

第一章

概 论

王金堂 陈世平

1.1 空间相机的概念、基本组成和分类

1.1.1 概念

在空间遥感中收集信息用的遥感器可分为光学和微波两大类，微波类的介绍见另外专著，而两者使用较多的还是光学成像为遥感手段的空间相机或星载相机。它是装在可提供电源、姿态稳定、环境控制等和轨道保障工作条件的空间平台上与地面站等配合，以光学波段（紫外、可见光、红外）对地球或空间目标进行拍照并传回信息的具有光、机、电、热、控制和信息处理等技术综合性的光机仪器。

空间相机的种类繁多，比如有以胶片为信息载体的侦察相机、测量相机（也称测绘相机）和多谱段相机等；还有以光电探测器为接收器的 CCD 相机、多光谱扫描仪和成像光谱仪等。本书将这些航天遥感器统称为空间相机。在空间遥感领域，有的科技工作者习惯于用“航天光学成像遥感器”和“空间光学成像遥感器”等词来表示空间相机，也有习惯于将空间相机称为“遥感仪器”或“遥感器”和“相机”等。在本书的不同章节，概括所介绍的空间相机的特点，

采用了不同的名称来表示某一类具体的空间相机，如胶片或胶片型空间相机、光机扫描仪和空间 CCD 相机等

目前世界各国经历过业务应用的空间相机达数千台套，它们在气象、地球资源、海洋、环境和灾害监测、军事侦察及天文观测等方面获得了广泛应用，已成为人类认识自然，探索外层空间和扩展对宇宙和地球认识的不可缺少的手段，为满足各国经济建设、科技发展的需要以及促进人类文明和社会发展做出了重要贡献。

受篇幅限制，本书不针对每一种相机进行详细说明，而重点对空间相机的设计基础以及胶片相机、光机扫描仪、CCD 相机等几种典型的空间相机的设计和试验等作比较详细的介绍。

1.1.2 基本组成

空间相机一般由下列部分组成

1) 物镜。它由光学系统和结构组成。光学系统起收集目标信号光能量和抑制杂光等作用。空间相机总体设计的重要问题是将对空间相机的使用要求变换为对相机光学系统的技术要求，如物镜的工作波段、传递函数与分辨率等；并进一步确定物镜的结构参数如焦距、相对孔径、视场等。为此需对物镜进行认真的选择和审定。光学系统的型式很多，如折射式、折反式和反射式等。每种型式又有不同的结构类型可供选择。空间相机光学系统一般包括若干个光学零件如照相窗口、透镜、反射镜、滤光镜和棱镜等，由机械结构将其按要求组装在一起，称之为物镜。

2) 探测接收和电路系统。空间相机利用胶片或光电器件接收信息，其中光电探测接收涉及到光电转换理论，光电器件如 CCD 等的利用和选择涉及到信号放大、处理和显示技术包括存储、登记装置等。它一般由光电探测器和各种电路及机械夹装件组成。其中光电器件如光电探测器等接收到的信息，除经过处理后向地面实时传输以外，有的还要进行星上数据压缩和存储等，以便等到卫星飞经地面站上空时传下来。

3) 机械结构。物镜、探测器和电路系统构成了空间相机的基

本部件，总体结构将这些基本部件利用机械结构零件集成为空间相机。光学零件或探测接收器和探测接收系统中的部件必须用相应的结构固定在一起。

空间相机的结构一般设置主机架，将相机各部件如快门、焦面部件、机械传动、光阑、遮光罩等组装在架体上，并有与航天器安装的界面。

4) 热控装置。一般由热控涂层、隔热薄膜、相变材料、热管、导热索、散热器、加热器和温度控制器等组成。在空间热环境下，要使空间相机能正常工作，都应有主动式或被动式热控措施，以保持相机工作所需的温度范围和温度梯度。根据高精度高分辨率相机研制的经验，光学系统的热控精度有时要优于 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；对温度梯度的要求很高。因此热控装置也是空间相机的重要组成部分。对于红外探测器，一般需要工作在低温环境中，通常工作温度为 $60\sim 150\text{ K}$ 。

5) 控制和信息处理器。现代空间相机的整个工作过程通常都在微处理器的控制和监督下完成。由微处理器控制图像数据采集、存储处理或编码以及控制各伺服系统如输片、调焦、定标、曝光量调整、像移补偿等；并给注记装置输入信息。同时还要监视各个部件的工作状态，一旦相机出现故障，将转入备份通道工作或自动切断相机工作电源；并将故障信息通过遥测系统传向地面控制中心，以便采取对策。

1.1.3 相机的分类

空间相机可按不同的方法分类。

按接收器或探测器分类，空间相机可分成两类：以胶片为接收器和存储器并以光-化学效应为获得目标信息的胶片型相机和以光电器件为探测器，并以光电效应为记录图像手段的光电传输型的空间相机。

1) 胶片型相机又可分为画幅式、全景式和航线式相机。画幅式的空间相机照相时物镜光轴指向不变，利用启闭快门将物镜视

场内地物影像聚焦在胶片上。当用中心快门时，画幅式相机获得的照片的几何关系较为严格，常用于测绘、目标定位和建立地形控制网。全景相机是利用物镜及其位于视场中央的曝光狭缝（与卫星飞行方向平行）一起或单用棱镜等光学零件转动以进行与卫星飞行方向相垂直的扫描，连续改变光轴指向而获得宽覆盖，实现全景摄影。全景照片具有全景畸变、像移补偿畸变和扫描位置畸变，用于军事和国土普查。航线式相机光轴指向不变，胶片以掠过焦面的影像速度向前运行，通过焦面上位于物镜视场中央的一个横向狭缝实现连续曝光，从而获得与狭缝宽度相对应的地面窄条覆盖的照片。此类相机焦距很长，常用于军事侦察。

2) 光电传输型空间相机又可分为扫描成像和凝视成像两种。而扫描成像又有摆扫（如美国陆地卫星的主体制图仪 TM 和推扫（如 SPOT 卫星上的 HRVCCD 相机）两类。凝视成像又有线阵 CCD 推扫凝视成像和焦平面列阵凝视成像探测器件画幅式拍照两种。还有采用胶片成像和光电传输相结合的形式，如 20 世纪 60 年代报道过的月球轨道器相机^[1]，用胶片对月面拍照后，接着进行自动显影，再用飞点扫描器读出胶片上的影像，然后将视频信号送入传输系统传回地面。以后由于光电成像技术的发展此类相机不再使用了。

按谱段可分为紫外、可见光、红外和激光主动式或有源相机等；也可分为全色和多光谱相机以及成像光谱仪等。后者又可按光谱分辨率分为高光谱型和超光谱型。目前常见的成像光谱仪为色散型的。成像光谱仪研究的热点主要有滤光片型、干涉型和计算层析型等。

按成像目标，空间相机可分为面目标成像的相机和点目标成像的相机两类。如地物相机（侦察、测绘、资源相机统称）和对月亮、行星和太阳观测的相机都是对面目标拍照的相机。而星相机或星敏感器都是对天球上除太阳以外的恒星（点光源）拍照的。

按探测信号来源分为有源和无源两类。所谓有源遥感，即是用

人工产生的特定电磁辐射源来照射目标，再根据接收来自目标的反射电磁波特征，以达到识别目标的目的。无源则目标不需要人工辐射照射，而利用自然源（如太阳光、宇宙辐射、物体由于吸收太阳能而发出的红外辐射等）来测出目标的反射或辐射电磁波，达到遥感的目的。

按用途，空间相机可分为两种，一种是由空间相机对地观测的相机，又称地物相机，如对地面目标特性、地质和地貌进行调查、军事侦察、制图定位、气象、海洋观测等；另一类是在空间平台上完成搜索、捕获、跟踪和监视空间目标的相机，如在空间进行天体观测和在截击卫星（或动能武器）上进行量测与瞄准等。

1.2 特点和应用

1.2.1 特点

空间相机的特点大致有以下几个方面。

1) 相机能经受住发射和返回阶段产生的振动、过载冲击和噪声等恶劣力学环境影响的考验。入轨工作后适应卫星平台的姿态运动、高频抖动、颤动等环境。在设计相机时通常采用比刚度高的铝合金、镁合金、钛合金和碳纤维复合材料。结构件要进行优化设计，要求动态刚度高、连接紧固件要考虑特殊防松措施等。

2) 相机工作在比飞机高几十倍至数千倍的高度上，为了得到与机载遥感类似效果，空间相机一般应具有长的焦距。当空间相机用于对空间目标观测时，由于摆脱了大气抖动影响，所获图像的空间分辨潜力得到充分发挥。

3) 相机须采取适应空间环境特性的技术措施。

a) 相机能在真空或低气压等条件下进行正常工作，要考虑大气与真空的折射率的差异和压差，以便计算和校正引起相机的离焦或摄影窗口的变形。

b) 快门及其他活动部件在真空环境条件下，须进行防冷焊接。

计。

c) 相机在地面装校检测，周围环境可能造成相机的光学污染，有机材料在轨道上工作，特别在真空环境下产生挥发，可能污染光学表面及探测器，须考虑防污染问题。

d) 地球辐射带的粒子辐射，会使光学零件的透过率降低，甚至变成不透光，对光电器件产生影响，须进行防辐射设计。

太阳是 115~300 nm 紫外辐射的重要光源，位于绝大多数光学材料吸收带内，经紫外照射后，容易产生不可逆的光化学污染，使光学玻璃变颜色，使增透膜、干涉滤光膜、胶合剂性能严重降低。因此胶合面在空间应尽量避免使用，对于地物相机由于处于紫外的阴影区，可忽略其影响。而对观测太阳的空间相机，须考虑防紫外措施。

e) 空间星相机白天在轨道上工作往往面临着强大的杂光，恰似白天用肉眼观星，背景光远大于星光，导致星像被淹没，而使拍恒星失效。为此，须在星相机或星敏感器设计时考虑完善的消杂光措施。

f) 在地面调试相机，重力加速度为 $1g$ ，而入轨后为微重力，这将引起大口径的光学零件的重力变形，引起扫描装置参数变化。因此，要对大型反射光学零件进行轻量化以增加比刚度或者取用大型超薄反射镜面，同时，在地面调试时要采取措施尽量模拟相机在轨工作的微重力状态。

g) 在轨道环境中，由于舱内温度场的变化对空间相机光学系统和有关部件性能的影响，从而影响遥感图像的品质，因而对空间相机须进行热分析和热设计并采取热控措施。

4) 可靠性高。空间相机通常是一次使用不可维修的产品，因此对可靠性有很高的要求。为此，应把提高系统可靠性工作贯穿到空间相机设计、生产、装配、试验等每一个环节中。如：选用优质材料、宇航级元器件、备份冗余技术等。

5) 严格的体积、质量和功耗限制。由于航天器价格质量比很

高，在空间相机的设计中，要尽量选用轻型材料，采取轻量化措施将质量轻、体积小、功耗低、功能密度高作为永恒的追求目标。

1.2.2 应用

空间相机在遥感领域获得了广泛的应用，大致有以下几个方面。

(1) 用于气象观测

气象观测的目的是获得制定天气预报、进行科学研究所需的数据。从气象卫星获得的数据可以绘制云图、冰雪覆盖图；发现气压形成物旋涡、台风、飓风和大气锋面的生成并跟踪其发展发现湍流，确定云顶温度和地表温度；研究温度和湿度的垂直分布等。用于气象观测的空间相机主要有各种可见光和红外多通道扫描辐射成像仪，也包括可见光红外扫描成像大气（垂直）探测仪。

(2) 用于资源调查和环境监测

利用空间相机进行地球资源调查和环境监测是资源和环境勘测手段的一个飞跃。装载各种空间相机的资源卫星主要用于农作物、森林、牧场、土地调查、野生资源考察、地质、矿产、地下及地表水资源勘察，城市规划，环境灾害监测等。用于资源调查和环境监测的空间相机主要包括多光谱 CCD 相机、多光谱相机扫描仪、超光谱成像光谱仪等。

(3) 用于海洋遥感

海洋遥感以海洋及海岸带作为观测和研究对象。空间相机可用于海面温度、海水叶绿素、泥沙、海水热污染、水质等的观测。特别是大面积的水色动态监测为深入了解海洋初级生产力提供了惟一的有效途径。此外，空间相机还可用于海流、水深、水下地形、海水覆盖和海冰温度的观测，以及水陆分界和岛屿的调查。用于海洋遥感的空间相机主要包括海洋水色仪、CCD 成像仪、可见光及红外扫描辐射计、中分辨率成像光谱仪等。

(4) 用于精确的空间摄影测量

空间摄影测量分为二维和三维摄影测量。前者只研究目标点

的平面几何特性（如陆地卫星拍摄的像片，主要用于二维测图，即平面测图）。后者是研究三维空间的，主要用于三维空间立体测图。利用空间测量（绘）相机获取的图像和信息进行分析、判读和几何处理，能测绘地球的小比例尺二维和三维地图、月面图和其他天体图。

（5）用于空间侦察和预警

安装有空间侦察相机的卫星由于具有全球性的活动范围，能在短时间对地球上的大片陆地与水域进行监测；能迅速查明重要军事目标和经济目标的分布；能预警洲际或中程弹道导弹的发射和监视核爆炸等，在军事上有十分重要的作用。空间侦察的兴起也促使了空间遥感技术的迅速发展。

（6）用于行星、恒星和空间物理现象的观测

由于天文卫星和深空探测器脱离了地球大气层的障碍，装载其上的空间相机获得的遥感图片，在清晰度和分辨率方面远远优于地面上用最好的望远镜所能达到的结果。

（7）用于空间目标的搜索

基于空间相机在太空中对空间进行的观测不受（对天文目标）或很少受（对空间目标）大气的干扰。这对于识别、搜索空间目标有其独特的优势。如对废弃航天器的观测或在航天器交会对接中近距离目标的识别等。如果空间相机和其他遥感手段结合使用，将会使测量精度大为提高。

1.3 设计原则与实施步骤

不同类型的相机的具体设计要求和设计方法不尽相同，但一般按照需求分析—功能分解—设计综合—试验验证的过程进行。

1) 认真理解用户要求，正确确定相机的总体技术指标。用户需求往往是针对整个遥感系统提出的，而不是直接对空间相机提出的。相机研制者要和用户一起认真分析和论证，将应用性能指

标，如发现、识别和确认什么样的目标和目标的位置精度等，转换为空间相机的总体技术指标（工作波段、分辨率、空间分辨率、光谱分辨率、辐射分辨率、时间分辨率等）、指向性能要求、测量精度等。指标要尽量全面和定量，要有确切的定义。在对这些指标以及有关保障和限制条件进一步分析基础上，便可以进行相机的初步（概念）设计。

2) 根据技术发展的水平，选择相机研制的技术途径。应该尽量采用成熟技术，以保证可靠性和经济性等。但考虑一种新型相机方案时，根据现实与可能总要实现不断创新的思维，用以前没有用过的，在规定时间内可实现的新技术，以提高相机的性能。技术途径确定后，进行选定接收器（光电探测器、胶片等）、光学系统的结构形式，进而确定总体参数（如焦距、视场、相对孔径）提出卫星指向控制范围、精度及稳定度等，这样就基本上完成了初步设计。

3) 所选择的设计方案，满足总体指标是前提，同时尚需满足有关设计和建造规范的要求。对方案的可行性也需要比较，包括原材料，元器件的获得能力以及零部件和设备的加工、装调、测试能力，还要比较不同方案的成本和研制周期。方案的比较要尽量量化，不同因素要赋与不同的权重。经过这样的方案可行性论证后，要确认其中的关键技术问题。

这时还应进一步考虑空间遥感系统的问题，根据设计方案的总体设计指标及参数，考虑需要与可能、经费与进度，初步选定卫星平台及图像数据存储和传输等其他有效载荷，以及地面接收和处理站作为相机获得信息的保障（约束）条件。这些属于遥感系统设计的顶层问题。

4) 在相机的总体技术指标和方案确定后，要将指标合理分配至设备级、部件级。这种分配要将整个空间相机作为系统看待，进行系统综合性能分析，以使指标分配结果达到系统最优。确定总体指标、选择方案、分解指标并不是一个单方向的过程，往往需要循环进行，才能使设计更加合理、科学。在设计中建立和应用恰当的

模型进行仿真分析，可以使设计优化，满足要求。一般还要进行设计—试验验证—修改设计的循环。根据这些修改结果，还要对卫星平台（包括其他有效载荷）和地面站上的保障或约束条件进一步落实。

相机设计和其他星上系统相似，应注意成熟性，可靠性，小型化和进度经费之间的权衡，注意产品的标准化、通用化、系列化等。

在此还需要说明的是总体设计不仅是图纸设计，它覆盖了从方案设计、相机加工、装调、测试以及整星试验直到相机检验合格验收的全过程。

1.4 技术发展和展望

目前大口径非球面（包括同轴和离轴）光学系统设计、加工、检验、装调已有较大的进步，光学系统的像质已接近衍射极限。优质的胶片和光电元器件（线阵和面阵 CCD, TDICCD, CMOS 图像传感器等）也有了相应的发展，再加上卫星的指向精度和稳定度已达到相当高的水平，在这些技术基础上，根据用户的需求，各类空间相机分别向高空间、时间、光谱和辐射分辨率，大幅面，高测量精度，小型、轻型或超轻型化等方面发展。现对此作一简单描述，最后还要介绍一下相机在轨试验的新动向。

1.4.1 气象和海洋观测空间相机

1960 年发射的 TIROS-1 是世界上第一颗试验气象卫星，也是第一颗载有空间相机的遥感卫星。TIROS-1 卫星上只装有两台光导管电视摄像机，地面分辨率为 5 km。TIROS-1 是倾角为 48° 的中低轨道卫星，后改进为太阳同步极轨卫星可拍摄全球云图。至今极轨气象卫星已发展到第 5 代，其标志就是 1998 年 5 月发射的 NOAA-15。它装载有先进的甚高分辨率辐射计（AVHRR），以及由红外分光计（HIRS）和先进的微波探测器（AMSU）组成的业务垂直探测器，不但可获得全球全天候昼夜云量，还

可观测定云顶、地面和海平面的温度，测量地球的热辐射、大气温度和水汽垂直分布。静止轨道气象卫星能连续观测地球同一地区的空间环境和气象数据，拍摄云图、测量大气垂直温度、确定风矢量、收集和转发气象资料等。1994年和1995年发射的GOES-8, GOES-9是新3代静止气象卫星，它除了以往两代载有的可见光红外扫描辐射计(VISSR)外，还装载了独立的大气探测仪。由于采用了三轴稳定平台，进一步提高了云图质量、观测效率和时间分辨率，对监测中小尺度、特别是短时间、小尺度天气系统十分有利。

极轨气象卫星携带的AVHRR是一种45°镜扫描的光机扫描型空间相机，中国FY-1气象卫星的多通道扫描辐射计也具有相同的扫描方式，但通道选择不同。中国FY-1C和FY-1D的通道数增加到10个，还兼顾了海洋水色探测，分辨率为1.1 km。静止轨道气象卫星携带的VISSR在光学系统主轴上也有一块45°镜，但它是靠卫星自旋实现东西扫描的，南北扫描靠南北扫描镜步进运动实现。中国FY-2气象卫星的可见光红外扫描成像仪靠望远镜步进实现南北扫描。这类空间相机的可见光和近红外通道的分辨率为1.25 km，热红外和水汽通道的分辨率为5 km。卫星气象观测要求不断提高空间相机的光谱分辨率、空间分辨率和辐射分辨率。EOS土星上的中分辨率成像光谱仪(MODIS)就具有从400 nm到1440 nm范围的36个通道，其中2个通道的空间分辨率达250 m，所有通道的量化等级均为12 bit，MODIS是摆镜扫描的光机扫描仪。多角度成像也是一个发展趋势，EOS土星上的多角度成像光谱辐射计(MISR)使用了9个独立的线阵CCD相机从9个不同角度观测，每个角度都有4个通道，空间分辨率可由指令控制选择从240 m,480 m,960 m到1.92 km。

1978年发射的“风云-7”卫星装载了海岸带水色扫描器(CZCS)，开始了卫星海洋水色探测。CZCS也是45°镜扫描的光机扫描型空间相机，有6个通道，8 bit量化，重复观测周期为6 d。1997年夏发射成功的“海星”小卫星装载了新的有效载荷宽视场

海洋探测仪 (SeaWiFS). 而 SeaWiFS 有 8 个通道, 10 bit 量化, 每两天提供常规的全球覆盖, 并有足够的合成色素浓度测量精度, 用以定量研究海洋初级生产力和生物化学. 中国 HY-1 卫星载有的水色扫描仪也属 45° 镜扫描的空间相机, 但它具有包括 2 个热红外通道在内的 10 个通道, 分辨率为 1.1 km. 中国 HY-1 海洋卫星上的另一台空间相机是 4 谱段 CCD 相机, 它是采用线阵 CCD 推扫的空间相机, 分辨率为 250 m. 日本高级地球观测卫星 (ADEOS) 的海洋水色温度探测仪 (OCTS), 以及德国 DLR 研制的 MOS-IRS 也都是推扫式的卫星海洋观测也要求越来越高的光谱分辨率、空间分辨率和辐射分辨率. 前面介绍的 MODIS 也应用于海洋观测. 2002 年 2 月欧空局发射的 Envisat-1 装有的可以探测海洋色素浓度的中分辨率成像光谱仪 (MERIS) 在 390~1 040 nm 范围有 15 个通道, 但中心波长和光谱宽度 (1.25~25 nm) 是可编程的, 它的分辨率也分 250 m 和 1 km 两种模式. MERIS 是推扫成像的, 它使用的面阵 CCD 有 740×520 (空间×光谱) 像元. 海洋遥感器的发展趋势是将海色和海温作为两个独立参数, 用两种仪器探测, 海面温度将用热红外与微波辐射计联合探测, 海色方面的仪器将向中分辨率的成像光谱仪发展. 但用户根据实际情况还会让光机扫描仪存在相当长的一段时间, 甚至与成像光谱仪一起使用.

1.4.2 资源观测空间相机

1972 年以来, 美国发射了“陆地卫星” (LANDSAT) 1 号至 7 号, 苏联于 1980 年发射了“流星-自然号”卫星, 后演变成“资源号”系列卫星. 1998 年 7 月发射的“资源 O1-N4”是它的改进型资源卫星. 法国于 1986 年开始发射 SPOT 系列, 已经发射了 1 号至 5 号 5 颗卫星. 欧空局、日本、印度、中国等也已经或正在形成自己的资源卫星系列. 用于资源卫星的空间相机, 除早期的 BRV 摄像机外, 主要有两类. 一类为摆镜扫描的, 如 LANDSAT 上的多光谱扫描仪 (MSS)、主题绘图仪 (TM), 包括增强型的 (ETM) 和超增强型的 (ETM+). 中国和巴西合作的地球资源卫星 (CBERS) 上的红

外多光谱扫描仪也属这种类型。这类相机的探测器是分离的，有单元的和多元的。另一类为推扫式的，如法国 SPOT 卫星上的高分辨率相机(HRV)和 CBERS 上的 CCD 相机。这类相机的探测器主要是采用 CCD 器件。资源探测用的空间相机都是多光谱的，一般谱段数多于 4 个。如 CBERS 上的 CCD 相机有 5 个谱段，ETM+ 有 8 个谱段。资源类相机的地面分辨率一般为几米至几十米，如 SPOT 卫星 HRV 的地面分辨率全色达到 10 m，多光谱各波段达到 20 m，SPOT-5 卫星 HRG 相机全色分辨率为 5 m（经处理可达 2.5 m）多光谱各波段为 10 m，ETM+ 全色分辨率为 15 m 热红外为 60 m 其余多光谱波段为 30 m。

实际上，资源探测对地面分辨率有更高的需求。但直到 1994 年美国总统令明确 Landsat-7 的计划由 NASA 和 NOAA 联合负责，同时允许私人公司研制商用 1 m 分辨率卫星后，才促进了高分辨率空间相机的产业化和商业化。在已获批准的 5 种高分辨率商业遥感小卫星系统中，有 5 种相机全色分辨率高达 1 m 多光谱高达 4 m。如太空成像公司 IKONOS 卫星上的高分辨率 TDICCD 相机的地面分辨率为 1 m 多光谱段为 4 m 当 1 m 分辨率时 重复观测时间为 3 d 当 1.5 m 分辨率时为 1.5 d。2001 年 10 月 18 日数字地球公司的“快鸟 2”卫星，成为世界上首颗发射成功的具有 0.61 m 分辨率的商业成像卫星。另外太空成像公司也获准在 2004 年发射全色 0.5 m 多光谱段 2 m 的新卫星与全色 1 m 多光谱 4 m 相机一起工作。由于这种高分辨率卫星或相机装有精确的前、后、左、右指向控制 可以进行前后立体测绘 也可侧摆以提高时间分辨率，使得空间分辨率和时间分辨率的矛盾基本上获得解决。所以今后在陆地资源遥感中，除目前继续使用 ETM+ 等传感器外，今后将可能使用像 ALI^[2] 那样的光学成像传感器，还要使用高分辨率遥感 CCD 相机，使遥感数据向深度、广度前进一大步，而遥感的内容也变得更加丰富，更加有用。

1.4.3 小 轻 型 相 机

1) 近几年来, 尤其在小卫星星座上的空间相机明显趋向小型化, 甚至超小型化 (质量和体积减小, 功耗降低)^[3]. 在此过程中, 一些物理特性限制相机的几何尺寸 (如焦距值以及大多数红外探测器需要致冷器等); 然而, 最近在高性能三反射镜消像散系统 (TMA 等) 以及智能自适应结构方面取得进展, 使光路多次折转成为可能 (保持焦距不变而减短了镜筒的长度), 非致冷的红外探测器也在研制中. 各种微功耗器件, MOS 电路, 中大规模集成电路, 各种金属和非金属材料, 微机械, 还有微光学, 数据存储和压缩技术都有了长足的进步. 在此情况下, 出现了若干小而轻的相机. 如星载激光雷达 (LIDAR), 它有主动测距的功能, 又有被动摄像功能. 可从距月面 500 km 的高度对月面测距, 其精度可达 ± 5 m; 也可用 4 种可见光波段的滤光片对月球摄像. 在上述高度情况下, 可获得 10~30 m 的月面分辨率. LIDAR 系统质量仅为 1.6 kg^[4].

2) 光学系统按光学精度要求在轨展开. 目前光学遥感器的地面分辨率的提高仍有赖于其光学系统口径的增大和焦距的增长. 若光学系统像降落伞那样在轨由小伞包展开为大的镜面, 则可达到大幅度地减少卫星和光学遥感器的体积和质量, 达到小型化的目的.

据初步估计与哈勃望远镜 (HST) 所采用的技术相比, 精密展开结构可使同类产品的质量下降至原来的 1/50 成本下降为原来的几分之一^[5].

3) 由于小卫星体积质量受到的严格限制, 使传统模块化的设计再也不能满足要求. 装载于小卫星上的空间相机, 如对地观测小卫星的空间相机应建立在三维计算机辅助设计基础上对光学、机械、电子学系统进行一体化设计和应用新型的材料^[6]. 另外随着微电子器件的发展, 使某些功能软件化, 将使空间相机向智能化发展.

1.4.4 空间测绘相机

空间测绘相机有画幅式和推扫式两种,而画幅式又分以胶片为信息载体的和以面阵 CCD 为接收器的两类,要提高它们的测量精度,就要增长相机的焦距、提高空间分辨率和加大飞行方向的视场,以增加基高比。

1) 以胶片为信息载体的画幅式成像摄影测量相机,以 20 世纪 90 年代初美国的大幅面相机(LFC)为代表,它在航天飞机上的地面摄影分辨率为 14~25 m,焦距 30.5 cm,幅面 23 cm×46 cm,质量 450 kg 左右。从 LFC 的数据看,要进一步地提高它的测量精度相当困难。而用上述测量原理的面阵 CCD 相机,以其处理方法成熟,对卫星平台稳定性要求低而引起人们的重视,但目前像元数还受到较大的限制,地面覆盖和地面分辨率矛盾很难统一,尤其是基高比不合适,因此这类相机(卫星)的发展受到了限制。

2) 由推扫成像的 CCD 测量相机,目前已受到国际上普遍的重视,美国、德国、日本等都要发射像元分辨率为 0.5~10 m 的这种测量相机。按照 CCD 相机组合方式不同及摄影测量原理不同可以分为三类立体测量相机。

第一类为单线阵 CCD 相机,其典型代表是法国 SPOT-1 至 SPOT-5 卫星上的 HRV,HRVIR 和 HRG 相机,它们都是通过从相邻轨道倾斜观测形成的重叠立体对,达到立体测绘,取得三维数据的目的。与此不同,德国和以色列的装有 CCD 推扫相机的小卫星,沿飞行方向的前后摆动,形成重叠的立体对,这种方法在两个重叠图像的形成周期上优于前者。

第二类为星载双线阵测量相机,这种相机由两个具有一定交会角的线阵 CCD 相机组成,其优点是获取立体对时不需要卫星指向摆动。美国 20 世纪 80 年代初提出的测绘卫星(Mapsat)和立体卫星(Stereosat)就计划装载这种相机,但这两颗卫星的计划未实现。其原因是多方面的,主要的就是这种相机对卫星的姿态稳定度要求过高(10^{-6} (°)/s),技术难于达到。2002 年 5 月 4 日法国

SPOT-5 卫星装载的高分辨率立体成像仪 (HRS) 是一台双镜头测绘相机, 两个镜头在卫星上可沿轨道方向前后倾斜安装成一个前视 20° , 一个后视 20° 以进行前后 10 m 分辨率立体对测量, 幅面为 120 km 沿轨进行 5 m 过采样, 可给出 10~15 m 高程精度的数字高程模型. 卫星沿轨飞行 90 s, 可获得一景立体图相对应的像对. SPOT-5 还装有 2 台高分辨率的几何仪 (HRG) 成侧向左右视角 $\pm 27^\circ$ 安装, 幅宽分别为 60 km. 全色的地面像元分辨率为 5 m 经地面处理为 2.5 m, 可进行旁向立体测量.

第三类为星载三线阵 CCD 相机, 其构成与前两类相机不同的是, 三线阵相机具有从摄取的图像出发重构外方位元素的特点^[7], 可以降低对卫星稳定性的要求. 利用三线阵 CCD 相机进行立体测量是 20 世纪 80 年代初德国人首先研究并应用的, 他们已开发出了多种三线阵 CCD 相机, 其中较典型的有模块式光电多谱立体扫描仪 (MOMS-02)、单镜三线阵电-光立体扫描仪 (MEOSS)、高分辨率立体相机 (HRSC) 和宽视角光电立体扫描仪 (WAOSS) 等. 日本计划于 2003 年发射的 ALOS 卫星姿态稳定度为 (2×10^{-4}) ($^\circ$)/5s 其上安装了 PRISM 三线阵 CCD 相机, 地面像元分辨率将达 2.5 m.

综上所述, LFC 等一类空间摄影测量相机, 不但工作寿命短, 实时性差, 而重要的是进一步提高测量精度受到严格限制 (如绘制 1:10 万地图). 而用线阵推扫 CCD 前后立体测量相机可允许较大幅度的增长焦距, 提高地面像元分辨率和获取较理想的基高比, 从而可以得到很高的测量精度, 可绘制大比例尺 1:5 万 ~ 1:2.5 万的地图. 因此完善和发展该类测量相机, 以进一步提高测量精度是比较现实的技术途径之一.

4.5 空间侦察相机

在空间侦察相机中出现最早的是普查相机, 它的空间分辨率较低, 但幅宽较大. 以后随着分辨率要求越来越高, 就出现了空间分辨率很高的详查相机. 虽然有的相机地面分辨率很高, 但这类相

机成像幅面很小,仅为几千米或十几千米左右,不能完全满足用户的需求.后来美国研制的 8X 卫星侦察相机,又将可见光、近红外相机和 SAR 相结合,较大地提高了幅宽,但时间分辨率距要求还相差甚远.

美国 KH-12 卫星的大口径、长焦距相机,采用了自适应光学技术校正由于失重和温度变化所引起的光学系统误差,在 300 km 高度达到 10 cm 的地面分辨率.由此可见要想达到这样高的分辨率,作为相机最重要的就是加大光学系统的口径,因为口径越大,角分辨率越高;还有增长焦距,使卫星在一定高度上达到更高的地面像元分辨率;同时还需要一个具有高稳定性和高精度指向及有指向改变能力的卫星平台.

目前空间侦察相机的视场从 1° 左右到几度,光学系统由最初的折射式发展到折反式和反射式.而反射式又从两个反射镜(R-C式)发展到三反射镜消像散系统,使得光学遥感器更加轻小型化.并且根据发展情况,以光电传输型的相机逐步代替以胶片为信息载体的相机.

要再进一步提高空间分辨率,经验证明,有非常大的难度.因为在地面将望远镜的口径越做越大,受光学材料、制造工艺等的可能性的严格限制,口径大于 10 m 是很困难的,更何况质量和外形尺寸巨大也无法发射.但若在分布式的卫星群(小卫星编队飞行)上由多个小孔径望远镜阵,借助干涉等方法^[8]构成光学综合大孔径对地成像,可通过小孔径系统实现大孔径的角分辨率,即增大光学系统的等效孔径.这是提高角分辨率的有效途径之一,这种方式称为综合孔径成像.采用这种成像方式的上述相机能获得更高分辨率和较大的覆盖面积,从而可较大地提高时间分辨率.这可能成为详查相机全面提高性能的有效措施之一.但各小孔径所产生的像场必须同相,要达到 $1/10$ 的光频波长精度,在机械调整、稳定性、大气抖动的排除等方面都不容易做到特别是在空间分布式条件下要达到综合孔径的目的,要研制出分布式卫星光学综合孔径