

空间低温光学的新进展

陈 隆 智

(兰州物理研究所)

The new development of space cryogenic optics

Chen Longzhi

(Lanzhou institute of physics)

Abstract: This article introduces the properties of cryogenic system and cryogenic optical instruments in new type of infrared space telescope which the United States projects to send in 2002; the choice of cryogenic property experiments and materials of major mirror and secondary mirror. It summarizes the problem of Hubble space telescope during practical revolving which has been sent in early nineties.

Keywords: infrared space telescope, cryogenics optics, superfluid helium.

摘要: 介绍美国计划于2002年发射的新型红外太空望远镜的低温系统、低温光学仪器的性能;主镜和二次镜的低温性能试验和材料的选择。概述了90年代初期发射的哈勃太空望远镜在实际运转时所存在的问题。

关键词: 红外太空望远镜、低温光学、超流氦。

由于哈勃(Hubble)太空望远镜一再推迟发射,直至1990年4月24日才成功的由航天飞机发射至611.5km的运行轨道上。因而使美国国家航空航天局(NASA)在80年代计划于1997年发射的另一大型红外太空望远镜的计划不得不推迟到2002年^[1]。在文献[1]中所提及的90年代超流氦在航天器中的新应用所提及的两项新应用都需要相应的推迟在下个世纪初期。

本文将概述哈勃太空望远镜的巨大成功和所产生的故障。分析了国外由此而采取的一些新的对策。推迟发射大型红外太空望远镜的原因之一就是必须对主镜面和二次镜的低温性能模拟试验进行补充和完善。再加上新型的望远镜的设计寿命为5年,其中的超流氦的实际贮存量已接近9000L。耗资巨大的这项航天器计划当然就应当极为慎重的考虑了。除此而外,在文中还要介绍望远镜镜面材料的选择、低温系统的性能、低温光学仪器的性能、主镜面和二次镜的低温性能试验。

1. 哈勃太空望远镜的遗憾

长达12m的哈勃太空望远镜的制造和保存期历时10多年,耗资15亿美元,终于在1990年4月24日上天。这个航天器上携带着当今世界上最先进的低温光学仪器,是人类用最先进的望远镜探测宇宙的壮举。

从70年代中期开始,美国NASA开始研制太空望远镜。为研磨、抛光望远镜的主镜面历时达5年之久。1981年完成主体制造。因为发现流行的“计算机病毒”进入哈勃太空望远镜的计算机系统等原因,发射时间一再推迟。在此期间不得不妥善对已研制成功的望远镜进行保管。极为严格的恒温、恒湿和无尘的要求,每月的保管费高达700~1000万美元之多。

哈勃望远镜上天以后,向地面发回了大量的照片,令人遗憾的是如此先进的低温光学仪器所得到的照片是模糊不清的。这一结果引起科学家和有关负责人的极大不满。究其原因这是由于主镜面加工过程中所形成的镜面形状有1mm的误差造成的。球面像差的存在直接导致成像的模糊不清。

在采取太空维修的同时*,不得不重新对今后的太空观测计划进行修改和补充。与此同时,还要完善镜面和科学仪器的地面模拟试验。

2. 新型的红外太空望远镜

哈勃太空望远镜只是美国国家航空航天局(NASA)计划发射的4个轨道天文望远镜组成的系列之一。这个系列被命名为“宏伟天文台”。这个系列计划的实施向在一个固定的研究环境中的新型低温光学和遥感技术提出了挑战。超流氦用量的大大增加使空间低温光学的发展在新世纪的开始时出现了新曙光。

新型的红外太空望远镜(简称为SIRTF)将80年代制定的两项计划合而为一。原计划1997年发射的红外望远镜的轨道高度为700km。另一项计划在90年代末期发射的红外望远镜的轨道高度为10万公里。为节省开支和集中力量,低轨道的红外望远镜不再研制。计划在2002年发射的新型红外太空望远镜由直径为95cm的主镜(镜面直径比哈勃望远镜的主镜片直径2.4m要小)、迭装式二次镜、定向的第三镜、4000L超流氦杜瓦、补液杜瓦、狭缝暗室、红外列阵照相机、红外列阵摄谱仪、多次成像的光度计组成。

2.1 概况

在考虑了所查出的哈勃望远镜中所产生的故障原因以后,对新型太空红外望远镜的研制步骤和内容进行了补充和修改。从1995年开始研制。设计的有效运行寿命为5年。探测的项目也有几十项。其中包括探寻宇宙的边缘、寻找智慧宇宙人、观测星体的诞生和衰亡等一系列宇宙之谜。是哈勃望远镜计划的继续和发展。新型航天器的发射质量为5700kg,比望远镜主体(连同所有的仪器和低温系统)约重30%。由于运行轨道离地高达10万公里,能够更清晰地不受干扰拍到更远的照片。计划选用土星4号—人马座火箭发射。

从低温来看,新型航天器的成功发射会出现的困难主要有:1.25K的低温要求、有效寿命长达5年、航天器的质量应尽可能轻。1.25K的低温要求是高质量的红外望远镜及其光学仪器所必须的。在考虑了超流氦的蒸发损耗以后,为保持1.25K的低温,超流氦的实际用量

*1993年12月初,美国发射“奋进号”航天飞机,对哈勃望远镜进行太空维修。

将达到近9000L。除了必须使绝热去磁制冷机而外,还设计了空间补液系统。由续后发射的航天器向它补充超流氦。

从光学上来看,新型航天器的成功发射会出现的困难主要有:主镜面、二次镜等光学元件均必须在低于2K的超低温条件下工作,其聚焦、衍射、成像质量均有不少的困难。

2.2 低温系统

新型航天器的低温系统与红外天文卫星(IRAS)、宇宙背景探测器(COBE)、红外空间天文台(ISO)相类似。由于超流氦贮量的增加,低温系统的复杂性也大大增加。低温系统由真空外壁、超流氦内罐、真空隔热层组成。夹层中有3个气氦冷却屏。三个气氦冷却屏之间均采用真空多层隔热。低温系统除了确保望远镜本体所必须的1.2K低温条件而外,还须保证各个仪器所必须的1.25K低温条件。此外,红外摄影仪中的传感器温度不得高于1.45K,其热负载低于1mW。其它传感器的工作温度略高,为2K左右,其热负载为15~25mW。内层容器选用高导无氧铜作为材料。必须在高热导率的条件下测量所用壁材的低温应力和振动效应。

2.3 望远镜中的低温光学技术

(1) 镜面材料的选择

美国阿姆斯(Ames)研究中心、亚利桑那大学的光学中心承担了主镜和二次镜的研制工作。吸取了哈勃望远镜主镜片出现故障的教训,决定补作多项模拟试验。先制作的是小尺寸的直径为50cm的凹面主镜面,并在模拟容器内进行常温、液氮和液氦条件镜片的性能试验。试验成功以后,再逐渐正式制作望远镜实际使用的主镜面和二次凸镜。

镜面材料仍选用溶胶-凝胶法生产的 SiO_2 凝胶。溶胶-凝胶法生产的优点是:由于从溶液中制备,可以保证玻璃成分的高纯度和高度均匀性;在较低温度下制备,节能效果好;可以制备耐高温的具有特殊性能的玻璃。制备过程中,若均匀加入质量比为7.5%的 TiO_2 ,就可以制成望远镜镜片所用的超低膨胀系数的石英玻璃。另外两种典型的光学玻璃材料是光学熔融石英玻璃、零膨胀系数的微晶玻璃。

制备的过程是这样的:先在低于150℃的温度下处理排除未成氢键的水;然后大于800℃的温度下处理排除与 $-\text{SiOH}$ 基团形成氢键的水;最后在更高的温度下进行处理,使 $-\text{SiOH}$ 基团脱去水分子而形成硅氧硅结构网络并致密化。

掺有 TiO_2 的 SiO_2 凝胶就是较为满意的超低膨胀系数光学玻璃材料。其主要性能指标为:热导率为 $1.3\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$;膨胀系数为 $0.2\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$;弹性模量为 $6756\times 10^7\text{Pa}$;硬度为 4864MPa ;密度为 $2.21\text{g}/\text{cm}^3$ 。

新型望远镜主镜面的制作是极为慎重的。直径为50cm的主镜面制作成功、性能达标后,再试制直径为70cm的主镜面,以求摸索其客观规律。试验发现低温下容易产生故障的地方是镜面与支承的联结处。常用的方法是采用固定法使其产生较小的处于非稳定态的应力。而太空望远镜则必须采用弹性紧固法,以确保位置的相对稳定性。镜面的防振措施也必须严格满足要求。

新型太空望远镜中的二次凸镜的性能与哈勃望远镜是相同的。来自观察对象的光经过二次镜后被主镜面聚焦成束。在主镜面和二次镜之间产生位置可变的聚焦调节作用。二次镜的镜面材料与主镜面相同。有6个支承点支承着二次镜。控制每一个支点就可以使二次镜的倾斜角和位移发生变化,从而决定了光束聚焦的位置。二次镜的低温性能试验已经结束,性能

较为满意。

(2) 杂散光的消除

新型太空望远镜可观测的波长范围为 $1.8\sim 1200\mu\text{m}$ 。望远镜中的杂散光必须很少。这样才能使观测结果只受到空间本底的静态噪音的影响(本底噪音源来自黄道光、银河系内外的扩散光、3K宇宙背景辐射)。望远镜主体系统由暗室、带瞄准器的筒形挡板、带狭缝光阑的主镜面、中心暗室、带光阑的二次镜、支承杆、锥形挡板、带光阑的多边形第三镜。第三镜的设立是为了尽量减少仪器间的杂散光对观测的影响。二次镜的角度和位置可调,以适应杂散或脉冲目标的观测。所有的科学仪器都装在一个有17弧分直径的视场中。设备中的暗室表面镀有SiC并涂上碳黑。扩散光散射黑度的波长至少要降到 $200\mu\text{m}$ 。

(3) 光学精密仪器

新型太空望远镜中安装的当今世界上最先进的光学精密仪器有:红外列阵照相机、红外列阵摄谱仪、多次成像光度计。这三种仪器都必须置于超流氦制冷的低温环境中。附设的绝热去磁制冷机使温度的波动维持在0.1K以内。

a. 红外列阵照相机

这是使用了红外集成器件(又称为红外探测器阵列)的性能优异的照相机。选用对红外光灵敏的胶片对空间目标进行自动搜索和摄影(红外集成器件作为自动搜索的探测器使用)。红外彩色胶片使用的是一种能够感受绿、红外辐射的三层摄影材料。这种材料能把红外反射表面再现成红色;把绿色表面再现成蓝色;把红色表面再现成绿色,有独特的图像效果。这台照相机由史密斯桑纳(Smithsonian)天体物理实验室、戈达德(Goddard)空间飞行中心、休斯·桑塔·巴巴拉(Hughes Santa Barbara)研究中心、亚利桑那大学、诺切斯特(Rochester)大学联合研制。

所用的复式滤光调节器可以对两个波段进行红外滤光和偏振的选择。各个波段的滤光片上添加一个圆振滤光装置使衍射受到限制。波段1的红外列阵器件为InSb光电探测器阵列。其工作温度为10K。探测器的暗电流为每秒少于一个电子(可以看成探测器暗电流和读出电路漏电流的总和。探测器的暗电流是其主要部分)。工作时的读出噪音每像素低于10个电子/s。波段2的探测器为Si掺杂后的硅导带阵列。其工作温度为5~10K。暗电流小于10个电子/s。工作时的读出噪音每像素低于50个电子/s。

b. 红外列阵摄谱仪

研制中的这台摄谱仪在 $2.5\sim 200\mu\text{m}$ 波长范围内对天体物理对象具有较好的分辨谱。 $2.5\sim 36\mu\text{m}$ 为短—中红外波段; $36\sim 200\mu\text{m}$ 为长红外波段。由康奈尔(Cornell)大学、巴尔(Ball)宇宙空间系统集团公司、加利福尼亚大学技术研究所、宾夕法尼亚州立大学、诺切斯特大学和NASA的阿姆斯研究中心共同研制。

红外列阵摄谱仪与红外列阵照相机一样,也使用先进的红外集成器件作为探测器。长波段选用Ge:Be和Ge:Ga两种红外光电导体作为探测器。还选用掺杂的Si:Sb光电导体,以便用于短—中波波段与长波波段的交叉区。为了用于最长的长波区,光电导体应集成地组装在一起。

c. 多次成像光度计

多次成像光度计是一种多用途的灵敏度极高的偏振光学仪器。具有 $30\sim 1200\mu\text{m}$ 的角分辨力。波长为 $30\sim 200\mu\text{m}$ 时灵敏度最佳。由亚利桑那大学的斯梯文(Steward)实验室、贝

尔电子光学—低温公司、加利福尼亚大学、加利福尼亚技术研究所、喷气推进实验室共同研制的。

这台仪器可以对空间探测目标同时进行多次成像。由三个分系统组成：远红外照相机、光度计、热辐射计。装在这台仪器内的远红外照相机可以将 5×5 弧分视场的像通过 $32 \times 32 \mu\text{m}$ 的Ge:Ga探测器摄出（ $32 \times 32 \mu\text{m}$ 指的是像元尺寸）。空间分辨力比传统的远红外照相机提高了两倍。偏振器和滤波器在 $50 \sim 120 \mu\text{m}$ 之间选择待拍目标。

热辐射计由两部分组成。第一部分由工作在 $200 \sim 500 \mu\text{m}$ ，具有 3×3 弧分视场的 2×2 辐射热测量列阵组成。另一部分由工作在 $500 \sim 1200 \mu\text{m}$ ，具有4弧分视场的热辐射计组成。热辐射计的工作温度为1.25K。

光度计在 $30 \sim 50 \mu\text{m}$ 的波段工作时，可将 75×150 弧分视场内的像通过 $16 \times 32 \mu\text{m}$ 像元尺寸的Ge:Be探测器摄出；在 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 的波段工作时，可将 40×150 弧分视场内的像通过 $2 \times 8 \mu\text{m}$ 像元尺寸的Ge:Ga探测器摄出。

2.4 凝胶型 SiO_2 镜面的低温模拟试验^[2-4]

模拟试验在阿姆斯研究中心的低温光学试验装置上进行。

（1）主镜面的低温模拟试验

低温模拟试验的目的在于了解镜片在低温环境中所产生的形状畸变。如果发生畸变会引起球面象差的偏移。在低温环境中，镜片收缩的应力会使它的表面产生相应的应力。试验结果将只选中那些低温畸变小于 $0.633 \mu\text{m}$ 的镜片。从而对凝胶型 SiO_2 材料组分的选择进行复核。综合测出待试镜片在室温、液氮温度、液氮温度下镜面各部分产生的形状畸变所形成的误差。用相位干涉计进行测量。

（2）二次镜的低温模拟试验

二次镜从1988年开始研制。低温模拟试验的部分结果已经公布。采用双轴式电子自动准直仪对镜片形状进行校准。模拟试验容器的温度为液氮温度，外层用液氮预冷。

常温下镜片倾斜的微量飘移和稳定性采用双轴差压式激光干涉仪测量。倾斜稳定性的要求是在一个倾斜轴上在 0.03 弧秒/ 1000s 以内。能耗的模拟测量结果表明最大值为 3.2mW 。其中，在 ± 840 弧秒、 5Hz 、轴上加方形波时，镜片本身的能耗为 1.1mW ；4个传感器的能耗共为 2.1mW 。满足能耗小于 5mW 的设计要求。

二次镜的热稳定性是探测系统等效能量噪音、工作温度的函数。测试温度为 5.4k 。采用 $5 \times 10^{-18}\text{W}/\text{Hz}^{0.5}$ 的辐射热测量器测量。镜面工作时工作温度的变化应不大于 0.2mK/s 。实测结果为 0.12mK/s 。

（3）模拟试验的不足

尽管已经和正在进行多项低温模拟试验，不足之处是明显的。试验的最低工作温度只是液氮温度。而进入太空后，实际工作温度为 2k 左右。还需进一步作的地面试验有：空间环境下，低温随机振动模拟试验；液氮温度下镜片波前误差的测量；望远镜整体（包括科学仪器）的飞行模拟试验等。

3. 小结

新型红外太空望远镜的研制是人类征服宇宙、探索宇宙奥秘的又一壮举。人类用望远镜

（下转第44页）

参 考 文 献

- 1 Gasser M G, Sherman A, Beale W. Developments towards achievement of a 3—5 year lifetime Stirling cycle refrigerator for space applications. NBS 607, Refrigeration for Cryogenic Senors and Electronic Systems
- 2 McFarlane R, Keungcs, Shaik MA. Long life Stirling Cryocoolerf or Space Applications. Proceedings of Internationnal Cryocooler Conference, Monterey, California, 1988, 147
- 3 Davey G. Review of the oxfood Cryocoolers, Adv. Cryog. Eng. 1990, 35
- 4 Boyle R,JamesE, MillerP. Structural and thermal interface characteristics of Stirling Cycle Cryocoolers for Space applications. Adv. Cryog. Eng. 1992,37(B)
- 5 White R. Vuilleumier Cycle Cryogeric refrigeration. AFFDL—TR—76—17, 1976
- 6 Renyer B L. High Capacity long—life Vuillenmier cycle refrigerator. AFFDL—TR—73—149,1973
- 7 Sherman A. Selected Vuilleumier refrigerator performance characteristiss. Adv. Crgyog. Eng., 1972, 18
- 8 Doody R D. The high—Capacity, Spaceborne, Vuilleumier refrigerator. SPIE, Cryogenically cooled Sensor Technology, 1980, 245
- 9 Lawrence A w. An Overview of the development of sorption refrigeration. Adv. Cryog. Eng., 1992, 37(B)

(上接第49页)

观测太空已有近400年的历史了。从1609年伽利略研究并改进丹麦镜片师设计的望远镜(折射望远镜)开始,到耗资10多亿美元的红外望远镜的出现。生动地体现了科学事业上一代又一代人的创业与继承的令人钦佩的精神。人们等待着在探索宇宙奥秘的征途中新的奇迹的出现。

参 考 文 献

- 1 陈隆智。航空器上的氮制冷。真空与低温, 1993, 12:3, 156:
- 2 Norris D, Bothwell M, Plamondon J.Space infrared telescope facility.Space optics.Postconference Edi.Washington, 1991
- 3 Miller J H, Melugin R K, Augason G.Ames research center cryogenic mirror testing program.A Comparison of the cryogenic performance of metal and glass mirrors with different types of mounts.Melugin R K Edi.Proc.SPIE 973 -08, 1988
- 4 Duffy M, kissh F.Prototype secondary mirror assembly for the space infrared telescope facility fabrication phase final technical progress report.Hughes danbury optical system, PR K12—0008, 1990