

消旋检测装置的红外光学系统分析与设计

高明, 刘彦清, 吕宏, 倪晋平
(西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要:设计了一种用于检测机载制冷型 CCD 消旋机构的长波红外光学系统。采用二次成像的方法保证冷光阑效率,应用光学被动消热差原理实现宽温度范围内热差补偿;系统引入以非球面为基底的衍射元件校正像差,探讨了衍射元件面形误差对系统光学性能的影响。设计结果表明,系统结构紧凑,重量轻,在 $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$ 的宽温度范围内实现了光学被动消热差的目的,达到100%的冷光阑效率及抑制冷反射的效果。

关键词:消旋检测;制冷型;消热差;衍射元件

中图分类号:TH745 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.006

Analysis and design of infrared optical system in despun device

GAO Ming, LIU Yan-qing, LÜ Hong, NI Jin-ping
(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: A long-wave infrared optical system to detect the refrigeration type CCD for airborne despun device was designed. The re-imaging configuration was used to meet cold shield efficiency requirement, and optical passive athermalization principle was applied to achieve athermalization compensation with a wide range of temperature. The aberrations are corrected by the aspherical-diffraction element, and the effect of diffraction element shape error on the optical system is discussed. The design results show that this system has compact structure and light weight. It realizes the athermalization compensation in the temperature range of $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$. 100% cold aperture efficiency and the controlling cold reflection are also achieved.

Key words: eliminating image rotation; cooled thermal imaging; athermalization design; diffractive optical elements

1 引言

近年来,随着红外探测器技术的进步,红外成像技术日趋成熟,并开始应用于各种瞄准和跟踪系统。红外制冷型 CCD 探测器体积小、重量轻、易操作,与消旋机构结合可达到图像消旋的目的,因此在机载光电跟踪设备中得到了广泛应用^[1]。制冷型 CCD 探测器本身携带有冷光阑,光学系统设计时必须保证系统出瞳和探测器冷光阑位置一致且口径大小相等,达到100%的冷光阑效率;由于探测器的工作温度与环境温度相差很大,极易在探测器上形成冷反射像,因此设计中要考虑到冷反射的抑制^[2];为了平衡红外材料折射率温度系数和热膨胀系数随温度变化引起的离焦现象,还需要进行消热差设计^[3]。

目前国内外对制冷型红外系统的设计日益成熟,然而仅用两种材料实现光学被动消热差、消冷反射设计的制冷型红外系统还未见相关报道。

针对机载制冷型 CCD 消旋机构,利用二次成像的方法设计了一种长波红外光学系统。系统引入以非球面为基底的衍射元件校正像差,通过模拟计算,分析了衍射元件精度对系统光学性能的影响。

基金项目:国家自然科学基金(No. 60972005);陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2012JM8008)资助项目。

作者简介:高明(1964-),男,教授,理学博士,从事光学设计理论及技术、光电精密测试技术、光大气传输理论及技术的科学研究工作。E-mail: spdtlyq@163.com

收稿日期:2013-12-04; **修订日期:**2013-12-08

2 光学系统设计

2.1 系统设计要

消旋机构采用 640 × 512 阵列的长波红外制冷型 CCD 探测器,像元尺寸为 24 μm × 24 μm,冷光阑距像敏面 25.7 mm,直径 12.85 mm。针对所选探测器,为了在复杂作业环境下对消旋机构检测,确定光学系统主要技术指标如表 1 所示。

表 1 系统技术指标

工作波段/μm	7.7 ~ 9.5
焦距/mm	-120
视场/(°)	5
F/#	2
系统总长/mm	≤250
冷光阑效率/%	100
消热差范围/℃	-40 ~ 60

2.2 系统结构设计

综合考虑红外材料的折射率和折射率温度系数,选用 Ge 和 ZnS 作为系统透镜的材料组合。制冷型红外探测器通光孔径较小,为了满足消杂散光和抑制冷反射的要求,决定采用二次成像结构^[4]。如图 1 所示,系统分为物镜组和中继镜组两部分,近轴关系由公式(1)表示。

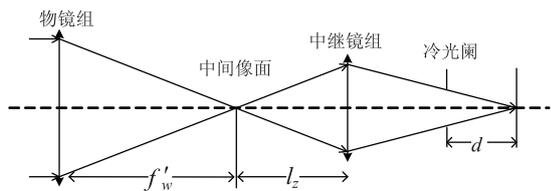


图 1 二次成像结构示意图

$$\begin{cases} \beta_z = \frac{ld + f'^2 - 2f'd}{f'(l-d)} \\ f'_w = \frac{f'^2(l-d)}{ld + f'^2 - 2f'd} \\ f'_z = \frac{fd(d-l)}{(d-f')^2} \\ l_z = \left(1 - \frac{1}{\beta_z}\right)f'_z \end{cases} \quad (1)$$

式中, f'_w, f'_z, f' 对应物镜组、中继镜组和系统的焦距; l_z, β_z 为中继镜组物距和垂轴放大率; l 为系统总长; d 为 CCD 的冷光阑到像面距离。

根据表 1 的技术指标,假设系统总长为 250 mm,由式(1)可以解得中继镜组垂轴放大率 $\beta_z = -0.55$,继而分别求得 f'_w, f'_z, l_z 值。这时可由得到的参数分别设计物镜组和中继镜组,再对二者拼接后构成完整的二次成像结构,然后利用 ZEMAX 软

件对整个系统结构进一步优化,使其满足系统性能指标的要求。

2.3 消热差设计

为了消除环境温度变化引起的离焦现象,系统采用光学被动消热差的方法,通过材料匹配、透镜曲率和间隔的变化实现系统热差补偿^[5],式(2)表示消除色散离焦和热离焦所满足的条件:

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{h_1\psi}\right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 \eta_i \psi_i) = 0 \\ \left(\frac{1}{h_1\psi}\right)^2 \sum_{i=1}^n (h_i^2 \chi_i \psi_i) + \alpha_j L = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, h_i 为近轴光线在第 i 个透镜的高度; ψ 为系统的光焦度; ψ_i 为第 i 个透镜的光焦度; η_i 为透镜的色散因子; χ_i 为热膨胀系数; α_j 为镜筒机械结构的热膨胀系数; L 为镜筒长度。由式(2)可知,当色散离焦量为零而且透镜热离焦量与机械结构热离焦量相互抵消时,才能实现系统的光学被动消热差。

2.4 冷反射的抑制

本系统通过在光学设计阶段控制 YNI 的量值来实现:

$$YNI = y \times n \times i \quad (3)$$

式中, y 代表近轴光线在某一面的入射高度; n 为折射率; i 为边缘光线在此面的入射角度。YNI 的绝对值越小,透镜表面反射聚焦到探测器的冷反射像越集中;当 $|YNI| \geq 1$ 时,透镜表面反射到探测器的冷反射像发散或离焦,可以忽略冷反射像对系统像质的影响^[6]。

2.5 设计结果及像质分析

在系统第 10 面上采用以非球面为基底的衍射面,通过优化整个系统结构,最终得到的光学系统二维布局如图 2 所示。系统由物镜组和中继镜组两部分构成,共 7 片透镜,总长 245 mm。中继镜组以物镜组的像面作为物面实现二次聚焦成像,其后面为 CCD 的固有结构。

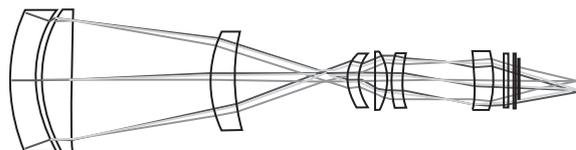
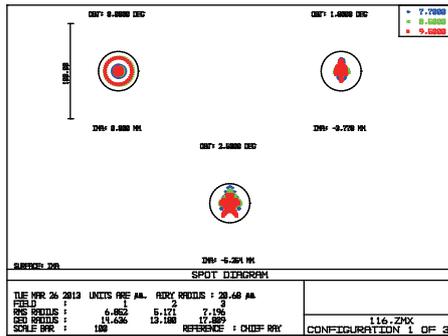


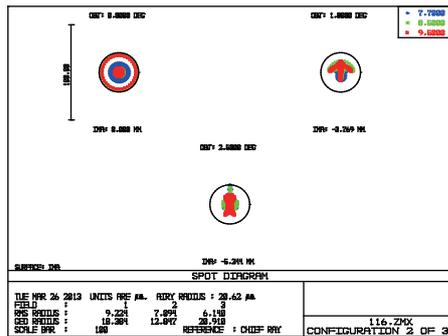
图 2 光学系统二维布局图

系统点列图如图 3 所示。图 3(a)、图 3(b)、图 3(c) 分别代表 20℃, -40℃, 60℃ 时点列斑大小。黑色圆圈代表艾里斑直径,约为 20.6 μm,在 0 视场、0.7 视场、1 视场下弥散斑大小均小于艾里斑直

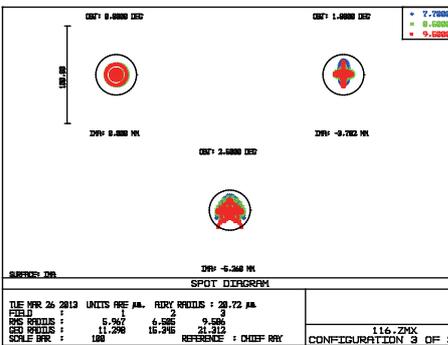
径,同样小于制冷型 CCD 探测器一个像元大小,能量集中。



(a) 20°C 时点列图



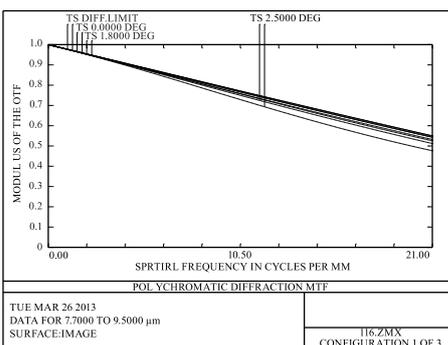
(b) -40°C 时点列图



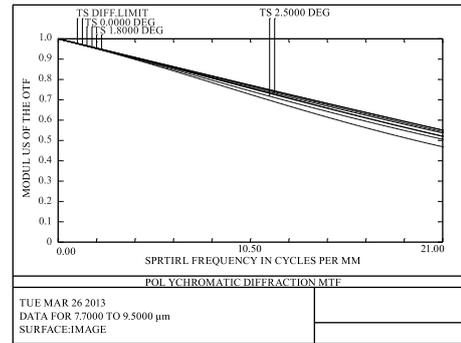
(c) 60°C 时点列图

图3 点列图

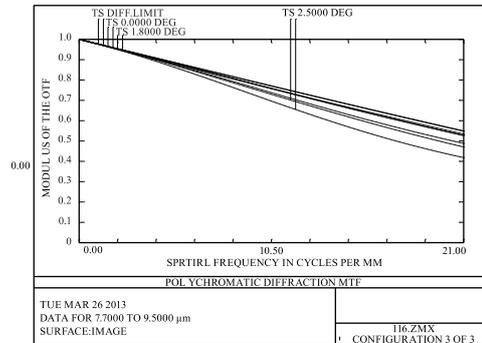
图4(a)、图4(b)、图4(c)表示在20°C, -40°C, 60°C情况下的光学系统调制传递函数(MTF)曲线,可以看出在21 lp/mm(Nyquist 频率)位置光学系统 MTF 值约为0.5,接近衍射极限。



(a) 20°C 时 MTF 曲线



(b) -40°C 时 MTF 曲线



(c) 60°C 时 MTF 曲线

图4 MTF 曲线

根据瑞利原则,温度变化造成的像面离焦与系统焦深有以下关系^[7]:

$$\Delta L \leq \pm 2\lambda_D (f'/D)^2 \tag{4}$$

其中, D 为入瞳直径; f' 为系统焦距。由式(4)计算可得焦深为 $68.8 \mu\text{m}$ 。分析得出,系统在 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 温度范围内最大离焦量为 $17 \mu\text{m}$,远小于系统焦深。

表征冷反射大小的 YNI 量值如表 2,可以看到透镜各表面均满足 $|YNI| > 1$,因此反射到 CCD 光敏面上的冷反射像不会对系统正常成像造成干扰。

表 2 系统透镜表面 YNI 值

Surf	YNI	Surf	YNI
1	11.006844	8	2.614687
2	19.813761	9	1.973673
3	18.466082	10	-1.098383
4	-4.253535	11	-1.985234
5	1.757976	12	-3.832137
6	-2.152368	13	-1.918122
7	2.489332	14	-1.891131

3 衍射元件精度分析

衍射元件的面型精度是评判衍射元件质量的主要因素。随着面型误差的增大,波面偏差也随之增大。式(5)表示在 (x, y, z) 坐标系下,以非球面为基底的衍射面面型:

$$Z = \frac{r^2}{R^2} + A_4 r^4 + A_6 r^6 + \dots + A_N r^n + \frac{r^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \frac{r^2}{R^2}}}$$

$$\frac{2}{N_m - 1} \left[B_2 r^2 + B_4 r^4 + \dots + B_N r^n - \text{Int} \left(\frac{\Phi(r)}{2\pi} \right) \lambda_m \right] \quad (5)$$

其中, Z 对应矢高; $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; R 为顶点曲率半径; A_4, A_6 等为非球面系数; K 为二次曲面系数; B_2, B_4 等为相位系数; λ_m 为中心波长; N_m 为对应 λ_m 的折射率; $\text{Int}(x)$ 表示取整函数。

为了分析面形误差对光学性能的影响, 在式(5)上叠加一个余弦函数模拟衍射面的面形误差, 带有面形误差的衍射面可表示为:

$$Z = \frac{\frac{r^2}{R^2}}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \frac{r^2}{R^2}}} + A_4 r^4 + A_6 r^6 + \dots + A_N r^n + \frac{2}{N_m - 1} \left[B_2 r^2 + B_4 r^4 + \dots + B_N r^n - \text{Int} \left(\frac{\Phi(r)}{2\pi} \right) \lambda_m \right] + H \cos(2k\pi x) \quad (6)$$

式中, H 代表面形误差振幅; k 是余弦函数的频率。

利用 Zernike 多项式拟合, 得出光线经衍射面后实际波阵面与理想波阵面的偏差。波面偏差图如图 5(a)、(b) 所示, 分别代表衍射面面形误差值 H 为 0.1、0.4 时对应的波面偏差。由图 5(a)、(b) 对比可得, 实际波阵面与理想波阵面偏差随面形误差幅值增加逐渐增大。

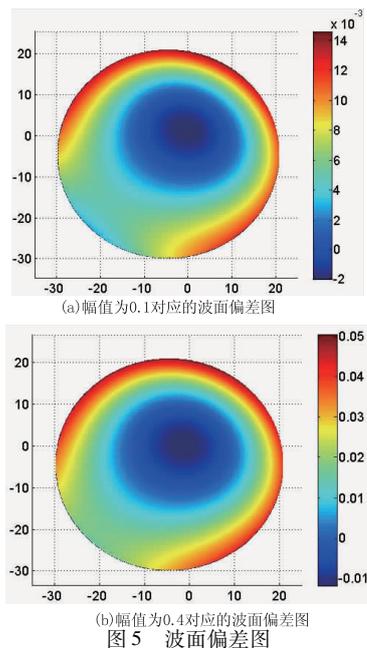


图5 波面偏差图

分析可知, 衍射面面形误差会导致成像系统的光学性能降低, 衍射元件的面型精度对系统成像质量尤为重要。

4 结论

本文设计了一种用于消旋机构检测的制冷型红外光学系统, 仅用 Ge 和 ZnS 两种常规材料, 实现了

-40 ~ 60°C 宽温度范围内系统消热差。研究发现, 衍射元件的面型误差是影响像质的重要因素。通过优化, 系统出瞳位于像面前 25.7 mm 处, 直径 12.85 mm, 与制冷型 CCD 冷光阑完全重合, 满足 100% 冷光阑效率; 系统各面冷反射控制量 $|YNI| > 1$, 冷反射得到很好的抑制; 系统调制传递函数在 Nyquist 频率处值约为 0.5, 接近衍射极限。

参考文献:

- [1] Wang Dai, Li Xiaoyan, Wu Qinzhang. Design of eliminating image rotation on opto-electronic imaging tracking and measuring device [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(1): 108 - 112. (in Chinese)
王岱, 李晓燕, 吴钦章. 某光测设备上消像旋的设计 [J]. 光电工程, 2012, 39(1): 108 - 112.
- [2] Yang Zheng, Qu Enshi, Cao Jianzhong, et al. The narcissus study in the optical system for the infrared staring array [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(1): 35 - 38. (in Chinese)
杨正, 屈恩世, 曹剑中, 等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(1): 35 - 38.
- [3] Meng Qingchao, Pan Guoqing, Zhang Yunqiang, et al. Design of athermalizing infrared optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37 (Supplement): 723 - 727. (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(增刊): 723 - 727.
- [4] Luo Jinping, Wang Helong, Liu Xin, et al. Passive optical athermalization design in re-imaging optical system [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(4): 85 - 88. (in Chinese)
罗金平, 王合龙, 刘欣, 等. 二次成像光学被动无热化设计 [J]. 电光与控制, 2012, 19(4): 85 - 88.
- [5] Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized and achromatized refractive/diffractive infrared hybrid optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(11): 1364 - 1367. (in Chinese)
焦明印, 冯卓祥. 采用衍射元件实现消热差的混合红外光学系统 [J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1364 - 1367.
- [6] James W Howard. Narcissus: reflections on retroreflections in thermal imaging systems [J]. Applied Optics, 1982, 21(18): 3393 - 3397.
- [7] Yu Yang, Jin Yaping, Pan Zhaoxin, et al. Athermal design of cooled LWIR optical system with extensive temperature range [J]. Infrared Technology, 2011, 33(10): 585 - 587. (in Chinese)
于洋, 金亚平, 潘兆鑫, 等. 长波红外制冷型光学系统超宽温消热差设计 [J]. 红外技术, 2011, 33(10): 585 - 587.