

空间望远镜研究与“哈勃”介绍

马品仲

(中国科学院南京天文仪器研制中心, 南京 210042)

摘要 简述空间望远镜特点与设计的要求, 并以“哈勃空间望远镜”为例介绍设计方案。

关键词: 空间望远镜; 特点; 设计方案

1 前言

由于宇宙深处的各种电磁波受大气反射, 吸收和散射而极大地衰减, 1—1000Hz 的大气湍流和闪烁使星像衍射, 并使星光颜色改变, 亮度减弱和起伏, 光线的抖动和地面照明灯光和尘埃等较强背景干扰等严重影响天体物理观测。上疏下密的大气层使天体折射向天顶方向(在天顶大气折射为零), 故天体测量必须纠正此蒙气差。 $\lambda < 100\text{nm}$ 的远紫外辐射波电离层内氧和氮分子吸收成为原子, $\lambda < 300\text{nm}$ 紫外辐射在地面 50km 高空被臭氧层完全吸收, 使天体的紫外光谱在地面无法测量。在红外波段由于水汽和 CO_2 分子等振动带, 转动带所造成的强烈吸收, 只留下很少的观测波段, 如最宽的红外窗口在 8—13 μm , 17—22 μm 是半透明窗口, 红外测光波段有 J (1.2 μm), H (1.6 μm), K (2.2 μm), L (3.6 μm), M (5.0 μm), N (10.6 μm), Q (21 μm) 等使地面望远镜的观测受到限制。

由于银河系和河外星系更精细观测, 要求望远镜有很高的集光能力, 分辨率和全波段, 全时段, 全方位观测, 以便能在无大气抖动和散射情况下, 观测 28 等暗星和 0".01 分辨率的精细结构。以探索宇宙起源和演变, 年令和黑洞秘密等, 为人类开发利用宇宙创造条件, 为此美欧为哈勃空间望远镜投资近 30 亿美元, 以便抢先对太阳系行星, 银河系, 恒星早期和晚期演化, 星际物质, 行星际和星系际空际等作一系列更深刻的研究。

2 空间望远镜特点与设计的要求

空间望远镜与地面望远镜相比有下列优点和特点。

(1) 因 500km 以上高空, 大气稀薄无大气抖动和闪烁, 无大气尘埃干扰, 可使光学望远镜达 0.01 以上衍射极限分辨率。

(2) 天空背景不受大气辉光和照明灯光影响, 不受大气吸收和散射影响, 故天空总是黑

的, 可对暗星作连续观测并提高分光光谱分辨率, 使观测距离和星等比地面望远镜远 7 倍和暗 5 个星等。尤其点像不受大气干扰, 使星像质量和对比度极好, 从而可观测 28 等极限星等限河系。

(3) 因不受大气辐射窗口限制, 摆脱大气对辐射吸收和强烈噪声, 故可作紫外到红外 1150—11000 Å 全波段观测, 极大地有利于对类星体, 爆发星系和恒星发射时状态观测, 并确定其成份, 温度和密度等物理与化学特性参数。

(4) 因无大气辐射造成的天空噪声和大气干扰, 从而提高测光精度。因无大气折射, 可消除折射带来的蒙气差, 提高了天体测量精度, 可改善基本星表精度, 可测天体视差和自行, 以精测银河系距离, 确定光度大的恒星和某些特殊恒星的绝对星等, 可测恒星角直径和双星间距等。

(5) 因高空无任何障碍物阻挡, 故可全方位和全时段观测, 而不受昼夜和气象条件变化影响。且高空引力极小, 故空间望远镜不产生结构变形, 提高成像质量和跟踪精度。

但空间望远镜造价昂贵, 且运输与修理困难, 耗资巨大, 如哈勃空间望远镜造价 15 亿美元, 发射升空费 6 亿, 第二次发射修理费 6.29 亿美元。因此对空间望远镜的设计和制造提出严格的要求, 以保证能在较长时间内优质观测。

1) 主镜加工面形精度要求 $\lambda/50$, 不允许出现哈勃空间望远镜主镜面形错误, 故需加强面形检测和加工方面技术。

2) 刚度和强度要高, 能经受航天发射时超重和振动。

3) 重量要轻, 选择强度高, 膨胀系数小的轻质材料 (如铍, 钛和碳纤维塑料等) 制造桁架和机架, 主镜用低膨胀系数玻璃蜂窝结构, 机架用薄壁和多肋焊接箱式结构。

4) 降低望远镜热辐射, 机架各部份镀高反射率材料如金和银等, 尽可能降温和隔热, 防止热胀冷缩造成料动。

5) 对各种接收仪器操纵, 转换和观测结果的记录输送, 要配遥测遥控系统, 计算机数据处理和程序操纵系统等。

6) 用喷气技术控制望远镜指向 (绕质心旋转), 有高精度姿态控制和导星系统, 地面遥控监测操作和显示系统等。

7) 望远镜各部件做成整体可卸式, 便于组合装配 (用简单快速锁紧机构), 留下组装照片, 望远镜体外装扶手和脚踏板等, 便于宇航员在太空中维修和更换部件, 可更换部件包括科学观测仪器, 导航仪器, 太阳能电池板和蓄电池等。望远镜寿命 20 年左右才进行返回地面大修。

3 空间望远镜设计方案

3.1 运载与轨道

空间望远镜应由航天飞机发射升空, 从地面起飞时, 因引力和气压大, 故速度低。随着火箭上升, 气压下降和引力减少, 自身燃料和氧化剂消耗使火箭质量减轻, 发动机推力增加, 使加速度增大。当火箭升到 100km 以上时, 大气压力和密度为地面万分之一, 使航天飞机达到第一宇宙速度 (7.9km/s), 使航天飞机进入 600km 高空绕地球的轨道如图 1, 根据开普勒

定律, 它的运动速度 $V = \sqrt{K(\frac{2}{r} - \frac{1}{a})} = 7.564\text{Km/s}$, 运动周期 $T = \frac{2\pi}{\sqrt{K}}a^{3/2} = 96.5$ 分钟,

半长轴 $a = \frac{K(h+R)}{2K - (h+R)V_0^2}$ 。式中 a 为椭圆轨道半长轴, K 为地球引力参数 $3.986 \times 10^5 \text{Km}^3/\text{s}^2$, h 为入轨高度 600Km , R 为地球半径 6378km , $r = R + h = 6378 + 600 = 6978\text{km}$, V_0 为入轨初始速度。

航天飞机入轨后, 即可打开舱门, 用机械手将空间望远镜置于太空中, 经测试合格后, 即可让它自行观测。哈勃空间望远镜赤道倾角 29 度。

3.2 光学望远镜

图 2 以哈勃望远镜为例, 长 13.2 米, 直径 4.3 米, 总量 12 吨, 可观测 28 等暗星, 角分辨率 0.007 角秒, 分光光谱分辨率达 0.5 兆赫, 通讯信息传送率 8 兆比特/秒, 使用寿命 15 年, 可看到 150 亿光年的河外星系, 可观测 $1150 \sim 11000 \text{\AA}$ 从红外到紫外的所有波段内的各种天体。从而可研究恒星的产生与演变, 研究天体激变物理过程, 研究银河系的结构, 分布及其运动, 研究河外星系诞生与演变, 各种类星体和活动星系核等。主焦比 $f/24$ 的卡塞格林式望远系统, 主副镜为凹凸双曲面可消球差和彗差, 主镜直径 2.4 米, 副镜直径 0.3 米, 主副镜间距 4.57 米, 主镜用超低膨胀系数 7971ULE 玻璃, 由 Corning 厂制成蜂窝结构, 量 817.2kg , 面形精度 $\lambda/50$, 在 6328\AA 处反射率 89% , 70% 能量集中在 $0''.1$ 以内。镜面镀铝层厚 $0.065\mu\text{m}$, 再镀氟化镁保护膜厚 $0.025\mu\text{m}$, 以防氧化和提高紫外光反射率, 镀膜均匀度 $< 3\%$, 膜层厚度偏差 $< 0.01\lambda$ 。镜筒为桁架结构, 为防杂散光干扰, 在主镜到副镜前 10 尺范围有薄壁圆柱形遮光筒, 望远镜由 perkin-Elmer 公司制造。

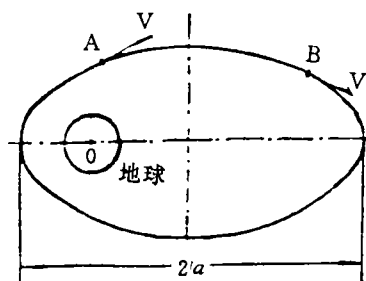


图 1 椭圆轨道

3.3 科学仪器舱

如图 2, 5 台科学仪器和 3 台精密制导传感器分装成 8 个独立箱体, 宽视场和行星相机及 3 台用于导航和测速的陀螺仪径向排列安装, 焦面上的轴向科学仪器 4 台平行于主光轴, 由转向镜选择焦平面 $\Phi 8$ 个视区中的一个, 即可作各种观测和位置测量, 各仪器分述于下:

3.3.1 暗弱天体照相机

为在较宽波段高分辨率观测 28 等星, 以研究爆

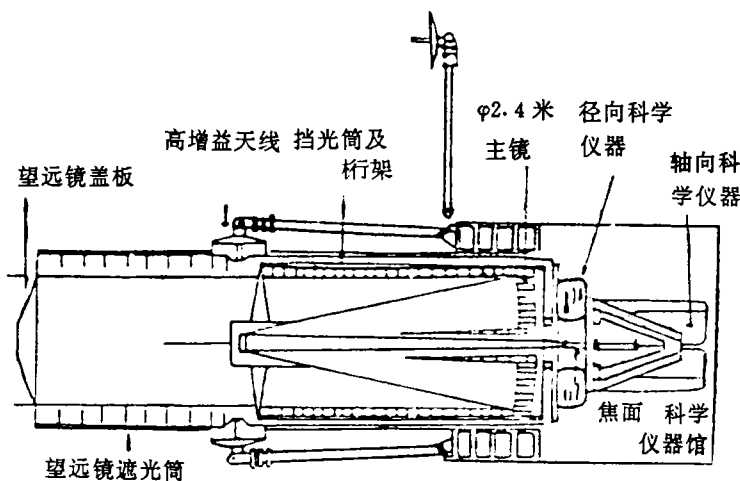


图 2 哈勃空间望远镜结构

炸星系，黑洞和类星体周围星系，确定恒星周围行星位置和活动星系核周围精细结构，如图3设 $f/96$ 和 $f/48$ 二台相机，用光子计数成像探测器，可在光阴极管上产生 $11'' \times 11''$ 和 $22'' \times 22''$ 图像，有 512×512 像素，每个像素 16bit 对应 $0''.022$ 和 $0''.04$ 分辨率。有 3 级 MgF_2 电子星像增强器，能将 $1200 \sim 6000 \text{ \AA}$ 波段范围天体亮度增强 10 万倍，可观测比地面望远镜远 7 倍距离的天体。为观测最暗目标，要求探测器有最高灵敏度和最低噪声，探测器由像增强器，电视阴极射线管及耦合透镜组成。

3.3.2 宽视场和行星照相机

为鉴别季节变化和长期变化自然现象，焦比 $f/12.8$ 宽视场相机视场 $2.67' \times 2.67'$ ，每个像素对应 $0''.1$ 分辨率，视场内可观测几百个亿光年远星系。焦比 $f/30$ 行星相机视场 $68.7'' \times 68.7''$ ，每个像素对应 $0''.045$ 分辨率，可拍摄行星周围高分辨率照片。如图4用棱锥体绕其轴转 45° ，可转向两个相机，使两个独立相机装在一个仪器舱内。两个相机均由 4 个 800×800 像素 CCD 组成，共 256 万像素。低背景噪声和高灵敏度 CCD 适作银河系和河外星系弱星体观测，曝光时间短，用晕苯有机磷光体涂复的 CCD 观测波段 $1150 \sim 11000 \text{ \AA}$ ，因它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。

3.3.3 暗弱天体光谱仪

为测量 ($1150 \sim 8000 \text{ \AA}$) 可见和紫外光谱，确定类星体，彗星和遥远星系化学成份，温度，运动和物理特性。如图5入射光径 $0''.1$ 到 $4''.3$ 的 12 个窗口，到 $1150 \sim 5000 \text{ \AA}$ 兰光探测器或 $1800 \sim 8000 \text{ \AA}$ 红外探测器，提供光谱分辨率 10^3 或 10^2 ，可分辨 3 \AA 或 30 \AA 。可在两条

独立光路内 Digicon 光子计数器的光阴极上聚焦得光谱图像。由 Digicon 产生光电子被 512 个二极管线阵收集，每个二极管记录特定波长入射光强度测偏振，并以 10 毫秒时间分辨率测辐射谱的快速时间变化。

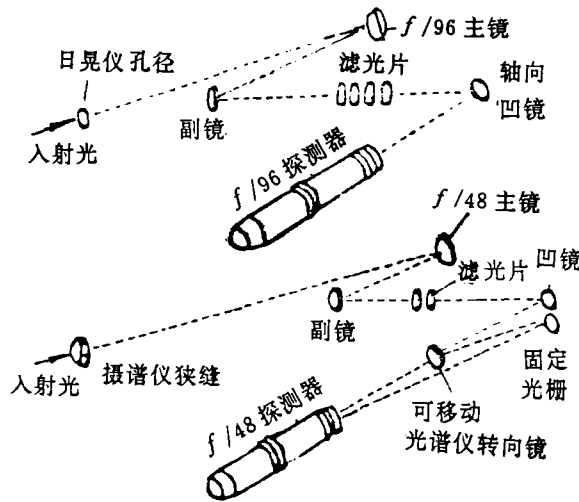


图3 f/96 和 f/48 暗目标照相机

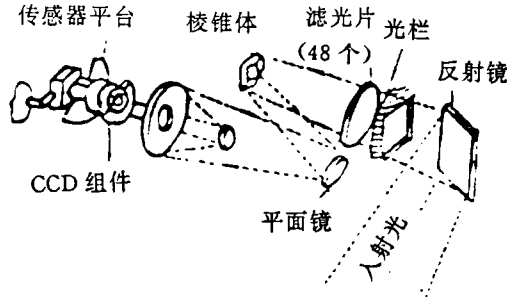


图4 宽视场行星照相机

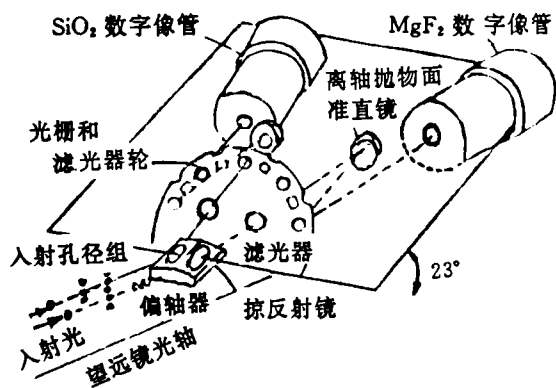


图 5 暗目标光谱仪

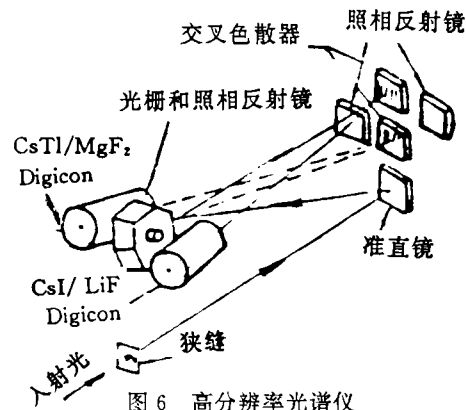


图 6 高分辨率光谱仪

3.3.4 高分辨率光谱仪

为研究爆发星系，类星体和恒星发射时物质的物理和化学性能，确定天体成份，温度和密度等，用图 6 摄谱仪的准直镜，照相镜和色散器件（5 个定向光栅和 1 个中阶梯光栅）在探测器上成光谱像。二个 Digicon 探测器用 CsI/LiF 和 CsTe/MgF₂ 作光阴极/窗口，每个 Digicon 有 512 个二极管线阵，以光子计数工作。有高，中和低三种光谱分辨率 $R = \lambda/\Delta\lambda = 10^5, 2 \times 10^4$ 和 2×10^3 ，即 0.03 \AA ， 0.15 \AA 和 15 \AA 。高和中分辨率在 $1100-3200 \text{ \AA}$ 区，低分辨率在 $1100-1700 \text{ \AA}$ 区，用累积和直接方式得光谱，其时间分辨率 200 和 50ms。光谱仪有二个狭缝进入孔，大孔 $10'' \times 20''$ （椭圆）和小孔 $3''$ （圆），视场 $0.25''$ 和 $2''$ 。

3.3.5 高速光度计

因大气闪烁噪声使地面光度计难以研究短于 1 秒时间变化，且地面几弧秒直径光度计讯噪比大，而空间无限制，可在 $1200-8000 \text{ \AA}$ 区以 $10 \mu\text{s}$ 时间间隔对天体作高时间分辨率精测，可测 0.001 星等光强振幅变化和近紫外线性偏振。改善对银河和较近星系大小测量，建立恒星光度标准，研究它们时间变化，可测天体随时间快速光变现象（分钟量级）和天体距离。

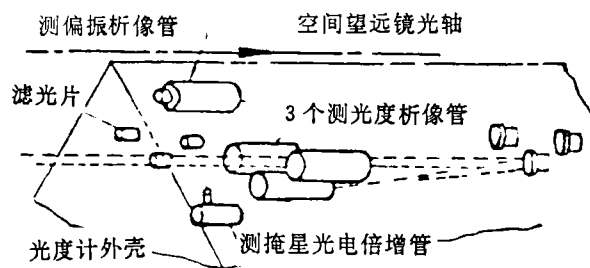


图 7 高速光度计探测器排列

如图 7 有 4 个析像管和 1 个光电倍增管，两个 CsFe/MgF₂ 析像管对 $1200-3000 \text{ \AA}$ 敏感，两个 bialkali 光阴极/石英板面的析像管对 $1800-7000 \text{ \AA}$ 敏感，光电倍增管对红光敏感。一个 bialkali 管测紫外线性偏振，其余三个析像管测光度。光电倍增管与 bialkali 光度探测器一道作掩星观测，多块滤光片作宽带分光。

一个 bialkali 管测紫外线性偏振，其余三个析像管测光度。光电倍增管与 bialkali 光度探测器一道作掩星观测，多块滤光片作宽带分光。

3.4 航天保障系统

为保证望远镜正常飞行和工作，并将资料发送到地面控制中心。由导航姿控系统的 3 台定向恒星跟踪仪和 6 台速率陀螺仪，3 台精密导星仪（两台用于修正导航误差，保证观测定位精度，另一台作天体视差测量）作天体距离的精测，可测到 $0''.0016$ 相对位置精度，可提供速度，转动，倾角和偏角等信息，以控制望远镜航行和定位，使光轴稳定在 $0''.01$ 以内。数据处

理系统由中央计算机执行航天和观测指令, 计算和存储, 传输观测和工程数据, 测定太阳能电池板和通讯天线方向。供电系统由两片太阳能电池板和 6 个蓄电池组成, 电池板在 2/3 朝阳时间产生 2.4kW 电力, 供各系统正常工作, 并充满 6 个蓄电池条 1/3 背阳时工作。通讯联络系统将观测到图像和数据, 经一个地球同步卫星以每秒 100 万位二进制码转发至地面。温控和保险系统监视望远镜和电源工作, 如有故障可自动停机维修。

4 空间望远镜的维修

由于空间望远镜的巨额投资, 要求在 20 年使用寿命期间的小修简单方便, 以利航天飞机升空后能方便地更换易损部件, 20 年后将空间望远镜运回地面大修。如哈勃空间望远镜进入轨道后, 发现聚焦模糊, 像质不好和导星时有抖动而影响使用。现分别简述于下:

4.1 光学系统及其像质

2.4 米主镜有球差且非常规则, 成高精度球形对称, 并准确等于黄绿光半个波长, 即镜面形使波面均方差为 $\lambda/2$, 由于实际双曲面主镜过于平坦, 在边缘低于理论双曲面 $2\mu\text{m}$, 致使主镜边缘光线成像焦面位于中心光线成像焦面后 $38\mu\text{m}$, 造成星像模糊和导星灵敏度降低, 使大视场行星相机和高分辨率暗天体相机工作受影响, 只能看清 40 亿光年星体而看不清 150 亿光年星体。其像质在可见光区域应集中光能的 70% 在 $0''.1$ 以内, 但因有球差仅集中 15% 光能于 $0''.1$ 内, 其余 85% 光能分散在 $3''$ 范围内。虽经计算机图像复原处理, 清晰度有了提高, 但感光灵敏度降低 20 倍。

产生球差原因: 由于测量和抛光中存在误差。

修复措施: 1) 用主镜背面 24 个主动光学测控器可消去 1/10 球差, 而 9/10 球差无法纠正。2) 把空间望远镜由航天飞机带回地面修理, 费用和危险性太大。3) 如图 8 在焦点附近一组修正镜, 使它产生与原球差符号相反的球差, 使球差为零, 使重新聚焦的清晰实像能进入暗弱天体照相机的光谱仪, 高分辨率光谱仪。这个耗资 5000 万美元重 296kg 的轴向补偿校正系统可由航天飞机带至太空中装配。

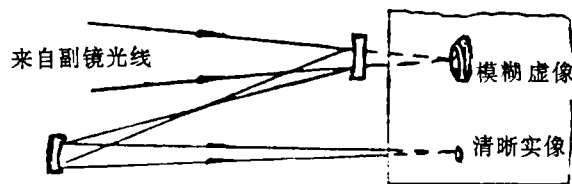


图 8 哈勃空间望远镜轴外补偿校正系统

4.2 跟踪指向系统及其精度

由于太阳能电池板的金属架在 2/3 朝阳和 1/3 背阳温差很大 ($-50^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$) 产生热胀冷缩, 导致导星抖动, 抖动幅度 15 毫角秒, 0.1Hz 周期, 时间 15 分钟, 一天抖 6 次, 严重降低跟踪指向精度和图像分辨率, 而影响观测。另外由于紫外线, 粒子辐射和原子氧使电池板输出电能衰减。故由英国航空航天公司空间部新制二块长 12 米, 宽 2.8 米, 重 160kg 的电池板 (共 4.8 万个太阳能电池), 功率大于 2.4kW, 寿命 5 年, 并采取绝热隔热等措施, 由航天飞机带至太空更换。

4.3 航天保障及科学仪器

用于导航和测速的 3 对 6 台速率陀螺仪 (3 台作导航, 3 台备用), 因有误差需更换 2 对

4 台。为提高宽视场行星相机灵敏度和分辨率，需更换 1 台耗资 2400 万美元，内有矫正主镜像差光学系统的新相机，它有 3 个广角视场摄像机和 1 个行星视场摄像相列为方阵，可同时拍摄广角和行星视场图像，其 CCD 具有更高灵敏度。为提高数据处理能力和运行速度，386 微机增加一个耗资 400 万美金新处理器，机箱 $0.2 \times 0.2 \times 0.2$ 米内有 2 个存储器和协处理器，以换下 1 个完全失灵存储器和 1 个半失灵存储器。用于测量地球磁场强度和帮助导航系统控制望远镜方位和俯仰，以瞄准星际探测目标的两个磁场探测器，因背阳时望远镜温度太低使磁通道有中断现象，故需用新探测器更换 1 号磁场探测器，对 2 号探测器需盖上温度绝缘防护罩。高分辨率光谱仪有 2 台摄谱器分别装在光栅两侧，其中一台电压不足使工作不稳定，其修理盒由 1 个交叉片或继电器构成，装在不稳定一侧的供电设备上，可提供程序补码和控制电压，使两台摄谱仪又可同时工作而互不干扰。

4.4 哈勃空间望远镜修复进展情况

巨额投资的空间望远镜能否修复，失灵的卫星和航天站能否维修和组装，直接关系到人类征服宇宙能力，关系到投资效益的重大问题。因此美国宇航局和欧洲航天局决定于 93 年 12 月 2 日到 13 日，由“奋进”航天飞机的 7 名宇航员对“哈勃”作一次史无前例的太空维修，挑选最有经验的指令长，驾驶员和机械手操作员，又选 4 位宇航员从 92 年 3 月开始在水中失重状态下，进行 1 年多模拟太空中维修动作。因宇航员在太空中行走，密封的头盔限制视野，失重环境使宇航员不能运用地面工作习惯，加压的多层手套又影响手的灵敏度和触觉，这给更换和维修带来难度。因不准触及光学零件，免以移位和弄脏零件而影响成像质量，对更换太阳能电池板也需有数百个步骤，这就要求宇航员在地面反复练习到非常熟练的程度。

“奋进”号航天飞机 12 月 2 日升空后，一直追赶以 7.8km/s 速度飞行的哈勃空间望远镜，4 日晨“奋进”号从后下方接近“哈勃”不到 10 米，在两者相对速度 $< 2.5\text{cm/s}$ 情况下，用机械手将“哈勃”固定到航天飞机敞开的载货舱内，并供给它电源，接通遥控和指令传输系统。从 4 日到 9 日 4 名宇航员分两组（一个操作，一人递工具），每天工作 6 小时共 36 小时，轮流在开放的太空中为“哈勃”更换两对陀螺仪及其电子元件，保险丝，两片太阳能电池板及其驱动电子装置。更新一架广角星际照相机。更换 1 号磁场探测器和装上 2 号磁场探测器上的温度绝缘罩。安装 1 个重 296kg ，冰箱大小（ $2.2\text{米} \times 0.88\text{米} \times 0.88\text{米}$ ）的轴向补偿光学校正系统，高分辨率光谱仪，暗弱天体照相机和光谱仪。为 386 微机增添一个协处理器和存储器等。最后将两片太阳能电池板展开。

修复安装后，首先使导航，供电，数据处理和保险系统工作起来，再进行检验和调试如作高分辨率光谱仪，暗光工作起来，再进行检验和调试如作高分辨率光谱仪，暗弱天体照相机和光谱仪的观测和调试，再启用主镜光学补偿校正系统和广角行星相机，这时一组精选的天文观测图片即可问世。然后将“哈勃”用机械手重新置放在空间轨道，从 12 月 10 日后其一切设备均运行正常，未出现任何故障，在更换中也没有损伤任何部件，达到了预期目的。

参 考 文 献

- [1] McRoberts. J. , Space Telescope. NASA, EP-166, 1982
- [2] Hall. N. B. , The space telescope observatory. NASA, cp-2244, 1982
- [3] Chaisson. E. J. , Scientific American. 1992, 226 (6): 44

Design and Research of Space Telescope

Ma Pinzhong

(*Nanjing Astronomical Instrument Research Center,*
Academia Sinica, Nanjing 210042)

Abstract

This paper describes the characteristics and design requirement of space telescope, then design scheme of hubble space telescope were introduced.

Key Words: Space telescope, Characteristics, Design scheme