

基于相位补偿的低温光学系统常温装调方法研究

彭晴晴, 骆守俊, 何伍斌

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 基于对红外光学系统的热分析, 提出一种低温光学系统的常温装调方法。在常温装调时为系统引入额外的相位板来补偿低温系统在常温时产生的离焦和表面变形。通过热分析获得离焦量和表面变形数据, 设计出合适的相位板进行补偿, 从而可以实现低温光学系统在常温环境下的正常装调和测试。

关键词: 热分析; 低温光学; 常温装调; 相位补偿

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.04.018

Assembling and alignment of cryogenic optical system at room temperature based on phase compensation

PENG Qing-qing, LUO Shou-jun, HE Wu-bin

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Based on the thermal analysis of infrared optical system, a novel assembling and alignment method of cryogenic optical system is introduced. When assembled and adjusted at room temperature, an additional phase board is set in the system to compensate the defocusing and surface changes. The data of defocusing and surface changes can be acquired by thermal analysis in advance. The suitable phase board is designed to compensate the changes. By this way, the normal assembling and testing of cryogenic optical system at room temperature can be realized.

Key words: thermal analysis; cryogenic optics; assembling in room temperature; phase compensation

1 引言

为提高空间光学的探测灵敏度, 越来越多的空间技术开始研究应用于低温环境的光学遥感器。尤其在深空探测中, 红外系统在深空低温环境(低于4 K)中对弱暗点目标进行探测, 系统本身热辐射产生的杂散辐射背景会严重降低系统灵敏度^[1]。因此为提高灵敏度, 光学系统需在低温环境中运行^[2]。

当空间光学系统在地面装调完成进入空间低温环境运行时, 由于温度变化、重力场不同等, 常温装调后的系统将会发生严重的刚体位移和表面变形, 刚体位移会引起光学系统成像的倾斜和离焦, 表面变形则将影响系统的波像差^[3-4], 从而大大地降低成像质量, 甚至不能够进行探测。因此研究低温光

学系统如何在常温进行装调就成为一种必要。

2 低温光学装调方法

传统的低温光学装调方法主要有两类。一是无热化设计, 在温度变化时选取合适材料保证光学零件与机械零件均匀地膨胀和收缩, 使离焦量为零。其主要用于全反射系统中, 如欧洲 IRAS 望远镜与 Spitzer 望远镜的反射镜与主要结构零件都采用金属铍制成^[5]; 中科院成都光电所提出全部采用铝合金材料的低温红外光学系统^[6]。然而此方法对材料选择要求十分严格。另一方法为利用机械调焦装置控制光学零件位置, 在光学系统降至低温后通过改

作者简介: 彭晴晴(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为红外光学系统设计。E-mail: jenny-pq@hotmail.com

收稿日期: 2012-09-18

变元件间隔消除温度变化引起的离焦量^[7]。此方法需采用复杂的低温调焦结构,特别是低温光学系统工作温度低于 100 K 时,对调焦机构的环境适用性挑战更大。上海技术物理研究所提出采用光学平板补偿离焦的低温装调方法^[8]。但以上几种方式只补偿了像面离焦,而没有补偿由于温度变化产生的波像差,从而也没有改善下降的成像质量。

为了解决上述问题,本文提出一种采用相位板的低温光学系统常温装调方法。通过在常温下的光学系统中引入二元相位板,来补偿空间低温光学系统在常温装调环境下产生的刚体位移和表面变形,进而补偿常温相对于低温产生的离焦和波像差,从而实现空间低温光学系统在常温下的装调和测试。

3 二元相位板

自美国 MIT Lincoln 实验室提出二元光学的概念后,衍射光学元件在国际上得到了迅速发展。二元相位板是一种对光波的波前进行相位调制的衍射光学元件。越来越多的光学系统通过采用相位调制器件对光波的波前进行相位调制从而改善成像质量,比如发展迅速的常用于天文学和眼底成像的自适应光学系统^[9-10]、致力于轻小型发展方向的大视场可变分辨率成像系统等^[11]。

本文采用二元光学元件的相位调制功能,对低温光学系统在常温环境下产生的波像差进行相位补偿,从而实现低温光学系统在常温下的等效装调。

4 系统建模和分析

要获取补偿的离焦量和相位面需要对光学系统进行热分析。通过对空间低温设计的光学系统在地面常温环境的变化进行有限元分析和热分析,得到其变形数据。采用 Zernike 多项式对变形数据进行拟合,从而得到可在光学分析软件中读取的面形变化数据,对光学像质进行评价。然后针对在常温中发生变化的焦面偏移和表面变形进行补偿,不改变光学系统参数而只控制相位板进行优化,得到焦面位置和成像质量与低温环境一致的常温系统。

本文为简化条件只针对温度变化,通过热分析获得红外光学系统在常温 20 °C 与低温 -90 °C 的离焦量和像质变化。

4.1 原始常温 20 °C 设计与低温 -90 °C 变形

图 1 为进行分析的红外光学系统在常温 20 °C 下的结构图及 MTF 曲线。在 20 lp/mm 处 MTF 约为 0.56。

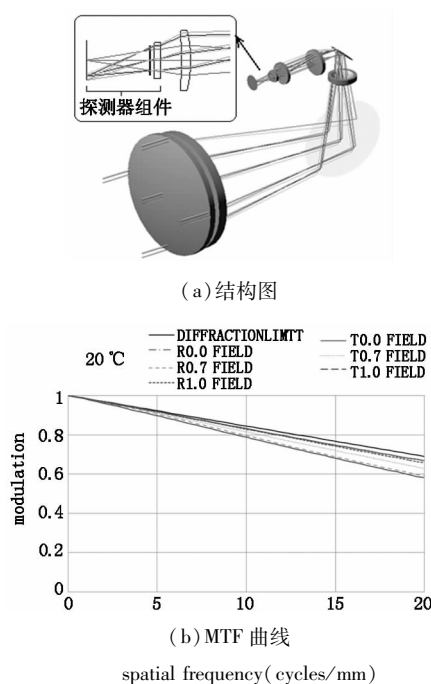


图 1 红外光学系统原始常温设计结构图及 MTF

合适设置光学系统所用材料的热膨胀系数、折射率变化率等,对常温 20 °C 和低温 -90 °C 时的系统进行热分析,得到系统在低温 -90 °C 相对于常温的离焦和像质变化,如图 2 所示。表 1 为原始常温设计及其在低温环境发生变形后的 MTF 值对比。

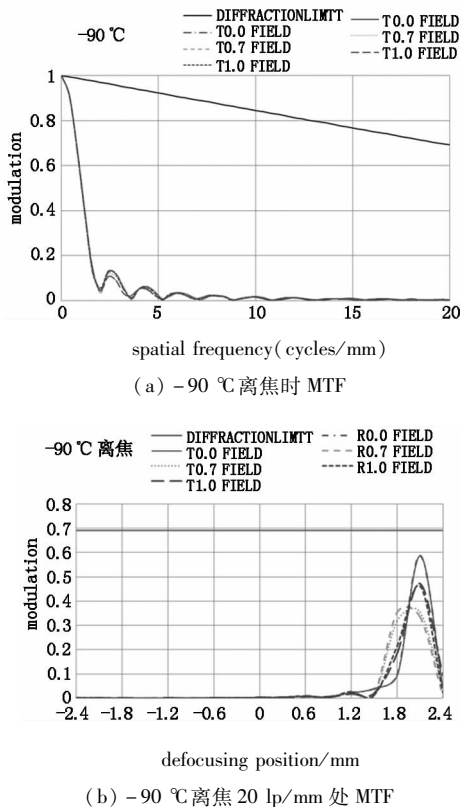


图 2 常温系统在低温 -90 °C 环境中像质变化和离焦

表1 原始常温设计及在低温变形后的MTF值对比

20 lp/mm	原始常温设计	低温变形在常温焦面处	低温离焦约2 mm处
MTF	0.56	0.001	0.4

由图1和图2可知,在常温下设计和正常装调后的系统,在进入低温环境后将会发生严重的像面离焦和像质恶化,即使在最佳焦面位置其MTF也不高于0.4。因此有必要对低温光学系统在常温的装调进行补偿。

4.2 低温-90℃设计及其在常温下的变形

对低温-90℃的系统调整焦面和优化像质,得到低温-90℃时的最佳焦面位置 and 良好成像质量,如图3所示,MTF约为0.55;此时系统在常温20℃下的离焦和像质变化如图4所示,在低温环境像质良好的系统在常温20℃下会发生严重的离焦和像质恶化。

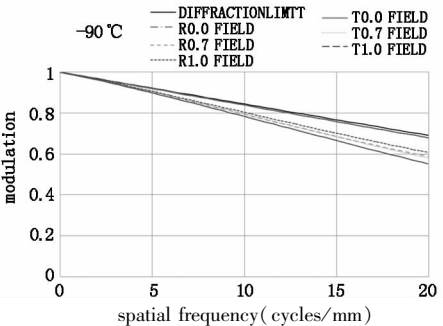
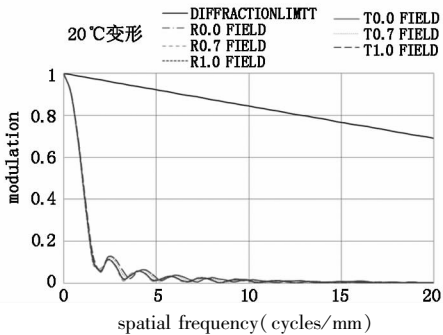
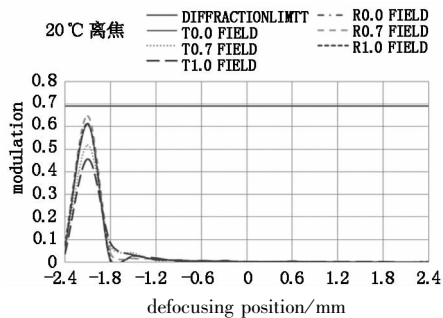


图3 在低温-90℃进行设计和优化的系统MTF



(a) 20℃离焦时MTF



(b) 20℃离焦20 lp/mm处MTF

图4 低温-90℃正常工作的系统在常温20℃下的像质变化和离焦

表2 原始低温设计及在常温变形后的MTF值对比

20 lp/mm	原始低温设计	常温变形在低温焦面处	常温离焦约-2.2 mm处
MTF	0.55	0.002	0.45

4.3 对常温20℃发生变形的系统进行相位补偿

为了使在常温20℃装调的系统可以在低温-90℃运行环境中获得最佳像面和成像质量,需要在常温下获得与低温正常工作等效的系统,同时又不改变系统的其他参数。为此,我们在系统探测器组件的前面放置一块采用锗材料的相位板,如图5所示。相位板的厚度可以补偿低温系统在常温环境的离焦,而相位板引入的相位变化可以补偿低温系统在常温环境产生的波像差从而补偿像质的变化。

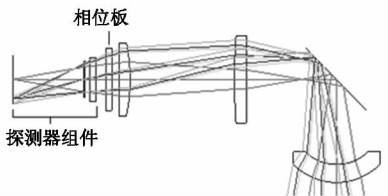


图5 常温20℃离焦系统加入相位板补偿后的系统

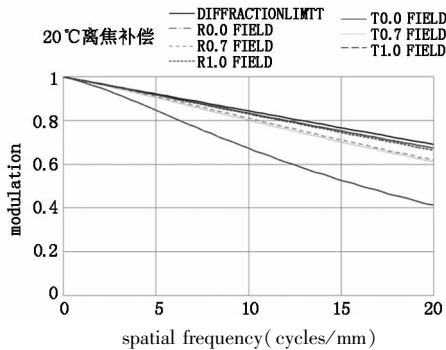
平行平板可以使像面位置发生一定距离的移动从而对像面离焦进行补偿。此处的相位板既是平行平板又可以改变相位来补偿常温下产生的额外波像差以及平行平板本身引入的像差。将相位板放置在红外探测器窗口的前面,其可以产生的焦面位移为:

$$a = L - \frac{L}{n}$$

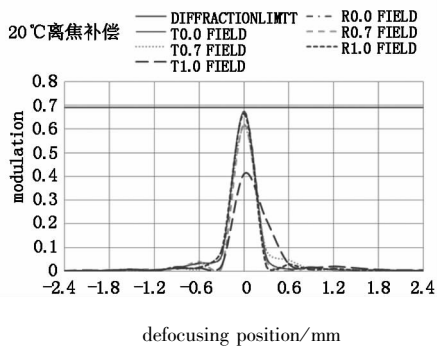
其中, L 为相位板的厚度; n 为锗材料在常温下的折射率($n=4.024610$)。由热分析可得到低温系统在常温环境的离焦量为-2.02 mm。因此用相位板产生的焦面位移($a=2.02$ mm)来补偿时,相位板的厚度为:

$$L = \frac{na}{n-1} = 2.6878 \text{ mm}$$

如图6所示,只进行离焦补偿时常温下系统的MTF在20 lp/mm约为0.4,与低温运行环境中的像质相比仍旧不够完善。如果考虑更多的地面装调与空间低温环境的不同影响因素,将会产生更严重的像质下降。因此,为了获得空间低温系统的地面等效系统,除了离焦补偿,对像质下降进行相位补偿也是非常必要的。



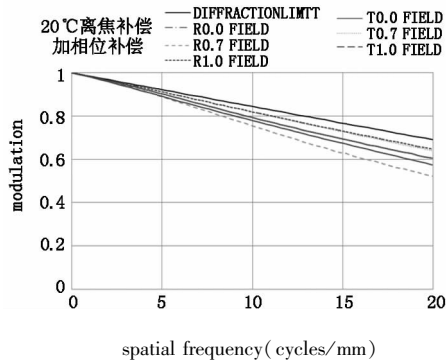
(a) 补偿后 MTF



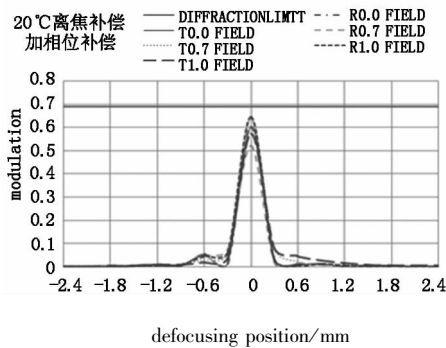
(b) 补偿后 20 lp/mm 处 MTF

图 6 只对常温系统进行离焦补偿的 MTF

对引入的相位板进行优化来获得合适的相位补偿。如图 7 所示,常温环境下系统通过相位板进行离焦补偿和相位补偿后,MTF 在 20 lp/mm 达到了 0.55,与空间低温运行环境的成像质量基本一致。



(a) 补偿后 MTF



(b) 补偿后 20 lp/mm 处 MTF

图 7 进行离焦补偿和相位补偿后的常温下 MTF

如表 3 所示为引入的相位板补偿参数,相位板采用旋转对称式,只使用了两阶参数,以便于降低加工难度和成本;且锗材料折射率较大,可以用相对薄的相位板实现离焦补偿。

表 3 相位板的补偿参数

Diffraction Order	C1	C2
1	-1.0516×10^{-17}	-3.0319×10^{-7}

表 4 原始低温设计、常温离焦补偿、常温离焦加相位补偿 MTF 对比

20 lp/mm	原始低温设计	常温离焦补偿	常温离焦加相位补偿
MTF	0.55	0.46	0.55

由以上分析得出结论:在常温装调时系统中引入此相位板,将系统装调到最佳焦面和最佳成像质量;当系统进入空间低温运行环境时,去除相位板,即可获得同样的最佳像面和成像品质。如将相位板设计为可任意切入切出的模式,那么该系统便可以实现地面常温和空间低温环境中都能正常运作的多功能系统。

5 结 论

由于光学系统在地面常温下装配完成之后,在空间低温环境使用的情况下必然会产生最佳像面发生位移和光学成像质量下降等影响,而在低温真空环境中进行装调和测试又存在很大的困难,在当前技术条件下还很难实现,因此研究在地面常温环境下进行低温光学系统的装调就十分必要。本文提出了一种采用相位板进行离焦补偿和像质补偿的对低温系统在常温环境下进行装调的方法,并对红外光学系统进行热分析和离焦补偿、相位补偿分析,在理论上证明了这种装调方法的可行性。

参考文献:

[1] Xiao Fugen, Liu Guoqing. The application of cryogenic engineering in aerospace [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2002, 19(3): 10-19. (in Chinese)
肖福根, 刘国青. 低温技术在航天领域的应用[J]. 航天器环境工程, 2002, 19(3): 10-19.
[2] Li Qikai. Zernike polynomials fitting in cryogenic optical thermal integration analysis [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(4): 45-50. (in Chinese)
李其锴. Zernike 多项式拟合用于低温光学镜头热集成分析[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(4): 45-50.
[3] Yang Jiawen, Huang Qiaolin, Han Youmin. Application and simulation in fitting optical surface with zernike poly-

- nomial [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2010, 31(5):49-55. (in Chinese)
- 杨佳文, 黄巧林, 韩友民. Zernik 多项式在拟合光学表面面形中的应用及仿真[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(5):49-55.
- [4] Yang Yi, Zhang Wei, Chen shijin. Study on data transmission tool for thermal/structural/optical integrated analysis [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(2):201-205. (in Chinese)
- 杨铎, 张伟, 陈时锦. 光机热集成分析中数据转换接口的研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(2):201-205.
- [5] Schreiber M, Young P. Design of infrared astronomical satellite (IRAS) primary mirror mounts [J]. Proc. SPIE, 1980, 250(10):50-58.
- [6] Shen Mangzuo, Ma Wenli, Liao Sheng. Cryogenic infrared optical system; China, 96233926. 1 [P]. 1996-10-23 (in Chinese)
- 沈忙作, 马文礼, 廖胜. 低温红外光学系统: 中国, 96233926. 1 [P]. 1996-10-23.
- [7] Paul R Yoder. Opto-mechanical system design [M]. 3rd. ed. Washington: CRC Press Taylor & Francis Group, 2006.
- [8] Liu Yinnian, Ding Xuezhuan, Sun Dexin, et al. A cryogenic optical alignment method with optical parallel flat; China, 201010284483. 4 [P]. 2010-09-17. (in Chinese)
- 刘银年, 丁学专, 孙德新, 等. 一种光学平板补偿离焦的低温光学装调方法: 中国, 201010284483. 4 [P]. 2010-09-17.
- [9] R K Tyson. Introduction to adaptive optics [M]. Washington: SPIE Press, 2000.
- [10] V P Lukin, P F Schippnick. Atmospheric adaptive optics [M]. Washington: SPIE Press, 1995.
- [11] Qingqing P, Jun Chang, Shulong Feng, et al. Reflective fo-veated optical imaging system based on liquid crystal spatial light modulator [C]. Proc. SPIE, 2010, 7849, 784911-1-7.