



空间望远镜* 及其科学仪器

苏万振

(中国科学院紫金山天文台)

提 要

计划于 1986 年送入轨道的空间望远镜将是第一个大口径、长寿命、多功能的轨道天文台。它的宽波段覆盖和高成像质量将使它成为当代无可匹敌的天文观测设备。本文简要介绍此望远镜结构、焦平面上的科学仪器及望远镜的发射、管理与控制。

引 言

1962年美国科学院一个研究空间科学未来的小组首先提出研制大型空间望远镜作为美国空间科学计划长期目标的建议。1969年美国科学院的另一个小组提出口径3米的空间望远镜目标。1972年美国科学院重新考察七十年代天文学的需要和优先项目时,认为大型空间望远镜是一个实际的长期目标。与此同时,NASA组织天文学家小组给空间望远镜的可行性研究提供科学指导,并于1973年和1977年两次从科研机构抽调科研人员组成小组,帮助确定空间望远镜及其科学仪器的基本设计方案,参与空间望远镜的设计和研制。1974—1977年期间,空间望远镜计划由于预算未批准,几乎处于取消或无限期拖延状态。后经几百名天文学家 and 对此感兴趣的科学家在国会外的紧张活动,1977年空间望远镜计划才获国会批准。八十年代初,美国天文学调研委员会在“八十年代的天文学和天体物理学”的报告中,认为空间望远镜计划对整个天文学科有极为重要的意义,建议NASA尽可能早日完成其研制任务并使之投入运转使用。

现在,空间望远镜预定于1986年发射,它将成为一个大口径、长寿命的空间光学天文台,给天文观测能力创造了重要条件。空间望远镜无可匹敌的观测能力来自以下方面:

1) 它是迄今为止被送入轨道的口径最大的望远镜,其主反射镜为2.4米,能在其焦平面上形成高质量的图像。

2) 它在500km高度的轨道上进行观测,摆脱了地球大气的阻碍和歪曲,可达到地面观测无法达到的波段覆盖、灵敏度和角分辨率。配上适当的仪器后,此望远镜可进行从紫外到红

1983年11月18日收到。

* 计划在1986年发射,为了表彰E. P. 哈勃在宇宙学方面作出的巨大贡献,此望远镜已被NASA命名为“哈勃空间望远镜”。——编者注

外整个光谱区不同波长辐射观测。天体影像的空间分辨率可达 $0''.1$ 量级(地面约为 $1''$ 量级), 可观测距离比地面望远镜远 7 倍。

3) 其焦平面上的科学仪器设计成可作各种不同组选和更换方式, 使望远镜可充分利用最新技术成果, 发挥其巨大科学潜力。

4) 望远镜将用空间运输系统——航天飞机送入轨道和进行维修。在望远镜工作期间可通过航天飞机送宇航员进行轨道中的仪器维修与更换。必要时, 每隔一段时间(例如 5 年)把整个望远镜载回地面作大的修整, 然后再送入轨道。其寿命原则上可达几十年, 现设计希望至少 15 年。

5) 为保证地面与望远镜的通讯经常畅通, 地面与望远镜之间通讯将通过一个地球同步的跟踪和数据中继卫星系统进行。

因此, 此空间望远镜不但将使光学观测产生自 1948 年帕洛马天文台 Hale 望远镜建成以来的第一次质量飞跃, 而且将为预计二十年后出现的空间射电、红外、光学、紫外、X 射线全系列望远镜提供必要的技术试验和操作试验。此望远镜发射后, 还将向全世界各地天文学家提供观测机会。

一、空间望远镜的结构

图 1 给出空间望远镜(ST)的结构图。望远镜圆柱体长 12.8 米、直径 4.27 米。望远镜本身由两个双曲面反射镜组成: 2.4 米凹面主镜和装在主镜前约 16 英尺处很小的凸面副镜。投射到主镜上的光反射到副镜上, 并由此射向主镜的中心孔, 图像到达主镜后几英尺处的一个焦平面上。

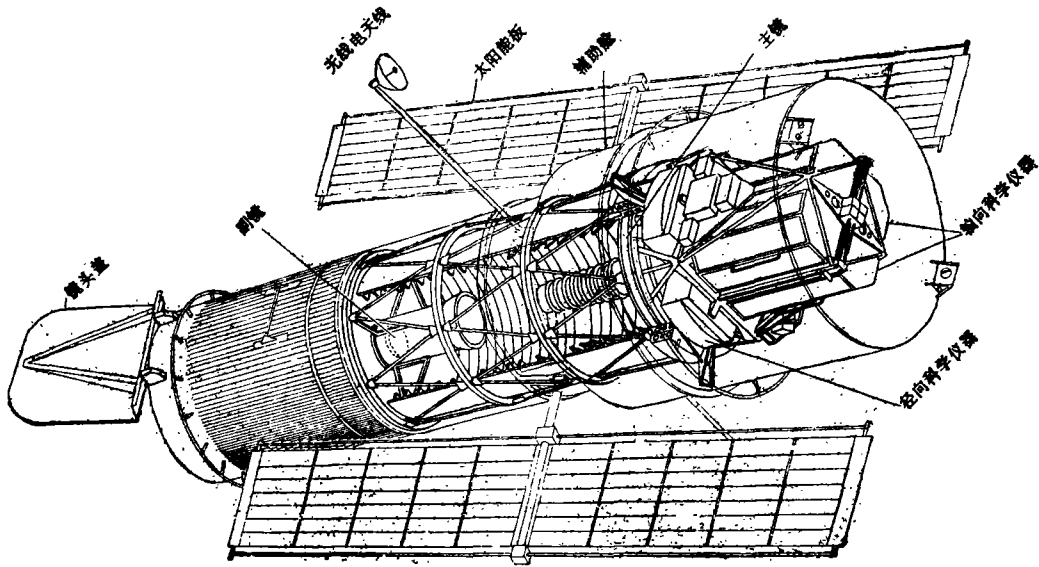


图 1 空间望远镜结构图

望远镜镜筒在副镜前延伸 10 英尺以上, 以使光学系统免受散射光的干扰(大部份散射光为太阳的直射光以及地球和月亮所散射的太阳光)。一个内隔板系统提供进一步屏蔽。

电子设备和其它装置放在望远镜筒后部的环形舱内, 用以检测集中在焦平面上辐射的科学仪器均装在主镜后科学仪器舱内的一系列箱体上。两个给电子设备供电的太阳电池帆板和两个与地面通讯用的盘形无线电天线由中间舱伸出。

两个反射镜由热膨胀系数极低的石英玻璃制成。这两个反射面离其理论廓线的平均偏差不超过 100\AA 。望远镜在空间时保持接近于热力学恒温。两个反射镜彼此间以及与焦平面间的位置可进行遥控调节, 以获得最清晰的图像。

望远镜通过反作用飞轮可指向任何所要观测的天空目标, 精密制导系统预计能使光轴稳定在 $0''.01$ 以内, 持续时间达 10 小时之久。

二、焦平面上的科学仪器

为使空间望远镜充分利用一切最新技术成果, 其焦平面上的仪器设计成可更换方式, 即可在轨道中通过宇航员操作拆除仪器, 并在其位置上装上新的仪器, 或返回地面后更换仪器。

在最初几年运行期间, ST 将装配两架照相机、两部摄谱仪、一个高速光度计、一个精密制导系统。前五种仪器, 即宽视场和行星照相机、暗目标照相机、暗目标摄谱仪、高分辨率摄谱仪和高速光度计, 用以进行各种天体物理观测。第六种仪器, 精密制导系统, 包括三个精密制导传感器, 除为望远镜提供定向信息外, 还可对天体位置作精密测量。此外, ST 上有一台计算机, 可控制望远镜的运转并处理数据。

尽管在 ST 的第一代科学仪器中, 未配备红外敏感仪器, 但已考虑好未来如何在此望远镜上安置一台对波长为 1mm 辐射敏感的仪器。第二代仪器的主要变化将包括望远镜摄谱仪的改善和使红外观测的潜力付诸实现。

上述科学仪器装成八个箱体, 四个装成平行于望远镜光轴, 另四个(宽视场行星照相机和三个精密制导传感器)绕轴径向排列。望远镜焦平面视场半径为 $14'$, 分为八个视区(图 2)。半径 $11'$ 以内视场具有最高分辨率, 供 5 架天体物理观测仪器用。从内径 $11'$ 至外径 $14'$ 的三段圆弧视场, 用于精确制导系统的三个传感器。

经副镜反射后的入射光被置于科学仪器舱内的拾取镜传向不同方向。中心 $2'.7 \times 2'.7$ 视场的光, 被装在光轴的棱形平面镜向外导往径向安装的宽视场行星照相机; 排列在入射光束外侧周围的三个弧形平面镜将光投射到也是径向安装三个精密制导传感器上。绕过这四个镜子的光在四个轴向安装的仪器箱前的入射孔像平面上聚焦。此焦平面上除被拾取镜屏蔽的区域外, 其余视场分为四个扇形, 分别用于四个轴向安装仪器进行观测。

表 1 列出 ST 上的科学仪器概要。

三、宽视场照相机和行星照相机(WF/PC)

WF/PC 可以宽视场照相机或较高分辨率的行星照相机二种方式进行工作。在每种方式

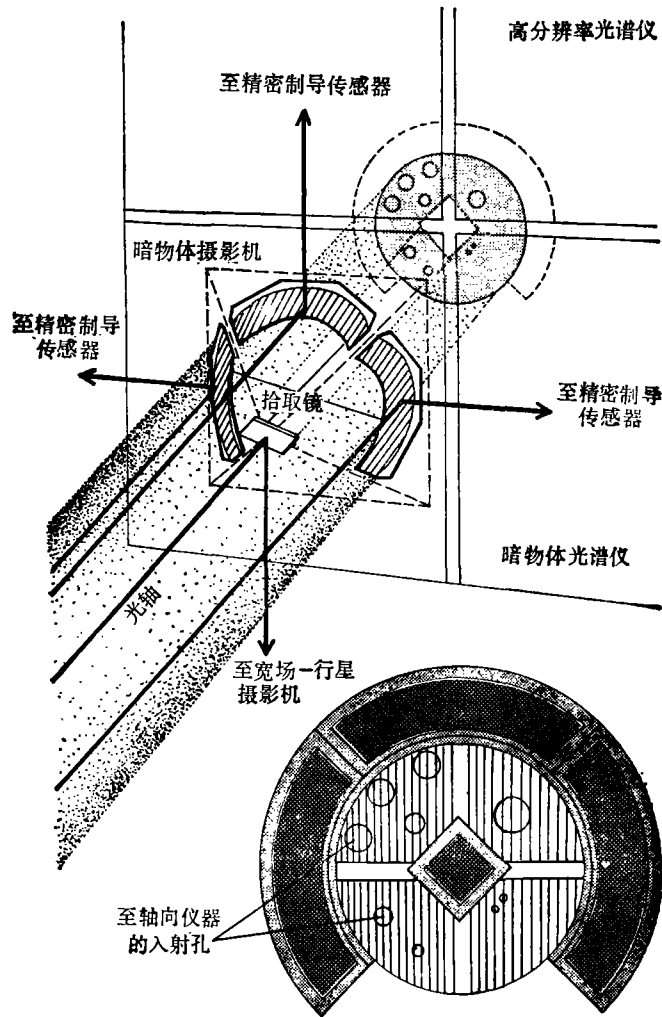


图2 ST焦平面仪器视场划分

中，检测系统都由四个电荷耦合器件(CCD)光敏硅片组成。每片硅片为边长约0.5英寸的正方形，每边有800个像素，所以每片有64万个像素。由四个CCD镶成的照片具有超过250万个像素，每个像素产生正比于一次曝光时达到像素的光子数的电讯号。

经拾取镜射入到WF/PC的光，借助锥形镜转向WF照相机的四个CCD或PC照相机的四个CCD(图3)。此锥形镜能绕其轴旋转 45° ，允许两个基本独立的光学系统装在一个仪器舱内，48个滤光片中的任何一个都能插入光程中。

在宽视场方式中，照相机具有 $2'.67$ 的正方形视场，是所有仪器中最大视场。每个像素对着一个 $0''.1$ 的角。在行星方式中，方形视场边长 $68''.7$ ，每个像素对应 $0''.043$ 的角。CCD探测系统的低背景噪声和高灵敏度，很适于作弱光源的观测，使得进行某些行星观测只需很短的曝光时间。观测者也将可利用这种行星方式对延伸的银河系和河外天体进行高分辨率的

表 1 空间望远镜上的科学仪器

仪器名称	视 场	分 辨 率	波段通带	极限星等
WF/PC 宽视场照相机, $f/12.8$	$2'.7 \times 2'.7$	$0''.1$	$1150-11000\text{\AA}$	$9.5 \leq M, \leq 28$
行星照相机, $f/30$	$1'.2 \times 1'.2$	$0''.04$	$1150-11000\text{\AA}$	$8.5 \leq M, \leq 28$
4, 800×800 CCD 探测器, 15μ 见方				
FOC 暗目标照相机, $f/96$	$11'' \times 11''$	$0''.02$	$1200-6000\text{\AA}$	$21 < M, \leq 28$
$f/48$	$22'' \times 22''$	$0''.04$	$1200-6000\text{\AA}$	$21 < M, \leq 28$
MgF ₂ 像增强器				
FOS 暗目标摄谱仪, $R=10^5$	$0''.1-4''.3$	3\AA	$1150-7000\text{\AA}$	$19 < M, \leq 22$
$R=10^2$	$0''.1-4''.3$	30\AA	$1150-7000\text{\AA}$	$22 < M, \leq 26$
SiO ₂ 和 MgF ₂ 512 二极管 Digicon 探测器, 50μ 分辨率				
HRS 高分辨摄谱仪, $R=10^5$	$0''.25-2''.0$	0.03\AA	$1100-3200\text{\AA}$	$M, \leq 11$
$R=10^4$	$0''.25-2''.0$	0.15\AA	$1100-3200\text{\AA}$	$M, \leq 14$
$R=2 \times 10^3$	$0''.25-2''.0$	1.5\AA	$1100-1700\text{\AA}$	$M, \leq 17$
CsTe/MgF ₂ 和 CsI/LiF 512 二极管 Digicon, 5 定向光栅, 1 中阶梯光栅				
HSP 高速光度计, 多滤光片,	$0''.4, 1''.0, 10''$	16μ	$1200-8000\text{\AA}$	$M, \leq 24$
2, S-20 和 2, CsTe/MgF ₂ 光电倍增器探测器				
FGS 精密制导系统, 三个星选择器,	69 弧分 ²	$0''.003$	$4670-7000\text{\AA}$	$4 < M, \leq 20$
Koester prism interferometer and image dissector				

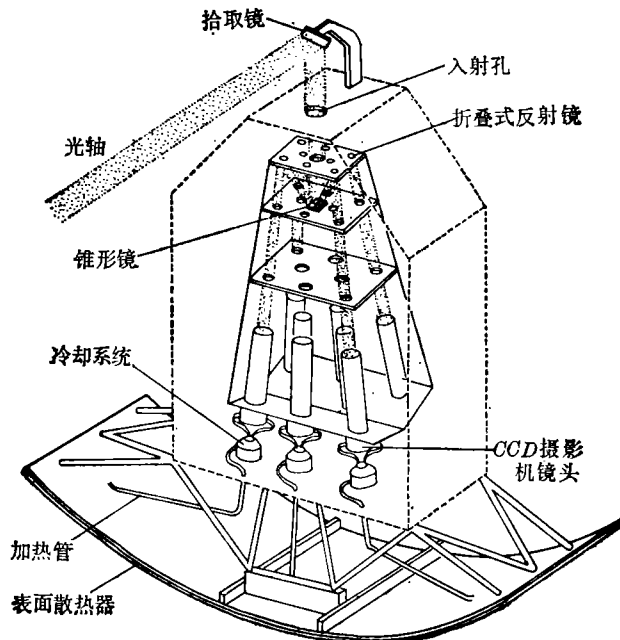


图 3 宽视场和行星照相机

观测。

WF/PC 是 ST 上 积累最大信息量的仪器——每张图像超过 3000 万位; 其波段响应也最

宽——波段敏感区从紫外 1150\AA 到近红外 11000\AA 。这么宽的波段响应可能是使用称之为晕苯的有机磷光体涂复 CCD，使紫外辐射光子转变成硅探测器能探测到的可见光子的结果。

四、暗目标照相机(FOC)

FOC主要目的是充分利用 ST 可在较宽波段高分辨率观测很暗目标的光学功能，探测 ST 可看到的最暗天体，并记录其光学系统所获得的最高角分辨率的图像。此外，还能确定所观测辐射之偏振，并进行点目标和远目标的光谱测量。

FOC 包含二个相似但又彼此独立的完整光学系统。每个照相机系统都有它自己的光路和探测器系统(图 4a、b)。f/96 和 f/48 光学中继的目的是以最小的象歪曲和光损失，把图像从

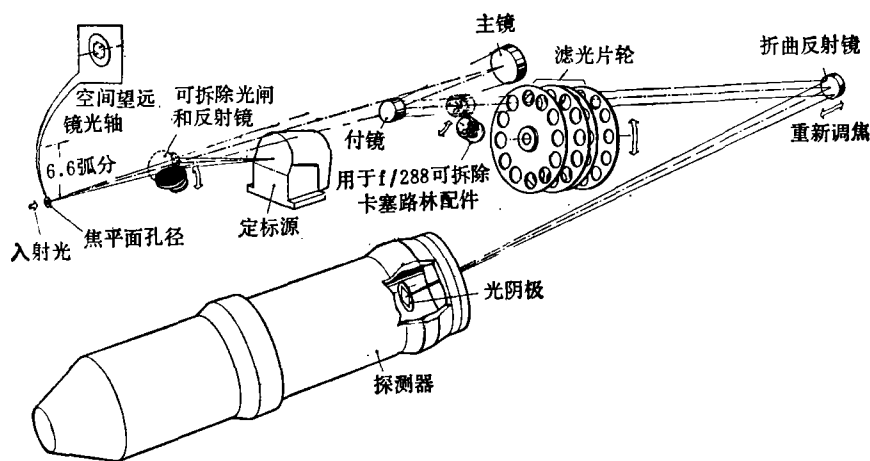


图 4a. 暗目标照相机 f/96 光学中继

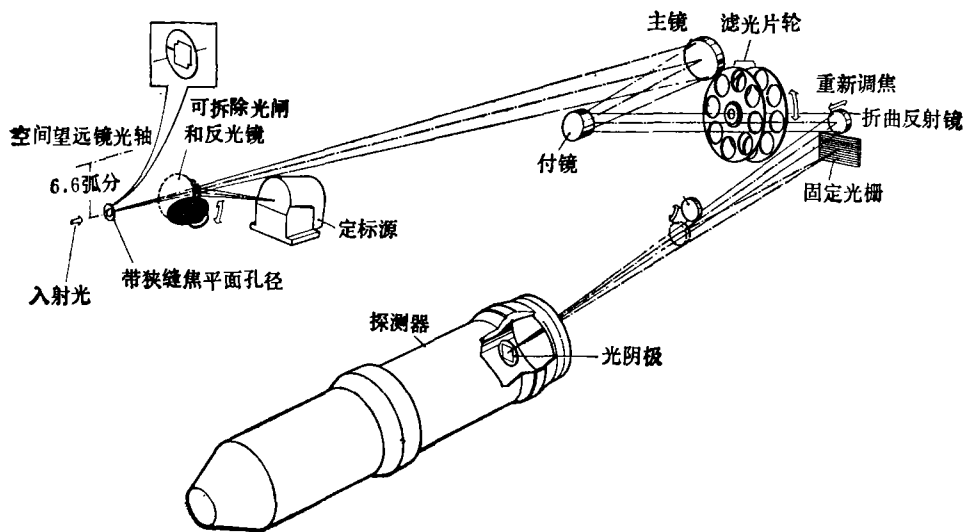


图 4b. 暗目标照相机 f/48 光学中继

f/24 望远镜焦平面传送到探测器的光阴极。为观测研究最暗目标, 要求探测器具有最高灵敏度和最低的仪器噪声, 因此选用以光子计数方式工作的成像探测器。两个相同的探测器都由像增强器、电视阴极射线管以及它们之间的耦合透镜系统组成。电视管可检测出像增强器的输出闪烁——相应于到达光阴极的光子。两个照相系统分别在光阴极管上产生 $11'' \times 11''$ 或 $22'' \times 22''$ 图像。一般图像数据格式为 512×512 像素(每像素 16bit), 每个像素对应 $0''.022$ 或 $0''.04$ 。

FOC 的功能与 WF/PC 相似。但 FOC 对较窄波段敏感、视场较小、具有较高的空间分辨率。观测者可根据观测分辨率、视场和所使用波段, 选用 FOC 或 WF/PC 其中一种照相机。

五、暗目标摄谱仪(FOS)

FOS 是一台对 $1150-8000\text{\AA}$ 波长辐射敏感的中等光谱分辨率的摄谱仪。从 ST 光学系统射入 FOS 的光, 经两条独立的光通路, 在(各自的)光子计数 Digicon 探测器的光阴极上聚焦成光谱图像(图 5)。FOS 进入孔包含可供选择的大小从 $0''.1$ 到 $4''.3$ 的 12 个窗口。Digicon 探测器根据光电效应作用, 其传感器产生的光电子被 512 个二极管组成的线性阵列收集起来。每个二极管记录特定波长入射光的强度。这两个 Digicon 探测器仅是光阴极和板面材料不同, 因而对波长敏感区不同。其中一台称之“蓝光”探测器对 $1150-5000\text{\AA}$ 敏感, 另一台称之“红光”探测器对 $1800-8000\text{\AA}$ 敏感。不同的方式可提供光谱分辨率为 10^3 或 10^2 , 相应可分辨波长约 3\AA 或 30\AA 。

此仪器也可用于研究入射光的偏振, 并以 10 毫秒的时间分辨率研究亮光源辐射谱中的快速时间变化。

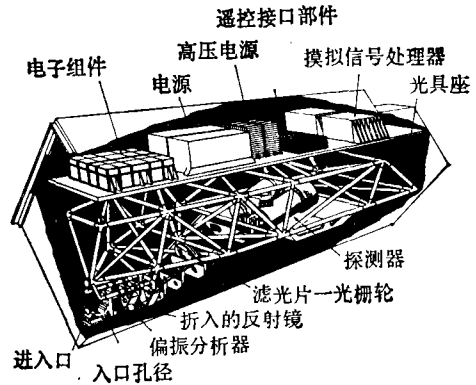


图 5 暗目标摄谱仪

六、高分辨率摄谱仪(HRS)

HRS 是具有比 FOS 更高光谱分辨率、对紫外波段敏感的摄谱仪。它将把紫外天文学提高到比以前(OAO-3、IUE)所达到的更高光谱分辨率、空间分辨率和时间分辨率, 扩展到更暗弱、更遥远的天体。

HRS 的光学设计如图 6 所示。主要是利用准直器、照相镜、色散器件, 使之在探测器光阴极上形成光谱像。色散器件有 5 个定向光栅、一个中阶梯光栅。

HRS 有二个 Digicon 探测器, 分别以 CsI/LiF 和 CsTe/MgF₂ 作光阴极/窗口。每个 Digicon 探测器包含 512 二极管的线性阵列。Digicon 以数字光子计数方式工作。

HRS 有高、中、低三种光谱分辨率, 分别相应于 $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \sim 10^5, 2 \times 10^4, 2 \times 10^3$ 。高分

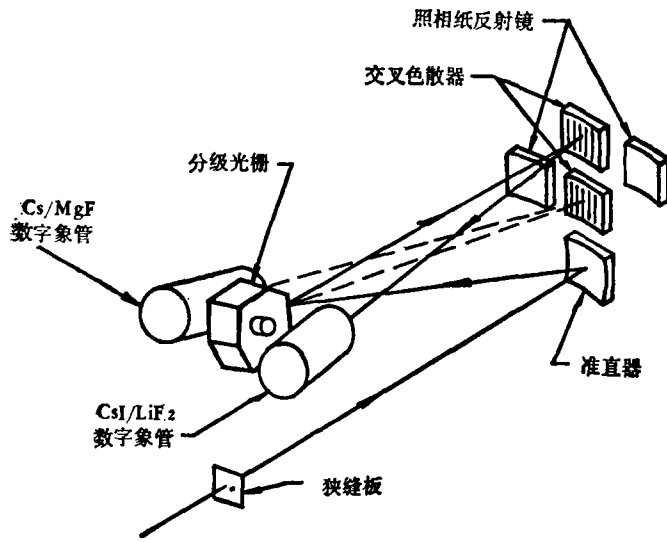


图6 高分辨率摄谱仪光学设计概念

辨方式可获得与地面望远镜Coudé摄谱仪相当的光谱分辨率，并超过以前紫外天文台仪器的分辨率；中分辨率方式提供与OAO-3的U₁波道相同光谱分辨率，并稍超过IUE高色散摄谱仪的分辨率；低分辨率方式提供比IUE低色散摄谱仪约高10倍的分辨率。较高分辨率方式的灵敏度较低。 $R=2 \times 10^4$ 中分辨率方式可观测星等比OAO-3望远镜观测的星等暗6个星等，比IUE暗4个星等。

HRS观测的紫外波段没有象OAO-3那样伸向更远紫外。高、中分辨率方式的波段范围为1100—3200Å；低分辨率方式为1100—1700Å。

HRS有二个进入孔，视场分别为0".25和2" (IUE的大、小进入孔分别接近于10"×20" (椭圆)和3" (圆))。

HRS用积累方式或直接方式获得光谱资料，相应时间分辨率为200毫秒和50毫秒。

七、高速光度计(HSP)

地面高速光度计的可观测波段受大气限制，大气闪烁噪声使之难以研究短于1秒的时间变化。此外，地面观测要求直径几弧秒的光度计口径，因而增加讯噪比。ST上的HSP消除了这些限制，可在可见光和紫外波段范围内，以高至 10^5 Hz的速率(即短至 $10\mu s$ 的时间间隔)对天体源作高时间分辨率的精确测量研究。它可测出很小振幅变化，并可测量近紫外的线性偏振。

HSP有五个探测器(图7)：四个析象管和一个光电倍增管。其中两个CsTe光阴极/MgF₂板面的析象管对1200—3000Å敏感；另二个bialkali光阴极/石英板面的析象管对1800—7000Å敏感。光电倍增管对红光敏感。有三个析象管(二个CsTe管，一个bialkali管)用于光度计；另一个bialkali管用于偏振仪，测量近紫外的线性偏振。光电倍增管与bialkali光度探测器一道用于掩星观测。HSP包含许多块滤光片可供作各种宽带分光。

HSP设计简单、精确，它将用于建立恒星目标的光度标准，研究它们的时间变化，并将用于识别过去主要靠射电或X射线波长观测的光学上的暗天体。根据狭义相对论，区别 $10\mu s$ 间隔事件的能力意味着能测出宽度仅为3km那样小的恒星目标的光输出变化，因此有一计划是让HSP探索有可能隐藏黑洞的天体系统中的极其快速变化。

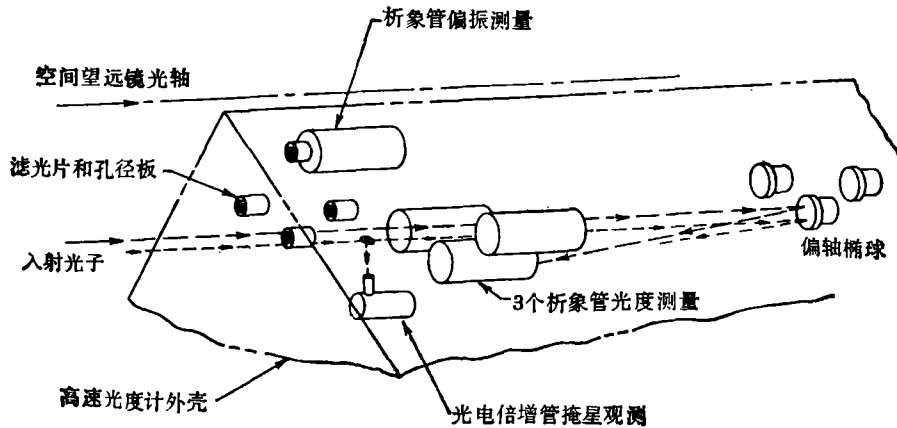


图7 高速光度计探测器排列

八、精密制导传感器(FGS)

ST通过反作用飞轮可指向所需要的天空位置。反作用飞轮以磁力矩卸载。三轴上的精密陀螺为反作用飞轮提供误差讯号参考。陀螺对角运动随时间变化速率敏感,但不能精确决定指向的绝对方向,为求出指向的绝对位置,ST装配了恒星跟踪器和精密制导系统。恒星跟踪器可获得星表中亮星($M_v \leq 8$),能以低于几弧秒的精度决定方向。精密制导传感器用于高精度地决定参考星相对于系统轴的位置。精密制导系统能在15毫弧秒视场内决定恒星位置精度可达毫弧秒量级。

三个FGS中的二个,以69弧分²视场对已知坐标的星(制导星)作扫描,并把这些目标的实际位置与预报位置之差提供给陀螺。根据ST结构模式和测量的陀螺噪声特性估计,ST系统指向稳定度 $0''.007$ 。

第三个FGS可用于作指定目标相对于参考目标的天体测量学测量。天体测量学家正研究利用FGS对暗至 $M_v=17$ 的目标作精度达 $0''.002$ 的天体测量学测量。

为保证ST指向天空任何地方,在FGS相当小的视场内都有制导星,必须测量暗至14星等的制导星的精确位置。现在尚无合适的星表。STSCI的一个重要任务就是在ST发射前发展这些能力。

九、空间望远镜的发射、操作与控制

负责实际建造ST本身的承包商是珀尔——埃尔曼公司,负责承载系统和部件集成工作

整体的承包商是洛克希德导弹和空间公司。这项工程总造价约 7.5 亿美元。

1986 年发射时, ST 将装在航天飞机货舱上, 随航天飞机进入约 500km 高度, 然后通过机械手将其释放在轨道上。望远镜释放后将展开太阳能帆板、通讯天线和镜头盖(这三者在装进货舱发射时是收起的)。此后, 每当 ST 的仪器需维修或更换时, 宇航员可通过航天飞机进入 ST。每隔一段时间(~5 年)整个 ST 用航天飞机载回地面修整反射镜和主要部件, 然后再送回轨道。

由于 ST 处于倾角 $28^{\circ}.5$ 、高度 500km 轨道, 地面站与望远镜的直接通讯, 仅能在卫星飞临地面站时的短时间内进行。为此, 将利用地球同步的跟踪和数据中继卫星系统(TDRSS)进行地面与 ST 通讯, 所有观测数据亦通过此卫星系统发回地面。数据传输速率 20% 时间可为 Mbit/s, 其余大部份时间为 4kbit/s。

ST 以相当自动化方式进行操作, 任何一项观测必须事先作好计划。每次观测都必须事先排好一组拟被执行的指令, 拟定望远镜须置于什么视向、须获得那些制导星、选用焦平面上的那种仪器、它的具体操作方式, 需要那些必要的定标和星上数据储存等。

新成立的空间望远镜科学研究所(STSCI)和戈达德飞行中心(GSFC)共同负责操纵望远镜。GSFC 可直接控制 ST, 并作为其发回数据的收集点。GSFC 接收数据后传给 STSCI。STSCI 负责 ST 观测数据的初步处理和分析, 然后提供给观测者。

空间望远镜发射后, 经过约持续三个月的系统检测和科学验证, 其最初观测时间将优先分配给与研制望远镜和科学仪器有关的科学家, 然后逐渐减少这种优先比例, 即最初二个月 100%, 接着的六个月 50%, 第二年 25%, 然后再十个月的 10%。在前二年半内, 他们平均获得 30% 观测时间。其余 70% 观测时间将分配给经公开申请、同行评议、竞争后选中的世界各地申请者进行各个领域的天文学研究。

参 考 文 献

- [1] Donald N. B. Hall (ed.), *The Space Telescope Observatory*, NASA CP-2244, (1982).
- [2] John N. Bahcall, Lyman Spitzer, Jr, *科学*, (1982), 11.
- [3] 美国天文学调研委员会(ASC), 八十年代的天文学和天体物理学, 北京天文台台刊, 副刊3, (1982), 11.

The Space Telescope Observatory and Its Scientific Instruments

Su Wan-zhen

(Purple Mountain Observatory, Academia Sinica)

Abstract

The Space Telescope Observatory to be launched into orbit in 1986 will be the first, long-lived, versatile orbiting observatory. The wide wavelength coverage and emphasis on high image quality of its design will make it a unique facility. The configuration of the Space Telescope and its focal plane instruments as well as its launching and scientific management are briefly introduced.