

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0173-10

# 自力更生、自主创新创建我国航天光学遥感器研制基地

王家骥, 韩昌元

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要** 本文叙述了我所近十年来空间光学遥感器(SORS)技术领域的发展,包括光学材料、光学制造和镀膜、光学检测、系统装配和最终检验以及空间环境模拟试验,并详细地介绍了主要的制造和测试设备及具备的能力。

**关键词** 空间光学遥感研究实验室; 空间光学; 光学遥感; 空间相机; 光学材料; 光学制造和检验; 光学系统装配和检验; 空间环境模拟试验

中图分类号 O434.19

文献标识码 A

## The current status of Space Optical Remote Sensor Research in CIOMP

WANG Jia-qi, HAN Chang-yuan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** This paper reviewed our space optical remote sensor (SORS) technologies including optical materials, optics fabrication and coating, optical testing, system assembly final testing, and space environment simulation experiment conducted in our institute. The primary part of the fabrication and testing facilities and results are described in detail.

**Key words** space optical remote sensor research laboratory; space optics; optical remote sensing; space camera; optical material; optical fabrication and inspection; optical system assembly and testing; space environment simulation experiment

随着科学技术的发展,航天光学遥感器在国民经济、国防和人类的认知领域起着越来越重要作用。从某种意义上来说,其技术水平标志着一个国家的航天应用水平和衡量一个国家的科学技术和综合国力的一个方面。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所是新中国光学科研事业的摇篮,曾在王大珩院士等老一辈科学家的领导下为我国二弹一星的研制作出了重要贡献。近年来我所在国家重点航天任务载人航天工程以及 863 航天领域都承担了多项航天光学遥感器的重要科研任务,被中国科学院列为航天光学遥感器研制基地之一。

在航天光学遥感器的研制方面,我国与世界先进国家如美国、俄罗斯相比还有相当的差距,这种差距不可能采取全盘引进的方式较快地缩短。其原因是我国的经济实力还有限,不可能投入高额资金,同时其相关技术各国都严加保密,因此自力更

生不断创新是发展我国航天光学遥感事业的唯一可行途径。

航天光学遥感器是集光学、机械学、材料学、电子学以及计算机技术综合的高技术产品。为了满足研制和生产的需要,除了培养一批精通研究、设计、制造、试验等各个科学技术领域的专家以外,还必需建立起相应的成套技术基础设备和专门的实验室。

近十年来围绕航天光学遥感事业发展的需要,中国科学院长春光机所自力更生、自主创新创建了我国一流的航天光学遥感器研制基地之一。主要表现在以下五个方面。

### 1 光学材料

为了满足航天光学遥感器研制所需要的大尺寸高质量光学玻璃的制备要求,对已有的光学玻璃的精密退火系统进行了技术改造,并建立了光学玻璃的性能精密测试实验室。

**作者简介:** 王家骥(1940.2-),男,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所学术委员会主任,博导,从事光学工程和装备研制以及光学仪器总体设计。E-mail:wangjq@ciomp.ac.cn

这些玻璃在尺寸方面要求通光口径  $\phi 500 \sim 700$  mm,并要求其光学均匀性和残余应力尽可能达到理想状态。这就需要提高超精密退火系统的稳定性、温度控制精度,并延长退火周期和提高检测评定的可靠性。

精密退火炉与温控系统改造方面已完成了如下项目:

- 1) 新增二台超精密和三台普通退火炉及配套设备;
- 2) 改造原有二台大型玻璃退火炉,成为超精密退火炉;
- 3) 对超精密退火炉进行环境温度冲击保护,建

立隔离层或缓冲层;

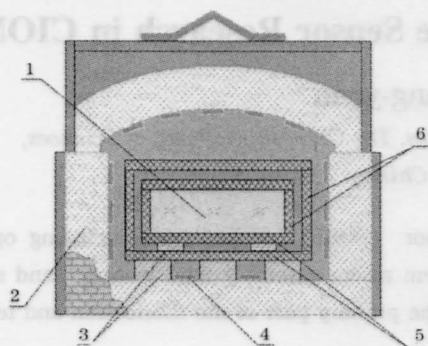
4) 对超精密退火炉(共四台)更新换型保温材料,增加温控点,提高炉内温度的稳定性;

5) 增添新的温控工业微机与接口,执行器件,提高运行可靠度,编制新的超精密退火程控程序,实现  $0.05$   $^{\circ}\text{C}/\text{h}$  的退火速率。

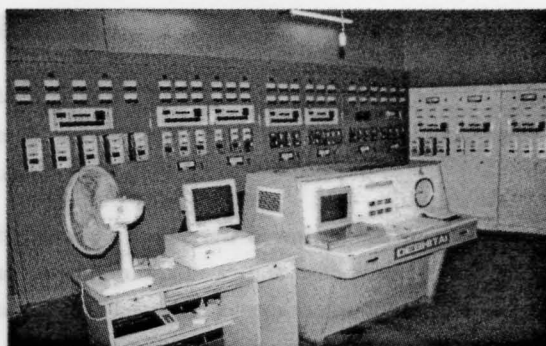
改造后的超精密退火炉的性能指标如下:

载物室规格:  $\phi 1300$  mm  $\times$  360 mm; 温度范围:  $\leq 700$   $^{\circ}\text{C}$ ; 炉内径向温差:  $\leq 0.2$   $^{\circ}\text{C}$ ; 升温速率:  $\leq 30$   $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ; 降温速率:  $\leq 0.02 \sim 5$   $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 。

图 1 为大型玻璃毛坯精密退火炉结构示意图和所有退火炉控制室。



(a)



(b)

图 1 大尺寸、高质量光学玻璃超精密退火炉。(a) 退火炉结构示意图。1:玻璃毛坯;2:硅藻土保温砖;3:耐火支撑砖;4:加热体;5:铸铁盘;6:铸铁内外套;(b) 退火炉控制室

Fig.1 Precision glass-annealing furnace for large size and high quality optical glass. (a) The furnace schematic diagram. 1: glass blank; 2: thermal insulation brick; 3: refractory support; 4: heater;

5: cast-iron plate; 6: cast-iron case; (b) Control equipment

用这些改造后的精密退火炉完成了本所和国内其他单位承制的航天光学遥感器及其配套检测设备所需要的一批高质量光学玻璃的制备任务。不仅在质量方面而且在批量方面都能满足工程研制需要。使我所在这方面的水平达到国内领先、国际先进水平。如直径  $\phi 700$  mm 光学玻璃均匀性达到  $1.5 \times 10^{-6}$  水平。

改造后的大尺寸光学玻璃检测实验室如图 2 所示。使用面积为  $103$   $\text{m}^2$ ,恒温室面积为  $58$   $\text{m}^2$ ,恒温室温度波动小于  $\pm 0.5$   $^{\circ}\text{C}$ ,通风具有空气净化、恒温、恒湿、排毒等功能。恒温室内设有尺寸为  $5$  m  $\times$   $1$  m  $\times$   $1.2$  m 空气防震平台;移动距离为  $600$  mm 被检玻璃样品夹持工作台;检测玻璃均匀性用的刀口干涉仪及图像处理系统,测量精度  $\leq \lambda/10$  P-V;检验均匀性用的有效尺寸为  $\phi 300$  mm,面形精度  $\leq \lambda/10$  P-V 的贴置玻璃;口径  $\phi 400$  mm,曲率半径  $4$  m,面形精度  $\leq \lambda/10$  P-V 的标准球面反射镜。

建成后的检测实验室已具备检测直径达  $\phi 800$  mm 光学玻璃均匀性的能力,并完成了  $\phi 720$  mm  $\times$   $130$  mm,  $\phi 800$  mm  $\times$   $140$  mm,  $\phi 590$  mm  $\times$   $60$  mm 等不同尺寸的 40 多块大尺寸光学玻璃的精密退火和均匀性测试,以及对从俄罗斯引进的近 20 块  $\phi 565$  mm  $\times$   $70$  mm 的高强度和耐辐射窗口玻璃

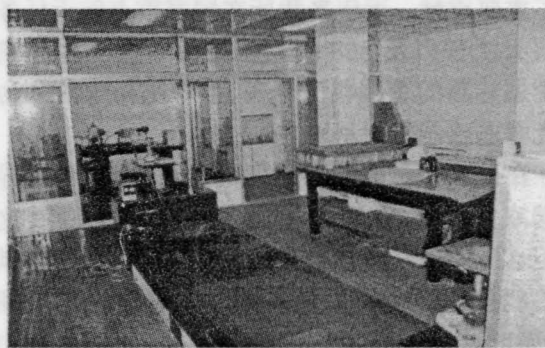


图 2 光学玻璃检测实验室

Fig.2 Optical glass specification-testing lab.

进行了折射率均匀性的复检,得到与俄罗斯自检报告的数据吻合的结果。这些玻璃的折射率均匀性都达到  $1.5 \times 10^{-6}$  水平。

## 2 光学加工及镀膜

为了满足对空间光学遥感器应用的反射镜镜胚轻量化处理的需要,前期采用改造数控钻床,并通过工艺试验确定工艺参数及刀具,编制加工用数控程序的方法建成了反射镜镜胚轻量化加工中心。后期研究开发了  $\phi 2 \text{ m}$  万能光学铣磨机。可加工光学石英玻璃、微晶玻璃、光学玻璃,工件最大直径为  $\phi 600 \text{ mm}$ ,盲通孔形状可为圆形、矩形、梯形、正六边形及其他异形孔,其内接圆直径为  $\phi 12 \sim 60 \text{ mm}$ ,孔的尺寸精度和位置精度达到  $\pm 0.02 \text{ mm}$ ,孔间壁厚可薄至  $3 \text{ mm}$  左右,轻量化程度达  $50\%$  以上。轻量化后的镜面加工精度已达到  $\leq \lambda/10 \text{ P-V}$ 。

光学加工的粗磨、细磨、抛光工序新增设了  $\phi 800 \text{ mm}$  立式万能光学铣磨机  $\phi 800 \text{ mm}$  单轴精密抛光机和大型球面同心度检测设备。这些设备可完成口径达  $\phi 800 \text{ mm}$  的平面和球面的成形、抛光,球面的同心度检测精度达  $2''$ ,已加工成的口径  $\phi 700 \text{ mm}$  球面的面形精度达  $\lambda/10 \text{ P-V}$  水平。在大尺寸高精度平面的加工方面已建成直径分别为  $1.5 \text{ m}$  和  $3 \text{ m}$  的大型平面环抛机,已加工的口径  $\phi 790 \text{ mm}$  平面接近  $\lambda/10 \text{ P-V}$  精度, $\phi 560 \text{ mm}$  平面达到了  $\lambda/10 \text{ P-V}$  精度。可加工的最大平面镜尺寸为  $\phi 1.5 \text{ m}$ 。图 3 为  $\phi 2 \text{ m}$  万能光学铣磨机。

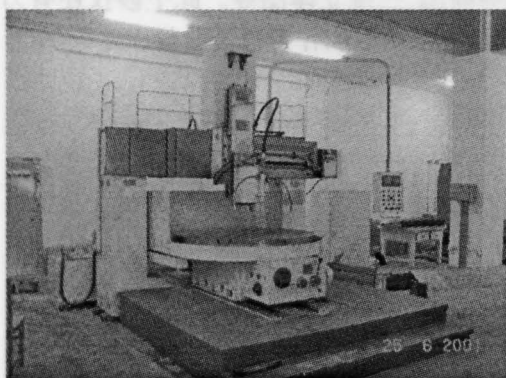


图 3  $\phi 2 \text{ m}$  万能光学铣磨机

Fig.3  $\phi 2 \text{ m}$  universal optical mill for grinding

非球面在空间光学遥感器领域中占有重要地位,由于在空间光学遥感器中采用非球面光学零件可使光学系统得到简化,有利于小型化、轻量化,并且提高成像质量。尤其是离轴非球面光学系统具有可实现大视场并无中心遮拦的优点,具有重要的应

用价值。为此自力更生先后研究开发了 FSGJ-1  $\phi 800$  非球面数控加工中心和 CNC  $\phi 2 \text{ m}$  数控光学加工中心。其中,FSGJ-1 非球面数控加工中心可加工口径  $\phi 800 \text{ mm}$  的共轴和离轴非球面镜面,加工精度可达  $\lambda/40 \text{ RMS}$ ,表面粗糙度达  $3 \text{ nm RMS}$ 。达到非球面加工的国际先进水平。图 4 为 FSGJ-1  $\phi 800$  非球面加工中心,图 5 为 CNC  $\phi 2 \text{ m}$  数控光学加工中心。

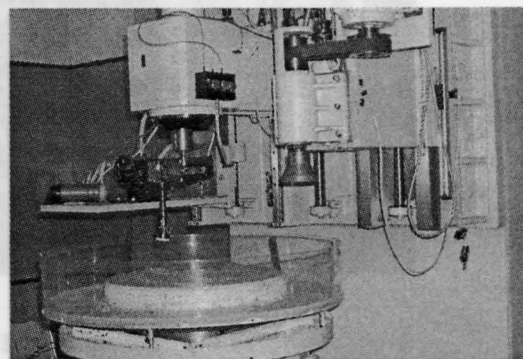


图 4 FSGJ-1  $\phi 800 \text{ mm}$  非球面数控加工中心

Fig.4 FSGJ-1  $\phi 800 \text{ mm}$  aspheric numerically controlled machine

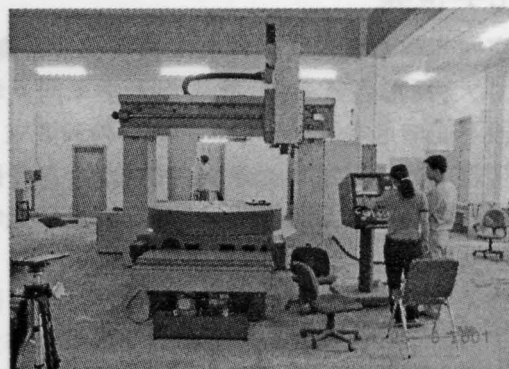


图 5  $\phi 2 \text{ m}$  CNC 数控光学加工中心

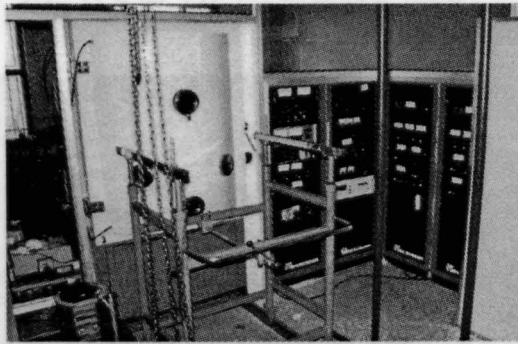
Fig.5  $\phi 2 \text{ m}$  CNC numerically controlled optical fabrication center

光学镀膜在空间光学遥感器研制中也是非常重要的技术之一。反射镜面的高反膜,要求在  $\lambda = 0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$  范围内反射率  $R \geq 97\%$ ; 折射界面的减反膜,要求  $\lambda = 0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$  范围内反射率  $R \leq 0.4\%$ ; 窗口的透明导电膜,要求可见光反射率  $R \leq 10\%$ ,红外反射率  $R \geq 90\%$  并具有导电加热功能;红外截止膜要求尽量不损失可见光透过率;半反半透分光膜要求透射和反射率尽可能相等并且不产生偏振效应。

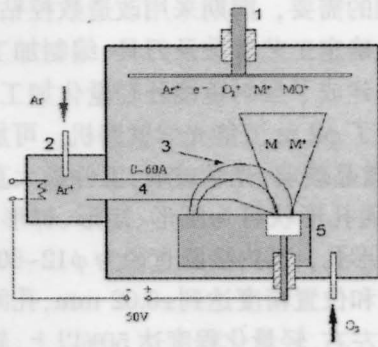
空间光学遥感器中应用的膜层除要达到上述性能要求外,还要求在空间使用环境下膜层稳定耐久。为了满足这些需要用  $\phi 1100 \text{ mm}$  普通大型箱式

镀膜机改造成了低压离子辅助镀膜机,研究开发了有效空间为 $\phi 1300\text{ mm}\times 900\text{ mm}$ 的真空退火炉。离子镀膜机真空室尺寸为 $\phi 1100\text{ mm}\times 1250\text{ mm}$ ,最大可镀工件尺寸为 $\phi 800\text{ mm}$ ,极限压强 $\leq 4\times 10^{-4}\text{ Pa}$ ,电子枪工作压强 $\leq 1\times 10^{-4}\text{ Pa}$ ,抽气时间为 $25\text{ min}$ ,载物台最大承重为 $150\text{ kg}$ ,镀制出的膜层致密、牢

固,镀膜时基座底温升高,只有几十度,对面形影响小。图6为 $\phi 1100\text{ mm}$ 光学离子镀膜机及其工作原理。真空退火炉用来对镀制好的光学薄膜进行真空退火,进一步提高光学薄膜的光学性能。真空退火炉的加热最高温度为 $900\text{ }^\circ\text{C}$ ,真空度达 $3\times 10^{-3}\text{ Pa}$ ,升温速率为 $0.5\sim 10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。



(a)



(b)

图6  $\phi 1100\text{ mm}$  光学离子镀膜机。(a) 镀膜机;(b) 工作原理。

1: 夹具与地绝缘具有 $5\text{ V}$ 自偏压;2: 等离子体源;3: 电子束;4: 等离子体;5: 电子枪

Fig.6  $\phi 1100\text{ mm}$  optical ion-assisted e-beam evaporator. (a) Evaporator; (b) Working principle

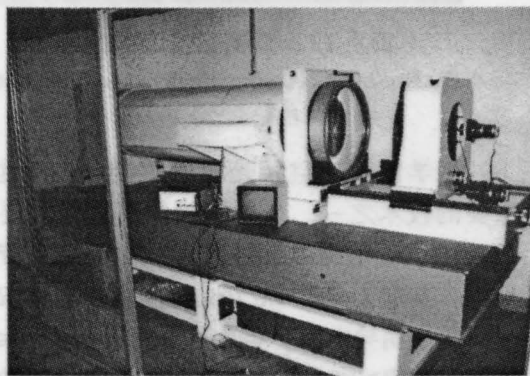
1: fixture is isolated from ground with  $5\text{ V}$  offset; 2: plasma source; 3: e-beam; 4: plasma beam; 5: electronic gun

### 3 光学检验

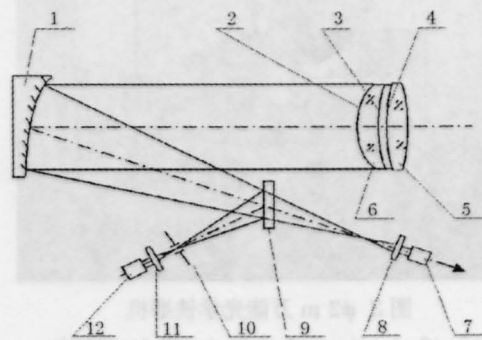
空间光学系统光学元件制造精度都非常高,并且尺寸大,面形各式各样,故常规光学车间光学检验手段不能满足空间光学系统的光学检验要求。为了适应空间光学遥感器光学元件的检验,自行研制了一系列配套的光学检验设备,基本满足了光学检验工作需要。

为了检验长曲率半径凹球面的面形检验,研究开发了刀口干涉仪。它利用被检球面的局部作为参

考面检验整个球面的面形,属于共路干涉仪,由于参考光和被检光走相同的光路,对振动和空气抖动影响不敏感,特别适用于长曲率半径大球面反射镜的面形检验。如直径 $\phi 700\text{ mm}$ ,曲率半径 $R=26\text{ m}$ 的凹球面反射镜,用这个干涉仪检验,边检边修,其面形精度达到 $\lambda/10\text{ P-V}$ 水平。干涉仪配有计算机干涉图像处理系统,可定量给出P-V值,RMS值以及面形等高图、三维立体图等。此干涉仪还有刀口阴影检验功能,所以叫作刀口干涉仪。



(a)



(b)

图7  $\phi 500\text{ mm}$  平面、凸球面激光干涉仪。(a) 干涉仪;(b) 光学系统原理。1:离轴抛物镜;2:椭球面;3:参考球面;4:被检凸球面;5:被检透镜;6:标准透镜;7:CCD 像机;8:成像镜头;9:分束镜;10:针孔;11:扩束镜;12:激光器

Fig.7  $\phi 500\text{ mm}$  plane and convex spherical surface laser interferometer. (a)  $\phi 500\text{ mm}$  interferometer; (b) Optical system diagram. 1: off-axis parabolic; 2: ellipsoid; 3: reference sphere; 4: convex sphere tested; 5: lens tested; 6: standard lens; 7: CCD camera; 8: imaging lens; 9: beam splitter; 10: pin hole; 11: beam expander; 12: laser device

6: standard lens; 7: CCD camera; 8: imaging lens; 9: beam splitter; 10: pin hole; 11: beam expander; 12: laser device

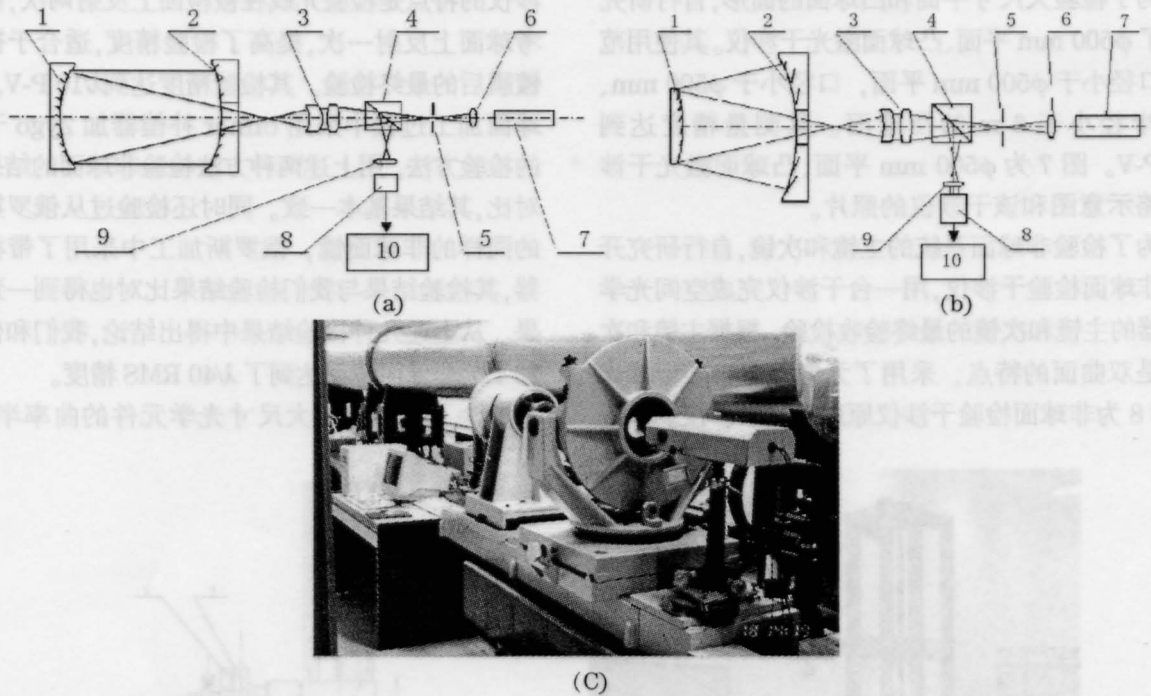


图8 非球面补偿检验装置。(a)非球面主镜检验干涉仪原理;(b)非球面次镜检验干涉仪原理。(c)非球面检验干涉仪。  
 1:被检镜;2:标准球面;3:标准镜头;4:分束棱镜;5:小孔;6:扩束镜;7:激光器;8:CCD摄像机;9:成像镜头;10:计算机  
 Fig.8 Aspheric interferometer. (a) Interferometer principle for aspheric primary mirror; (b) Interferometer principle for aspheric secondary mirror; (c) The interferometer. 1: tested mirror; 2: standard sphere; 3: standard lens; 4: beam splitter; 5: pin hole; 6: beam expander; 7: laser device; 8: CCD camera; 9: imaging lens; 10: personal computer

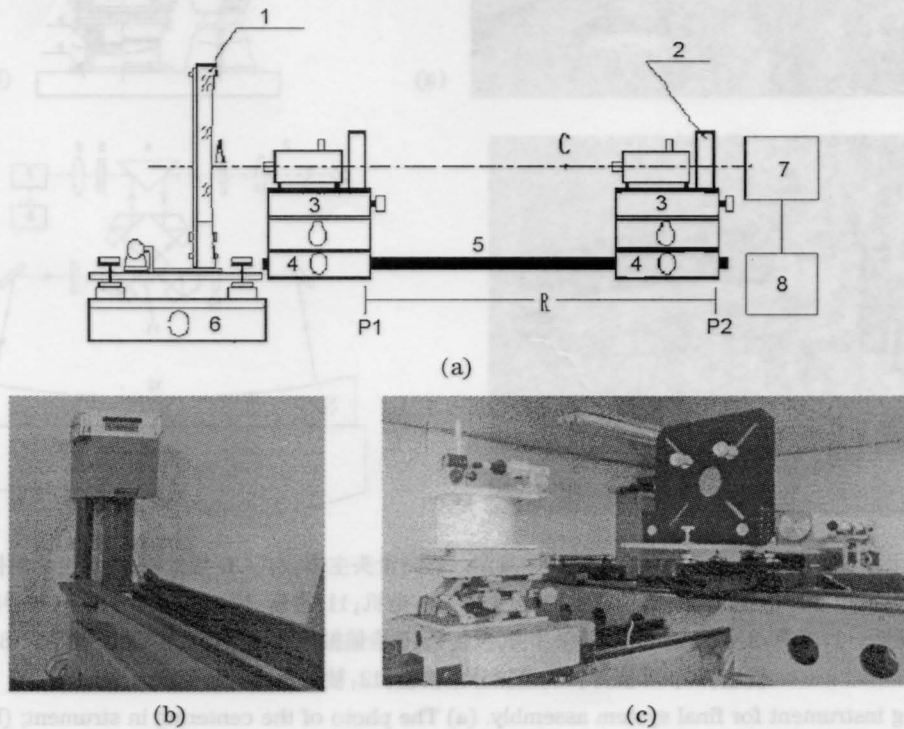


图9 长曲率半径测量装置。(a)结构组成示意图;(b)双频激光干涉仪;(c)测量曲率半径瞄准装置。  
 1:被检镜;2:角反射棱镜;3:双向微动台;4:滑车;5:导轨;6:三维调整工作台;7:激光干涉仪;8:显示和打印  
 Fig.9 Long curvature radius measuring equipment. (a) The schematic diagram of the measurement apparatus; (b) The double frequency laser interferometer; (c) The aiming apparatus for measurement. 1: mirror tested; 2: cube reflector; 3: dual-direction micro-adjuster; 4: slide; 5: crossrail; 6: 3D adjusting table; 7: laser interferometer; 8: display and printing

为了检验大尺寸平面和凸球面的面形,自行研究开发了 $\phi 500\text{ mm}$ 平面、凸球面激光干涉仪。其使用范围为口径小于 $\phi 500\text{ mm}$ 平面,口径小于 $\phi 500\text{ mm}$ 、曲率半径小于 $6\text{ m}$ 的凸球面。其测量精度达到 $\lambda/10\text{ P-V}$ 。图7为 $\phi 500\text{ mm}$ 平面、凸球面激光干涉仪光路示意图和该干涉仪的照片。

为了检验非球面系统的主镜和次镜,自行研究开发了非球面检验干涉仪,用一台干涉仪完成空间光学遥感器的主镜和次镜的最终验收检验。根据主镜和次镜都是双曲面的特点,采用了无像差点自准干涉光路,图8为非球面检验干涉仪原理及其干涉仪。该干

涉仪的特点是检验光线在被检面上反射两次,而在参考球面上反射一次,提高了检验精度,适合于被检镜镀膜后的最终检验。其检验精度达到 $\lambda/10\text{ P-V}$ 。在非球面加工过程中采用 offner 补偿器加 Zygo 干涉仪的检验方法。用上述两种方法检验非球面的结果作过对比,其结果基本一致。同时还检验过从俄罗斯引进的同样的非球面镜,俄罗斯加工中采用了带板补偿器,其检验结果与我们检验结果比对也得到一致的结果。从上述几种检验结果中得出结论,我们和俄罗斯加工的非球面镜都达到了 $\lambda/40\text{ RMS}$ 精度。

为了精密测定大尺寸光学元件的曲率半径,自

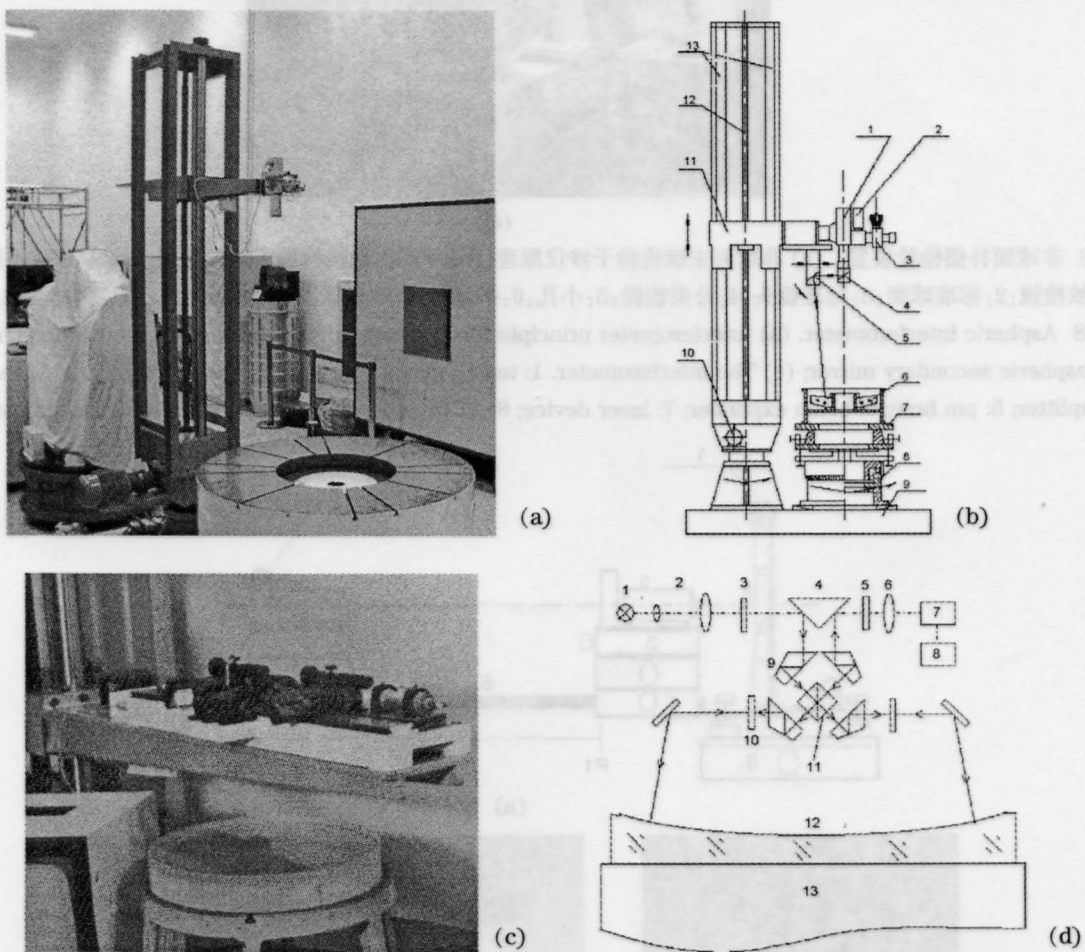


图10 总装调对心干涉仪。(a)对心仪;(b)对心仪结构示意图。1:测量头主体;2:CCD摄像机;3:双坐标测微目镜;4:固定反射镜;5:可调反射镜;6:被检部件;7:工作台;8:精密主轴;9:平台;10:电机;11:滑座;12:传动丝轴;13:立柱导轨;(c)对心干涉仪;(d)对心干涉仪原理图。1:光源;2:调焦镜组;3:偏振片;4:反射镜;5:检偏振片;6:聚焦镜;7:CCD摄像机;8:监视器;9:半五棱镜组;10: $\lambda/4$ 波片;11:偏振分束棱镜;12:被检镜;13:精密转台

Fig.10 Centering instrument for final system assembly. (a) The photo of the centering instrument; (b) The centering instrument schematic diagram. 1: measuring head; 2: CCD camera; 3: micro measuring eyepiece; 4: fixing mirror; 5: adjustable mirror; 6: mirror tested; 7: work table; 8: main wheel; 9: platform; 10: motor; 11: floatable stage; 12: driving guide screw; 13: mail slide; (c) The centering interferometer; (d) The centering interferometer working principle. 1: light source; 2: expander; 3: polarizer; 4: mirror; 5: analyser; 6: imaging lens; 7: CCD camera; 8: monitor; 9: half penta-prisms; 10:  $\lambda/4$  plate; 11: PBS; 12: mirror tested; 13: precision rotating table

行研制了长曲率半径测量装置。该测量装置由原有的 6.5 m 长精密导轨及防震台和自行研制的双频激光测长干涉仪构成。测量范围为被检镜口径为  $\phi 200\sim 600$  mm, 曲率半径为 500~6500 mm, 测量的相对精度为 0.01%。图 9 为长曲率半径测量装置原理图和其测量装置。

#### 4 光学系统总装调、总检测

为了适应空间光学遥感器总装调要求, 研制开发了大口径光学系统对心仪。仪器可分别用目视, CCD 电视和激光干涉方法测量偏心度, 偏心测量精度  $< 1''$ , 主轴精度为晃动  $< 0.5''$ , 径跳  $< 0.05 \mu\text{m}$ 。工作台直径为  $\phi 900$  mm, 导轨行程为 1.8 m。其中干涉测量偏心时的瞄准精度达到  $0.15''$ 。图 10 为对心仪示意图。

光学系统总体性能检测方面, 首先建设了总检测实验室。实验室面积  $100 \text{ m}^2$ , 恒温、洁净。室内安置长度为 15.5 m 的空气减震平台, 平台上放置焦距 13 m, 口径  $\phi 650$  mm 的牛顿式平行光管, 平行光管波像差小于  $\lambda/5$  P-V。

平行光管可用于相机的星点检验、目视分辨力检验、静态和动态照相分辨力检验, 还可检测相机的调制传递函数 MTF。为了测动态照相分辨力, 专门研制了配套的动态目标发生器。目标的空间频率范围为  $3.65 \text{ Lp/mm}\sim 50 \text{ Lp/mm}$ , 目标对比度为 100:1, 光谱范围为  $500\sim 900\text{nm}$ , 速高比调整范围为  $0.01\sim 0.08 \text{ rad/s}$ , 速高比相对误差小于 0.1%(当  $V/H=0.026 \text{ rad/s}$  时), 调焦范围为  $\pm 80 \text{ mm}$ , 调焦精度为 0.01 mm, 偏流角可调范围和定位精度分别为  $\pm 30^\circ$  和  $\pm 5'$ 。图 11 为相机总检测实验室, 包括 13 m 平行光管, 15.5 m 所浮隔振装置和动态目标发生器。

为了测试空间光学遥感器的传递函数, 与 13 m 平行光管配套地研制了长焦距光学系统传递函数测试仪。传函测试空间频率为  $0\sim 200 \text{ Lp/mm}$ , 测量精度为 5%, 被测镜头口径小于  $\phi 650$  mm, 焦距小于 4 m, 光谱范围为  $400\sim 900 \text{ nm}$ 。用这个装置还可以测定相机镜头加 CCD 在内的整个传感器的调制传递函数。

为了测定空间光学传感器的杂光系数, 专门研制

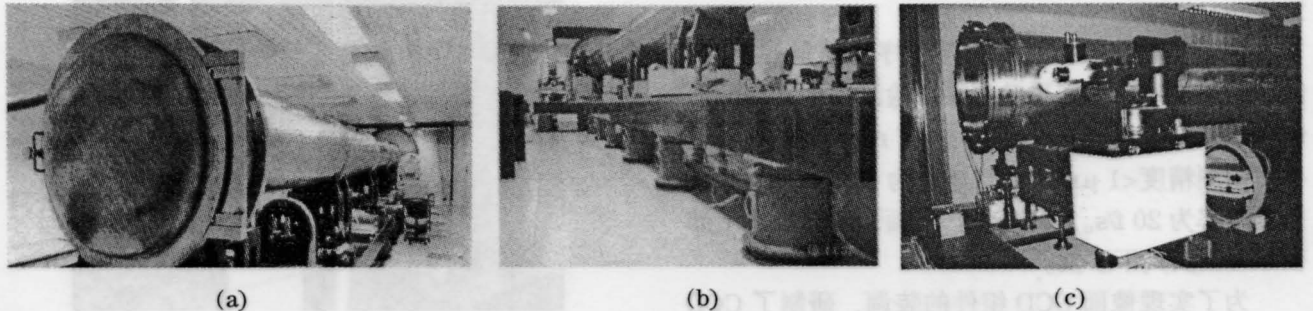


图 11 相机总检测实验室。(a) 13 m 平行光管; (b) 15.5 m 气浮隔振装置; (c) 动态目标发生器

Fig.11 General performance testing Lab. (a) 13 m collimator; (b) 15.5 mm air-bearing vibration isolated table; (c) The moving subject simulator

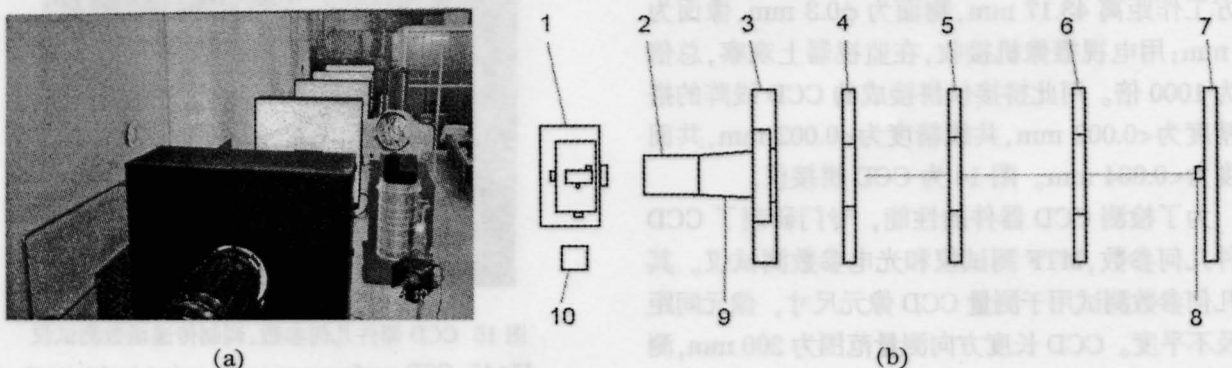
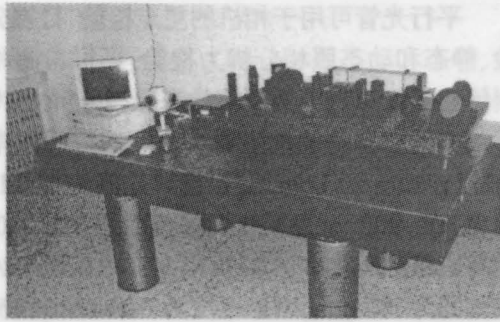


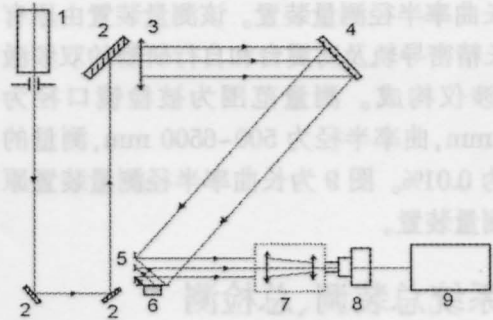
图 12 长焦距杂光系数测试仪。(a) 杂光测试仪; (b) 杂光测试仪原理示意图。

1: 工作台; 2: 被测镜头; 3: C 屏; 4: B3 屏; 5: B2 屏; 6: B1 屏; 7: A 屏; 8: 黑体; 9: 遮光罩; 10: 控制柜

Fig.12 Stray light coefficient-measuring device. (a) The device; (b) The schematic diagram. 1: detector; 2: lens tested; 3: screen C; 4: screen B3; 5: screen B2; 6: screen B1; 7: screen A; 8: black body; 9: diaphragm tube; 10: control panel



(a)



(b)

图13 平面面形动态干涉仪。(a) 平面面形动态干涉仪; (b) 平面面形动态干涉仪原理示意图。

1:激光源;2:反射镜;3:准直物镜;4:反射镜;5:光栅;6:被测表面;7:成像对焦;8:CCD摄像机;9:计算机

Fig.13 Film unevenness dynamic measuring interferometer. (a) The interferometer configuration; (b) The working principle. 1:laser; 2:mirror; 3:collimator; 4:mirror; 5:grating; 6:plane tested; 7:imaging lens; 8:CCD camera; 9:personal computer

了长焦距杂光系数测试仪。被测镜头口径 $\phi 500\text{ mm}$ , 焦距 $f=2.7\text{ m}$ , 光谱范围为 $0.5\sim 0.8\ \mu\text{m}$ 。杂光系数重复测量精度为 $0.005$ 。图12为长焦距杂光系数测试仪原理图及其测试仪。

还配套地研制总检用的长焦距大口径镜头的透过率测定仪、精密检焦装置、畸变测定装置、快门速度与像面曝光量测量仪、自准干涉波像差测定装置等。

为了实施总装调时对关键工序的质量控制, 研制了用于胶片负压展平动态精度检测用的平面面形动态干涉检验仪。胶片面积为 $127\text{ mm}\times 127\text{ mm}$ , 不平度检测精度 $<1\ \mu\text{m}$ , 快门速度为 $1/250\sim 1/1000\text{ s}$ , 采样速率为 $20\text{ f/s}$ 。图13为平面面形动态检验干涉仪原理图及其干涉仪。

为了实现像面 CCD 组件的装调, 研制了 CCD 拼接仪。工作台两个方向的行程分别为 $200\text{ mm}$ 和 $100\text{ mm}$ , 导轨精度为 $<2''$ , 观察用工具显微镜放大倍率为 $20$ 倍, 焦距为 $36.055\text{ mm}$ , 数值孔径为 $0.35$ , 物方工作距离 $43.17\text{ mm}$ , 物面为 $\phi 0.3\text{ mm}$ , 像面为 $\phi 6\text{ mm}$ ; 用电视摄像机接收, 在监视器上观察, 总倍率为 $1000$ 倍。用此拼接仪拼接成的 CCD 线阵的搭接精度为 $<0.002\text{ mm}$ , 共线精度为 $<0.002\text{ mm}$ , 共面精度为 $<0.004\text{ mm}$ 。图14为 CCD 拼接仪。

为了检测 CCD 器件的性能, 专门研制了 CCD 器件几何参数, MTF 测试仪和光电参数测试仪。其中几何参数测试用于测量 CCD 像元尺寸, 像元间距以及不平度。CCD 长度方向测量范围为 $200\text{ mm}$ , 测量精度为 $1.5\ \mu\text{m}$ ; 宽度方向测量范围为 $1\text{ mm}$ , 测量精度为 $1.5\ \mu\text{m}$ , 高低不平度的测量范围为 $1\text{ mm}$ , 测量精度为 $2.0\ \mu\text{m}$ 。测定 CCD 传递函数的测量精度为 $5\%$ 。图15为 CCD 几何参数, MTF 测试仪。

CCD 光电参数测试仪可测光谱响应、动态范围、线性度、饱和曝光量、等效噪声、各像元的响应均匀性等, 用于 CCD 器件的筛选和辐射标定。

除以上介绍的自行研制的总检测设备外, 从美国引进了 kodak 胶片冲洗机, 用于胶片纪录空间光学遥感器分辨力的最终测定。

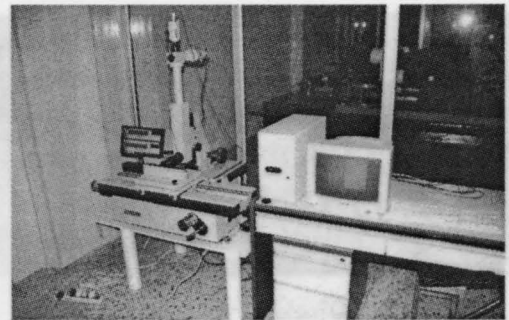


图14 CCD 拼接仪

Fig.14 CCD jointing machine

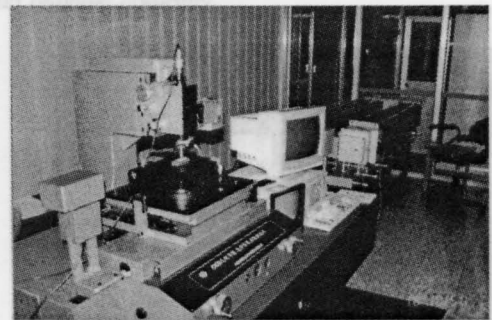


图15 CCD 器件几何参数、调制传递函数测试仪

Fig.15 CCD performance measuring instrument

有了这些自行研制的整套设备和引进的胶片冲洗机, 现在完全具备了空间光学遥感器总装调及总检测能力, 可满足其研制和生产要求。



## 5 空间环境模拟实验

为了保证空间光学遥感器对运载和空间环境的适应性, 必须在地面完成各项空间环境模拟试验。

在力学环境试验方面我们购置了苏州试验仪器厂的 D-600 电磁振动台, 从英国引进了 9 t 电磁振动台, 并相应地建设了实验室。这些设备可以满足相机的力学环境试验要求。图 16 为航天光学遥感器在 9 t 电磁振动台上进行力学环境试验的实况。

在热环境试验方面建立了有效容积为  $\phi 2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  的热循环试验装置, 与普通高低温试验箱不同的是要求密封, 罐内充干燥氮气, 试验控温范围为  $\pm 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

在热真空环境试验方面建立了有效容积为  $\phi 2.5 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$  的热真空试验装置, 控温范围达到  $\pm 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , 极限真空度达到  $1.3 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ 。图 17 为热循环、热真空环境模拟试验装置。

在热光学环境试验方面建立了与上述大型热真空试验罐配套的焦距为 13 m 和 20 m, 口径为  $\phi 650 \text{ mm}$  和  $\phi 1 \text{ m}$  兼容的真空平行光管。整个热真空试验罐和真空平行光管在一起抽真空, 其真空度达到  $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ , 并且把热真空试验罐和 20 m 平行光管安放在同一个防震平台上, 为此建立了长 26.5 m 的空气减震平台, 它可以把整个热真空试验罐和平行光管气浮, 达到光学检验要求的防震效果。图 18 为热真空、热光学实验室。

用此试验装置可进行空间光学遥感器整体的热平衡试验和热光学试验。其目的是在星载环境条件下确定空间光学遥感器焦面位置, 检验不同温度和气压环境条件下空间光学遥感器传感, 确定热控措施的有效性和确保空间光学遥感器在空间环境下达到所要求的空间分辨力。

总之, 发扬自力更生、自主创新的精神, 通过近十年的努力, 我所已建成空间光学遥感器研究、设计、生产和试验基地, 这是较短时间内花较少经费

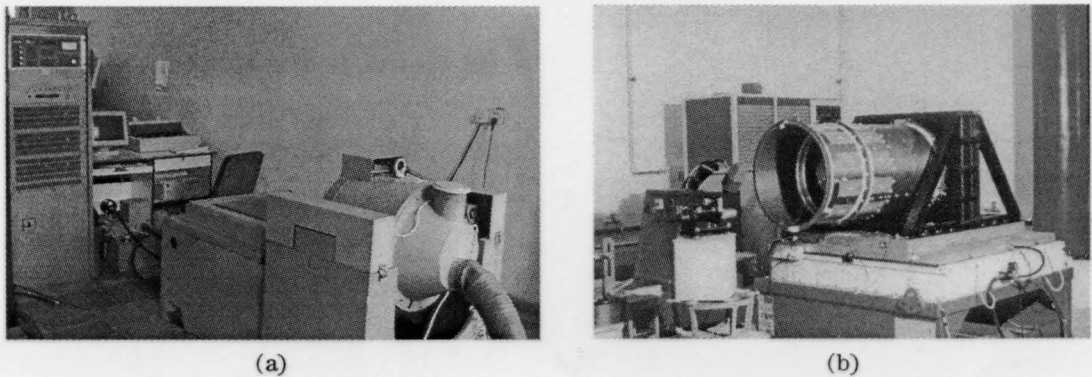


图 16 力学环境试验实验室。(a) 600 kg 电磁振动台; (b) 9 t 电磁振动台  
Fig.16 Mechanic environment-testing Lab. (a) 600 kg electromagnetic oscillation stand;  
(b) 9 t electromagnetic oscillation stand

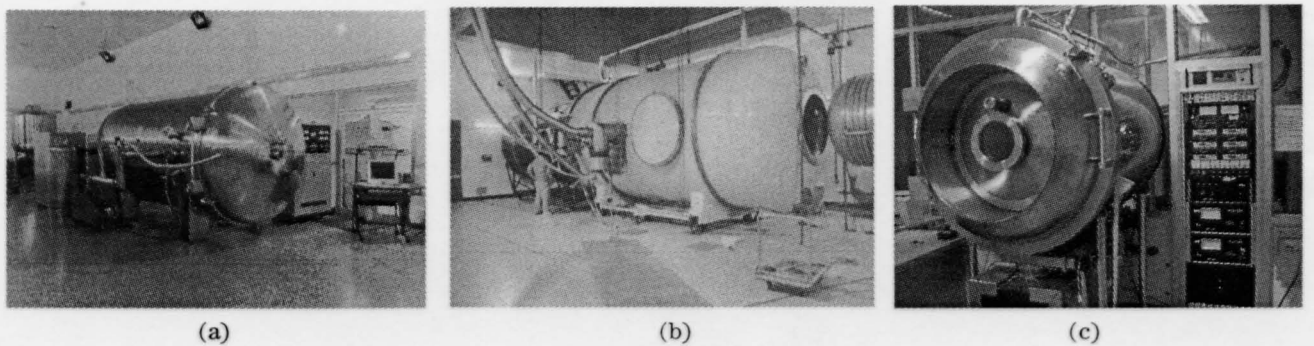
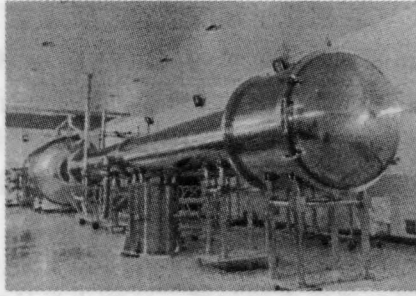


图 17 力循环、热真空环境模拟试验装置。(a)  $\phi 2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  热循环试验装置; (b)  $\phi 2.5 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$  大型热真空试验装置;  
(c)  $\phi 0.8 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  小型热真空试验装置  
Fig.17 Thermal circulation and thermal vacuum environment testing Lab. (a) The  $\phi 2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$  thermal circulation setup;  
(b) The  $\phi 2.5 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$  thermal vacuum chamber; (c) The  $\phi 0.8 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  thermal vacuum chamber



(a)



(b)

图 18 热光学实验室。(a) 20 m 平行光管与热光学环境模拟试验装置; (b) 26.5 m 隔振装置

Fig.18 Thermal-balance and thermal-optics testing Lab. (a) The 20 m collimator and thermal vacuum chamber; (b) The 26.5 m long air-bearing isolation table

满足工程研制要求的正确途径,研制基地的建设同时也锻炼和培养了一批有理论有实践经验的中青

年科技骨干队伍,这些成功的经验应发扬广大,为我国航天光学遥感事业作出更大贡献。



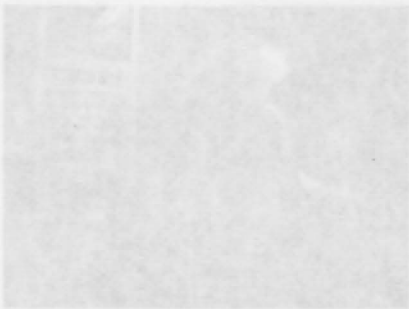
(a)



(a)

图 18 热光学实验室。(a) 500 kg 电磁隔振台; (b) 500 kg 电磁隔振台

Fig.18 Thermal-balance and thermal-optics testing Lab. (a) 500 kg electromagnetic isolation stand; (b) 500 kg electromagnetic isolation stand



(c)



(d)



(a)

图 19 热光学实验室。(a) 40.8 m x 2.5 m 热真空隔振台; (b) 40.8 m x 2.5 m 热真空隔振台; (c) 40.8 m x 2.5 m 热真空隔振台

Fig.19 Thermal-balance and thermal-optics testing Lab. (a) The 40.8 m x 2.5 m thermal vacuum stand; (b) The 40.8 m x 2.5 m thermal vacuum stand; (c) The 40.8 m x 2.5 m thermal vacuum stand