

风云一号气象卫星遥感仪器的光学设计

郑亲波 胥学荣

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要——介绍了风云一号气象卫星用的遥感仪器——甚高分辨率扫描辐射计的光学系统设计, 包括光学结构选择、成像质量评价、光谱波段截取、视场配准和杂散辐射的抑制等, 其中考虑了加工、安装工艺和热适应等问题。仪器成像质量优于 1/10 瞬时视场, 各通道的调制传递函数优于 0.3。

关键词——扫描辐射计, 光学设计。

1. 引 言

风云一号气象卫星上的扫描辐射计是我国第一台利用光电扫描方式获取从可见光到热红外宽波段信息的遥感仪器。为了获得清晰的地物目标的图象, 要求其光学系统有高的成像质量。为了达到高的探测灵敏度, 要求光学系统有高的光学效率。作者在研制风云一号遥感仪器的光学系统中形成了完整的系统设计和性能测试方法。从风云一号卫星所获得的结果表明, 本设计是可行的。它对类似的航天光电遥感仪器的研制将有一定的参考价值。

2. 光学系统设计

2.1. 光学系统的结构与要求

图 1 是辐射计的光路结构图。目标辐射通过与光轴成 45° 的扫描反射镜进入由主、次镜组成的五个通道共用的主光学系统, 以平行光形式射出, 光束中的红外辐射部分经红外/可见分色片反射, 再经折转反射镜和滤光片进入辐射致冷器内的锗制红外会聚系统。工作在 105 K 温度的碲镉汞探测器位于其焦面上。光束中的可见光部分透过分色片再经可见/近红外分色片分裂成两束平行光, 透射的近红外辐射由会聚透镜聚焦在视场光阑上, 再投射到硅单元探测器上。而反射的可见辐射由另一会聚透镜组会聚在硅三元线列探测器上, 在线列探测器附近设置了微型组合滤光片, 形成了三个独立的探测波段。

根据辐射计对地面分辨率和探测灵敏度的要求, 以及空间遥感仪器的特点, 光学系统必须:

- (1) 接收并会聚来自地球目标的辐射;

- (2) 用分光形式形成五通道探测,并限定其光学波段;
- (3) 与探测器一起确定仪器的瞬时视场,并使各有关视场配准;
- (4) 有较高的成像质量;
- (5) 有较高的光学效率;
- (6) 在安装校准之后,经受卫星发射段和轨道运行段的环境条件考验,像质不受变化。光学系统设计性能指标的要求见表 1。

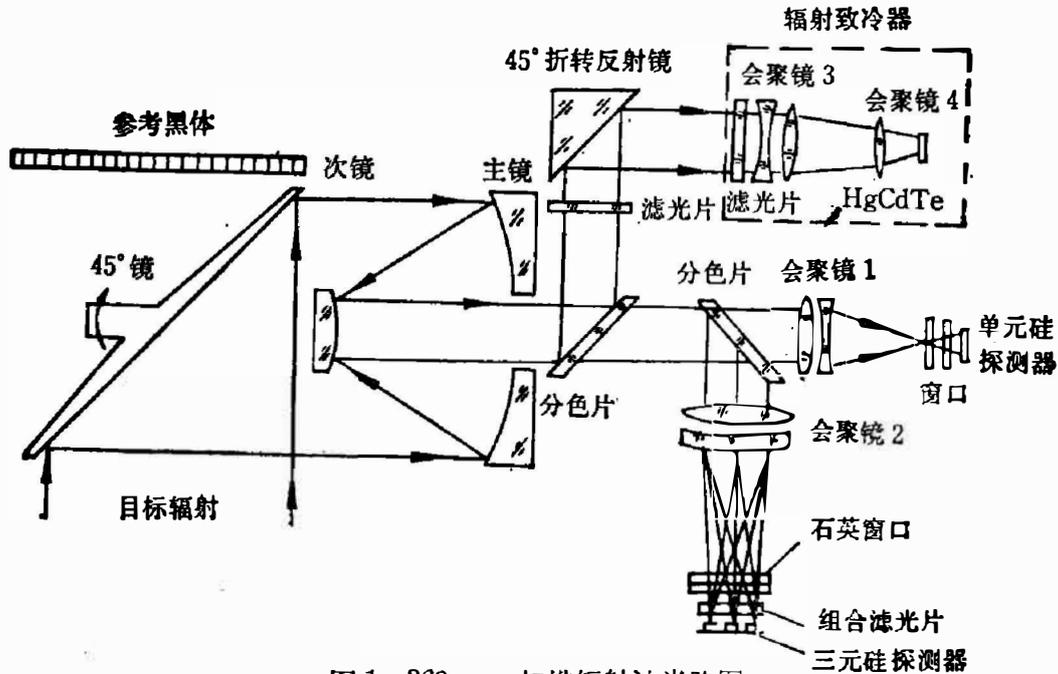


图 1 360 rpm 扫描辐射计光路图

Fig. 1 Optical configuration of 360 rpm Scanning Radiometer.

表 1 光学系统的设计指标要求

Table 1 Requirements for optical design of VHRSR.

参 数	通 道				
	1	2	3	4	5
波段(μm)	0.58~0.68	0.725~1.10	0.48~0.53	0.53~0.58	10.5~12.5
中心波长定位精度	—	—	1%	1%	—
波长宽度(μm)	0.58 ± 0.01 0.68 ± 0.01	0.725 ± 0.01 $1.1^{+0.01}_{-0.005}$	0.48 ± 0.005 0.53 ± 0.005	0.53 ± 0.005 0.58 ± 0.005	10.5 ± 0.1 $12.5^{+0.1}_{-1.0}$
MTF	>0.85	>0.85	>0.85	>0.85	>0.8
光学效率	0.3	0.3	0.16	0.18	0.18
入瞳直径(mm)	200				
IFOV(mrad)	$1.2^{+0.1}_{-0}$				
视场配准	CH_1 与 $\text{CH}_2 < 1/10\text{IFOV}$			$\text{CH}_{1,2}$ 与 $\text{CH}_3 < 1/4\text{IFOV}$	
星下点位置校准	与飞行方向和扫描方向的偏差均小于 $1/5\text{IFOV}$				

2.2 扫描反射镜

由磁滞同步电机直接驱动的扫描反射镜的转速为 360 rpm, 为了保证有较大的力矩裕度, 要求扫描镜的转动惯量较小, 即质量较轻. 主光学系统的入瞳直径为 200 mm, 因此, 扫描镜是一块短轴为 205 mm, 长轴为 290 mm 的椭圆形平面反射镜. 扫描反射镜基体选用金属铍材料.

扫描反射镜设计的关键是防止镜面的变形. 在结构上采用了背面蜂窝形式, 即减轻了镜体的质量, 又提高了镜体的刚度. 在镜面的制作上采用了先进的表面复制工艺, 保证了平面度和高反射率的要求. 扫描反射镜经过热学、力学等一系列的试验, 在直径 200 mm 范围内, 平面度偏差小于 4 个牛顿环计数.

2.3 主光学系统

主光学系统是由两块被称作主镜和次镜的抛物面反射镜组成. 主镜有效口径为 200 mm, 它既是系统的孔径光阑, 又是系统的入瞳, 焦距为 200 mm, 故其 F 数为 1. 与之相距 175 mm 的次镜口径为 25 mm, F 数也是 1. 这是一个共轴共焦系统, 构成了平行光进、平行光出的望远镜, 其角放大率为 8. 这种望远镜结构的特点是三级象差系数为零或很小. 即

$$\begin{aligned}\Sigma S_1 &= \Sigma S_2 = \Sigma S_3 = 0; \\ \Sigma S_4 &= 1.3 \times 10^{-4}; \\ \Sigma S_5 &\approx 0.\end{aligned}$$

这种结构能极大地利用主镜面积, 其有效利用率为

$$K = 1 - (D_2/D_1)^2 = 1 - (f_2'/f_1')^2 = 0.984; \quad (1)$$

它的另一个特点是与后光学系统耦合方便. 在光路中插入分色片、滤光片时, 对光焦度不产生影响; 与之耦合的会聚透镜组不受距离的限制, 而且结构布局容易.

主镜的抛物面方程为

$$y^2 + z^2 = 800x; \quad (2)$$

其最接近球面的半径 $r = 406.202$ mm, 最大非球面度 $\delta = 0.049$ mm.

次镜的抛物面方程为

$$y^2 + z^2 = 100x; \quad (3)$$

最接近球面的半径 $r = 50.781$ mm, 最大非球面度 $\delta = 0.006$ mm. 由于次镜的非球面度很小, 当抛光整修面形时, 它和主镜组合配对加工, 既完成了次镜的加工, 又修正了主镜加工引入的波像差, 保证了五个通道共用的主光学系统的成像质量.

主镜和次镜的材料为熔石英; 主、次镜光学镜筒的材料为殷钢; 它们的特点是热膨胀系数非常小. 因此, 选择了合适的轴向间距公差和径向配合公差, 在 $-5 \sim +45^\circ\text{C}$ 的温度范围内, 其热变形产生的像质变化, 完全符合设计要求. 为了有效地抑制杂散光, 光学镜筒内壁车削细纹, 并进行黑化处理, 同时主镜中心部位设置了光障板.

抛物面是一个对平行光成像理想的曲面. 理论上讲, 其像点图案只是衍射斑. 然而由于面形加工误差、表面镀膜膜层厚度误差以及装配和校准(非共轴共焦)等误差, 其最终的像点并不是完善的, 主光学系统产生的角弥散相当于 $1/15$ 瞬时视场.

2.4 可见/近红外会聚透镜组

(1) 透镜组

为了满足宽波段的工作需要, 以及避免胶合透镜的胶层物质在空间粒子条件下的变质和在地面存放的湿度影响, 选用了双分离消色差透镜组。从满足消球差、彗差以及位置色差的要求, 采用 BaK₁ 钡冕玻璃正透镜在前、F₆ 火石玻璃负透镜在后的组合。

辐射计探测目标的瞬时视场是 1.2 mrad, 经望远镜式主光学系统后, 以 9.6 mrad 平行光射出。由于确定了探测器线度为 1 mm, 则会聚透镜组的焦距为

$$f' = 1 \text{ mm} / 9.6 \times 10^{-3} = 104.2 \text{ mm};$$

选用的结构参数为

$$R_1 = 46.13, R_2 = -83.95, R_3 = -62.52, R_4 = -539.50;$$

$$d_{12} = 12.5, d_{23} = 2.8, d_{34} = 4.0.$$

以通道 1 的中心波长 0.63 μm 为例, 各面的三级象差系数如表 2 所示。

根据表 2 计算得到三级象差值为

$$\text{球差 } l'_4 = 0.2412 \text{ mm}; \text{ 子午彗差 } K_T = 0.01915 \text{ mm};$$

$$\text{象散 } x_t - x_s = 0.02233 \text{ mm}; \text{ 匹兹凡面 } x_p = 5.165 \times 10^{-3} \text{ mm}.$$

通过计算机运算, 得到实际象差值为

$$\text{球差 } L'_4(H) = 0.0628 \text{ mm}; \text{ 子午彗差 } K_T(H) = 0.0123 \text{ mm}.$$

表 2 会聚透镜组象差系数

Table 2 Aberration coefficient of the converging lens.

面数 \ 系数	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
1	0.0562309	8.28198E-3	1.21981E-3	2.69534E-5	1.8363E-4
2	0.211179	2.48916E-2	2.93398E-3	1.48107E-5	3.47574E-4
3	-0.276452	-3.31539E-2	-3.97603E-3	-2.2033E-5	-4.79474E-4
4	0.0159667	1.50968E-3	1.42743E-4	2.5533E-6	1.3738E-5
Σ	6.92535E-3	1.52937E-3	3.205E-4	2.22844E-5	6.72952E-5

三元线列探测器在像面上成平面形排列, 而在 0.48~0.68 μm 波段的三个通道有其各自的最佳像面位置。选择像面位置使得三个通道的成像质量基本相同。在这一位置上, 最大弥散斑尺寸约为探测器敏感面尺寸的 6.5%。

通道 2 的近红外透镜的结构形式与三通道透镜组相同, 但为了缩短辐射计的总长度, 将焦距约缩短一半, 并采用了视场光栏。虽然缩短焦距不利于象质, 但这是单通道使用, 其中心波长的弥散斑尺寸与视场光栏尺寸的比值仅为 3% 左右。所以这样设计还是可行的。

(2) 加工要求

球面样板等级, 即加工样板的实际半径与光学设计计算值之差, 将直接影响透镜组的性能和参数。从三级象差系数值可知, 透镜组象差系数均为正值, 而且第二面的贡献最大: 第三面是象差平衡面, 其系数为负值。将第二, 三面的参数变动量输入计算机, 选择一合适参数, 与样板标准等级对照后确定这两个面的样板等级为 B 级。显而易见, 第一、四面的样板等级可定为 B 级或 B 级以下。

透镜的表面曲率对样板曲率的偏离程度用牛顿环计数表征。牛顿环的规则计数值反映

了透镜表面半径差异引起的矢高变化。矢高为

$$\Delta H = \left| \frac{D^2}{8R_p} - \frac{D^2}{8R_s} \right| = \left| \frac{D^2}{8} \left(\frac{1}{R_p} - \frac{1}{R_s} \right) \right| = \frac{D^2}{8} \cdot \Delta C = \frac{D^2}{8R^2} \Delta R; \quad (4)$$

式(4)中, R_p 为透镜半径; R_s 为样板半径; R 为名义半径; D 为透镜口径; ΔR 为二者半径之差。

牛顿环计数为

$$N = \Delta H / \lambda / 2 \approx 500 \frac{D^2}{R^2} \Delta R, \quad (\lambda = 0.5 \mu\text{m}); \quad (5)$$

从式(5)可知, 牛顿环计数值与样板等级精度 ΔR 有关, 对 N 的要求高过样板精度显然是不合理的。 N 的大小还与该透镜表面在光学系统中的地位有关。选择合适的 N 值不仅要考虑成像质量, 而且还要考虑到透镜的加工时间和成品率。

牛顿环的不规则性, 显示了透镜球面半径并不是处处相等, 这一差异引起了象散的增大。这种不规则性是由于在加工的抛光阶段磨削力不均匀或胶盘时胶力不均匀所致, 或者是透镜材料内部应力释放不均匀和材料硬度不均匀所致。

对透镜表面的抛光要求取决于透镜在系统中的地位以及系统对杂散光的要求。根据弥散斑对系统总的成像质量的影响, 确定允许的单透镜的偏心率要求和透镜组的镜间偏轴要求。

2.5 热红外波段会聚透镜组

(1) 透镜组设计

热红外探测波段对气象卫星来说是一个非常重要的波段, 它不仅能获得地表热图象和地表目标温度, 而且能昼夜工作, 使卫星每天观察地球二次。

会聚透镜位于辐射致冷器内, 它与扫描辐射计的主光学系统之间采用平行光耦合的方式。该通道会聚系统的设计受到众多条件的限制, 诸如较小的探测器尺寸、低温环境、尽可能高的光学效率, 以及为数不多的可供选择的透镜材料。特别是用平面窗口封装的探测器, 必须留有较长的后截距; 因此, 给设计带来了很大的困难。

我们选择单晶锗作为红外透镜的材料, 它在 $10.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 波段内经抗反射镀层后, 有较高的光学效率。透镜组的结构采用负透镜在前, 正透镜在后的双分离透镜组为第一次会聚, 然后由一月牙形透镜再次将象点缩小, 并成像在碲镉汞探测器的敏感面上。

由于探测器尺寸为 0.21 mm , 这一会聚系统的入射平行光束为 9.6 mrad , 因此, 其等效焦距为

$$f'_e = 0.21 / 9.6 \times 10^{-3} = 173.86 \text{ mm},$$

即 F 数为 0.87 。

我们设计的会聚透镜组弥散斑尺寸约为探测器尺寸的 $1/3$ 。这一设计结果使得热红外通道在空间频率 417 c/rad 时的调制传递函数 $\text{MTF} > 0.96$ 。

加工装配后, 用 Traple-2000 测试仪测得该通道的会聚透镜组 MTF 曲线, 当 $f = 417 \text{ c/rad}$ 时 $\text{MTF} > 0.9$ 。

(2) 红外透镜组的热设计

抑制红外信号中的杂散辐射对于探测地物目标的热波段透镜系统来说是一个重要的问

题。采用冷光学系统和低的比辐射率镜筒,对降低杂散辐射是有一定效果的。

制备红外会聚透镜的材料是锗,镜筒材料为不锈钢。采用不锈钢是考虑到镜筒两端有较大的温差,为了避免镜筒的导热将热量带到二级冷块附近的月牙透镜而增加辐射致冷器的热负载,除了选材之外,还采用薄壁结构增加热阻。

会聚透镜组的透镜处在不同温度的低温下工作,因此与室温比较,锗的折射率、曲率半径、厚度间隔都发生变化,其结果将引起系统焦距、后截距的变化。如果不采取措施,后截距变化引起的离焦,将极大地降低系统的调制传递函数,使成像模糊。

2.6 光谱响应波段的确定

为了确定 VHRSR 的光谱响应,必须考虑具有不同光谱特性的元部件的影响。这些元部件是:镜面膜层、分色/分光片,滤光片等。由于这些元部件的相对光谱响应影响系统的光谱响应波段,又由于这些部件的绝对响应影响着仪器的信噪比,所以光谱响应和灵敏度两者应该综合起来考虑。

探测器对于确定光谱响应的波段是很重要的因素。除了带通滤光片之外,其余的元部件对系统的相对光谱响应影响不大。滤光片的技术指标,包括带宽、次峰响应和透过率。应在充分了解探测器、分色片等光学宽波段光谱响应曲线的基础上,分别对前截止边带和后截止边带的陡度提出设计要求。

为了获得通道 5 的系统光谱响应,设计了二块滤光片:短波截止滤光片和长波截止滤光片。如果碲镉汞探测器的长波限短于 $12.5 \mu\text{m}$,则长波截止滤光片就不使用。这样,就可以提高系统的灵敏度。

通道 2 使用一块有色玻璃作为短波截止,而利用硅探测器的长波限作为长波截止,于是得到 $0.725 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 的响应波段。

通道 1、通道 3 和通道 4 对光谱带宽度、中心波长定位都很严格,而且又处在三元线列硅探测器的前面,因此,特别设计和研制了置在焦平面附近的微型组合滤光片。

3. 主要性能测试与结果

3.1 光谱响应和 MTF

图 2 是甚高分辨率扫描辐射计五个通道的相对光谱响应。

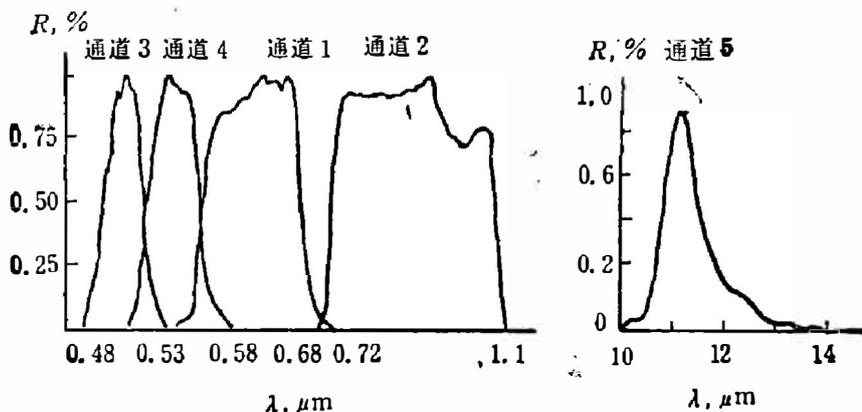


图 2 甚高分辨率扫描辐射计的相对光谱响应曲线
Fig. 2 Relative spectral response curves of VHRSB.

对可见/近红外会聚透镜组和热红外会聚透镜组都单独进行了 OTF 和 MTF 测试, 图 3 和图 4 分别是其中一个红外透镜组的 OTF 曲线和离焦量 MTF 曲线。

扫描辐射计由光学系统、探测器、电子学系统所组成, 所以, 目标辐射经过这三个独立环节转换成电信号传送给地面。因为整机的 MTF 是这三个环节的 MTF 之乘积, 所以判断辐射计地面分辨率, 有必要对整机进行 MTF 的测试。实测表明, 在 417 c/rad 的空间频率点, 其 MTF 值超过 0.3。

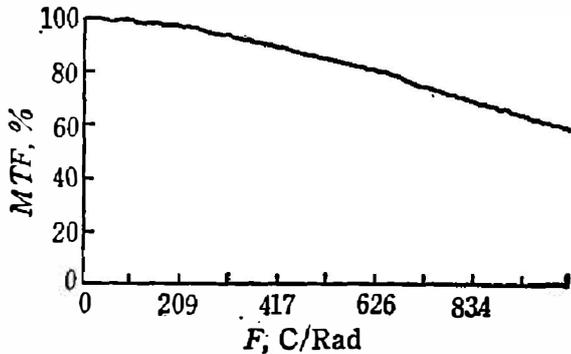


图 3 热红外会聚透镜组的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF of the thermal infrared lens.

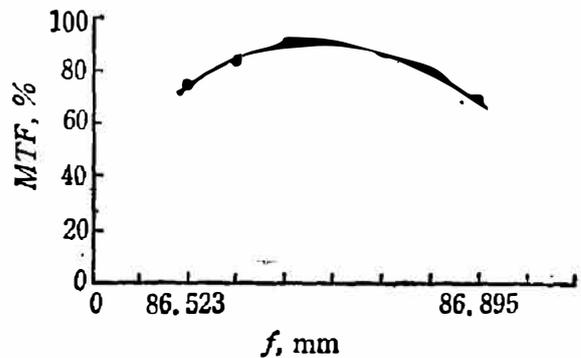


图 4 热红外会聚透镜组的离焦曲线(室温条件)

Fig. 4 MTF of focus-off of the thermal infrared lens.

3.2 视场配准和仪器安装面与主光轴的相对关系

在测试整机 MTF 时, 由于使用了同一空间频率的辐射源, 同时测出了通道 1、通道 2 和通道 5 的电信号, 根据示波器上电信号的超前和滞后现象, 就可确定出视场配准情况。

利用准直光源, 测量了安装平面的 X 、 Y 方向(扫描方向和飞行方向)对光轴的平行性, 得出星下点位置校准数据。

表 3 列出了辐射计主要光学性能测试数据。

表 3 辐射计主要光学性能测试结果

Table 3 Measured data of the main performances of optics of VHRSSR.

参 数	通 道				
	1	2	3	4	5
光谱波段(μm)	0.5742~0.6872	0.7191~1.03	0.4355~0.5290	0.5287~0.5858	10.575~12.15
MTFs(417c/rad)	>0.4	>0.5	>0.3	>0.3	>0.3
视场配准	GH ₁ 、CH ₂ 、CH ₅ <1/8 IFOV				
星下点标准('')	扫描方向 0		飞行方向 14		

3.4 轨道飞行试验

卫星发射后, 各地都收到了清晰的地球景色的图象资料。专家们对同一目标的五个通道图象进行了分析, 并与地面目标进行了对比, 确认辐射计的地面分辨率(在卫星 900 km 高度)达到了 1.1 km 的要求, 证实了光学系统的设计质量和装校质量并能经受卫星发射段的力学环境和轨道空间环境的考验。

致谢——本光学系统的研制成功, 是本所工厂、光学薄膜、光学装校、光谱测试等部门同志大力协作的结果。在此对协助和支持我们工作的同志深表谢意!

参 考 文 献

- [1] AVHRR Final report, N81-1239.
- [2] The TIROS-N/NOAA A-G, Satellite series, N79-12135.
- [3] Characterization of the landsat sensor's spatical responses, N84-31784.
- [4] J. M. Liold, 热成像系统, 红外与激光技术编辑组译, 1978, 140~152.
- [5] 郑亲波、詹丽珊、胥学荣, 红外研究, 1 (1982), 3: 179~184.
- [6] 郑亲波, 红外研究, 3 (1984), 1: 69~70.

OPTICAL DESIGN OF VHRSR FOR FY-1 METEOROLOGICAL SATELLITE

ZHENG QINBO, XU XUERONG

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia, Sinica, 200083, Shanghai, China)

ABSTRACT

The paper describes the optical system design of the Very High Resolution Scanning Radiometer (VHRSR), which has been mounted on FY-1 Meteorological Satellite. It not only involves selection of the optical structure, evaluation of image quality, determination of spectral band, regulation of FOV and reduction of veiling-glare, but also considers the effect of satellite environment on the optical system. The dimension of blur point of the optical system is smaller than $1/10$ IFOV, and MTF of each channel is greater than 0.3.