f_1 - t_{l2}}{f_3}\right) - \frac{|\Phi_2|}{|\Phi_3|} \right) \chi_1 + \left(\frac{t_{l2}}{f_3}\right) \chi_2 + \frac{|\Phi_2|}{|\Phi_3|} \chi_3 = 0 \quad (1)$$

$$\left(\frac{f_1 - t_{h1}}{t_{h1}}\right) \left(\left(1 - \frac{t_{h2}}{f_3}\right) - \frac{|\Phi_2|}{|\Phi_3|} \right) \chi_1 + \left(\frac{t_{h2}}{f_3}\right) \chi_2 + \frac{|\Phi_2|}{|\Phi_3|} \chi_3 = 0 \quad (2)$$

式中:下角标 h 代表大视场。同时,在不同的视场下还有如下的色差方程:

$$\sum_{i=1}^n \chi_i \Phi_i = -\alpha_L \Phi \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{y_1} \frac{\Phi_i}{v_i} = 0 \quad (4)$$

式中: χ_i 为各镜组元的热膨胀系数; y_i 为打在各个镜面上的边缘光线高度; v_i 为各种玻璃材料的阿贝数; α_L 为镜筒材料的热膨胀系数。

公式(2)、(3)为了保障不同的视场下整体消热差,公式(3)、(4)分别保证筒长与色差都满足条件。在一个组元中,如果一个镜元难以实现这些功能,可以分成两个镜子组合进行实现,不同视场下均满足公式(1)~(4),合理选择玻璃后求解便可以得出一个合理的初始结构^[8]。

在设计中继系统时采用如下公式:

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = \Phi \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i}{v_i} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \chi_i \Phi_i = -\alpha_L \Phi \quad (7)$$

公式(5)为了保障整体光焦度,公式(6)保证消色差都满足条件,方程(7)先保证消热差。根据公式(6)~(7)合理选择玻璃后求解,便可以得出一个合理的初始结构。

1.2 设计指标

表 1 设计指标

Tab.1 Parameters of optical design

Parameter	Value
Wavelength band/ μm	4.4~5.4/7.8~8.8
Image surface size/mm	8.8
Field of view/($^\circ$)	196
Effective focal length/mm	4.83
$F\#$	2.68
Working temperature/ $^\circ\text{C}$	-40~60

2 设计结果及分析

根据技术指标要求,按照消色差理论进行初始估算^[9-10],结合 ZEMAX 光学软件对光学系统进行设计,并进行不同温度下视场及像质的分析。

宽波段消热差红外鱼眼透镜的最终设计结果如图 3 所示。整个系统由 8 片透镜组成,镜筒的材料考虑到成本问题采用铝合金,透镜主要由硅 (Si)、锗 (Ge) 及 AMTir3 等材料组成,只采用了一个非球面,

系统最大元件口径为 63 mm,系统总长 189.7 mm。工作时 F 数保持不变,保证冷光阑匹配。

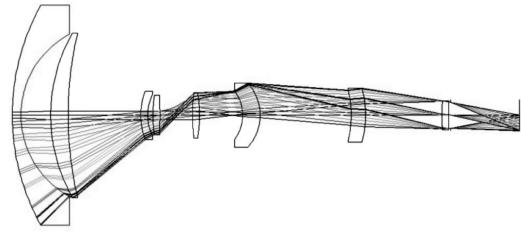
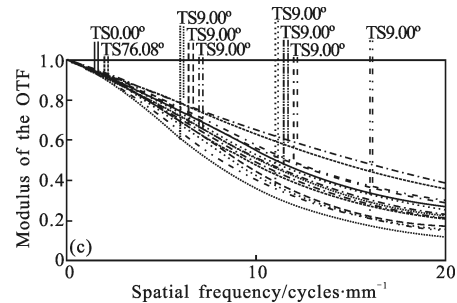
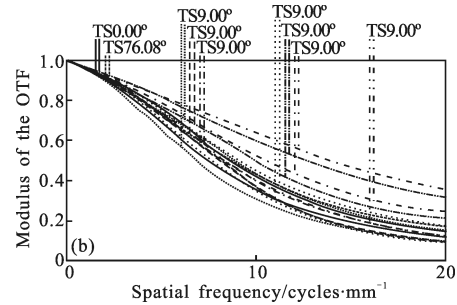
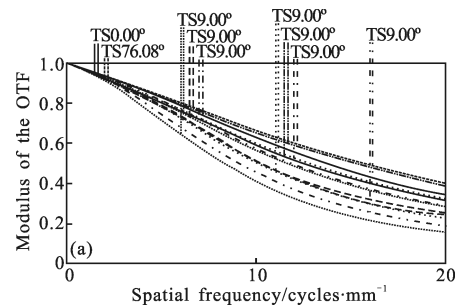


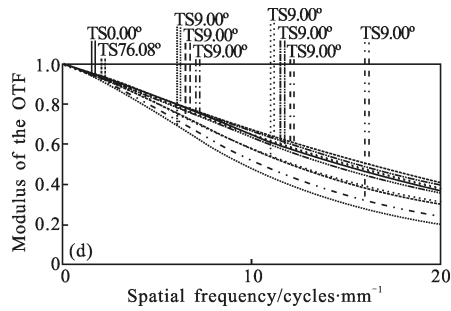
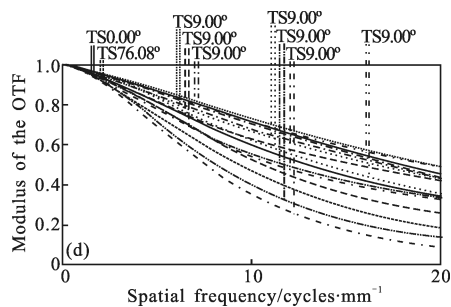
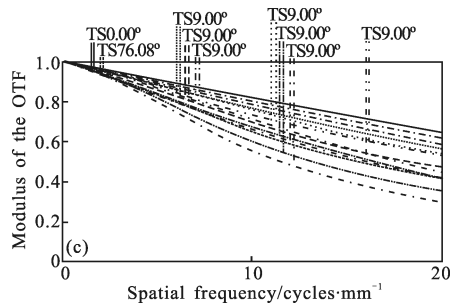
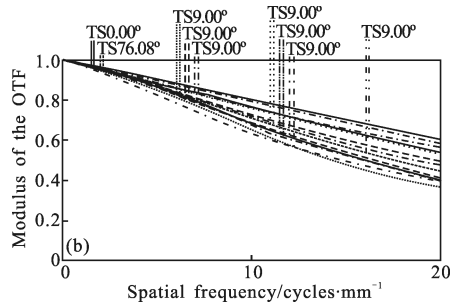
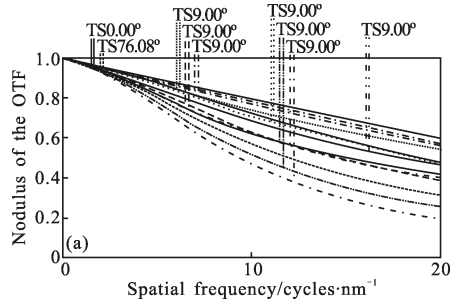
图 3 光学系统图

Fig.3 Schematic of optical system

经过优化设计,系统各个波段在-40~60 $^\circ\text{C}$ 温度下像面稳定,成像质量优良。图 4、图 5 分别为各个波段下不同温度的光学调制函数曲线,所示传递函数曲线分别为 20、-40、-10、60 $^\circ\text{C}$ 的情况。

长波红外波段在 20 lp/mm 处轴上各温度下的传递函数为 0.31、0.25、0.23、0.33,边缘分别为 0.21、0.23、0.18、0.25;中波红外波段在 20 lp/mm 处轴上各温度



图 4 7.7~8.8 μm 的 MTF 曲线Fig.4 MTF of 7.7~8.8 μm 图 5 4.4~5.4 μm 的 MTF 曲线Fig.5 MTF of 4.4~5.4 μm

下的传递函数为 0.48、0.51、0.45、0.52，边缘分别为 0.32、0.41、0.38、0.29，均满足环境适应性及像质要求。

图 6 为相对照度情况。由图可见，各个视场下的相对差异极小，对系统光能量损失影响不大。

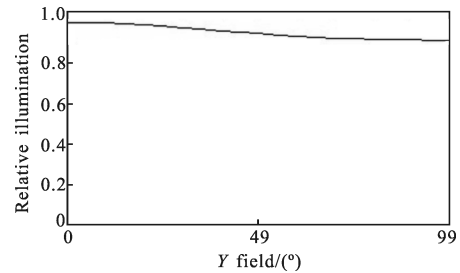


图 6 相对照度图

Fig.6 Relative illumination

3 结论

通过理论分析与推导，根据被动消热差理论，合理地选择透镜结构及透镜相对位置，设计了一款针对 Sofradir 公司研制的双色量子阱红外焦平面探测器的双色消热差红外鱼眼光学系统。 $F\#$ 为 2.68，可实现在 192° 的观察范围下、 $4.4\sim 5.4\ \mu\text{m}/7.8\sim 8.8\ \mu\text{m}$ 的波段、 $-40\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 范围内均有良好稳定的成像质量，并且只采用一个非球面，减小了加工的难度，具有结构简单、易于加工的优点。该系统适用于导航、探测、搜索工作中，在红外成像领域具有广阔的应用前景。

参考文献：

- [1] Wang Yongzhong. Some key problems about the design of IR thermal imaging fisheye lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34 (7): 1078-1080. (in Chinese)
王永仲. 红外热成像鱼镜头设计中若干特殊问题的处理 [J]. 光子学报, 2005, 34(7): 1078-1080.
- [2] Schreer O, Saenz M L, Peppermuller C, et al. Helicopter-borne dual-band dual-FPA system [C]//SPIE, 2003, 5074: 637-647.
- [3] Oelrich B D, Crastes A, Underwood C I, et al. Low-cost mid-wave IR microsatellite imager concept based on uncooled technology [C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5570: 209-217.
- [4] Saint-Pe O, Dubet D, Duthil P, et al. Study of an uncooled focal plane array for thermal observation of the Earth [C]// Proceedings of SPIE, 1998, 3436: 593-604.

- [5] Herve Geoffray, Francois Guerin. Measured performance of a low cost thermal infrared pushbroom camera based on uncooled microbolometer FPA for space applications [C]// Sensors, Systems and Next-Generation Satellites V, 2001: 298–308.
- [6] Oelrich B D, Stephen U C. The evaluation of uncooled detectors for low-cost thermal-IR earth observation at the Surrey Space Centre [R]. Guildford: Surrey Space Centre, 2005.
- [7] Yasuhisa Tamagawa, Toru Tajime. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart [J]. *Opt Eng*, 1996, 35(10): 3001–3006.
- [8] Akpam M N. Design of a dual field-of-view optical system for infrared focal-plane arrays [C]// SPIE, 2002, 4767: 13–23.
- [9] Wu Haiqing, Zhao Xinliang, Li Tonghai, et al. Design of diffractive/refractive infrared fisheye lens optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(8): 1533–1536. (in Chinese)
吴海清, 赵新亮, 李同海, 等. 折射/衍射红外鱼镜头光学系统设计 [J]. *光子学报*, 2010, 39(8): 1533–1536.
- [10] Smith W J. *Modern Optical Engineering* [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, translated. 4th ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 285–289.