

文章编号: 0253-2239(2001)02-202-04

低温光学系统的研制

沈忙作 马文礼 廖 胜 张晓宏

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘要: 低温光学系统对于在空间探测微弱红外目标有重要的意义。无热效应的光学系统设计保证光学系统的像质不受温度变化的影响。有限元分析方法的优化设计,在确保光学性能的前提下使系统的重量达到最轻。特殊的制造工艺充分消除零件内部应力。低温检测的结果表明,光学系统的温度从室温降到 100 K 的低温,在温度变化 185 K 的条件下,系统波面误差几乎没有变化,光学系统都能达到衍射极限的成像质量。

关键词: 低温光学系统; 红外光学; 光学检测

中图分类号: TH74 文献标识码: A

1 引 言

红外探测系统的探测能力,当探测器本身的噪声很小时,实际上受到背景辐射噪声的限制。在大气层外空间工作的红外系统,由于空间背景的平均温度很低(4 K),光学系统本身的热辐射成了红外探测系统的主要热背景来源。为了实现更高灵敏度的红外探测,必须降低光学系统本身的温度。工作在低温条件下的低温光学系统,其设计、制造和检测,与常规的光学系统有很大的不同,研制难度大,是一类新的特殊光学系统。低温光学系统从 70 年代末问世以来,在空间红外目标的观测中得到了广泛的应用,促进了技术的发展。低温光学系统的致冷温度从液氮温度(77 K)发展到液氦温度(2 K),探测波长扩展到十几至几十微米,光学系统的口径小到 10 cm 量级,大至 1 m 左右的都有^[1~3]。

本文将介绍我国第一个低温光学系统的研制情况。该系统的主要技术指标是:口径 180 mm,焦距 500 mm,视场 $1^\circ \times 1^\circ$,工作温度小于等于 100 K,光学系统质量 2.5 kg,工作波段 8~14 μm ,成像质量达到衍射极限。

2 低温光学系统的设计

2.1 无热效应设计原理

我们研制的低温光学系统的工作温度为 100 K,接近液氮的温度,与室温 300 K 的温差达到 200 K 之多。研制低温光学系统合理的途径是在室温下

制造,检验合格,而让它在低温下仍能保证其满意的成像质量。所以,需要研制的光学系统,实际上是一个在很大温度范围内都能正常工作并维持衍射极限成像的特殊光学系统,低温光学系统设计必须遵循无热效应的设计原则:

1) 全反射光学系统。光学系统全部由反射镜组成,光线不进入光学元件的内部,从而避免了材料内部的光学特性(折射率)在温度变化范围大时的检测与控制的问题;

2) 所有光学系统中的光学元件与结构元件都用同一种材料制造。当温度降低时,整个光学系统都按相同的比例收缩,它的成像质量和焦面位置都保持不变,温度的变化从原理上对光学系统的成像没有影响。

2.2 双反射镜系统的光学设计

由于光学系统的视场较大,达到 $1^\circ \times 1^\circ$,对角线 1.4° 。一般卡塞格林式系统已经不能满足其成像质量的要求,所以低温光学系统采用的是典型的里泰-克雷蒂安(Rithey-Chretien,简称 R-C)全反射光学系统。它的主镜和次镜都是双曲面,系统的入瞳位于主镜的前方,如图 1 所示。光学系统的后工作距离较长,以便在主镜后面安排红外探测器等部件。

全反射光学系统没有色差。利用主、次镜两个二次曲面,在保证焦距的条件下,可以校正球差与彗差,使得在整个视场中获得衍射极限的成像质量。图 2(a)的系统点列图显示,在全部视场内,像点的大小基本上不超过中央衍射斑的范围。不同视场处的系统调制传递函数(MTF),基本接近系统的衍射极限值,见图 2(b)。系统调制传递函数曲线的中间

凹陷,是由于光学系统中央遮拦的缘故。

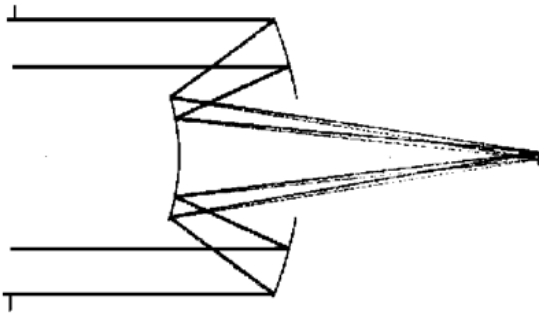


Fig. 1 Rithey-Chretien two-mirror optical system layout

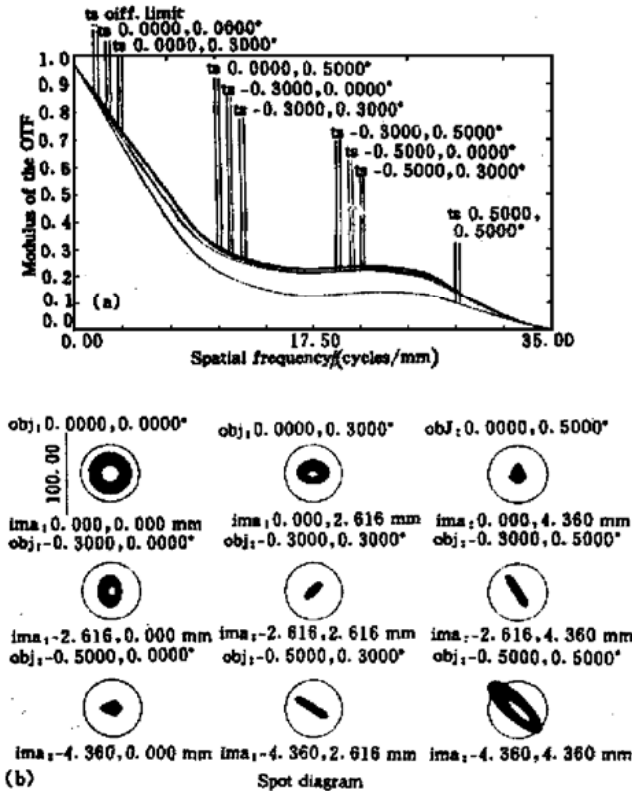


Fig. 2 Optical design results of the system (a) MTF; (b) Spot diagrams

2.3 有限元分析优化结构设计

整个低温光学系统由主镜、次镜、支架和基板四个部件构成,支架用来固定次镜,而基板则是整个光学系统的联接件。根据无热效应的设计原理,它们全部用同一种材料铝合金制造(图3)。



Fig. 3 Outlook of the cryogenic optical system

设计的低温光学系统,不仅要求成像质量好,结构稳定,耐冲击震动,能经受降温过程中系统内部温度梯度引起的热负载,而且系统的重量有苛刻的限制。这些互相矛盾的技术要求,对光学系统的结构设计,提出了新的挑战。

有限元分析法能精确计算光学系统的镜面和构件,以及在外力和温度载荷下的变形和应力。用有限元方法进行机械结构的优化设计,能够综合平衡系统重量和光学系统刚度之间的矛盾,在保证系统的低温光学性能前提下,使系统的重量最小。设计时要考虑光学系统在受外力(重力、加工力、运输过程中的冲击力)和降温过程中内部温差所造成零件的变形和应力。零件变形与应力校验的判据是:(i)在工作状态下,零件的变形不超过光学系统成像质量对光学镜面变形与镜面间相对位置变化所要求的公差;(ii)光学系统在加工、装配、运输等非工作状态下的应力,不超过材料的微屈服极限(对应的应变是 10^{-6}),使得系统内部不产生不可恢复的变形。

光学系统中要求最严格的是主镜,图4为主镜有限元分析的例子。

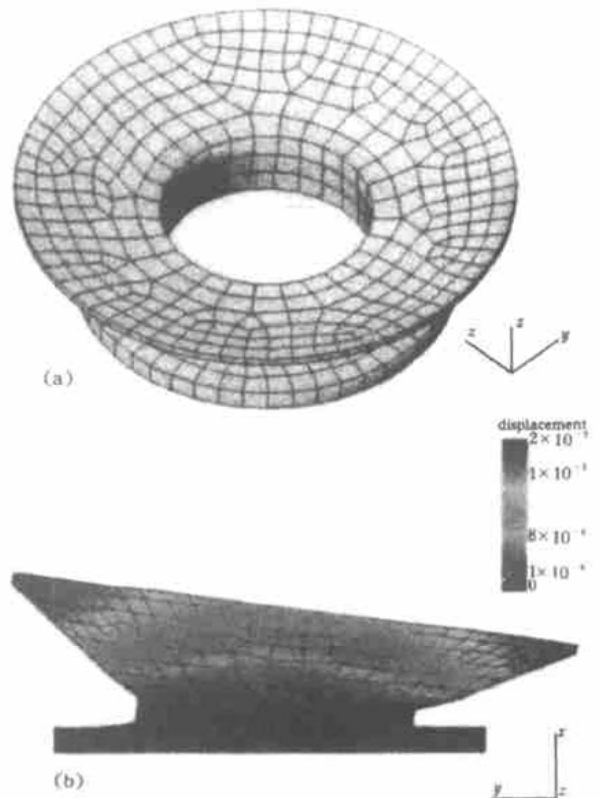


Fig. 4 Finite element analysis of the primary mirror. (a) 3-D model; (b) Deformation under lateral 1 g load

表1是有限元分析优化设计的结果,这些结果都能满足系统的技术指标的要求。

Table 1 Optimization design results by using finite element analysis

mirror deformation	cooling rate	1 st order harmonic frequency	system mass
$\lambda/10$	2.5 K/min	287 Hz	2.52 kg

3 低温光学系统的制造

低温光学系统要真正实现的无热效应的结果,除了选择同种材料制造整个光学系统外,在光学系统的制造过程中还须满足以下两个条件:(1)所有的镜子和结构件的材料,其内部的物理特性应该是均匀一致的,并且各向同性;(2)材料内部不得有残余应力存在,以免在温度变化时内部应力状态改变,造成零件和系统的变形。

制造光学系统的铝合金应该质地均匀,晶粒细小。在零件的机械加工过程中,采用合适的切削量,减小加工造成的材料表面应力。零件粗加工后,进行人工时效处理。零件表面的残余应力用 X 光衍射应力分析法检查。零件精加工后,进行高低温多

次反复温度循环,充分释放内部应力。

金属镜面的最终成型,用单点金刚石车床加工。切削量为微米级,面形精度为 $0.25 \mu\text{m} \sim 0.5 \mu\text{m}$,镜面表面的粗糙度达到 $R_A = 20 \text{ nm}$ 。金刚石切削后的镜面,用真空镀膜法镀上金属全反射膜,并加镀介质保护膜。低温反射膜有高的反射率(大于 98%),膜层坚固,经得起擦拭。反射膜系经液氮低温试验后,性能稳定,不脱落。

4 光学系统的低温检测

低温光学的检测装置示于图 5^[4]。光学系统及参考平面反射镜安装在一个真空绝热仓中。向仓中液氮罐灌入液氮,通过冷板传导使光学系统降温。光学系统中各零件的温度用铂电阻测量。由计算机实时监视和控制光学系统的温度。当到达系统预定的检测温度时,电热丝发热,使仓内温度保持恒定。由于铝合金材料的良好导热性能,光学系统内部温差很小。降温过程示于图 6。

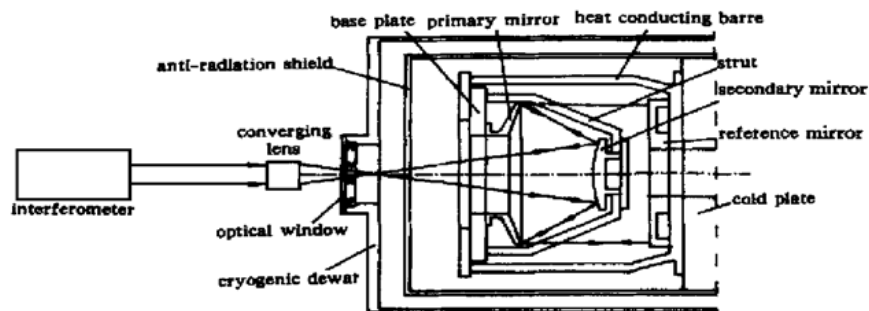


Fig. 5 Setup for the cryogenic test

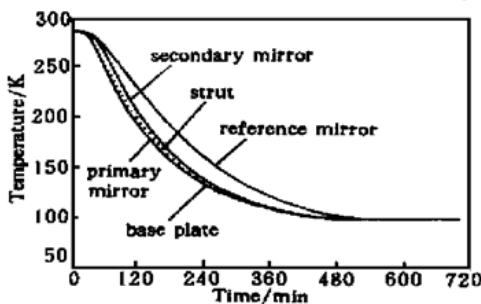


Fig. 6 Cooling process of the cryogenic test

因为光学系统是全反射式的,通过的波段很宽,可以用可见光 HeNe 激光波面干涉仪检测光学系统的波面误差,进而对系统的成像质量作出全面的评价,从波面误差计算系统的点扩展数(PSF)和调制传递函数(MTF)。HeNe 激光干涉仪发出的会聚光束,通过真空容器的光学窗口进入光学系统,光线从参考平面镜反射后,回到干涉仪,形成干涉图,测出光学系统的波面误差。

图 7 为光学系统常温与低温干涉检测的结果。

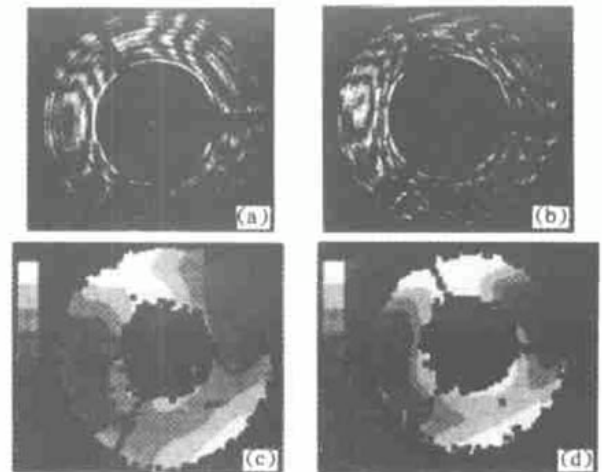


Fig. 7 Interferometric test results at room and cryogenic temperature. (a) Interferogram at $T = 285 \text{ K}$; (b) Interferogram at $T = 100 \text{ K}$; (c) Wavefront contour at $T = 285 \text{ K}$; (d) Wavefront contour at $T = 100 \text{ K}$

He-Ne 激光检测波长 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ 。因为检测时光线两次通过系统, 在对应的波面等高图上, 每个灰阶代表 $\lambda/4 = 0.1582 \mu\text{m}$ 的实际波面误差。按中心波长 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ 计算, 可以求得低温光学系以工作波长为单位的波面误差。

表 2 列出了低温光学系统在常温和低温条件下的检测结果。

检测结果显示, 光学系统常温和低温波面误差的形状与大小都非常接近。这说明了, 我们在研制过程中采用的低温光学系统的无热效应设计原理, 有限元设计方法, 以及与特殊的制造工艺途径都是正确的。我们研制的低温光学系统, 在规定的工作

波段里, 系统波面误差均方根值(RMS)都小于 $1/50$ 波长, 达到了衍射极限的成像质量。

表 3 列出了我们研制的冷光学系统与同期国外系统的比较。随着口径的增大, 系统波面误差也会相应地增加, 但基本性能都比较接近。

Table 2 Wavefront errors of the cryogenic optical system

test temperature	wavefront error (at $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$) / λ		wavefront error (at $\lambda = 10 \mu\text{m}$) / λ	
	RMS	PV	RMS	PV
285 K	0.259	1.374	0.0164	0.087
100 K	0.268	1.437	0.0170	0.091

Table 3 Technical specifications of different cryogenic optical systems

type of cryogenic optical systems	aperture / mm	temperature / K	working wavelength / μm	wavefront error RMS at $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$	year of publication or development
spirit III telescope	368	80	10 (central)	1.964	1992
LWIR advance technology seeker	100	90	8~ 14	0.083	1992
this system	180	100	8~ 14	0.268	1996

参 考 文 献

- [1] Schreiber M, Young P. Design of infrared astronomical satellite (IRAS) primary mirror mounts. *Opt. Engng.*, 1981, **20**(2): 190~ 194
- [2] Mastandrea A A, Glasheen R R, Guregian J J *et al.*. Development of the spirit III telescope: from design through test. *Proc. SPIE*, 1992, **1765**: 42~ 52
- [3] Alff W H, Schmidt J J. SIRFT a cryogenically cooled IR telescope. *Proc. SPIE*, 1985, **590**: 357~ 363
- [4] Shen Mangzuo, Lin Xiangdi, Ma Wenli *et al.*. Cryogenic test of an all-aluminum infrared optical system. *Proc. SPIE*, 1996, **2814**: 121~ 125

Development of a Cryogenic Optical System

Shen Mangzuo Ma Wenli Liao Sheng Zhang Xiaohong

(Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 20 July 1999; revised 8 November 1999)

Abstract: The development of a cryogenic optical system is presented including the system design, manufacturing and cryogenic test at near liquid nitrogen temperature. The test results show that there is little wavefront error difference between the optical system at room temperature and cooled to 100 K. In both cases the optical system all can achieve diffraction limited imaging quality.

Key words: cryogenic optics; infrared optics; optical test