

# 地资卫星上的四带和五带 多光谱扫描器

**摘要** 地球资源卫星上的多光谱扫描器 (MSS) 有两种型式: 一种具有四条光谱带, 从0.5到1.1微米, 另一具有五条光谱带, 即增加了10.4—12.6微米的一条。本文介绍其光学设计和性能。仪器有一物空间平面扫描镜, 其运动近于线性, 并有一灵敏的光学位置监控器, 测定扫描镜的角位置。孔径为22.9厘米的望远镜将景物成像于纤维光学阵列上, 于是将景物的能量分解并传送到光电倍增管 (对于带1、2、3) 和硅光电二极管 (对于带4) 上。带5的能量通过纤维后再成像于以辐射冷却的碲化汞镉 (HgCdTe) 探测器。带1至4以一内装灯和太阳来校准。带5则使用一个内装黑体和一个冷参考。这就是对探测器的自身观察。在907千米高轨道上运行的四带扫描器一次扫过的地面为185千米时提供的数据记录从一带到另一带可优于50米, 而所分辨的花样为80米。经过一年的时间, 辐射率测量表明变化小于2%。

## 引 言

地资卫星1上的第一台多光谱扫描器自从其在1972.7.23日发射以来已发回150,000幅以上的高信息含量的地面图景。地资卫星在1975.1.22日成功地送上了轨道。收到的数据已被利用到农业, 地质, 地理, 水利, 生态, 海洋等方面, 既为地球资源管理

又为科学研究服务。

本文介绍现已在轨道上的四谱带的多光谱扫描器的光学设计及性能, 也介绍正在制造的新的五带型的, 第五带增进了一种按热性质制图的能力, 而其前四个带与早先的型式完全一样。两种型式的扫描器示于图1和2, 图中最显著的区别是辐射冷却器, 它加在五带的多光谱扫描器上以冷却第五带的探测器至其工作温度。

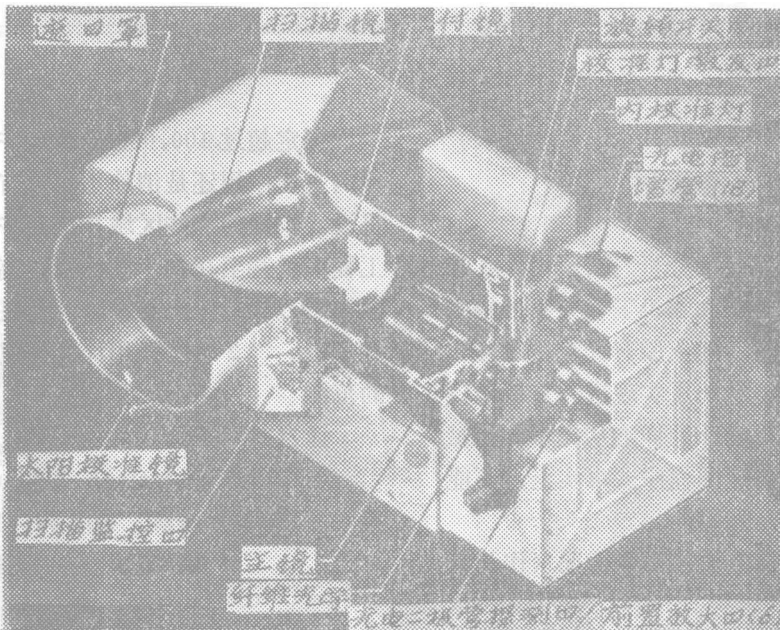


图1 四带多光谱扫描器剖开图

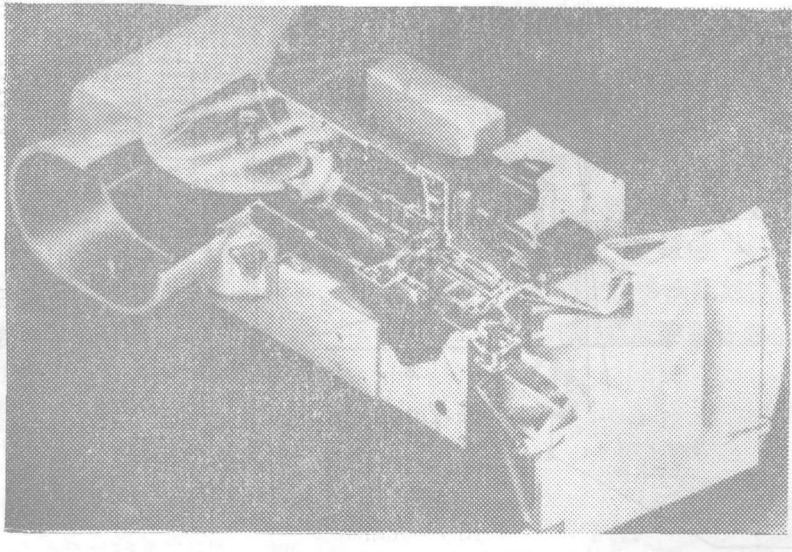


图2 五带多光谱扫描器剖开图

## 一 般 情 况

以近极的太阳同步轨道可取得对地面的近于均匀照明的有系统的复盖。这种轨道保证对相邻的地区照明角度不甚改变，对同一地区再次成象亦然。

扫描器的设计是用物方平面扫描镜的动作当卫星在白天向南运行时将自西向东扫过185千米宽。平面镜每次扫描将产生六条数

据，而当卫星在轨道上前进时，又对邻近地区产生六条数据。这样，摆动的平面镜作横向扫描而卫星的进程则作沿轨道的扫描，如图3所示。采取物空间扫描的型式有两项理由。第一，工作时传感器“看”着望远镜的内部部件。象空间的扫描传感器表现出这些内部部件由于测量景象时所招致的污染而引起温度变化。第二，这种型式在扫描过程中使望远镜总是用在其轴上的光路。图3示其光学装置，而图4是光路的截面图，基本上是按

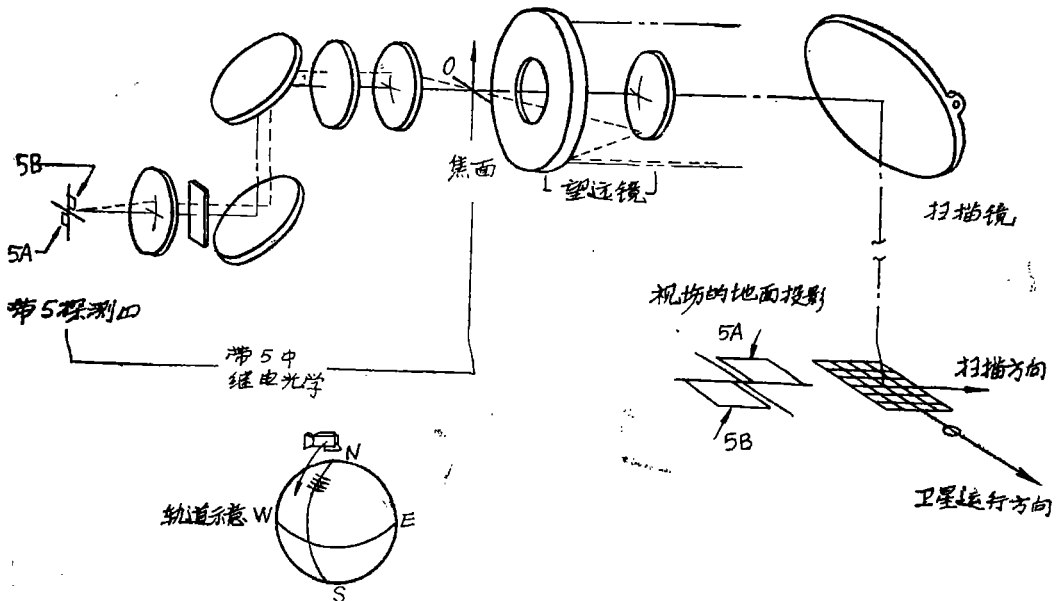


图3 扫描与光学装置

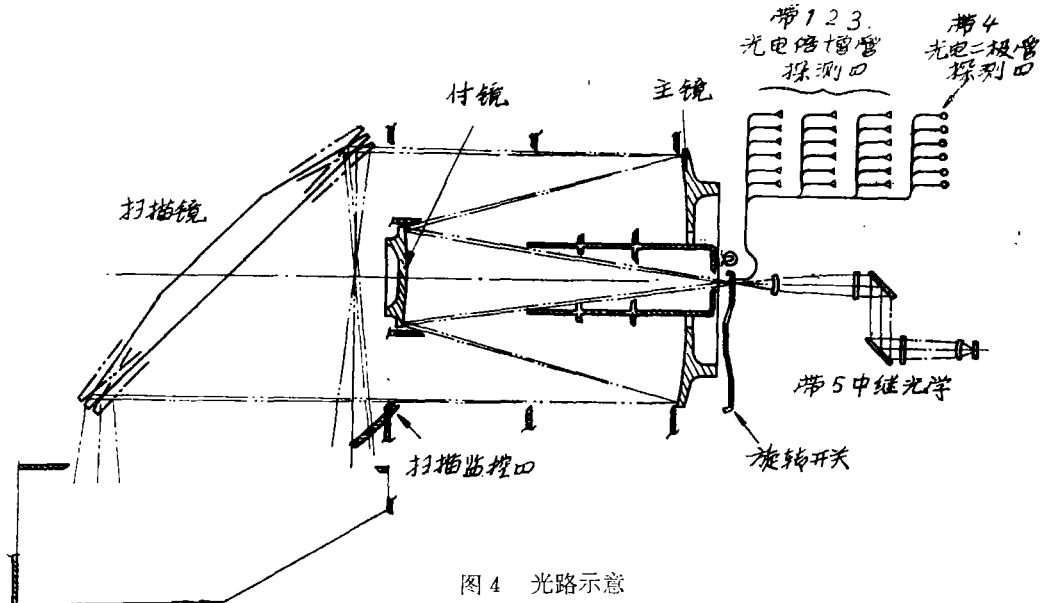


图4 光路示意

比例尺的。主镜与副镜都是非球面的，形成日共·克里田 (Ritchey Chretien) 光学系统。在焦面附近，能量通过一个旋转开关，这包括校准作用。焦平面有纤维光学元件的阵列，以之分解象并将能量输送到各光电传感器去。24根纤维排成 $4 \times 6$ 的行列，相应于四条谱带和每条带所扫描的六条线。每个玻璃纤维的方形顶端就是86微弧度的场光阑，从地资卫星向下在地面上伸张79米。

第五带的场光阑，由探测器的大小决定，是260微弧度平方，在地面上伸张240米。这样，两个探测器就复盖了其他带的六条线所扫描的区域。第五带红外辐射通过一个中继系统到达探测器。

从多光谱扫描器上26个探测器出来的放大输出将予以数量化和多路化，以便送到地面站去。多路调制器的采样在每次扫描的开始由位于扫描器孔径边缘的镜扫描监控器来激发。这个装置将一束光投射到扫描镜和探测器上以使在作185千米扫描时的西端，正中，和东端各发出一个脉冲，作为不依赖于扫描镜的计时变化的角参考。

每在轨道上运行一周，在扫描镜下面的一个小四斜棱的反射镜就将日光反射到光学纤维上。这个输出呈现为在每个扫描线上的一个脉冲，作为在轨道时的对于头四个带的

校准源。

表1是扫描特征的摘要。

## 光学元件

### 扫描镜

图5是扫描镜组件的1:1的图。反射镜轻轻地悬在弹簧支枢上，其动作由于给予和镜子相接触的冲击缓冲器以冲击而往复于扫描到返回以及返回到扫描之间，标称周期是4毫秒。扫描阶段的剩余时间用以成象，约

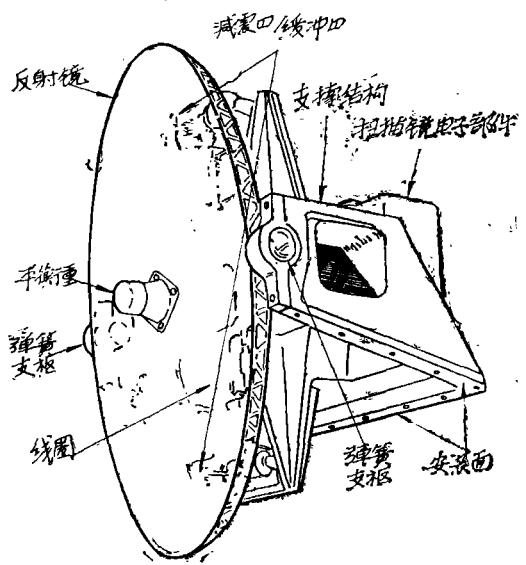


图5 扫描镜组件

表 1 多光谱扫描器特征数据

	四带多光谱扫描器		五带多光谱扫描器		
重量	48公斤		64公斤		
体积	40×59×89厘米		54×62×126厘米		
功率	42瓦		55瓦		
轨道	太阳同步		9:30上午		
高度			908公里		
再遇周期			18天		
扫描宽度			185公里		
扫描频率			13.6赫		
扫描效率			0.45		
望远镜孔径直径			22.9厘米		
无遮拦面积因数			0.75		
光谱(微米)范围	1带	2带	3带	4带	5带
	0.5—0.6	0.6—0.7	0.7—0.8	0.8—1.1	10.4—12.6
探测器	光电倍增管→硅光电二极管		碲化汞镉		
单个视场	86微弧度 (连同包层)		260微弧度		
每带每次扫描线条数	6		2		
f/数	3.6		1.9		
光学透射	0.46		0.53		

占全周期的45%。在受冲击之间的扫描阶段，镜子以等角速度运动（除去由于弹簧支座的回复力所致的很小的速度改变）。有一磁转矩器在镜子的返回期间施以力矩，供给其在受冲击时因阻尼而丧失的能量。转矩间歇由恰当的反馈来控制，以平衡能量消耗的变化。反馈是由钨丝灯，硅光电晶体管探测器和准直光学系统组成的光学开关来在扫描中点断开转矩器实现的。

反射镜是椭圆形的，长轴35.5厘米，厚2.5厘米。其前后两片，以及其整体的连接肋杆，是用放电加工方法从一整块铍板制成的。前表面镀以无电镍，以使其表面有光学性的光洁，背面也同样处理，为的是肋强平衡。在前表面上真空镀银，使多光谱扫描器所用光谱区有均匀的光谱反射性能，再加上一层保护膜以防失泽。

使用镀银膜对高可靠性的空间计划有点冒险。受大气中污物的作用银会分解。虽有良好保护膜也难免有针孔，在这种地方分解开始。即使有这种可能的毛病，也未考虑其它膜层，因为银的反射性能是比较合于要求的。

### 扫描位置监控器

对于重现现象的一项关键问题是精确重现所扫描的象元的位置。这就必须知道扫描镜的角位置精确到±10微弧度。扫描监控器是用光学方法来确定镜子到这样精度的角位置。监控器用一个镓砷（GaAs）二极管光源，从扫描镜作多次反射以产生角位置信息。图6示扫描监控器各部件。

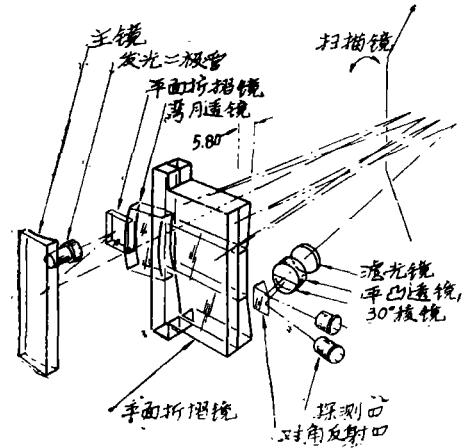


图6 扫描监控器光学示意图

### 望远镜

选择日其克里田型式的原因在于它的轴外性能良好，而这是第五带和前四带在焦平面上离开达0.38厘米这种情况所要求的。这种设计的另一优点是对于微小的失调不太敏感。望远镜的焦距为82.6厘米，f数为3.6。反射镜由熔石英制造，有增强的镀银层。

望远镜组件，包括殷钢的支撑结构，示于图7，部份剖开。主镜直径为22.86厘米，

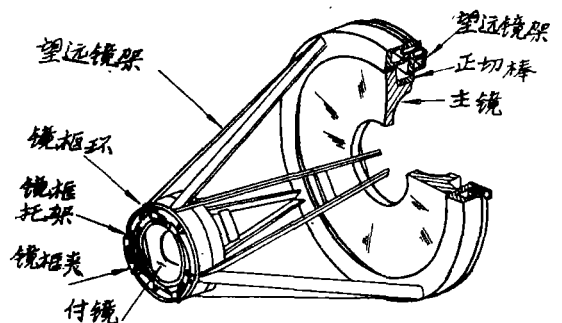


图7 望远镜组件

厚0.76厘米，加上圆柱形框使其很像一只碟子。用殷钢的三点正切棒支撑以使机械应力与热应力尽量小。付镜也是同样处理的。设计公差的要求是组合成的光学系统成象质量应有小于1/3波长的波前变形。此外，在指定的温度范围（+5°——+35℃）内的试验表明变化不超过1/2波长。

### 纤维光学

前四带用的纤维光学用24条有包层的方

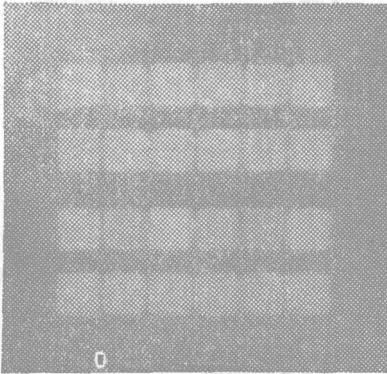


图8 光学纤维的象平面端

头纤维来分解象并将光传到24个探测器。纤维头在焦平面上布置成方阵如图8所示。这些照片是在探测器端照明来拍摄的。纤维列之间的间距选择是与数据采样方案相配合，以使采样各点可以相贴合。

### 传输透镜

传输透镜将纤维输出端的能量送到探测器。送进光电倍增管的能量耦合于增强核镜而使平均信噪比增进到1.4。在每个透镜与探测器之间有一恰当的光谱滤光镜。

传输透镜是平凸透镜，以高折射率玻璃制成，凸面上涂有增透膜，平面则光学地浸没于纤维端。两项处理皆旨在使透射损失最小。

### 中继光学

第五带的象从望远镜焦面以中继光学再成象于探测器上，理由有二：其一，探测器必须冷却，所以，它要占较大的位置；其二，因为对探测器是以辐射方式冷却的，冷

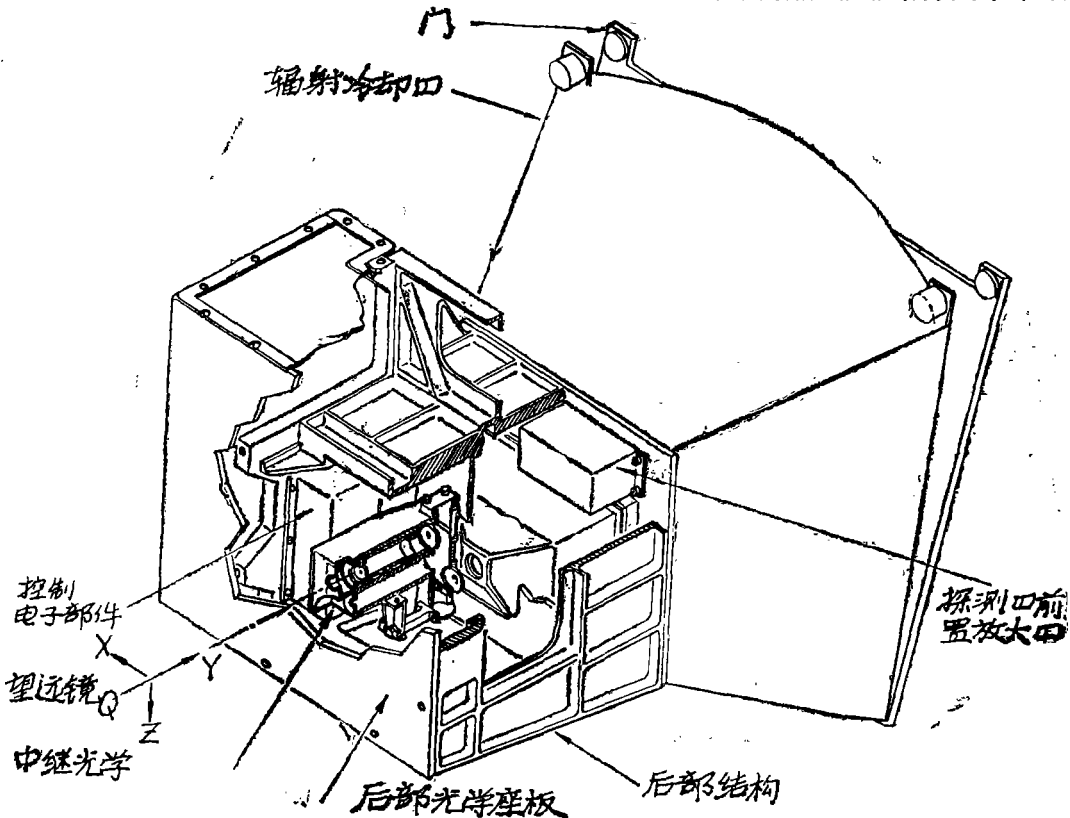


图9 扫描器后部中继光学剖开图

却器必须完全面对空间。为了满足这些要求，象必须推后到第一焦点的后面25.6厘米，而且离轴6.6厘米。中继光学的设计示于图9，其中所用皆为锗透镜。

第三个中继透镜装在辐射冷却器上。如果冷却器与铸件之间有些移动，对于探测器的对准不致有多大影响，因为进入第三中继透镜的光线大致是准直的。

### 滤光镜

带1、2、3的光谱带通滤光镜由吸收玻璃制成，它们明确了短波极限，而长波极限则用多层电介质膜来确定。带4的滤光镜只定下短波极限，主要靠电介质膜系，而其长波灵敏度则靠探测器的性能。图10示多光谱扫描器前四带的全面光谱响应；图11示其第五

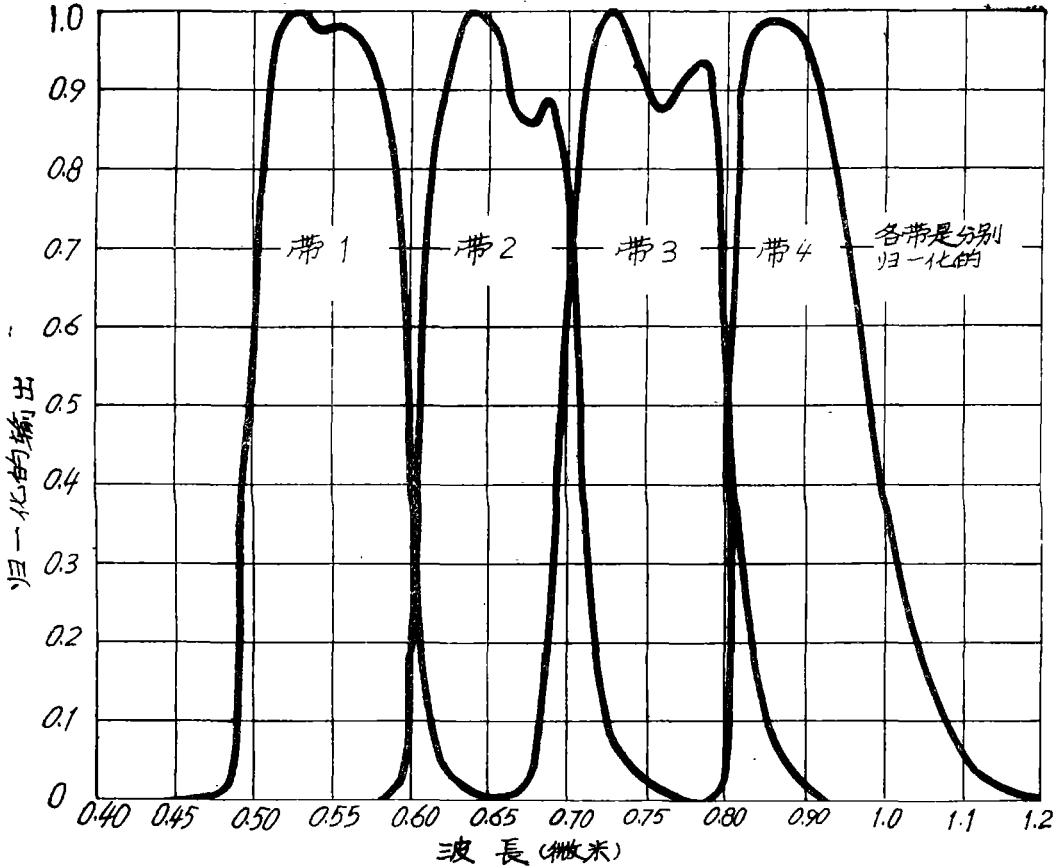


图10 四带多光谱扫描器的光谱响应

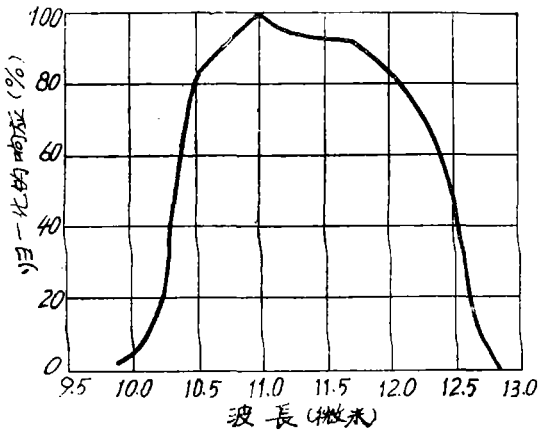


图11 多光谱扫描器第五带的光谱响应

带的。带5用一锗基片加上多层电介质膜以产生10.4到12.6微米的通带。

### 探测器

带1、2、3都用光电倍增管探测器。光阴极是多碱式的，而棱镜则光学地浸没在管子的面板上以使辐射能量多次在光阴极材料中通过而增强其响应。图12示管子的装置细节并指出传输光学的位置。

带4所用的硅光电二极管是p-i-n型的，偏压的接法是使其电容减小。图13示探

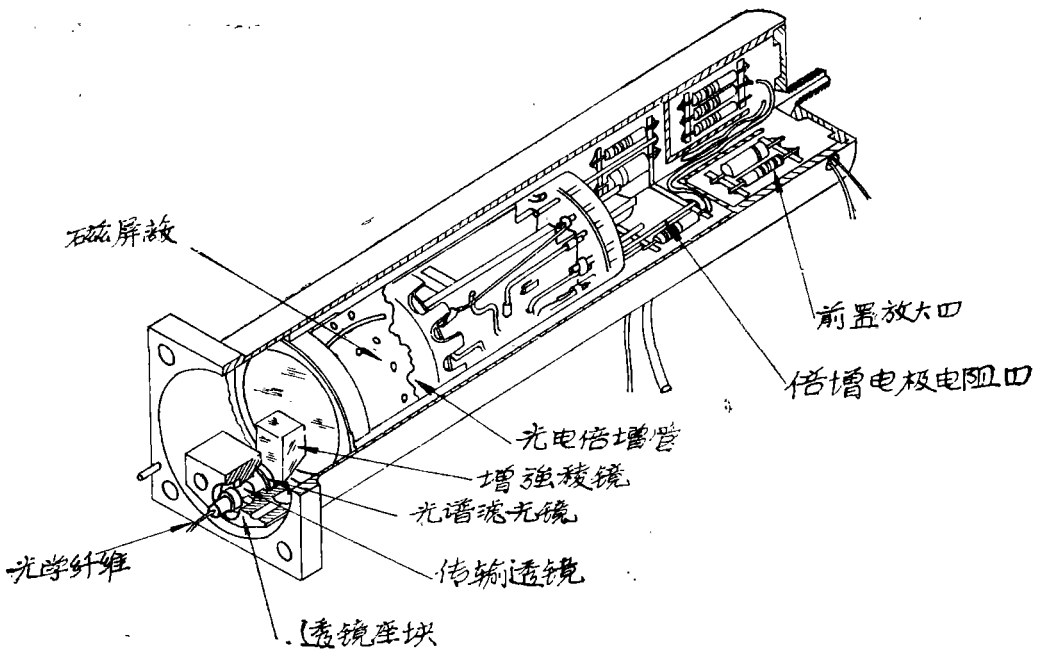


图12 光电倍增管组件

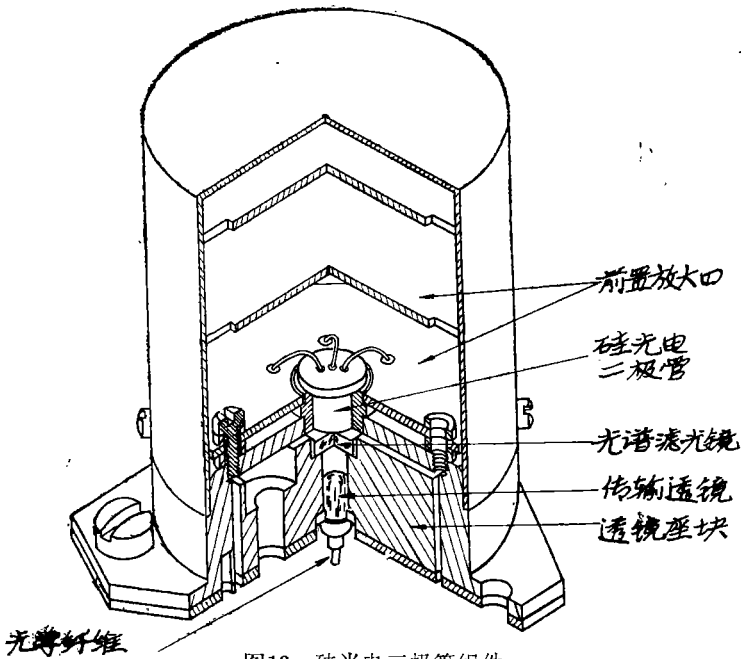


图13 硅光电二极管组件

测器的精细安排和接到前置放大器的短接线。

带5的碲化汞探测器是用一块单晶制成的，形式如图14所示。探测器的区域是密封着的并有涂增透膜的Irran II窗。设计要  
求是尽可能小的体积与重量，因其要悬在辐射冷却器之内。要有良好的探测性能应该冷

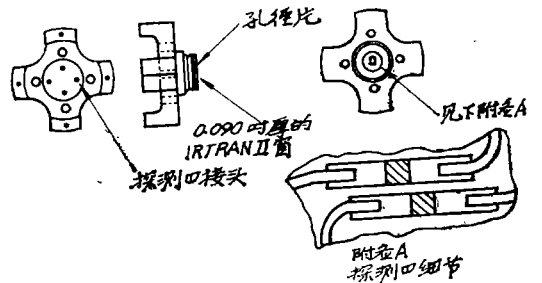


图14 碲化汞探测器组件

却到 $100^{\circ}\text{K}$ 附近。

设计冷却器的要点包括有良好的刚性和低的导热性。其所以要求刚性是因为便于使

视场与前四带的对准。图15是冷却器在探测器区域的图，这是以 $90^{\circ}$ 交于光轴的两平面视图。

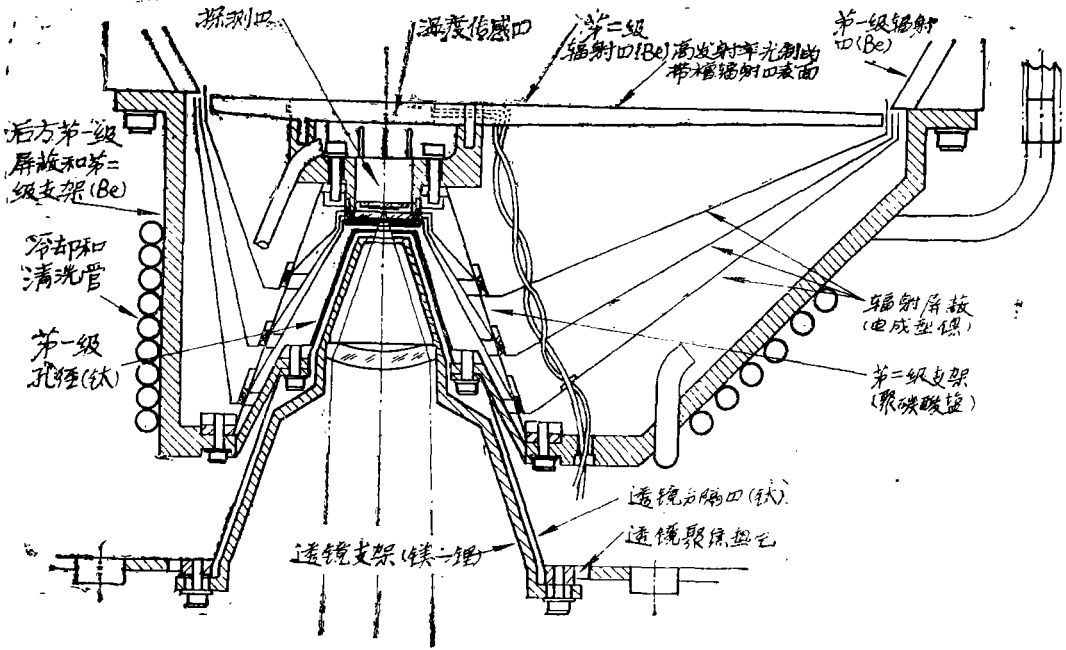


图15 探测器区域的辐射冷却器（相交 $90^{\circ}$ 的两平面形成的截面）

要这个参考。

## 校 准

太阳校准

### 带 1 到 4 的内校准

引进校准源的开关在每两次扫描周期下转动一次。图16是旋转开关的卸开图。在一次开关终了时，对于前四带，从一只带有校正色的滤光片的白炽灯来的光经过附于旋转开关的中性滤光楔之后聚焦在纤维的末端。光源电压与扫描时间的变化关系在地面处理时用以平衡某一谱带中的六条信道上可能发生的增益变化。经验证明人眼能够觉察相邻线之间的轻微变化。地面处理所进行的校正要使线与线之间光密度变化保持在 $2\%$ 以内。

另一次关开终了时将以一个黑色面呈现给四个带，作为第四带的零参考。带1、2、3的光电倍增管对于零信号自然有零电流，但带4的硅光电二极管以偏压工作，因此需

前四带所用作为校准标准的太阳光采样按图17所示的装置取得。反射镜之间夹角的选择是当所视察的景象在黑暗中采样。之所以要个斜棱是为了随季节太阳角有变化。孔径定出收进的日光份量，提供一个中等的信号振幅，但对第五带来说则太小。在地资卫星1测试时由于污染所致的太阳校准信号下降的情况在地资卫星2则未曾出现。

### 带 5 的校准

多光谱扫描器的热红外带的振幅校准方法是独特的，因为不便于将仪器指向空间以取得零输入。代替它的是用一反射镜令冷却了的探测器观察它自身。以下解释可以帮助了解这个方法。

扫描器所观察的景象辐射率的范围相应

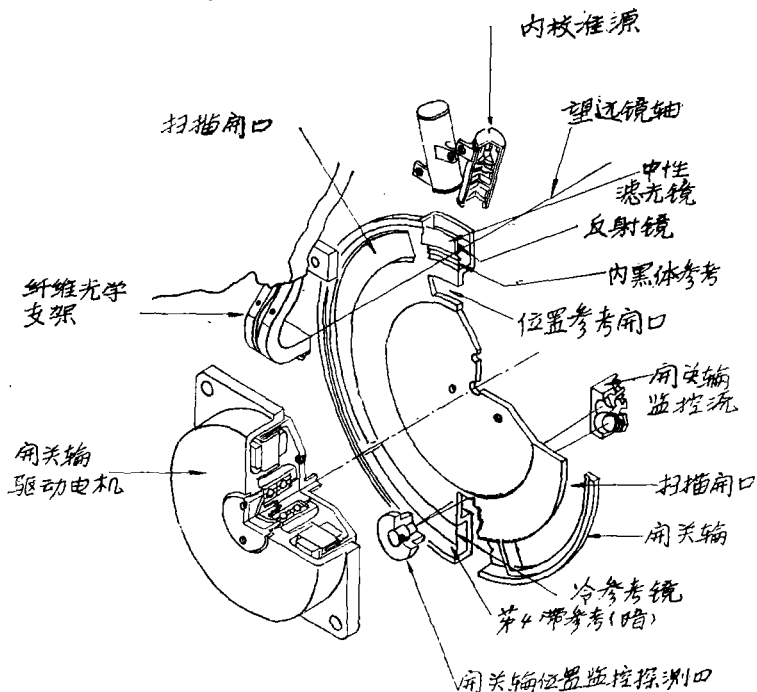


图16 旋转开关部分的卸开图

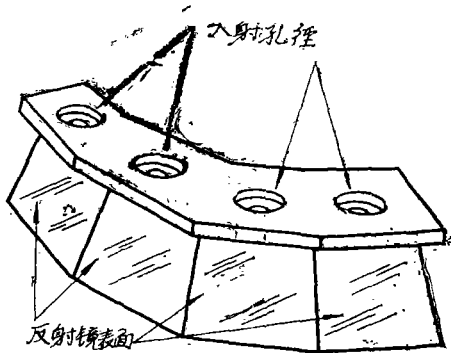


图17 太阳校准组件

于温度范围  $223^{\circ}\text{K}$  到  $330^{\circ}\text{K}$  ( $-58^{\circ}\text{F}$  到  $+135^{\circ}\text{F}$ )。旋转开关一次终了使其观察开关上的带槽的黑表面，这大致为开关温度下的辐射黑体。另一次终了时带来一面反射镜使探测器观察它自身，即自己的辐射率很低的冷却区域（同时作为带4的零参考）。这两个参考措施称为内黑体参考和冷参考。当镜子在的时候，镜子和中继光学将提供少量的室温辐射率，这成为实际的冷参考，因为冷却的探测器区域相对来说辐射率是微不足道的。冷参考比最冷的景象更低些。

探测器将接收的功率转变为电压，由前置放大器和视频电子放大器加以放大。电压是辐射功率的线性函数。信号电压与探测器偏压相比只占一个小范围，而偏压对于探测器的正常工作是必要的。以直流电平控制除去偏压部分，随后有一直流恢复过程。只有在冷参考时才接上直流恢复电路，并将扫描器输出定在预定的电压。扫描循环的其余时间就断开直流恢复电路，但在直流恢复期间将一电容器充电保持一定电压水平，这样各种辐射输入的电压都能和冷参考联系起来。

扫描器的0到+4伏输出范围由多路调制器转换为6位数字码。由于编码级是有限的，又由于冷参考给予探测器的功率比  $223^{\circ}\text{K}$  的景物的功率要小，所以将冷参考定在编码范围以下的一定电压上，于是全部输出范围就留给在  $223^{\circ}\text{K}$  到  $330^{\circ}\text{K}$  的景物数据用了。当探测器的响应率和扫描器温度变的时候，则一指定的景物辐射率所给的信号电平将有变化，因而有校准系统来消除这些影响。

探测器响应率（电压输出除以信号功率输入）随探测器温度和其年龄而变。温

度是受辐射冷却器的性能控制的。这种冷却器依靠暴露它的高反射率的表面以及稳定的辐射表面,因此易受污染的影响。再则,即使温度固定,有些探测器经过长时间也会改变响应率。为了补偿这些变化,提供了一系列的可指挥的增益级。但既然它们是不连续的,还是只好不能完全相应。

扫描器的这个温度变量是重要的,因为到达探测器的辐射功率包括来自扫描器元件的份额。可以暂且把探测器所观察到的扫描器元件全都认为在同一个温度。

以上所述总结于图18。所标注的辐射率值是在规定的极小与极大温度 ( $N_m$ 在 $223^{\circ}\text{K}$   $N_M$ 在 $330^{\circ}\text{K}$ ) 下的。还有两个内参考的( $N_R$ 和 $N_C$ ), 示出它们随扫描器温度的变化, 却假定表观景物辐射率是不受影响的。实际上, 探测器所受功率对于一固定的景物将随扫描器温度而变, 不过本图是用表观景物辐射率表示的。 $V_{off}$  表示前已说过的固定的电压下移。

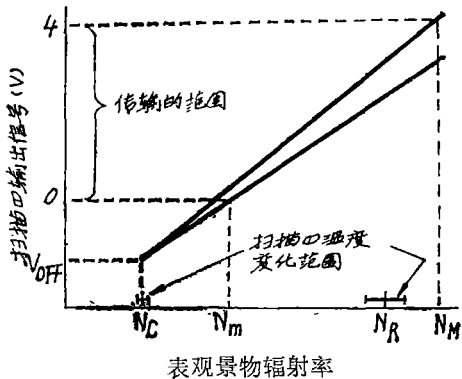


图18 第五带信号电压与表观景物辐射率的关系

所绘直线表示扫描器的电压与功率响应之间关系的范围, 如果响应越出这个范围, 则用指挥增益级来改正。

### 带 5 在发射前的校准

校准步骤包括给予扫描器以标准黑体源, 呈现出一系列已知的景物辐射率, 然后记录下扫描器输出电压 (包括从内黑体参考来的) 同时将扫描器温度保持固定在一组数值中的一个上。这些数据将画在电压对辐

射率的图上, 并将直线延伸到与 $V_{off}$  相交, 这就给出表观冷参考辐射率。内黑体与电压信号的交点给出其表观辐射率。这样取得一组参考辐射率对扫描器温度的关系。

在轨道上应用这项校准时, 遥测出的扫描器温度识别出两参考辐射率。冷辐射率与 $V_{off}$  的交点和内黑体参考辐射率与其电压值 (这是扫描信号的一部分) 的交点确定一条直线如图18所示。用这个图可将扫描器景物信号转换为表观辐射率。其所以称为表观是因为它们包含着大气效应。

## 性 能

这个扫描器的成果已经制成如地图, 庄稼和木材的估算, 探矿, 供水以及环境控制等, 指明它的精确性和用途。它的性能的某些数据示于表 2 和表 3。这些项目的进一步讨论见于参考文献 (5、6)。

表 2 多光谱扫描器(MSS)性能测试

对子系统的试验			
特征	要求	MSS I	MSS II
扫描重复性 (微弧度)	24(最大)	5	3.4
交轴变化 (微弧度)	33(最大)	3	3
调制传递函数 (MTF)在137米波长	0.35(最小)	0.42	0.43
内校准绝对稳定性(%)	$\pm 2$ (最大)	无数据	0.5
信道之间(%)	$\pm 1$ (最大)	2.4	1.9
带之间(%)	$\pm 1.5$ (最大)	3.6	2.2
信噪比:			
带1(在 $2.48$ 毫瓦·厘米 $^{-2}$ 球面度 $^{-1}$ )	71(最小)	113	129
带2(在 $2.00$ 毫瓦·厘米 $^{-2}$ 球面度 $^{-1}$ )	57(最小)	86	98
带3(在 $1.76$ 毫瓦·厘米 $^{-2}$ 球面度 $^{-1}$ )	38(最小)	72	76
带4(在 $4.60$ 毫瓦·厘米 $^{-2}$ 球面度 $^{-1}$ )	77(最小)	123	130

表 3 MSS性能测试: 在轨道上\*

特征	MSS I
记录:	
谱带之间	<50米均方根
轨道运行之间	150米均方根
分辨率	
重复性的船坞图样	80米
所观察到的小地形	40米
辐射率变化 (在Death Valley Site, 一年内)	<2%

\* 括地面处理的蜕化

译自“Opt. Eng.” Vol.14 P312—322,

1975

(卢寿栢译)