普通高等教育地质矿产类规划教材

遥感成像原理及图像特征

张庸 主编

地质出版社

普通高等教育地质矿产类规划教材

遥感成像原理及图像特征

张　庸　主编

地质出版社

·北　京·

（京）新登字 085 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了遥感成像的物理基础和摄影、光学机械扫描、电子束扫描、固体自扫描、天线扫描等各种遥感成像方法的基本原理以及世界著名的遥感技术系统及其图像。

本书可供高等学校遥感应用专业学生使用，也可供从事遥感应用技术的教学、科研人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

遥感成像原理及图像特征/张肃主编．—北京：地质出版社，1994.10
普通高等教育地质矿产类规划教材
ISBN 7-116-01622-8

Ⅰ.遥… Ⅱ.张… Ⅲ.①遥感成像-理论②遥感成像-图像-特征 Ⅳ.TP70

中国版本图书馆 CIP 数据核字（94）第 12862 号

地质出版社出版
（100013 北京和平里七区十楼）
责任编辑：刘亚军
*
北京地质印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所发行
开本：787×1092 1/16 印张：12 字数：283000
1994 年 10 月北京第一版·1994 年 10 月北京第一次印刷
印数：1—1000 册 定价：7.20 元
ISBN7-116-01622-8
P·1312

前　言

如果把人类发现小孔成像的现象看做人类无意识地进行遥感技术探索的话，至今已有二千多年了。但是遥感真正成为一种系统的、全面和完整的技术方法并在全球范围得到应用还是近几十年的事情。在这几十年里遥感所使用的电磁波段由近紫外线、可见光、红外线波段扩展到微波波段，也把传感器从地面送到空中，随后又送到空间。随着遥感技术的发展，遥感图像种类不断增加，遥感应用范围也不断扩大。气象、海洋、农业、林业、地质、矿产、环境、水文、天文、军事等领域都争相应用遥感解决自己的难题。但并不是每一种遥感图像都是万能的。它们都有自己形成的原理、自己的特点和适用范围。为了提高对遥感图像的应用效果，必须对成像的原理有所了解，掌握各种图像的特征。为此，给遥感应用专业的学生编写这本教材。

由于遥感成像原理内容相当广泛、复杂，涉及学科很多，而且也很新，被认为是20世纪的高新技术。因此在短短的教材中不可能介绍得很细、很全、很深，只是对各种遥感成像原理和重要的遥感技术系统做概略的介绍。

也还是由于上述原因，在本教材编写过程中，参考了大量的文献、资料，有些地方甚至直接引用了原文，对那些付出艰辛劳动的原作者表示我们的敬意和感谢，并将主要参考文献列于书后。

从1987年开始，朱亮璞、俞浩清、刘纪远、赵华昌、刘洪学、欧梓新、甘竹生、付春久、薛国梁等教授、专家先后为我们提供了大量宝贵的资料，对本教材的编写工作予以了极大的支持；赵华昌研究员、陈文升教授审阅了初稿；杨洪钧、王璞、陈明远、陈炳伟同志对本教材的出版工作给予了积极的支持，责任编辑刘亚军同志付出了辛勤的劳动。在此一并向他们表示衷心的谢意。

本教材由张庸主编。参加本教材各章编写的人员分工是：第一章，张庸、高全胜；第二章，刘嘉宜；第三章，蒋引珊、刘嘉宜；第四章，张庸；第五章，陈圣波；第六章，王以铭、张庸；第七章，张庸、李钧钢；第八章，张庸、陈圣波、高全胜；王廷兴、柏青山、潘丽春、薛国梁等参加第二章初稿的编写。

虽然得到各方面的帮助，但由于本人水平有限，书中误谬之处一定不少，恳请专家、读者指正。

张　庸

1994年8月

目　录

第一章　绪论 …… 1
　第一节　遥感图像成像的一般概念 …… 1
　第二节　遥感图像成像原理及图像特征研究内容 …… 2
　第三节　影响遥感图像成像的主要因素 …… 3
　第四节　遥感成像技术发展简史及我国遥感成像技术发展概况 …… 7
　第五节　遥感技术系统的展望 …… 9
第二章　遥感成像的物理基础 …… 12
　第一节　电磁波成像特征概述 …… 12
　第二节　与成像有关的几何光学基础 …… 13
　第三节　与成像有关的波动光学基础 …… 32
　第四节　成像量子光学和半导体基础 …… 51
第三章　摄影成像的基本原理 …… 64
　第一节　概述 …… 64
　第二节　成像设备与感光材料 …… 65
　第三节　光化学成像基本原理 …… 71
　第四节　全息摄影基本原理 …… 81
第四章　光学机械扫描成像基本原理 …… 85
　第一节　概述 …… 85
　第二节　扫描系统 …… 85
　第三节　聚焦系统 …… 90
　第四节　波谱分割系统 …… 92
　第五节　探测系统及波谱响应材料 …… 93
　第六节　辐射标定 …… 96
　第七节　光学机械扫描成像系统的分类 …… 96
　第八节　光学机械扫描图像基本特征 …… 96
第五章　电子束扫描成像基本原理 …… 99
　第一节　概述 …… 99
　第二节　电子束扫描成像过程 …… 99
　第三节　电子束扫描图像主要特征 …… 105
第六章　固体自扫描成像基本原理 …… 107
　第一节　概述 …… 107
　第二节　光学－电荷耦合器件成像基本原理 …… 107
　第三节　CCD 像机图像主要特征 …… 118
第七章　天线扫描成像基本原理 …… 119
　第一节　概述 …… 119
　第二节　雷达基本结构和雷达方程 …… 120

第三节　天线…… 125
第四节　微波辐射成像计和雷达散射计简介…… 129
第五节　真实孔径侧视雷达…… 131
第六节　合成孔径雷达…… 133
第七节　合成孔径雷达图像的基本特征…… 139
第八章　世界主要遥感技术系统及其图像特征…… 142
第一节　气象卫星类…… 142
第二节　“水星”系列—“双子星座”系列—“阿波罗”系列—天空实验室…… 152
第三节　地球资源卫星类(一)——美国陆地卫星系列…… 155
第四节　地球资源卫星类(二)——法国斯波特卫星系列…… 162
第五节　地球资源卫星类(三)——日本、印度地球资源卫星简介 …… 169
第六节　海洋卫星类…… 173
第七节　美国航天飞机及其重要遥感试验系统…… 179
主要参考文献…… 185

第一章 绪 论

第一节 遥感图像成像的一般概念

一、遥感图像的概念

遥感在各个学科的应用是以图像为研究对象。所以遥感技术的主要任务是获得目标物的图像。在此，我们应该搞清楚图像、成像等一些基本概念。

所谓图像是在电磁波（主要是紫外线—微波）范围内，利用传感器直接或间接（即通过转换装置）得到与目标物电磁辐射强弱相对应的形象图像和能够转化为形象图件的数据资料的统称。比如航摄仪摄制的各种照片、陆地卫星 MSS 图像、RBV 图像、航天飞机和航空侧视雷达图像以及众多的数字图像等。不论是紫外线，可见光，红外线，微波的哪个波段范围，也不论是哪种成像方式，凡是所得到的直观图像或能转换为直观图像的资料都统称为图像。

影像曾指"光化学而组成物体有形象的画面"。这里除去光化学的含义外，还有两个意思：一个是物体，一个是画面。考虑到遥感已超越了画面，如果扩展到遥感范围用于具体的画面上也是很好的。如某某物体在图像中的影像特征。而现在也有人把它做为图像同义语，还有一些人把它做为像片的同义语，这些都有待商榷。

像片是摄影方式得到的物体影象及其载体之和。如黑白航空像片，彩色航空像片等等。像片是最早出现的一种遥感图像，当开始有其它遥感方式的图像时，也有人把这些新图像称为像片，当时是延用了像片的概念。现在看来，莫如把像片（照片）这一概念限定在摄影方式得到的图像中。

二、遥感图像的分类与图像命名

遥感图像的划分，从不同角度出发有不同的分类方法。按平台高度划分的，有按电磁波波段进行划分的，也可以按成像方式进行划分，现在常用的还是按成像方式结合波段进行划分可见光摄影图像、彩红外摄影图像、热红外光机扫描图像等等。因为目前不同高度平台上可有相同传感器，单纯以平台高度不能表达波谱和成像特点，单纯用波段分类体现不了成像方式和几何特征，所以许多学者采用综合分类方法。对一个图像的命名，要表明分类位置又要体现该图像的具体特点。我们建议采用下面命名的式子：平台名称＋成像传感器名称（或类别）＋波段名称（或代号）＋图像处理方式。如陆地卫星 $MSS_{4,5,7}$ 标准假彩色合成图像，$SPOT_1HRV_2SX_1$ 拉伸处理图像等等。另外，我们在此提出的一种按图像表达方式进行划分的方法（表 1—1），对于表述图像转换等场合是比较方便的。

三、遥感图像成像

所有通过传感器得到目标物遥感图像的过程都是遥感图像成像过程（下简称遥感成像或成像）。与成像活动有直接关系的技术称为成像技术。它包括传感器、资料回收、图像恢复等部分。其核心是传感器。

遥感图像
- 数字图像
  - 数字图像
    - 数字图像
    - 数值图像
- 模拟图像
  - 信号模拟图像
    - 电信号图像
    - 磁信号图像
    - 光信号图像
  - 直观模拟图像（直观图像）
    - 原生直观模拟图像
    - 次生直观模拟图像

表 1—1　按表达方式的图像分类

过去在遥感分类中划分有成像方式和非成像方式。现在这种分法仍然可用，但两者之间的界限越来越模糊。主要是因为二者有内在联系而且非成像传感器测得的数据可以转换为图像。近来成像传感器得到的数据又可以相比于直接测量的数值。成像与非成像传感器也是有联系的，有的成像传感器就是在非成像传感器上发展起来的，如微波辐射成像计就是由微波辐射计发展起来的。现在还有把成像与光谱测量融合在一起，称为成像光谱技术，就更深刻地表现了二者的紧密关系。非成像遥感、成像遥感有差别也有联系，随着时间的推移，联系就更加紧密，区别就更减少了。

第二节　遥感图像成像原理及图像特征研究内容

遥感图像成像技术是遥感研究工作的一部分。遥感图像成像原理（以下简称："成像原理"）主要是研究各种遥感成像条件、成像器材、成像机理、成像过程及有关系统。这是一个涉及学科范围广泛、技术新的学科。所说的成像条件诸如成像高度，允许能量积累时间，成像接收能量及来源、成像角度、成像时刻……。比如遥感平台是一个重要的成像条件，不同高度、不同速度、不同轨道、不同倾角、不同运动方式等，我们现在可以选用的各种传感器在性能上有很大差别，这些成像器材的作用过程、原理不尽相同，收集到信息后采取的记录方式不一样，形成的图像不一样，发回到地面的手段也不一样。因此，研究成像原理就是研究从平台、传感器到地面站的整个内容。

既然成像原理的核心部分是传感器，那么就要研究其能量来源、所收集电磁波的范围、能量接收聚集、波谱分割、波谱响应、能量的记录、图像或数据的形成、图像数据的传递、图像的恢复、所用的器件、设备及原理、过程等问题。

图像特征包括三个方面：几何特征、波谱特征和干扰因素在图像中的表现。

几何特征有：图形，投影性质，畸变，校正，配准，几何分辨率，比例尺，重叠及与正射投影图的比较等等。波谱特征有：波谱位置带宽，精度，波谱分辨率。对于应用遥感图像的专业人

员来说，掌握成像原理是必不可少的。然而成像原理范围广，专门化程度高，所以我们在这里只涉及有关的和基本的部分。

第三节　影响遥感图像成像的主要因素

遥感图像的获得是非常复杂的，从利用传感器获取所需数据、数据的传送与接收、数据信息处理到最后整理出所需的遥感图像，这中间有各种各样的影响因素。大致来说，主要有平台因素、大气因素、光照因素等。

一、遥感平台因素

在获取遥感图像的过程中，遥感平台起着非常重要的作用。除了装载传感器等仪器外，遥感平台的高度、速度、轨道偏航、滚动等情况，对遥感图像的几何特征有着很大的影响。在图像的获取过程中，影响传感器获取信息的因素是多方面的，而且是不均衡、不稳定的，各种影响因素随传感器所在地点、高度等变化而变化，有些因素（如高度）的变化，还会引起光谱特征方面的变化，因此研究平台方面的差异对研究成像原理是非常必要的。

（一）气球

气球是人们最早用来使用的摄影平台，它成本低，很少有机械振动，便于操纵，可变性好。但气球有体积大、机动性差、速度慢、受气象条件影响大的缺陷，使利用气球成像受到了限制。另外气球的种类也是影响成像的一个因素，因为不同种类的气球可以分别使用不同的传感器，因而所获得的图像也不同。飞机的发明使气球曾一度退出历史的舞台，但由于它有方便、价廉等其它飞行器所不具有的优点，在气象研究、高空摄影方面有其它飞行器所无法代替的功能，所以从七十年代末开始，气球又重新引起人们的兴趣。我国近来也开始用气球进行遥感试验，目的是试验以平流层气球为平台用于资源调查、扫描成像以及大像幅多光谱摄影可行性的研究、获得了令人满意的效果。拟在今后几年，还要配合陆地卫星资料进行试验，对进行大气辐射校正将有很大作用。

（二）飞机

飞机的机动性强，速度快，高度的可变性强，对传感器的适应能力也很强。航天传感器（或其模拟型）几乎都是先在飞机上试验过后再装配于航天器上。飞机作为遥感平台有着很大的潜力。

在航空遥感中，遥感对飞机的性能是有一定要求的。主要是在飞行高度、续航能力、有效载荷、飞行的稳定性及飞机的可改装程度等方面。现在飞机的型号很多，其功能和特性完全可以满足遥感仪器对它的选择。但飞机的航偏、仰俯、颠簸、起伏都影响成像质量，飞机的高度、速度等影响传感器的选择和利用。

在航空遥感中，飞行费用是比较高的，约占总投资的75%—80%，因此，在选择所使用的飞机类型时要考虑到这一点，尽量降低费用。相比之下，气球在这方面具有很大的优越性。

（三）人造地球卫星

人造地球卫星的升空给遥感带来了一场新的革命。现在卫星已成为遥感的主要航天平台。下面简要介绍一下人造地球卫星的情况。

1. 卫星运动的基本规律

卫星运动的基本规律是由地球、星体二者关系决定的。根据开普勒定律导出：

①卫星是以地球中心为焦点作二次曲线运动，运动轨迹为圆或椭圆；星际间飞船则作抛物线或双曲线运动；

②卫星运动扫过的面积速度一定；

③卫星公转周期的平方与轨道长半径的立方成比例。

2. 卫星的主要参数

卫星轨道的设计可分为两步，首先是初轨设计，然后求精确轨道。在初轨设计中，只考虑地球和卫星之间的引力，忽略日月引力、地球扁率、地球大气等其它次要因素。确定出的初轨

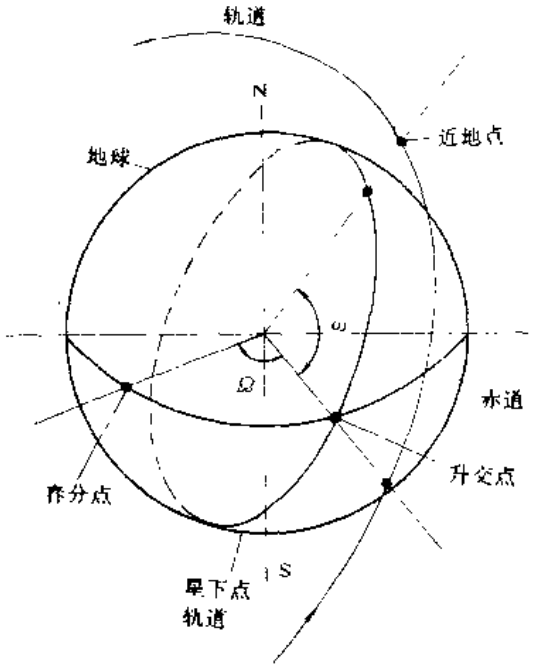


图 1—1　卫星几个轨道要素示意图

的数据就是卫星的主要参数。卫星的主要参数有以下六个(图 1—1)：

(1)轨道长半径(a)及短半径(b)：是卫星绕地球旋转的椭圆轨道的长半径和短半径，如果旋转轨道为圆形，则长、短半径相等。

(2)偏心率(e)偏心率决定轨道运行的形状，其计算公式为：

$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a}}$$

偏心率为 0 时，卫星轨道为一个理想的圆形轨道。不同的遥感应用，对轨道的形状要求是不一样的。

(3)轨道倾角(i)：是卫星轨道平面与赤道平面的夹角。在降交点一侧是从赤道平面顺时针向轨道平面度量。当卫星绕地球转动，在东西方向分量的运动方向与地球自转方向一致时，轨道倾角在 0°到 90°之间变动；当卫星绕地球转动，在东西向分量的运动方向与地球自转方向相反时，轨道倾角在 90°到 180°之间变动。

(4)升交点赤经(Ω)：指春分点时升交点地球向径与地球春分点向径的交角。有了升交点赤经，则可以确定太阳入射角，主要可确定卫星在天体中的方位。

(5)近地点角距(或称幅角)(ω)：是近地点向径和升交点向径间的夹角。二者都在轨道平面上，说明(确定)升交点在轨道中的位置。当$\omega=0°$时，升交点即为近地点的星下点；当$\omega=180°$时，升交点为远地点的星下点。

(6)过近地点时刻(t)：是卫星时间定位的要素。

以上六个参数可以确定出轨道的轨迹和任意时刻的位置。当然，我们只是考虑了在理想情况下的初轨参数，没有考虑到其它因素的，但能表达卫星轨道的基本特征。轨道特征影响着传感器的使用和图像特征。

习惯常用轨道周期、轨点倾角、近地点高度、远地点高度来表述。

轨道周期(T)：是卫星围绕地球旋转一圈所需要的时间。对它的选取必须满足传感器工作的要求，即传感器获得数据的必要的能量积累时间。轨道周期还确定了轨道间距，间距过小，图像重叠太大，底片不能充分利用；间距太大，可能会造成图像不重叠。

3. 卫星轨道的分类

卫星轨道可从不同角度进行划分，综合起来可以划分如下：

卫星轨道	中低轨道(近地轨道)	太阳同步轨道	圆形轨道	回归轨道	极地轨道
					准极地轨道
			椭圆轨道	准回归轨道	倾斜轨道
		非太阳同步轨道	圆形轨道	回归轨道	极地轨道
					准极地轨道
			椭圆轨道	准回归轨道	倾斜轨道
	高轨轨道	地球同步轨道	静止轨道		
			非静止轨道		
		非地球同步轨道			

表1—2 卫星轨道分类表

4. 卫星姿态的控制

卫星在空间飞行时是处于失重状态的，在这种状态下，在没有阻力的空间飞行，如果没有一种力控制就很容易随机摆动、旋转、翻滚。卫星上面的传感器其镜头和天线必须对准地面或某一部分有一固定的方向，才能准确地接收和探测地球的信息。为此，必须准确地控制卫星在空间的姿态。

几十年来，科学家们经过不断的努力和探索，采取了很多控制卫星姿态的方式，保持卫星不随机摆动、旋转和翻滚。如螺旋式自旋稳定方式、滚动式自旋稳定方式、立轴自旋稳定方式、双自旋稳定方式、飞轮稳定方式、重力梯度稳定方式和三轴控制稳定方式。

以上的各种稳定方式都有各自的优缺点，目前三轴控制稳定是使用最多的控制稳定方式。它可以确保卫星姿态能满足任何一种要求，对定位要求越来越高的遥感，也能达到要求的精度。它靠星内控制姿态的微型火箭喷出气体的反作用保持姿态三轴稳定，是一种受控于人的稳定方式，可随时修正轨道。但由于设备和燃料增加卫星发射时的重量，成本提高，并限定了寿命。

重力梯度稳定方式是卫星姿态控制的一个发展方向，是一种利用自然力的被动式稳定方式。由于距地心越远重力越小，离心力越大。如果卫星体制成一种差距，则可以维持其某一面永远向着地球。月球就是这种原理形成一个面永远朝着地面的。多年来，卫星利用重力梯度还没有较成熟的经验，屡遭失败，但近一两年来有了一些新进展。

姿态控制是独成一体的系统，尤其喷气控制系统相当复杂。未来还可能研制成动量互换、磁矩稳定方式。卫星除姿态控制系统外，还有其他系统。如结构系统、遥控系统、程序控制系统、遥测系统、传输系统、温度系统、供配电系统等等。这些与成像关系不大，在此略去。

卫星的轨道种类、轨道参数、稳定方式不同，适用的传感器不尽相同。就是说各种成像方式不一定适用于所有的卫星。例如光机扫描仪在滚动式自旋稳定的卫星上就不能使用。

5. 航天飞机和空间站

航天飞机是一种能起飞，象卫星一样进入轨道进行航天飞行，能改变轨道，又能象飞机那样返回地面，兼有航天、航空飞行能力并且可以重复使用的航天器。这种航天器的设想和试验早在 1927 年就已开始，直到 1982 年 4 月 12 日美国“哥伦比亚”号航天飞机升空才真正达到实用。

航天飞机有以下特点：

(1)有效载荷大，可进行多种科学试验；

(2)工作实验设备齐全，还可以载人飞行，用途特别广泛；

(3)所有部件都可回收(有的燃料箱除外)，多次使用可降低成本；

(4)飞行高度可随时改变；

(5)试验周期可以变短，尤其对传感器而言；

(6)遥感设备可以回收。

但航天飞机造价昂贵，工艺复杂，容易出现故障，飞行预备期长，而且容易受到攻击。尽管如此，航天飞机仍是一种很有价值的航天遥感平台。

近几年来，美国、英国、日本等发达国家已经开始研制“空天飞机”。“空天飞机”可以看作是航天飞机的一种改进和提高，其功能与航天飞机一样，所不同之处在于“空天飞机”可以象普通飞机那样起飞，不需要火箭的助推而依靠自身的发动机加速进行航天飞行，进入太空轨道。它比航天飞机的显著优点在于：它不需要火箭助推器，节省了飞行费用；飞行周期短。

空间站可以看做是一种长寿命的大卫星。其运行轨道和卫星相同，但比卫星有更优越的条件。它可随时维修仪器设备，不会因小的毛病停止工作。可随时补给、更换照像机中的胶片，回收、处理资料、实验遥感设备等，是一种理想的遥感平台。

由于目前各种高度的平台已趋于完善，其发展趋势是向立体结构发展，即地面平台、空中平台、空间平台结合试验与应用。

二、大气条件

大气对遥感的影响主要体现在大气对电磁波辐射的各种影响上。因为遥感传感器接收

的是地物反射或辐射的电磁波。各种波段的电磁波在穿过大气层时，由于大气对电磁波的吸收、反射、散射和衰减，使传感器接收到的地物反射或辐射的电磁波信息产生噪声，影响遥感图像的真实性。

在大气中，水汽、臭氧、二氧化碳主要吸收太阳辐射。太阳辐射被吸收后，在太阳的连续光谱上产生很多暗带。其他的成分对太阳电磁波也有吸收作用，但不是主要的。水汽吸收波长的范围很广，在0.7—3.0μm内最强。

大气对太阳电磁辐射的散射作用主要有两种方式。引起散射的粒子尺度远小于入射电磁波波长的散射称瑞利散射；引起散射的粒子尺度相近于入射电磁波长的散射称米氏散射。瑞利散射主要对可见光波段影响较大。

太阳电磁辐射与大气相互作用的结果，使能量不断减弱，其中反射作用影响最大，由于云层反射对电磁波各波段都有强烈的影响，同时大气本身的向上反射及向上发射的辐射，都能使传感器接收的能量（主要是地物反射和发射的能量）产生噪声，对遥感造成严重障碍。

电磁波透过大气时，其衰减强度随波长而异，电磁波的某些波段，大气对它们的衰减作用较小，这些电磁波波段称为大气窗口，研究和选择有利的大气窗口，对最大限度地接收有用信息是非常重要的。

第四节　遥感成像技术发展简史及我国遥感成像技术发展概况

一、遥感成像技术发展简史

遥感成像技术的发展概括了遥感技术的绝大部分历史，同时也体现了遥感理论和应用技术的发展。遥感成像的发展包括平台、传感器、成像材料、图像传输和回收的技术及理论的发展。我们根据事物发展的规律，把遥感成像的发展归纳为四个阶段。

（一）萌芽阶段（　　—1915）

在公元前四世纪就有人发现小孔可以成像，但在近二千年一直没有重要突破。在1553年，意大利人薄塔发明了小孔暗箱成像，到1568年意大利人巴巴罗制成了透镜暗箱，可以说是照像机的雏形。之后人们又发现了银盐感光的现象，随后进行了银盐纸成像试验，但当时没有定影术，图像不能保存。到十九世纪上半叶，摄影术研究发生了质的变化。1820年法国人研究出沥青法摄影，可以保存并将此法用于印刷，这种方法又很快为银盐感光法所代替。1839年达格雷用硫代硫酸钠定影，公开了第一张银板照片。至此，照像机、感光材料、显影、定影药品都已出现，摄影术真正成形。

19年后法国人利用气球得到第一张空中像片，相继又有人用风筝、鸽子进行空中摄影。莫尔于1907年用比较简陋的低空火箭和陀螺稳定相机进行空中摄影试验，到1909年才有了第一张以飞机为平台的航空像片。虽然在此前后已经有了（地面）三镜头相机、全景相机和空中侦察相机，但直到第一次世界大战初也没有把航片用于军事侦察，所以说这一阶段以试验性空中摄影为多，没有真正投入使用。

这一阶段的特点是：摄影方法初成，平台简单，很少应用。

（二）航空遥感发展阶段（1915—1957）

1915 年有了航空专用侦察相机。由于第一次世界大战。英国皇家空军劳斯少校首次拍摄德军区航空像片而得到官方支持，航空摄影有了发展。由于战争加剧，英军每天冲洗航片上千张，战争后期德军投入 2000 余台航空相机，法军每天要冲洗航片上万张。不久又研究出彩色胶片(1924 年)，红外航空胶片(1931 年)、彩色电影胶片(1931 年) 和手提式双镜头航空相机，更增加了航空遥感的范围。在二次大战期间和战后又相继出现了彩红外反转片(1942 年)和机载侧视雷达和相干光学处理方法(1953 年—1954 年)，使得航空遥感发展得更为全面。但由于雷达技术的严格保密，彩色摄影成本过高，这一阶段仍以黑白航空像片为主。

这个阶段的特点是：航空摄影技术趋于成熟且较多范围的应用；向多波段和多种手段发展；开展了零星的空间成像的研究，遥感平台变化不大。

(三)航天遥感试验阶段(1957—1972)

虽然从 1907 年莫尔试验到 1954 年美国利用改进的德国 V-2 火箭拍摄像片经过了几十年的努力，人类仍不能在空间较高空间取得长时间的地面图像。1957 年苏联发射地球卫星成功，给人们带来了希望。苏美互相竞争，军事侦察卫星的大量涌现，使得航天遥感试验加快了步伐。美国水星号、双子星座号、阿波罗号、泰罗斯号、艾萨号、雨云号等飞船、卫星和苏联的月球号、金星号、东方号、宇宙号、火星号、上升号、闪电号、流星号等卫星系列的出现，把多种样式照像机、电视摄像机、光学机械扫描仪等传感器送到了空间。并在此阶段研制成了九镜头航空相机和机载合成孔径雷达。这一时期取得不少令人兴奋的图像，但是比较零散，分辨率也低。

这一阶段特点是：航天平台的出现，取得空间对地多而不连续的图像；无论是平台还是传感器，很多都是试验性、探索性的；卫星、传感器数量大、变化快、花样多。如在美国从开始发射到现在的已用卫星系列总数中，这一阶段占 60%。

(四)多种遥感手段综合发展和应用阶段(1972—现在)

以陆地卫星系列的发射和应用为标志，遥感技术已趋于成熟。航天遥感中有高轨、中轨、低轨，航空遥感中有高、中、低空，传感器在紫外线、可见光、红外线、微波各波段都可成像，应用领域也非常广泛，说明遥感技术已进入一个崭新的阶段。

这个阶段重要的卫星系列有美国陆地卫星、天空实验室、海洋动力卫星、海洋卫星、航天飞机，欧洲的太空实验室，苏联连续发射的宇宙系列、联盟系列、礼炮系列，新发射的进步系列、联盟 T-1 系列、和平号轨道站、法国发射的斯波特卫星、日本桃化海洋卫星等。进入空间的传感器也是样式新颖名目繁多，如多波段扫描仪，返束光导管电视摄像机，合成孔径雷达，大像幅像机，电荷耦合像机等等。

总的来说这一时期的特点是：航天平台技术已成熟；成像传感器系统化；图像可以覆盖全球，被广泛应用，而且继续向精、深方向发展。

二、我国遥感成像技术发展概况

我国的遥感成像技术发展相比于西方国家起步较晚，差距比较大。在五、六十年代主要是依靠从苏联进口设备进行黑白航空摄影。从七十年代才进入发展时期，有了自己的高空摄影仪、多波段扫描仪，并拥有自己研制的达到国际水平的遥感平台。从八十年代到现在，已经发射了多颗通讯卫星、气象卫星、国土卫星及科学探测卫星。在国土卫星上使用了 CCD 像机等先进技术，并有自己的地面站。我国自行研制的机载合成孔径雷达等已投入使用。这些成

果引起了国际上的普遍关注，说明我国正向着遥感技术先进国家行列迈进。

第五节 遥感技术系统的展望

遥感技术在近几年间有了飞速的发展，遥感应用方面也取得了显著的成就。随着科学技术的进一步发展，遥感技术还会有更大的进展。综合发展现状及趋势，对其前景归纳如下：

一、不断提高航天遥感的几何分辨率

中轨卫星在60年代的几何分辨率是以km计算的，70年代突破100m，80年代初达到30m，80年代中期达到20～10m。侦察卫星（低轨）可达0.15m。

预计今后几年在资源卫星方面，将普遍发展分辨率为10m的传感仪器。由于商业、科技上的竞争，有可能突破10m大关。侦察卫星可能发展0.1m分辨率的传感器。

二、观测波段的细分

1973年天空实验室分出13个波段用于实验（波段有重叠）。1972年陆地卫星MSS 0.5μm～1.1μm为4个波段。1982年TM虽为4个波段，但观测波段带宽度由70年代的100nm发展到80年代的几十个nm。

近几年来，在遥感波段方面又取得一些新的进展：

1983年美国喷气推进实验室航空成像光谱计AIS在1.2μm－2.4μm（1200nm间），范围分为128个波段，各波段稍有重叠，每个波段宽度仅10nm，光谱分辨率小于10nm。

1984年航空可见光—红外成像光谱测量仪AVRIS把0.4μm－2.4μm分成224个波段，平均还不足10nm。

1985年加拿大荧光线性成像仪PLI在0.42－0.81nm间，有256个波段可供选择（有重叠，每个波段约为1.94nm），其分辨率是目前最高的。我国室内研究成果也可达几个nm。虽然对如此细分光谱成像测量的意义目前有争论，但明显的效果会促使其更快地发展。

三、由相对波谱图像向绝对波谱图像转变

过去我们由宽波段的单一波段照片发展到多波段图像，已经向定量迈进一步，但不能由成像的过程直接得到地物波谱数值。若概括为一个公式则为：

$$P = K \cdot H$$

其中P为光谱辐射率（反射、发射、散射）；K为系数；H为图像中的灰度。其中的K是一个不定因子，过去P值是从成像过程中测不出“绝对值”的。从目前的研究成果资料来看，成像光谱仪的研制成功并已经取得令人振奋的结果。在成像的同时，可以得到与地面测得的辐射率值相等的数据。

由上面的介绍可以看出：（1）非成像与成像关系趋向于融合；（2）波谱研究有可能进入新的轮回。

四、热红外及微波遥感将会得到较大发展

我们统计国际上近期研制比较著名的52个系统中，有19个是有热红外成像系统，约占40%，说明热红外系统是比较受到重视的。比较有名的机载系统有SUP（4个波段），TERS（6个波段），STIMS（美国6波段热红外多波段扫描仪）。

从SEIMS波段上看分为如下波段：8.2－8.6μm，8.6－9.2μm，9.2－9.4μm，9.4－

10.2μm,10.2—11.2μm,11.2—12.2μm。这种扫描仪是专门的热红外成像设备,说明其更加专门化。

航天微波遥感,除已经上天的多个合成孔径侧视雷达系统外,还有专门的雷达卫星,说明微波遥感也明显地受到重视。

热红外及微波遥感的特殊效果在遥感应用上也确是不容忽视的。

五、发展多角度成像器件

多角度成像有以下几个优点:

1. 不同角度收集数据;

2. 可以进行立体观察;

3. 可以进行多次覆盖;

4. 可以及时地对某个地区进行覆盖。

所以可以对不同的工作任务进行不同的设计。

单纯用于收集不同角度数据的仪器如:SIR-B 系统有六个档次,可以满足平原、丘陵、低山、高山等不同地形类型最佳视角的选择。

由于多角度,可以在两个相邻轨道上对同一目标进行覆盖(如 SPOT 卫星)。多角度还有一个目的,是随时对关心的地区进行观测。由于卫星轨道固定,无法随时移动到某一目标的上空。由于多角度,则可以及时指令改变传感器的角度,对某一地区进行观测,或在多个轨道上,对某一地区进行重复观测并可立体成像,如 SPOT 卫星的 HRV,反射镜向左右两侧离开天底的垂直观察,有 90 个档可供选择。有很多国家都在研制这种工作方式的仪器。

六、传感器件的固体化

电荷耦合器件(Charge Couple Device),简称 CCD,是 70 年代以来发展起来的一种新的遥感仪器。它采用半导体系统非平衡态理论作为理论基础,工艺上采用了业已成熟的 LSI 和 VLSI 工艺,发展很快。与传统的摄像管相比较,CCD 除集成度高,成本低,电性能好以外,还具有以下优点:

1. 不再需要机械转动的扫描镜,可靠性、稳定性都得到了保证;

2. 坚固耐用,寿命长;

3. 累积时间长,可提高分辨率;

4. 信噪比、辐射测量灵敏度都高于光机扫描仪;

5. 图像畸变小,容易纠正。

6. 不受电磁场影响;

7. 反应快,工作效率高。

法国的 SPOT 卫星、美国原计划发射的 AEROSA 系统、航天飞机 EILE 系统及加拿大 ELI 系统都属于这类。

法国的 SPOT-1 是美国产元器件、自己组装成机。预计 SPOT-3 可能制成全部由自己研制的 CCD 器件、性能远要优于现在的 HRV 像机。

预计 CCD 将逐渐取代光学机械扫描仪成为遥感成像的主要传感器。

七、航天平台的航空化及航天摄影术的再起

航天飞机的出现,使得遥感平台家族中又增添了一个新的成员。航天飞机作为一种可随时升空和回落的宇间飞行器,可以多次使用,不仅降低了成本,而且克服了卫星受轨道严格

控制的缺陷，机动性、灵活性大为提高，早已引起了各国的普遍关注。虽然美国“挑战者”号航天飞机的爆炸给航天平台的航空化带来了阴影，但没能阻挡对航天飞机的研制。继“挑战者”号航天飞机之后，美国已相继多次发射航天飞机，进行了一系列的科学试验，取得了重要的科研成果，并利用航天飞机成功地修复了“哈勃”太空望远镜。

目前，法、英、俄、日等国也在积极研制自己的航天飞机，并取得了一定的进展。值得注意的是，英国研制的 HOTOL 号航天飞机可水平起飞、降落，没有助推火箭，采用大气助燃，一级动力升空，整体全部回收，设备重复使用，打破了一级火箭不能升空的旧理论。相比之下，英国 HOTOL 号航天飞机采用新的理论和技术，将使航天成本大为降低。

随着非摄影传感器的问世，航天摄影似有被趋于淡漠的势头，但非摄影传感器在分辨率、资料的传输，图像的处理等方面也存在一定的缺陷和不足，所以，航天摄影没有被完全取代。自 1984 年航天飞机 LFC 系统试验以来，航天摄影又再度引起人们的兴趣，其原因有以下几点：

1. 航天飞机的使用能轻而易举地解决资料回收的问题；

2. LFC 分辨率高，可达 10—15m；

3. 可以形成立体像对；

4. 图像校正处理方便；

5. 已有完备的仪器和成熟的经验用于成像；

6. 成本较航空摄影低得多；

7、可以充分发挥已有的解译经验(即航片的解译经验)。航天飞机 LFC 的成功使得航天摄影有可能进入一个新的发展高潮。

八、气球平台的复活

在前面我们已介绍的气球平台的一些特性及优点。近年来，各国以一些现代技术增加了气球平台的机动性和稳定性，大大降低了成本。在我国已有几个研究单位研制并利用了气球做平台(如我国空间遥感中心和光机所等)，其摄制的图像效果优于 1 ∶ 5 万航空摄影。

九、遥感飞行综合成像

在一次飞行中选用的波段范围可以横跨可见光、红外线、微波，采用的传感器可以包括多种成像方式。这样进行综合成像的目的是一次飞行可以获取多种信息，降低飞行成本，减少浪费。

总的归纳起来，遥感技术系统在今后的若干年内将在以下几个方面有所突破：

1. 波谱和几何分辨率的提高及成像光谱技术广泛应用；

2. 地面覆盖特性向多功能转化；

3. 波谱覆盖向综合性发展；

4. 平台成本降低，应用更加方便。

第二章　遥感成像的物理基础

第一节　电磁波成像特征概述

遥感技术的基本任务就是通过各种有效的传感器，收集地面物体在某一电磁波辐射范围内所反映的图像，获得各种地物的波谱特征信息，以供人们分析、提取和利用。在电磁波谱中，目前遥感技术所利用的只包括近紫外波段、可见光波段、红外波段和微波波段。本节概述各个不同波段的成像特征。

由于各种地物及其环境之间的电磁波辐射有着不同特征和相互依存关系，在不同波段具有不同的辐射特性，从而决定了不同波段的成像特征也有若干性质上的差异(图 2—1)。

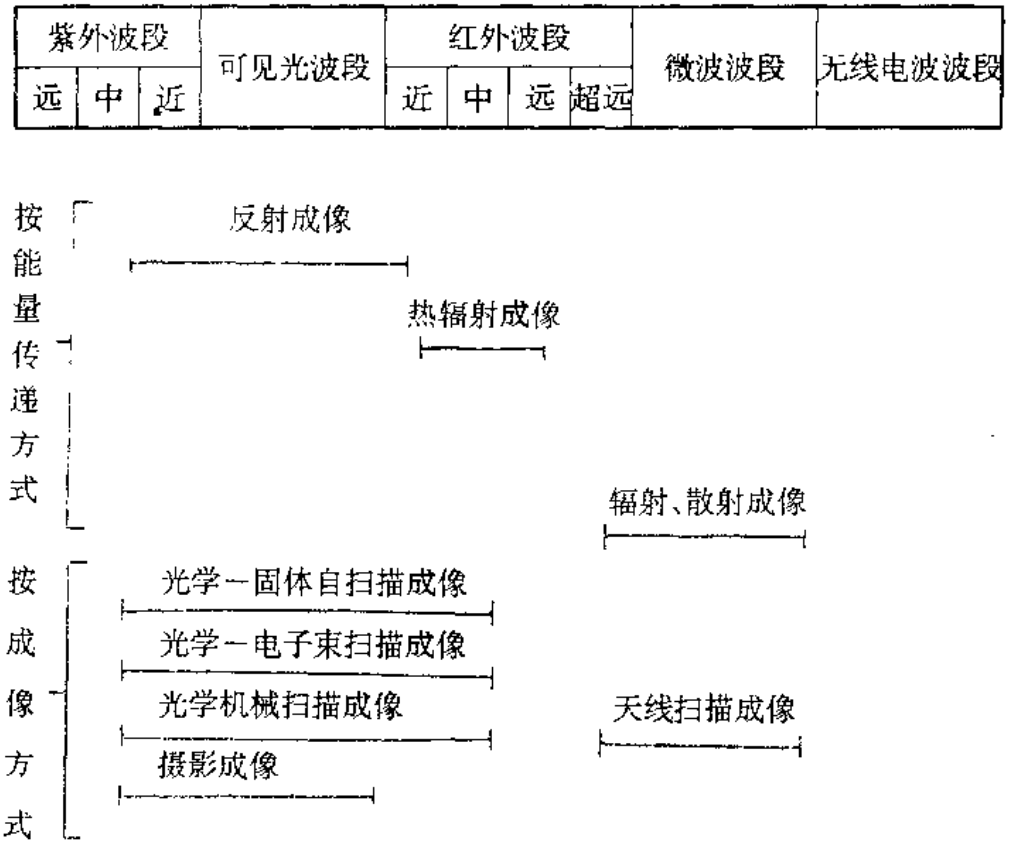


图 2—1　各电磁波段成像类型示意图

一、反射成像

太阳辐射能量主要分布在可见光、近紫外和近红外波段，这些波段均可采用日光反射成像，或利用发射这个波段范围内电磁波的人工光源进行反射成像。只是在整个波段里近紫外、近红外波段与可见光不同，在成像过程中必须使用特殊的滤光片或镜头，以便阻截住可见光，让近紫外、近红外波段电磁波得以通过。

在反射成像技术中最常用的是摄影成像方式，光学机械扫描、光学－电子束扫描和光学－固体自扫描方式。

二、热辐射成像（简称热成像）

地物自身的热辐射，按普朗克公式及维恩位移定律计算，地表常温物体（以地球表面的平均温度近似于 300K 计算）的热辐射能量绝大部分集中在远红外波段，其峰值波长为 9.7μm。地表某些高温物体（如喷发后期的火山）若以 1000K 计算，其热辐射能量有一半以上在中远红外波段，其峰值波长约为 2.9μm（见图 2－66）。因此，对地表高温物体进行热成像时，常利用远红外波段的 8－14μm 大气窗口。不过由于大气层上部臭氧层在 9.6μm 附近对红外线的吸收，在航天热成像时，常避开这个吸收带，如陆地卫星 5 号在 TM_6 波段选择的波长为 10.40—12.50μm，就是考虑到这个因素。

热成像技术，目前主要是采用光学机械扫描，少数用光学－电子束扫描和光学－固体自扫描方式。

热红外成像可以昼夜进行。在地形起伏地区，白昼热图像受日照及地形影响较大，图像反差往往过于强烈，相对地掩盖了不同地物自身热特性。夜间热红外图像基本上消除了地形的影响，可较好地反映出物体自身的热特性，不过由于夜间整个环境变冷而使不同地物的热对比度明显减弱，图像反差弱，因此恰当地选择成像季节和时刻是十分重要的。

热红外成像与反射光成像一样，受气象条件的影响较大。云雨对远红外线的散射和吸收使红外线的透射率明显减低，必将影响热成像的质量。但是各种气体分子以及大气中所含的烟尘等，由于其半径显然小于远红外波长，它们所产生的瑞利散射在长波红外中影响极为微弱。从这一点来说，热红外的成像条件稍优于反射光的成像。

三、微波成像

微波波段的波长（1－1000mm）远比可见光、红外线大得多，在电磁波的波粒二象性中，波动性占主导地位，而且物体自身相应的辐射能量很微弱，因此微波成像已不能采用反射成像、热辐射成像的成像方式。虽然微波辐射能量很小，但目前的技术已经完全能够接收、处理成像。微波成像必须采用无线电技术来进行工作。所以微波成像在成像原理和技术方法与前两种有重大差别，它是采用天线扫描成像方式。

第二节　与成像有关的几何光学基础

几何光学是以光的直线传播性质为基础，研究光在透明介质中传播的规律和光通过光学系统成像的原理。

一、光的传播规律——几何光学的基本定律

1. 光的直线传播定律：光在均匀介质里沿直线传播。

2. 光的独立传播定律：自不同方向或由不同物体发出的光线的相交，对每一光线的独立传播不发生影响。

3. 光的反射和折射定律：光线由一种介质进入另一种介质时，光线在两介质的分界面上被分为反射光线和折射光线，它们的进行方向分别遵守反射定律和折射定律。反射定律指出：入射光线、反射光线和法线共面，入射光线和反射光线分居法线的两侧；反射角等于入射

角。

折射定律可用公式表示为：

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

当光从光密介质射向光疏介质时(即 $n_2 < n_1$)，折射角 i_2 总是大于入射角 i_1，当入射角增至某一数值

$$i_0 = \sin^{-1}(n_2/n_1)$$

时，折射角 $i_2 = 90°$。当 $i_1 > i_0$ 时，将导致 $\sin i_2 > 1$，这显然是不可能的。事实上此时折射光线消失，入射光线全部反射回原介质，称为全反射，i_0 称为临界角。

二、光学元件

根据光的传播规律和实际要求，可以制作一些光学元件，如平面镜、球面镜、棱镜和透镜等。现在研究光学元件对光线的作用及成像原理。

(一)平面镜

在平玻璃或金属板上镀一层银，形成反射膜，成为平面镜，可以使入射光线的百分之九十以上被反射。

1. 平面镜对光线的作用

平面镜能够反射光线，改变光线进行方向。反射光线的方向由光的反射定律确定。

如图 2—2 所示，光垂直照射到平面镜上，可使光逆着原来入射方向反射，使光线方向改变 180°。

图 2—3 所示，当入射角 45°时反射角也等于 45°，可使光线方向改变 90°。利用这一性质，

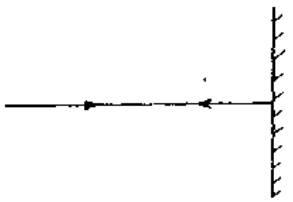


图 2—2 平面镜使光线方向改变 180°角

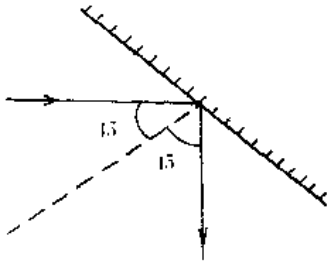


图 2—3 平面镜使光线方向改变 90°角

可使水平方向的入射光线改为竖直方向出射，或竖直的入射光线改为水平方向出射。

图 2—4 所示，当平面镜转过 θ 角时，可使反射光线转过 2θ 角，利用这一性质可测量角度的微小变化。

利用两个平面镜组合可以进一步改变光线进行方向。如图 2—5 所示，两平面镜互相平行对立，可使出射光线平行于入射光线且方向相同，只是移动一定距离，目的在于使光线避过障碍物而继续前进。利用这一性质可作成潜望镜。

图 2—6 所示，两平面镜正交，可使出射光线跟入射光线平行而方向相反。

图 2—7 所示，两平面镜交角为 θ 角，光线经过两次反射后，出射光线与入射光线的交角是 2θ 角，亦称为角反射器。

以上这些组合在光学仪器工程中是常用的装置。

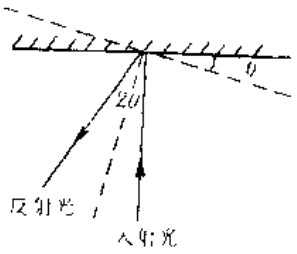


图 2—4　平面镜转 θ 角使光线方向改变 2θ 角

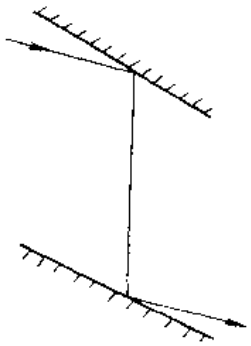


图 2—5　两平行平面镜使光线方向平移同向

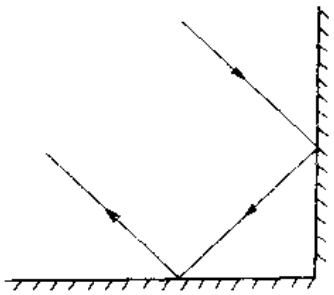


图 2—6　两垂直平面镜使光线方向平移反向

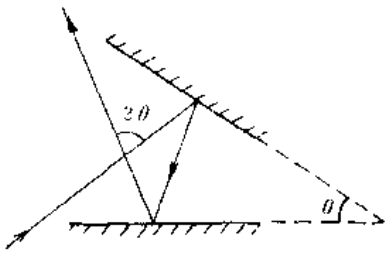


图 2—7　两夹角平面镜使光线方向转过 2θ 角

2. 平面镜成像

设 S 是平面镜前的一发光点，向四面八方发出光线，SA 和 SB 表示两条入射光线，按光的反射定律，在镜面上反射后沿 AC 和 BD 两条直线前进。从镜面看去，反射光线好象从 S' 所发出一样，S' 叫做 S 的像(见图 2—8)。因为反射角等于入射角，可以从几何关系证明 $\triangle SAB \cong \triangle S'AB$，$BS = BS'$，这就证明 S' 和 S 在镜面所在平面的同一法线上，并且到平面的距离相等，也就是说 S' 和 S 两点对于平面镜的平面是对称的。

对于平面镜所成的像，光线实际没有通过像点，不过是逆光线进行方向的延长线通过的像点，这种像叫做虚像，而光线通过像点的像则叫实像。

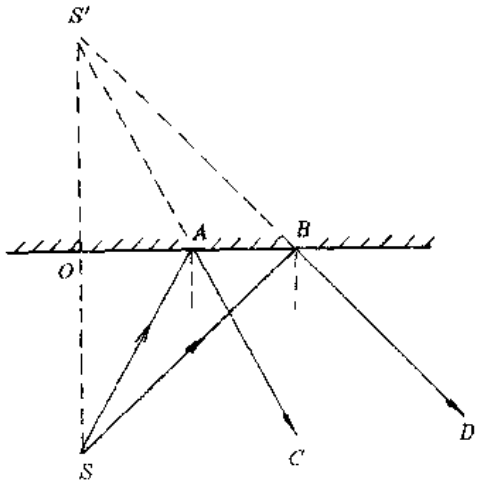


图 2—8　平面镜成像

(二)球面镜

球面镜的反射面是球面的一部分。反射面是球面的凹面，叫做凹面镜；反射面是球面的

凸面，叫做凸面镜。镜面上的中心点，叫镜的顶点，球面的球心 C 叫做镜的曲率中心，球面的半径 R 叫做镜面曲率半径。通过顶点 O 和曲率中心 C 的直线叫做主轴。

1. 凹面镜会聚光线的作用

设有平行于主轴并且接近主轴的光线照射到凹面镜上，按反射定律可确定反射光线的方向。从图 2—9 可见反射光线成会聚光束交于镜前主轴上的一点 F，这一点叫凹面镜的焦点。从焦点到顶点的距离叫做焦距。从图上可直接量得焦距约为曲率半径的一半。可简单证明如 $F=SD$ 是入射光线，DC 是 D 点的法线，则 DF 是反射光线。因按反射定律有 $\angle SPC=$

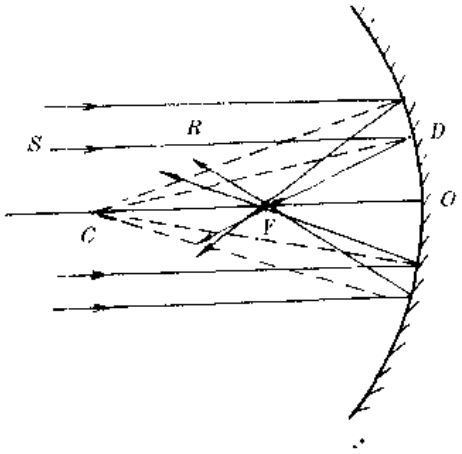


图 2—9　凹面镜的会聚光线作用

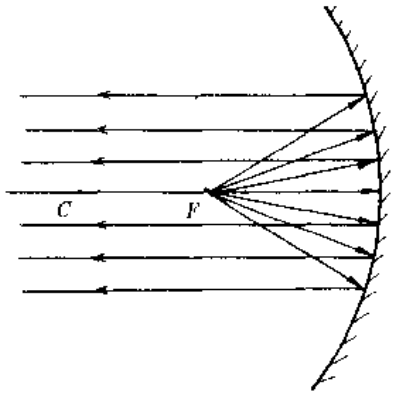


图 2—10　凹面镜使在焦点上的光源成平行光射出

$\angle FDC=\angle DCF$。当 SD 接近主轴时，$FC\cong DF$，所以 $FO=FC=OC/2$。

根据光路的可逆性，当光源放在凹面镜的焦点上时，由光源发出的光经镜面反射后成平行光射出，如图 2—10。

凹面镜的上述性质在技术上有广泛的应用：

将平行光会聚于一点，如反射式天文望远镜，太阳动力机都具有这样的作用。

将一束光束改成平行光集中地向一个方向发射，如汽车和手电筒上的照明灯以及探照灯都具有这样的作用。

2. 凸面镜发散光线的作用

设有平行于主轴并且接近主轴的入射光线照射到凸面镜上，按反射定律可确定反射光线的方向。从图 2—11 可见，反射光线成发散光束，从镜面看去，反射光线好象从 F 点发出，叫做凸面镜的焦点。从图上可直接量得焦距仍是曲率半径的一半。

可以认为凸面镜也有聚焦作用，但凸面镜的焦点跟凹面镜的焦点显然不同。凹面镜的焦点是光线确实通过的焦点，叫做实焦点。对凸面镜的焦点，光线实际没有通过，只是逆光线进行方向的延长线通过的焦点，叫做虚焦点。

拿口径相同的平面镜和凸面镜比较，凸面镜观察到的范围更大，如图 2—12。凸面镜这一性质在实际上也有应用，如汽车司机座位外面的凸面反射镜，是用来观察更广阔范围内的情况，以避免交通事故。凸面镜也用于某些传感器的聚焦系统中。

(三)棱镜

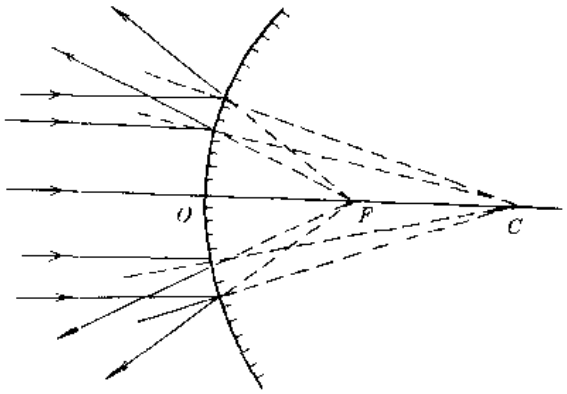


图 2—11　凸面镜的发散光线作用

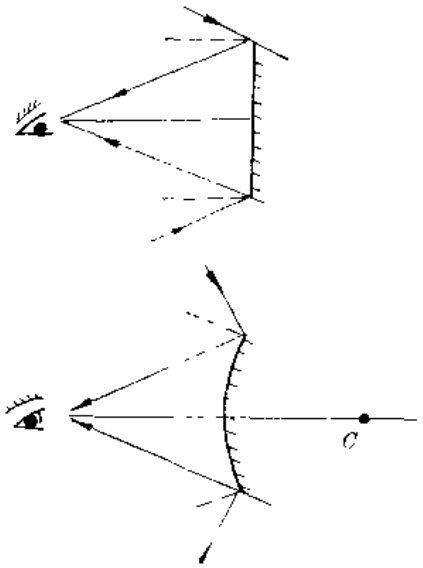


图 2—12　球面镜较平面镜观察范围大

棱镜是由透明介质(如玻璃)做成的棱柱体。截面呈三角形的棱镜叫三棱镜。与棱边垂直的平面叫做棱镜的主截面。

1. 棱镜改变光路的作用

(1)光线通过棱镜要产生折射,故可利用棱镜改变光线进行方向,折射光线的方向由光的折射定律确定。

图 2—13 为三棱镜的主截面,沿主截面入射的光线 DE 在界面 AB 上的 E 点发生第一次折射。光线在这里是由光疏介质进入光密介质的,折射角 i_2 小于入射角 i_1,光线偏向底边 BC。进入棱镜的光线 EF 在界面 AC 上的 F 点发生第二次折射,在这里光线是由光密介质进入光疏介质的,折射角 i_1' 大于入射角 i_2',出射光线进一步偏向底边 BC。光线经两次折射,传播方向总的变化可用入射线 DE 和出射线 FG 延长线的夹角 δ 来表示,δ 叫做偏向角。可以证明,δ 与 i_1、i_1' 及棱角 α 之间有如下关系:

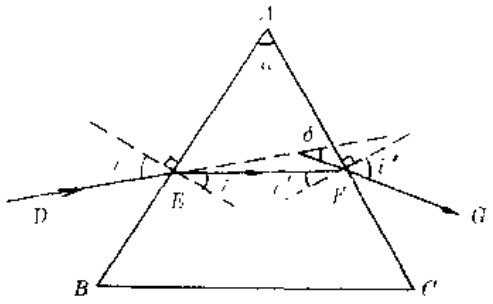


图 2—13　棱镜使光线方向偏折

$$\delta = i_1 + i_1' - \alpha$$

(2)光线从棱镜射出时是从光密介质射向光疏介质,可能产生全反射,故可利用棱镜的全反射作用来改变光路。这在许多方面都较平面反射镜优越。图 2—14 所示的一组棱镜,即为用来改变光路方向的转向棱镜,在光学仪器中经常会用到它们。图中 a 为全反射棱镜,光线垂直入射于直角棱镜的 AC 面,光线对 BC 面的入射角是 45°,大于临界角 42°,故产生全反射,而垂直于 AB 面射出,光线方向改变了 90°。

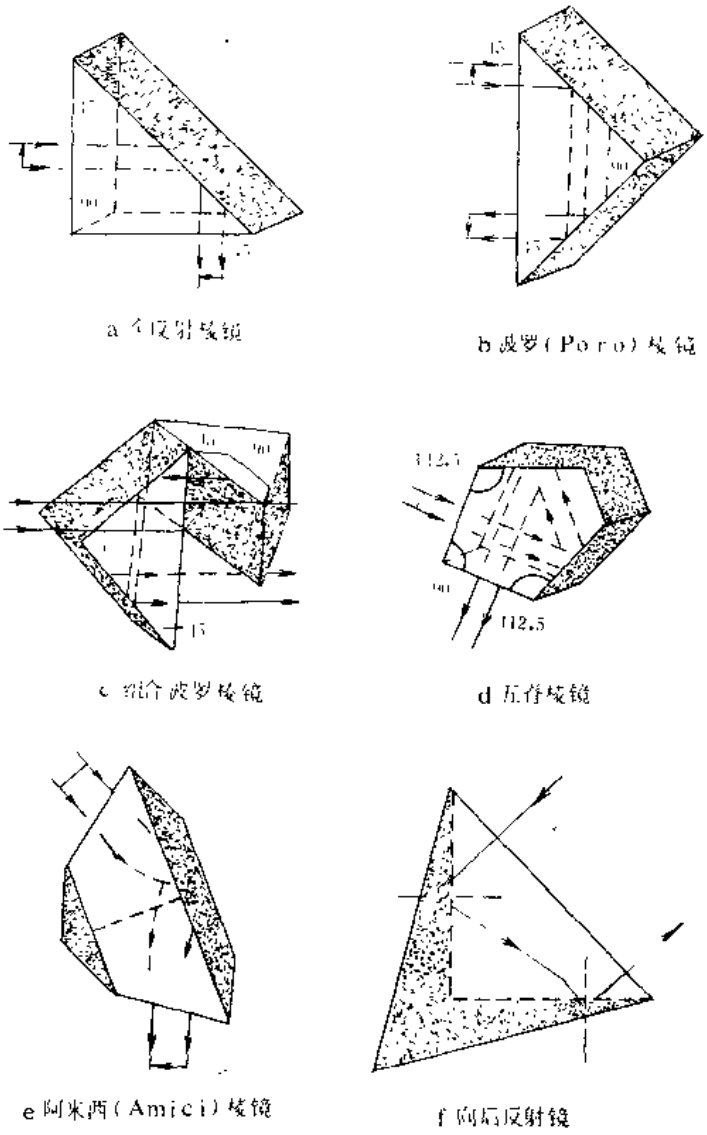


图 2—14　几种转向棱镜

b. 波罗(poro)棱镜，光线垂直入射于棱镜的 *BC* 面，经 *AB* 和 *AC* 面两次全反射又垂直 *BC* 面射出，使像上下移动一个距离，而且发生了倒转。

c. 组合波罗棱镜，常用于陆地望远镜中，使倒像转变为正像。

e. 阿米西棱镜，多用于瞄准镜或照相机的调焦光路中，使光路改变 90°，像的左右与物的左右互换。

f. 向后反射棱镜，亦称四面立角体，形如立方体割下的一个"棱角"，三个互相垂直的平面构成交角 *A*，角 *A* 的中线垂直于第四个折射面。它的独特之处，是对空间一定范围内的入射光线，经过在它三个互相垂直平面上的相继全反射后，出射光线的方向与入射光线的方向正相反。这种棱镜在激光器的共振腔中可代替"高反介质镜"；在激光测距中把它当做被测目标的反射器，不仅能有效地把光反射回来，而尤其是减少了瞄准调整的困难。正因为如此，它已被用为"月球激光反射器"，使从地球上某地送出的激光束由置于月球上的这种反射器反射回原地。

2. 棱镜的分光作用

棱镜最主要的应用在于分光，即利用棱镜对不同波长的光有不同折射率的性质来分析光谱。折射率 n 与光的波长有关，这一现象叫做色散。当一束白光或其它非单色光射入棱镜时，由于折射率不同，不同波长（颜色）的光具有不同的偏向角 δ，从而出射线方向不同（图 2－15）。通常棱镜的折射率 n 是随波长 λ 的减小而增加的（正常色散），所以可见光中紫光偏折最大，红光偏折最小。棱镜的分光作用广泛地用在分光计、摄谱仪器中。

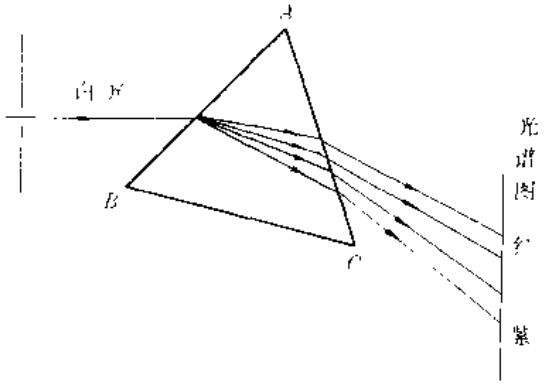


图 2－15　棱镜的分光作用

（四）光学纤维

近年来发展很快的光学纤维，是利用全反射原理使光线沿着弯曲路程传播的光学元件。一般使用的光学纤维是由直径约几 μm 的多根或单根玻璃（或透明塑料）制成的，每根纤维分内、外两层，内层材料的折射率大于外层材料的折射率。当光由内层射到内外两层纤维的界面时，入射角大于临界角的光线，由于

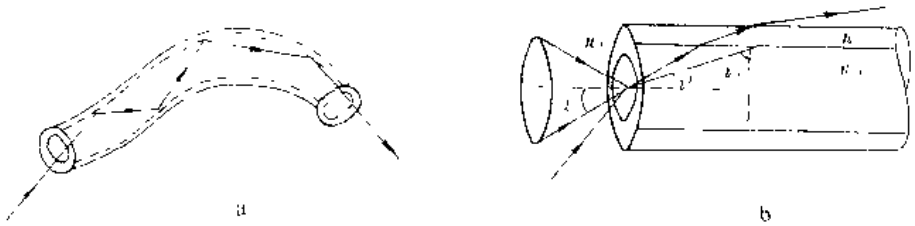


图 2－16　光学纤维工作示意图

接连不断地发生全反射，可以将光沿着纤维从一端传到另一端。如图 2－16a 所示。

图 2－16b 中的单箭头线是一条临界光线，它在两层界面上的入射角等于临界角 i_0。显然由折射率为 n_0 的介质（如空气）经端面进入纤维，并且入射角大于 i 的那些光线，在 n_1、n_2 界上的入射角就小于 i_0，这些光线不能通过纤维。如果用大量光学纤维构成的光学纤维束的两端各条纤维的排列顺序严格地对应，则可以利用它来传像。在这样的纤维束的一个端面上有一图形，图形上每一点的光线沿着一根特定的纤维传到另一端面上对应的点，在这一端就会显现出与原来一样的图形。若再能用其它光学仪器放大，就更便于观察了。

（五）透镜

透镜是由两个折射曲面组成的光学元件，两曲面间是构成透镜的介质（通常是玻璃）。折射曲面可以是球面（包括平面，是曲率半径为无限大的球面）和非球面。中央厚边缘薄的透镜叫凸透镜，边缘厚中央薄的透镜叫凹透镜。图 2－17 所示为各种类型的透镜。

通过透镜两个球面的球心 C_1、C_2 的直线称为透镜的光轴，如图 2－18a。如果透镜有一个面是平面，则通过另一侧面的球心并垂直这平面的直线就是透镜的光轴。如图 2－18b。

常用的透镜，中央部分的厚度比球面的曲率半径小很多，称为薄透镜。凡是通过薄透镜的中心 O 点的光线都不改变方向，这一点叫薄透镜的光心。如图 2－19。

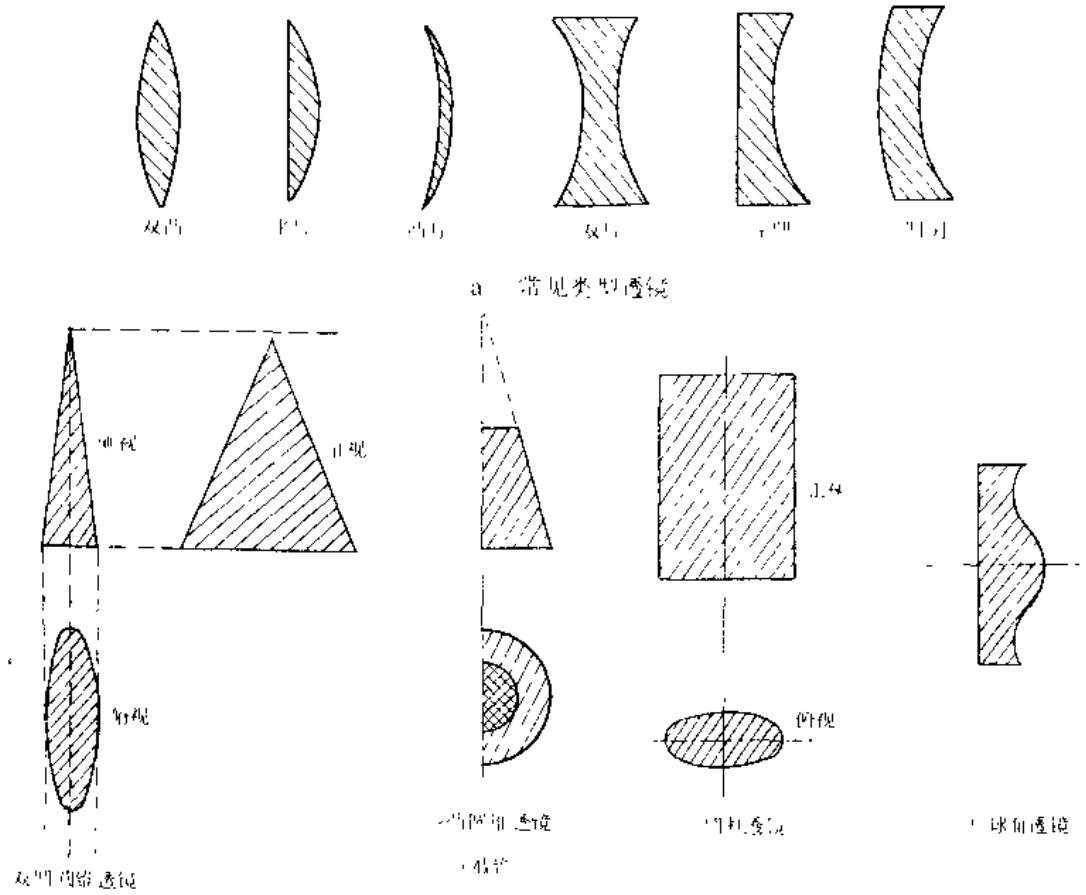


图 2—17　几种类型的透镜

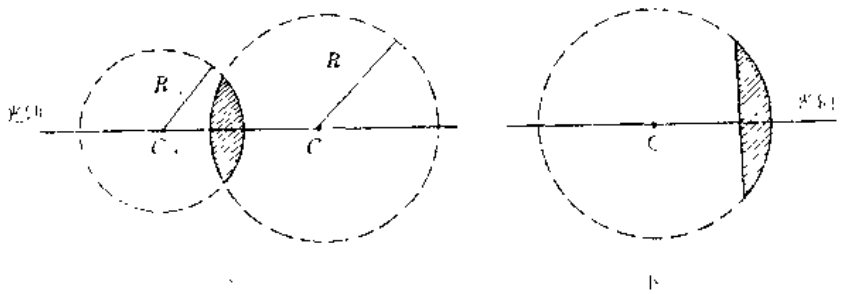


图 2—18　透镜的光轴

下面根据光的折射定律，用作图法来研究透镜对光线的作用和成像原理。

1. 凸透镜有会聚光线的作用

设有平行于光轴且接近光轴的光线照射到凸透镜上，按折射定律可确定折射光线的方向。

如图 2—20 所示凸透镜，光线 DE 从空气射到透镜的平面上，因是垂直入射，故不发生折

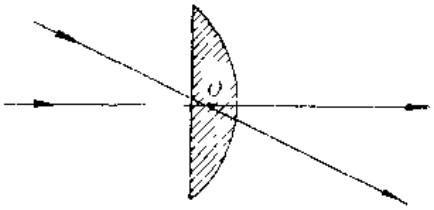


图 2—19　光线通过薄透镜的光心不改变方向

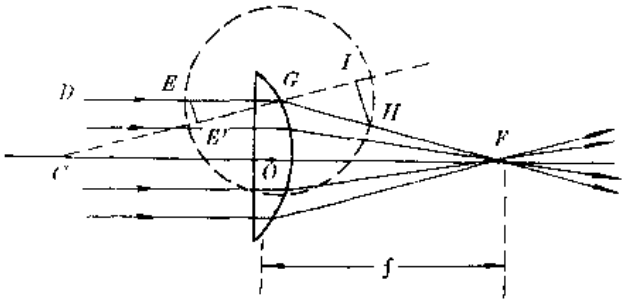


图 2—20　凸透镜的会聚光线作用

射，一直射到球面上 G 点，从玻璃射入空气发生折射。折射光线的方向由折射定律确定。(连接 G 点和球心 C 点的直线作为球面上 G 点的法线，以 G 点为圆心任意长度为半径作一圆周，圆周与入射光线交于 E，从 E 作一与法线垂直的线段 EE'。为了确定折射光线，作一与法线垂直的线段 $HI=nEE'=1.5EE'$。线段 HI 交圆周上 H 点，联接 GH 便得折射光线)。折射光线向光轴 CO 偏折，交于光轴上 F 点。

如图所示，所有折射光线成会聚光束都交于 F 点，这一点叫凸透镜的焦点。如用太阳光

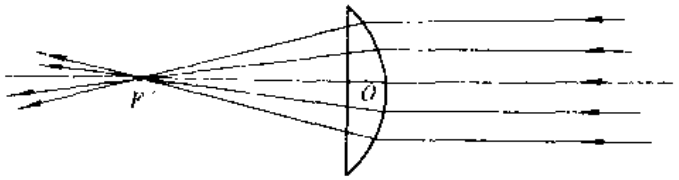


图 2—21　平行光束从右边入射，折射光线交于左边 F' 点

照射，在焦点上光极亮，可以把纸烧焦，焦点 F 到光心 O 的距离叫焦距，用 f 表示。

如果平行光线从右边射到凸透镜上，折射光线也成会聚光束交于左边 F' 点，这一点也叫焦点，焦点 F' 到光心 O 的距离也叫焦距 f(见图 2—21)。

可见凸透镜有两个焦点，分别位于透镜两侧，与光心距离相等，即有一定的焦距 f。焦距是透镜的主要特征，透镜凸得越厉害，会聚光的本领越强，焦距越短。

凸透镜的聚光作用直接用在光学仪器的聚光系统中。如果把一个光源放在凸透镜的焦点上，按光线的可逆性知道，光线经过凸透镜的折射后变成平行光，沿着光轴方向传播，在实际中常利用凸透镜的这一性质做成平行光源。

2. 凹透镜有发散光线的作用

设有平行于光轴且接近光轴的光线照射到凹透镜上，按折射定律可确定折射光线的方向。如图 2—22 所示平凹玻璃透镜。光线 DE 从空气射到透镜平面上，一直射到球面上 G 点，从玻璃射入空气发生折射。折射光线的方向由折射定律确定。(连接 G 点和球心 C 点的直线，作为球面上 G 点的法线。以 G 点为圆心任意长度为半径作一圆周，圆周与入射光线交于 E，从 E 作一与法线垂直的线段 EE'，为了确定折射光线，作一与法线垂直的线段 $HI=nEE'=1.5EE'$，线段 HI 交圆周上 H 点，连接 GH 便得折射光线)。折射光线远离光轴 OC 偏折，其延

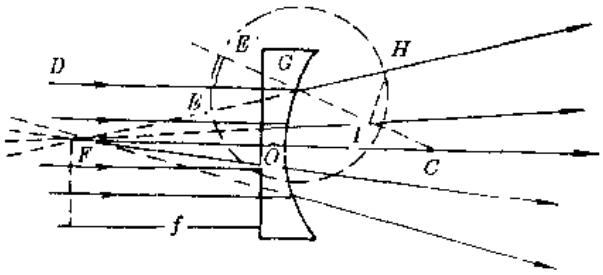


图 2—22　凹透镜的发散光线作用

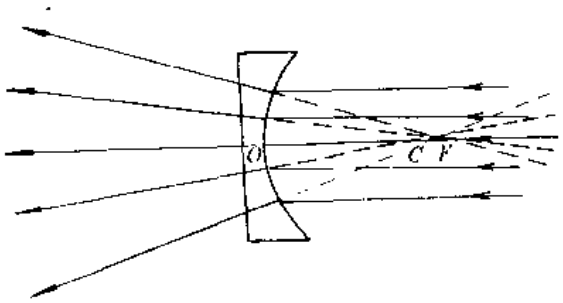


图 2—23　平行光线从右边射来，折射光线的延长线交于右边 F' 点

长线在左边交于光轴上 F 点。

如图所示，所有折射光线成发散光束，其延长线都交于 F 点，这些散开光线就好象是从这个交点发出来的，这一点叫凹透镜的虚焦点。如用太阳光照射，这个发散光束照到我们眼里，我们将看到太阳好象就在焦点处。

如果平行光束从右边射到凹透镜上，折射光线也形成发散光束，其延长线都交于 F' 点，如图 2—23 所示，这一点也叫虚焦点，虚焦点 F' 到光心的距离也叫焦距 f。

可见凹透镜也有两个焦点，分别位于透镜两侧，与光心的距离相等，即有一定焦距 f。透镜凹得越厉害，发散光的本领越强，焦距也越短。

3. 透镜成像

将一物体用灯光照亮，放在凸透镜焦点以外的地方，在透镜的另一侧放一白纸屏，移动

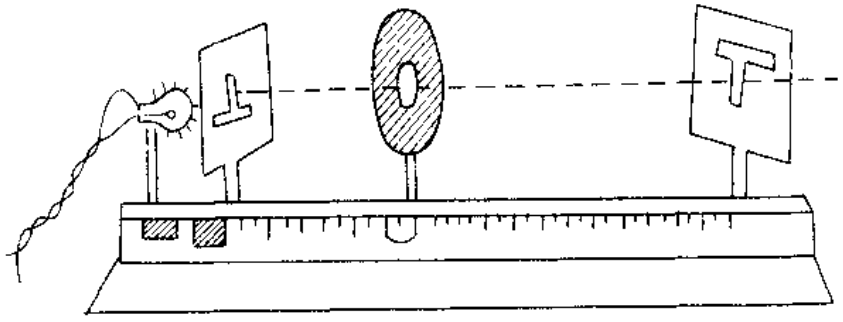


图 2—24　透镜成像

纸屏，在适当的位置上，就能在纸屏上显现出物体的实像。如图 2—24 所示。

透镜是怎样成像的呢？物体在光的照射下，每一部分都要向各方向发出光线，其中通过透镜的一束光线经过透镜折射后又会聚起来，物体上每点发出的光都会聚到相应的一点。物体上的亮点发出的光线强，会聚后的像也亮；暗点发出的光线弱，会聚后的像点也暗。这样我们就能在屏上看到整个物体的像。透镜成像的实质就是把物体上各点发出的不同方向的光线，经过透镜折射后，重新会聚到相应的各点。

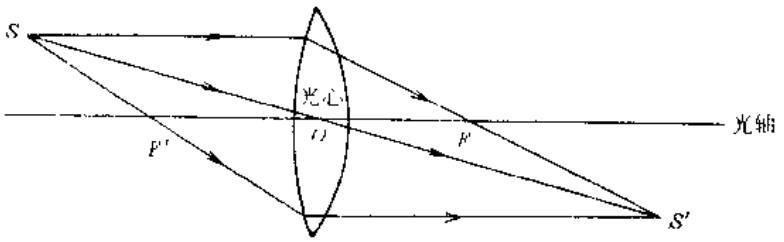
透镜成像在什么位置？它和物、透镜有什么关系？这可根据透镜折射的特点，用作图法

进行分析。

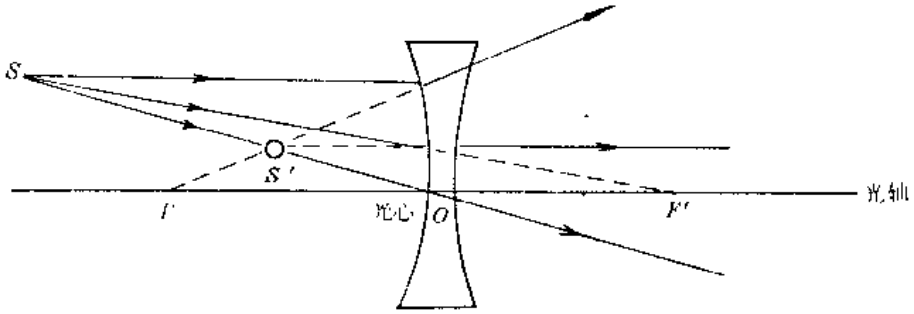
有三条特殊的光线经过透镜折射后的进行方向是完全确定的。如图 2—25 所示：

①通过光心的光线，经过透镜后方向不变；

②平行于光轴的光线，经过透镜折射后通过焦点 F；



a　凸透镜



b　凹透镜

图 2—25　通过透镜三条特殊的光线

③通过焦点 F' 的光线，经过透镜折射后，与光轴平行。

用作图法求像时，从这三条光线中任选两条，这两条光线经过透镜后的交点就是物体上发出该两条光线所对应的像点的位置。然后用同样的方法求出物体上某几个点的像点，这样就能求出整个物体的像。

物体与透镜光心的距离叫物距，像与透镜光心的距离叫像距。如果已知透镜的物距和焦距，就能用作图法确定像距。

现在用作图法研究凸透镜成像的规律。

设有凸透镜，焦距为 f。

(1) 物距大于两倍焦距

如图 2—26 所示，物体 AB 放在凸透镜两倍焦距以外，要求 AB 的像。

先从 A 点作平行于光轴的入射光线和通过透镜光心的入射光线，经过折射后交于 A' 点，A' 点就是 A 点的像，再从 B 点引出平行于光轴的入射光线和通过透镜光心的入射光线，经透镜折射后交于 B' 点，B' 点就是 B 点的像。物体上其它各点的像都位于 A' 点和 B' 点之间，因此 $A'B'$ 就是 AB 的像。从图中可以看出，物体在凸透镜两倍焦距以外，像就在焦距和两倍焦距之间，是缩小的、倒立的实像。

照相机就是这种情况，照相因为物很远，物距大于两倍焦距，因此像在镜头焦点附近的底片上是缩小的倒像。

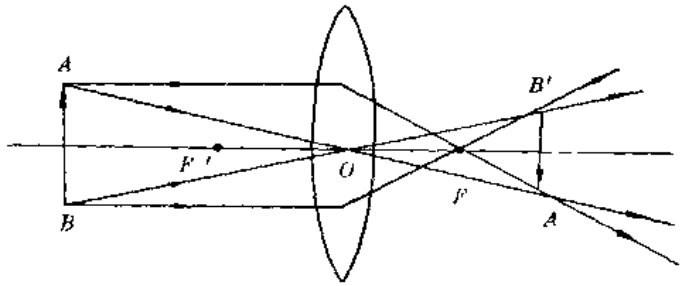


图 2—26　物体在两倍焦距以外所成的像

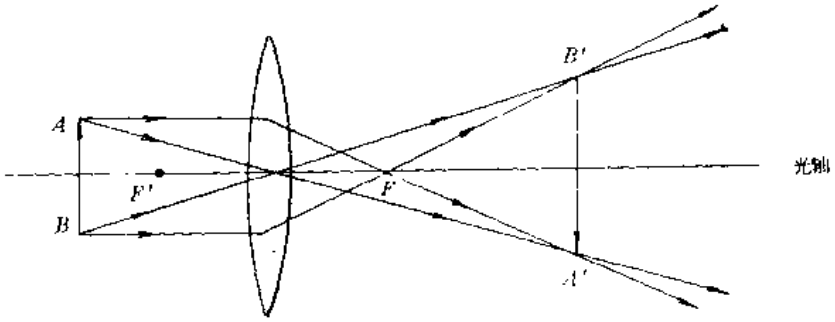


图 2—27　物体在两倍焦距以内，焦距以外所成的像

(2)物距小于两倍焦距而大于焦距

如图 2—27 所示，物体 *AB* 放在凸透镜两倍焦距以内，焦距以外处，像在两倍焦距以外，是放大的倒立的实像。

放大机、幻灯机、投影仪的成像都属于这种情况。把底片放在镜头两倍焦距以内，焦距以外，便可在屏幕上得到放大的实像。

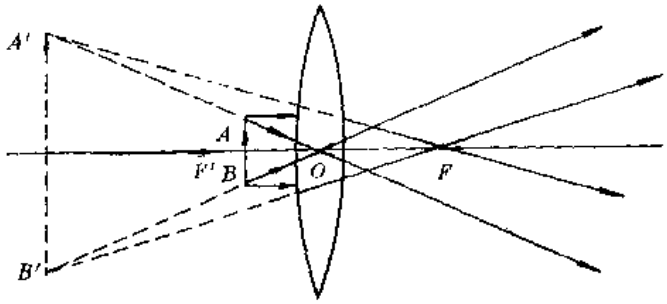


图 2—28　物体在焦距以内所成的像

(3) 物距小于焦距

如图 2—28 所示，物体 *AB* 放在凸透镜焦距以内处，光线通过透镜折射后是发散的，不能会聚于一点，所以用屏幕找不到物体的像。但如果用眼睛在透镜后面看时，即在物的同侧，可

以看到放大了的正立的像，由于这种像不是实际上光线交点而是光线延长线的交点，所以是虚像。

用放大镜观察物体时就是这种情况，一般用放大镜观察物体时，总是把虚像位置调至眼睛观察最清楚而不费力的明视距离(即 25cm)附近。

4. 异型透镜

异型透镜可以产生两个以上的光学作用。如圆柱凸透镜沿柱状延伸方向无曲率，相当于平面镜，而沿横截的方向上作用如凸透镜。圆锥透镜在纵向上焦距是远近渐变，导致直立平面的影像倾斜。利用圆锥透镜，可使倾斜的照片得以恢复。根据用途不同，可以设计成各种异型透镜。

例如，宽银幕放映物镜的成像关系与普通物镜的成像关系不同。被它成像的画面是一张"变形"的图片，图片上的景物与实物的比例因方位而异，在子午方向上有一个固定的比例，在弧矢方向上有另一个固定的比例。通用的宽银幕放映物镜是由普通放映物镜和变形镜组组合起来的，其中变形镜组在子午和弧矢方向上具有不同的放大率，这两种放大率恰恰与电影图片上的子午和弧矢放大率匹配，放映后使银幕上重现原景的正常图样。

柱面透镜系统可在子午和弧矢方向上以不同放大率成像。这里对柱面系统的成像原理和光学特性作以简单介绍。

图 2－29 是一个柱面透镜，其中一个面是平面，另一个面是柱面。柱面在弧矢截面里的母线是一段圆弧，而在子午截面里的母线是一条直线。它在两个截面里有两个焦距，设弧矢焦距为 f_s'，子午焦距为 $f_t'=\infty$。当柱面透镜对同一个物面成像时，子午和弧矢光束将在两个不同的像面上成像，这两个像面的位置由高斯公式决定：

$$\frac{1}{f_s'}=\frac{1}{l_s'}-\frac{1}{l}$$

$$\frac{1}{f_t'}=\frac{1}{l_t'}-\frac{1}{l}$$

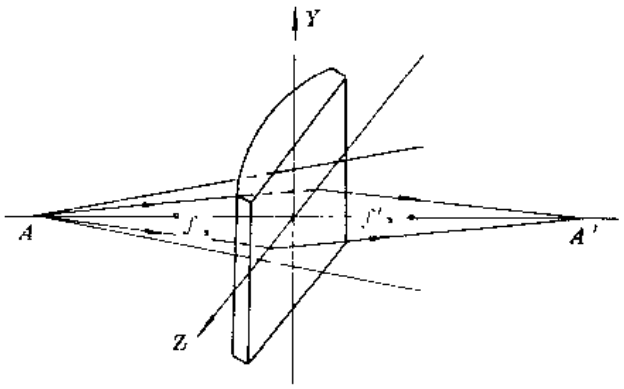


图 2－29　柱面透镜

式中 l 为物距，l_s' 和 l_t' 为像距。如不考虑透镜的厚度，则有 $l_t'=l$。且因 $f_s'\neq f_t'$，则 $l_s'\neq l_t'$。

如果用两个柱面透镜做成一个伽利略式的望远系统，则因为无限远的目标经过望远镜成像时，像面也在无限远，而使弧矢像面和子午像面重合起来。这样就做成了既有共同像面，又有变形比的光学系统。图 2－30 就是这样一种系统的结构原理图。图中前组为负光焦度的柱面透镜，后组为正光焦度的柱面透镜。把这个立体图按两个截面剖开，制做成弧矢和子午截面的视图，可以清楚地看到各自的成像关系(图 2－30b)。在弧矢面内，电影片经过普通放映物镜所成的像，可被伽利略望远镜构成的变形镜组放大后投射到银幕上。在子午面内变形镜组的放大率为 1，所以它对电影片没有任何放大作用。

三、光学仪器

我们用眼睛观察物体，有高度的准确性、极高度的灵敏度、精密的分辨能力以及高度的

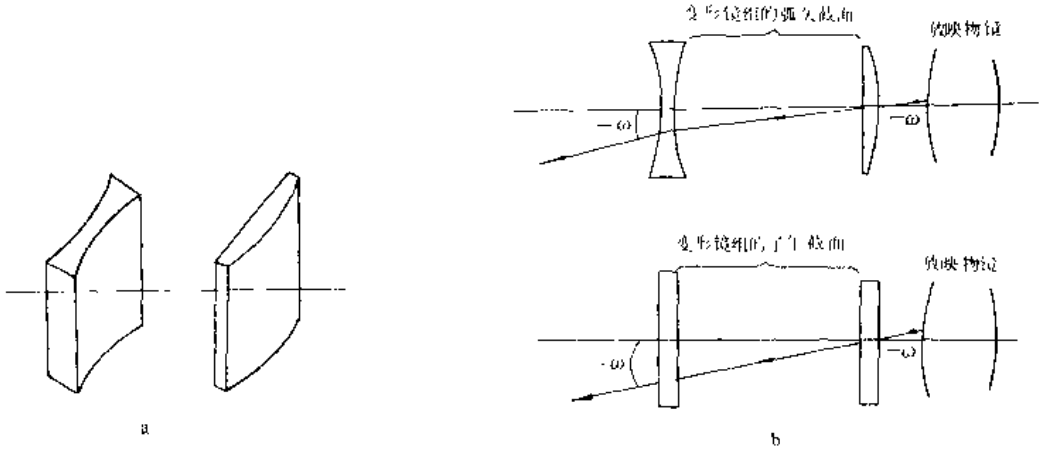


图 2－30　柱面透镜伽利略式望远系统结构示意图

适应性和简捷的结构等。但就客观的需求来说还不能完全满足人类活动的需要。例如对太远或太小的物体都看不清或看不见；不能对所观察的物体的大小、远近和形状作出数量上的精确比较和计量；对于发生在瞬间的现象或事物不能留下长久的记录；对红外光和紫外光都不产生光的感觉。

为弥补视觉的局限性，科学工作者按一定的目的把光学元件组合成光学仪器。下面用近轴光学原理扼要介绍放大镜、显微镜和望远镜。

（一）放大镜

最简单的放大镜是一个焦距 f 相当短（通常在 1－10cm 之间）的会聚透镜。其作用是放大物体在人眼网膜上所成的像。

放大镜的成像作用：如果我们用肉眼观察物体时，为了能长时间观察而不疲倦，要把它放在明视距离上。但是，如果视角 α 很小，我们就很难看清楚。为了增大视角，可以把物体移近到 A_1B_1 的位置，在这里视角 α_1 虽然增大了，可是效果并不好，原因是眼睛高度调节很快就感到疲倦。

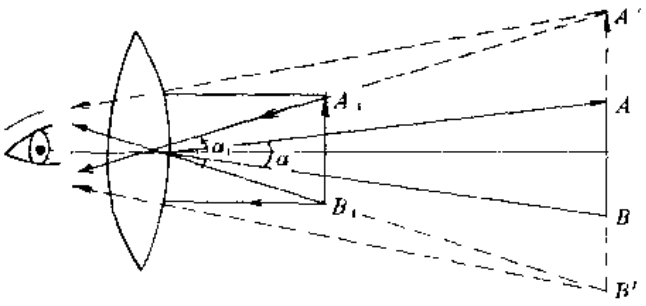


图 2－31　放大镜成像作用

我们知道，当物体放在凸透镜的焦点以内，所成的像是放大、竖立的虚像。根据这个道理，在眼睛与物体 A_1B_1 之间放一个放大镜，使物体 A_1B_1 位于放大镜的焦点以内，同时调节放大镜的位置，使物体由放大镜所成的放大、竖立虚像 $A'B'$ 位于明视距离 d 处。这样就用增大了的视角 α_1 在明视距离处既清楚又省力地进行观察了。如图 2－31 所示。

放大镜的放大率：我们可近似地认为物体是放在放大镜的焦点上，像成在明视距离 d 处，如果放大镜的焦距为 f，则放大镜的放大率为：

$$M = \frac{A'B'}{AB} = \frac{d}{f}$$

可见放大镜的焦距 f 越短，放大倍数就越大。一般放大镜的放大率约为 2.5—25 倍。

（二）显微镜

为了研究更微小的物体或物体的细微组织结构，通常应用显微镜。

显微镜由两组透镜组成，对着物体 AB 的一组叫物镜 O_1，对着眼睛的一组叫目镜 O_2。物镜的焦距 $f_{物}$ 很短，目镜的焦距 $f_{目}$ 较长。

显微镜的成像作用：显微镜成像的光路如图 2—32 所示。从透镜成像规律知道，当物体距透镜小于两倍焦距大于焦距，得到放大的实像。物体 AB 是在物体焦点之外附近，用作图法可得到放大了的实像 $A'B'$ 的位置和大小。如果使 AB 的像 $A'B'$ 位于 O_2 的焦点以内，同时调节目镜的位置，使 $A'B'$ 由目镜所成的放大、竖立虚像 $A''B''$ 位于明视距离 d 处，就是说目镜相当于一个放大镜。这样，物体 AB 经过物镜和目镜两次放大得到了像 $A''B''$，$A''B''$ 对 AB 来说是

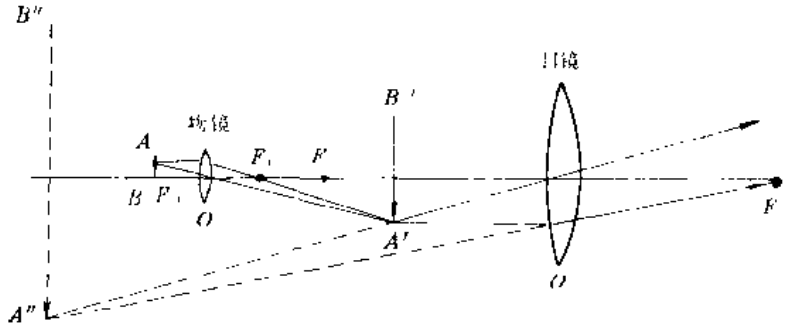


图 2—32　显微镜光路图

倒立的。

显微镜的放大倍数：根据显微镜的工作原理可以知道，显微镜的放大倍数 M 应该是物镜的放大倍数 $M_{物}$ 与目镜放大倍数 $M_{目}$ 的乘积，即：

$$M = M_{物} \times M_{目}$$

由图可以知道，物镜、目镜放大倍数分别为：

$$M_{物} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{A'B' \text{ 到物镜距离}}{AB \text{ 到物镜的距离}}$$

$$M_{目} = \frac{A''B''}{A'B'} = \frac{A''B'' \text{ 到目镜距离}}{A'B' \text{ 到目镜距离}}$$

以上各量可近似表示如下：

$A'B'$ 到目镜距离≈目镜的焦距 $f_{目}$

$A''B''$ 到目镜的距离≈明视距离 d

AB 到物镜距离≈物镜焦距 $f_{物}$

$A'B'$ 到物镜距离≈镜筒长度 L

因此目镜和物镜的放大倍数可以用镜头焦距、镜筒长度和明视距离来表示：

$$M_{目} = \frac{d}{f_{目}}$$

$$M_{物} = \frac{L}{f_{物}}$$

所以

$$M = \frac{Ld}{f_{物} f_{目}}$$

即显微镜的放大倍数和目镜、物镜的焦距成反比。一般出厂的显微镜镜头上都标有放大倍数（如 10×，15×，20×等），放大倍数越大则镜头焦距越短。可以根据放大倍数近似估出焦距，便于调节。

（三）望远镜

为了观察远处物体，通常应用望远镜。望远镜也是由两组透镜（物镜 O_1 和目镜 O_2）组成，

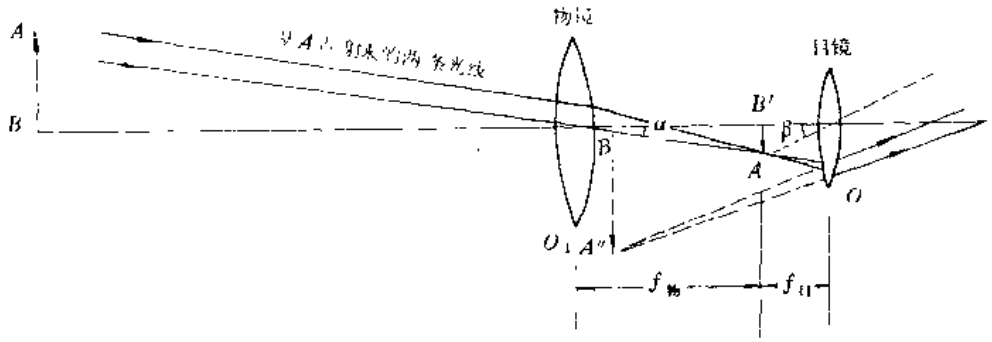


图 2—33　望远镜光路图

物镜的焦距 $f_{物}$ 较长，目镜的焦距 $f_{目}$ 较短。

望远镜的成像作用：物镜 O_1 的作用是将远处的物体 AB 成一个缩小的倒立的实像 $A'B'$。由于物体很远（至少有几十米、几百米或更远的地方），从物体 A 点发出的光线看成平行光，故实像 $A'B'$ 在物镜 O_1 的后焦点附近。目镜 O_2 的焦点和物镜 O_1 的后焦点是重合在一起的，因而对目镜 O_2 来说由物镜得到的实像 $A'B'$ 作为物位于它的前焦点附近。光线经过 O_2 折射后是发散的。这些光线的延长线的交点就成为物体 AB 的倒立虚像 $A''B''$（见图 2—33）。

望远镜放大倍数：由图可知，经过望远镜放大的虚像的视角 β 显然比原来远处物体的视角 α 要大得多。望远镜视角放大的倍数为：

$$M = \frac{\beta}{\alpha}$$

叫做望远镜的放大倍数。

由上可知：

$$\beta = \frac{A'B'}{f_{物}}$$

$$\alpha = \frac{A'B'}{f_{物}}$$

所以望远镜的放大倍数：

$$M = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{A'B'/f_{目}}{A'B'/f_{物}} = \frac{f_{物}}{f_{目}}$$

上式说明望远镜的放大倍数是物镜与目镜焦距之比。因此，要提高望远镜的放大倍数，就要增大物镜的焦距和缩小目镜焦距。物镜焦距越长，镜头直径也越大，这给加工制造带来很多困难，故提高放大倍数就受到一定限制。一般实验用望远镜放大倍数为10－20倍，军用望远镜为十几倍至几十倍，天文望远镜达几百倍，很多种航天遥感成像设备中是用望远镜作为物镜的。

四、像差

在实际中近轴光线的要求不是总能满足的，光源发出的光一般也不是单一波长的，所以经透镜后光束的同心性不能保持，这样同心光束经光学系统后实际将扩展成各种不同形状的光束，因而像和物不能保持理想的共轭而会发生各种差异。这种偏离理想成像的现象，称为像差。为了提高成像质量，应当尽量减少像差。主要的像差有以下几种：

1. 球面像差(简称球差)

因为通过透镜边缘部分的光线比通过主轴附近的光束折射得更厉害，故由光轴上一物点发出的光束经透镜(或光学系统)后不再交于一点(图2－34)，从而使轴上像点被一弥散

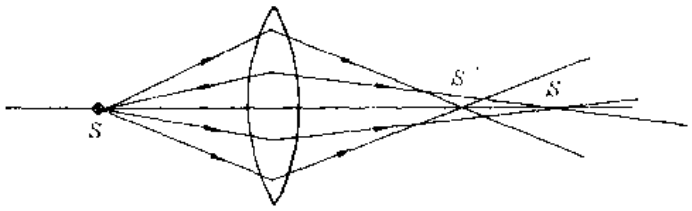


图2－34 球 差

光斑所代替，这种成像的缺陷称为球差。球差的大小与光线的孔径有关。

利用正负透镜的组合，可以消除球差。例如把不同材料制成的且曲率半径不同的凸、凹两个透镜粘合起来，凹透镜可以将凸透镜边缘光线的强折射校正一些，使凸透镜的球差被凹

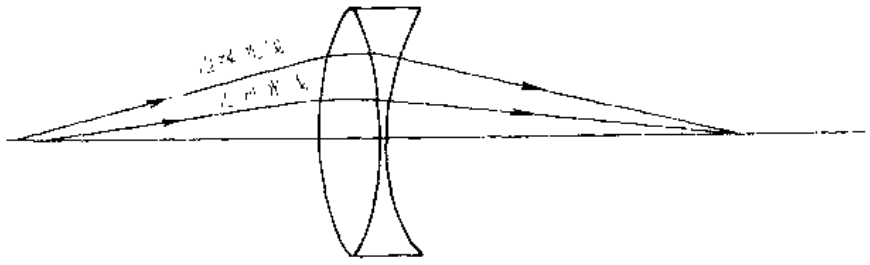


图2－35 经过复合透镜边缘光线和近轴光线会聚一点

透镜的球差抵消一部分，这样的复合透镜可以消除球差。如图2－35。

2. 彗形像差(简称彗差)

傍轴物点发出的宽阔光束经过光学系统后在像平面上不再交于一点，而是形成如彗星形的亮斑(对光束的光轴不对称)，这种像差称作彗差。因为是小物、宽光束成像，它对显微镜成像的影响很大。可利用粘合透镜来消除彗差。

3. 像散和像场弯曲

这两种像差都是由于物点离光轴较远，光束倾斜度较大引起的。像散现象如图 2－36 所示，出射光束的截面一般呈椭圆形，但在两处退化为直线，这两条相互垂直的直线分别称为子午焦线和弧矢焦线。约在两焦线距离中点处，像成为一个圆斑，称为明晰圈。可以认为这是光线聚焦最清晰的地方，是放置照相底片或屏幕的最佳位置。对于摄影和望远系统，因为

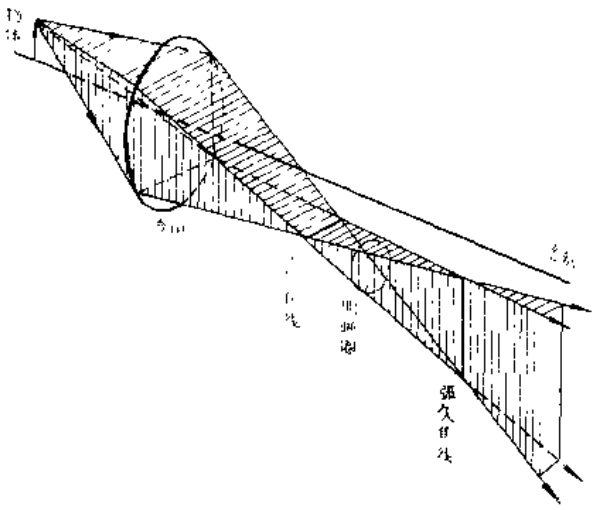


图 2－36　像　散

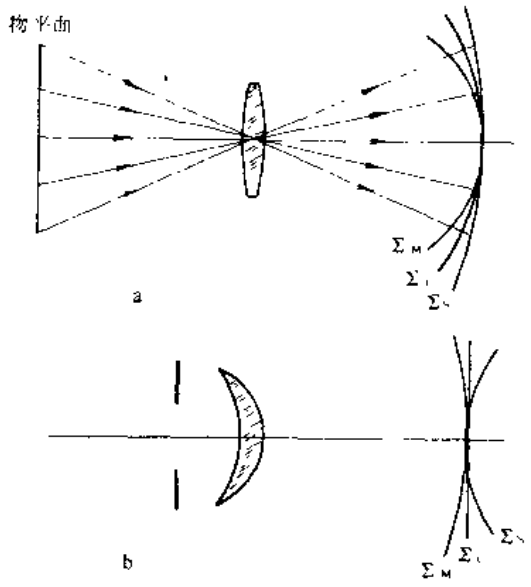


图 2－37　像场弯曲及其矫正

是在大范围内造像，这类像差的影响较大。

对于物平面上所有的点，由于到光轴的距离不同，成像后明晰圈的轨迹不是一个平面而是一个曲面，即明晰圈到透镜的距离不等远（有不同的像距），这种像差称为像场弯曲，如图 2－37 所示。如果照相机中存在着像场弯曲，感光底片就需要做成同样形状的曲面，这是很不方便的。对于单个透镜，像场弯曲可通过在透镜前适当位置上放一光阑来矫正（图 2－37b）。像散现象则需通过复杂的透镜组来消除。

4. 畸变

由于透镜对同一物距的物体不同部分的垂轴放大率不同，造成物体各部分不成比例地被放大，破坏了像和物之间的几何相似性，这种像差叫畸变。畸变使物体变形，所以对于测量仪器的影响特别大。

图 2－38 表示视场中的两种畸变：边缘部分的放大率比中心部分大的称为枕形畸变，边缘部分的放大率比中心部分小的称为桶形畸变。究竟产生哪种畸变，与孔径光阑的位置有关。例如对凸透镜来说，将光阑放在前面（图 2－39a），就会产生桶形畸变；光阑放在后面（图 2－39b），则产生枕形畸变。有的照相机里采用如图 2－39c 所示的对称镜头，将光阑放在一对相同的透镜中间，可以使两种相反的畸变相互抵消。

5. 色差

如图 2－40 所示，由于折射率随颜色（波长）不同，不同颜色的光通过透镜所成的像，无

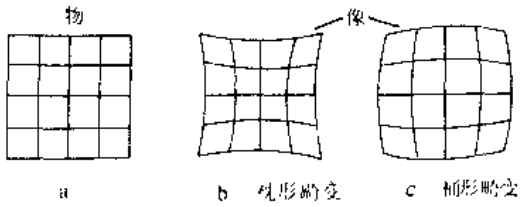


图 2—38 畸　变

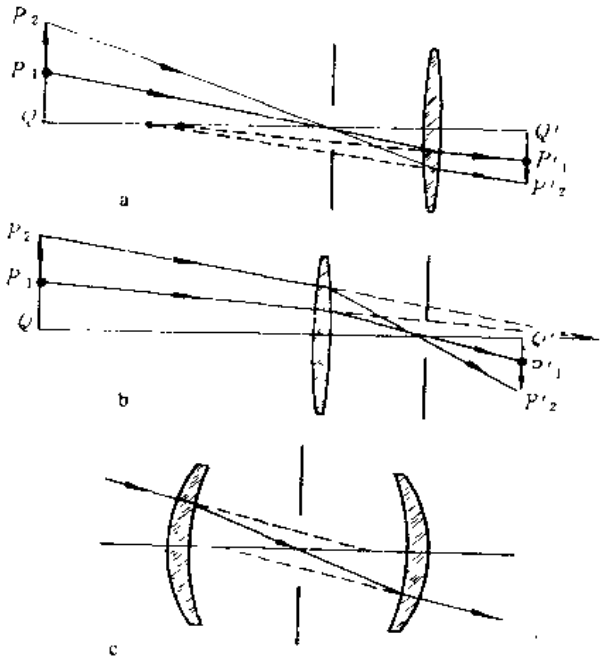


图 2—39 用光阑消除畸变

论位置和大小都可能不同。当入射光是复色光时，所成的像将出现彩色边缘，使像模糊不清。

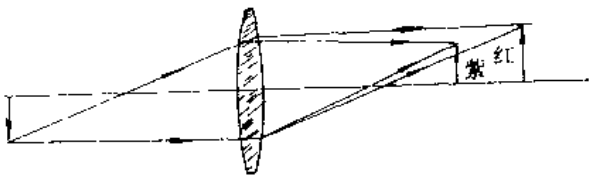


图 2—40 色　差

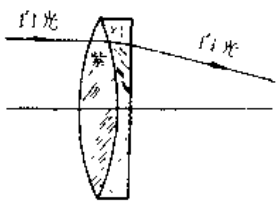


图 2—41 消色差粘合透镜

这种像差称为色差。

单个透镜的色差是无法消除的，但将一对用不同材料制成的凸、凹透镜粘合起来(见图 2—41)可以对选定的两种波长消除色差。由同种材料制成的两块薄透镜相隔距离等于它们焦距之和的一半时，也可以消除色差。

完全消除所有的像差是不可能的，也是不必要的。实际中总是根据各种光学仪器特定的用途，重点地考虑某几种类型的像差。例如显微物镜的对象是傍轴小物，但要求孔径大，主要矛盾在于球差和彗差。某些照相机的视场较大，特别是航测或翻拍镜头对物像间的相似性要

求较严格，重点在于消除像场弯曲和畸变。目镜的重点是消除视角色差(即要求不同颜色的像对眼睛所张的视角相同)。此外，由于接收器件(眼睛、照相底片等)的分辨本领有一定限度，所以只需将像差减小到接收器件不能分辨的程度就足够了。

第三节　与成像有关的波动光学基础

前面我们根据几何光学的基本原理研究了光的一些现象、性质和应用，在那里所用的光线，以及光的传播规律等不过是关于光的表现的抽象，并未涉及光的内在属性。

为了进一步洞悉光的属性以及更有效地利用它，我们还必须研究光的波动性和光的粒子性。以光是一种波动为基础的称为波动光学，以光是一种粒子为基础的称为量子光学。

光的波动性寓于光的干涉、衍射以及偏振等现象中。所以首先将通过这些现象的研究阐述光的波动性以及波动性的应用。

一、光的干涉

(一)光的电磁理论

光是电磁波中的一个狭窄波段，可见光的频率范围为 $3.9\times10^{14}\sim7.5\times10^{14}$Hz。

任何波长的光在真空中的传播速度都是 $c=2.9979\times10^{8}\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}\approx3\times10^{8}\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$。在其它介质中，光的传播速度小于 c，且随介质的性质和光波的波长而不同。设介质对某种频率的光的折射率为 n，则这种频率的光在该种介质中的传播速度为：

$$v=\frac{c}{n}$$

光的波长与波速、周期和频率的关系：

$$\lambda=v\cdot T=v/\nu$$

由此得出，同一频率的光波在不同介质中将有不同的波长。

电磁波中的振动矢量是电场强度和磁场强度。在光波中，对人眼或感光仪器起作用的是电场强度 E，故将 E 称为光振动或光矢量。

振幅为 E_0，频率为 ν 的沿 OX 方向传播的平面单色光的波方程可表示为：

$$E=E_0\cos2\pi\nu(t-\frac{x}{v})=E_0\cos2\pi(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda})$$

按波的一般理论，振源的能量通过波向空间传输，光的强度(即光的平均能流密度)为：

$$I=\frac{n}{2c\mu_0}E_0^2\propto E_0^2$$

式中 μ_0 为真空磁导率，E_0 为振幅。在同一种介质里只关心光强的相对分布时，上式中的比例系数不重要，人们往往把光的(相对)强度就写成是振幅的平方：

$$I=E_0^2$$

但在比较两种介质里的光强时，则应注意到，比例系数中还有一个与介质有关的量—折射率 n。

(二)光波的叠加

两个(或多个)光波在空间某一区域相遇时，发生光波的叠加问题。一般说来，频率、振幅和位相都不相同的光波的叠加，情形是很复杂的。这里只限于讨论频率相同的单色光波的叠

加。尽管实际光源发出的光波不能认为是余弦或正弦函数的单色波，但是任何复杂的波动都可以由傅立叶定理分解为一组由余弦或正弦函数表示的单色波之和，因此讨论单色波的叠加有着实际意义。

波的叠加服从叠加原理：几个波在相遇点产生的合振动是各个波单独产生的振动的矢量和。但是当光波的强度很大时(例如电场强度高达 $10^{12}V \cdot m^{-1}$ 的激光)，上述叠加原理不再适用。

(三)波的干涉和相干条件

设两个频率相同，振动方向相同(同在 Y 方向)的单色光波分别发自光源 S_1 和 S_2，P 点是两光波相遇区域内的任一点，P 到 S_1 和 S_2 的距离分别为 r_1 和 r_2(如图 2—42 所示)。两光波各自在 P 点产生的光振动可以写为：

$$E_1 = E_{10}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda}\right)$$

$$E_2 = E_{20}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda}\right)$$

根据叠加原理，在 P 点的合振动为：

$$E = E_1 + E_2 = E_{10}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda}\right) + E_{20}\cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda}\right)$$

令 $\varphi_1 = -2\pi r_1/\lambda$，$\varphi_2 = -2\pi r_2/\lambda$ 和 $\omega = 2\pi/T$(称圆频率)，上式可改写成：

$$E = E_0\cos(\omega t + \varphi)$$

式中：

$$E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos\Delta\varphi$$

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{E_{10}\sin\varphi_1 + E_{20}\sin\varphi_2}{E_{10}\cos\varphi_1 + E_{20}\cos\varphi_2}$$

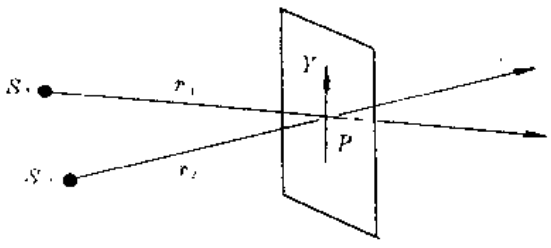


图 2—42　两光波在 P 点叠加

其中 $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi(r_2 - r_1)/\lambda$ 是两光波在 P 点的位相差。

P 点的光强度：

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi$$

式中 $I_1 = E_{10}^2$ 和 $I_2 = E_{20}^2$ 分别是两列波单独在 P 点的光强度。该式表明，P 点的光强度取决于两光波在 P 点的位相差。由于 $\Delta\varphi$ 与位置有关，故在两光波迭加区域，光的强度不是均匀分布的。在 $\cos\Delta\varphi > 0$ 处，$I > I_1 + I_2$；在 $\cos\Delta\varphi < 0$ 处，$I < I_1 + I_2$；在 $\cos\Delta\varphi = 1$ 处，I 取最大值；在 $\cos\Delta\varphi = -1$ 处，I 取最小值；其它各点介于最大值和最小值之间。这就是说，光波的叠加引起了光强度的重新分布。只要两光波的位相差保持不变，在叠加区域内各点的强度分布也是不

变的。我们把这种在叠加区域出现的光强度稳定的强弱分布的现象称为光的干涉。例如，在曝过光的照相黑色底片上，用锐利的刀片划出两条相距不大于 0.5mm 的平行狭缝，通过它观看直灯丝，可看到一组明暗相间的干涉条纹，这是双缝干涉现象。又如，在太阳光下常可看到浮于平静水面上的汽油膜呈某种颜色，这是薄膜干涉现象。

光的干涉虽不难实现，但并非任意两光波相遇都能产生干涉现象。由上面讨论可知只有满足下列条件才能产生干涉，即相干条件为：

(1)两叠加光波频率相同；

(2)两叠加光波的光矢量振动方向相同；

(3)两叠加光波位相差恒定。

满足相干条件的光称为相干光，产生相干光的光源称为相干光源。

(四)产生相干光的方式

不论在自然界或在实验室都不能获得满足上述条件的两独立的实在光源。这是因为光源发光实际上是组成光源的原子(或分子)发光的总和。一个原子发光的时间很短，约为 10^{-8}秒，光源中各个原子是此起彼伏独立地发光。各原子开始发光的时刻也参差不齐。因而不同原子或同一原子在不同时刻发出的光波之间就没有固定的位相差。这样两个光源或同一光源上两个不同部分发出的光波，都是不同原子或同一原子在不同时刻发出的，其位相差不能维持恒定，而是迅速地无规则地变化，不满足相干条件。

为满足上述相干条件，则总是把由同一光源发出的光分成两个或两个以上的相干光束，使它们各自经过不同的路径后再相遇以产生干涉。产生相干光的方式有两种，即：

(1)分波阵面法

光波在空间传播时，某一时刻光矢量振动位相相同的点组成的面称为波阵面，简称波面。

从点(或线)光源发出的光波波阵面上分离出两部分或更多个部分，由于波面上任一部分均可视为新的光源，且同一波阵面的各部分有相同的位相，所以这些被分离出的部分波阵面可作为初位相相同的光源。不论点(或线)光源的位相改变如何频繁，这些光源的初位相差都恒定不变。杨氏双缝实验就是由分波阵面获得相干光而实现干涉的。

(2)分振幅法

利用透明薄板的第一表面和第二表面对入射光的依次反射，将入射光的振幅分解为若干部分，由这些部分光波相遇所产生的干涉，称为分振幅法的干涉。如薄膜的干涉(图 2—43)。单色点光源发出的光线射到薄膜上，一部分在薄膜的上表面反射，如图中光线(1)；另一部分经 a 点折射进入薄膜在下表面 b 点反射后又透出薄膜，如图中光线(2)。这两光线(1)和(2)来自同一点光源，符合相干条件，相遇时将发生干涉。

(五)光的干涉理论

现在应用光的波动性来解释干涉条纹的形成。

1. 光程与光程差

光的干涉条纹是两束相干光迭加形成的。两光在相遇处的位相差 $\Delta\varphi$ 为 2π 的整数倍时出现干涉极大(亮纹)，当 $\Delta\varphi$ 为 π 的奇数倍时出现干涉极小(暗纹)。两光在相遇处的位相差与光所走的路程有关，即：

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$$

若两相干光束通过不同的介质，则上式应写成：

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{r_2}{\lambda_2} - \frac{r_1}{\lambda_1}\right)$$

为了便于进行比较，可把光在介质中的波长 λ_1、λ_2 换算成真空中的波长。设同一频率的光在真空中的波长为 λ，在折射率为 n 的介质中的波长为 λ'，由

$$\lambda = c/\nu \qquad \lambda' = v/\nu \qquad \frac{c}{v} = n$$

有

$$\lambda' = \lambda/n$$

应用上式可把位相差用真空中的波长表示，即：

$$\Delta\varphi = 2\pi\left(\frac{r_2}{\lambda_2} - \frac{r_1}{\lambda_1}\right) = \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 r_2 - n_1 r_1) = \frac{2\pi}{\lambda}\delta$$

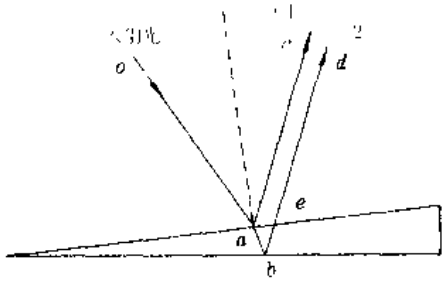


图 2—43　薄膜的干涉

光波在某种介质中通过的几何路程与该介质折射率的乘积 nr 叫作光程。由 $nr = c \cdot r/v = ct$ 可知，光程在数值上等于相同时间内光在真空中通过的路程。所以 $\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$ 就是两光在相遇点的光程差。上式表明，两光波在相遇点的位相差由它们在该点的光程差决定。

当 $\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1 = k\lambda$　$(k = 0, 1, 2\cdots\cdots)$时，$\Delta\varphi = 2k\pi$，干涉相长，出现亮条纹。

当 $\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1 = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}$　$(k = 0, 1, 2\cdots\cdots)$时，$\Delta\varphi = (2k+1)\pi$，干涉相消，出现暗条纹。

可见相邻干涉条纹上的光程差相差一个波长。

2. 双缝干涉条纹

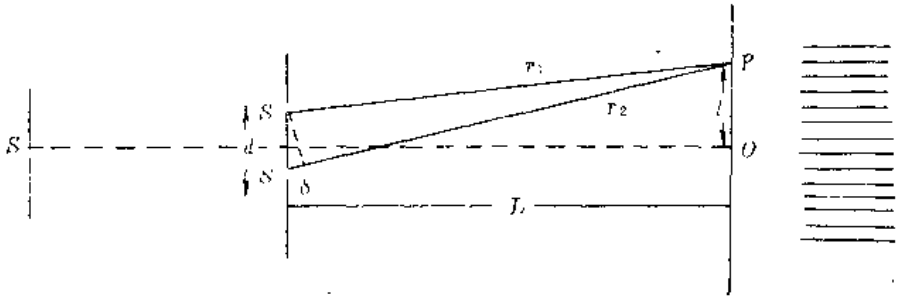


图 2—44　双缝的干涉

现在计算双缝干涉条纹的位置。

如图 2—44 所示，双狭缝 S_1、S_2 构成一对相干光源。由于整个实验系统都在空气中($n \approx 1.0$)，所以从 S_1、S_2 发出的光到达屏幕上任一点 P 的光程差即为自 S_1 和 S_2 到 P 点的距离之差，$\delta = r_2 - r_1$。设双缝间相距为 d，到屏幕的距离为 L，幕上任一点 P 到 O 的距离为 l，O 是由 S 作出的平分双缝的中央线与幕的交点，并且 L 和 l 都比 d 大很多。于是，近似地有

$$\frac{\delta}{d}=\frac{l}{L}$$

由此得出：

$$\delta=\frac{l}{L}d$$

对于给定的装置 l 和 d 是确定的，故 l 的不同就反映光程差的不同。

在 $\delta=\pm k\lambda$，即 $l=\pm k\lambda\frac{L}{l}$ 处出现亮条纹，其中 $k=0,1,2,\cdots$ 为干涉亮条纹的级次。

在 $\delta=\pm(2k+1)\lambda/2$，即 $l=\pm(2k+1)\frac{\lambda}{2}\frac{L}{d}$ 处出现暗条纹，其中 $k=0,1,2,\cdots$ 为干涉暗条纹的级次。因幕上有相同 l 值的点的轨迹是平行于双狭缝的直线，所以双缝干涉图样是明暗相间的直条纹。相邻亮纹或相邻暗纹之间的距离均为 $\Delta l=\lambda L/d$，即条纹间距与干涉级 k 无关，而与相干光的波长 λ 成正比。在红光产生的干涉图样中相邻条纹间距较绿光干涉图样中相邻条纹的间距大些。当以含有各种波长的白光作光源时，除 $k=0$ 的中央亮纹外，其余各级亮纹都是带颜色的。当 k 较大时，不同级数的各色条纹相互重叠，整个干涉图样中可以辨认的条纹数目很少。

3. 薄膜的干涉条纹

现在计算在劈尖薄膜上形成的干涉条纹分布。设劈尖薄膜的折射率为 n，周围为空气，波长为 λ 的平行单色光垂直照射劈尖。由劈尖上表面反射的光和进入薄膜在劈尖下表面反射的光在劈尖的上表面相遇时，下表面反射的光比上表面反射的光在薄膜内多走了 $2h$ 的路程，故两束光具有光程差 $2nh$，如图 2－45 所示。又考虑到光线在上表面反射时，是由光疏介质射向光密介质，反射光有半波损失，产生附加光程差 $\lambda/2$，而光线在下表面反射时，是由光密介质射向光疏介质，没有半波损失。因此两束反射光的光程差为：

$$\delta=2nh+\frac{\lambda}{2}$$

当 $\delta=2nh+\frac{\lambda}{2}=k\lambda$，，即 $h=(k+\frac{1}{2})\frac{\lambda}{2n}$ 处出现亮条纹。其中 $k=1,2,\cdots$ 为干涉亮纹的级次。

当 $\delta=2nh+\frac{\lambda}{2}=(2k+1)\frac{\lambda}{2}$，即 $h=k\frac{\lambda}{2n}$ 处出现暗条纹。其中 $k=0,1,2\cdots$ 为干涉暗纹的级次。

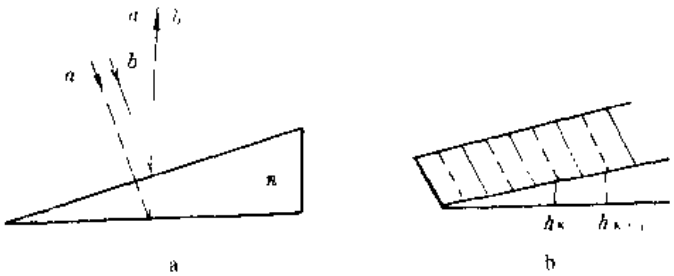


图 2－45　劈尖薄膜的干涉

由此可见，同一级条纹上的各点对应于相同的膜厚，因而劈尖干涉条纹是一组平行于棱边的明暗相间的直条纹。

相邻亮条纹或相邻暗条纹对应的薄膜厚度差为：

$$\Delta h = \lambda/2n$$

即半个介质内的波长。利用上式，可以从观测干涉条纹的数目来计算薄膜厚度的微小变化。

二、干涉现象的应用

(一)镀膜光学元件

1. 单层膜

在一块玻璃片(基片)的光滑表面上涂镀一层折射率和厚度都均匀的透明介质薄膜，当光束入射到薄膜上时，将在薄膜内产生多次反射，并且从薄膜的两表面有一系列相互平行光束射出(图 2—46)。设薄膜的厚度为 h，折射率为 n，薄膜两边的空气和基片的折射率分别为 n_0 和 n_G。可根据不同的需要选择适当的镀膜材料。

(1)单层增透膜

当膜的折射率小于基片的折射率时，镀膜后膜系的反射率总小于未镀膜的基片的反射率，因而镀膜后有增透作用。通常镀制增透膜使用的材料是折射率为 1.38 的氟化镁(MgF_2)，反射率约为 0.013，即仍有 1.3%的反射。

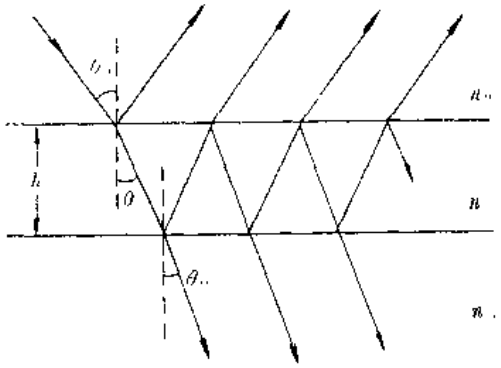


图 2—46　单层介质膜的反射与透射

(2)单层增反膜

如果单层膜的折射率 n 大于基片的折射率 n_G，则膜系的反射率比未镀膜时基片的反射率要大，单层膜起到增强反射的作用，而且所选用的单层膜的折射率越高，膜系的反射率也越高。常用的高反射率镀膜材料为硫化锌(ZnS)，$n=2.38$，其单层膜的最大反射率为 33%。这种膜系可作为光束分离器。但是，若实际应用中要求得到尽可能高的反射率的话，单层增反膜就不能满足要求，必须采用多层高反膜。

(3)半波长膜

当单层膜的光学厚度 nh 为 $\lambda/2$ 时，不论单层膜的折射率是大于或小于基片的折射率，膜系对波长 λ 的反射率都与未镀膜时基片的反射率相同。因此，膜的光学厚度每增加或减少 $\lambda/2$，对波长 λ 的反射率没有影响。

2. 双层膜和多层膜

(1)双层增透膜

为了使反射损失降低到零，常用光学厚度均为 $\lambda/4$，且第一层为低折射率的介质(如氟化镁)，第二层为高折射率介质(如硫化锌)的双层膜来达到对 λ 全增透的目的。它们的反射损失比单层膜时更大一些，这种膜一般只有当使用波段很窄时才采用(见图 2—47)。

也有第三层以至多层的增透膜，它们可以在更宽的波段内获得更好的增透效果。目前已有在整个可见区反射率不超过 0.5%的增透膜。

(2)多层高反射膜

常用的多层高反射膜是一种由光学厚度均为 $\lambda/4$ 的高折射率层(硫化锌)和低折射率层(氟化镁)交替叠成的膜系,称为 $\lambda/4$ 膜系,通常用下列符号表示:

$$GHLHLH\cdots\cdots LHA = G(HL)^PHA$$

$$P = 1,2,3\cdots$$

其中 G 和 A 分别代表玻璃基片和空气,H 和 L 分别代表高折射率层和低折射率层,$2P+1$ 是膜层数。这种结构的膜系可以使入射光在每一膜层上都获得强烈的反射,经过若干层反射之后,入射光几乎全部反射回去。

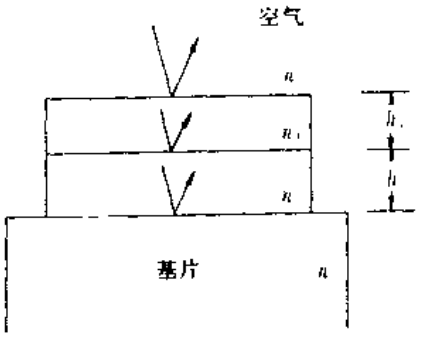


图 2—47 双层膜示意图

(3)冷光膜和彩色分光膜

冷光膜是一种既能高效地反射可见光又能高效地透射红外光的多层 $\lambda/4$ 膜系。它的反射带宽在 300nm 左右。这种膜系通常涂在电影放映机的反光镜上,以减少反光镜的受热和增加银幕的照度。

理论和实践证明,若采用两个高反射膜堆中间加一个过渡层的膜系可以成为很好的冷光膜,例如可以采用这样的结构:$G(HL)^n H_1L_2(HL)^n H_3 nn$,符号中的脚标,1,2,3 表示 λ_1,λ_2,λ_3 三个控制波长,而且 $\lambda_2=(\lambda_1+\lambda_3)/2$。高折射率层用硫化锌,低折射率层用氟化镁,三个控制波长为 $\lambda_1=650nm$,$\lambda_2=560nm$,$\lambda_3=480nm$。

还可以镀制在可见区内有选择反射性能的彩色分光膜,来达到反蓝透红绿,或反红透蓝绿等效果。这种膜广泛地用在彩色电视等光学系统中。

3. 干涉滤光片

干涉滤光片是应用多光束干涉原理制成的一种从白光中过滤出波段范围很窄的单色光的多层膜系。常用的有两种,一种称为全介质干涉滤光片,其结构如图 2—48 所示,在平板玻璃 G 上镀上两种膜系 $(HL)^P$ 和 $(LH)^P$,再加上保护玻璃 G'(实际上也起保护膜系作用)。另一种是金属反射膜的干涉滤光片,其结构如图 2—49 所示。在平板玻璃 G 上镀一层高反射率的银膜 S,银膜之上再镀层介质薄膜 F,然后再镀一层高反射率的银膜,最后加保护玻璃 G'。全介质滤光片的两组膜系事实上可以看成为两组高反射膜 $H(LH)^{P-1}$ 和 $(HL)^{P-1}H$ 中间夹着一个间隔层 LL,因此上述两种滤光片的原理是相同的。

干涉滤光片的光学性能主要由三个参数表征:(1)滤光片的中心波长,即透射率最大的波长,用 λ_0 表示;(2) 透射带的波长半宽度 $\Delta\lambda$;(3)峰值透射率 τ。下面分别予以讨论。

(1)滤光片的中心波长

在正入射的情况下,滤光片的中心波长 λ_0 由下式决定:

$$\lambda_0 = 2nh/k \qquad k = 1,2,3\cdots$$

上式表明 λ_0 决定于间隔层的光学厚度 nh 和干涉级 k。对于一定光学厚度的滤光片,可有对应于不同 k 值的中心波长 λ_0。例如间隔层 $n=1.5$,$h=6\times10^{-5}$cm($nh=9\times10^{-5}$cm)的滤光片,在可见区有 $\lambda_0=600$nm($k=3$)和 $\lambda_0=450nm$($k=4$)两个中心波长。间隔层的厚度增大时,中心波长的数目就更多些。为了把不需要的中心波长滤掉,可以附加普通的有色玻璃滤光片,因此常采用有色玻璃作为干涉滤光片的保护玻璃 G 和 G'。值得提出的是普通有色玻璃滤光

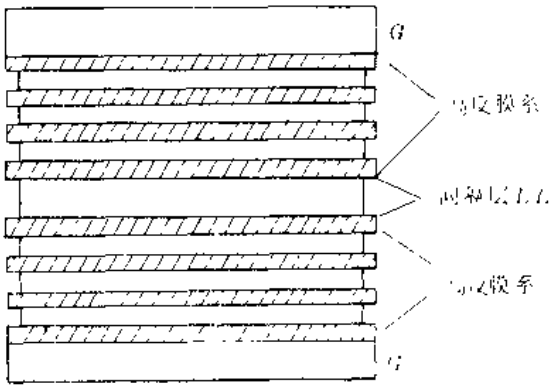


图 2－48　全介质干涉滤光片(斜线薄层代表高折射率介质层,空白薄层代表低折射率介质层)

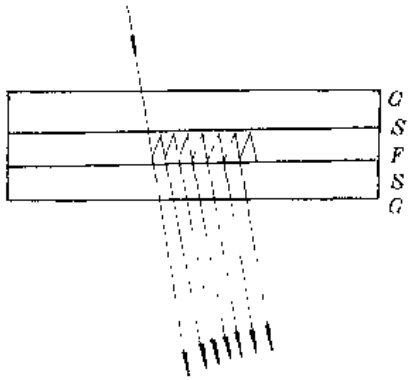


图 2－49　金属反射膜干涉滤光片

片的优点是透射率大,缺点是透过的波长半宽度也大。还有一种用精胶加有机染料制成的精胶滤光片,可以得到很窄的波长半宽度,但透过率很小,干涉滤光片则兼有两者的优点。

(2)透射带的波长半宽度

由计算可以得到透射带的波长半宽度 $\Delta\lambda$ 由下式决定:

$$\Delta\lambda = \frac{2\lambda_0}{k\pi\sqrt{F}}$$

式中 $F = 4R/(1-R)^2$,而 R 是高反射膜的反射率。该式表明透射带的波长半宽度 $\Delta\lambda$ 与干涉级 k 和高反射膜的反射率 R 成反比,k 和 R 值愈大,$\Delta\lambda$ 愈小,滤光片的单色性愈好。

(3)峰值透射率

峰值透射率就是对应于透射率最大的中心波长的透射光强度与入射光强度之比,用 τ 表示,即:

$$\tau = \left[\frac{I(t)}{I(i)}\right]_{max}$$

若不考虑滤光片的吸收和散射损失时,$\tau=1$。但实际上由于高反射膜的吸收和散射造成光能损失,峰值透射率不可能等于 1。特别是金属反射膜滤光片,吸收严重,峰值透射率一般在 30%以下。表 2－1 列出了几种滤光片的三个主要参数,可供选择滤光片时参考。

表 2－1　几种干涉滤光片的特性

类　　型	中心波长 (nm)	峰值透射率	波长半宽度 (nm)
M－2L－M	531	0.3	13
M－4L－M	535	0.26	7
MLH－2L－HLM	547	0.43	1.8
M(LH)²－2L－(HL)²M	605	0.38	2
HLH－2L－HLH	518.5	0.90	38
(HL)³H－2L－H(LH)³	529	0.70	4
(HL)³－2H－(LH)³	560	0.50	2

M 代表金属膜;L 代表光学厚度为 $\lambda/4$ 的低折射率膜层;H 代表光学厚度为 $\lambda/4$ 的高折射率膜层。

(二)迈克耳逊干涉仪

1. 仪器的结构要点

迈克耳逊干涉仪是用分振幅法产生双光束以实现干涉的仪器。图 2--50 为其构造简图，其中 M_1、M_2 为在相互垂直的两臂上放置的相互垂直的两个平面反射镜，并且 M_1 可沿臂轴方向移动，G_1 和 G_2 是厚度和折射率都相同的两块玻璃板。在 G_1 的背面镀有铝或银的半反射膜，从光源 S 射来的光束在这里被分为强度近似相等的两束。图中用(1) 表示反射的一束，用(2)表示透射的一束。因 G_1 与 M_1 和 M_2 均成 45°角，所以两光束分别近于垂直入射 M_1 和 M_2。两光束反射后再在 E 处相遇时产生一定的干涉图样。G_2 为一补偿板，它的作用是补偿光

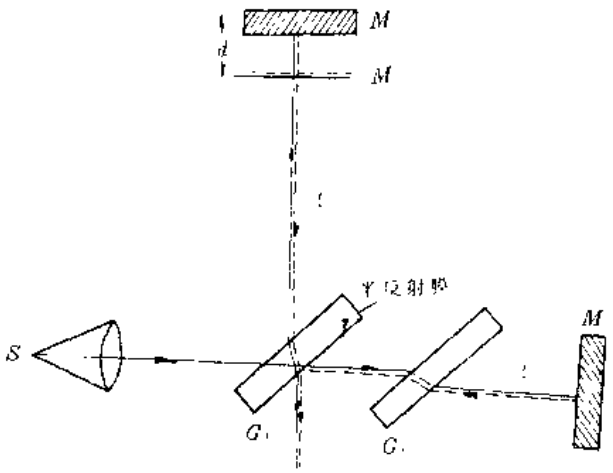


图 2--50　迈克耳逊干涉仪

束(2)的光程，使两光束在玻璃中的光程相等。M_1 和 M_2 的背后有螺旋，用以调节它们的方向。

2. 干涉条纹

现在我们来分析迈克耳逊干涉仪产生的各种干涉图样。设 M_2' 是 M_2 对 G_1 的半镀膜面所成的虚像，因而光自 M_1 和 M_2 的反射，相当于自 M_1 和 M_2' 的反射。

a. 点光源产生的非定域干涉图样

用凸透镜会聚后的激光束是一个线度小、强度足够的点光源。点光源经平面镜 M_1、M_2 反射后，相当于由两个虚光源 S_1、S_2' 发出的相干光束(图 2--51)。S_1、S_2' 的距离为 M_1、M_2' 的距离 d 的二倍，即 $2d$。虚光源 S_1、S_2' 发出的球面波在它们相遇的空间处相干，因此是非定域的干涉图样。用平面的屏观察干涉图样时，不同的地点可以观察到圆、椭圆、双曲线、直线状的条纹(在迈克耳逊干涉仪的实际情况下，放置屏的空间是有限的，只有圆和椭圆容易出现)。通常把屏放在垂直于 S_1S_2' 的联线、对应的干涉图样是一组组同心圆，圆心在 S_1S_2' 延长线和屏的交点 E 上。

如图 2--51 所示，由 S_1、S_2' 发出的光到屏上任一点 A 的光程差 L 为：

$$L = \sqrt{(Z+2d)^2+R^2} - \sqrt{Z^2+R^2}$$

$$= \sqrt{Z^2+R^2}\left[\sqrt{1+\frac{4Zd+4d^2}{Z^2+R^2}}-1\right]$$

当 $Z \gg d$ 时，将上式展开：

$$L = \sqrt{Z^2+R^2}\left[\frac{1}{2}\cdot\frac{4Zd+4d^2}{Z^2+R^2}-\frac{1}{8}\cdot\frac{16Z^2d^2}{(Z^2+R^2)^2}\right]$$

$$= \frac{2Zd}{\sqrt{Z^2+R^2}}\left[1+\frac{dR^2}{Z(Z^2+R^2)}\right]$$

$$= 2d\cos\delta\left[1+\frac{d}{Z}\sin^2\delta\right]$$

(i)$\delta=0$ 时，光程差最大，即圆心 E 点所对应的干涉级次最高。移动 M_1，若 d 增加时，可以看到圆环一个个自中心生出而后向外扩展；若 d 减小时，圆环向中心收缩并在中心处一一消失。每"生出"或"消失"一个圆环，相当于 S_1、S_2' 间的距离改变了一个波长 λ。设 M_1 移动了 Δd 距离，相应地"生出"或"消失"的圆环数目为 ΔN，则从仪器上读出 Δd 及数出相应的 ΔN，就可以测出光的波长 λ。

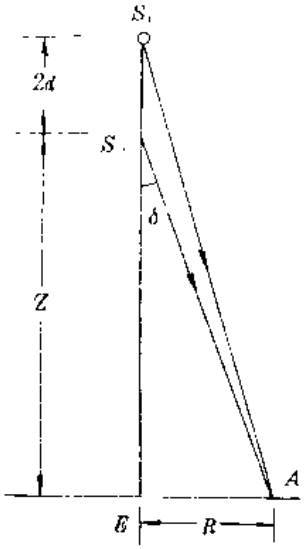


图 2—51　虚光源S_1、S_2'发出的相干光

$$\Delta d = \frac{1}{2}\Delta L = \Delta N\cdot\frac{\lambda}{2}$$

(ii)d 增大时，光程差 L 每改变一个波长 λ 所需的 δ 的改变值减小，即两亮环(或两暗环)的间隔变小，看上去条纹变密；反之，d 减小时，条纹变得稀疏。

b. 等倾干涉条纹

当 M_1 与 M_2 完全平行时，所得干涉为等倾干涉，其条纹位于无限远或透镜的焦平面，入射角为 δ 的自 M_1、M_2 反射的两束光的光程差为：

$$L = AC + CB - AD = 2d\cos\delta$$

可见在 d 一定时，光程差只决定于入射角(出射角)。故干涉图样是一组明暗相间的同心环状条纹。

和非定域干涉图样类似，等倾干涉条纹的干涉级次以圆心为最高，愈向边缘，干涉条纹的级次愈小，并且随条纹对干涉中心的远离，条纹的间隔愈来愈小。当 d 逐渐增大时，圆环不断由中心生出，条纹变密；当 d 逐渐减小时，圆环不断缩进中心，条纹变稀。

再考察一下产生等倾干涉条纹需要用什么样的光源问题。从图 2—52 可知，自光源发出的光应该能够从不同方向入射到 M_1、M_2'，这样才能在 L_1 焦平面上形成完整的干涉图样。例如在靠近镜 M_2 处放一点光源，在采用点光源的情况下，等倾干涉实际上就是非定域干涉中屏放到无穷远处的特例。但是等倾干涉并不一定要用点光源，它完全可以采用扩展光源。而且扩展光源发光面上的各发光点之间可以不相干。这一特点使等倾干涉比较容易实现。

c. 等厚干涉条纹

当 M_1 和 M_2' 有微小夹角时，M_1 和 M_2' 之间形成楔形空气薄层，可出现等厚干涉条纹。如图 2—53 所示，光源 S 发出的不同方向的光线(1)和(2)经 M_1、M_2' 反射后在镜面附近相交，产生干涉。把眼睛聚焦在 M_1 镜附近(也可用透镜) 可以观察到干涉条纹。当夹角 θ 很小时，光线(1)和(2)的光程差仍可近似地用 $L=2d\cos\delta$ 表示。其中 d 是观察点 B 处空气层的厚度，

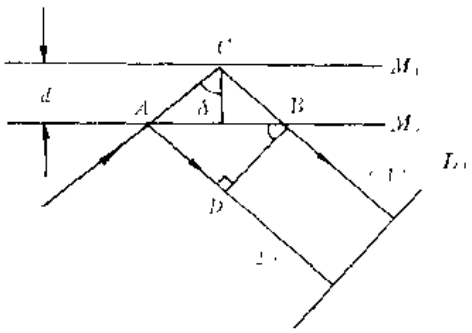


图 2—52　等倾干涉程差图

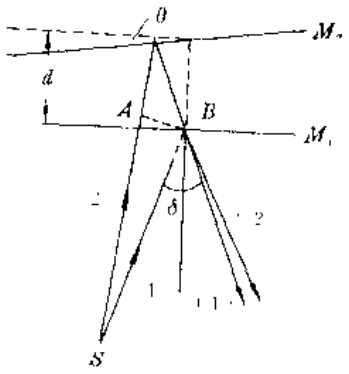


图 2—53　等厚干涉光路图

δ 仍为入射角。在 M_1 与 M_2' 交线处，$d=0$，如不考虑光束(1)在 G_1 镜反射时附加的光程差，光程差为零应出现直线亮纹。如果入射角不大，$\cos\delta\approx 1-\frac{\delta^2}{2}$

故

$$L\approx 2d\left(1-\frac{1}{2}\delta^2\right)=2d-d\delta^2$$

在 M_1 与 M_2 交线附近，干涉图样是一组平行于交线的明暗相间的直线条纹，随着视角 δ 的增大，条纹逐渐发生弯曲。从上式可知，要保持同样的光程差 L，必须增大 d，即弯曲的方向是凸向交线处。

观察等厚条纹时，仍应采用扩展光源，使得反射后能有各方向的光线以便观察到整个干涉图样。

3. 时间相干性的问题

时间相干性是光源相干程度的一个描述。为简单起见，以入射角 $\delta=0$ 作为例子讨论。这时光束(1)和(2)的光程差 $L=2d$。当 d 增加到某一数值 d' 后，原有的干涉条纹将消失。两束光产生干涉效应的最大光程差称作相干长度，用 L_m 表示。相干长度除以光速 c 就是光走过这段光程所对应的时间，称为相干时间，用 t_m 表示。不同的光源有不同的相干长度和相干时间。

为什么光源存在一定的相干长度和相干时间呢？一种解释是，实际光源发射的光波不是无穷长的波列，当两光路之间的光程差超过了波列的长度时，由同一波列分出的两路波列首尾错开，不再重叠，这时就不能发生干涉。所以波列长度表征了相干长度。另一种解释是，实际光源发射的单色光并不是严格单色的，而是有一个波长范围。假定光波的中心波长为 λ_0，谱线宽度为 $\Delta\lambda$，即光波实际是由波长为 $\lambda_0-\frac{\Delta\lambda}{2}$ 到 $\lambda_0+\frac{\Delta\lambda}{2}$ 之间所有的波组成。干涉时，每个波长对应一套干涉图样，随着 d 的增加，$\lambda_0+\frac{\Delta\lambda}{2}$ 和 $\lambda_0-\frac{\Delta\lambda}{2}$ 两套干涉条纹逐渐错开，直到错开一个条纹，干涉图样便消失了。

因为

$$L_m=k\left(\lambda_0+\frac{\Delta\lambda}{2}\right)=(k+1)\left(\lambda_0-\frac{\Delta\lambda}{2}\right)$$

则

$$k\lambda_0+\frac{k}{2}\Delta\lambda=k\lambda_0+\lambda_0-\frac{k}{2}\lambda_0-\frac{\Delta\lambda}{2}$$

$$k\approx\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}$$

将 $k=\frac{\lambda_0}{\Delta\lambda}$ 代入 L_m，得

$$L_m\approx\frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$$

可见，光源的单色性越好，即 $\Delta\lambda$ 越小，相干长度就越长，所以上面两种解释是完全一致的。相应地，相干时间

$$t_m=\frac{\lambda_0^2}{c\Delta\lambda}$$

氦氖激光器发射的激光单色性很好。对 632.8nm 的谱线，$\Delta\lambda$ 只有 10^{-4}～10^{-7}nm，故相干长度可达几 m 到几 km。而普通的钠光灯、水银灯等，$\Delta\lambda$ 约为零点零几纳米，相干长度只有一两个 cm。白炽灯发射的光，$\Delta\lambda\approx\lambda$，相干长度为波长的数量级，只能看到级数很少的彩色条纹。

三、光的衍射

衍射是波动在传播途中遇到障碍物后所发生的偏离"直线传播"的现象。光的衍射就是光可以"绕过"障碍物在某种程度上传播到障碍物的几何阴影区。对于声波和无线电波，由于波长较长，在日常生活中可以很明显地觉察到它们的衍射现象；而光的衍射现象，由于光的波长较短，只有当光通过很小的孔或狭缝时才能明显地观察到。

光的衍射现象，按光源、衍射开孔（或屏障）和观察衍射的幕（可以叫做衍射场）三者之间距离的大小，通常分为两种类型：一种叫菲涅耳衍射，这是光源和衍射场或者二者之一到衍射开孔（或屏障）的距离都比较小的情况；另一种叫夫琅和费衍射，这是光源与衍射场都在离衍射物无限远处的情况。

光的衍射现象是光的波动性的有力证明，在现代科学技术和生产方面有许多重要应用。

（一）菲涅耳衍射与夫琅和费衍射实验

现在具体考察单色光经过衍射小孔后的衍射现象，以区别近场与远场衍射。

图 2—54 表示一个单色平面波垂直照射到圆 Σ 上（圆孔直径大于波长）。若在离 Σ 很近的 K_1 处，观察透过的光，将看到边缘比较锐利的光斑，其形状、大小和圆孔基本相同，可看作是圆孔的投影，这时光的传播大致可看作是直线进行的。若距离再远些，例如在 K_2 面上观察时，将看到一个边缘模糊的略大的圆光斑，光斑内有一圈圈的亮暗环，这时光斑已不能看作是圆孔的投影了。随着观察平面距离的增大，光斑范围将不断扩大，但光斑中圆环数目则逐渐减少（如 K_3 面的情形），而且环纹中心也表现出从亮而暗，又从暗而亮的变化。当观察平面距离很远时，如在 K_4 面，将看到一个较大的中间亮边缘暗且在边缘外有较弱的亮暗圆环的光斑。此后观察距离再增大时，只是光斑扩大，但光斑形状不变。

从这一例子可以看出，在衍射孔后不同距离的地方，衍射图样是不同的，观察位置在 K_2、K_3 及其前后的范围内的衍射现象称为菲涅耳衍射或近场衍射，而在很远处（如 K_4 面上）的衍射现象称为夫琅和费衍射或远场衍射。当然，对一定波长的光来说，远与近的距离和衍射孔径有关，孔径越大，相应的近场与远场的距离也越远。

（二）菲涅耳波带法

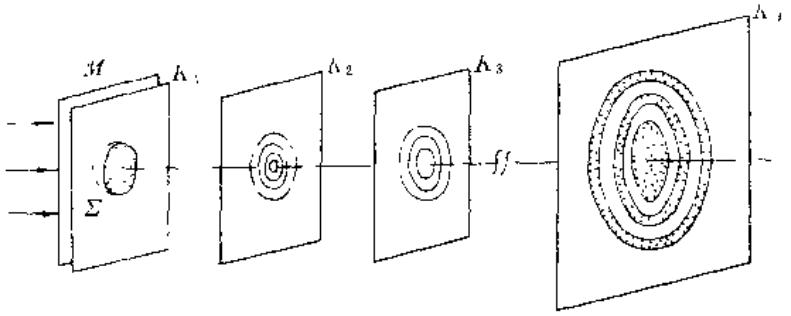


图 2—54　菲涅耳衍射与夫琅和费衍射

菲涅耳波带法对于定性分析或半定量分析菲涅耳衍射现象是很方便的。现介绍如下：如图 2—55 所示，S 为一单色点光源，P 为光场中任一点，且 S 与 P 之间没有任何障碍。

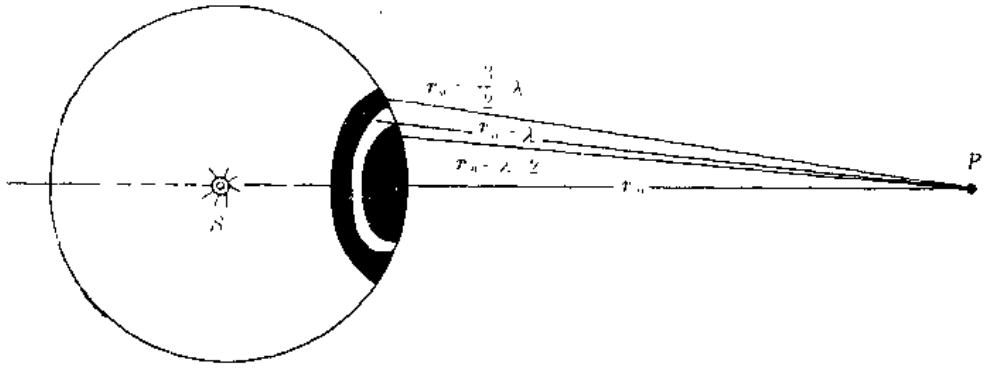


图 2—55　菲涅耳波带

现在利用菲涅耳波带法求 S 对 P 点产生的光作用。

设由 S 发出的球面波在某一时刻的波面为 Σ，Σ 与 SP 连线的交点为 M，设 $MP=r_0$。以 P 为圆心，以 $r_0+\frac{\lambda}{2}$，$r_0+k\frac{\lambda}{2}$…为半径，在波面上作圆分波面为许多环带。在这些环带中，两相邻带的相应点到 P 点的光程差为半波长，这些环带叫做半波带(或波带)。

显然 S 在 P 点产生的光振动，就是波面上所有波带发出的次波在 P 点的光振动的叠加，而各波带在 P 点产生的光振动的振幅由各带的面积、各带到 P 点的距离以及各带对 P 点的倾角决定。可以证明这些环形带的面积大致相等，其值为：$\Delta S=\pi R r_0\lambda/(R+r_0)$。这样，各波带在 P 点所产生振动的振幅就只与各波带到 P 点的距离和倾角有关了。而波带的序数 k 越大，距离 r_k 和倾角 θ_k 也愈大，因而各波带在 P 点产生的振动的振幅将随 k 的增大而减小。设 a_1、a_2……a_k 分别为第一波带、第二波带……第 k 波带在 P 点产生振动的振幅，则有：

$$a_1 > a_2 > a_3 \cdots\cdots > a_k$$

同时应注意到，自两相邻波带的相应点到 P 点的光程差为半波长，它们发出的光波到 P 点产生的振动位向相反。若把一个波带在 P 点产生的振动看作正的，则相邻一个波带在 P 点产生振动为负。这样，各波带在 P 点所产生的振动的振幅应为：

$$A_k = a_1 - a_2 + a_3 - a_4 \cdots\cdots + (-1)^{k+1} a_k$$

这是一个单调下降的序列。

将上式中各奇数项的 a 写作：

$$a_1 = \frac{a_1}{2} + \frac{a_1}{2}, \quad a_3 = \frac{a_3}{2} + \frac{a_3}{2}, \cdots\cdots$$

于是当 k 为奇数时，A_k 可写作如下形式：

$$A_k = \frac{a_1}{2} + (\frac{a_1}{2} - a_2 + \frac{a_3}{2}) + \cdots\cdots + (\frac{a_{k-2}}{2} - a_{k-1} + \frac{a_k}{2}) + \frac{a_k}{2}$$

当 k 为偶数时：

$$A_k = \frac{a_1}{2} + (\frac{a_1}{2} - a_2 - \frac{a_3}{2}) + (\frac{a_3}{2} - a_4 + \frac{a_5}{2}) + \cdots\cdots + (\frac{a_{k-3}}{2} - a_{k-2} + \frac{a_{k-1}}{2}) + \frac{a_{k-1}}{2} - a_k$$

如前所述，因振幅 a_k 随着序数 k 的增加而减小，故可以认为第 k 个带所发次波到达 P 点的振幅，近似地等于第 $k-1$ 个带与第 $k+1$ 个带所发次波在 P 点的振幅之和的一半，即 $a_k = \frac{a_{k-1}+a_{k+1}}{2}$，因此上列 A_k 的两个级数中用括号括出的所有各项都等于零。结果是当 k 为奇数时

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \frac{a_k}{2}$$

当 k 为偶数时

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \frac{a_{k-1}}{2} - a_k$$

如果带的数目 k 足够大，则由第 $k-1$ 个带和第 k 个带所发的次波在到达 P 点时的振幅彼此相差很小，则

$$\frac{a_{k-1}}{2} - a_k \approx -\frac{a_k}{2}$$

于是得：

$$A_k = \frac{a_1}{2} \pm \frac{a_k}{2}$$

式中的±号按 k 为奇数或偶数而定：k 为奇数时取正号；k 为偶数时取负号。

当 S 与 P 之间没有受到遮蔽时，a_k 实际上趋于零，因此上式变为：

$$A_k = \frac{a_1}{2}$$

此式表明，没有遮蔽的整个波面对 P 点的作用等于第一个波带在该点作用的一半。因为波带的面积是非常小的，所以光能量的传播可以看作是沿着 SP 直线进行。

（三）菲涅耳衍射（圆孔与圆屏）

1. 圆孔衍射

如图 2—56 所示，在 S 与 P 之间有一带圆孔的光屏 M，圆孔中心在 SP 连线上。P 点合振幅的大小取决于圆孔露出的波面上对于 P 点所作出的波带数。当在露出的波面上作出的波带数为奇数个时，$A_k = \frac{a_1}{2} + \frac{a_k}{2}$，$P$ 点有最大的光强。而为偶数个波带时，$A_k = \frac{a_1}{2} - \frac{a_k}{2}$，$P$ 点有最小的光强。圆孔愈小，圆孔包含的波带数愈少，a_k 与 a_1 相差也小。在此情形下，当 k 为奇数时有：

$$A_k = \frac{a_1}{2} + \frac{a_k}{2} \approx a_1$$

当 k 为偶数时，有：

$$A_k = \frac{a_1}{2} - \frac{a_k}{2} \approx 0$$

这表明，当圆孔露出奇数个波带时，P 点是光强约等于 a_1^2 的亮点，而当圆孔露出偶数个波带时，P 点是光强接近于零的暗点。

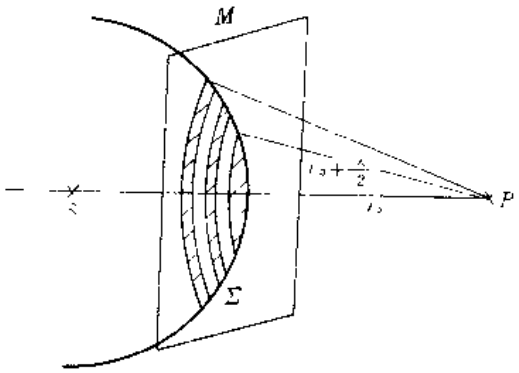


图 2—56　圆孔衍射

2. 圆屏衍射

现在用圆屏代替圆孔。如图 2—57 所示，在点光源 S 与观察点 P 之间放置一个不透明的圆屏 D，考察屏中心和光源连线上任一点 P 的光强度。为此，以 P 为圆心，分别以 r_1 $+\frac{\lambda}{2}$，$r_1+\lambda$……为半径（r_1 为圆屏边缘到 P 点的距离）将到达圆屏的波面划分成波带。这些波带对 P 点的作用应是第一个波带对 P 点作用的一半，即：

$$A = \frac{a_1}{2}$$

要注意，这里所说的第一个波带是从圆屏边缘开始计算的第一个波带。由此可知，当圆屏直径较小，第一波带的作用还相当显著时，P 点是亮点，周围有一些强度较小的亮暗环。对于半径很大的圆屏，它将遮住数目众多的波带，而使露出的第一个波带在 P 点产生的振动的振幅 a_1 接近于零。于是，P 点实际上是暗点。

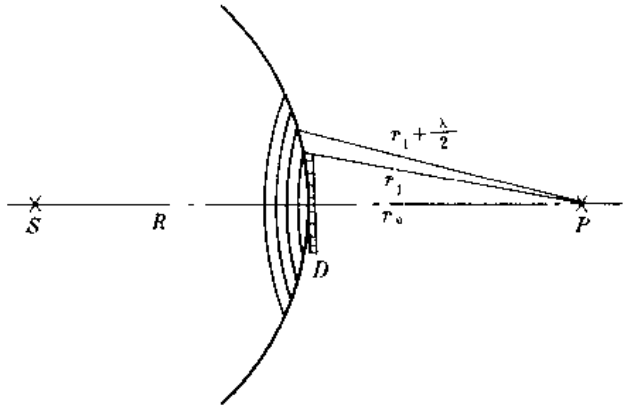


图 2—57　菲涅耳圆屏衍射

（四）波带片

根据以上讨论，可以看到圆屏的作用能使点光源造成实像，可以设想它和一块会聚透镜相当。另一方面，从菲涅耳半波带的特征来看，相对于 P 点划分的波带中，奇数序波带（或偶数序波带）发出的次波在 P 点是同位相的，而奇数序波带和偶数序波带发出的次波在 P 点位相相反。因此，如果设想做成一个特殊的光栏，使得奇数序的波带畅通无阻，而偶数序的波带被完全遮去，或者使奇数序的波带被遮去，而偶数序的波带能通过，那么观察点 P 处的振幅是同位相的诸次波的叠加。这样就会得到最大的叠加振幅，即

$$A_k = \sum_k a_{2k+1}$$

或

$$A_k = \sum_k a_{2k}$$

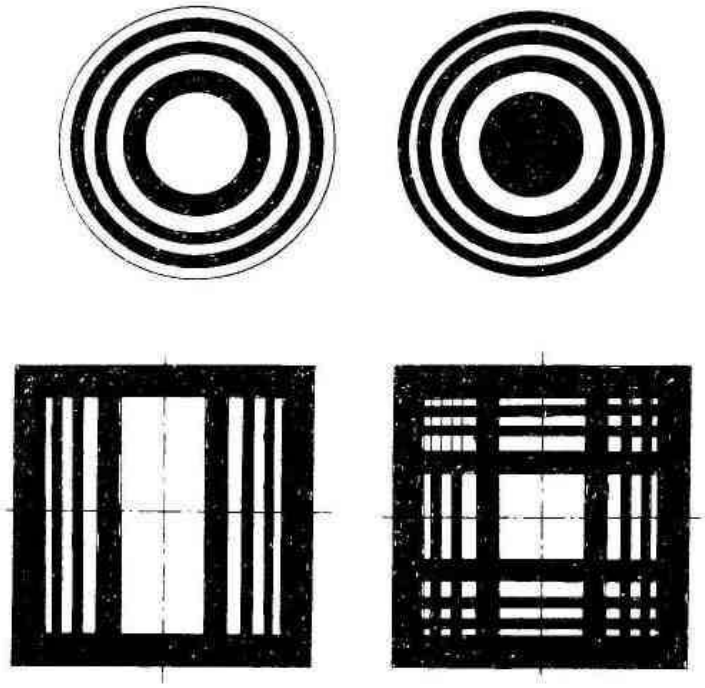


图 2—58　环形波带片与方形波带片

这样做成的光学元件叫做菲涅耳波带片(简称波带片)。因为它可以把波面上等位相的波带汇集在一起，具有透镜的作用，所以又称菲涅耳透镜。另外还可以制作成长条形波带片。这种波带片的特点是在垂直于轴的平面上会聚成一条明亮的直线，直线的方向与波带片的直线条平行。如果把波带片做成两个正交的长条形波带片的组合，也就是形成十字形(方形)的波带片，这种菲涅耳透镜所成的像是一个明亮而细的十字线。起衍射聚焦作用的波带片和普通透镜相比，具有面积大、轻便、可折叠等优点，特别适用于远程光通讯、测距以及宇航技术中，而且在微波、红外和紫外线的成像技术方面开辟了新的方向。图 2—58 为同心环带波带片和方形波带片图像。

(五)夫琅和费衍射

1. 单缝衍射

平行光通过单狭缝的衍射。如图 2—59 所示。透镜 L_1 把光源 S 发出的光变成平行光，垂直入射单狭缝后产生衍射，再被透镜 L_2 会聚于焦平面上，于是在 L_2 的焦平面处的屏幕上出现单缝衍射图样。这种衍射图样是一组平行于狭缝的明暗相间的条纹，其特点是中央亮条纹最亮，亦最宽，两侧对称排列着一些宽度为中央亮纹一半，强度较小的亮条纹。单缝衍射图样的光强度分布如图 2—60 所示。

2. 双缝和多缝衍射

当平行光垂直照射双缝中的任何一个缝时，这两个缝各自产生的衍射图样相同，而且位置完全重合(如图 2—61 中虚线所示)。这是因为单缝衍射条纹的分布只取决于衍射角 φ，和单缝在垂直方向的位置无关。当平行光垂直照射双缝时，我们发现原单缝衍射图样中各亮条纹的强度并不是简单的迭叠，而是在其中又出现了一些亮暗细条纹，如图 2—61 中实线所示。这是两缝的衍射光发生干涉的结果，某些地方振动加强，某些地方振动减弱。因此，双缝

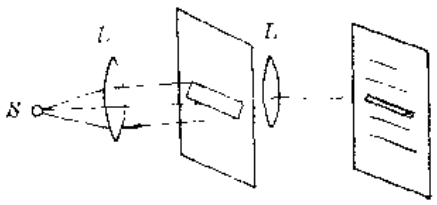


图 2—59　单缝衍射

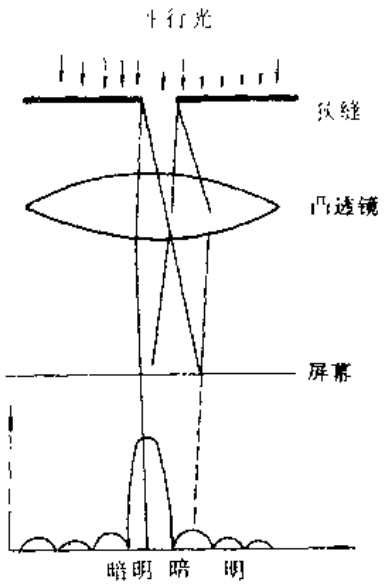


图 2—60　单缝衍射的光强分布

的衍射图样可看作单缝衍射与双缝干涉的总效果，即双缝衍射图样实际上是一种被单缝衍

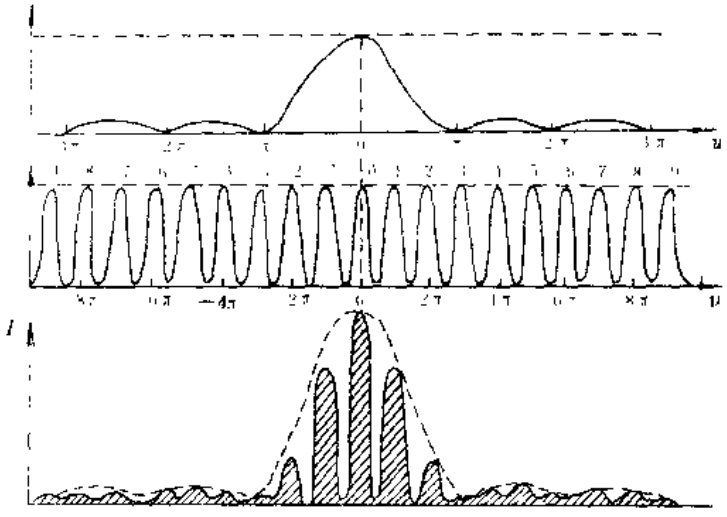


图 2—61　双缝衍射光强分布

射调制的双缝干涉条纹。

实验表明，光经过双缝衍射后的亮条纹比在单缝情况下变得狭窄而光的强度增强，亮纹间的暗区变宽了。若缝数增加，亮条纹就变得更狭窄，而光的强度更加增强，暗区变得更宽了。

(六)衍射光栅

由大量等宽等间距的平行狭缝构成的光学元件叫衍射光栅。用于透射光衍射的叫透射

光栅，用于反射光衍射的叫反射光栅。一般光栅在 1mm 内有几十乃至成千条缝(视应用的光谱区而异)。相邻狭缝中心间的距离 d 叫做光栅常数，一个光栅的规格是由它的总缝数 N 和光栅常数 d 两者来标明的。光栅和棱镜一样，是一种分光装置，主要用来形成光谱。

当用单色平行光束照射光栅时，光线经过透镜后，在屏幕上可观察到在宽大的黑暗背景中出现为数不多的明晰细锐的亮条纹(通常称作主极大或谱线)。光栅的衍射图样可看作单缝衍射和多缝干涉的总效果。

1. 光栅方程

按照透过各缝的衍射光相互干涉作用形成条纹图像的原理，不难推导出光栅衍射形成主极大亮纹的条件。如图 2－62 所示，当单色光垂直入射光栅时，从各缝透过的沿衍射角 φ 方向前进的平行光被透镜会聚于同一 P 点，而任意相邻两缝透过的在 φ 角方向上平行光线的光程差为 $d\sin\varphi$。当此光程差为入射光波长的整数倍时，会聚于 P 点的干涉效果都是彼此加强的，P 点位置必出亮条纹。于是，得到光栅衍射主极大亮条纹的条件是衍射角 φ 必须满

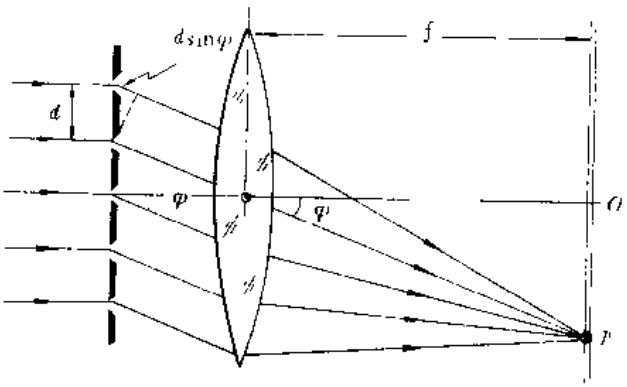


图 2－62　衍射光栅

足下列公式：

$$d\sin\varphi = k\lambda \qquad k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots\cdots$$

式中 k 为主极大的级数。通常称此式为光栅方程。由光栅方程可以看出，对于给定入射单色光波来说，光栅常数 d 愈小，各级谱线的位置分得愈开。光栅上狭缝总数愈多，透射光束愈强，因此所得亮条纹也愈亮。

2. 光栅光谱

由光栅方程可知，对于给定常数 d 的光栅，不同波长的同一级谱线出现在不同方位。长波的衍射角大，短波的衍射角小。如果入射光里包含几种不同波长的光，则除第零级外，各级主极大的位置各不同，我们将看到衍射图样中有几套不同颜色的谱线，各自对应一个波长。各种波长的同级谱线集合起来构成的一组谱线称为光栅光谱。当以白光入射光栅时，零级光谱(k==0)仍是白色的，位置居中。两侧对称地排列着第一级(k=1)、第二级(k=2)等光谱。在同一级光谱中，紫色的谱线在内侧，红色的在外侧，如图 2－63 所示。由于各谱线间的距离随光谱的级数而增加，所以高级数的光谱彼此发生重叠。故实际使用时，常采用滤光片以获得某一波长范围的光谱。

3. 光栅光谱仪

用衍射光栅作色散元件的分光计、摄谱仪统称为光栅光谱仪，分透射式和反射式两种。

图 2－64 是透射光栅光谱仪的示意图。其中 S 为光源狭缝，它和透镜 L_1 组成平行光管，

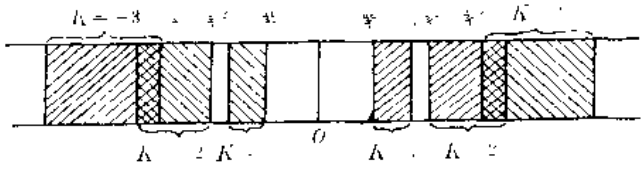


图 2—63　光栅光谱

S 在透镜 L_1 的焦面上。自平行光管射出的平行光束垂直地射在透射光栅 G 上，在光栅的后面用普通的望远镜 T 观察光谱，望远镜 T 可绕垂直于图面并且通过光栅的轴线 O 而旋转，

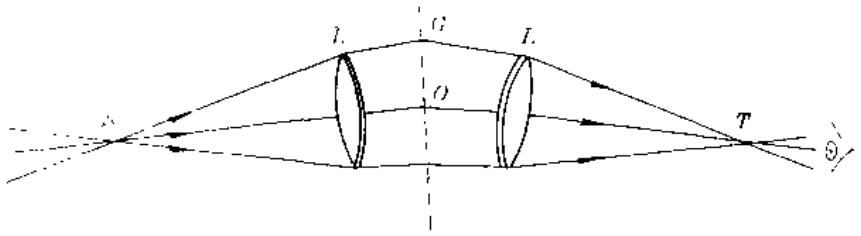


图 2—64　透射光栅光谱仪

以便观察不同方向上的各级光谱。

实际上用得最多的是反射光栅光谱仪。这种光谱仪普遍地用于从真空紫外直到红外、甚至远红外的宽广波段。反射光栅可作成凹面，它除了分光作用外还兼有聚焦的作用，不用附加任何光学系统就可以产生光栅光谱。这是凹面光栅的十分重要的优点。由于这一点，凹面光栅在原则上可用于随便什么光谱范围。可以证明，假如光源狭缝 S 和凹面反射光栅 G 同放在直径等于光栅表面曲率半径的圆周上，并且光栅表面与该圆周切于一点，则由该光栅所产生的光谱将都呈现在这个圆周上(见图 2—65)。故在这圆周上放置摄影胶片便可摄得各级光谱。

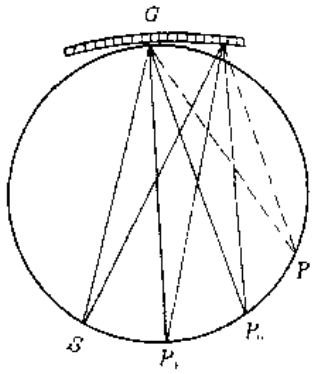


图 2—65　凹面反射光栅

第四节　成像量子光学和半导体基础

一、物体的热辐射

(一)黑体辐射

1. 黑体

实验表明，一个物体对光的吸收、透射、反射与物体的温度 T 和入射光的波长 λ 有关，因此应明确写成

$$1 = \alpha(\lambda,T) + \tau(\lambda,T) + \rho(\lambda,T)$$

其中 $\alpha(\lambda,T)$、$\tau(\lambda,T)$ 和 $\rho(\lambda,T)$ 分别是物体的光谱吸收率和光谱透射率、光谱反射率。对于波长为 λ 的辐射是不透明的物体来说，$\tau(\lambda,T)=0$，则

$$\alpha(\lambda,T) = 1 - \rho(\lambda,T)$$

这说明对某一波长而言，一物体若是强吸收体，那么它一定是弱反射体。

若一物体在任何温度下，对照射在其上的任何波长的辐射能完全吸收，即 $\alpha(\lambda,T)=1$，则该物体称为绝对黑体，简称黑体。

若一物体对各种波长的吸收率小于 1，又近似地为一常数 η，即

$$1 > \alpha(\lambda,T) = \eta > 0$$

说明这个物体对光是无选择性地吸收，那么该物体称为灰体，η 称为灰体的黑度。一般金属材料大都可以近似地看成灰体。

若一物体对各种波长的吸收是变化的，说明该物体对光是有选择性地吸收，则称它为选择性辐射体，它的吸收率满足：$1>\alpha(\lambda,T)>0$

2. 基尔霍夫定律

仅由物体的温度决定的辐射称为热辐射。早在 1860 年，基尔霍夫就发现物体的热辐射出射度与吸收率之间有内在联系，即“良吸收体，也是良发射体”。他总结了物体的光谱辐射出射度 $M(\lambda,T)$ 与吸收率 $\alpha(\lambda,T)$ 之间的定量关系为：

$$\frac{M(\lambda,T)}{\alpha(\lambda,T)} = f(\lambda,T)$$

式中 $f(\lambda,T)$ 是一个与物体性质无关的普适函数，它只与温度 T、波长 λ 有关。

对于黑体，它的吸收率 α 与 T、λ 无关，恒等于 1，则上式为：

$$\frac{M_b(\lambda,T)}{1} = f(\lambda,T)$$

即：

$$M_b(\lambda,T) = f(\lambda,T)$$

说明黑体的光谱辐射出射度 $M_b(\lambda,T)$ 就是普适函数 $f(\lambda,T)$。因而

$$\frac{M(\lambda,T)}{\alpha(\lambda,T)} = M_b(\lambda,T)$$

该式称为基尔霍夫定律，即物体的光谱辐射出射度 $M(\lambda,T)$ 与吸收率 $\alpha(\lambda,T)$ 的比值与物体性质无关，等于同一温度黑体的光谱辐射出射度 $M_b(\lambda,T)$。

3. 黑体热辐射定律

上面的讨论告诉我们，要了解一般物体的热辐射性质，需确定黑体的光谱辐射出射度

$M_b(\lambda,T)$的数学表达式。

自然界不存在绝对黑体，实际应用中均采用人工制造的理想黑体模型。如图 2－66 所示，一空心容器，器壁由不透明材料制成，器壁上开有一小孔 O。当电磁辐射通过小孔进入空腔后，经内壁的多次反射，重新射出小孔的辐射甚微，相当于小孔对各种波长的辐射的吸收

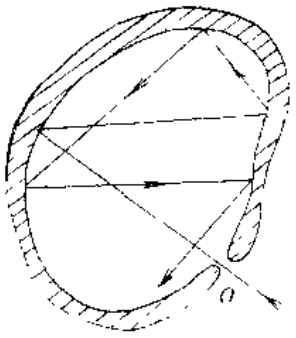


图 2－66　绝对黑体的模型

率等于 1。因此，这个空腔的小孔就是一个理想的黑体。

普朗克从能量量子化假设出发提出一个与实验相符的黑体热辐射公式：

$$M_b(\lambda,T)=2\pi hc^2\lambda^{-5}\cdot\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}$$

该式称为普朗克公式。式中 c 是光速，k 是玻耳兹曼恒量，e 是自然对数的底，h 是普朗克恒量，其值为：$h=6.627\times10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$。图 2－67 给出了黑体的光谱辐射出射度与波长和温度的关系。

由普朗克公式可以推导出关于黑体热辐射的两条普遍规律：

(1)将普朗克公式对波长积分：

$$\begin{aligned}M_b(T)&=\int_0^\infty M_b(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda\\&=\int_0^\infty 2\pi hc^2\lambda^{-5}\cdot\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}}-1}\mathrm{d}\lambda\\&=\sigma T^4\end{aligned}$$

这规律叫做斯忒潘-玻耳兹曼定律。式中 $\sigma=\frac{2\pi^5k^4}{15c^2h^3}=5.67\times10^{-8}\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$，称为斯忒潘恒量。$M_b(T)$是单位面积($m^2$)的黑体向 2π 空间辐射的总功率，称为黑体的辐射出射度(简称辐出度)，它与绝对温度 T 的四次方成正比。

(2)由图 2－67 可见，对应于每一种温度，黑体的光谱辐射出射度有一最大值，它所对应的波长用 λ_m 表示。将普朗克公式对波长 λ 微分，并令 $\frac{\partial M_b}{\partial\lambda}=0$，可得：

$$\lambda_mT=2.897\times10^{-3}\text{m}\cdot\text{K}$$

这规律称为维恩位移定律。它表明，随着温度的增加，黑体光谱辐射出射度的峰值向短波方

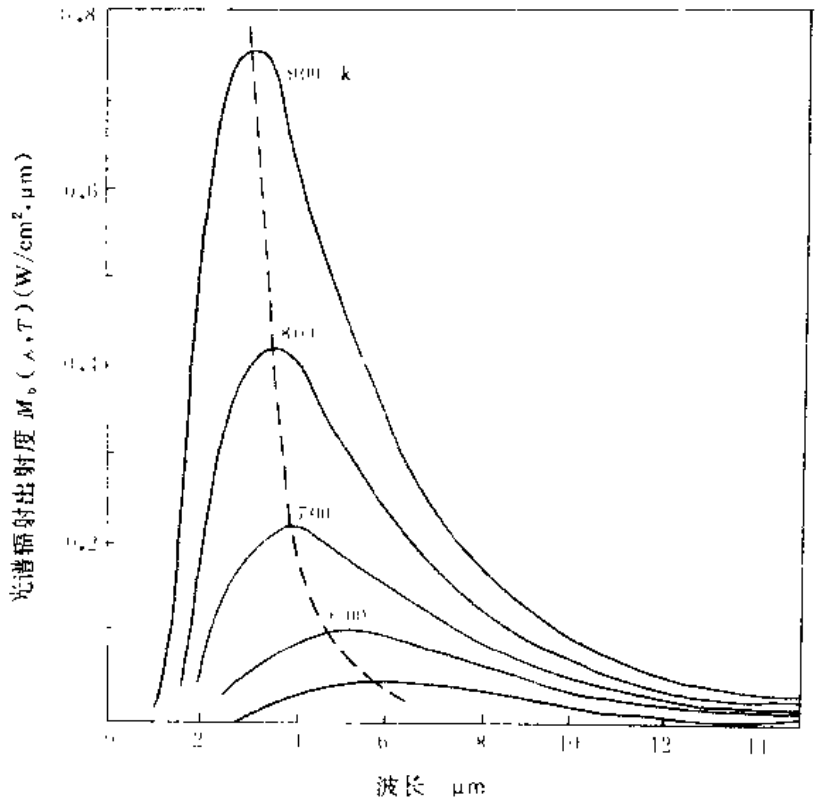


图 2 -67 黑体的光谱辐射出射度与波长和温度的关系曲线

向移动。

4. 黑体的微波辐射

黑体在微波波段的辐射能很弱，辐射出射度约在 $10^{-9}\sim10^{-20}$W·m^2 范围内。但用中等灵敏度的微波接收机就能检测到，它是一种重要的保密性好的遥感波段。

在微波波段，常用频率 ν 替代波长 λ，因 $d\lambda=-\frac{c}{\nu^2}d\nu$，则普朗克公式可改写为

$$M_b(\nu,T)=M_b(\lambda,T)\frac{c}{\nu^2}=\frac{2\pi h\nu^3}{c^2}\frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}}-1}$$

$M_b(\nu,T)$是单位频宽的黑体辐射出射度。

在波长大于 1mm 的微波情况下，$h\nu\ll kT$，则

$$e^{\frac{h\nu}{kT}}\approx 1+\frac{h\nu}{kT}$$

因而前式可化简为：

$$M_b(\nu,T)=\frac{2\pi kT}{c^2}\nu^2=\frac{2\pi}{\lambda^2}kT$$

该式在雷达技术和微波遥感中十分有用，是计算微波辐射的基本公式，倘若考虑的是朗伯体，根据 $I_\theta=\frac{M_b}{\pi}$，可得黑体的微波辐射亮度

$$I_\theta(\nu,T)=\frac{2kT}{\lambda^2}$$

单位是 W·m^{-2}/sr。

若对微波波段积分，得到黑体的微波辐射总亮度

$$I_b(T)=\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\frac{2kT}{\lambda^2}\mathrm{d}\lambda$$

显然，它与温度 T 的一次方成正比。

(二)一般物体的热辐射

1. 比辐射率

黑体是一种理想的物体。实际物体的辐射出射度总是小于黑体的辐射出射度。常把 $M(\lambda,T)$ 与同温度的黑体的 $M_b(\lambda,T)$ 之比称为该物体的比辐射率(或发射率) $\varepsilon(\lambda,T)$，描写物体对某一波长的电磁波的辐射，即

$$\varepsilon(\lambda,T)=\frac{M(\lambda,T)}{M_b(\lambda,T)}$$

由基尔霍夫定律可知

$$\varepsilon(\lambda,T)=\alpha(\lambda,T)$$

即物体的比辐射率和此物体同温度、同波长的吸收率相等，它不仅是温度和波长的函数，还与物体的性质和表面状况有关。物体的比辐射率随波长变化的规律称为物体的发射光谱。

2. 一般物体的斯忒藩-玻耳兹曼定律

对于非黑体

$$M(T)=\int_0^\infty M(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda=\int_0^\infty \varepsilon(\lambda,T)M_b(\lambda,T)\mathrm{d}\lambda$$

则有

$$M(T)=\varepsilon\sigma T^4$$

系数 ε 为物体的平均比辐射率，对于灰体，ε 就等于比辐射率 ε，其值与波长无关。上式即为经过修正的、适用于一般物体的斯忒藩-玻耳兹曼定律。它说明一般物体的辐出度决定于温度 T 和比辐射率 ε 两个参量。

3. 色温度

对于黑体，可以根据其辐射光谱中最大光谱辐出度相应的波长 λ_m 确定其温度。由于温度不同时辐射光谱的相对组成不同，不同温度的黑体就呈现出不同的颜色。

对于非黑体，由于比辐射率的影响，不存在上述关系。但在实际应用中仍应用物体的光谱分布来定义物体的温度。如果温度为 T 的物体的光谱辐出度随波长的分布，即 $M(\lambda,T)$-λ 曲线，大致与温度为 T_c 的黑体的分布相同时，即 λ_m 的位置相近，则称 T_c 为该物体的色温度。由于分布大致相同，所以该物体发出的光的颜色和在温度 T_c 的黑体的颜色很接近。色温度的定义可表示为：

$$\frac{M_b(\lambda_1,T_c)}{M_b(\lambda_2,T_c)}=\frac{M(\lambda_1,T)}{M(\lambda_2,T)}=\frac{\varepsilon_1 M_b(\lambda_1,T)}{\varepsilon_2 M_b(\lambda_2,T)}$$

式中 $M_b(\lambda_1,T_c)$、$M_b(\lambda_2,T_c)$ 是温度为 T_c 的绝对黑体在辐出度峰值附近的光谱辐出度，对应的波长 λ_1、λ_2。$M(\lambda_1,T)$、$M(\lambda_2,T)$ 是一般物体在 λ_1、λ_2 的光谱辐出度，ε_1、ε_2 为物体对应的比辐射率。对灰体，$\varepsilon_1=\varepsilon_2$，则 $T_c=T$，即色温度等于实际温度。

航空摄影使用的彩色胶片多为日光型，要求光源色温度在 5400K 左右，即只有当光源的光谱成分中红、绿、蓝等色光的比例接近色温度为 5400K 的光谱组成时，胶片才能比较正

确地反映物体彩色。所以，当光源的色温度条件与彩色片的要求不符时，可以选用滤光镜调整色温度，如果色温过低，可加蓝色滤光镜吸收光源中一部分长波成分，使透过光中短波成分相对增加，以提高色温度；如果色温度过高，则可加橙红或桔黄色滤光镜，吸收部分短波成分而降低色温度。

当物体的选择吸收很强时，色温度就失去意义。

4. 亮温度

亮温度是用物体的辐射功率(即辐出度)来定义物体的温度。如果温度为 T 的物体与温度为 T_b 的黑体的辐出度相同，则称 T_b 为该物体的亮温度。即

$$M(T) = \varepsilon\sigma T^4 = \sigma T_b^4$$

因此

$$T_b = \varepsilon^{\frac{1}{4}} T$$

显然，物体的亮温度小于它的实际温度。

二、光电效应及其应用

当光束照射在金属表面上时，有电子从金属表面逸出的现象，叫做光电效应。

研究光电效应的实验装置如图 2--68 所示。在一抽成高真空的容器内，装有阴极 K 和阳极 A，阴极 K 为一金属板。在两极之间加上电压。当单色光通过窗口照射到阴极 K 上时(如果用紫外线，窗口必须用石英来做)，由阴极表面逸出的光电子受电场加速飞向阳极，在

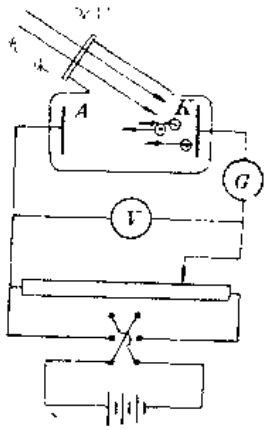


图 2—68　研究光电效应的实验装置

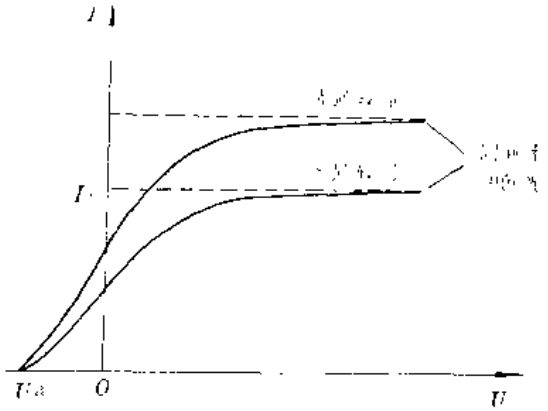


图 2—69　光电效应的伏安特性曲线

电路中形成光电流。光电流的强弱可由电流计 G 读出。

总结所有的实验结果，光电效应的规律可归纳为以下三条：

(1)饱和光电流与入射光强成正比。

(2)对某一确定频率 ν 的单色光有一确定的截止电压 U_a。截止电压 U_a 与入射光强无关，只随入射光的频率 ν 线性地增加。当入射光的频率 ν 低于某频率 ν_0 时，U_a 降到零。这时不论光强多大，光电效应不再发生。频率 ν_0 称为该种金属光电效应的截止频率或红限。

(3)只要照射光的频率大于截止频率 ν_0，在开始照射后立即有光电子产生，弛豫时间最多不超过 10^{-9} 秒，与光的强度无关。

为了解释光电效应的实验事实，爱因斯坦在普朗克能量量子化的基础上，提出了关于光

的本性的光子理论。爱因斯坦认为，电磁辐射不仅在发射和吸收时具有粒子性，而且在空间传播时也具有粒子性，即一束光是一粒一粒以光速 c 运动的粒子流。这些光粒子简称为光子。每个光子(仍保留频率、波长的概念)具有能量 $E=h\nu$。若光子流的密度为 N，频率为 ν 的单色光的能流密度为 $S=Nh\nu$。

根据光子理论，当光子投向金属表面时，金属中的自由电子全部吸收一个光子的能量 $h\nu$，其中一部分消耗于电子从金属表面逸出时所需的逸出功 A，另一部分转换为电子的动能 $\frac{1}{2}mv^2$。根据能量守恒与转换定律，应有

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 + A$$

这个方程称为爱因斯坦光电效应方程。

光子理论对上述实验结果的解释：

(1)入射光的强度增加时，光子数也增多，单位时间内被击出的光电子数目也增多。所以饱和光电流与入射光强度成正比。

(2)由爱因斯坦方程，有 $\frac{1}{2}mv^2=h\nu-A$。要阻止具有初动能 $\frac{1}{2}mv^2$ 的光电子到达阳极，需加一反向电压 U_a，其数值应由下式决定：

$$eU_a = \frac{1}{2}mv^2$$

即

$$U_a = (h\nu - A)/e$$

显然，U_a 就是截止电压，它仅决定于光的频率 ν 而与光强无关，且与 ν 成线性关系。此外，当 ν 趋于截止频率 ν_0 时，U_a 趋于 0，这时 $h\nu_0=A$；而当 $\nu<\nu_0$ 时，每个光子的能量 $h\nu<A$，电子吸收后获得的能量小于逸出功，光电效应不能发生。所以，截止频率 $\nu_0=A/h$。不同金属材料的逸出功不同，因而有不同的截止频率。

(3)光子能量一次为金属中的电子全部吸收，因而无需累积能量的时间。

爱因斯坦的光子理论正确地解释了光电效应。这一事实说明，光不但具有波动性，而且也具有粒子性，即光具有波粒二象性。联系这二象性的关系是：

$$E = h\nu$$

$$p = h/\lambda$$

实验证明，不但光(电磁波)具有波粒二象性，一切实物粒子也具有波粒二象性，对于实物粒子上两式也成立。应该说上两式所揭示的是物质世界普遍规律。在实物粒子范围内的上两式称为德布罗意关系式。

光电效应的应用十分广泛。光电管就是应用光电效应制成的光电器件。用于不同波段的光电管，其阴极涂不同材料的感光层，如用于可见光的涂金属 Li、K、Na 等，用于紫外线的涂 Hg、Ag、Au 等。把光电管接入电路，在其阳极和阴极间保持一定的电势差，当光照射在阴极上时，电路中就有电流通过，饱和电流与光强成正比。在有声电影、电视和无线电传真技术中常用光电管把光信号转化为电信号，在光度测量时也常常用光电管把光变为电流并放大后进行测量，在自动控制技术上光电管更有广泛应用。

在光照很弱时，光电管所产生的电流很小，不易探测，常用光电倍增管来实现极弱光强

下的光电转换。即在光电管中原阴阳极之间装上许多次阴极，数目可达十几个。当光照射在阴极上时，使其发射电子，由于外电场的加速，这些电子以高速轰击相邻的第一次阴极，产生比入射电子较多的次级电子，这些电子再被加速，轰击第二次阴极，从而发射更多的电子。如此继续下去，可使光电流放大几百万倍，而获得很高的灵敏度。光电倍增管已广泛应用于科学技术的各个方面。

三、原子光谱

原子光谱是研究原子结构的依据。所有元素的原子光谱都是由一条条分立的谱线组成的，我们称这种光谱为线光谱。各种原子有各自的特征光谱线。

1913 年，玻尔把量子论引用于原子系统，得出了光的发射与吸收的量子模型。

(1)在微观领域内，经典电动力学是不适用的。在半径只有零点几纳米的情况下，电子在一定的轨道上绕核旋转时并不产生辐射。

(2)电子绕核运动的角动量不是连续可变的，而是量子化的，具体地说，电子轨道角动量 L 要满足下面的量子化条件。

$$L = mvr = n\frac{h}{2\pi} \qquad n = 1,2,3\cdots\cdots$$

式中 n 为量子数，v 为电子运动的速率，r 为电子轨道半径，m 为电子质量。

若考虑核外只有一个电子的氢原子，并注意核对电子的库仑引力提供电子绕核作圆周运动的向心力

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

可求得氢原子中电子的轨道半径只能取下列分立值：

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2 = a_0 n^2$$

式中 $a_0 = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0.0529\text{nm}$，称为玻尔半径。

下面求与这些轨道相应的原子的能量。如以电子距核为无穷远处的势能为零，则原子系统的总能量(势能加动能)为

$$E = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} + \frac{1}{2}mv^2 = -\frac{e^2}{8\pi\varepsilon_0 r}$$

将 $r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2$ 代入，则得

$$E_n = -\frac{1}{n^2}\left(\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2}\right)$$

把具体数值代入，得到

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2}\text{eV}$$

可见，原子的能量是不连续的，只能取某些分立的值。

上面的结论说明：原子中的电子只能在某些确定的分立的轨道上运动，这些量子化的运动状态在量子力学中称为量子态；原子的任一个量子态都有确定的能量，能量最低($n=1$)的量子态称为基态，能量高于基态($n>1$)的各量子态称为激发态。这些量子态能量的值称为原子的能级。

(3)当原子从较高能级 E_m 跃迁到某一较低能级 E_n 时，发射一个光子，光子的频率与能

级差 $E_m - E_n$ 有关，即

$$h\nu = E_m - E_n$$

从不同的初始状态跃迁到同一末状态时所发出的光谱线属于同一谱线系。如巴耳末谱线系是氢原子中的电子从 $n>2$ 向 $n=2$ 的能级跃迁时产生的。同样地，如果外来光子的频率满足上式，则原子将吸收这个光子能量，从低能级 E_n 跃迁到高能级 E_m。所以，原子的发射光谱和吸收光谱中谱线是一一对应的。

玻尔理论成功地说明了氢原子的光谱以及类氢离子的光谱。该理论提出的原子能级的概念和能级跃迁决定谱线频率的结论对于各种原子也是普遍正确的，即(3)给出了一切原子

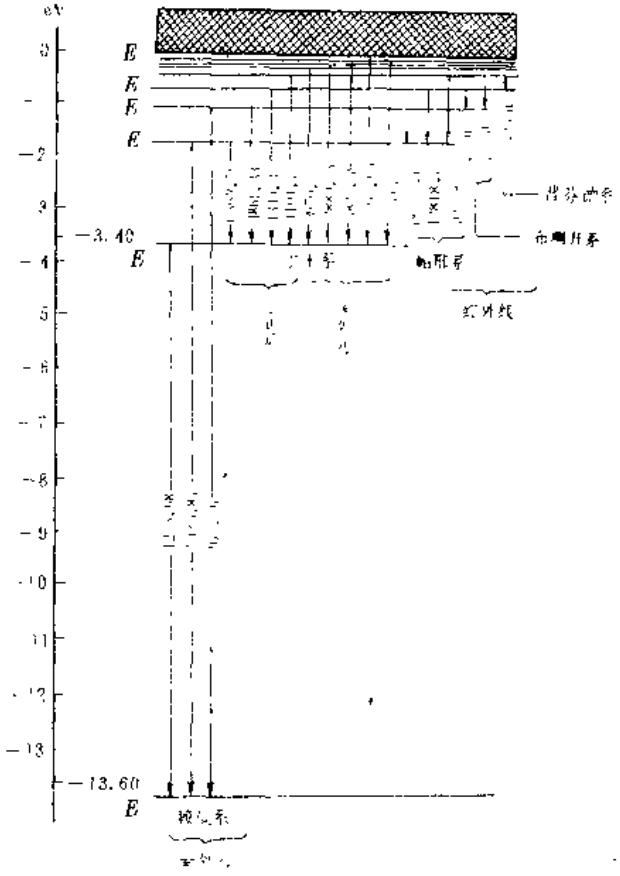


图 2—70　氢原子能级与发射光谱

光谱的成因。氢原子能级与发射光谱如图 2—70 所示。

进一步研究稍复杂的原子，发现它们的光谱很复杂，不像氢原子光谱那样简单。即使氢的谱线，在分辨率较高的光谱仪中，也能观察到谱线有分裂。因此仅用 n 这个量子数不能够描述分裂的能级。稍后德国人索末菲设想对 $n>1$ 的轨道除圆形外还有椭圆形的。因而要描述一个在二度空间运动的电子，除角动量量子化外，还需要有径向动量的量子化。其次在三度空间中轨道平面和在某一特定的方向的取向也产生量子化(如在外磁场方向上)。这取向的量子化称作空间量子化。此外电子还有自旋的量子化。这些动量的相互作用，及转动时产生磁矩的相互作用，使能级分裂。在复杂原子中，价电子多，它们的轨道与自旋相互作用更复杂，能级分裂更多，所表现的光谱更复杂。

四、分子光谱

前面讨论的原子光谱中各谱线的间隔较大，仅在线系的尾端才密集起来。如果最外层电子不是太多，则原子光谱线系的数目也是不多的。分子光谱的形状与原子光谱不同，它的谱线系很多。在每一谱线系中，一端谱线排列较稀，而另一端则非常密集，以致很难分辨出各条谱线，在光谱图上看上去像是连成一片，所以我们常称分子光谱为带状光谱。

分子是由原子间靠化学键结合而成的。分子的运动包括分子中的电子跃迁，分子中原子的振动以及分子作为一个整体的转动。根据量子力学，这几种运动的能量都是量子化的，相对于每种运动都有一定的分立能级，如图 2－71 所示。按照一定的选择定则，分子从一个能

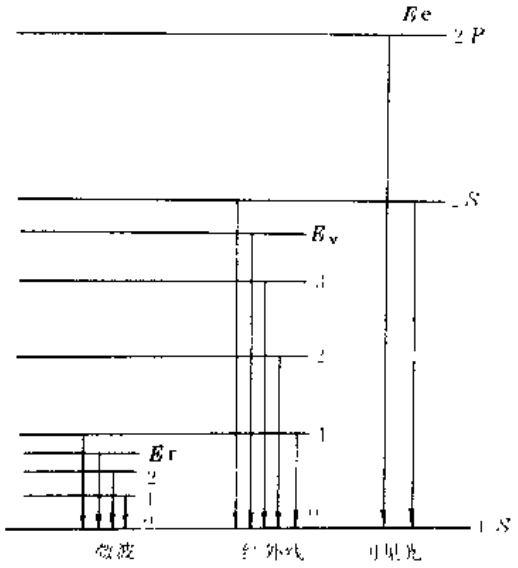


图 2－71　分子能级示意图

级跃迁到另一个能级便发出或吸收一定频率的光。

当电子处在某一电子能级 E_e 时，分子的能量还因原子的振动而分为若干振动能级 E_v；当分子处于某一电子能级和某一振动能级时，它的能量还要因转动能量的不同再分为若干个转动能级 E_r。所以分子处于某个量子态时，可认为其总能量是上述三部分能量之和，即

$$E = E_e + E_v + E_r$$

分子由一个量子态跃迁到另一个量子态所发射或吸收的光子频率为

$$\nu = \frac{1}{h}(E' - E'')$$

$$= \frac{1}{h}(E_e' - E_e'') + \frac{1}{h}(E_v' - E_v'') + \frac{1}{h}(E_r' - E_r'')$$

这就是分子光谱呈带状的原因。应该指出的是，分子跃迁可以是两种或三种运动形式的同时跃迁，也可以是单一运动形式的独立跃迁。这就造成了分子光谱的复杂性。不同的谱带系由不同的电子能级之间的跃迁所形成，它包含若干谱带。不同的谱带由不同的振动能级之间的跃迁所形成。每一谱带内包含的若干密集谱线，又是由不同转动能级之间的跃迁产生的。归纳起来，分子光谱包括：

电子光谱，位于紫外及可见光区（$\lambda = 0.062 \sim 1.24\mu m$），$E_e$、$E_v$ 和 E_r 都改变。$\Delta E = \Delta E_e +$

$\Delta E_v+\Delta E_r$。

振动光谱，位于近、中红外区($\lambda=1.24\sim2.48\mu m$)，$E_v$ 和 E_r 改变。$\Delta E=\Delta E_v+\Delta E_r$

转动光谱，位于远红外及微波区($\lambda=2.48\mu m\sim1.24cm$)，只有 E_r 改变。$\Delta E=\Delta E_r$。

五、固体光谱

固体的结构比原子、分子的结构复杂得多。因而，固体的光谱也比原子光谱和分子光谱复杂许多。固体光谱由连续的光谱区带组成。谱带的宽度与固体的温度有关，光谱的形状还与固体中的杂质、缺陷等有关。固体光谱可以用固体的能带理论来解释。为此我们介绍一下能带理论。

大量的原子(分子或离子)作有规则的周期性的排列而形成的物体叫晶体。晶体中，由于原子间离得很近，发生电子轨道不同程度的重叠。每个价电子不仅受本身原子核的作用，而且还受相邻原子核的作用。这些价电子可以从一个原子转移到相邻的原子中去，它们已不属于某个原子，而为整个晶体所共有，称为电子的共有化。理论和实践都证明，在由 N 个原子组成的晶体中，电子共有化的结果，使原先每个原子中具有相同能量的价电子能级，因各原子间的相互影响而分裂为 N 个和原来能级很接近的能级。其中最高能级和最低能级之间的间隔由电子轨道重迭的程度而定，一般为几十个电子伏特。然而，实际的晶体，即使小到 $1mm^3$，所包含的原子数通常也达到 $N=10^{19}$ 左右。这就是说原来一个价电子能级，现在分裂成 10^{19} 个新能级，相邻新能级的间隔要小于 $10^{-17}eV$。显然，在实验上要区分这样的间距是不实际的。所以我们可认为分裂后的 N 个能级是连续分布的，称为能带。

由价电子能级分裂而成的能带称为价带，价带可能所有能态都被电子填满成为满带，也可能未被填满。由原子的各激发能级分裂而成的能带，在未被激发的正常情况下没有电子填入，称为空带。在没有为电子所填满的能带中的电子具有导电作用，所以空带和未被电子填满的价带又称为导带。在能带之间有一定的间隙，这个间隙称为禁带，电子不能取这些间隙中的能量值。

晶体中还常含有或挤进杂质，杂质的能级位于禁带中，是分立的，不成为能带。

晶体中的电子被光激发后可以在能带之间、杂质与能带之间跃迁或在带内跃迁，(见图2—72)，所以固体光谱是连续谱。

晶体中除了电子运动外，还有原子在其平衡位置附近的微振动，这种振动叫晶格振动。固体中原子间有着很强的相互作用，因此，晶格振动是所有原子一起参与的共同振动，我们称这种振动模式为格波。可以证明电磁波只与波数(波矢量 K 的数值)相同的格波作用。晶格振动发射或吸收光谱大约在红外区 3~30μm 范围。

六、半导体及其特性应用

一些材料价带已被电子填满，且价带与上面最低的空带(激发能带)间的禁带宽度 ΔE_g 较小，约 0.1～2eV，因此用不大的激发能量(热、光或电场的)就可把价带中的电子激发到空带去。这些进入空带的电子可参与导电。另外在价带顶部附近由于失去电子而留下一些空穴。在外电场作用下，价带中的电子就可受电场作用而填补这些空穴，相当于空穴沿着与电子相反的方向移动(进入较低能态)，即空穴对导电也有贡献. 这样有了较弱的导电性能，这种材料称为半导体。硅(Si)、碲(Te)、砷化镓(GaAs)等都是半导体。

半导体的电导率随温度升高而明显增大，且随着温度的微小变化，其电导率的变化十分灵敏。利用半导体的这种特性可制成各种热敏电阻(有的可反映 0.0005K 的变化)。

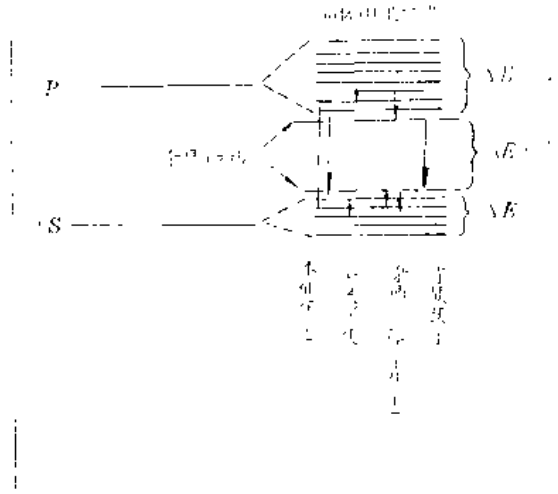


图 2 -72　固体光谱

(1)本征半导体

晶格排列完整，没有杂质的纯净半导体称为本征半导体。在本征半导体中，导带中的电子和价带中的空穴数目相等并同时参与导电。

(2)杂质半导体

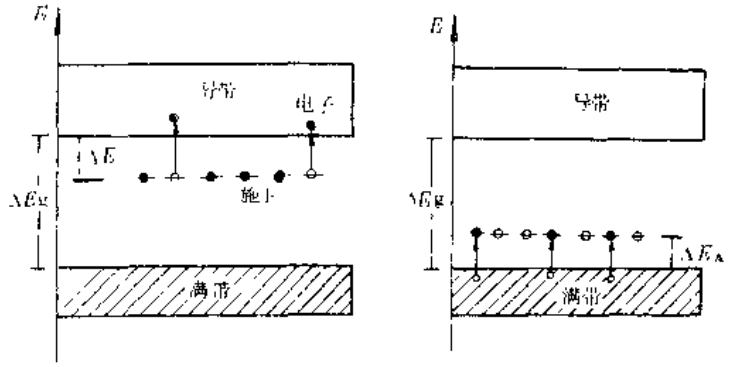
在纯净的半导体中掺入少量的其它元素，则称为杂质半导体，其导电性能较之本征半导体有显著提高，而且导电机构也有所不同。

若在四价元素硅晶体中掺入少量五价元素如磷，掺入的磷原子将在晶体中替代硅原子而构成共价键结构，结果就多出一个价电子在杂质离子的电场范围内运动。这种杂质的多余价电子的能级在禁带中且靠近导带底(如图 2—73a 所示)，因此只要很小的激发能，杂质价电子就可被激发而跃迁到导带去。这种掺杂的结果，使在常温下导带中的自由电子浓度较之纯净半导体大好多倍，从而大大提高了半导体的电导率。这种杂质半导体主要靠电子导电，即电子是多数载流子，空穴是少数载流子，故称它为电子型半导体，或 n 型半导体。

若在硅晶体中掺入少量的三价元素如硼，那么掺入的硼原子在替代晶体中硅原子而构成共价键结构时，将缺少一个电子而出现了一个空穴。这些空着的杂质能级在禁带中且靠近半导体的满带(如图 2—73b 所示)，满带中的电子极易被激发跃迁到杂质能级，同时在满带中形成空穴。这时空穴浓度比纯净半导体中增加了好多倍，其电导率也显著地增加了。这种杂质半导体主要依靠空穴导电，即空穴是多数载流子，电子是少数载流子，故称为空穴型半导体或 p 型半导体。

(3)p-n 结

把一块本征半导体掺以不同杂质，一边成为 p 型，另一边成为 n 型，在两者的交界面处就构成一个 p-n 结。由于 p 型半导体中空穴多而电子少，n 型半导体中电子多而空穴少，因此 n 型中的电子要向 p 型扩散，p 型中的空穴要向 n 型扩散，结果在交界面两侧出现电荷积累，这就是 p-n 结。积累的电荷产生由 n 型指向 p 型的内电场，正好止 n 型的电子和 p 型的空穴继



a. n 型半导体　　b. p 型半导体

图 2—73

续扩散，达到动态平衡时，在交界面处形成一定的接触电势差，如 2—74 所示。$p-n$ 结的接触电势差对 n 区中的电子与 p 区的空穴都是一个势垒，又称阻挡层。

当把外电源正极接到 p 型，负极接到 n 型（称正向联接）时，外电场方向与阻挡层的电场方向相反，使阻挡层势垒降低，于是 n 型中的电子和 p 型中的空穴易于通过阻挡层，继续向

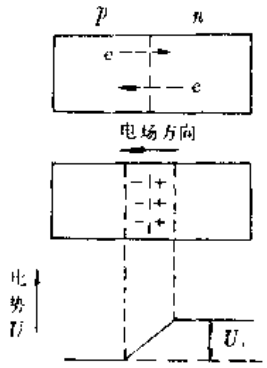


图 2—74　p-n 结

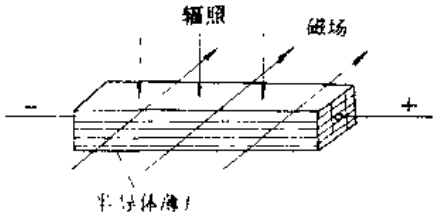


图 2—75　光磁电效应示意图

对方扩散，形成从 p 型到 n 型的正向宏观电流。外电压增加，电流也随之增大。

反过来，如果把负极接到 p 型（称反向联接），外电场方向与阻挡层的电场方向相同，使阻挡层势垒增高。于是 n 型中的电子和 p 型中的空穴都更难于通过阻挡层，只有很小的由 n 型到 p 型的反向电流，而且随外电压的增加，电流很快达到饱和。可见 p-n 结有单向导电性，在无线电及电子线路中可作为良好的整流、检波、振荡等元件使用。

(4)光电导效应

半导体材料在光的照射下，吸收光子，激发出自由载流子，使体内载流子浓度增加，引起电导率的显著增加，称为光电导效应。由于光激发的自由载流子并没有逸出体外，所以光电导又称为内光电效应。光电导是红外探测器中应用得最广泛的量子效应，利用半导体的这种特性而制造的元件，称为光敏电阻。半导体对不同波长的光，光电导的强弱不同，如硫化铅、

硒化铅是重要的红外光敏材料，而硫化镉则是使用于可见光和X光。

(5)光生伏特效应

在光的照射下，半导体 p-n 结区的附近吸收光子后，产生大量的电子—空穴对，p-n 结内的电场将电子扫到 n 区，将空穴扫到 p 区，使 n 区带负电，p 区带正电，从而 p-n 结的两端形成电位差，这种效应称为光生伏特效应。这一效应的实际应用是光电池，受辐照时光电池的两端产生端电压，电压的高低正比于辐照的强度。

(6)光磁电效应

光磁电效应也属于内光电效应。在光的照射下，半导体表面吸收光子后，在上表面产生大量的电子—空穴对，使表面的电子、空穴浓度比体内的电子、空穴浓度大，因此电子、空穴从表面向体内扩散。在扩散的过程中，磁场的作用使电子和空穴各偏向一侧，因此在垂直磁场与扩散方向的两端面上产生电位差，这类现象称为光磁电效应。见图 2—75。

第三章　摄影成像的基本原理

第一节　概述

所谓摄影，是通过光学系统对视场形成的影像，由光化学反应得到目标物图像的成像方法。

可摄影电磁波段指在 0.3μm—1.3μm 范围的近紫外波段、可见光波段、近红外波段能够使摄影胶片感光，并在一定条件下摄制成像的工作范围。这一波段电磁波，可以使胶片上银的卤化物（或其它感光剂）反应，而形成与目标物某一波段的反射强度值相对应的图像。

摄影是遥感中最早、目前看来最为成熟的一种成像方式。成像的过程是光学—光化学反应的过程。过去的摄影在人们头脑中形成的是用带镜头的照像机，对准目标物，启动快门，使胶片感光的过程。但由于激光的应用使得全息成像广泛发展，摄影的含意已超出了传统的方式。

摄影中有主动和被动成像方式。被动方式包括可见光黑白摄影、近红外黑白摄影、彩色摄影、彩色近红外摄影等。它们是常用的成像方式。主动摄影是从光源器材和波段光性、成像方式来划分的。如照明弹（照像弹）摄影、闪光灯摄影、红外雷达、激光雷达和全息摄影。主动摄影必须有一个足够强度的光源。目前，这种方式正进入日常生活当中。摄影分类见表 3—1。

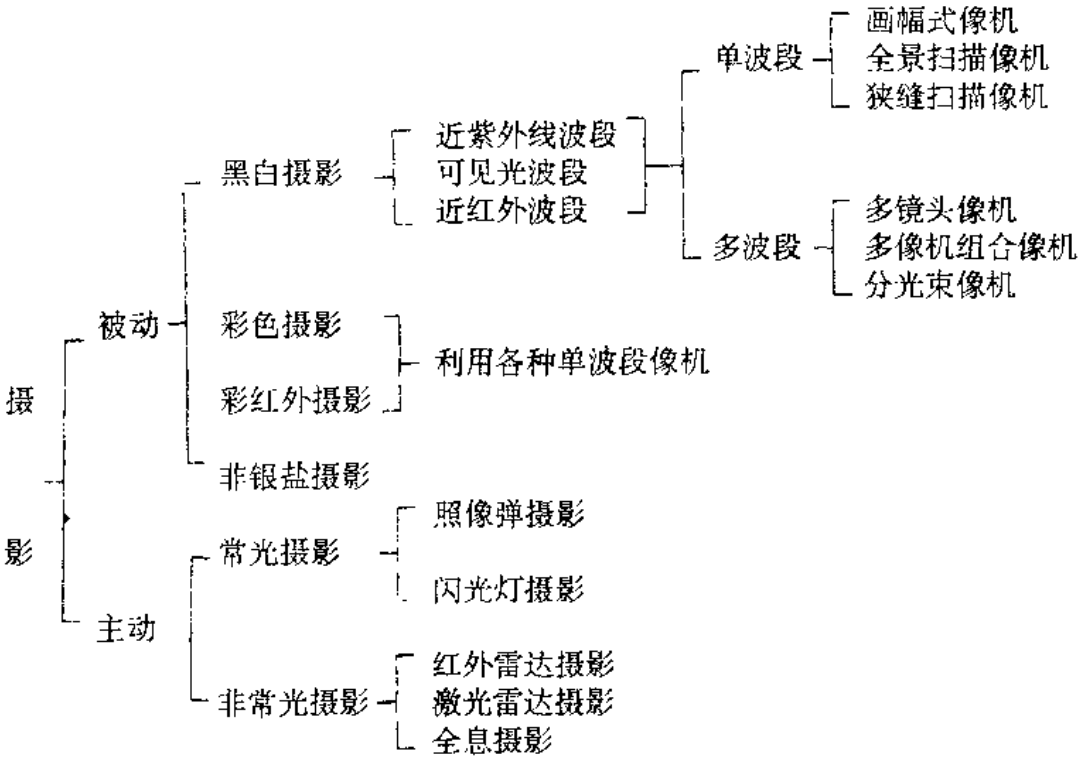


表 3—1　摄影成像分类表

摄影在遥感成像的众多方式中之所以经久不衰，是因为它具有自己独特之处：

(1)最容易得到逼真直观图像；

(2)分辨率高；

(3)设备简单，成本较低；

(4)解译经验丰富，处理设备完善；

(5)图像恢复及处理方法是其它成像方式必须使用的。

正因为如此，摄影在遥感中占有重要地位，在航空遥感中，30年代到50年代是处于独霸地位。目前，在一般地区的航空遥感中，摄影也是首选方法。在航天遥感中，它是开路先锋。在资源遥感中，由于近年航天飞机和空间站的兴起，航天摄影技术在稍被冷落之后，又重新被重视起来。另一方面，摄影技术的一部分还做为把其他成像方式得到的数字图像、信号图像转变为直观图像的方法。因此，摄影技术是遥感技术中不可的缺少的一种方法。

第二节　成像设备与感光材料

一、拍摄设备

拍摄设备是指各类照像机(或称摄影机)。虽然照像机千差万别，但基本结构和基本原理是相同的。基本结构由镜头、光圈、快门和暗箱几部分构成。

照像机的功能是使物体反射的电磁波通过物镜成像于焦平面上，并使焦平面上的感光材料正确感光。照像机物镜成像原理，简单地说就是透镜成像过程(关于透镜成像原理见第二章第二节)。单个透镜会产生像差，为了消除各种像差，而制成多个透镜组成的透镜组。如凸透镜和凹透镜球面像差正好相反，因此，可以用适当的凸透镜和凹透镜组合起来消除球面像差和彗形像差或用非球面透镜来修正球面像差。用控制光圈缩小透镜表面透光部分，也能降低球面像差和彗形像差。

对于像散，像场弯曲，畸变色差，都可以通过适当的凸、凹透镜组合来减少误差。图3—1是一些典型的摄影镜头，可以看出摄影镜头是由多个透镜组成。

但是，由于摄影波段范围相当宽，单用一种镜头难于消除全部色差。如灰色镜头是用于蓝—黄波段摄影。复灰色镜头是用于整个可见光波段。对于近红外波段摄影，若用复灰色镜头时还要加一个凸透镜来纠正。

对于照像机的其它部分就不赘述了。

二、黑白感光材料基本结构

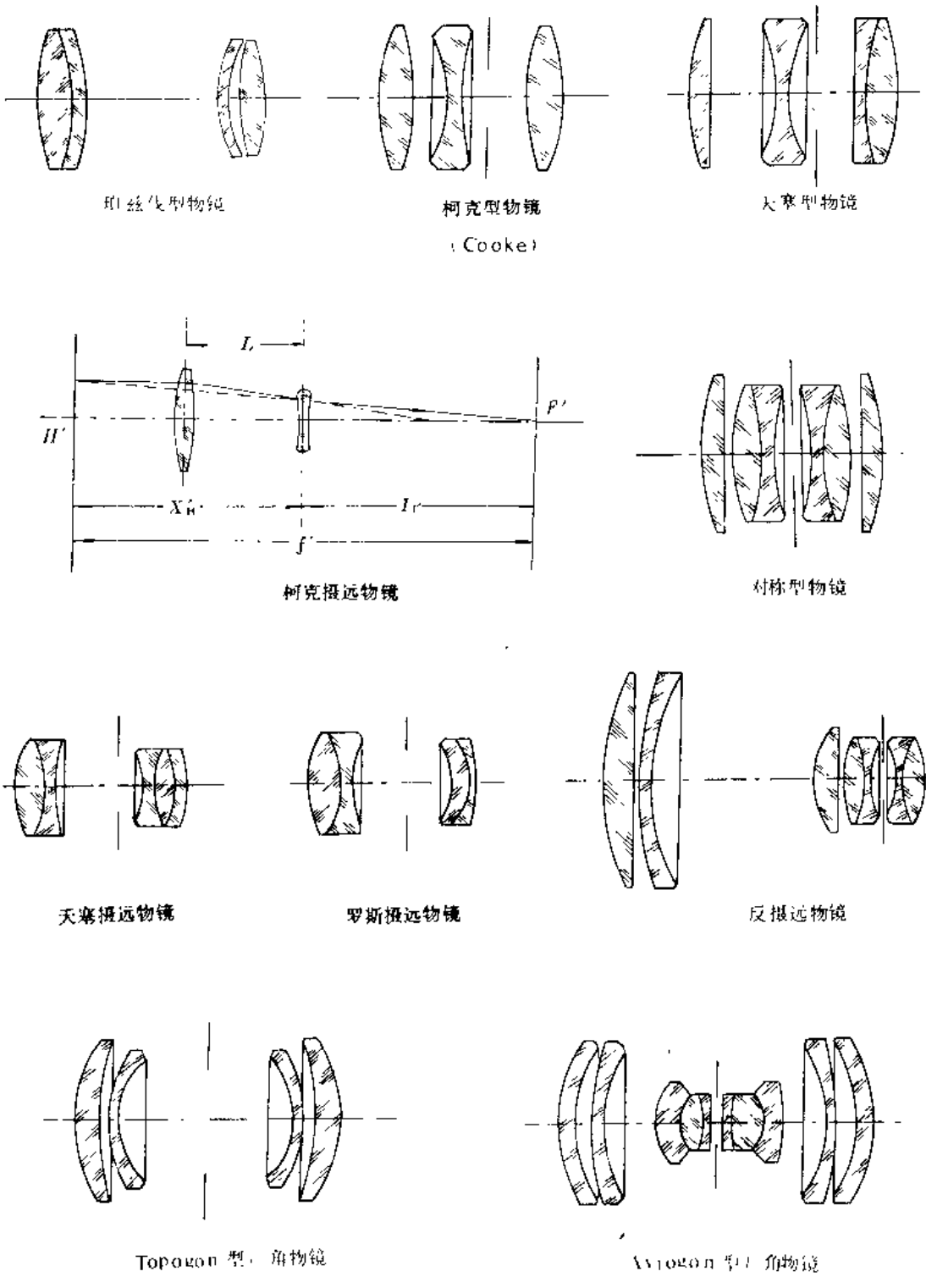
现代摄影底片一般使用软片，也偶使硬片。最后形成直观图像(像片)时，主要用像纸，有时也用软片。不论哪一种黑白感光材料都有一个大致相同的基本结构：它是依次由保护层、感光乳剂层、底层、片基、防光晕层及防静电层、防卷曲层构成(图3—2)。

依次简要介绍一下各层成分与作用。

1、保护层

保护层的成分是明胶。它能防止软片在卷动过程中由于摩擦而产生的伤痕。因为软片上的摩擦伤痕在显影时会形成条状灰雾，洗像之后会在正片影像上出现相应的条纹。

2、感光乳剂层



柯克型物镜
（Cooke）

柯克摄远物镜

对称型物镜

天塞摄远物镜

罗斯摄远物镜

反摄远物镜

Topogon 型广角物镜

Aviogon 型广角物镜

图 3—1　几种典型摄影镜头

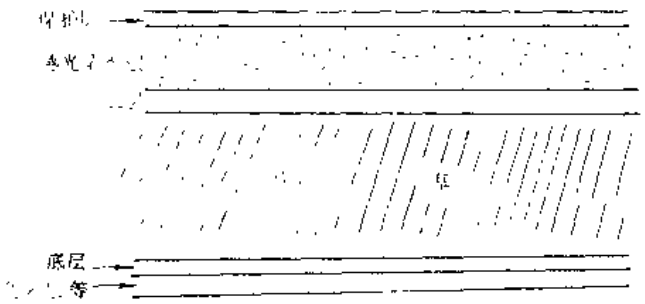


图 3—2　黑白片结构示意图

感光乳剂层的成分为感光剂和支持剂。

感光剂的成分是卤化银(氯化银、溴化银、碘化银)。溴化银感光最快,所以遥感应用最多。碘化银感光很慢,一般不单独使用。但若与溴化银合用,则能提高乳剂的感光性。所以摄影用的负片以及有些透明正片的乳剂中都含有少量的碘化银。溴化银和碘化银合成的乳剂叫做碘溴化银乳剂。氯化银感光较慢,一般用于制造如像纸之类的低感乳剂。感光剂是感光材料中光化学反应的主体部分。

支持剂的成分是明胶。它使感光剂牢固而均匀粘着在片基上,并使之彼此分离,同时具有一定的孔隙,能使显影充分进行。

乳剂层中乳剂颗粒常为八面体,显微镜下呈六角形、三角形、梯形、圆形等(图 3—3)。不管外形什么样,其内部结构都是立方体。

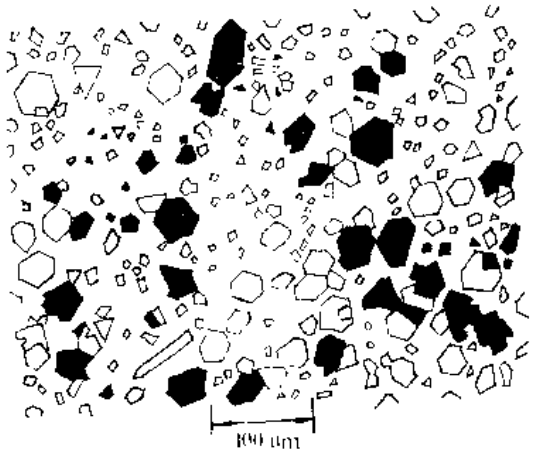


图 3—3　乳剂层中卤化银颗粒显微照片

(据俞浩清,1985)

乳剂颗粒大、感光快、分辨率低；颗粒小、感光慢、分辨率高。

3、底层

软片的底层是由明胶和片基溶剂的混合物组成，涂布于片基正背两面。它使正面乳剂层和背面附加层与片基牢固粘着。像纸的底层是明胶加白色的硫酸钡涂层，又叫钡底层。钡底层除具有粘合作用外，还能增加纸基表面的洁白度。

4、片基

硬片的片基成分为玻璃；软片有醋酸片基、涤纶片基和聚碳酸酯片基等；像纸的片基为纸。片基的作用是支持乳剂层。片基一般要求稳定性好（化学性能、物理性能），耐水性强，机械强度大，不易燃烧，易涂布乳剂等。

5、防光晕层

防光晕层的组成根据乳剂感光性不同，选取不同色料。通常正色片涂红色，全色片涂绿色或灰色。防光晕层是用来吸收卤化银晶体对光的散射光和穿过片基再由背面反射回来的光，从而防止产生的光晕。因为光晕（图3－4）可使不该曝光的卤化银颗粒也感光。由乳剂中散射作用产生的光晕称为漫射光晕。乳剂层愈薄，漫射光晕愈小。由片基背面反射光产生的光晕，称反射光晕。片基愈薄，反射光晕愈小。

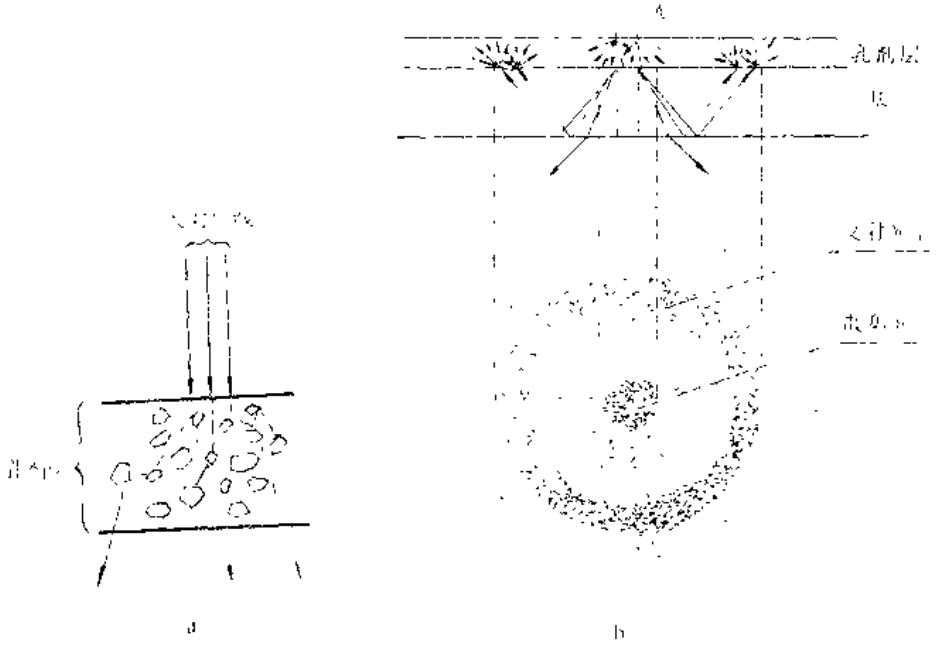


图3—4　光晕产生原理图

（据俞济清，1985）

6、防静电层

防静电层可选取甘油、硝酸钾、烷基胺盐、苯胺化合物等涂布。可以增强软片的导电性，减少摩擦产生的静电。因为静电可产生静电火花，会使乳剂层感光，产生树枝状或绒毛状的斑痕。静电还可使软片吸着尘埃等杂质，可划伤、弄脏乳剂层。

7、防卷曲层

采用成膜物质，涂布软片背面；或用不成膜物质处理软片背面。以增加背面强度防止软片涂布乳剂层后向正面卷曲。

黑白片的种类有紫外片、色盲片、正色片、分色片、全色片、红外片等。它们的光谱感光范围见图 3—5 和表 3—2。

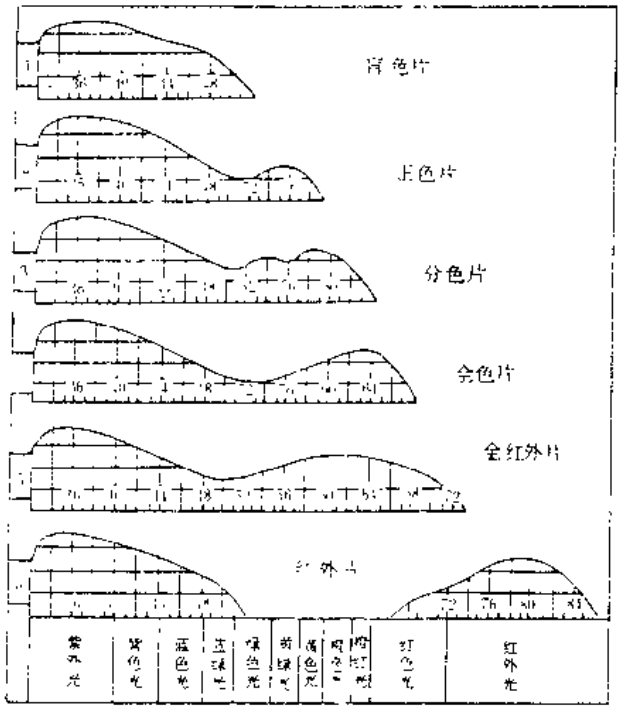


图 3—5　各种感光材料的光谱感光范围

（据俞浩清，1985）

表 3—2　黑白感光片光谱感光范围

名　称	型　号	光谱感光范围(nm)	名　称	型　号	光谱感光范围(nm)
紫外片	Ⅰ　型	250～500	正色片	黄 快 型	300～600
	Ⅱ　型	250～500		黄特硬型	300～600
	Ⅲ　型	200～400	全色片	红 快 型	300～700
色盲片	蓝 快 型	250～500		红特硬型	300～700
	蓝 硬 型	250～500	红外片	Ⅰ　型	最长至 750
	蓝特硬型	250～500		Ⅱ　型	最长至 800
	蓝超硬型	250～500		Ⅲ　型	最长至 840

三、彩色—彩红外摄影感光材料

（一）彩色片的结构

现在彩色摄影都使用多层彩色片。它的基本结构如图 3—6。与黑白片相同部分在此就不讨论了。只讨论感光乳剂层。

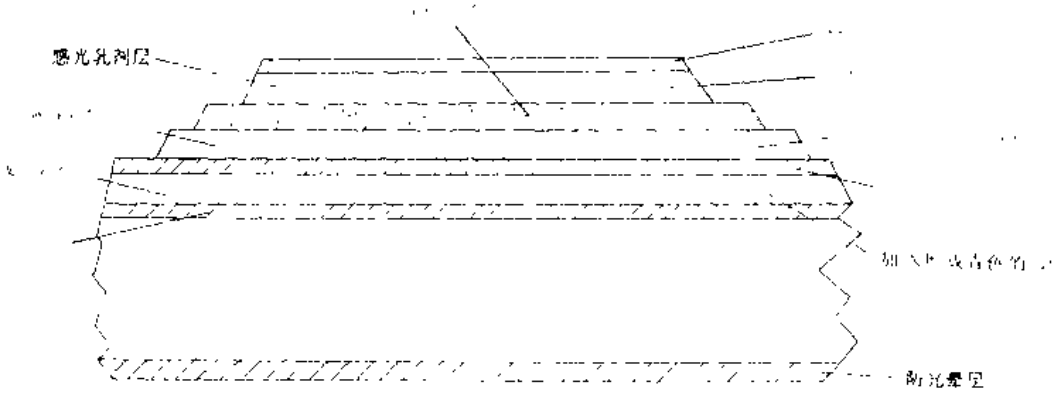


图 3—6　多层彩色片结构示意图

（据俞浩清，1985）

多层彩色片有三层卤化银感光乳剂层，对蓝光都很敏感。上层采用未经光学增感的盲色乳剂并加入能产生黄色染料的黄色成色剂。它只能感蓝光；中层采用正色乳剂并加能产生品红色染料的品红色成色剂，只感受蓝光和绿光，不感受红光。在上层与中层间加一层黄色滤光层后，吸收了通过上层后的剩余蓝光，中间层就只感绿光了。下层采用全色乳剂并加能产生青色染料的青色成色剂，下层为全色乳剂，可感受蓝光和红光，而对绿光的感受能力特别小。各层的感色性如图 3—7a 所示。入色光经过上层、黄色滤光层、中层，只剩红光，所以下层只感红光（图 3—7b），曝光后，经显影上、中、下层分别形成黄色、品红色、青色影像。再漂去黑色金属银像，就得到由染料组成的彩色图像。

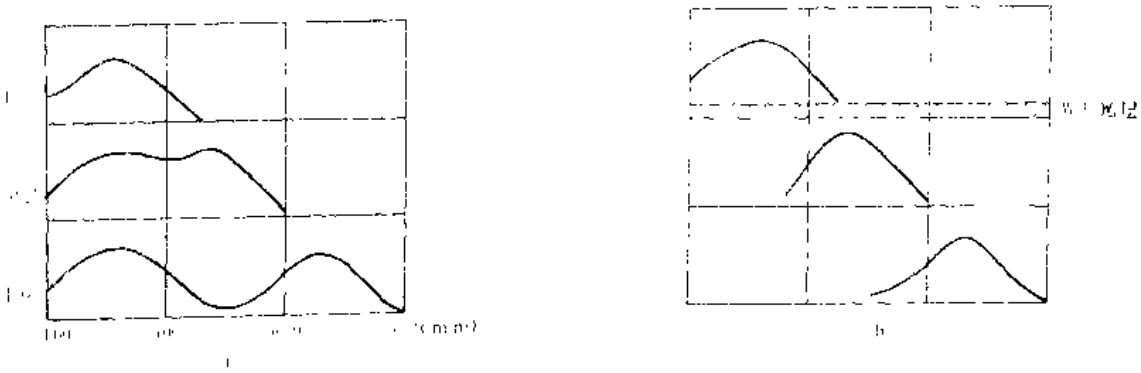


图 3—7　三层乳剂的分层感色 a. 和有效感色性 b.

（据俞浩清，1985）

（二）彩红外感光材料

彩红外摄影可以认为彩色摄影的一个变种。它是把目标物绿、红、近红外波段信息记录下来。彩红外感光片的基本结构与彩色片结构相同，只是没有感蓝乳剂，而增加了感近红外的乳剂层。乳剂层由上到下分感红外层、绿感光层和红感光层。它们分别含青、黄、品红成色剂。

第三节　光化学成像基本原理

一、概述

在摄影中不论是黑白摄影、彩色摄影、彩红外摄影基本设备和基本过程是相同的，只是采用的片种不同和显影剂、定影剂的差别。它们的基本过程是通过照像机(包括航摄仪)拍摄，使其内胶片感光，再将胶片进行显影、定影得到负片，然后将负片通过接触印像或放大，使感光材料感光，经类似于负片形成过程，得到直观图像(正片)。

二、光化学反应

光化学反应是指只有在光作用下才能进行的化学反应，即分子吸收光能，激发到高能态，然后电子激发态分子进行化学反应的过程。

光是一种电磁波，具有波动和微粒二重性。光化学即与电磁辐射及其与物质相互作用有关，是处于化学和物理交叉点上的科学。光化学离不开光的吸收与发射过程。

可见光的波长范围是 400—760nm，近紫外线波长为 150—400nm，近红外光的波长为 760nm—3000nm。光子的能量随光的波长增大而下降。一个光子的能量为 ε，

$$\varepsilon = h\nu$$

而波长为 λ，

$$\lambda = c/\nu \qquad 则 \qquad \varepsilon = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

式中 h 为普朗克常数，c 为光速，ν 为频率。对光化学反应有效的是可见光、紫外光和近红外线。

光化学反应中分子的活化能来自光吸收，吸收光可以影响化学反应速度，可以在热反应不能发生的情况下实现化学反应。光化学反应与温度无关，且比热反应有更高的选择性。

(一) 光化学基本定律

1、光化学第一定律："只有被分子吸收的光才能引起分子的光化学反应。"这是 19 世纪由格罗杜斯和德拉波(Grotthus and Draptr)总结出来的。但这并不意味着吸收的光一定能引起化学反应。应用该定律于光化学反应时，必须知道初级过程吸收的能量。光化学过程包括初级过程和次级过程。初级过程指分子吸收光子生成激发态分子开始，以激发态分子消失或以该激发态分子活性转变为不大于同类分子而告终。光化学次级过程为初级过程后发生的一系列过程。根据这个定律，在进行光化学反应研究时，要注意光源，反应器材料及溶剂等的选择。

2、光化学第二定律：在初级反应中，一反应分子吸收一个光子而被活化。这是 20 世纪由斯塔克(Stark)和爱因斯坦(Einstein)提出的。它描述了被吸收光子与被活化分子之间的定量关系，又称为光化学当量定律。它严格地只适用于光化学初级过程或光的吸收，所适用的光强度范围是 10^{14}～10^{18}光子·秒$^{-1}$。

(二) 量子产率

为了表达光化学反应的效率，引入量子产率的概念，对于探讨光化学反应机理十分有用。

$$M + h\nu \rightarrow M^*$$

M^* 为 M 的电子激发态，称为活化分子。活化分子有可能直接变成产物，也可能与低能量分子相撞而失活，或引发其它次级反应。用 φ 表示量子产率，对于指定反应：

$$\varphi = \frac{\text{反应物分子消失数目}}{\text{吸收光子数目}} = \frac{\text{反应物消失的物质的量}}{\text{吸收光子物质的量}}$$

也可根据产物分子生成数目来定义：

$$\varphi' = \frac{\text{产物分子生成数目}}{\text{吸收光子数目}} = \frac{\text{产物生成的物质的量}}{\text{吸收光子物质的量}}$$

还可以用反应速率 r 和吸收光子的速率 I_a 来定义量子产率：

$$\varphi = \frac{r}{I_a}$$

r 和 I_a 为可测量，故量子产率可由实验测定。如果一个光化学过程只包括初级过程，则问题较为简单。如初级过程后接着进行次级过程，则由于活性分子所进行的次级过程不同，φ 可以小于 1，也可以大于 1。

(三)光吸收的结果

分子吸收光子，电子跃迁至高能态，产生电子激发态分子。激发态分子极不稳定，它可以是光物理过程或光化学过程而使能量衰减。

1、光物理过程：包括分子内传能的辐射跃迁和无辐射跃迁及分子间传能。结果使激发态分子能量衰减。光物理过程中均包含激发态分子，故为初级过程。

2、光化学过程，激发态分子可以通过下列过程使能量衰减。

(1)离解　　$M^* \rightarrow R + N$

(2)异构化　　$M^* \rightarrow M'$

(3)双分子反应　　$M^* + K \rightarrow E + P$

以上三种过程均含激发态分子，故为初级过程。初级过程的生成物又可进一步反应出现次级过程。光化学过程导致光化学反应的发生。

光化学初级过程包括光吸收和激发态分子能量衰减的光物理和光化学过程，对子吸收光子后，激发态分子能否发生光化学反应，则取决于激发态分子发生光化学过程和能量衰减的光物理过程的相对速率。光化学反应速率一般只与入射光强度有关，而与反应物浓度无关，即为零级反应。根据光化学第二定律，初级反应的速率就等于吸收光子的速率 I_a。因此，光吸收的结果，如要发生光化学反应，必须有足够的光强度。

三、光对感光层的作用

感光层的感光剂是卤化银，主要是溴化银。下面以溴化银为例来说明光对感光层的作用。

溴化银的晶体结构是正立方体，如图 3—8 所示。感光层曝光时，光能为 $h\nu$ 的光量子作用子溴化银晶体上，溴离子首先吸收了光量子成为激发态溴离子，被激发的电子跃出，使溴离子成为溴原子，其反应式为

$$Br^- + h\nu(\text{光}) \rightarrow Br + e(\text{电子})$$

根据某些推断认为，溴化银晶体上并非是完全均匀一致的，各种原因可以存在晶格缺陷和位错。如图 3—9 和图 3—10。

电子离开溴离子后，在游动过程中，当遇到结晶格子变形和具有异类夹杂物（Ag 和 Ag_2S）的地方便停留下来，这些地方往往是晶体的角上、边上或晶体内不完整处。从能量角度

看，这些地方就像一个陷坑一样，自由电子会被陷落，并会牢固地停留住。这些地方被称为是感光中心，因此，感光中心便成了吸附许多电子的带电体了，从而形成了负电场。随着光解的进行，电子不断聚集，电场逐渐加强。在晶体内格间的银离子会在电场作用下，向电场移动，并实现银离子的还原反应。

$$Ag^+ + e \rightarrow Ag$$

以上 Br 离子氧化和银离子还原即为照像的第一次光化学反应。还原的银被固定在感光中心处，使感光中心扩大。扩大了的感光中心又能有效地捕获随后光解出来的电子。这样，只要吸收了光而不断地有电子释出，感光中心就不断扩大，当银原子聚集量达某种程度时，就达到了可显影的阶段。这时扩大了的感光中心被称为显影中心或显影核，其主体是中性银。这些显影核便是构成潜像的潜像核。具有一个以上显影核的溴化银晶体就能够显影。整个感光层有无数个大小不同的潜像核，由此，便构成了潜影。

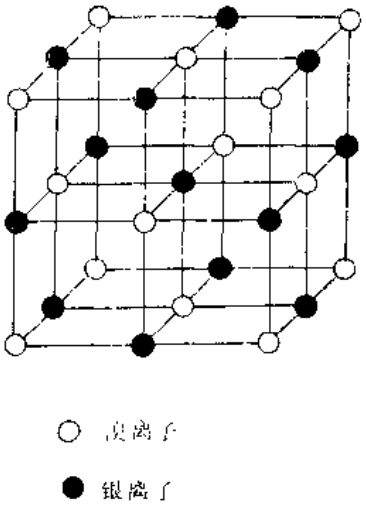


图 3—8　溴化银晶体结构
（据俞浩清，1985）

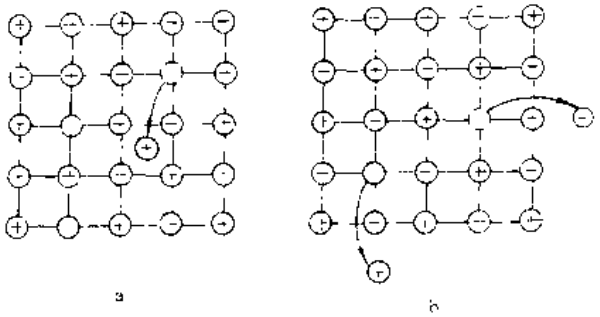


图 3—9　溴化银点阵缺陷
（据俞浩清，1985）

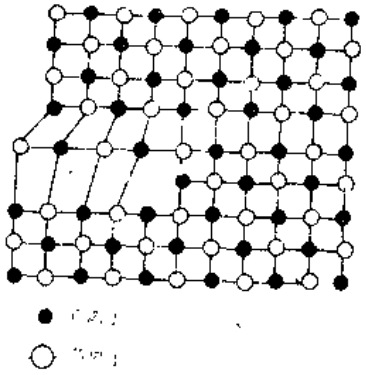


图 3—10　溴化银点阵错位
（据俞浩清，1985）

溴化银晶体受光作用分解出来的溴原子结合成分子，被晶体周围明胶吸收，而离开晶体，从此，晶体结构再重新调整，重新趋于平衡。因此，光对感光层作用的结果，是使其实现光化学反应，形成潜像。如图 3—11 所示。

四、黑白显影与定影过程

（一）显影

显影是利用显影液使已曝光的溴化银继续还原为银，扩大潜影，将潜影变为影像的过程。

1 显影机理

从化学角度看，显影是一种还原过程。有理论认为，显影过程即由显影剂中还原剂提供

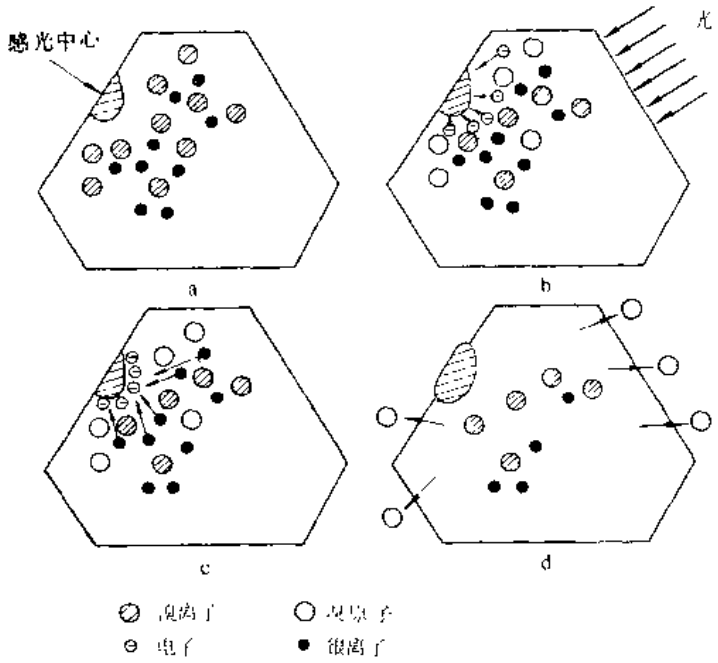


图 3—11 潜像形成的过程

(据俞浩清,1985)

a. 为表面具有感光中心的溴化银晶体(图中仅表示一部分银离子和溴离子);

b. 为曝光后,受光的溴离子释出的电子流向感光中心;

c. 电子达到感光中心使该中心带负电,失去平衡的银离子流向感光中心;

d. 到达感光中心的银离子得到电子还原成银原子,使感光中心扩大,溴原子被晶体周围的明胶所吸收

电子给潜影核,使潜影中心吸引并还原银离子为金属银。因此说,显影是一种由潜影所催化的选择性还原过程。

$$Ag^+ + \text{还原剂} \rightarrow Ag + \text{氧化物}$$

(曝过光的)

曝过光的卤化银还原有两种途径:①化学显影:还原剂使卤化银晶体粒子中银离子还原成金属银;②物理显影:由显影液提供银离子,并还原成金属银。

用电化学理论可以初步理解显影机理。把显影反应看成为一个电池反应阳极为显影核的银,阴极为不溶性电极。由于实际体系的不可逆性,采用近似方法处理。对于阳极有电极反应:

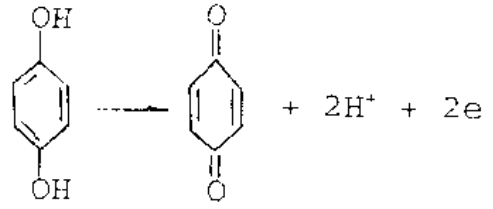
$$Ag^+ + e \rightarrow Ag$$

能斯特(Nernst)方程式为:

$$E_{Ag^+/Ag} = E^{\ominus}_{Ag^+/Ag} + \frac{RT}{F}\ln a_{Ag^+}$$

a_{Ag^+}为银离子活度,$E^{\ominus}_{Ag^+/Ag}$为标准电极电势,E 与 a_{Ag^+}及温度有关,在指定温度时,E 只与 a_{Ag^+}有关,且当 a_{Ag^+}增大时,$E_{Ag^+/Ag}$也增大。由于显影液为 AgBr 所饱和,因而,由溶解平衡可知,银离子活度又取决于溴离子的活度。

对于阴极,如显影剂的还原剂为对苯二酚,电极反应为:



对苯二酚　　醌

能斯特方程式为：

$$E_{氧化态/还原态} = E^{\ominus}_{氧化态/还原态} + \frac{RT}{F}\ln\frac{a_{氧化态}\cdot a_{H^+}^2}{a_{还原态}}$$

由上式看出，还原剂的 E 与还原剂的氧化态和还原态活度有关，同时也与 pH 值有关。当 pH 值越高时，E 还原剂变得越负，还原性更强。整个电池电动势 E 为：

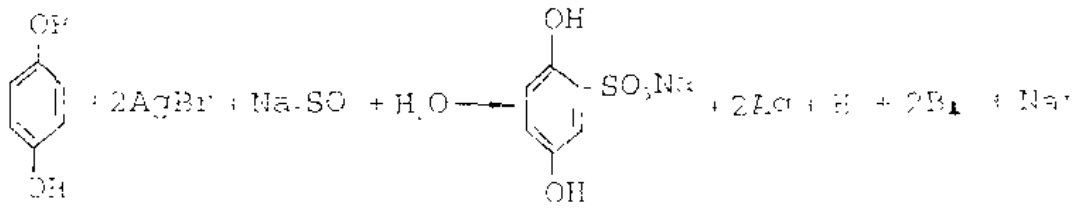
$$E = E_+ - E_-$$

从理论上讲，只要 $E>0$，银离子的还原反应就可以进行，即可以显影。但要想真正实现以一定的速度显影，需使 E 达到一定的值。E 取决于 E_+ 和 E_-，也就是与温度、离子活度及溶液 pH 有关，因此，显影的条件是必须注意的，要选择能使 E 达到合理值的条件。

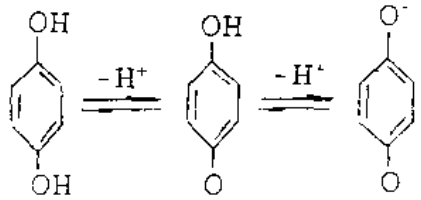
应用电化学方法可以概括说明显影原理，利用 E 值来说明显影反应的定性方向，但还存在许多缺陷。如①尽管 AgBr 溶解度非常小，即 Ag^+ 含量应当很低，但显影速度却相当快。原因应考虑 AgBr 的过饱和所致；②物理显影因 Ag^+ 浓度大，但显影速度却比化学显影慢，用电化学方法解释不通；③加入促进 AgBr 溶解的硫代硫酸钠，并未促进显影，反而使 Ag^+ 浓度下降。为弥补这些无法解释的现象，有人提出了其它的论说。如沃尔默(Velomer)指出：潜影核是具有高度分散的中性银的聚合，呈胶体，具有特殊的吸附性能，据此，银核吸附了显影液而使浓度增大，反应得以进行。此外，还有接触说和表面电荷说。显影机理的各种论说都是以银离子在显影核上得以还原为特征的。

2、显影化学反应

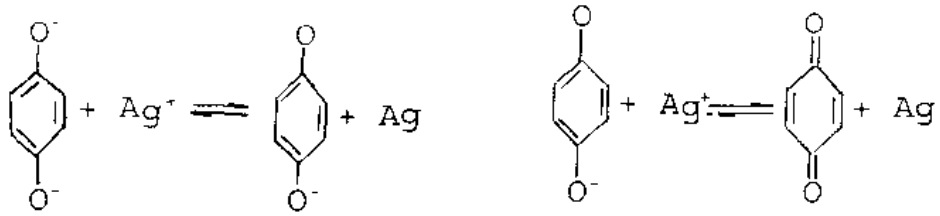
当以对苯二酚为还原剂，以亚硫酸钠为保护剂的显影剂显影过程的化学反应为：



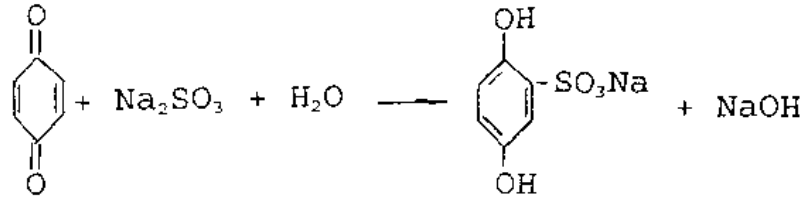
其反应机理为：



该过程与 pH 值有关。进一步



Ag^+被还原，而对苯二酚氧化成了醌。在亚硫酸钠作用下，可使上述反应成为不可逆反应：



因此，亚硫酸钠是一种保护剂，用以抑制空气对显影液的氧化。制止有色物质的形成以及防止对苯二醌使明胶变软或变硬。

如果显影液中有足够的的亚硫酸钠，也能具有使卤化银溶解的作用，使溶液中含有Ag^+，引起物理显影：

$$AgBr + 2SO_3^{2-} \rightarrow [Ag(SO_3)_2]^{3-} + Br^-$$

$$[Ag(SO_3)_2]^{3-} \rightleftharpoons Ag^+ + 2SO_3^{2-}$$

其它种类的显影剂也具有同样类似的反应。

显影液还可以利用两种显影剂相结合的超加和性来显影。如对甲氨基苯酚和对苯二酚的结合，或 1-苯基-3-吡唑啉酮和对苯二酚的结合，其反应机理是：

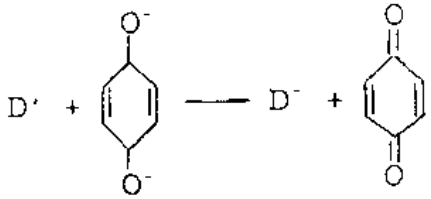
(1)第一个显影剂吸附在颗粒表面；

(2)银离子被第一个显影剂还原：

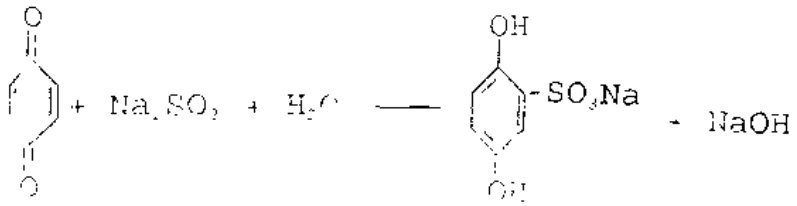
$$Ag^+ + D^- \text{（显影剂）} \rightarrow Ag + D\cdot$$

式中D^-是还原剂，$D\cdot$是还原剂的自由基。

(3)第二个还原剂使第一个还原剂再生：



(4)与亚硫酸钠反应除去第二个显影剂的氧化物：



第(3)、(4)步进行的非常快，(2)步是较慢的一步反应。

为提高曝过光的卤化银还原选择性，显影液中加入 KBr 为“抑制剂”和苯骈三氮唑为“防灰雾剂”。因此，显影剂大致可以由四个方面的物质构成：显影剂、防氧化剂、抑制剂和促进剂(见表 3—3)。

表 3—3 典型显影液的组成

组　成	示　例
显 影 剂	对苯二酚　1-苯基吡唑啉酮　N-甲基-4-氨基苯酚
碱或促进剂	碳酸钠　硼砂　氢氧化钠
保 护 剂	亚硫酸钠
抑 制 剂	溴化钾或有机防雾剂

(二)定影

定影的目的是溶去没有感光的卤化银，并使其后遇光也不再起变化。定影液不能溶解已显影的银。而银盐的溶解通过形成可溶性络盐而除去。反应式为：

$$AgBr+S_2O_3^{2-}\rightleftharpoons[AgS_2O_3]^-+Br^-$$

吸附的不溶解

$$[AgS_2O_3]^-+S_2O_3^{2-}\rightleftharpoons[Ag(S_2O_3)_2]^{3-}$$

溶解的

在足够量的 $Na_2S_2O_3$ 溶液中，AgBr 还可以生成 $[Ag_2(S_2O_3)_3]^{2-}$ 和 $[Ag_3(S_2O_3)_4]^{5-}$ 络离子。因而定影液中需含有足量的 $Na_2S_2O_3$。

最后形成的银络离子溶于水，是无色的，对空气和光稳定，带有甜味，加热至 100 ℃时可析出 $Ag_2S\downarrow$。

五、彩色片的显影和定影过程

彩色片的光化学反应同黑白片一样，但彩色片是由三层卤化银感光乳剂层构成，其结构如图(3—6)所示。在显影过程中，由于各层加入的成色剂不同，形成不同的染料。影像的色彩是由减色法利用三原色混合而呈现的。因此，彩色的显影化学反应比黑白要复杂得多。

(一) 显影

由费希尔(Ficher)提出了从感光卤化银得到染料影像的反应，并采用了通常所说的发色显影，其原理为：反应中感光卤化银在含有以 4-氨基苯胺(对苯二胺)或其衍生物作为显影剂的显影液中显影，当感光卤化银还原为金属银时，显影剂被氧化，而被氧化的显影剂与称为成色剂的或偶合成分的第二组分反应形成染料成色剂，可存在显影液中，也可以在乳剂层中，这种方法被称为二级彩色摄影。即

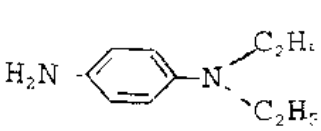
显影剂＋曝过光的卤化银→被氧化的显影剂＋Ag^+＋X^-

被氧化的显影剂＋成色剂→染料

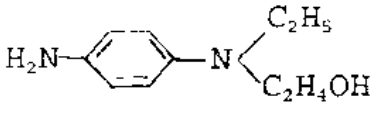
这种显影必须满足的条件是：(1)用适当的成色剂就可以形成正确色调的染料；(2)染料必须稳定；(3) 对人体无过敏性刺激作用；(4)溶液必须有足够的还原能力，且偶合迅速；(5)碱性溶液能抗空气氧化。

1、显影化学反应

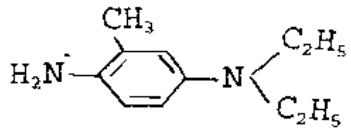
彩色显影剂与成色剂配合生成染料。显影剂中的活性基因为氨基。氨基酚和次苯胺显影剂具有这种性能。主要的显影剂有：



二乙基对苯二氨



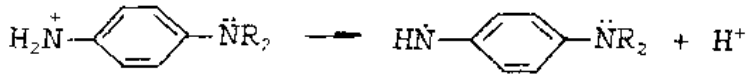
乙基氨乙基对苯二氨

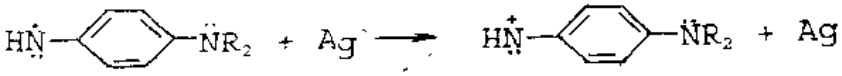


2-氨基-5-二乙氨基甲苯

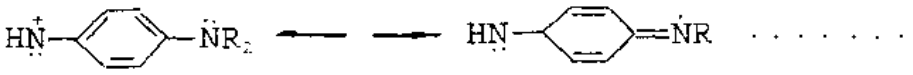
如以醌二亚胺为显色剂的显色反应历程为：



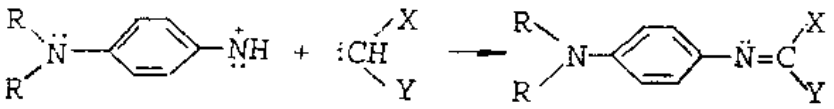




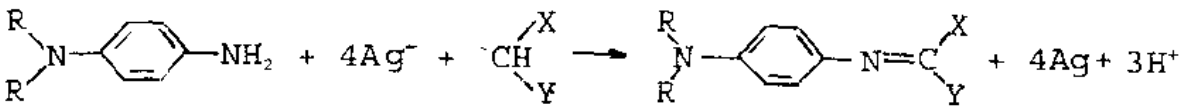
是醌二亚胺的氧化和银离子的还原过程。两种稳定的醌二亚胺共振结构是：



在 pH≈10－12 溶液中显影，醌二亚胺是偶合物质，与成色剂反应，首先生成一种隐色染料：



显影总反应为：



显色剂　　成色剂　　染料

彩色显影过程生成的染料颜色由成色剂的组成所决定。成色剂的选择应当是使上层中生成黄色染料，中层中生成品红染料，下层为青色染料。因此，要选择不同的成色剂，显影过程决定反应生成合理染料的重要因素与成色剂有直接关系。

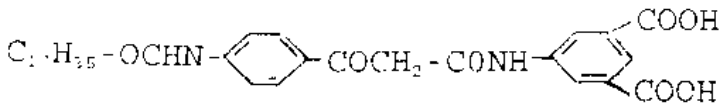
2、成色剂

可作为成色剂的物质范围很广，一般为弱酸，尽可能为无色物质。要求与显影剂形成的

染料色彩正确，有一定的反应速度，生成的染料稳定。目前使用较多的方法是把成色剂加在各层乳剂中，不使成色剂扩散到其它乳剂层中。

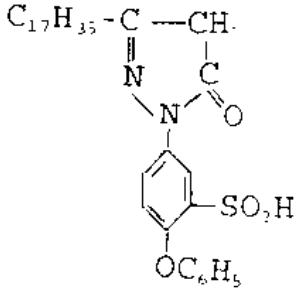
非扩散性的成色剂分子有：

黄色成色剂：



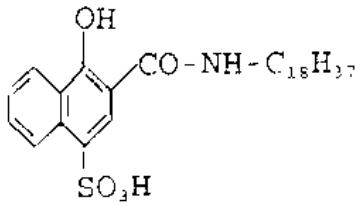
N-(4'-十八酰氨基苯酰乙酰基)3,5 二羟基苯胺

品红成色剂：



1(3'-磺基-4'苯氧基苯基-)-3-十七烷基吡唑酮(5)

青色成色剂：



1 羟基-4-磺酸基-萘酰(2)替十八胺

以上三种成色剂与显色剂反应生成相应颜色的染料。

成色剂一般从具有芳香族胺类、苯酚类、萘酚类、活性甲撑化合物类中选择。关于成色剂的化学结构与分光吸收的关系，有许多专门的研究，在此不再叙述。

实际应用的所有显影物质都有毒性，与皮肤接触后，能起小疹，当侵入机体内部时，则能出现严重的中毒现象，使用时应当注意。

(二) 漂白与定影

在显影剂中，染料形成的同时，银离子被还原为金属银，金属银的存在会影响染料的纯度和鲜艳度，因此，必须除去，银的去除过程称为漂白。

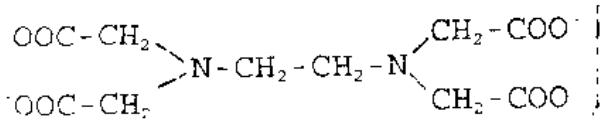
去除银的方法是采用铁氰化物和硫代硫酸钠组成的还原性溶液。具体反应如下式：

$$Ag+K_3Fe(CN)_6+KBr\rightarrow AgBr+K_4Fe(CN)_6$$

或者是在硫代硫酸钠存在下，用乙二胺四醋酸铁氧化并溶解银像，以达到漂白一定影的目的，最后仅有色素影像被留下。

$$Ag+Na[Fe^{3+}Y]+nNa_2S_2O_3\rightarrow Na_x[Fe^{2+}Y]+Na_{2n-1}[Ag(S_2O_3)_n]$$

式中 Y 为



这一方法的另一优点是工业生产中流出的废水危害少。

（三）多层彩色反转片的成色过程 多层彩色反转片的基本结构与彩色负片相似，有感蓝、感绿、感红三个含有成色剂的感光层。在对彩色物体摄影曝光后，要通过首次显影、水洗、反转处理、彩色显影、调节、漂白、定影、水洗、稳定、干燥等冲洗过程。其首次显影、反转处理、彩色显影、漂白与定影是反转片冲洗的重要几步。

首次显影（简称"首显"）其实质与黑白显影过程原理相同，因此又称黑白显影。首显时黑白显影液与反转片三层感光层中感光的卤化银潜影反应，使之成为三层黑色金属银的影像（参见黑白片的显影与定影过程）。这一过程中显影液与各层彩色成色剂作用不生成染料。

反转处理的目的是使在首显过程中未被显影的卤化银全部形成能被彩色显影的潜影。这一过程可以采取二次曝光的办法来实现，也可以利用反转液来完成。在反转液中使首显后余下的卤化银全部形成潜影银。

彩显过程是从首显阶段保留下来的卤化银颗粒经反转液处理后生成了起显影中心作用的银核进入彩显液时，发生彩色显影过程的。首先生成金属银，被氧化的显影剂与成色剂形成染料。胶片的每一层乳剂都有成色剂，因此，黄、品红和青染料在它们各相应的乳剂层中形成（参见彩色负片彩显过程）。把整个反转片处理过程由如下示意图表示（图 3—12）。

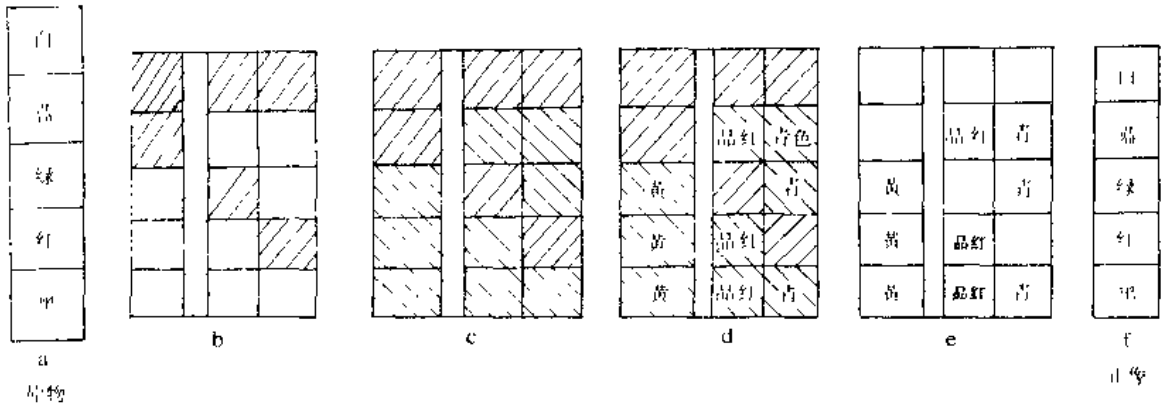


图 3—12 反转片成色过程示意图

漂白是为定影时去掉首显、彩显时负、正两种金属银影像打基础，将金属

银转化成卤化银，以便在定影液中除去。同时，要漂去黄滤光层、防光晕层。漂白与定影的反应过程同彩色负片漂白与定影过程。经过定影后的染料影像，即合成为彩色正像。图中a为原物体；b为首显后形成的黑白负像；c为反转处理后黑白负像加上正像潜影；d为彩显后黑白负像、正像染料像；e为漂白定影后除于两种金属银像保留各层成色染料；f为各层染料叠加形成的彩色正像。

第四节　全息摄影基本原理

普通照相是通过透镜成像把物体在感光片平面的照度分布记录下来，所以记录的是物体光波的强度分布。所谓"全息摄影"就是要把来自物体的光波的全部信息，包括物光的振幅和位相全部记录下来，在被摄物体物像再现时，就能得到物体的立体图像。

1960年以后出现了激光，它的高度相干性和大强度为全息摄影提供了十分理想的光源，从此以后全息技术的研究进入一个新的阶段，相继出现了多种全息方法，开辟了全息应用的许多领域。

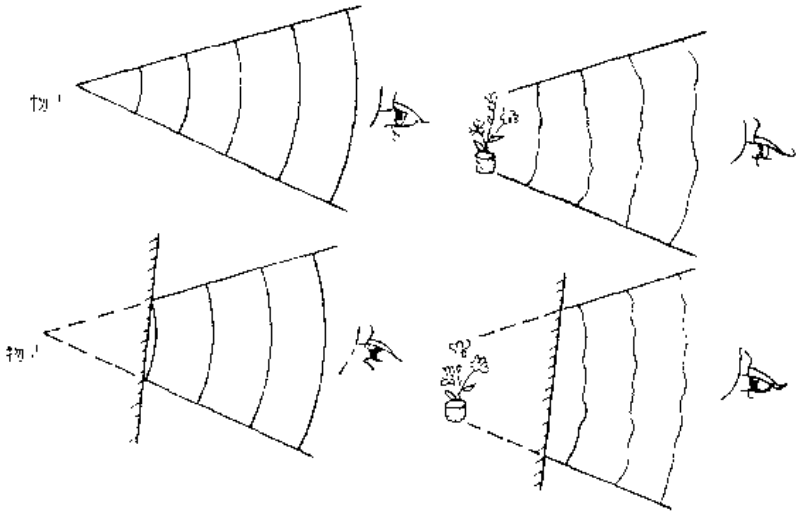


图3—13　全息初想图

在图3—13中，人眼看到一个亮点，是因为有一个发光点所发出的球面波的波面为人眼所接收到的缘故。如果上述发光点或物体（可看作是由无数发光点所组成）被障碍物所遮住，但它们所发出的球面波或特定的波面却被记录下来或被人眼看到，我们也应同样感觉到该发光点或物体的存在，这就是全息摄影的最初设想。事实上，这种设想应包括两部分：其一是要将景物的特定波面（包括振幅和位相）记录下来；其二是在观察时再将原来的特定波面显现出来。

在图3—14(a)中，将一束相干光（激光）垂直地照射在两条平行狭缝 S_1 和 S_2 上，通过 S_1 和 S_2 发出的两束光，在屏幕 D 上迭加成干涉条纹。如果把 S_2 看作物体，S_1 作参考光源，则屏幕 D 上的干涉条纹就是物体 S_2 的全息图，用感光片将它记录下来，就得到一张狭缝 S_2 的全

息照片(它是一个明暗条纹的强度按正弦规律变化的光栅)。为了得到 S_2 的再现像,只须仍用参考光束 S_1 去照射上述的全息照片 D(即光栅版)。由于光栅的衍射,在光栅后面会出现一系列的衍射光波,其中有一列衍射波与物体原来位置所发出的光波完全一样。这列光波就在狭缝 S_2 处形成一个虚像,于是我们可从全息照片的后面看到原物体狭缝 S_2 再现的像(一条明亮的条纹)。另外在全息照片的后面还有一个和它共轭的实像 S_2'[图 3—14(b)]。

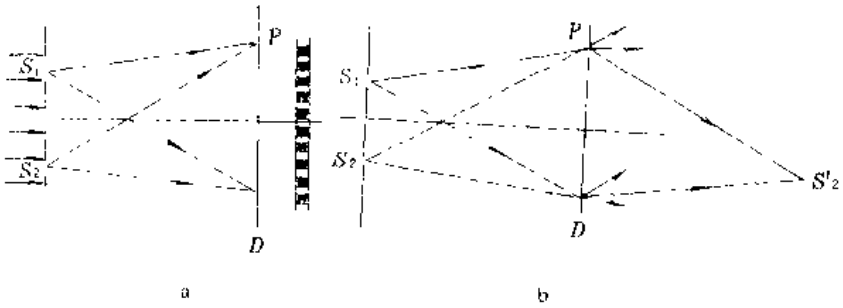


图 3—14 全息光学原理图

如果狭缝 S_2 用其它物体代替,仍用一束相干光(激光)照射,则由物体表面反射的光波(称为物光)与 S_1 发出的光波(称为参考光)在屏幕 D 上发生干涉,形成较复杂的全息图样。因为从被摄物体上各点反射出来的物光在振幅(强度)和位相上都不相同,所以感光片上各点处的干涉条纹也不相同。强度不同使条纹变黑程度不同;位相不同使条纹的密度、形状不同。因此,被摄物体反射光中的全部信息都以不同浓黑程度和不同疏密、不同形状分布的干涉条纹形式记录下来。采用上述再现方法,同样可以得到物体的再现像。如果原物体是立体的,那么再现的像也是立体的,这就是全息摄影的基本原理,现以波动方程给以说明。

令 x、y 平面是全息照相的平面 D,强光源发出的一列单色平面波为 $E_{0R}\cos\omega t$,E_{0R} 为该波的振幅,把这一单色平面波分为参考光波 E_R 和物体光波 E_0 两部分。到达 D 处的平面参考波 E_R 可用下式表示:

$$E_R(x,y) = E_{0R}\cos[\omega t + \varphi(x,y)]$$

这里位相角 φ 是位置(x,y)的函数,而平面 D 处参考波的振幅 E_{0R}是常数。另一束从物体反射到平面 D 的光波可表示为:

$$E_0(x,y) = E_{00}(x,y)\cos[\omega t + \varphi_0(x,y)]$$

这里 $E_{00}(x,y)$为物体光波到达平面 D 上某点的振幅,$\varphi_0(x,y)$为相应点物体光波的位相角,它们都是和一个不规则的波前的位置有关的新的复杂的函数。$E_R(x,y)$和 $E_0(x,y)$两束光波符合相干条件,在平面 D 处迭加后,由于干涉而形成一个光强分布,该分布可由照相乳胶记录下来。除了一个常数以外,最终的光强 $I(x,y)$或 $E^2(x,y)$可直接写为两干涉光波的叠加

$$E^2(x,y) = E_{0R}^2 + E_{00}^2(x,y) + 2E_{0R}E_{00}(x,y)\cos[\varphi(x,y) - \varphi_0(x,y)]$$

当再现时,再用单色光 $E_R(x,y)$照射全息照片,最终形成的波的振幅 $E_F(x,y)$必与 $I(x,y)\cdot E_R(x,y)$成正比。假使所使用的再现波与参考波一样,入射在全息片 D 上的角度也一样,那么,我们可以把 $E_R(x,y)$写为:

$$E_R(x,y) = E_{0R}\cdot\cos[\omega t + \varphi(x,y)]$$

最终的波(除一个常数以外)可由前面公式求得:

$$
\begin{aligned}
E_{\mathrm{H}}(x,y) &= E^{*}(x,y)\cdot E_{\mathrm{R}}(x,y)\\
&= E_{0\mathrm{R}}(E_{0\mathrm{R}}^{2}+E_{00}^{2})\cos(\omega t+\varphi)\\
&+ E_{0\mathrm{R}}E_{0\mathrm{R}}E_{00}\cos(\omega t+2\varphi-\varphi_{0})\\
&+ E_{0\mathrm{R}}E_{0\mathrm{R}}E_{00}\cos(\omega t+\varphi_{0})
\end{aligned}
$$

上式表达了从全息照片发出的光，其中第一项可以改写为$(E_{0\mathrm{R}}^{2}+E_{00}^{2})\cdot E_{\mathrm{R}}(x,y)$，它是对再现波振幅调制的描述。因为全息照片的每一部分的作用和衍射光栅一样，所以此项代表零级的直射光束。既然它不包含与物波位相(φ_0)有关的信息，我们无须加以研究。

第二项和第三项是被全息照片衍射的的两个第一级光谱。其中第二项具有与物波相同的振幅E_{00}，它的位相不仅涉及$2\varphi(x,y)$，而且还具有与物波相反的位相($-\varphi_0$)。它也形成一个像，并具有这样一个特点：最接近观察者的点在像中显得最远，即所形成的像是倒转的，它就是前面提到的实像S_2'。

第三项明确具有物波$E_0(x,y)$的形式，如果你注视被照明的全息照片，你将看见"物体"(即虚像)仿佛确实在那里。这个再现的虚像与实际物体完全一样，也是三维空间的。

全息摄影的一种实验装置简图如图3—15所示。激光器输出的光束通过分光镜分为两束，一束经过透镜使光束扩大而照射到被摄物体上，再经物体反射(或透镜)后射向感光底片，这就是物光。另一束经反射镜改变光路，再由透镜扩束后直接投射到感光底片，这部分就是参考光。物光和参考光在胶片上相干迭加形成干涉条纹，干涉条纹的形状记录了物光与参考光间的位相关系，而其明暗对比程度(反差)记录了物光波前的振幅分布。经显影、定影后，就得到全息照片。全息照片不同于普通照片，用肉眼直接观察全息照片，并不能看到物体的任何形象。在显微镜下可观察到全息照片上布满细密的亮暗条纹，条纹形状与原物形象也没有任何几何上的相似性。要看被摄物体的像，必须用一束同参考光束的波长和传播方向完全相同的光束照射全息相片，则用眼睛可以观察到一幅非常逼真的原物立体图像，再现在全息相片后面物体原来的位置上。除了这个虚像外，在全息照片的观察者一侧还会形成一个实像(图3—16)。这两个像相当于光栅所产生的零级两侧的两个一级衍射波所成的像。通过全息照片去看物体的像犹如从窗口去观察原物一样，不同角度可观察到它的不同部位。

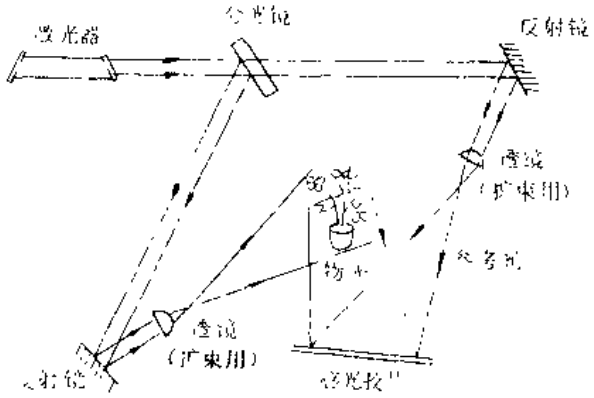


图3—15 全息摄影简图

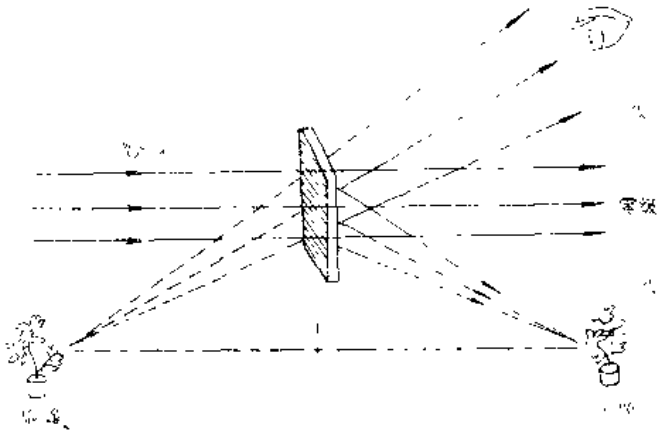


图 3—16　全息摄影的再现

全息摄影的主要特点如下：

(1)由于全息摄影记录了物体各点的全部光信息，所以再现物像和原物一模一样，是一个十分逼真的立体像。

(2)由于全息摄影过程中物体与底片之间是点面对应关系，即全息照片中每一局部都包含了物体各点的光信息，所以全息照片的每一部分，不论有多大，总能再现原物的整个图像。

(3)同一张底片上，经过多次曝光，可以重迭许多像，而每一个像又能不受其它像的干扰而单独地显示出来。

(4)全息照片易于复制。如果用接触法复制，将使原来透明部分变成不透明，而原来不透明的部分变成透明，用复制照片再现的像仍和原来照片的像完全一样。

第四章　光学机械扫描成像基本原理

第一节　概述

自从陆地卫星资料传入我国以来，光学机械扫描成像这一方式便广为人知，尤其是对MSS了解的更为透彻。

很久以前，人们总想把光学机械扫描技术用于使景场亮度变为电学视频信号。但光学机械扫描电视系统，很快就被光学-电子束扫描电视系统所取代。二次大战以后，在军事部门主管下，机载型扫描仪得到迅速发展。这些成像器件引用了早期光学机械扫描电视系统，而这些扫描仪大多发展成被动式红外传感器。随着元部件的发展，扫描仪性能得到了迅速而稳定的提高，早期扫描仪很快被淘汰。到目前扫描仪的工作范围已发展到紫外线、红外线——很宽的波谱范围，形成了单独的一类传感器。

光学机械扫描仪能有这么快的发展也是由于它有以下的优点：

(1)能够在摄影光谱区和摄影光谱区以外的某些波段成像。在长波段，大于1.2μm的，乃至14μm也可以成像；

(2)能根据要求迅速实时发送、记录、分析或处理；

(3)探测器的动态范围通常比胶片大，而且探测过程是可逆的。即在成像过程中，探测器并不损耗，成像成本低；

(4)扫描仪可以标定，结果可以给出定量的辐射数据，甚至可能在整个通道内同时取得图像和数据。

当然，它也有不可克服的缺点，如：机械部分容易出故障，目前分辨率已逼近极限，分辨率的提高受到限制，设备重量大，干扰因素多。

如果我们给光学机械扫描成像下个定义，可以说，通过机械转动扫描镜，使之掠过视场，收集信息，并传递给探测器，经过探测记录而成像的方式。

光学机械扫描仪基本结构不外分为以下几部分：扫描部分，聚焦部分，探测部分和记录部分(图4－1a)。其中扫描部分前也可有聚焦部分(图4－1b)。对于热红外波段的扫描仪还要有一个制冷系统，使探测器正常工作。

第二节　扫描系统

光学机械扫描系统也称为扫描器，是使目标物的影像进入成像系统的门户。扫描器主要是由机械驱动的扫描镜。对于驱动部分，我们这里不详叙述，重点讨论扫描镜和它的某些运动方式。

扫描系统与聚焦系统直接相连，位置可以互换，也可以把聚焦系统分为两部分分别置于扫描系统的前后。扫描镜也可以使用聚焦镜，使扫描系统具有聚焦作用。

(一)扫描系统的分类

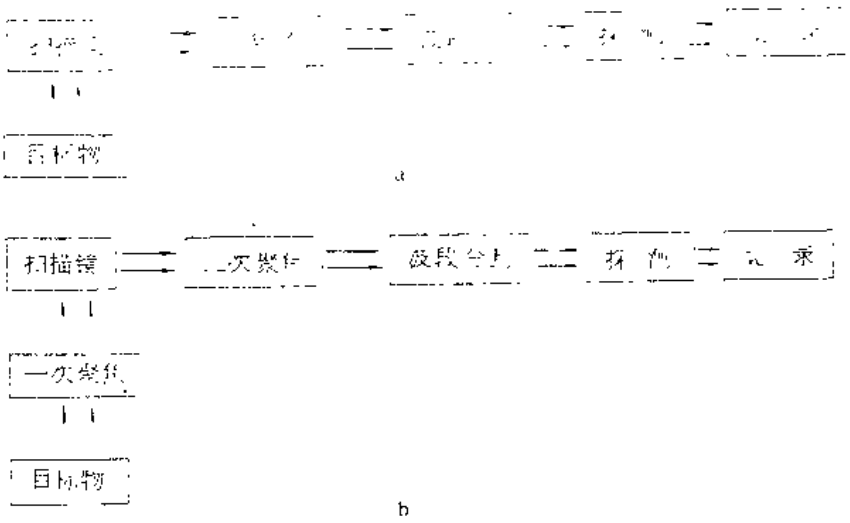


图 4—1　光学机械扫描仪结构方框图

扫描系统从不同角度有不同的分类。

按扫描镜接收信息的来源性质分为物平面扫描和像平面扫描(图 4—2)。所谓物平面扫描(简称物扫描)，是使用近轴光学系统用扫描反射镜直接扫描物场，然后转给聚焦部分。而像平面扫描(简称像扫描)，是用广角镜对目标物形成整个视场影像，扫描镜掠过这一像场，接收前面镜头传递的像场的能量，再转给下步聚焦系统。这种结构在扫描镜前都有透镜组

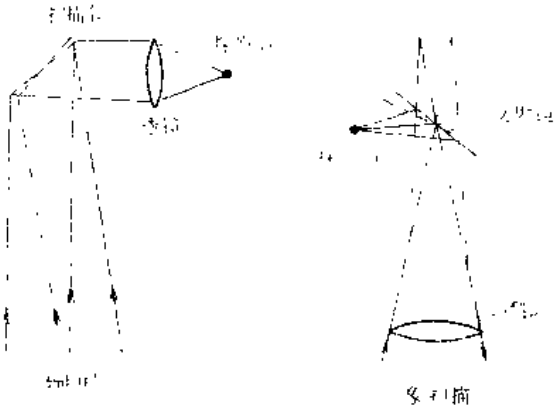


图 4—2　物扫描与像扫描

(镜头)，因此，有聚焦作用。

按扫描镜的形式分为平面反射镜式、四面反射镜式、旋转多面反射镜式(反射镜轮式、反射棱镜式)、透镜式、透射棱镜式、光楔式等(图 4—3)。当前常用的是平面反射镜式、四面反射镜式、透镜式和棱镜式。

由于扫描镜的形式各异，扫描镜运动方式不同，扫描轨迹也有差别，归纳起来有以下几种形式：行扫描(包括单向行扫描、双向行扫描)、光栅形扫描、螺旋形扫描、摆线扫描等(图 4

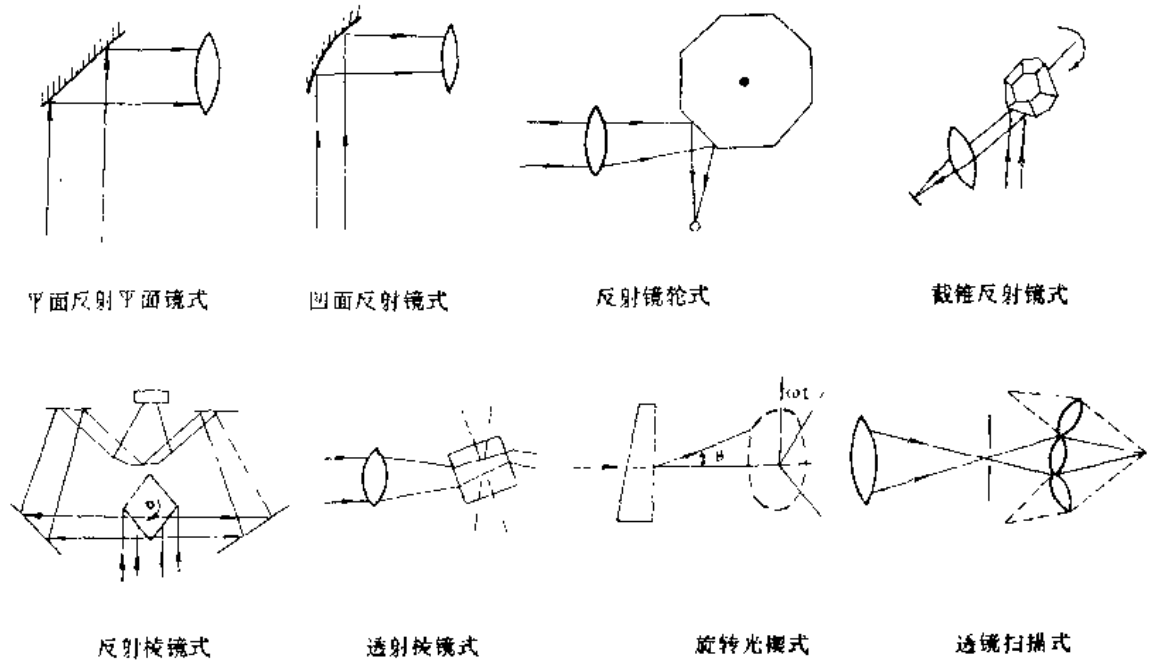


图 4—3　主要扫描镜类型图

—1)。

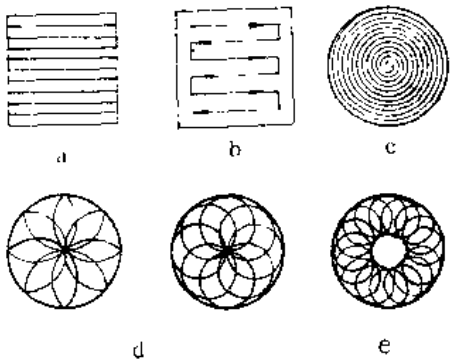


图 4—4　扫描轨迹

(据 J.T. 克利克苏诺夫,1978,略加修改)

a. 单向行扫描;b. 双向行扫描;c. 螺旋形扫描;d. 花瓣形扫描;e. 摆线扫描

下面将分别简要叙述各种扫描镜的几何特征。

(二)平面反射扫描镜及凹面反射扫描镜

平面扫描镜也称振动平面镜、摆动扫描镜。平面扫描镜是在一定范围内做周期性摆动,扫描系统结构可以是物扫描,也可以是像扫描。在扫描轨迹上可以是单向行扫描,也可以是双向行扫描,还可以是螺旋扫描。

1. 平面反射扫描镜、凹面反射扫描镜及其扫描轨迹

(1)平面扫描镜直线行扫描

直线扫描一般情况下,扫描镜以一定角度对地面做直线往复运动(图 4—5),形成的轨迹是直行扫描。若只有某一个方向有效工作,另一方面为无效扫描就形成单向行扫描图像。

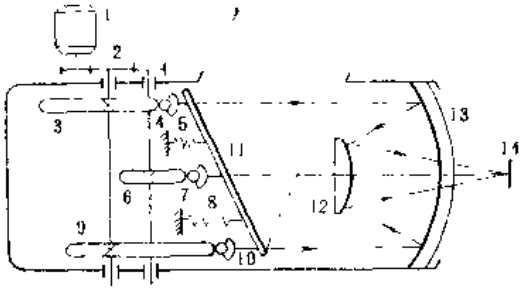


图 4—5　直线行扫描装置结构图

（据 J.B. 克利克苏诺夫，1978）

1. 马达；2. 传动减速部分；3. 9. 行扫描凸轮；4. 7. 10. 球形支柱；
5. 8. 弹簧；6. 帧扫描凸轮；11. 反射镜；12. 13. 聚焦系统；14. 探测器

陆地卫星 MSS 扫描镜由西向东为有效扫描，而由东向西为无效扫描。

往复双向行扫描简称双向行扫描或双向扫描。

双向扫描是 80 年代初期才用于航天遥感，扫描镜往返运动都在做有效扫描。其优点是：同样条件下有效扫描时间几乎增加一倍，像元辐射积累时间加长；分辨率等方面性能可以显著提高。

双向扫描如果仍使用单向扫描镜，就会出现重复扫描区和遗漏扫描区。因此必须改变单向扫描器的结构。陆地卫星 4，5 号中的 TM 是双向有效扫描，是在扫描镜到主焦平面间加了一个扫描线纠正器。这具纠正器不论在向西扫描还是向东扫描，起始时都向卫星运动方向移动一次扫描的距离，就可以补偿扫描误差。其实质是扫描镜视场略大，通过纠正器限制了景物的影像，避开将要重叠部分，移向将要漏掉部分，这样又限制了扫描孔径。实际上纠正器起了一个光栅的作用，使扫描得到纠正。基本结构见图 4—6。扫描线纠正器运动矢量和扫描结果见图 4—7。

(2)弧形行扫描

弧形行扫描的扫描镜光轴不是铅直向下过天底点，如果是物扫描则是扫描镜向前斜倾一个角度，在地面视场上扫过一个弧区；若是像扫描则是在镜头视野扫达一定的弧形区。其优点在于扫描时倾角不变，在扫描线中每个像元对应的地面面积不变(图 4—8)。

(3)平面镜旋转振荡扫描

平面镜旋转振荡扫描，平面镜一方面中心固定于电动轴上，另一方面以凸轮、滚轮使反射镜上各质点在旋转时发生周期性前后振荡，形成螺旋形轨迹。

(4)不同轴反射旋转振荡扫描

前面情况，反射镜光轴通过成像图像中心。如果采用反射镜光轴不通过图像中心，而反射镜运动轨迹中心在图像中心，就可以进行圆形图像花瓣形或螺旋形轨迹扫描(图 4—9)。

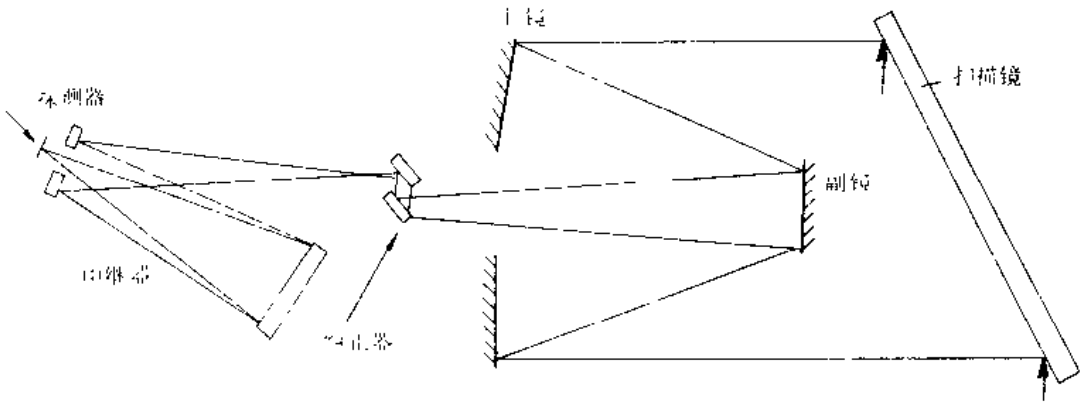


图 4—6　双向有效扫描系统基本结构图

（据朱启疆，1985）

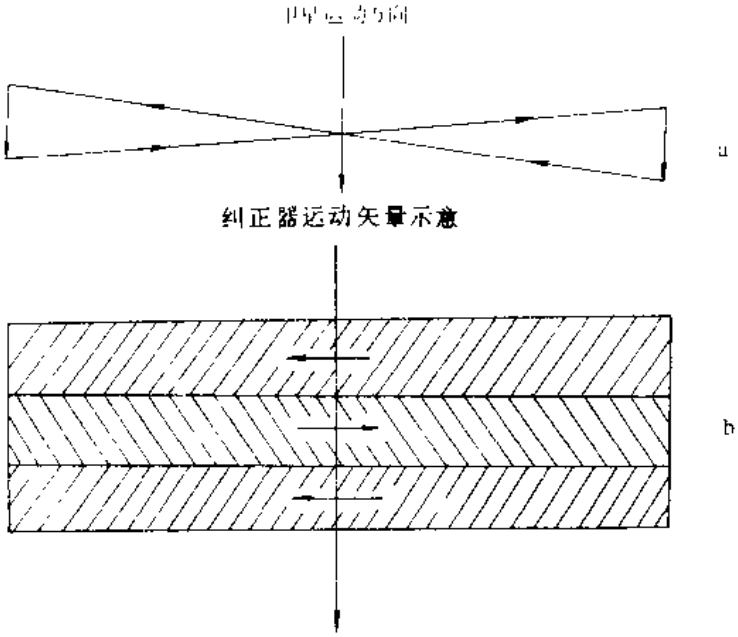


图 4—7　纠正器运动矢量纠正后扫描结果示意图

（据朱启疆，1985）

螺旋形轨迹扫描和花瓣形轨迹扫描，用于成像设备与景物相对静止的场合，对地球资源遥感并不适用。

2、扫描镜摆动与视场角关系

由于光学机械扫描取景的范围主要是靠机械转动扫描镜，使之掠过视场，那么扫描镜的摆动幅度就与视场范围有直接关系。视场大小是以视场角来表述的。扫描镜的摆动大小是用摆动角度来表述。平面反射镜是最简单形式，平面镜视场角等于扫描镜摆动角度的二倍。

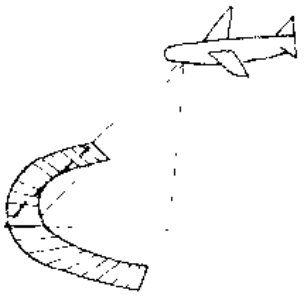


图 4—8　弧形行扫描示意图

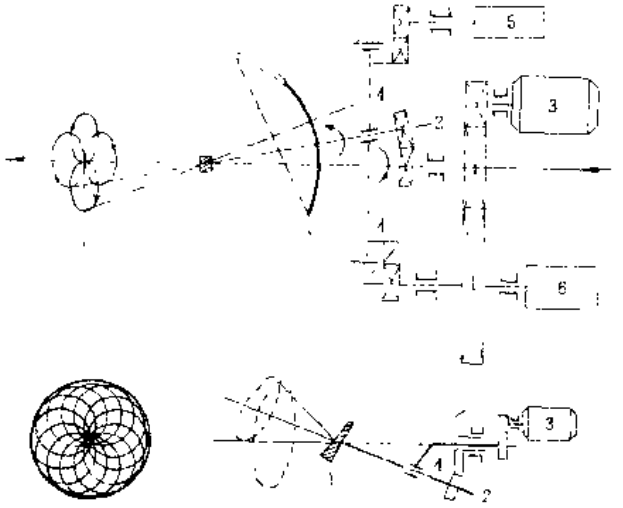


图 4—9　花瓣形轨迹扫描的光学机械装置

（据 Л. З. 克利克苏诺夫，1978，简化）

1. 扫描镜；2. 扫描镜主轴；3. 主马达；4. 扫描镜副轴；5. 6. 副马达

第三节　聚焦系统

在光学机械扫描仪中聚焦系统是由一系列透镜、反射镜组成透镜聚焦、反射镜聚焦和透射-反射聚焦三种形式。其作用是获取由景物传来的电磁波能量，加以集中使在探测器上单位面积能量增大，消除各种像差，使影像清晰。

探测器单位面积接收能量增大使能量集中的原因是景物非定向辐射电磁波，分散在很宽主体角内，若不经聚焦，探测器只能接收到很少的能量；若经过聚焦，则可以把聚焦镜面积上所接收的能量集中于探测器上（图 4—10），聚焦镜的面积显然要比探测器面积大很多倍。在理想情况下，由聚光镜接收的能量 F_a 全部传给探测器，则有如下关系：

$$K = F_a/F = \omega_a/\omega,$$

F 为不聚焦时探测器所能接收的能量，F_a 为聚焦后能量，ω_a 为聚焦系统立体角，ω 为探测器不加聚焦系统立体角，K 为放大系数，实际 K 值在 25—5000 之间。可见聚焦系统的好坏对图像质量有很大影响。

1. 透镜聚焦

透镜式聚焦有多种形式，有单片、多片透镜组，而以透镜组的为多。图 4—11 为几种透镜

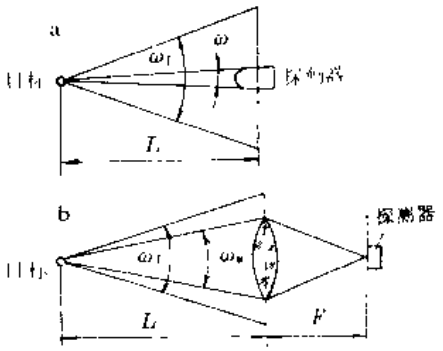


图 4—10　光学系统放大系数计算图

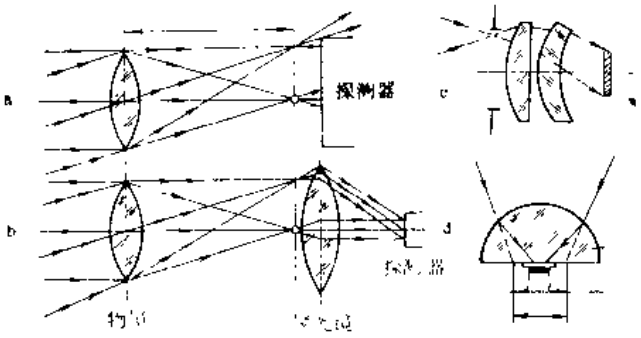


图 4—11　透镜聚焦系统基本结构

（据几飞克利克苏诺夫，1978）

聚焦的基本结构。由于不同光学材料对不同波段透射率不同，所以应用不同波长范围的扫描仪透镜要采用不同的光学材料。

2. 反射镜聚焦

反射聚焦的类型有平面反射聚焦（也称光捕集器）、牛顿式、卡塞格伦式、格里高利式、赫谢耳式等等。反射聚焦结构紧凑、价廉、无色像差且反射系数高（图 4—12）。

3. 透镜-反射镜聚焦

透镜-反射镜聚焦中的反射镜有平面镜，也有凹面镜。透镜与反射镜组成不同的聚焦系统（图 4—13）。

透镜聚焦与反射聚焦各自有各自的优缺点。从总的来看反射聚焦系统有结构紧凑，价格较低，反射系数可以制造得很高，无色像差，在多波段的成像系统中尤为合适。因此在较多的系统中采用反射或反射-透射聚焦系统。但是对热辐射通量受次反射屏蔽，致使总放大系数降低，影响了效果。因此热辐射成像中一般不使用反射聚焦。

第四节　波谱分割系统

做为现代光学机械扫描仪，往往是多波段，而且波谱划分越来越细。因此波谱分割技术就显得越来越重要。在光学机械扫描仪中采用的分割光谱的的方法有吸收滤光片、干涉滤光片、分色镜、棱镜、反射衍射光栅及傅氏干涉分光仪等。

（一）吸收滤光片

吸收滤光片是一种含颜料的透明状光学元件。遥感设备中常用有色光学玻璃制造。不同的颜色含有不同物质。与摄影中用的滤光片原理相同，但对非摄影波段则采用不是颜色而主要是成分的差异。不论那种，其主要原理都是选择性地吸收掉不同波长的电磁波。

吸收滤光片的优点是简单、易制作，成本低，稳定性好，波带较宽等。

（二）干涉滤光片

干涉滤光片结构和原理见第二章。干涉滤光片反射电磁波与透射电磁波之间是互为消长，透射电磁波长范围越窄，则反射电磁波波长范围越宽。干涉滤光片透射波谱范围是一个可以任意选定，可宽或窄。宽者可有几十纳米，窄者可达只有 0.1nm。这在现代遥感技术中是

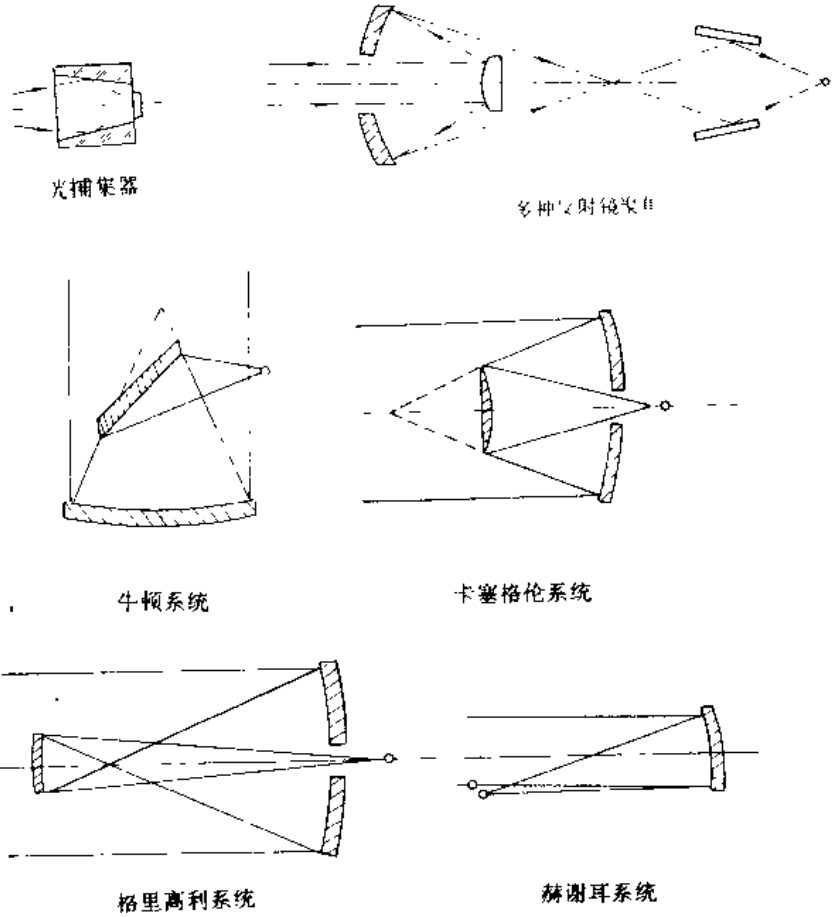


图 4—12　几种反射聚焦系统

（据 Л.З. 克利克苏诺夫，1978）

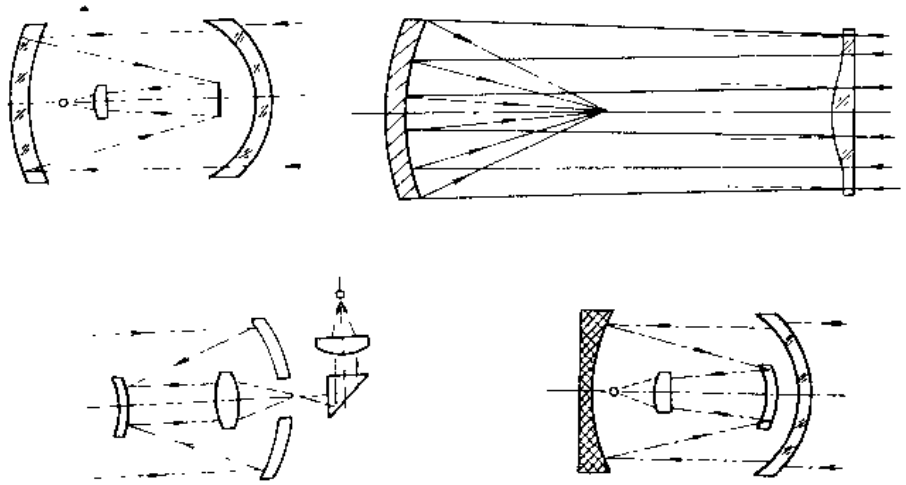


图 4—13　透镜-反射镜聚焦几种组合类型

（据 Л.З. 克利克苏诺夫，1978）

很有优势的一点。

另外，近几年来，已有改金属膜为多层介质膜，可以形成矩形波带干涉片，是一种理想的带通滤光片。

(三)分色镜

分色镜是对某个波段反射，另一部分波段透射的光学元件，从而实现光谱分割(图 4—

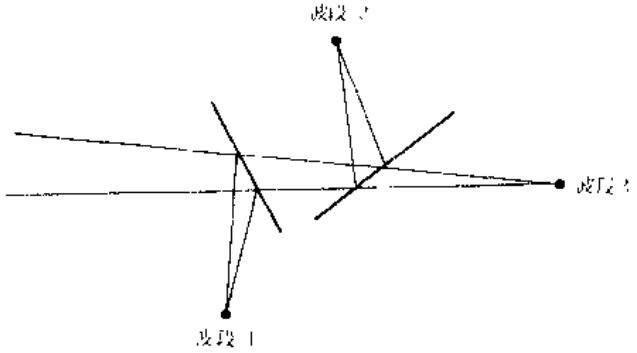


图 4—14　分光镜分割光谱结构示意图

14)。圣巴巴拉研究中心制造的雨云卫星温湿红外辐射计就是利用分色镜分割波谱的。

(四)棱镜

棱镜是利用色散原理进行分光。它的光谱覆盖范围较宽，透过率较高，色散中等。但它的色散是非线性的，一般短波端色散较大，长波端色散较小，波谱分辨率也下降。

(五)衍射光栅

平行、等宽而又等间隔的多狭缝即为衍射光栅。光栅分两大类：透射光栅和反射光栅，原理见第二章。细分还有平面光栅、凹面光栅、定向光栅、黑白光栅、正弦光栅等。由于现代刻划的光栅已经很精细，每毫米可刻 600—1200 条，因而可获得较高的波谱分割的效果。

第五节　探测系统及波谱响应材料

探测系统实质是一个换能系统，即将接受的电磁波转换为电信号，而后才能再转换成直观图像。这个系统一般由探测器、放大器和记录器构成。探测器是其中最关键的部件。

一、探测器及材料

探测器对波谱探测效果决定于探测器的波谱响应材料，不同的材料有它自己最佳响应波段。常见探测器和波谱响应材料在光学机械扫描仪中的元件有：硅光二极管、光电二极管、光电倍增管等。材料有：硫化铅，氧化铅，锑化铟，砷化镓，硫化硒，锗掺汞，锗掺镓，锗掺金，锗掺镉，锗掺锌，碲化铅，碲化铯，碲化铟……。到目前，这类材料已不下百种。下面是常见探测元件或材料应用波段范围示意图(图 4—15)。

可见各种元件都有自己的工作特性，它们在不同波长有不同的波谱探测率，因此，不同波段探测器常选用不同材料和器件。在扫描仪中通常采用的波谱响应材料和元件使用情况如下：

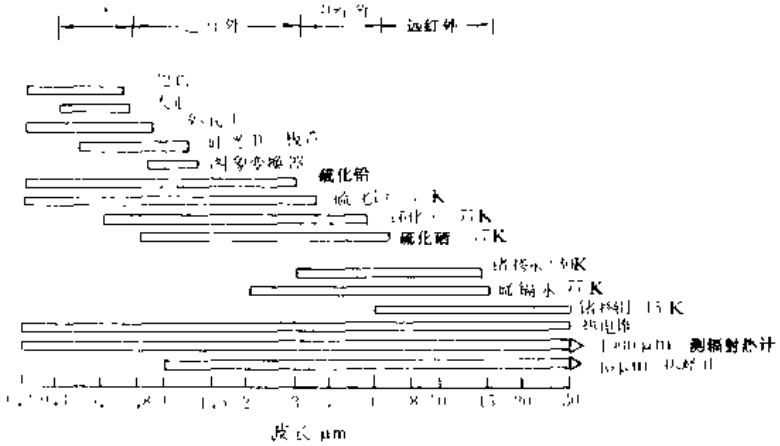


图 4—15　常用探测材料、元件应用波段范围
（据吕斯骅，1981）

0.3—0.75μm　　采用光电倍增管；
0.5—1.09μm　　采用硅光二极管；
1.5—5μm　　采用锑化铟；
8—14μm　　采用碲镉汞。

二、探测元件的排列

可能采取的方式：把各个元件水平地排列在一起而保持单个元件的扫描图形，这样水平快速扫描，垂直慢速扫描；把单个元件垂直地构成一列，再做行排列，这样就形成水平慢速扫描垂直隔行扫描；把若干单个元件排成一个小方阵式排满扫描区就成为小型阵列扫描和全幅阵列扫描（图 4—16）。

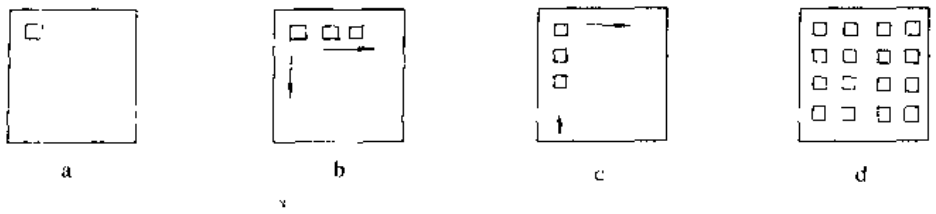


图 4—16　探测器排列与扫描方式
（据 J. M. 劳埃德，1981）

三、探测器元件波谱响应速度

探测器对波谱响应速度一般是用响应时间（τ）来描述，也称时间常数。对于热红外探测器因为要把吸收的能量转换为晶格振动能量（热能），然后再由热效应引起探测器的电阻、电压的变化，所以热探测器时间常数大、响应速度慢。而量子探测器是直接与体内的电子系统作用的，时间常数小，响应速度快。因此热红外探测器与其他短波探测器在一个系统内时，热探测器的分辨率都低于其它部分。探测材料和元器件的探测速度越快越好，因为可以提高地

面分辨率。但无论哪种材料的探测器响应速度都是有一个极限。

四、放大、记录和传输

经过探测器已把电磁波转换为电信号，但这时的电信号是非常微弱的，因此要把电信号经过放大，使能量达到能够显现直观图像或输入处理系统或达到空间传输发射的能量。这种放大是靠电子电路实现的，这里不赘述了。

经过放大的信号或记录在平台上携带的记录器的磁带上，或直接送到发射机发回地面。目前，星载扫描仪都配有记录和发射两套设备，而机载扫描仪近年来也有的增加发射设备，使实时接收在机载工作时也得以实现。通过无线电通讯，将所得到的信号传输给地面站，记录成信号图像或数字图像。经过图像恢复，数字图像又可随时转换为直观图像。

五、冷却系统

热红外探测元件在常温下会表现出噪声。为了减少这种由于温度高而造成的噪声，必须降低工作温度。在热红外线波段波长越长，温度要求越低。温度越低，工作状态越好。通常采用的冷却方法是采用致冷机或图 4—17 表示的一种采用冷却器的致冷方法。它示出了低温型的测辐射热计装在双层杜瓦瓶中，冷却到接近绝对零度的液氦温度。液氦装在中央圆筒里，在标准大气压下它的沸点 4.2K，降低压力，能使沸点下降。杜瓦瓶的内壳由于热传导保持在接近液氦的温度。两个真空隔层以及液氮(沸点 77K)把内壳和液氦容器保护起来，使其不受环境温度的影响，兼作滤光片用的窗口，做成楔形，这是为了防止光的干涉，而光的干涉会使记录的光谱曲线失真，同样探测器的腔体不应当有低阶次的谐振模式。当应用在红外光谱区时，导光管是空心的，其内表面是镜面反射的，通常不抽成真空，可以充入干氮以排除水蒸气。

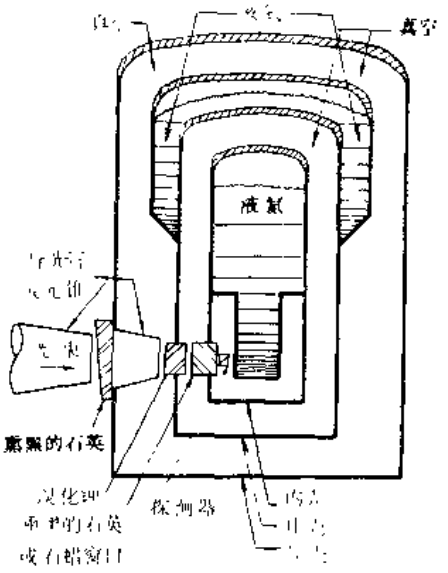


图 4—17　探测器致冷典型方法—双层杜瓦瓶致冷结构示意图
(据美国摄影测量学会，1975)

第六节　辐射标定

辐射标定一般包括两方面内容：仪器本身性能的标定和空间工作环境及仪器工作的标定。前者称仪器标定，后者称空间标定。

所谓仪器标定是指确定扫描仪的输出值，是厂家测定扫描仪对已知输入点源的辐射强度光谱响位在空间、时间的情况。若长时间反复测定，扫描仪性能稳定，那么工作稳定性和数据就可以从扫描仪上得到保证。这种工作是由厂方进行的。

对热红外波段工作的扫描仪，还有一个工作点的标定，如白天和夜间的标定位置就应不同，白天定的高，夜间定的低。

所谓空间标定，是指对工作环境和仪器工作状态实时的标定。标定的标准源有：太阳、空间、黑体、标准光源灯、温度可控的扫描仪外壳等。即在扫描仪对目标进行工作的同时记录标准源的光谱特征数据，做为辐射校正时标定的依据。

第七节　光学机械扫描成像系统的分类

因为光学机械扫描是跨紫外波段，可见光波段、近红外波段、中远红外波段，而且各波段物理性质有明显差别。因此分类中有用波段划分的。近一二十年来，综合各波段为一身的设备非常多，单独用波段划分就比较困难了。当然对于单独一个大波段范围工作的扫描仪还可以用这种划分方式。另一种分类是从能量来源划分为主动式和被动式两类。将两种分类合在一起概括为表 4－1。

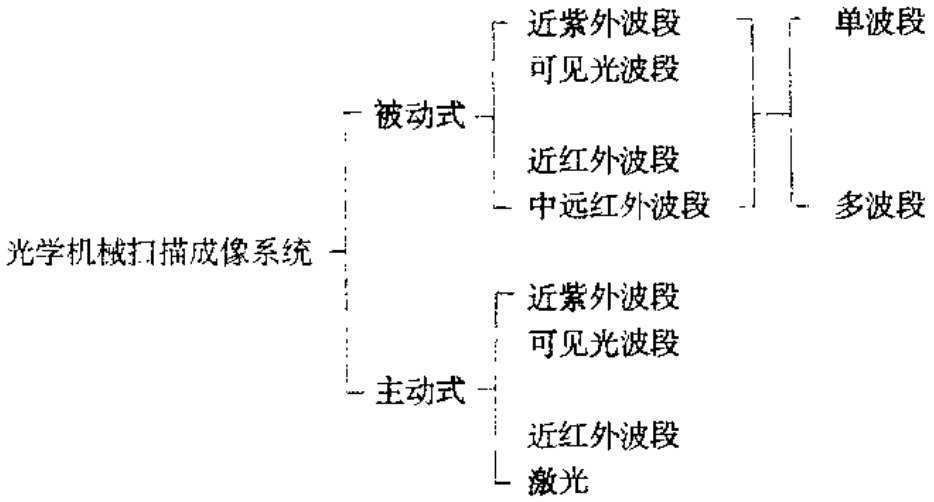


表 4—1　光学机械扫描成像系统分类

第八节　光学机械扫描图像基本特征

光学机械扫描图像特征分为几何特征和波谱特征。

一、几何特征

1. 光学机械扫描仪，不论那种型号，投影性质都是属动态多中心投影。

2. 由于连续扫描，一般沿航向无重叠。

3. 成像宽度决定于扫描镜的摆动角度(即可述为视场角)和平台高度。

4. 几何分辨率决定于探测器单个成像板所成的像(像元)对应地面的面积。由于平台速度、扫描速度、探测元件波谱响应速度等的限制，因而有一个明显的极限。从资源遥感的中高度卫星来看，目前的分辨率为 30—20m。

5. 畸变

一般遥感使用的扫描仪器是垂直平台运动方向，对场景进行行扫描的方式。每条扫描线

的图像具天底线特征，与画幅式相机不同。这是一个条带一个条带记录下的，因此它的视差畸变仅发生在垂直航向的方向上，在图像中心外的高位点会沿扫描线，背向中心位移。如高山顶的影像会沿扫描线的轨迹向外位移。当航高很大时，像点位移就不是很重要的了。

扫描仪中扫描镜以恒定的旋转（或摆动）角速度运动。若不考虑地球曲率可以说明到达地球表面的距离和扫描速度在地球上投影正比于天底夹角的余弦，因此扫描地球表面的速度是非线性的。

尽管速度是非线性的，但复制图像的速度一般是恒定的，所以扫描速度与记录速度差就缩小了扫描方向上沿航线图边缘的比例。如果航高大时，地球曲率更加大了上面提到的畸变。

如果扫描镜前视，构成圆锥扫描，可以部分地弥补这一缺点。另外，由于平台非规则地运动（如仰俯、航偏、滚动、变速等），通过陀螺稳定和根据姿态记录在图像恢复之前加以校正。

二、波谱特征

由于现代光学机械扫描系统很少是成批生产，很多情况是只制造一台或几台，一旦性能指标被认定，就投入使用。所以具体的波谱特性多有些出入。这里只能概括几点。

1. 波带总宽度是相当宽，可以从紫外线波段到远红外波段，有的单独是紫外波段，有的是可见光、近红外波段或并含有中红外波段的，也有单独中远红外波段的，种类是繁多的。往往是依各自的应用范围设计而定的。

2. 图像色调

可见光图像色调是反映了地面亮度，即“振幅的平方”。热红外图像色调表示的是辐射温度，多数暗色调表示低温度，浅色调表示高温度，也有相反的。

3. 波段划分与光谱分辨率

波谱分辨率与各波段物理特性有直接关系。从量子探测元件上看紫外波段，可见光，近红外要比远红外灵敏度、响应速度要好，因此不同波段分辨率是不同的。

尽管采用的波谱分割方式不同，但目的是一个：划分若干波段，分别记录下来。现在看来，波段划分越来越细，已经可以分割到 nm 级。这使得图像充分体现多波段的优势。

4. 波谱辐射误差，

波谱辐射误差可称辐射误差，也有人称为图像退化效应。所谓波谱辐射误差是由目标物辐射出的电磁波构成实际原始辐射特征与得到的图像影像之间在电磁波谱强度等特征不能对应之差，或说物场辐射与图像对应物场辐射记录差。这种误差产生于光学系统、电子线路、大气干扰、机械系统及意外噪声等，可以把波谱辐射误差概括为下式：

$$e = f - f' = c + g + d + n$$

其中，e 为总误差量，f 为原始辐射，f' 为原始辐射在图像中的记录，c 为大气传输误差，g 为光学及光学机械系统误差，d 为电子系统误差，n 为运动、意外噪声误差及其他误差。

除大气传输散射、吸收等衰减外，还有由于大气发射、大气湍流扰动带来的噪声。

光学系统的衰减，像差造成像元本身波谱误差及扫描机械系统运动随时间出现的误差带来的相邻像元之间“污染”的波谱差。

电子系统误差包括能转换，图像传输，图像恢复过程中检波，放大等过程的失真，这种电子系统误差，电子线路有足够的保真度可以得到部分抑制。至于其他运动及意外噪声及少数和个别的误差就难以预防和处理了。

以上几种误差造成图像对比度下降，边缘模糊。

校正波谱辐射一般在图像恢复预处理阶段进行，是使用标定的记录数据进行辐射校正但这种校正目前还不能完全消除系统工作中产生的辐射误差。

第五章　电子束扫描成像基本原理

第一节　概述

遥感中电子束扫描成像实质是光学－电子束扫描成像过程，可理解为：在光学镜头的焦平面上形成光像，由电子束扫描光像，收集信息记录成像的方式。

1931 年，美国成功地试制了第一支摄像管——析像管。随后开始了电视摄像机的研制工作。然而，摄像机真正达到实用阶段却是从 50 年代开始的，当时称为“非摄影的摄影测量”或“电子摄影测量”，即用光学-电子摄影自动控制及计算机技术来实现航空摄影成图全盘自动化。

1960 年 TIROS 气象卫星开始使用电视摄像机，并使之进入太空。到现在电子束扫描成像已有多种器件，分辨率也大为提高，而且还有一定的潜力。就摄像管而言就经历了光电像管、超光电像管、正析像管、超正析像管、氧化铅管、硒靶管等不同类别。由摄像管成像的摄像机一时被称为电视摄像机。但是现在的摄像机，不仅是摄像管成像，因此，摄像管构成的摄像机就不能笼统地称为电视摄像机，而应用具体的名字更为恰当，全称应是“电子摄像管(式)摄像机”或简称为“摄像管式摄像机”，如析像管摄像机、正析像管摄像机、超正析像管摄像机、光导管摄像机、返束光导摄像机等等。摄像管式摄像机的主要构成部分：镜头、快门、滤光片、摄像管、放大输出及记录电子设备(图 5－1)。其中核心是摄像管。摄像机的差别在于选用摄像管的不同。它是区别电视摄像机种类的标志。

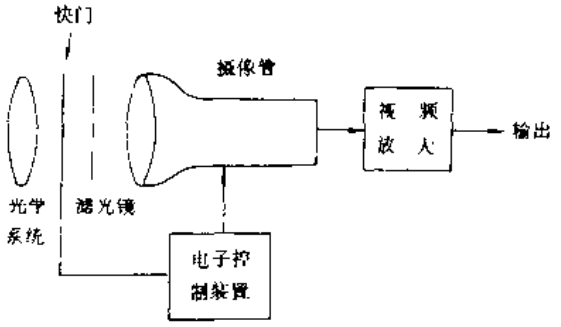


图 5－1　摄像管式摄像机结构框图
(据卢国铭，1984)

镜头部分与照相机镜头类似，这里不赘述；快门种类虽有机械快门、电子快门和程序快门，常用的是程序快门中的电子程序快门；光谱分割一般采用滤光片的办法；视频放大部分互相雷同，属子电子电路部分。所以在下面仅简述各种电子束扫描成像器件部分。

第二节　电子束扫描成像过程

电子束扫描成像过程主要是二大部分：形成光学图像和对光学图像进行电子束扫描，输出视频信号。前者使用的是类似摄影用的光学镜头，后者使用的是摄像管。要了解摄像管应先掌握电子束的形成、聚焦和运动过程。

一、电子束、电子枪、阴极射线管

电子束是电子束扫描成像的主体，它的产生、聚焦、运动是成像质量的关键之一。电子束是由自由电子组成在空间作一定方向运动的密集的电子流。在成像器件中是在电子枪中产

生的。

电子枪就是产生聚焦电子束的最基本的电真空器件。一般由热阴极、控制电极和一个或几个加速阳极组成，设置于真空器中。阴极受热发出电子，可以在各极静电场的作用下，聚集成向同一方向运动的、密集的、截面积很小的电子束。也可在真空器(管)外加电磁线圈，利用磁场，使电子束聚焦。同时还可以改变控制极的电压，控制电子流的密度。

阴极射线管是电子枪最简单的应用形式。它是将电子枪产生的电子束聚焦到荧光屏上，并作规定方式的扫描，使荧光屏上产生图像的电子束管。一般包括电子枪、偏转系统和荧光屏三个部分。它的基本工作过程是：从电子枪射出的电子束在荧光屏上聚焦，电子束射到荧光材料，产生一个很小的亮点。根据信号强度调节电子枪内控制电极(调制极)的电压，可以改变电子束流密度，从而改变亮点的亮度。电子束在荧光屏上扫描的位置，可以在偏转系统控制之下移动。偏转系统可以是两对相互垂直的偏转极板构成(称静电偏转式)；也可以是两对偏转线圈构成(称磁偏转式)。在偏转系统作用下，作行列运动，完成全幅扫描。荧光屏的荧光物质根据需要，改变其成分，得到不同时间长短的余辉。从而得到一幅反映信号强弱的直观图像。阴极射线管用于示波(示波管)、电视(显像管)、雷达(显示器)等。

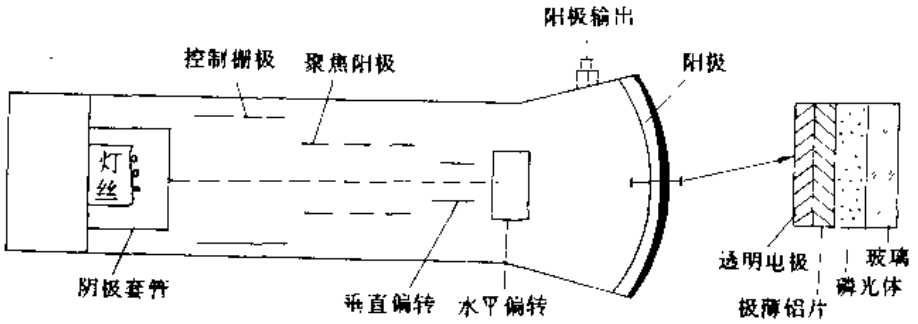


图 5—2　阴极射线管结构简图

二、摄像管简介

摄像管是电子枪的另一种应用形式。它与阴极射线管工作过程正好相反。它是把已有的光学图像转变为电信号输出的电真空器件。尽管摄像管种类很多，其基本结构主要有光电转换系统和电子束扫描系统。光电转换系统是利用光电发射或光电导原理，将光学镜头在焦平面(制成摄像管的靶面)上的光学图像转换为相应的电位图像。电子束扫描系统是使电子束在靶面规则地扫描，并将电位图像逐行逐点地转为电信号。摄像管主要的有几类：快速电子束管类、像区管类、光导管类。

(一)快速光电子束类

析像管(ID)：析像管实际上是一个光电倍增管(PMT)，在视场穿过一个小孔(图 5—3)被电子束扫描。假定是用与分辨率本身可以比较的微观尺度扫描光电阴极，则它的光度测量精度就是光电倍增管的光度测量精度。系统的灵敏度由规定小孔的面积与被扫描的光谱面积所决定。

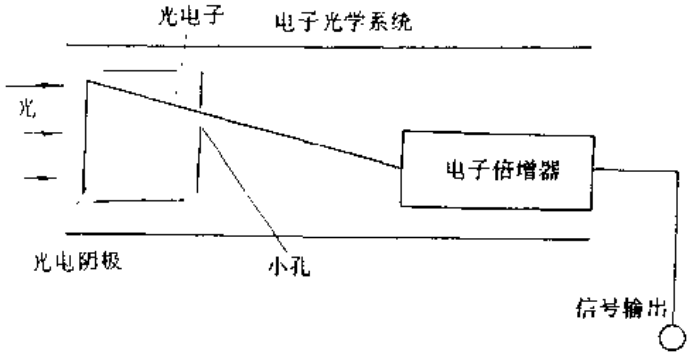


图 5－3　析像管工作原理示意图
（据 Y. Talmi，1975）

多孔析像管：把析像管的小孔数目增加为 M 个，并用数目相等的分立的光电倍增管或通过电子倍增器进行探测，可比析像管的信噪比(SNR)提高 M/N 倍。

平滑析像管：把析像管和一个以磷光屏作为输出读出的像增强器相连接，以磷光层的有限余辉时间作暂时存贮的寄存器，用析像管读出。达到提高总的增益的目的。但信噪比和动态范围降低。

（二）像区管类

1、超正析像管和分流直像管：超正析像管是由光电阴极、电子图像系统、阳极、存储靶、电子枪、光电倍增器组成。当光学镜头形成图像作用在光电阴极时，光电阴极发射的电子在电场作用下射向玻璃存储靶，电子枪发出的电子束从存储靶上电位的起伏后反射电子倍增器输出视频信号(图 5－4)。分流直像管是利用其散射电子束，而提高了灵敏度。

2、静电摄像管：静电摄像管(图 5－5)。有一个转动的多帧存储鼓。多帧存储鼓可以把曝光、存储、读出和清鼓过程之间完全分开。这个特性使得这种器件特别适应于专门简单明了的设计方案，而且实际上消除了滞后问题。大帧幅电介质存储元件提供了高分辨率和不寻常的积分与存储能力。当经过曝光的存储靶被高能量的读出电子束扫描时就完成了读出过程。子是在靶上产生次级电子，其速度与电位图像（电荷像）成正比，从而和输入光像成正比。这些被偏转的电子返回到速度选择器（监控器）内产生视频信号。这种读出过程并不消去电荷像，电荷像还可以再读出。静电摄像管是迄今为止设计出来的最有前途的普遍地可适用的多道光谱检测器。

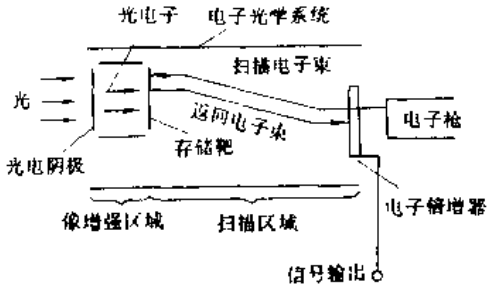


图 5－4　超正析像管、分流直像管工作示意图
（据 Y. Talmi，1975）

3、二次电子导电管：二次电子导电管的靶是用密度很低的(～0.02g/cm³)KCl 制成的，当高能光电子轰击产生的二次电子(增益≈100)，在靶内的电场影响下，通过靶结构内的真空孔隙移到信号极时便产生了正电荷图像(图 5－6)。

（三）光导管类

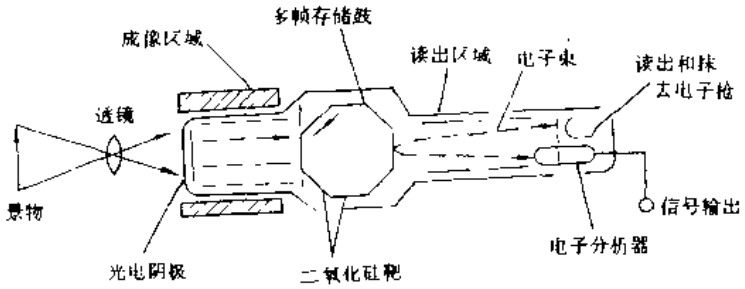


图 5—5　静电存储摄像管示意图
(据 Y. Talmi, 1975)

1、直读光导管：这种摄像管的共同点是都用光导靶作为敏感器和存贮单元，并采用视频信号提取方式过程是用电子束恢复靶的均衡电位；用光激发电子—空穴对使靶电容放电以产生电荷(电位)像；通过读出电子束对靶扫描在前面透明的信号阴极上产生电容耦合的视频信号(图 5—7)。后面将专讲光导管的摄像过程。各种摄像管的主要区别在于它们的靶的组成和构造以及由此引起的电荷像的性质。最普遍的摄像管是用硫化锑作为光导变换器的。它们的价格低廉并具有可控制的增益，但有因过度滞后而受到损害和非线性的变换特性的缺点。氧化铅摄像管显示出更高的灵敏度。

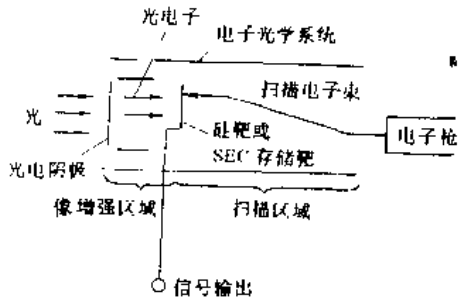


图 5—6　二次电子导电管工作原理示意图
(据 Y. Talmi, 1975)

这种管的优点是：体积较小、结构简单、坚固、容易调整、寿命长、价格较低。但余辉时间长。

2、返束光导摄像管：这些管子装有传统摄像管的内部零件，而利用超正析像管的返回

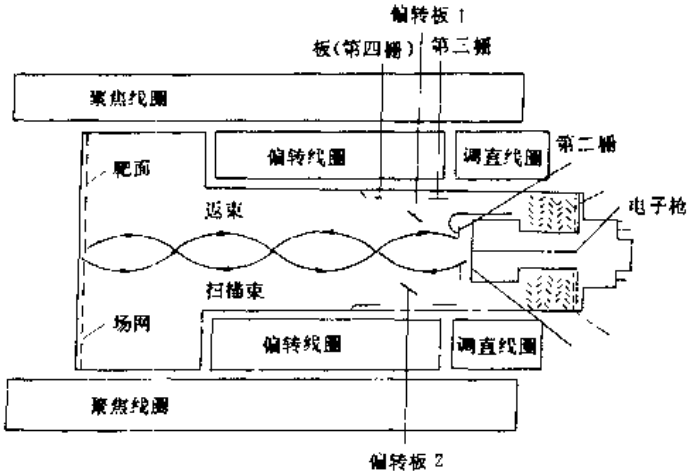


图 5—7　光导管结构原理图
(据 Y. Talmi, 1975)

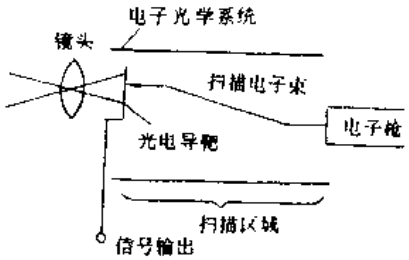


图 5—8　返束光导管结构示意图
(据卢国铭, 1984)

电子束读出方式(图 5—8)。它们是为了高分辨率和 NASA 地球观测研究,利用 Sb_2S_3—氧硫化物(ASOS)作为光电转换靶而特殊设计的。也曾制造了 RBV 硅管,而且应成为优良光度测量的检测器。它们有极好的量子效率,宽的动态范围和对紫外线的响应特性(仅仅受电极表面发射限制),并具有极好的分辨率和由于返回电子束读出机理,提供了大为改善的信噪比。

返束光导摄像管的结构示意于图 5—8,其特点是既采用了光导靶面又结合了超正析像管的电子倍增器。它有三个基本组成部分:电子光学部分、倍增器和光导靶。采用贮存式阴极双交叉四极电子枪。增加一次聚焦,电子束在出口处形成第二次交叉,使电子束流提高,并采用四波节非均匀磁聚焦和磁偏转,使电子束在第四波节会聚得最小,并正交射入靶面。

工作过程是:电子枪均匀发射电子束,电子束在多层螺旋管产生的轴对称磁场作用下,螺旋式前进,经控制、聚焦射向靶面,在靠近靶面时通过高透射率栅网,均匀减速,垂直着靶。整个过程有五个步骤:用强光照射靶面,抹去靶面残像;电子束对整个靶面扫描一次,便均匀冲电;打开快门,使靶面曝光;形成对应目标物明暗的图像,明区为正电位,最暗区保持靶面电位,与阴极电位相同;电子束扫描靶面,正电位吸收电子,阴极电位反射电子,经倍增放大输出信号。

返束光导管的优点是:分辨率高、灵敏度高、信噪比高、动态范围大、视频带宽、温度影响小。缺点是价格昂贵。

上述各种摄像管工作原理有差别,参数也不一致,下列简表(表 5—1)加以比较。

三、摄像过程

摄像过程主要是摄像管的成像过程。我们选用光导管为例,进一步讨论一下摄像过程。光导管是目前常用的,也是性能较好的、结构简单、市场常见的摄像管。

(一)光导管的基本结构

光导管的结构也主要由光电转换系统(光电靶)和电子束扫描系统(电子枪)构成(图 5—7)。电子枪结构同前述。光电靶(也称光电导靶)一般用蒸发法在玻璃基片上镀一层很薄的透明电极,作为信号电极。光导体就镀在信号电极上。光导体材料颇多。常用的有硫化锑、硫化铅、氧化铅等。返束光导管的光导材料是三硫化锑+硫氧化锑,其分辨率更高。光电靶的位置设在摄像机镜头的焦平面上。一般的光导管对电子束聚焦和扫描都是采用聚焦线圈和偏转线圈控制的。

(二)光导管工作过程

目标物反射(或发射)的光经过摄像机的镜头,在光导靶的表层形成光学图像。靶面上各点由于受到不同强度的照射,而产生不同数量的光电子。由此在光导层上引起不同数值的附加光电导,产生高低不同的电位起伏,这种起伏变化与靶面受到的光的强弱成正比。从而形成了与光像相对应的电位图像,完成光电转换工作。

电子枪发射出经过聚焦的电子束,在垂直和水平偏转装置(偏转线圈)形成电磁场的作用下对靶面作由左至右、由上至下逐点逐行地扫描,每个扫描点相当于一个小单元。由于已经受光照射形成的光像,构成了电位图像,每个小单元的电位就随光强弱而不同。各单元在电子束扫描时接受的电子数目不同,而且接受电子数随光的强弱变化。然后把平面分布关系,按扫描时间顺序排列,就得到按扫描单元位置顺序并载有各单元光强弱信息的信号,之后经过低噪声放大电路,将信号放大,在负载电阻上输出视频信号,完成摄像管的工作过程。

四、显像过程

表5 1 电子束摄像管的特性简表

	Sb_2S_3 光导管	PbO 光导管	Si 光导管	ASOS 返束管	Si 返束管	电子轰击靶管	二次电子导电管	正析像管	分流直像管	静电摄像管	析像管
光阴极直径(min)	16,25	25,46	16,25	8,16,25	25,50	16,25,40	25,50	40	40	50	19,13
灵敏度(光子/cm^2) (550mm 光照,积分时间 1/30s)	2.8×10^{10}	4×10^{9}	8.3×10^{9}	8.3×10^{10}	8.3×10^{9}	9.5×10^{7}	8.3×10^{7}	2.5×10^{8}	5.8×10^{7}	1.0×10^{9}	7.2×10^{11},高分辨率 6.0×10^{10},低分辨率
最大信号 —有效值,信噪比(饱和值)	200	320	480	30		32	90	45	100		$1.22A\sqrt{E/W}$
动态范围	250 非线性	100 线 性	500—1000 线 性	80 线 性	100 线 性	500 1000 线 性	~500 只有部分是线性	100 线 性	1000 线 性	1000 线 性	10,000 线 性
分辨率:(l_p/mm) MTF=20%	45	14	32	75	60	15	11 32	12	11	50	55
MTF=50%	24	9	18	45	40	10	8 20	6	10	30	35
分辨图像单元的数目	1×10^{6}	4×10^{4}	$2>10^{5}$	13×10^{6}	10^{6}	6×10^{4}	$(2-4)\times10^{6}$	6×10^{4}	2.0×10^{6}	6×10^{6}	$(2-4)\times10^{6}$
光谱响应(nm)	300~800	380—800 380—600	350—1100	450—850	350 1100	360- 850	300~800 100~900	300- 800	300 - 775	300--800	350—850
量子效率% 500nm								1	18	60	
400nm	13	62	68	30	50	15	12	100	100	60	15
600nm	24	15	78	80	60	9	5	16	51	40	5
800nm	17	0	82	5	45	0.3	0.8	0	1.8	1.0	0.3
1000nm	15	0	15	0	2	0	0	0	0	0	0
像保留(滞后)(%)	30	9	14	>50	无采用价值	15	6	10	10		20
最大积分时间(s)	0.9	10	>1.0	>1.0	>1.0	>1.0	>5h	>1.0	>1.0	100h	0

(据 Y. Talmi,1975)

摄像管输出的视频信号，调制和功率放大后，可经过编码，送到天线，发回地面接收站。地面接收站收到数据，经过一系列的处理，可以采用二种方式显示出直观图像。一种是通过电-光转换系统，把电信号转换成光信号，扫描感光胶片，得到可保存的直观图像。另一种是传给电视显像设备，供快速观看。电视显像设备核心是显像管，其原理就是前面讲述过的阴极射线管。

第三节　电子束扫描图像主要特征

电子束扫描图像的特征是由扫描成像系统决定的，主要取决于摄像管的特征。

一、几何特征

1、电视摄像机所成直观图像一般是画幅式，电视扫描行是连续图像的组成部分。

2、沿扫描行的地面图像为中心投影，具有由中心投影引起比例尺变化、象点位移、影像视差及立体像对图像等特性。

3、影像分辨率决定于光学系统、靶面涂料和电子束直径。因此对不同类型规格的摄像管、摄像机有差异，一般为 50 线对/mm 左右。

4、地面分辨率除决定于影像分辨率外还与航高有关系。现在中轨卫星电视摄像机地面分辨率可达几十米。

上两个分辨率都与电子束有关，电子束直径越小，分辨率越高，技术难度越大。

二、物理特征

1、光谱响应范围从近紫外线到近红外线(0.12－1.8μm)都有较高的灵敏度。如在制冷条件下可以达到 1.4μm(图 5－9)。

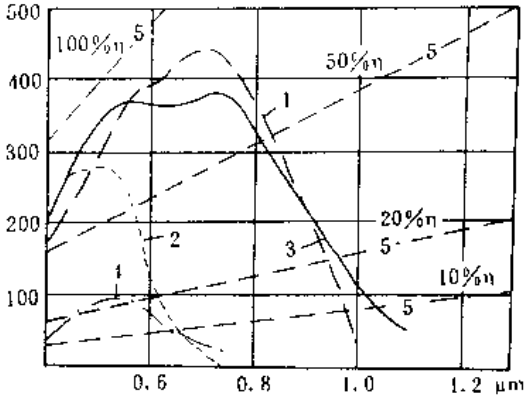


图 5－9　几种摄像管绝对光谱灵敏度

(据美国摄影测量学会,1975)

1. T_1 光导管　2. 非利普 XQ1023 型管　3. RCAC 型管

4. RCA8507A 型管　5. η为量子效率

2、大多数现代的摄像管信噪比受一级放大的噪声指数所限制。要得到优质图像所必需的最小的信噪比是 10，连续观察时信噪比较高。

3、动态范围是指摄像管产生有效图像辐照度值的范围。尽管各种类型不同，但一般来说

这类成像的动态范围是比较大的。并可以依靠电子视频加以处理。

4、电视摄像机采用慢扫描的工作方式，减少每秒帧数，减小图像信息带宽至合理的范围，从而保证必须的分辨率，提高传输距离。

三、图像畸变

1、几何畸变：几乎所有的电子束摄像机都有图像畸变。如图 5—10 示出，几种典型的畸变(夸大)。任何电视摄像机中的实际畸变是各种畸变因素混合的结果。对于给定的摄像机，其几何畸变的大小是一个固定的参数，约 2%。

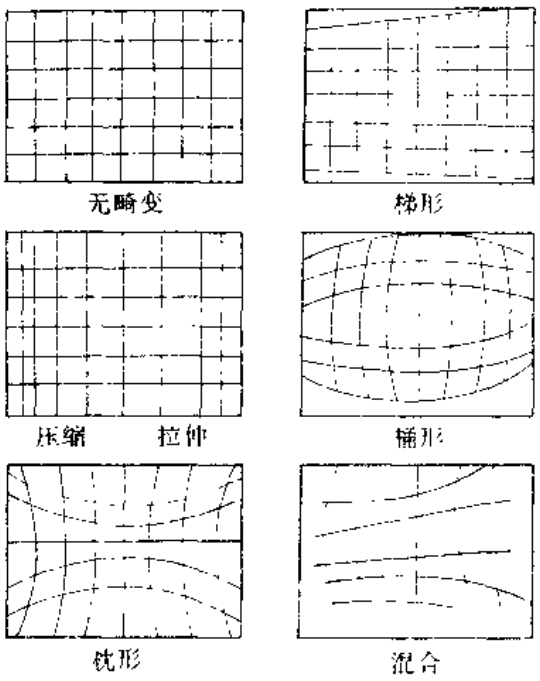


图 5—10　电子束扫描成像几种几何畸变示意图

2、成荫(黑点)：指同均匀照射的输入图像相比较视频输出信号的变化，是由光学系统以及摄像管靶面灵敏度所引起的。通过电子视频线路可以补偿。一般优质的电视摄像机的成荫不大于 5—10%。

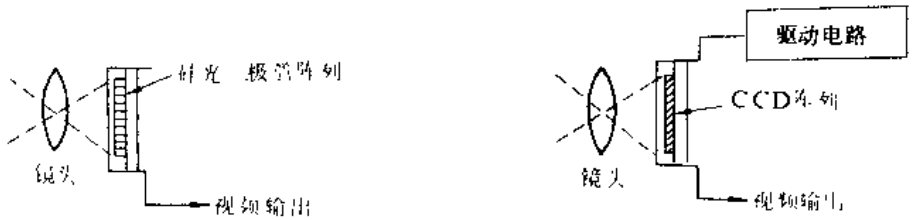
3、瑕疵：光点(包括白点和黑点)、斑点和补片就是通常观察到的典型瑕疵。是由摄像管靶面的缺陷引起的。

4、图像滞后：摄像管有没有模糊和拖尾而再现一个活动物体图像的本领与摄像管靶面的特性(如光照)有关。不同的摄像管滞后现象不一样。一般地说，滞后值在 5—20%之间。

第六章　固体自扫描成像基本原理

第一节　概述

固体的扫描成像过程实质是光学-固体自扫描成像过程。它是指由光学镜头掠过视场，通过在焦平面设置的固体自扫描器件的能量转换装置，形成目标物图像的方式。固体自扫描成像系统的结构如图 6－1。



a　　b

图 6－1　固体自扫描成像系统结构框图

a. 硅光二极管成像系统框图；　b. CCD 成像系统框图

这类器件中，最早出现的是硅光二极管阵列成像器件，但很快被电荷耦合器件所取代。现在流行的是电荷耦合器件(CCD)，正在发展的有庠链器件(BBD)和电荷注入器件(CID)等。

硅光二极管阵列成像器是在镜头的焦平面上把硅光二极管排成阵列，属于光敏元件阵列。目前是把若干个二极管制在一块基片上，间隔可以到 15μm，而且理论上可以排列很长，是可以有发展的。其优点是：(1)效率高；(2)测量精度好；(3)校正方便等。由于 CCD 的发展，硅光二极管的成像器件发展受阻。CCD 技术现已成熟，并广泛用于传感器上。庠链器件和电荷注入器件还没发展起来。本章将重点介绍 CCD 成像原理。

第二节　光学-电荷耦合器件成像基本原理

电荷耦合器件(Charge Coupled Device 简称 CCD)具有广泛的应用领域。CCD 应用于摄像时，物像靠光学镜头来产生，用 CCD 制成的成像设备称光学-电荷耦合成像器，简称 CCD 像机。

一、概述

CCD 像机的基本结构与前面提到的光学-固体自扫描成像系统的基本结构相同。光学镜头部分在前面讨论过，这里不重复。这里只介绍 CCD 器件的概况。

CCD 所以称为电荷耦合，是因为其它半导体器件是电压信号，而 CCD 积累是电荷的多

少，通过耦合方式转移和输出。

CCD 的特点是：动态范围大，可以达到 1000：1 以上自由扫描，而且表现为线性特性，噪声低，信噪比可达 80～100dB；灵敏度高，对红外光谱也很灵敏，硅质器件工作范围在 0.4—1.1μm间，如改用其它特殊材料还可以扩展到 2—200μm。

在成像方面不需要很高的工作电压，且不易破损，远优于需要复杂电路的硅光二极管阵列装置。与光学电子束扫描成像方式比较更有如下优点：(1)体积小；(2)重量轻；(3)封装密度高；(4)省电；(5)成本低；(6)性能可靠；(7)寿命长；(8)输出快；(9)几何失真小；(10)不受外界电磁场干扰；(11)用途广。

CCD 是 1970 年在 60 年代研究 MOS 器件的基础上研制出的。1973 年开始出售 CCD 摄像传感器，到 1975 年已经比较成熟，这短短几年的发展令人瞩目。

电荷耦合器件应用范围十分广泛，从图像传感器、模拟延迟线到彩色电视摄像机、计算机应用的大容量存储器等，为半导体技术的应用又打开了新的局面。在半导体器件发展应用中，倍受青睐。目前电荷耦合器件常见应用于：

(1)摄像方面　电视摄像机(图像传感器)、特殊摄像机、光学图形读出器、医用器械(盲人助读器、胃摄像机等)、复印机、传真、工业测量、文字识别、电视电话等。

(2)模拟延迟方面　电视接收机、录像机、电视电话、彩色电视摄像机、扫描转换器、军用通讯(编、译码)、带通或低通滤波器、雷达、延迟线等。

(3)数学存贮　缓冲存贮器、移位寄存器、半导体盘、半导体鼓等。

除此之外的应用范围仍日渐扩展。因此，CCD 近十余年来已成为国外半导体产品中的“热门货”，许多半导体厂家都在研制各种结构的 CCD，并使之实用。

由于 CCD 的研究和应用的进展，开阔了人们的眼界。因此曾有人认为，人们不仅可以利用电子运动，而且可以利用光子、原子、分子能级的电场、电荷来工作，从而获得与电子电路等效的功能，认为这是“分子电子学”的开始。

二、CCD 的基本结构

(一)MOS 结构与其电荷存储

构成 CCD 的基础结构是金属-绝缘的氧化物—半导体构成的 MOS 电容器。常称 MOS 结构(图 6—2)。要了解 CCD 必需先讨论 MOS 结构及其存储功能。MOS 象其它电容器一样能存储电荷。下面以 p 型硅底衬为例条进行讨论。若在金属电极上加一正的阶梯电压，硅-氧化硅界面处的电势(称为表面势或界面势)发生相应的变化，附近的 p 型硅中多数载流子-空穴被排斥，形成“耗尽层”。若在金属电极上所加电压超过 MOS 晶体管的开启电压，在 $Si\text{-}SiO_2$ 界面处可以形成势阱并储存电子。由于电子在那里的势能较低，所以可以说是在半导体表面形成。对于电子势阱(图 6—2)中能够容纳多少个电子，这取决于势阱的“深浅”，亦即表面势能的大小，而表面势又随栅电压变化。

这里所说的势阱，就是指深耗尽区下面的表面势。

如果没有外来的信号电荷，耗尽层及其相邻区域在一定温度下产生的电子将逐渐填满势阱，这种热产生的少数载流子电流叫做暗电流，以区别于光照下产生的载流子，热产生的多数载流子-空穴将通过衬底跑掉。

实验证明，MOS 结构有如下现象：(1)若金属电极(栅极)加一负电压，则空穴在 $Si\text{-}SiO_2$

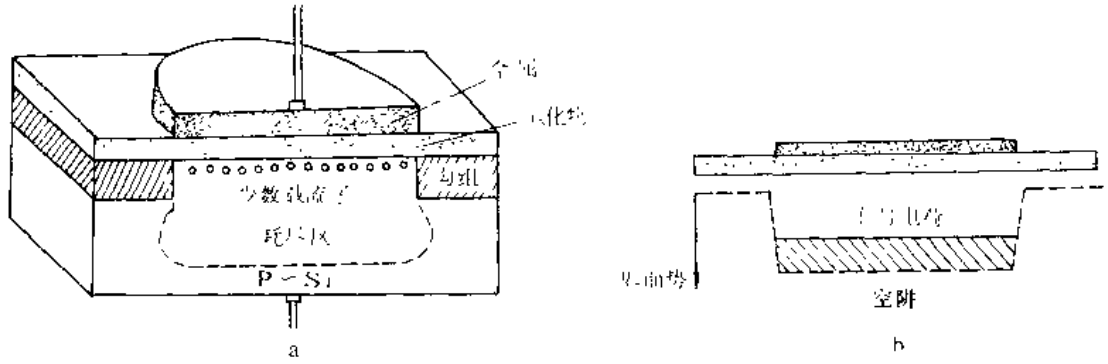


图 6－2　MOS 结构示意图

（据王以铭，1987）

a. MOS 电容器剖面图；　b. 有信号电荷的势阱

界面聚集；(2)若加一微小正电压，$Si\text{-}SiO_2$ 界面空穴被排斥，形成一个小的耗尽区和电荷的聚集；(3)继续增加电极电压，则会加宽加深耗尽区；(4)若保持恒定电压（如＋10V）随着电子积累，耗尽层变窄，表面势降低。我们由此得出结论：在 MOS 的金属电极加一个超过 $Si\text{-}SiO_2$ 开启电压时，即可由表层向内产生存储电荷的作用。研究 MOS 结构，不难看出：

栅极电压（V_G）与表面势（φ_s）有如下关系：

$$V_G = V_{ox} + \varphi_s$$

其中：V_{ox}为氧化物层的电压降。

在常见的 CCD 中氧化物层很薄，衬底掺杂浓度较低，p 型硅的表面势、栅极电压和电荷密度（Q_{INV}）有近似的如下关系：

$$\varphi_s = V_G + \frac{Q_{INV}}{C_{ox}}$$

其中：C_{ox}为单位面积氧化物电容。

（二）CCD 基本结构类型

CCD 基本结构是一系列 CCD 原始结构单元（MOS 电容器）构成，其中半导体底衬是一个整体，在其上生长均匀、连续的氧化层面，再上是各自互相分离、绝缘的，间隔极小的金属电极。

按金属电极与所加电压的组合关系分为二相、三相、四相结构（图 6－3、6－4、6－5）。把两个电极组成一个单元，前后两个电极分别加上一个不等的电压，称为二相。把三个电极组成一个单元，前后三个电极分别加上一个正电压，称为三相。同样，四相也是把相邻四个电极组成一个单元，前后四个电极分别加上四个正电压构成。这样在相邻的电极下造成不均衡的势垒。

（三）CCD 的驱动器

CCD 的工作电源是时钟脉冲驱动器（也称时钟脉冲发生器）。由它提供电荷转移所必需的脉冲和输入、输出结构所需的复位脉冲以及各种电平。只有这种电源 CCD 才能工作。因此，这种驱动器成为 CCD 整个器件的重要组成部分。

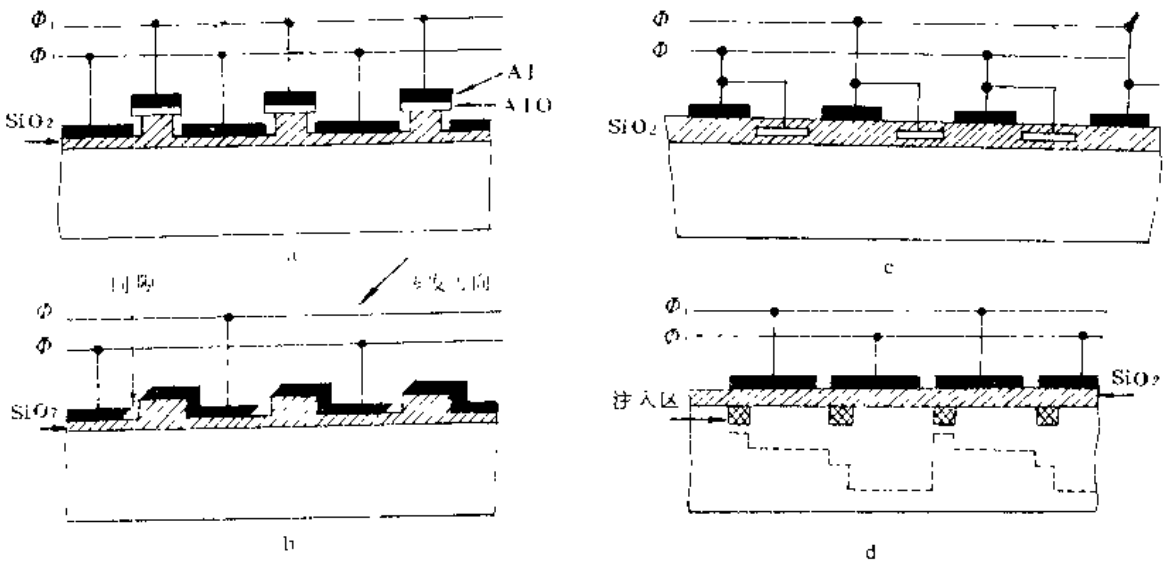


图 6—3　二相 CCD 典型结构图

(据王以铭,1987)

a. 利用钻蚀槽隔离的结构；　b. 利用斜角蒸发工艺的结构；

c. 利用氧化物厚度不同的二相硅—铝交迭栅结构；

d. 注入势垒二相结构

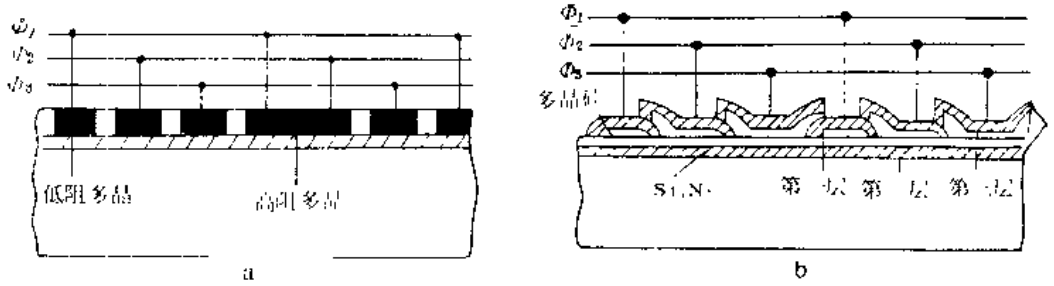


图 6—4　三相 CCD 典型结构图

(据王以铭,1987)

a. 采用一层多晶硅的三相电阻海结构；

b. 采用三层多晶硅的三相交迭栅结构

与 CCD 结构相适应,驱动器提供的脉冲也有二相、三相、四相之分。图 6—6 是各种时钟脉冲波形。图 6—6(c) 是三相时钟脉冲波形并示出输入、输出与时钟脉冲波形的关系。

图 6—7 为简单的二相时钟驱动器线路图,通过它或类似的电路,为 CCD 提供时钟脉冲电平。

三、CCD 的注入电荷、转移电荷与输出电荷的功能

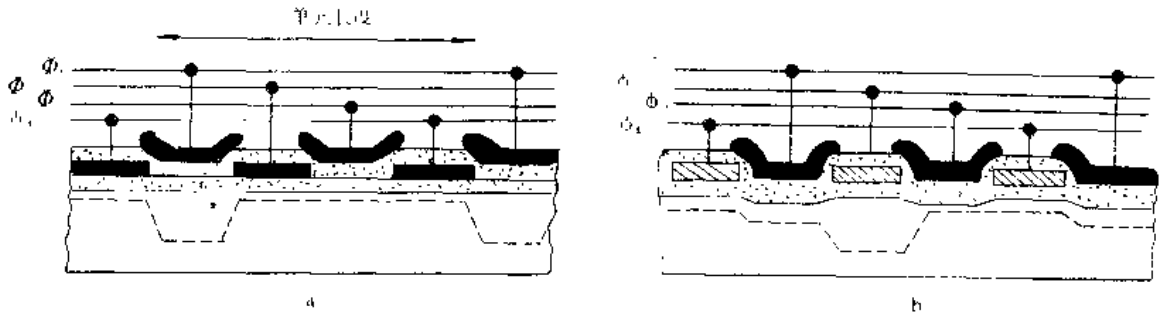


图 6—5　四相 CCD 典型结构图

（据王以铭，1987）

a. 两层金属，中间淀积绝缘物；　b. 晶硅－金属交迭栅

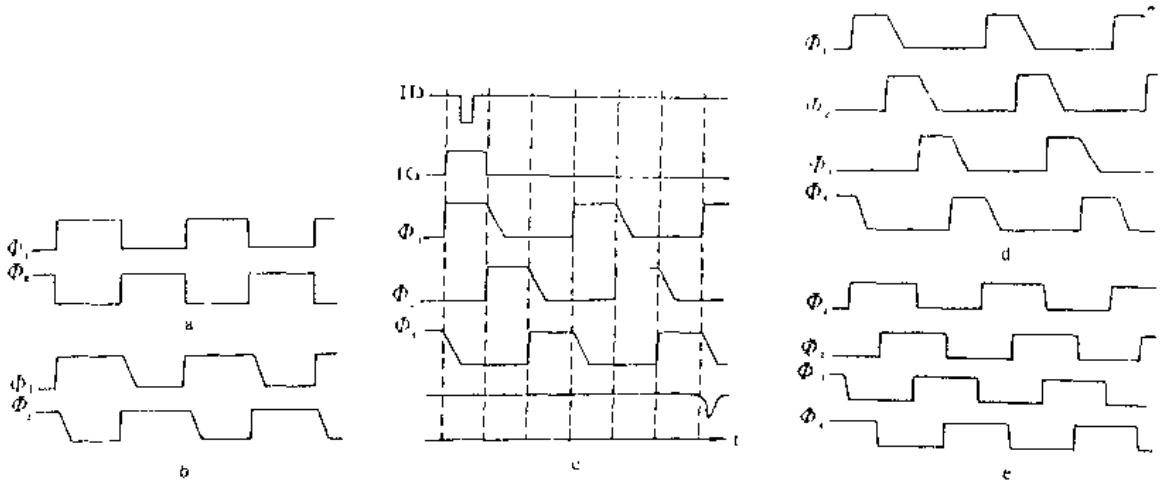


图 6—6　二相(a)(b)、三相(c)、四相(d)(e)时钟脉冲波形示意图

（据王以铭，1987）

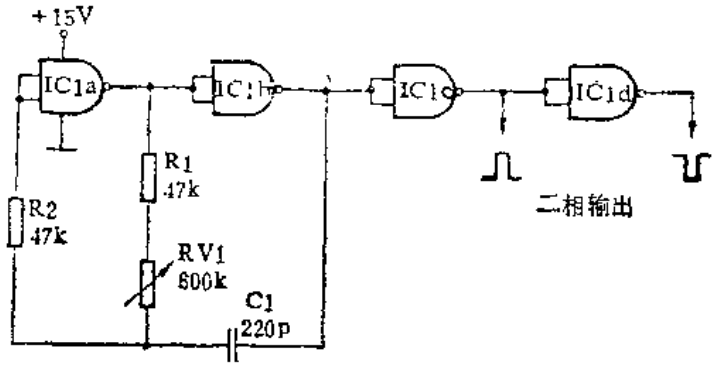


图 6—7　可变频通用二相 CMOS 时钟脉冲驱动器

（据王以铭，1987）

MOS 存储电荷的功能在前面已经讲过，CCD 存储电荷的功能与之原理相同。CCD 工作绝不是单独存储电荷的功能。CCD 还具备注入电荷、转移电荷和输出电荷等几个基本功能。

(一)CCD 的电荷注入

向 CCD 注入电荷是一种信号的注入。注入电荷的方式分为两类:一类是电注入式,一类是光注入式。

1、电注入

所谓电注入就是对信号电压或电流进行采样,将信号电压或电流转换为信号电荷,输入 CCD 器件中的过程。

具体的输入结构有很多种。归纳起来有:用输入二极管和用几种起控制作用的输入栅的办法(图 6—8),不同的用途可以采用不同的方式。

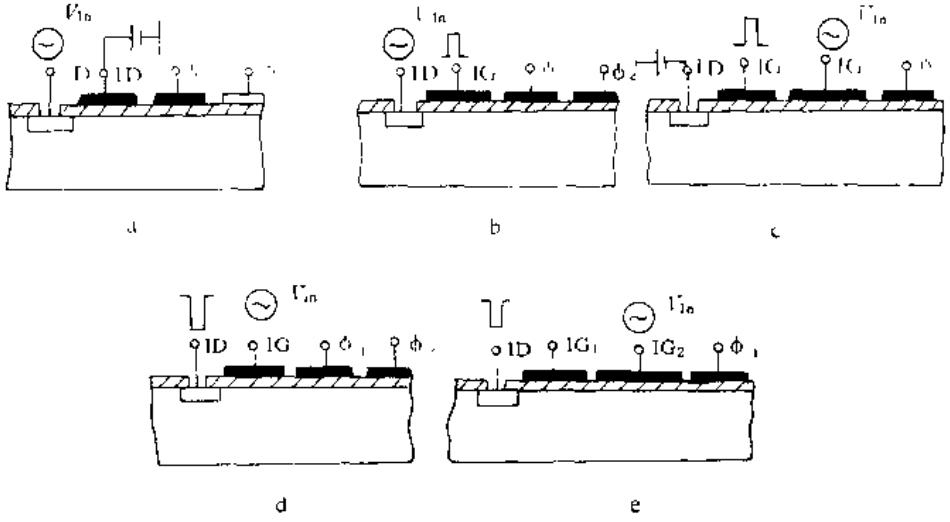


图 6—8 几种电输入方法

(据王以铭,1987)

a. 动态电流注入;b. 二极管截止;c. 改进的二极管截止;d. 电势平衡;e. "充和溢"

2、光信号注入

CCD 的底衬是半导体,半导体具有吸收光的性能,谓之光吸收。光吸收就是半导体中电子吸收光子并从一个能态跃迁到另一个较高能态,使光信号转换为电信号的过程。CCD 光注入的实质就是光吸收的过程,也可称为辐射吸收过程。

辐射吸收可用吸收系数(α)来描述,α 为一定波长的辐射沿传播路径的强度(I)的衰减率。吸收过程可用如下方程描述:

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha I$$

至于半导体能够吸收哪个波段的辐射和吸收率大小,是由半导体材料的成分和类型所决定。不同的半导体材料有不同的吸收限(向长波方向的极限),称为截止波长(图 6—9)。不同的半导体在接受光照射产生电子多少的能力不同。投到器件上一个光子产生导电电子(或空穴)的几率称为量子效率。同一种材料接收光子多,产生载流子就多。而且,对一种半导体,不同波长的量子效率也不相同(图 6—10)。

当合适波长的光从 CCD 电极上面或 CCD 背面照射时,能在半导体-氧化物表面以下的

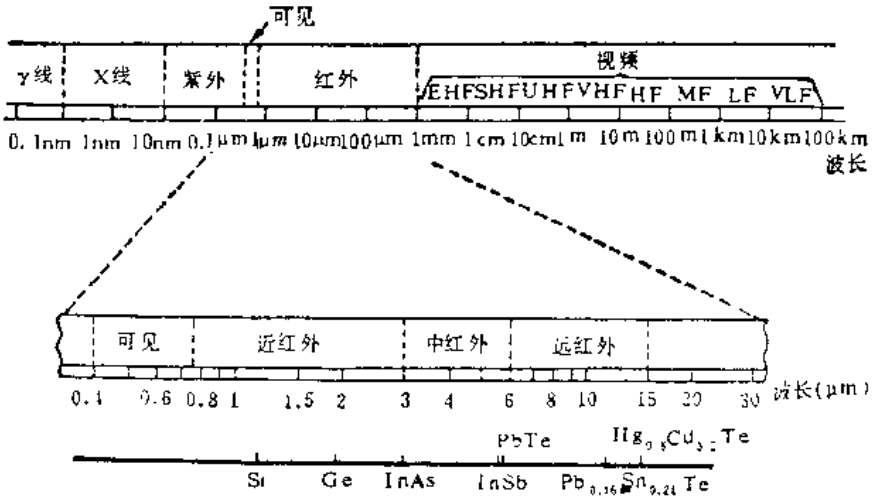


图 6—9　电磁波谱与几种材料的截止波长

(据王以铭,1987)

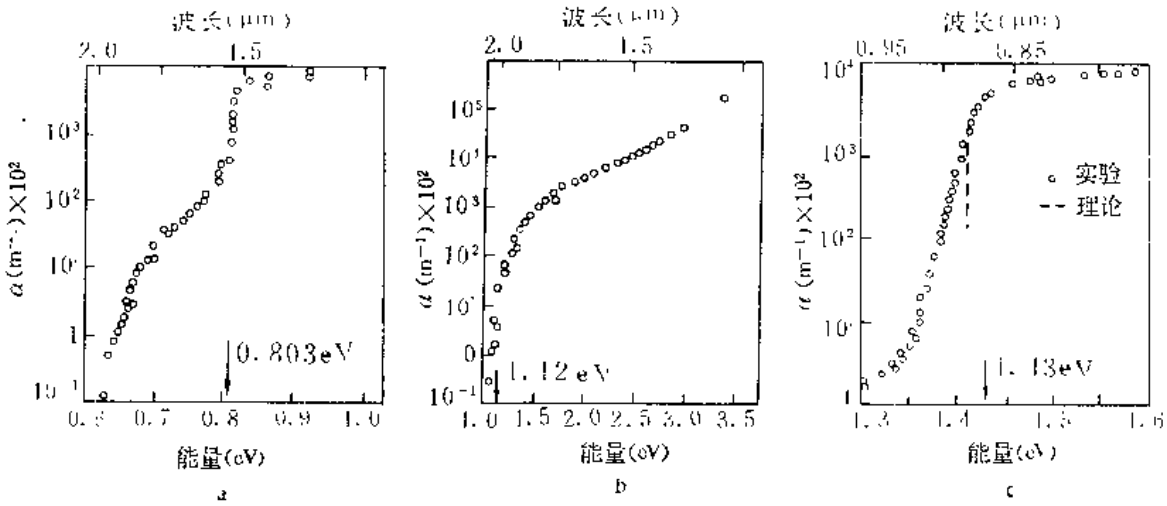


图 6—10　Ge(a),Si(b),GaAs(c)吸收系数与辐射波长的关系

(据王以铭,1987)

半导体内聚集电荷形成电荷包,同一种半导体材料中的电荷包的大小与光的辐射强度及波长有关。辐射强度越大,吸收系数与波长的关系可见图 6—10。

(二)电荷的转移

如若对 CCD 电极加同一正电压,所形成的电势将是相同的。当对不同电极加以不同的正电压时,在低正电压电极下聚集的电子将向高正电压电极下移动。人们需要的是将电荷从一个电极下转到一侧相邻电极下,而且不是逆行。就是说需要电荷有序移动。

对于 CCD,如果当在电极上加上定时规则变化的电压(称时钟脉冲电压),各电极下形成一个个分立的电子聚集的电荷包,在一个周期中向右移动一个电荷耦合单元,即势阱中的电子随着电压变化从一个电容器转到另一个电容器。因此,电荷包随着局部势阱连续横向位

移而向右移动(图 6—11),这就是转移。这种势阱相通,间隙区得以控制的现象就称为耦合。能够形成耦合的必要条件是电极间的距离非常近。

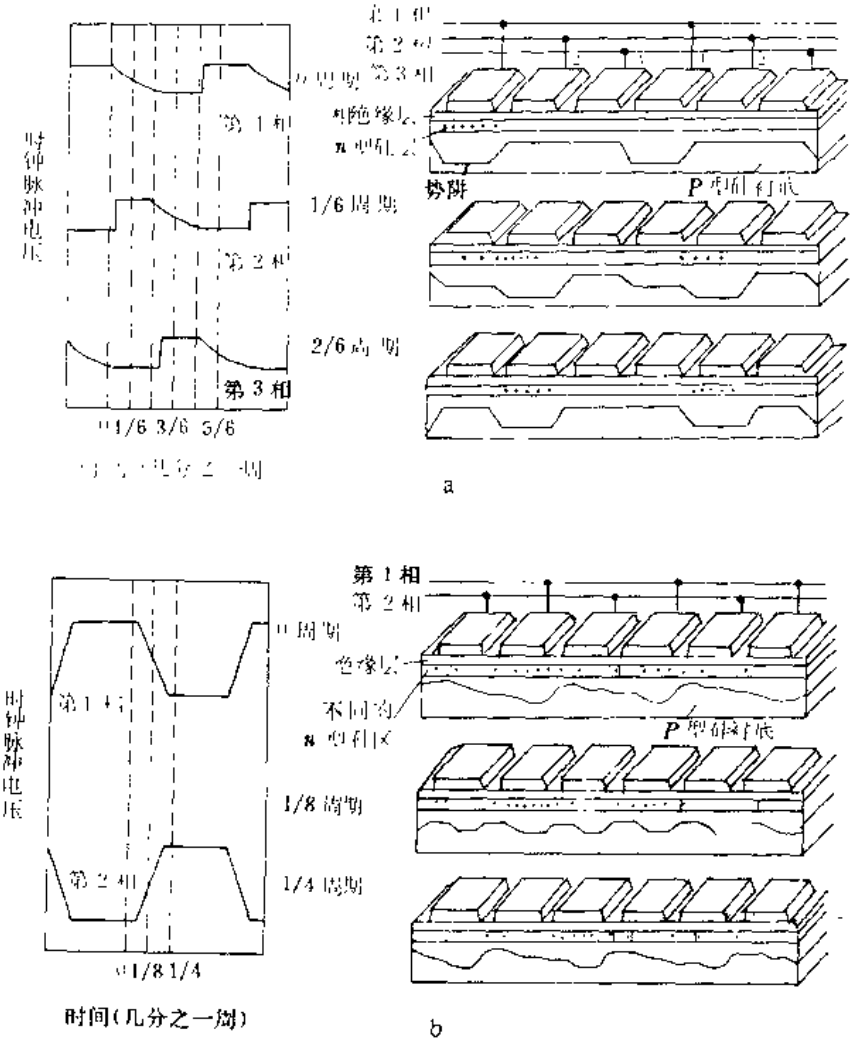


图 6—11 CCD 电荷转移示意图

(据王以铭,1987)

a. 三相电荷耦合元件; b. 二相电荷耦合元件

例如在三相中,令 $\Phi_1=+10V$,$\Phi_2=+15V$,$\Phi_3=+10V$,并按着一定顺序周期地轮换,就成为+10V,+15V,+10V 的"时钟脉冲电压",在时钟脉冲电压作用下,三相电极各极电压随之变化,电荷包也随之转移。表 6—1 示意电荷包转移与电极电压变化的关系。

如果在第一个单元,第一相+15V 的电极下形成一个电荷包,当按时钟脉冲电压第一次改变时,第二相电极电压逐渐变为+15V,而第一相电极电压逐渐变为+10V 电荷包自然向第二相电极下面转移,接着第三相电极电压变成+15V 电荷包转移的第三相电极下;进而就可以进入第二个单元的电极下面了。以此类推,电荷就可以不断地转移下去。

二相结构和四相结构也有类似的过程。

表 6—1　电极电压变化与电荷转移方向表

电极 / 电压 / 变换次数	N 单元			N+1 单元		
	第一相	第二相	第三相	第一相	第二相	第三相
原　始	15	10	10	15	10	10
1	10	15	10	10	15	10
2	10	10	15	10	10	15
3				15	10	10
4				10	15	10
5				10	10	15

一般说，CCD 的电荷转移过程，有一定的电荷损失，但损失量极小。典型三相 CCD 转移效率达 99.9%—99.99%，损失原因：(1)转移过程速度限制；(2)Si-SiO_2 界面对电荷的拖　。

(三)CCD 的电荷输出

CCD 电荷输出的最简单形式是置有一输出二极管，它与最后一个存储电极耗尽区相耦合(图 6—12)。一般有一个电极做在最后一个存储元件与二极管之间，使得最后一个转移电极的电容性电压检波减到最小，于是当 φ_n 信号撤去时存在于最后一个势阱的任何电荷都将集中于输出二极管附近，并在输出电路以一个小电流脉冲的形式出现，应用适当的负载电阻 R_L 便可获得电压输出。

四、CCD 成像原理

CCD 成像是将 CCD 阵列器件置于光学镜头的焦平面上。对通过光学镜头形成的影像进行采样，所以 CCD 成像过程实质可以称为 CCD 像感过程，即由不同光强照射一个个感光单元，注入、积累、转移、输出电荷的过程。

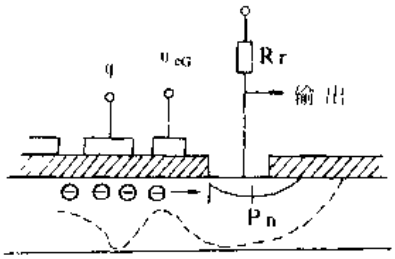


图 6—12　CCD 电荷输出电路示意图
(据王以铭，1987)

CCD 成像器件分为线性阵列(简称线阵)和面性阵列(简称面阵)。线阵是成像单元的一维排列，而面阵是成像单元的二维排列，只是采样和输出方式不同而已，掌握线阵工作原理就不难理解面阵方式了。

前面讨论了光注入问题，但没有涉及对目标物光强分布的反应和分辨。实际的成像器件中，感光区与转移区是彼此分开的。图 6—13 示出了 CCD 线阵单线结构成像器，上部所示感光区(也叫光敏区)一般是掺杂多晶硅-二氧化硅-硅 MOS 结构，用沟阻扩散(或者厚氧化物)分隔成一个个感光单元。转移区(也叫读出区)是 CCD 移位寄存器，上面通常覆盖一层铝，以便把光遮掉。感光单元线列与移位寄存器并行排列。感光单元与转移单元一一相对，二者中间用转移控制栅加以控制。各感光单元用光栅控制。

在积分期，光栅加高电平，各感光单元下面形成积分势阱，光照产生电子-空穴对，多数载流子通过衬底流走，少数载流子则被势阱收集，形成信号电荷包。积分期结束时，光栅电平下降，转移控制栅打开，各个电荷包由感光单元同时并行地向移位寄存器各单元转移。图 6—13 下部是光栅、转移控制栅电平和时钟脉冲的时序图。按照图中所示的安排，各个信号电荷包将进入各转移单元 φ 电极下的势阱。

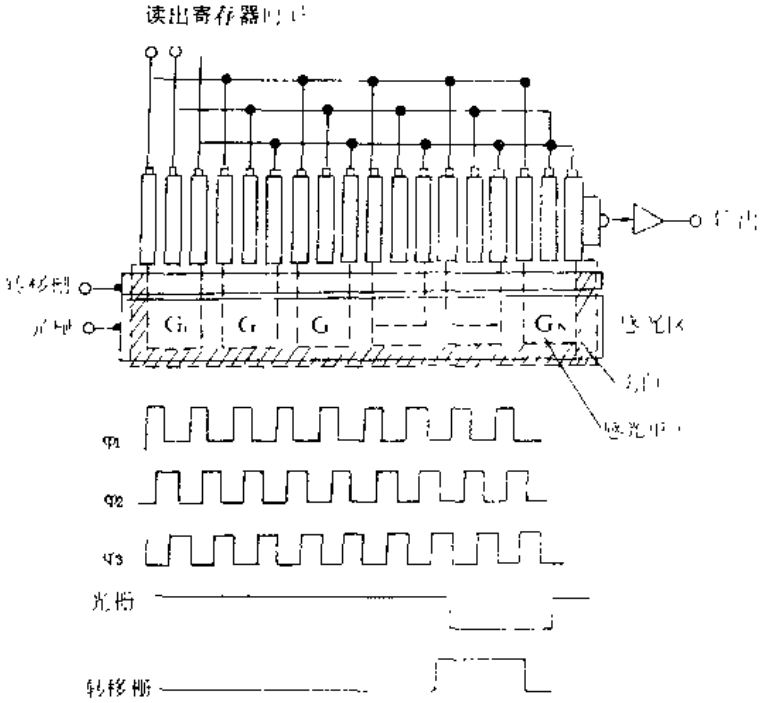


图 6—13　CCD 线阵单线结构成像器
（据王以铭，1987）

当各个电荷包在时钟脉冲驱动下开始沿移位寄存器向输出端转移时，转移控制栅关断，随着光栅上升至高电平，感光区进入下一个积分期，这种工作模式保证积分占空因数接近 100%。

实用的 CCD 线阵成像器一般采用如图 6—14 所示的双线结构，单元集成度大的器件尤其如此。双线结构有两个移位寄存器，它们平行地配置在感光区两侧。感光区用“S”形（或合乎要求的其它形状）沟阻扩散分割成两组单元，呈叉指状，在光栅和转移控制栅的配合控制下，这两组感光单元中积累起来的电荷包在积分期结束后分别进入左右两侧的移位寄存器。从整体上看，第 1，3，5…… 个电荷包一起进入一个移位寄存器诸单元，第 2，4，…… 个电荷包一起进入另一个寄存器诸单元，这里只需要注意使输出信号次序与感光单元排列一致。

从图 6—15 中可以看出 CCD 面阵成像器件的一般原理：分为感光区、暂存区、读出寄存区。在感光区又有 M 个转移沟道，每个沟道有 N 个感光单元，形成 $M \times N$ 个单元的二维器件。

将这类成像器件置于光学镜头的焦平面上，每次感光单元对像平面进行采样，输出后再按原位置排列，即可恢复图像。

实用 CCD 像机比较复杂，CCD 像机整体结构见第八章第六节 HRV 结构示意图。

这种器件用于遥感，以线阵为好。一个线阵可以是几十个，可以是几百，也可以是几千。目前已有三千个及双三千规模线阵器件。面阵 CCD 器件也有多种规格。

线阵瞬时视场是一条线，相当于一行像元。面阵瞬时视场是一个面，相当于一个平面像元阵。

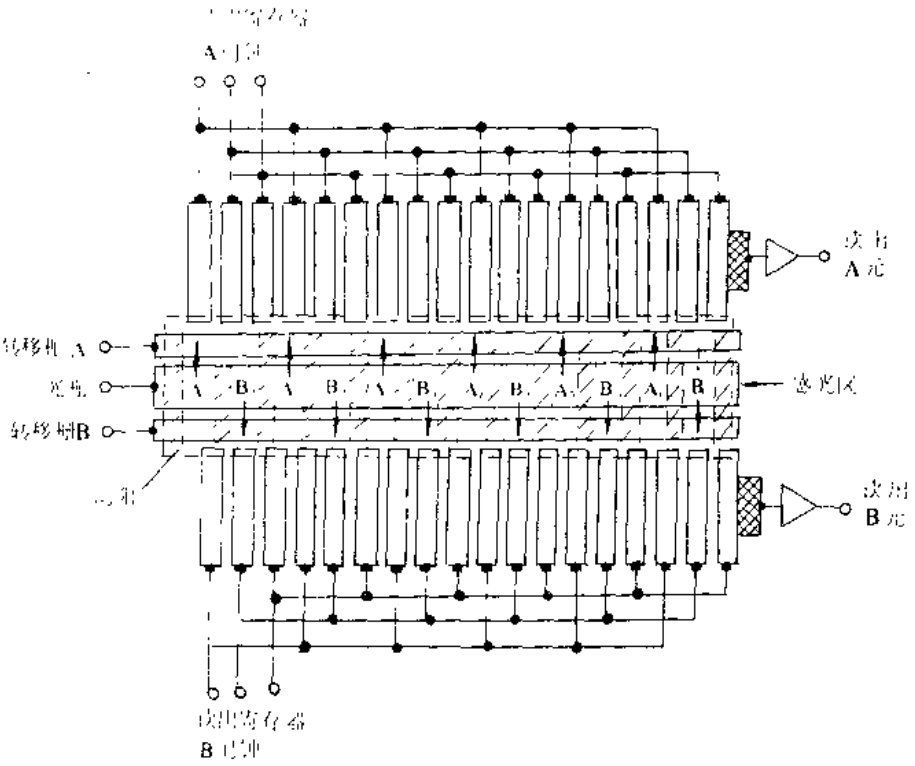


图 6—14　CCD 线阵双线结构成像器
（据王以铭，1987）

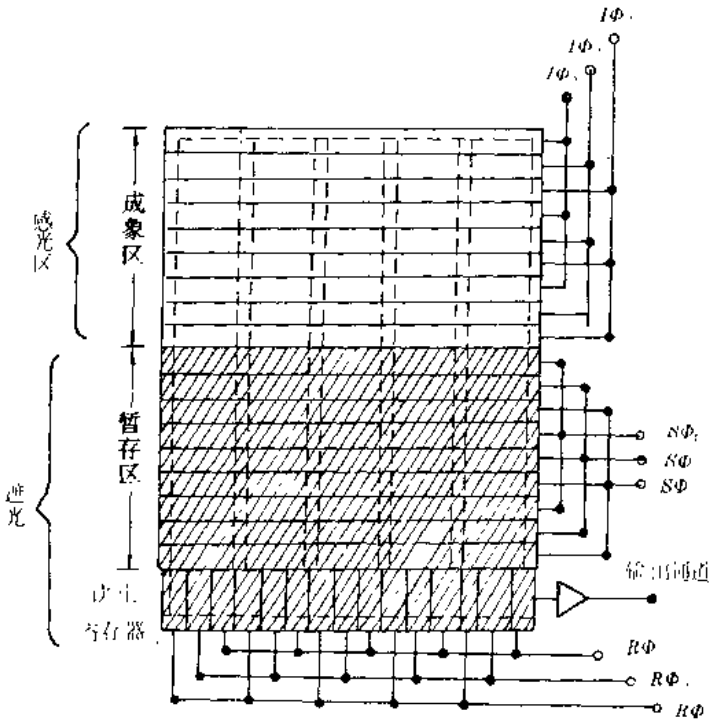


图 6—15　CCD 面阵成像器件之一（帧传输结构）
（据王以铭，1987）

第三节　CCD像机图像主要特征

(1)线阵式呈逐行扫描图像，由于平推着向前成像，故有多种相似的称呼：推帚式、推扫式、刷式、刷扫式等；面阵式图像为画幅式。

(2)线阵图像在忽略姿态畸变因素的情况下为动态多主纵线中心投影集合图像；面阵为中心投影。

(3)线阵式无重叠；面阵式画幅间重叠情况决定于设计条件。

(4)线阵各扫描线互相对应的像元之间像点位移方式相同；面阵各扫描线像点位移有差别，它的像点位移方式与摄影相同。

(5)线阵几何误差小，易校正；面阵与航片相同。

(6)几何分辨率决定于CCD成像单元对应于景物面积。由于CCD可以做得很长，其成像单元也很多，而且与光学机械扫描相比，单个像元可以获得较长的能量积累时间，因此分辨率可以有较大的提高。

(7)光谱响应范围较宽，而且量子效率高，与其他光学-固体扫描器件(如硅光二极管)的比较较高(图6—16)。CCD采用的材料不同，波谱响应范围不同。目前已应用到15 μm波长的红外波段。

(8)CCD的噪声低是其重要优点，因此低照度情况下，图像清晰度也较高。

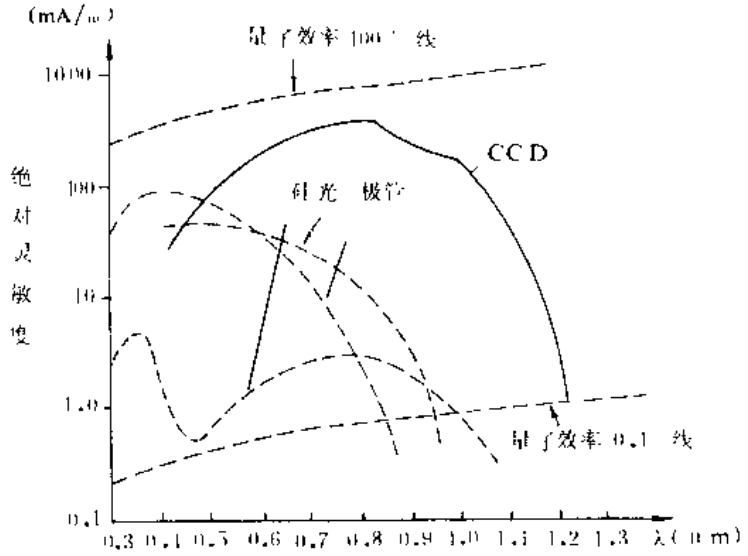


图6—16　CCD与硅光二极管光谱响应比较图

第七章　天线扫描成像基本原理

第一节　概述

一、天线扫描成像概念

天线扫描成像是指天线按一定的方位接收目标发射或反射回来的电磁波并形成图像的技术方法。使用的电磁波主要是微波波段的电磁波，有时也超出微波的范围。有人称它为雷达成像，但天线扫描成像不等同于雷达成像。天线扫描成像的内涵要比雷达成像大，它还包括了那些不属于雷达成像的无源微波成像，诸如微波辐射成像计一类。它们同属于天线扫描系统，却不属于雷达。这里，我们按接收电磁波的器件和方式分类，称这种成像方式为天线扫描成像。

雷达成像是天线扫描成像系统中相当重要的一部分。雷达译自英语 Radar，为 Radio detection and ranging 的缩写。原意即"无线电探测和测距"。雷达成像是自身发射电磁波，依靠被探测物反射回来的电磁波上所加载的信息，对被探测物进行测量和成像。因为雷达成像是自身发射探测电磁波，有人也称之为有源式或主动式天线扫描成像。和其对应的无源式或被动式天线扫描成像，则是自身不发射电磁波，靠接收被探测物自身辐射的电磁波，来测量被探测物的性质和相对距离。

天线扫描成像有一些自身独具的特点，是引起人们喜爱和利用它的原因，主要特点有：

1. 全天时工作，不受时间上的限制，即使在夜间也可照常工作；
2. 全天候工作，不受云雾的影响；
3. 接收到的电磁波与物质组成结构有关，能反映出被探测物的有关微波辐射特征；
4. 观测波段多利用微波或其附近的波段，不在人们经常使用的可见光、红外线波段，因而有一些独具的特点；
5. 有一定的穿透能力，可以在一定程度上获取隐伏的信息；
6. 天线方向可调整，以增加地表特性；

但天线扫描成像也有一些缺点：

1. 不能记录与颜色有关的信息；
2. 设备大而复杂，成本高；
3. 分辨率有待进一步提高；
4. 图像有特有的畸变。

二、天线扫描成像应用概况

天线扫描成像首先用于军事，现也用于气象、海洋、洪水、农业、冰冻、地形测量及矿产地质调查等方面。

天线扫描成像中的佼佼者合成孔径雷达已有几十年的经验，也进行了几十年的试验，技术上日趋完善。尤其是机载合成孔径雷达在航空遥感中占有一定比重，经验也比较成熟。从遥感地质角度看，在我国工作还较少。近年来的试验表明：高分辨率合成孔径侧视雷达图像对资源遥感应用也是最佳图像之一。

在从航天遥感方面，合成孔径雷达已有几套设备升空试验，性能不断提高。预计不久可以进入全球应用阶段。

三、天线扫描系统的分类

天线扫描系统以发射电磁波的角度可分为主动式和被动式两大类，从回波信号的分析又可分为成像和非成像两种，具体分类如下表所示：

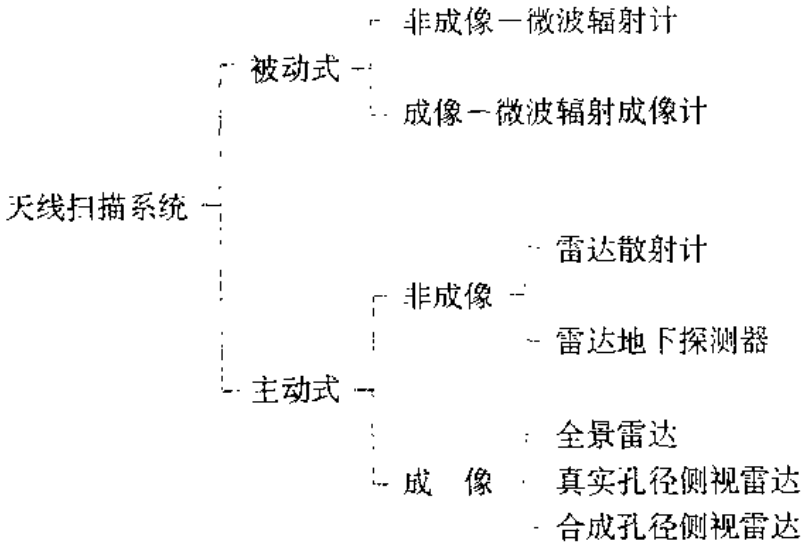


表7—1 天线扫描系统分类

第二节 雷达基本结构和雷达方程

一、雷达的基本结构

应用于各方面的雷达都有大致相同的结构。包含有脉冲发生器、发射机、收发开关、天线、接收机、显示器等几个基本部分(图7—1)。

二、雷达各部分功能简介

1. 脉冲发生器

脉冲发生器也有人叫它同步器或定时器，是利用谐振腔或谐振电路产生一定时间间隔、一定波形、一定宽度脉冲的设备。由它产生的脉冲被传送给发射机和显示器及其它伺服设备。除利用它发生的微波脉冲去探测地物外，也利用它去同步雷达各设备，使整个雷达的各个部件都能按一定时序工作。在雷达接到回波后，还利用它发生的脉冲信号去和回波信号比较，提取回波上加载的信息，进而判断地物的特征和位置。

2. 发射机

发射机是放大并调制电磁波的设备，通常包括高频振荡器和脉冲调制器等设备。它们接收从脉冲发生器传送过来的稳频脉冲信号进行功率放大，放大的信号被用来触发调制器，使调制器产生高压脉冲，高压脉冲做为电源提供给高频振荡器，高频振荡器产生高频振荡的电磁波经天线发射出去。

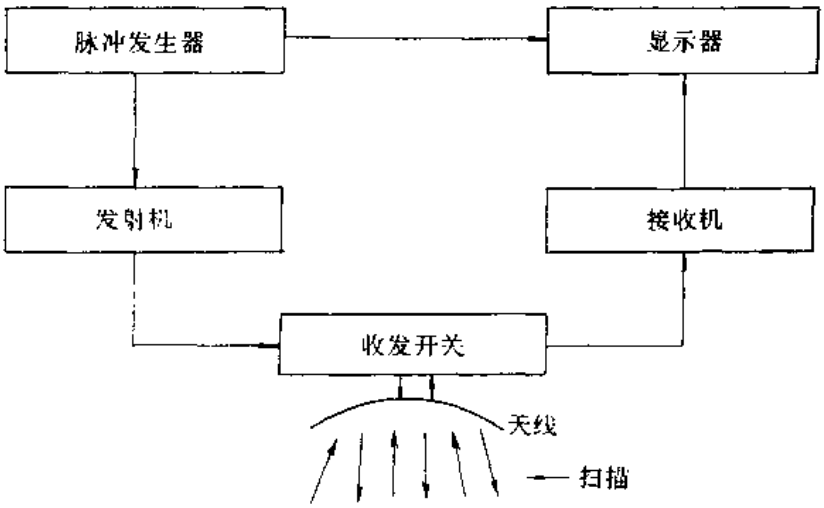


图 7－1　雷达基本结构框图

雷达发射的微波波形、宽度主要受这一部分中的调制器控制，而最后发射电磁波的功率受高频振荡器控制。为了发射足够的功率，高频振荡器通常采用磁控管、速调管等新型微波功率管。

3. 收发开关

收发开关也叫双工器，是收发系统共用一幅天线所必备的设备。它接受由脉冲发生器（同步器）传递过来的信号，使在发射机发送电磁波时接通天线与发射机的通路，发射完电磁波后断开发射机和天线通路，联通天线与接收机通路，使天线接收的回波信号能传送给接收机。这样，就可以使收发系统共用一幅天线。

4. 天线

天线是发射和接收电磁波的装置。它可以控制发射方向、扫描范围的能量分布、波束宽窄、极化种类和方式等等（下节将详细介绍）。

5. 接收机

接收机类似于一个无线电接收系统。它从天线上接受回波信号，对回波信号滤波、解调、混频，最后得出回波所携带的地物信息，送往显示器。

接收机通常都包含有高频设备、中频放大器、检波器和视频放大器，大多数接收机采用超外差式接收电路（图 7－2）。

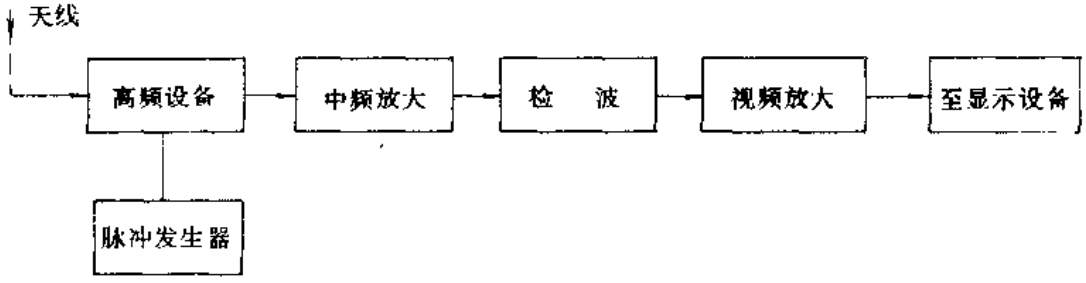


图 7－2　雷达接收机一般方框图

天线接收到回波信号后把信号传送给高频放大器(也叫射频放大器),放大器把微弱高频信号放大并与脉冲发生器发出的脉冲进行混频处理。混频后的电磁波就包含了地物位置和特性的,其频率也由高频转换为中频,再经过中频放大器进一步放大和检波器检波,得到视频信号,视频信号经过放大就可以传送给显示器了。

6、显示器

显示器为雷达的终端设备,它把接收机传来的视频信号转换为人们可以看到的图像。由阴极射线管(示波管或*CRT*)及附助电路构成,基本结构如图 7—3 所示。

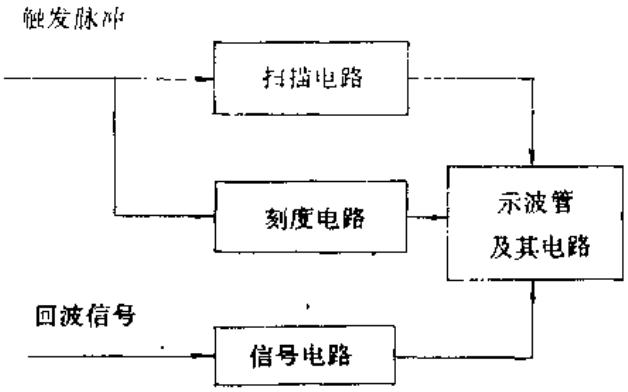


图 7—3　示波器电路框图

视频信号传入显示器前,接收机已经在混频器内获得了脉冲发生器发出的电磁波的位相。回波的位相和脉冲发生器的微波位相相比较就可得出地物的位置参数,地物的方位参数由天线方向可以确定下来。这些信息同时送入显示器,显示器中扫描电路和刻度电路分别处理这些信息,显示在显示器上,从而显现出我们需要的图像。

普通雷达显示器有多种类型,最常见的就是距离显示器(图 7—4)、平面显示器(图 7—5)和高度显示器(图 7—6)。

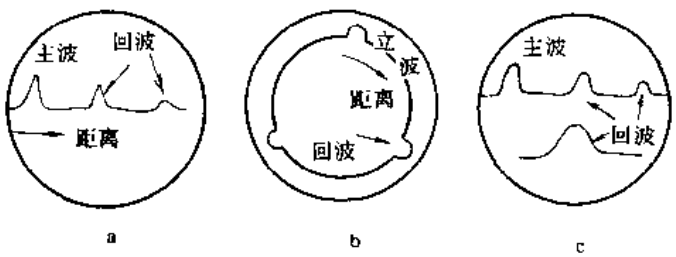


图 7—4　距离显示器

三、雷达工作参数

根据我们测量的目的,在雷达工作时需要确定一些参数。

1. 雷达的工作频率

雷达的工作频率取决于雷达的工作目的、工作环境、分辨率等。为了能识别小的目标物

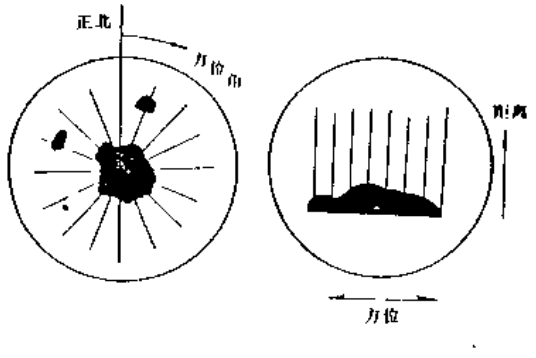


图 7—5　平面显示器

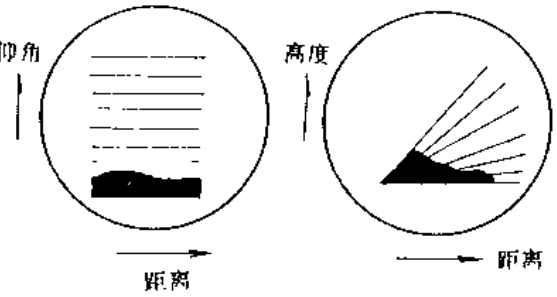


图 7—6　高度显示器

和远处的物体，提高分辨率，选 用较高频率的频段要好一些。频率提高，输出功率会大大增加，因为功率和频率的四次方成正比。但提高频率，大气对微波的衰减将增大。

2. 脉冲宽度

脉冲信号是一周期性信号。信号的电压或电流每重复一次的时间称为重复时间，用 τ 来表示。单位时间内重复的次数称为重复频率，用 F 来表示。在一个周期内，脉冲从开始发出到结束称为脉冲宽度。

3. 雷达分辨率

雷达的分辨率通常分为距离分辨率和方位分辨率。距离分辨率是指沿雷达波发射的方向上两个点相距多远才能被雷达显现出来。方位分辨率是指垂直雷达波发射的方向上到天线同距离的两个点相隔多少才能被雷达分辨出来。对于距离分辨率，我们定义为 ΔR：

$$\Delta R = \frac{c\Delta\tau}{2} \tag{7.1}$$

其中：c 为光速，$\Delta\tau$ 为脉冲宽度。距离分辨率与脉冲宽度关系，如图 7—7 所示：

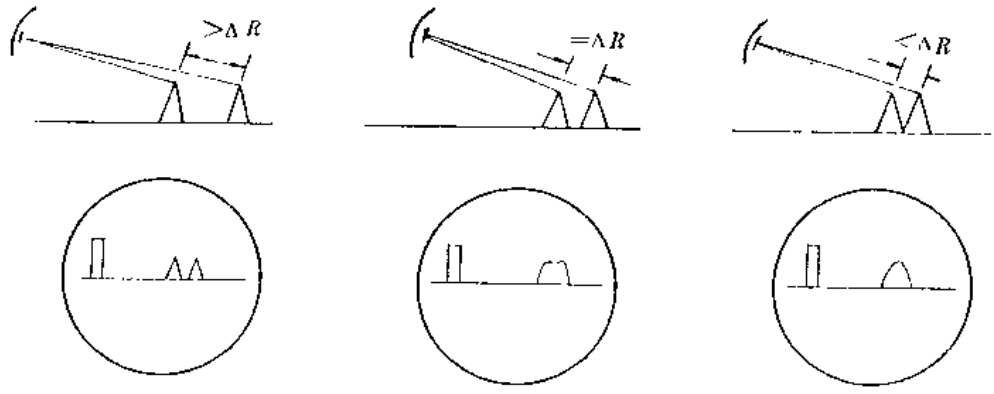


图 7—7　距离分辨率示意图

由上图可看出，脉冲宽度可影响距离分辨力。脉冲宽度越窄，距离分辨率越高。通常为了获得良好的距离分辨率，采用脉冲压缩的技术，即在发射机中加入一匹配滤波器，在不增加功率的情况下减小脉冲宽度。

方位分辨率通常与天线的波瓣宽度和方向系数有关，波瓣宽度越窄，分辨力越高。

五、普通雷达的雷达方程

雷达方程是一个反映接收机输入端和发射机输出端功率的关系式。它概括了雷达的天线系统、雷达目标和接收信号三者之间的关系。

一般情况下，由发射机产生信号经发射天线发射出去，经地面一孤立的目标散射，由接收天线接收其回波信号并传送给接收机，如图 7－8 所示。

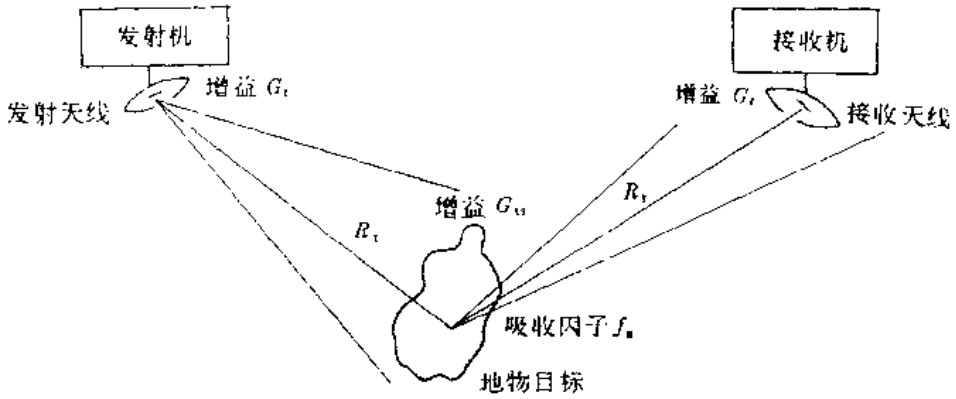


图 7－8　雷达中天线、目标、接收三者关系图

（据 F. T. 乌拉比，1988）

若发射天线的增益为 G_t，发射机功率为 P_t，那么发射天线在那一方向的发射功率密度为 $P_tG_t(1/4\pi R_t^2)$，若地物接收面积为 A_{ts}，则地物目标接收到的总功率 P_{ts} 为：

$$P_{ts} = P_t \cdot G_t \cdot A_{ts}(1/4\pi R_t^2) \tag{7.2}$$

地物目标接收到电磁波后要反射电磁波，考虑一般情况，地物不是良导体也不是绝缘体，这样，电磁波有一部分要被它吸收，设吸收因子为 f_a，则地物目标的发射功率 P_{ts} 为：

$$P_{ts} = P_{ts}(1 - f_a) \tag{7.3}$$

这时再把地物目标当作发射天线，接收天线看作地物，其面积为 A_r 作与上述相当的推想，接收天线最后接收的功率 P_r 应为：

$$P_r = P_{ts} \cdot G_{ts} \cdot A_r(1/4\pi R_r^2) \tag{7.4}$$

代(7.2)、(7.3)到(7.4)得：

$$P_r = \frac{P_tG_tA_r}{(4\pi)^2R_t^2R_r^2} \cdot [A_{ts}(1 - f_a)G_{ts}] \tag{7.5}$$

(7.5)式中方括号中内容是由地物目标决定的，可看作一个因子处理，定义为：

$$\sigma = A_{ts}(1 - f_a)G_{ts} \tag{7.6}$$

雷达方程最后得：

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \cdot \sigma \tag{7.7}$$

我们通常都是收发共用一幅天线，这样

$$R_t = R_r = R \quad G_t = G_r = G \quad A_t = A_r = A \tag{7.8}$$

另一方面，天线的有效面积的定义是：

$$A = \frac{\lambda^2 G}{4\pi} \tag{7.9}$$

对于收发共用一幅天线的雷达方程为：

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} = \frac{P_t A^2 \sigma}{4\pi \lambda^2 R^4} \tag{7.10}$$

上式以两种形式给出雷达方程，一种为天线增益的方式，另一种为天线面积方式。

在上述雷达方程中，给出的是接收功率对输出功率间的关系，而人们更愿意用信噪比来表示它们之间的关系。信噪比即是有用信号同背景噪音功率的比值。随着距离的增加，回波信号功率会越来越小，当达到最大距离时，回波信号刚好能被区分开来，我们称这时的最小可测回波信号功率为门限功率，而此时的信噪比 S/N 就等于门限功率。

最后，考虑环境的因素，雷达方程可表示为：

$$\frac{S}{N} = \frac{P_r}{kTBF_{n0}l} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 kTBF_{n0}L} \tag{7.11}$$

式中：k 为玻尔兹曼常数 $k=1.38\times10^{-23}$J/K，T 为参考温度 290K，F_{n0}为接收系统噪声系数，L 为系统损耗，B 为检波前接收机带宽。

第三节　天线

一、天线发射和接收电磁波的基本原理

在天线扫描成像系统中，天线是最基本而又极其重要的一部分。它的基本任务就是将发射机发出的高频脉冲信号发射到空间中和将空中传播的电磁波接收进来传给接收机。天线同时还有控制微波发射方向，扫描范围的能量分布，波束宽度，极化种类和极化方式等功能。

天线发射和接收工作实质就是把电磁波从导体(天线)传播到介质(大气)中去或从介质(大气)接收到导体(天线)中。整个过程是一种能量和场的转移过程。转移过程中，场中所包含的信息保持内容不变，所用到的基础理论就是电磁场的麦克斯韦方程组。在麦克斯韦方程组中，表达式如下：

$$\oint \boldsymbol{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = -\int_s \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} \tag{7.12}$$

$$\oint \boldsymbol{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l} = \int_s \left(\boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}\right) \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} \tag{7.13}$$

$\boldsymbol{E}$ 为电场强度，$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度，$\boldsymbol{H}$ 为电流密度。由(7.12)、(7.13)式知，交变的电场可产生交变的磁场，交变的磁场可再进一步产生交变的电场。电磁波就是通过电场和磁场的能量转换而向周围传播的，并且在传播的过程中并不需要媒介，电磁波在传播的过程中始终遵循(7.12)、(7.13)式，在碰到两种介质分界面上时，(7.4)、(7.5)式同样适用，不过此时的边

界条件已经有些变化，它将影响电磁波的传播。天线的作用可以用一个简单的LC振荡回路（图7—9a）演变来解释（图7—9）。当电路中有交变的电流时，电容两极板中电压交变变化，引起电位移矢量变化，变化的电位移矢量产生位移电流，位移电流并不是真正的移动的电荷，它可以在电容中通过而使整个电路电场能和磁场能相互转化。在整个过程中，电容和电感中实际传播的是电磁场。电磁波的绝大部分能量被局限在电容和电感中，并不向外辐射。我们依次按图7—9a、b、c、d的顺序改造，电路越来越开放，固有频率也越来越高，演变为d中一直线，电路完全开放，直导线两端交替出现正负电荷，这时就已演化成一根天线了。这也就是最简单的偶极振子天线，它已经能够向外辐射大部分能量，至于其它更复杂的天线其原理也和这大致相同。图7—10显示出偶极振子天线场区内的电力线和磁力线分布。

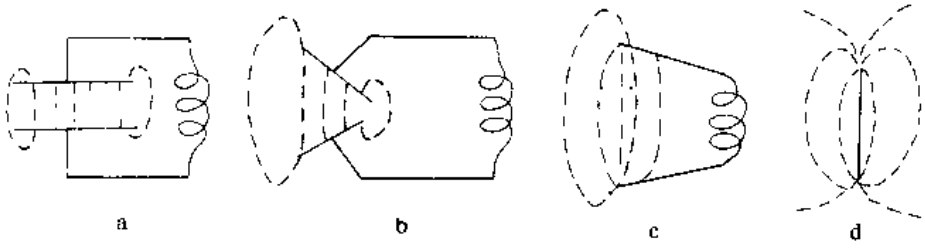
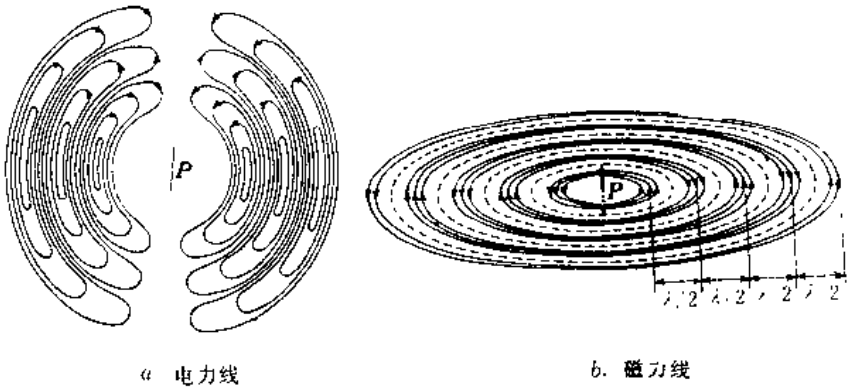


图7—9 LC振荡回路到偶极振子天线演变图
（据赵凯华，1984）



a 电力线　　b. 磁力线

图7—10 偶极振子天线场区内电力线和磁力线
（据赵凯华，1984）

天线接收电磁波的过程同发射过程原理相同，作用过程相反。由天线对空中的电磁波交变感应出电动势形成交变电流，传回接收机。

天线的种类很多，可按多种形式分类。若按其结构可分为两类：一类是由半径（或宽度）远小子波长的金属线构成线状天线，称为线天线。这类天线有半波天线和长线天线之分。另一类是由半径（或宽度）尺寸大于波长的金属或介质面构成的面状天线，称为面天线。这类天线有前馈抛物面天线、卡塞格伦天线和赋形波束天线等。线天线主要用于波长较长的长、中、短波段；面天线主要用于微波波段；超短波段则两种兼用；合成孔径雷达天线通用赋形波束天线。

二、极化与极化方式

从图7—10可以看出，天线辐射的电场是有方向的。在偶极振子天线中截面上的电场方向是平行于轴向方向的，并且中截面内的电力线密度最大，电场强度最强。天线存在着极化方向。电磁波遇到物体时，对于电磁波的两个分量，电场分量 E 和磁场分量 H。若 H 矢量在入射面内，而 E 矢量垂直这个平面时，称水平极化；若 E 矢量在入射面内，而磁场 H 矢量垂直这个平面，称为垂直极化。发射时有极化方向，接收时也有极化特性。按组合关系就有水平发射水平接收(HH)；水平发射垂直接收(HV)；垂直发射水平接收(VH)；垂直发射垂直接收(VV)。发射接收方式一致时称为平行极化，相互垂直时称为交叉极化。

三、天线波瓣与波瓣宽度

天线辐射电磁波在各方向上的电场强度不同，各方向辐射能量也不同，说明天线具有方向性。为描述方向特性，我们设想一个各向辐射能量等同的天线(实际中并不存在)，作为比较的标准，由此可定量地说明天线的方向性。

为描述天线辐射能量的空间非均匀性，我们引入波瓣的概念。波瓣是指天线发出电磁波功率密度分布形态。波瓣图就是天线辐射电磁波功率的形态在空间上的表示。它比较直观地反映了天线辐射能量空间不均匀的程度。理想的各向同性天线的波瓣图为一个圆，其它有方向的天线则根据结构种类而产生各自的波瓣图(图7—11)。

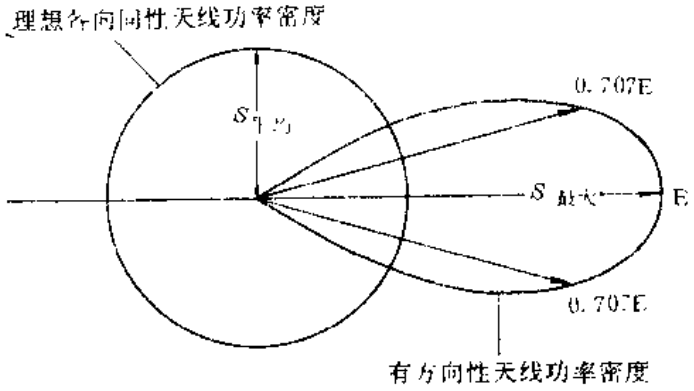


图7—11　不同天线波瓣功率密度示意图

波瓣图中，天线有一个或几个辐射能量功率最大的方向，在这方向的两侧存在着最大功率一半的功率点，也即是最大场强0.707倍的点，这两点的夹角，我们称为波瓣宽度。

实际中，人们总是采用方向性强的天线。方向性强的天线波瓣图尖锐，波瓣宽度小，大部分能量被集中在这个方向，有利于发射和接收，有利于区分目标物。微波遥感中也是利用天线的方向和波瓣宽度的特性来提高方向分辨率。

四、天线方向系数

天线在空间辐射能量的不均匀性使天线存在集中辐射能量的方向。这个方向表现在波瓣图中为一个最大的波瓣，我们称它为主瓣，依主次关系，其他波瓣下排称为副瓣(旁瓣)、尾瓣(背瓣)。

方向性天线的主瓣的最大功率与同功率的理想各向同性天线的这方向上的比值，称为方向系数。它无单位，体现了辐射能量的集中程度。

$$D = \frac{S_{最大}}{S_{平均}} = \frac{S_{最大}}{S_{总}/4\pi} \tag{7.14}$$

偶极振子天线的方向系数为 1.5，高方向性天线方向系数可达上百。

天线的方向性可用天线方向图表示(图 7－12)。

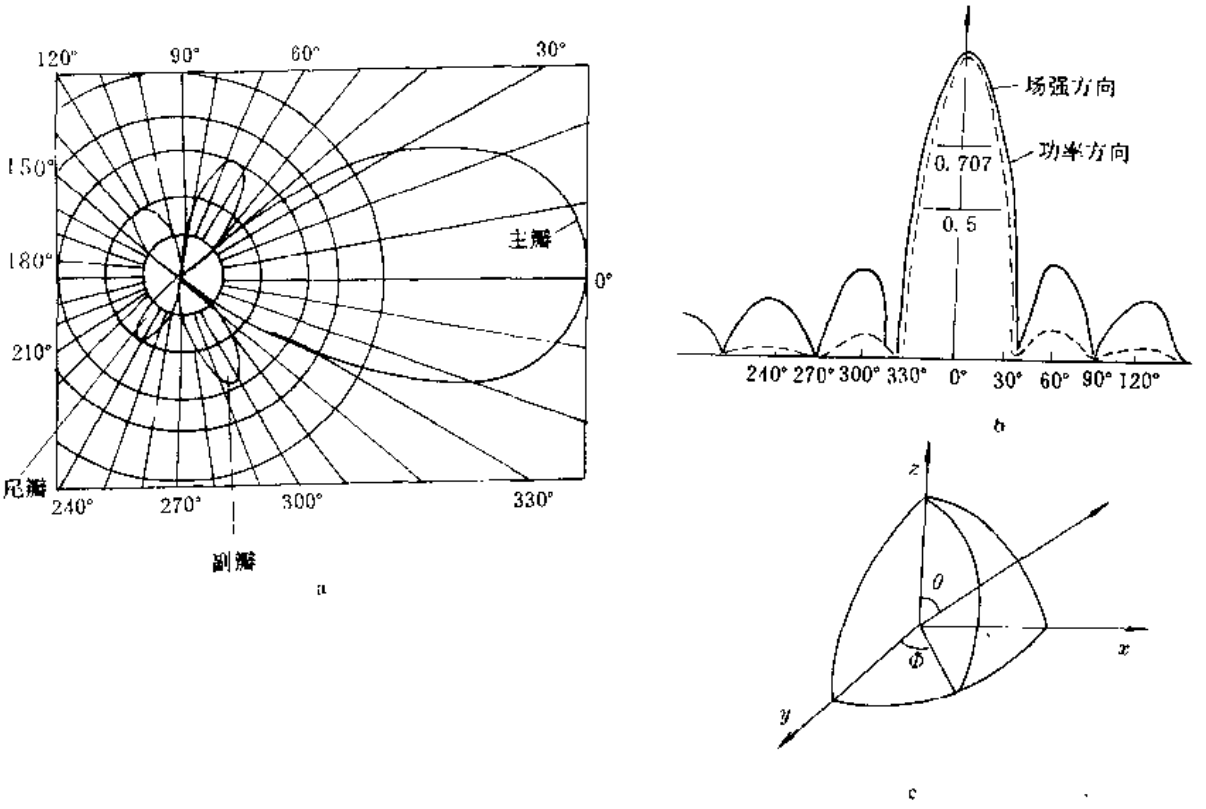


图 7－12　天线方向图

(据杨士中,1981)

a. 极坐标系中的天线方向图；b. 直角坐标系中的天线方向图；c. 球面坐标系中的天线方向图

五、天线的增益系数

在天线辐射能量过程中，一方面由于天线存在方向性而使某一方向辐射功率为平均功率 D 倍，另一方面由于损耗而使射功有所降低，若设辐射功率降低了 η 倍，则整个天线在发射过程中总的增益为：

$$G = \eta \cdot D \tag{7.15}$$

式中 G 被称为天线的增益系数，它比 D 更好更实际地描述了天线的方向性，若天线损耗很小，$\eta \approx 1$，则

$$G \approx D \tag{7.16}$$

因此若减少天线损耗，则可以使方向功率大大提高。

第四节　微波辐射成像计和雷达散射计简介

一、微波辐射成像计

被动式天线扫描成像主要采用微波辐射成像计。它是在微波辐射计的基础上发展起来的。

微波辐射计属于被动式天线扫描成像系统。它工作的理论基础是普朗克辐射公式，即自然界中一切物体都辐射电磁波，辐射的电磁波在微波波段与目标物的复电导率和复磁导率有关，从而区别地物。

具体说来，在微波波段，我们把普朗克黑体辐射公式作近似推导，辐射计接收到的功率可写为：

$$P = kBT \tag{7.17}$$

式中 P 为辐射计接收的功率，k 为玻尔兹曼常数，T 为目标温度。这个公式是在假设目标为绝对黑体而推出的，实际上目标并非绝对黑体。这样，表征目标的温度 T_B 与假设成的绝对黑体情况下的真实温度 T 相差一个系数，为目标发射率：

$$T_B = \varepsilon T \qquad (0 \leqslant \varepsilon \leqslant 1) \tag{7.18}$$

这样，公式(7.18)就化成：

$$P = \varepsilon kBT \tag{7.19}$$

在辐射计测量时，常用天线温度 T_A 表示接收到的辐射功率：

$$T_A = \frac{P}{kB} \tag{7.20}$$

实际情况中，由于情况复杂，可近似认为天线温度由三部分组成：

1. 经过大气衰减后的目标热辐射

$$T_{A1} = \tau T_{B1} = \tau \cdot \varepsilon_1 \cdot T_1 \tag{7.21}$$

τ 为大气透射率，T_{B1} 为目标表征温度，ε_1 为目标的发射率，T_1 为真实温度。

2. 目标反射周围的热辐射

$$T_{A2} = \tau \Gamma_1 T_E \tag{7.22}$$

τ 表示经过大气衰减，Γ_1 为目标表面的功率反射率，T_E 为周围环境表征温度。

3. 大气辐射

$$T_{A3} = (1 - \tau) T_0 \tag{7.23}$$

总的天线温度可以认为是三部分温度相加

$$T = T_{A1} + T_{A2} + T_{A3} \tag{7.24}$$

测量时，通常依靠两物温度差，由(7.24)的展开表达式可得

$$\begin{aligned} \Delta T &= \tau(\varepsilon_2 T_2 - \varepsilon_1 T_1) + (\Gamma_2 - \Gamma_1) T_E \\ &\approx \tau(T_{B2} - T_{B1}) \end{aligned} \tag{7.25}$$

公式(7.25)说明，测量得到的结果与真实温度差、反射率和大气吸收及发射率有关，地面各地物真实温度差相差不大，而各地物的发射率在微波波段却有差别，辐射计就是利用这种差别测量地物的。

微波辐射计通常由三部分构成：天线、接收机和输出记录，以后的辐射计大多依此改造

而成。

微波辐射成像计是把辐射计接收的微波强度转换为不同灰度并显示出来的装置(图 7—13)。

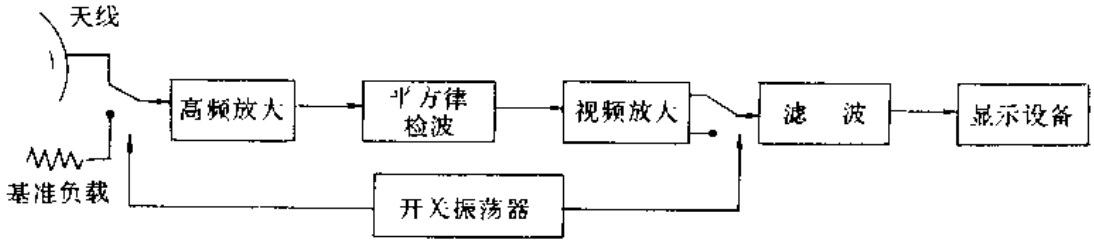


图 7—13 简单微波辐射成像计结构框图

二、雷达散射计

雷达散射计属于主动式的非成像天线扫描系统,它是测定目标物对微波的散射特性的雷达系统。

散射计工作的物理基础是各种物体的复介电常数、表面粗糙度、极化方式、照射面积等的不同而对电磁波的反射率也不相同。散射计接收散射回波而测量目标的特征参量。

目标的散射特性通常用散射系数 σ_0 表示,也称为归一化雷达横截面。它定义为目标的雷达散射横截面积 σ 与天线波束水平截面积 A 之比。

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{A} \tag{7.26}$$

由雷达方程(7.10)考虑 L 因素我们可求出散射系数 σ_0 为:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{A} = \frac{P_r(4\pi)^3 R^4 L^2}{P_t G^2 \lambda^2 A} \tag{7.27}$$

公式(7.26)中的 L 为单程大气功率损失因子($L \ll 1$)。

散射计就是测定物体平均散射系数 σ_0 的仪器,其结构和普通雷达相似,如图 7—14。

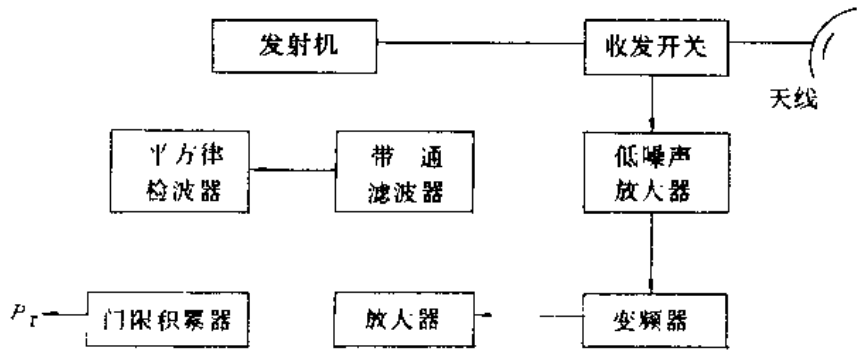


图 7—14 散射计方框图

(据卢国铭,1984)

散射计工作时对天线无空间分辨率的要求,通常都是用它来测量某一角度范围内的散

射系数的相对值。散射计往往使用有一定照射面积的圆锥天线。

非成像雷达系统除散射计外，还有测量正下方散射表面之间距离的雷达高度计；让微波透过一定介质深度，利用电磁波在介质中反射与传播的关系，测量垂直方向上的结构分布的地下探测器；还有利用多普勒效应测量目标物移动速度的多普勒雷达等等。

第五节　真实孔径侧视雷达

真实孔径侧视雷达(SLAR)，命名中"真实孔径"是指天线是一个一定长度的天线，其每次发射接收是以自身有效长度的效率直接反映到显示记录中。"侧视"是指其波束指向侧面，利用距离上的差异来实现横向分辨率。真实孔径侧视雷达的工作方式就是由运动平台携带一相对于平台不动的天线向平台一侧或两侧发射窄波束、接收其回波并成像。其发射和接收原理及结构同普通雷达相似，但增加了扫描线路和胶片记录等设备(图 7—15)。

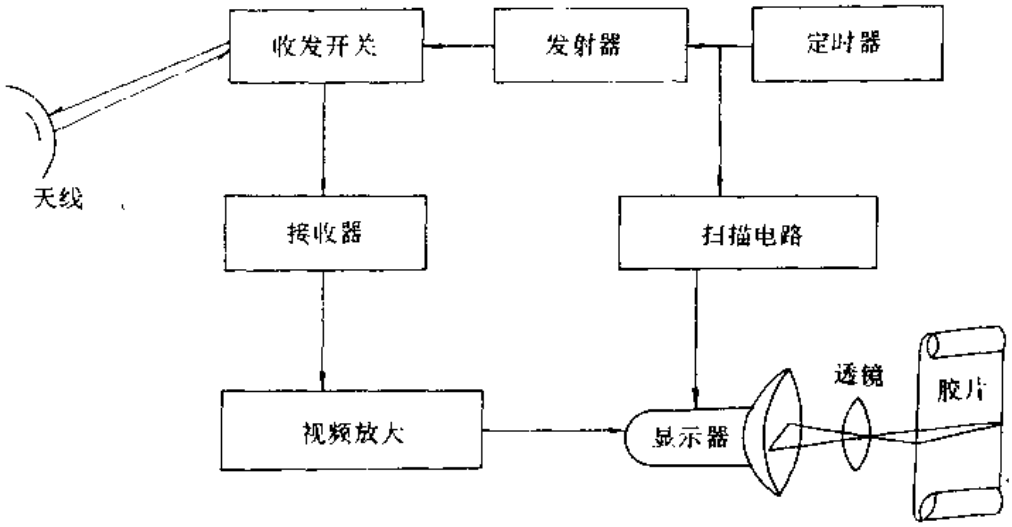


图 7—15　真实孔径侧视雷达结构框图

图 7—16 为真实孔径侧视雷达的工作过程示意图，运动平台携带真实孔径天线从空中掠过，相对于运动平台不动的真实孔径天线向平台侧向发射一波束，这束波在平台运动的方向上是很窄的，而在垂直于平台运动方向上是延展的，当这束波的回波信号返回平台时，平台所收到的信号仅仅反映这一窄条内地物的特征。随着平台的移动，这一被扫描的窄条也跟着沿平台运动方向移动，最终记录下运动平台所经过的一定范围的地物特征。

真实孔径天线扫描也不象普通雷达那样显示。普通雷达都是依靠天线的转动对周围地物进行扫描成像，天线转动一周，对周围景物扫描一遍，这时可以通过显示仪进行观测。而真实孔径雷达对一地区扫描，在平台运动的某一特定时刻，只有垂直于运动方向的一窄带信息被天线扫描，利用这一窄带内的电磁回波去调制示波器电子束的强度，这时荧光屏显示的不是一条有偏转的波形线而是一条有着明暗变化的直线，直线的明暗显示了回波的强弱。这一亮直线被记录到胶片上，随着平台的移动，胶片也沿着与亮直线垂直的方向同步移动，最后形成一幅图像。

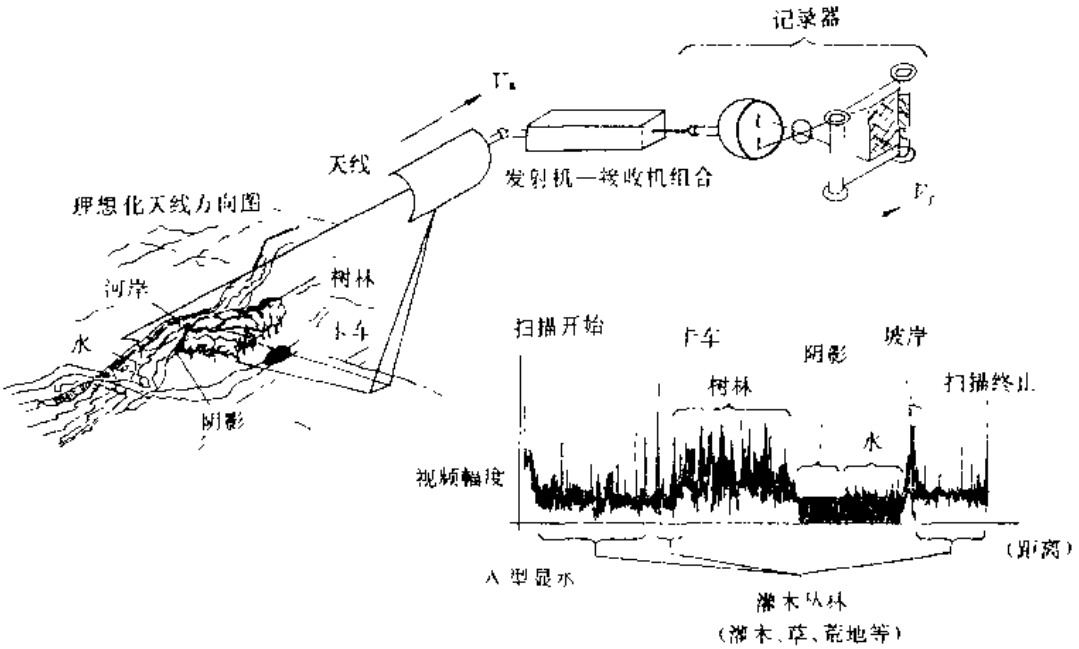


图 7--16　真实孔径侧视雷达原理示意图

(据 F. T. 乌拉比,1988)

真实孔径雷达的分辨率分为方位分辨率(r_a)和距离分辨率(r_p)。方位分辨率是指平行于平台航迹方向上的最小可分辨的距离。距离分辨率是指垂直于航迹方向上的最小可分辨的距离。方位分辨率(r_a)是由天线波束宽度、天线孔径和雷达到目标的距离决定的,如图 7--17 所示。方位分辨率为:

$$r_a = \frac{\lambda RK}{l} \tag{7.28}$$

式中 λ 为波长,R 为雷达到目标的距离,K 为天线孔径效率因数,l 为天线的孔径长度。显然,天线越长,分辨率越好。

在垂直于航迹上的距离分辨率(r_p)可表示为:

$$r_p = \frac{c\tau}{2\sin\theta} \tag{7.29}$$

式中 c 为光速,τ 为脉冲宽度,θ 为偏离铅垂方向的角度。因此脉冲宽度愈窄,距离分辨率愈高。

其反映输出输入功率关系的雷达方程和普通雷达相似:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma_0}{(4\pi)^3 R^4} = \left(\frac{\lambda}{L_a} R\right)\left(\frac{c\tau}{2\sin\theta}\right) \tag{7.30}$$

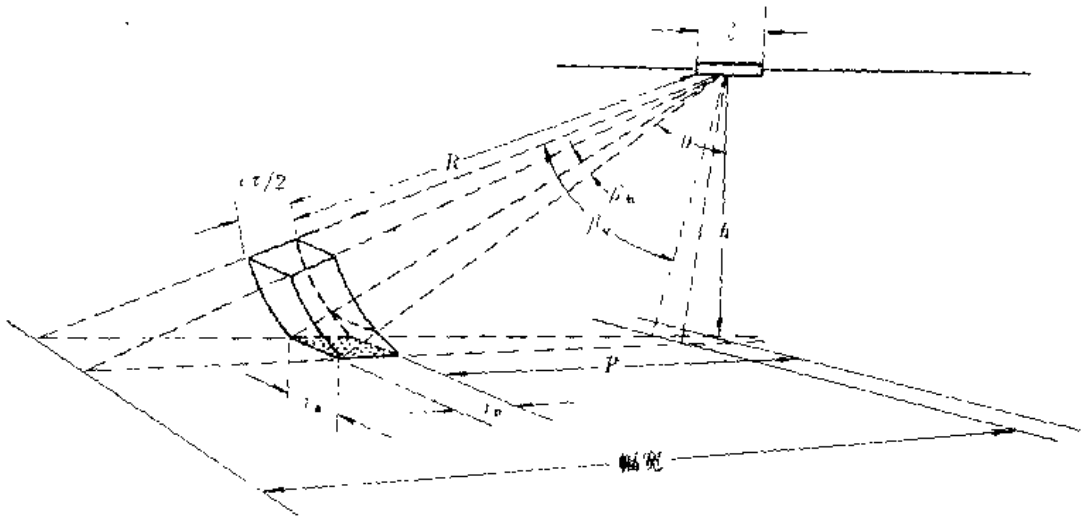


图 7—17　真实孔径雷达分辨率示意图
（据 F. T. 乌拉比，1988）

第六节　合成孔径雷达

一、合成孔径雷达的概念

合成孔径雷达(SAR)是目前分辨率最好的一种成像雷达，虽属于侧视雷达，但其工作方式和前面讲述的真实孔径雷达不同，它是相干的多普勒系统。由于它采用了合成孔径和相干信号处理技术，使它的分辨率得到大幅度提高，几乎可以和光学照像媲美。

从上节知道，真实孔径侧视雷达方位分辨与选用微波波长成正比，与天线有效孔径成反比。微波波长大体是可见光的 5—6 个数量级，因此，若要把真实孔径雷达的方位分率辨提高到与光学成像水平相当，就需要把天线加长到几公里，这显然是不可能的。

如果把很大孔径的天线改为一系列(N 个)小的天线，就成为阵列天线。阵列天线可以同时处理信号。如果不需要同时处理信号，而用一个小天线，依一定时序作 N 次(相当于阵列天线中小天线个数)来处理信号，就可以替代 N 个小天线的阵列天线的作用。这就是最初合成孔径的概念。如果把一个小天线载入平台，以其运动时序来发射、接收和处理，就可以在空中得到大的阵列天线效果(图 7—18)。

在讨论运动的天线合成"合成孔径天线"时，还得讨论短天线运动产生的多普勒效应。

多普勒效应是指当波源和波的接收器彼此作相对运动时，波的接收器接收到的波的频率将发生变化。波源和接收器相互靠近时，频率变高；相互远离时，频率变低。

依据多普勒效应，运动着的雷达天线同运动着的目标都能产生接收回波频率的变化，只是在"合成孔径雷达"中，运动的短天线按时间次序依次发送和接收电磁波，多普勒效应比真实孔径雷达明显。

合成孔径天线运动时，我们考虑图 7—19 的多普勒效应。在位置 1 时，天线与目标点相互靠近，短天线接收到的频率变化为正向增加，频率变高；在位置 2 时，天线与目标相对移

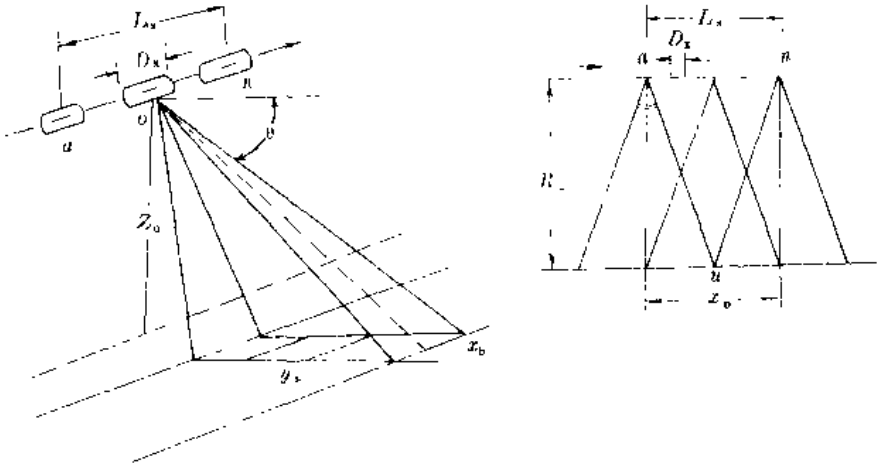


图 7—18　合成孔径天线示意图

(据杨士中,1981,略加修改)

动速度为零,接收到的回波频率变化为零,频率不变;当处在位置 3 时,天线与目标点背向移动,天线接收到的回波频率为减小,频率变低。这一历程也有人称为多普勒历程。合成孔径雷达运用了多普勒频移的理论进行定位、测距,记录遥感数据。

因此,合成孔径雷达的天线可以概括为:利用运动着的短天线,在依次的位置上发射微波和接收回波,通过一定方式把获取的数据处理成一个合成的大孔径的数据的装置。

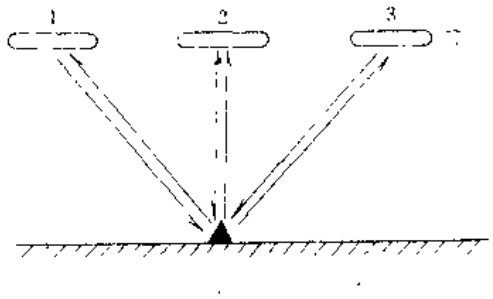


图 7—19　天线多普勒效应示例图

从上述可以看出这种天线并非是简单的由若干个固定的短天线同时获取数据的线阵天线。

单独用多普勒频率变化不能把每个数据单元区分开来,还需要把输入信号与机内参考信号相干处理,才能得到位置与频率对应关系,并取得回波强度和相位信息。

因此,严格一点说,合成孔径雷达是利用合成孔径天线,运用多普勒频移和相干技术,同时记录回波的振幅和相位的准全息方式成像的雷达系统。

二、合成孔径天线综合长度与分辨率

如图 7—18 和图 7—20 所示,天线在高 z_0 上作 v 等速飞行。天线向旁侧以俯角 θ 发射扇形波束,x 轴和 y 轴的辐射长度由图可知

$$x_b = R\beta_h \tag{7.31}$$

$$y_b = \frac{cT_p}{\cos\theta} \tag{7.32}$$

其中 β_h 为天线波束航向角,R 为斜距,T_p 为脉冲宽度,c 为光速。

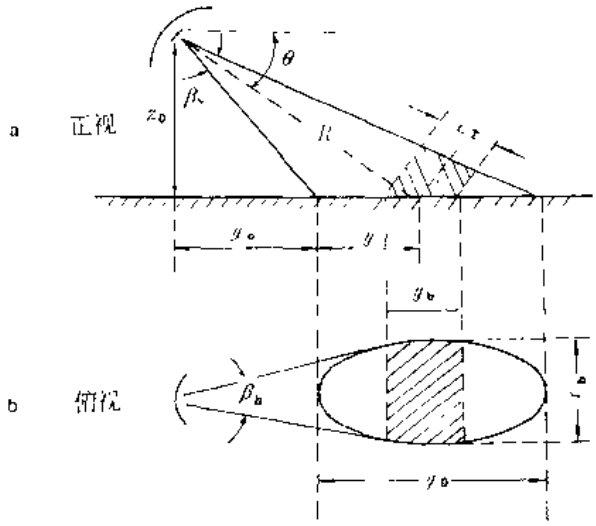


图 7—20　合成孔径天线几何关系图

（据卢国铭，1984，简化）

$$\beta_h = \frac{\lambda}{D_r} \tag{7.33}$$

D_r 为天线实际孔径在航向上的长度。

对于地面目标物 u 来说，天线从 a 点开始到 n 点终止，是能扫描到它的天线运动范围，也是天线主瓣能扫描它的范围。这就是合成孔径天线的最大综合长度，或称最大合成孔径长度。这个长度(L_s)近似等于主瓣半功率点宽度(x_b)。

即
$$L_s \approx x_b = R\beta_h \tag{7.34}$$

将(7.33)式代入(7.34)式，得：

$$L_s = \lambda R / D_r \tag{7.35}$$

对合成孔径天线来说，微波往返引起两次相位移动(图 7—21)，行程是斜距的二倍，这样合成孔径的等效波束角 β_s 为

$$\beta_s = \frac{\lambda}{2L_s} \tag{7.36}$$

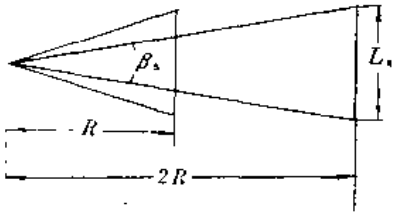


图 7—21　往返相移作用图

（据卢国铭，1984）

合成孔径天线方位分辨率理论上为

$$r_a \approx \beta_s R = R\lambda / 2L_s \tag{7.37}$$

代入(7.35)式得

$$r_a = \frac{D_r}{2} \tag{7.38}$$

说明合成孔径雷达方位分辨率只与天线实际孔径成正比。聚焦雷达方位分率与距离无关。

距离分辨与真实孔径侧视雷达相同，是由脉冲宽度来决定的。

$$r_p = \frac{c\tau}{2\sin\theta} \tag{7.39}$$

三、合成孔径雷达的雷达方程

合成孔径雷达雷达方程的推导与普通雷达相似，其结果为：

$$\frac{S}{N} = \frac{P_{av}A_rA_tP_{rg}\sigma_0}{8\pi N_0R^3\lambda_0vL} \tag{7.40}$$

P_{av}为平均功率，A_r 为接收天线有效面积，A_t 为发射天线有效面积，P_{rg}为地面分辨率，N_0 为 F_RT，β 噪声功率谱密度，σ_0 为散射系数，R 为斜距，λ_0 为波长，v 为平台速度，L 为系统损耗。因为信噪比与 R^3 成反比，显然它比真实孔径雷达优越了。

四、合成孔径雷达系统结构

图 7—22 为合成孔径雷达的结构图。在实际应用中，合成孔径雷达也分为几类。从天线上可分为聚焦的和非聚焦的合成孔径天线。聚焦的合成孔径天线是指对目标进行距离聚焦，使每次发射到达该点的位相相同。从发射机上可分为真相干雷达和伪相干雷达。真相干雷达是指发射机的每次发射相位都是相干的。伪相干雷达则是通过记录载波位相，以各次接收

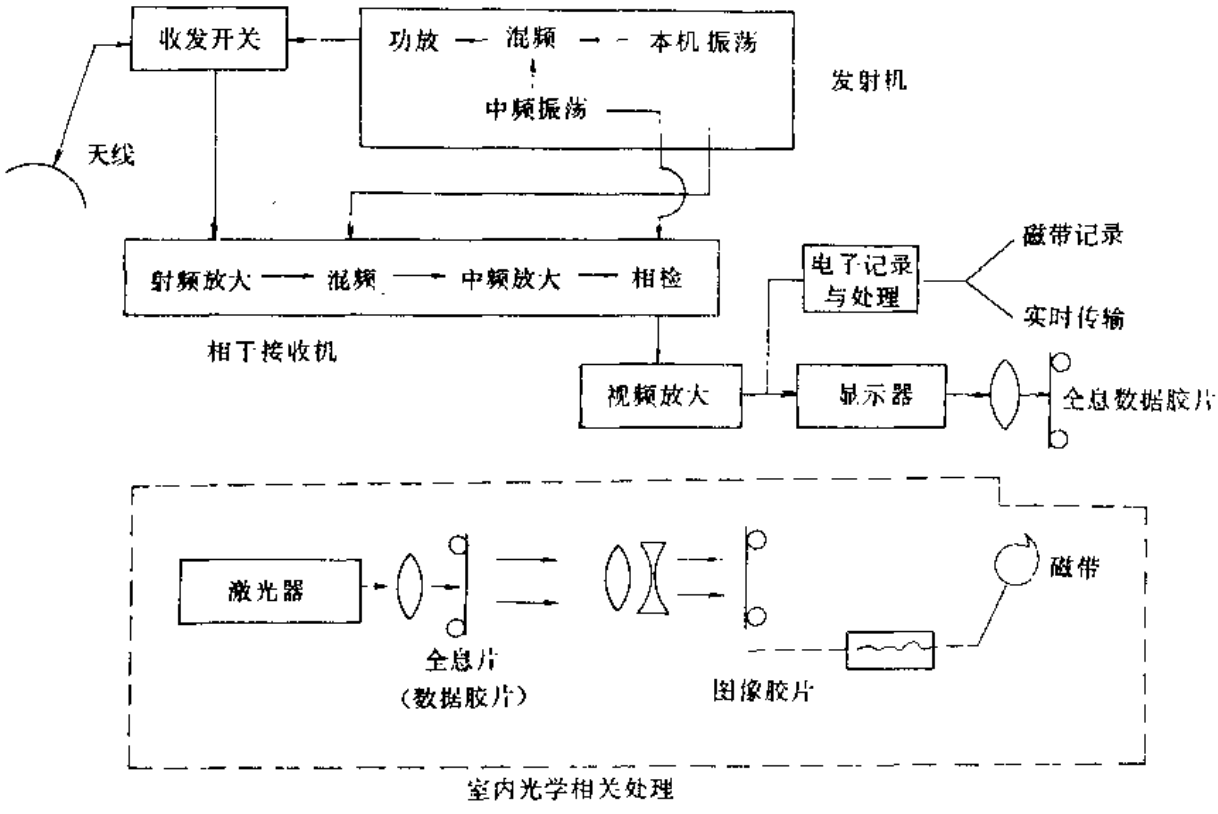


图 7—22　合成孔径雷达方框图

(据卢国铭，1984)

信号对该次发射作相干解调来达到最后相干合成数据的目的。

五、数据的采集

合成孔径雷达的数据采集并不是象光学成像那样在瞬时同时完成，而是按时间顺序依次一点一点积累起来，再加处理才能产生。因此有它独特的采集、存储和处理数据的方法。

合成孔径雷达一开始就有光学和电子数据采集、记录、存储和处理的思路。但光学数据采集方法曾一路领先，到现在已发展到光学数据采集和电子数据采集二种方法并行的阶段。

(一)光学方法采集数据

光学方法采集数据是将相干雷达的双极视频输出信号经过放大、调制亮度传给示波管，同时由偏转电路控制示波管扫描轨迹。这样使相干视频信号转换成光信号显示在荧光屏上，进而记录在感光胶片上。这种胶片就是全息数据胶片(图 7－23)。

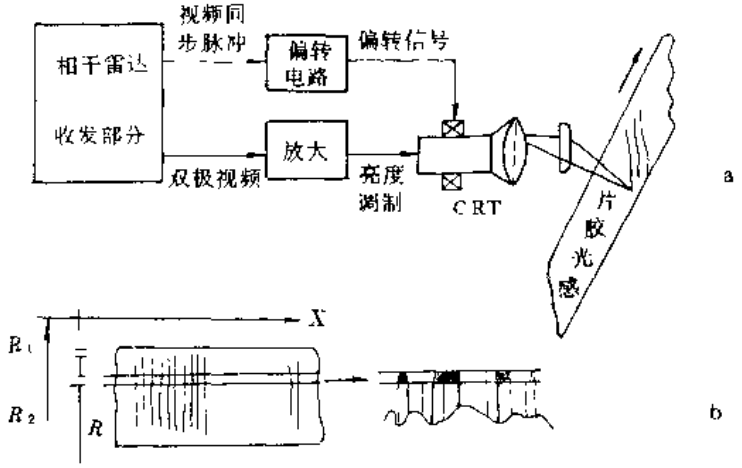


图 7－23　合成孔径雷达光学方式采集数据示意图

(据杨士中，1981)

(二)电子方法采集数据

电子方法采集数据方式有许多种。一般从相干雷达输出信号处采集，也有从视频输出处采集，甚至可以从胶片上采集。前者对有 m 个距离分辨单元的合成孔径雷达来说，是把从相干雷达输出线路设置 m 个距离门和 m 个不同参数的匹配滤波器。每个匹配滤波器的输出对应于该距离分辨单元。再将信号传给"模拟移位寄存器"的大规模集成电路，距离门和距离选通脉冲保证按距离分辨单元分别存储和处理信号(图 7－24)。这些信号可记录在磁带上，之后再经电子计算机进一步计算分析。

六、图像的恢复

合成孔径雷达自扫描到采集整个过程产生的数据有几个特点：天线向侧照射，方位焦平面是倾斜状态；方位焦平面与距离焦平面不重合；方位比例尺与距离比例尺不相同，即纵横比不等于 1；输出的是相干数据或全息数据胶片。图像恢复就必须针对这些特点来进行。

数据采集之后，就要恢复图像。收集数据采用两种方法，图像的恢复也要相应地按各自的途径，采用两种方法。

(一)光学处理恢复图像

在数据采集过程中，最终记录的是参考信号同回波信号的干涉，是一幅微波的全息图。这时若用微波再现，人无法看到再现的微波波前。若将全息图按 10^{-4}－10^{-5}的比例缩小，便可用激光再现当时的地物影像。实际上，在数据收集的过程中，已完成了这一步。全息数据胶片，是一幅完整的全息照片了。在恢复时，我们用单色光照射，便可初步再现目标物的影

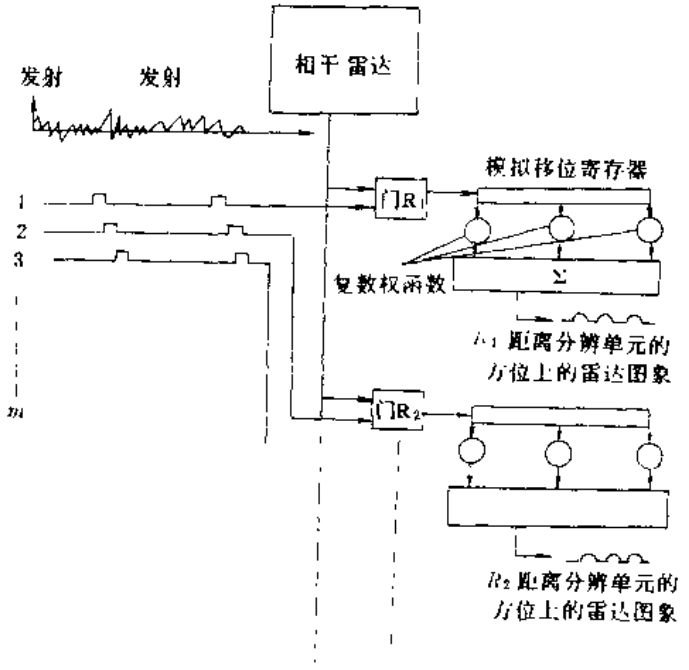


图 7－24　合成孔径雷达电子方式采集数据示意图
（据杨士中，1981）

像。

早期的光学处理装置是由圆锥透镜、圆柱透镜、球面透镜、窄缝构成，如图 7－25。

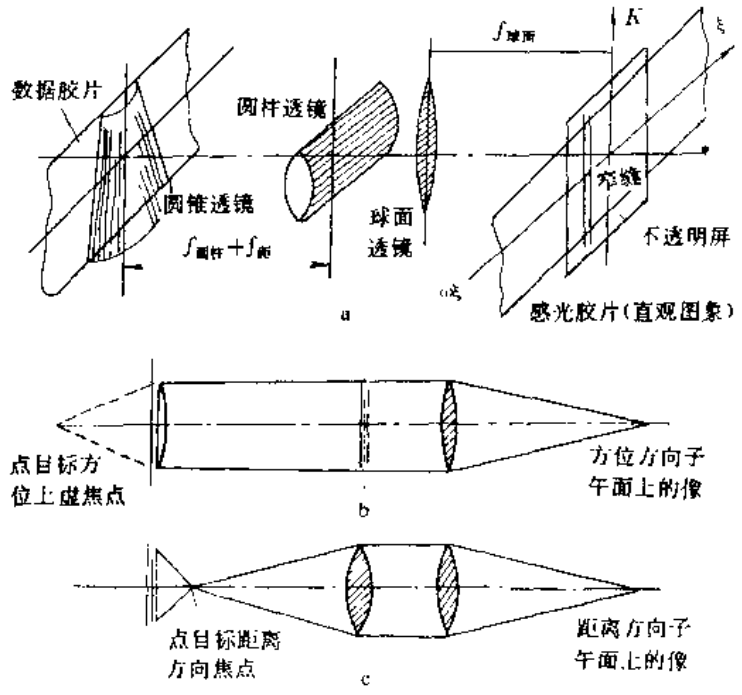


图 7－25　早期 SAR 图像恢复装置结构图
（据杨士中，1981）

原书缺页

原书缺页

原书缺页

原书缺页

Ⅰ—Ⅷ号为螺旋式自旋稳定，轨道高度 680km—1119km，倾角 48°—60°，非太阳同步椭圆轨道。主要传感器有：窄角、中角、广角电视摄像机，五通道扫描辐射计，哈尼尔辐射计，电阻热辐射计。

Ⅸ—Ⅹ号滚动式自旋稳定，高度 800—2900km，Ⅸ号仍为非太阳同步椭圆轨道，倾角 96.4°。Ⅹ号首次使用太阳同步椭圆轨道。因为是滚动自旋稳定，不能使用辐射扫描计进行工作，只有电视摄像机。但克服了Ⅰ—Ⅷ号卫星有时传感器不朝地面，卫星轨道倾角小，覆盖面积小等缺点。

（二）美国雨云卫星（Nimbus）系列

雨云系列是与泰罗斯后期、艾萨系列及依托斯系列平行发展的实验气象卫星。1964 年 8 月—1978 年共发射 7 颗（表 8—2）。轨道由椭圆近中午太阳同步轨道—圆形太阳同步轨道，三轴控制稳定。两块太阳能帆板作电源供应。该卫星载荷量大，便于各种遥感仪器的安装与工作。自从雨云卫星出现以后，几乎气象卫星所有新研制的仪器都是首先在它上面试用的。10 多年中在雨云卫星上进行了 30 余种名目繁多的探测仪器和技术的试验。美国作为最先发展气象卫星的国家除选择调制辐射计（SCR）系英国研制之外，其它遥感仪器几乎都是首创的。雨云卫星上试验的一些重要仪器：如高级光导摄像系统（AVCS），曾装备第一代 ESSA 和第二代业务气象卫星 ITOS/NOAA 卫星；进行垂直温度探测的卫星红外分光计（SIRS）后来在第二代业务卫星上演化成温度垂直廓线辐射计（VTPR）；雨云卫星上试验成功的微波波谱仪（NEMS），选择调制辐射计（SCR）及红外温度廓线辐射计（ITPR）综合应用在第三代业务气象卫星上，成为泰罗斯业务垂直探测系统（TOVS）等等。此外，雨云卫星在飞行中还积累了大量有用的观测资料。雨云卫星星体做为陆地卫星 1、2、3 号的样星。总之，雨云卫星系列对美国后来的遥感技术的有着深远的影响。

表 8—2　美国雨云（Nimbus）卫星系列轨道及传感器简表

卫星名称	发射日期	重量 (km)	周期 (min)	近地点 (km)	远地点 (km)	倾角 (°)	传　感　器
Nimbus-1	1964. 8. 28	376	98. 3	487	1106	98. 6	3AVCS, IAPT, HRIR
Nimbus-2	1966. 5. 15	414	108. 1	1218	1354	100. 3	3AVCS, HRIR, MRIR
Nimbus-3	1969. 4. 14	576	107. 3	1232	1302	101. 1	SIRSA, IRIS, MRIR, IDCS, MUSE, IRLS
Nimbus-4	1970. 4. 5	675	107. 1	1200	1280	99. 9	SIRSB, IRIS, SCR, THIR, BUV, FWS, IDCS, IRLS, MUSE
Nimbus-5	1972. 12. 11	772	107. 1	1093	1105	99. 9	SCMR, ITOR, NEMS, ESMR, THIR
Nimbus-6	1975. 6. 12	829	107. 4	1101	1115	99. 9	ERB, ESMR, HIRS, LRIR, SCAMS, TWERLF, PMR
Nimbus-7	1978. 10. 24	907	99. 28	943	955	104. 9	LIMS, SAMS, SAM－11, SBUV/TOMS, ERB, SMMR, THIR, CZCS

（三）美国艾萨卫星（ESSA）系列

艾萨卫星与泰罗斯卫星外形完全相同。滚动自旋稳定系统保持处在太阳同步轨道，轨道高度 1400km 左右。这种卫星可以在 24 小时内得到全球覆盖的照片。从 1966 年 2 月至 1969

年2月共发射9颗(表8—3),在轨道上同时保持两颗艾萨卫星。其中奇数号卫星带有两架光导摄像机,采用记录回放装置,由美国地面站用指令控制接收,每天向地面站发送400张左右云图。偶数号卫星用自动图片发送(APT)方式约每隔6分钟发送一张云图,全世界各个地方只要有APT接收设备都可以收到卫星云图。这种云图星下点分辨率为4km。艾萨卫星设计寿命1年,但艾萨8号工作了7年多的时间。

表8—3 美国艾萨卫星(ESSA)系列

卫星名称	发射日期	重量(kg)	周期(min)	近地点(km)	远地点(km)	倾角(°)	探测仪器
ESSA-1	1966.2.3	145	100.2	800	965	97.9	2TV—WA,FPR
ESSA-2	1966.2.28	114	113.3	1561	1639	101.0	2APT,全球业务APT
ESSA-3	1966.10.2	159	114.5	1593	1709	101.0	2AVCS,FPR
ESSA-4	1967.1.26	114	113.4	1522	1656	102.0	2APT TV
ESSA-5	1967.4.20	159	113.5	1556	1635	101.9	2AVCS,FPR
ESSA-6	1967.11.10	114	114.8	1662	1713	102.0	2APT TV
ESSA-7	1968.8.16	159	114.9	1646	1691	101.7	2AVCS,FPR
ESSA-8	1968.12.15	114	114.7	1622	1682	101.8	2APT TV
ESSA-9	1969.2.26	159	115.3	1637	1730	101.9	2AVCS,FPR

(四)诺阿卫星(NOAA)系列(依托斯/诺阿及泰罗斯/诺阿系列)

诺阿(NOAA)卫星最初称依托斯(ITOS)及依托斯改进型,1970年—1976年共发射6颗,第一颗称依托斯,以后用诺阿编号。1978年10月13日发射TIROS-N,其后编号接诺阿6、7、8…,现已发射10颗(表8—4)。

表8—4 美国诺阿卫星-依托斯/诺阿(ITOS/NOAA)及泰罗斯N/诺阿(TIROS/NOAA)系列

卫星名称	发射日期	重量(kg)	周期(min)	近地点(km)	远地点(km)	倾角(°)	探测仪器
ITOS-1	1970.1.23	310	115.1	1648	1700	102	2APT,2AVCS,2SR,FPR
NOAA-1	1970.12.11	310	114.8	1422	1472	102	2APT,2AVCS,2SR,FPR
NOAA-2	1972.10.15	341	114.9	1451	1458	98.6	2VHRR,2VTPR,2SP,SPM
NOAA-3	1973.11.6	341	116.1	1500	1512	101.9	同上
NOAA-4	1974.11.15	341	114.9	1447	1461	101.6	同上
NOAA-5	1976.7.29	341	116.2	1504	1518	102.1	同上
TIROS-N	1978.10.13	1420	98.92	849	861	102.3	AVHRR, HIRS－2, SSU, MSU, HEPAD,MEOED
NOAA-6	1979.7.27	1420	101.26	807.5	823	98.74	
NOAA-7	1981.7.23	1420	101.9	845	879	98.9	AVHRR, HIRS 2, SSU, MSU, HEPAD,MEPED
NOAA-8	1983.3.28	1725	101.2	801	826	98.7	
NOAA 9	1984.12.12	1725	1020	842	862	98.9	AVHRR, HIRSZ, SSU, MSU, HEOAD,MEPED,SBUV,ERBE
NOAA-10	1986.9.17						

传输方式采取实时直接发送给地面站和星上记录后再回放两种方式。

诺阿系列采用双星系统观察，三轴飞轮稳定，寿命 6 个月以上。

NOAA-1 载 2 台扫描辐射计，2 台高级光导管电视摄像机，1 台平板辐射计，1 台质子监测器。

NOAA-3 开始去掉电视摄像机和平板辐射仪，改增高分辨率辐射仪和垂直廓线辐射仪。图像分辨率为 1km，红外扫描辐射计图像分辨率为 4km。后来又增加了垂直温度廓线辐射计(VTPR)，提供 30km 高空温度廓线，水平分辨率为 60km。这样就有了三维温度数据，对气象预报很有意义。

泰罗斯-N(TIROS N)卫星是第三代业务卫星的开始。现在我们能接收的就是 NOAA-9 与 NOAA-10 两颗极轨卫星。这是迄今为止世界上最先进的极轨业务卫星。这一代卫星将持续到 90 年代中期。

这一代卫星轨道的标称高度为 833km 或 870km，太阳同步轨道，三轴稳定，对地定向，姿态精度±0.2°以内，经处理可达±0.1°。计划同时使用两颗卫星，即两颗诺阿卫星轨道平面成以极轴对称相交。这样卫星对同一地区每天观测次数增加到 4 次。因此每个地面站平均每隔两个多小时可以收到一次资料。卫星以五通道改进的甚高分辨率辐射计(AVHRR)代替了以前诺阿卫星上的二通道扫描辐射计(SR)和甚高分辨率辐射计(VHRR)的作用(NOAA-8 以前为四通道，NOAA-9 以后为五通道)。以 20 通道的高分辨率红外探测器(HIRS-2)代替了早期诺阿卫星上的 8 通道垂直廓线辐射计(VTPR)，并将雨云卫星上试验成功的微波波谱仪原理首次用于业务卫星，其仪器为微波探测单元(MSU)，星上还增加了英国研制的平流层探测单元(SSU)，这样由 HIRS-2，MSU 及 SSU 三部分构成泰罗斯业务垂直探测系统(TOVS)。分析以上仪器，可以看出，这一代卫星的一个特点就是“多光谱”。为了减少观测资料的传输误差，采用了数字化传输体制，总之，这个系列卫星的观测能力大为提高，获取资料范围大为扩大，资料精度大为改善。

NOAA 卫星系列目前携带的用于环境监测的传感器主要有改进型甚高分辨率辐射仪 AVHRR 和泰罗斯业务垂直探测系统 TOVS。

AVHRR 是旋转平面镜式光机扫描仪，全视场角为±56°，地面投影宽度 2700km。AVHRR 有 5 个通道(表 8—5)，白天可提供云覆盖和冰雪覆盖，夜间可提供云覆盖和海面温度等。直读高分辨率图像传输(HRPT)具有 1.1km 的分辨率，自动图像传输(APT)提供 4km 的无畸变分辨率。

表 8—5　AVHRR 通道及其主要应用

通　道	波长(μm)	主要应用(1.1km 分辨率)
1	0.58—0.68	天气预报、云边景图、冰雪探测
2	0.725—1.10	水体位置、冰雪溶化、植被和农作物评价、草场调查
3	3.55—3.93	海面温度、夜间云覆盖、水陆边界、森林火灾、禾草燃烧探测
4	10.30—11.30	海面温度、昼/夜云量、土壤湿度
5	11.50—12.50	同 4

1. 辐射分辨率

AVHRR 具有 10 比特的辐射分辨率，量化级为 1024；而 MSS 的 4、5、6 波段为 7 比特，7

波段为6比特，仅64个量化级；TM为8比特，256个量化级。

2. 空间分辨率

TM和MSS的空间分辨率分别是30m和80m，HRPT仅1.1km。相比之下，AVHRR的空间分辨率显然低得多，但是AVHRR的一个像元面积相当于MSS的200个像元或TM1340个像元，因此在地面处理时可以大大节省时间。对于大范围的资源与环境宏观监测及预报等领域，利用AVHRR数据可以达到即经济实惠，又省时的目的。

3. 光谱分辨

AVHRR的第1、2通道量测反射辐射亮度，MSS和TM则各有4个通道，但ABHRR饱和度阈值高，在分析高反射率表面时，AVHRR数据优于陆地卫星数据。

4. 覆盖频率

陆地卫星数据重复周期长(16—18天)，多云地区使用这类数据受到限制；AVHRR对某一地区每天有四次覆盖的可能性(两颗卫星)，无云的有效数据有时可多达3个。

AVHRR数据的这些特点，为探测大面积、多变化的环境现象提供了有利条件，在非气象领域里具有广泛的应用前景。主要的应用方面有：

海洋油污染探测；

探测火山喷发；

测定森林火灾和田野禾草燃源位置；

测定海洋涌流；

探测植被生活力；

确定蝗虫孳生地的范围；

农作物监测与作物估产；

湖面水位变化探测。

这个系列是目前重要的近极地气象卫星，由二个卫星构成双星同时工作，覆盖周期短，热图像分辨率很高。

(五)前苏联"流星"(METEOP)气象卫星系列

前苏联用于气象观察的卫星系列有两个，一个是"宇宙"卫星系列，一个是"流星"卫星系列。前者是一个非专一用于气象的庞杂用途的系列，已知有10余次用于气象仪器，能源，姿态控制，资料传输系统的试验。在试验的过程中也对地进行云、雪、冰覆盖，云顶温度，洋面温度，太阳辐射，地球反射等方面的观察，发回数据，但不是一个专门的气象卫星系列，这里不做介绍了。

"流星"系列自1969年发射以来到1985年共发射44颗，按先后及仪器发展分为两个子系列，即"流星Ⅰ"系列和"流星Ⅱ"系列。

"流星Ⅰ"，1969—1981发射31颗，"流星Ⅰ"-9和28—31号平均高度600余km，10—21号平均约900km。准太阳同步轨道、构思似"雨云"卫星。气象业务观测仪器有：

电视摄像机	星下分辨率	1.5km	
热红外扫描仪	星下分辨率	20km	波段8—12μm
扫描辐射计	星下分辨率	70km	波段①0.3—3μm
			②8—12μm
			③3—30μm

“流星Ⅱ”从1975年到1985年发射13颗，被认为是前苏联第二代气象卫星(表8—6)。平均高度900km上下，形状与“流星Ⅰ”相似。主要仪器如下表(表8—7)。

表8—6 前苏联“流星Ⅱ”(METEOPⅡ)气象卫星轨道参数

型　号	发射日期(年、月、日)	近地点高度(km)	远地点高度(km)	倾角(°)	周期(min)
流星Ⅱ-1	1975.7.11	872	903	81.3	102.5
流星Ⅱ-2	1977.1.7	880	910	81.8	102.5
流星Ⅱ-3	1977.12.14	(资料缺)			
流星Ⅱ-4	1979.3.1	857	908	81.2	102.3
流星Ⅱ-5	1979.10.31	877	904	81.2	102.6
流星Ⅱ-6	1980.9.9	816	892	81.25	102.4
流星Ⅱ 7	1981.5.15	868	904	81.3	102.5
流星Ⅱ-8	1982.3.25	954	976	82.5	104.2
流星Ⅱ-9	1982.12.14	836	904	81.2	102
流星Ⅱ-10	1983.10.28	780	901	81.2	101
流星Ⅱ 11	1984.7.5	954	974	82.5	104
流星Ⅱ-12	1985.2.6	935	956	82.5	104
流星Ⅱ-13	1985.12.26	952	975	82.2	104

表8—7 前苏联第二代“流星”传感器主要性能简表

	波　段	分辨率	覆盖宽度
扫描遥测光°计	0.5—0.7μm	2km	2600km
电视摄像机	0.5—0.7μm	1km	2200km
红外扫描辐射计	8—12μm	8km	2600km
八通道扫描辐射计	1.1，13.33，13.70，14.24，14.43，14.75，15.02，18.70μm	角分辨力2°	1000km

由于前苏联对外很少公布资料，传入我国的更少。俄罗斯90年代气象卫星发射计划不明，更难评述。

(六)中国“风云一号”(FY-1)气象卫星系列

FY-1是中国第一代极轨气象卫星，其目的是试验兼试用。FY-1系列有二颗卫星。第一颗FY-1A于1988年9月7日发射，第二颗FY-1B于1990年9月2日发射。星体本体为六面体，顶底面积为1.4m×1.4m，侧面面积为1.4m×1.2m。星体两外侧各安装三块1200mm×955mm可伸展折叠式太阳电池帆板。电池帆板展开后星体总长8.6m。卫星采用太阳同步轨道，高度901km，偏心率小于0.005，轨道倾角98.9°，周期102.86分钟。FY-1A过境地方时约为4:00和16:00，FY-1B过境地方时约为8:00和20:00。每天绕地球14圈。三轴稳定，对地定向。传感器和对地通信天线安装于平台对地一面。

卫星载二台甚高分辨率扫描辐射计，性能与NOAA卫星的AVHRR相近似。扫描仪有五个波段，波段范围用途如表8—8。

表 8－8　FY-1 甚高分辨率描辐射仪波段用途

波段编号	波段范围	主要用途
1	0.58－0.68μm	白天云图
2	0.725－1.1μm	白天云图，冰、雪覆盖，水陆边界
3	0.48－0.53μm	海洋水色
4	0.53－0.58μm	海洋水色
5	10.5　12.5μm	昼夜云图，地表，洋面温度

FY-1 卫星运行时，辐射仪扫描镜以 360 转/分的速率对地扫描，每条扫描线 2048 个扫描点，地面覆盖宽度约 3200km，瞬时视场 1.2mrad，星下点地面分辨率 1.1km。

FY-1 卫星有三种资料发送方式：高分辨率图像实时传输、自动图像实时传输和延时图像传输。由北京、广州、乌鲁木齐地面站接收数据再传送至北京资料处理中心。

经过处理后向用户提供：极射赤面投影拼图，多波段(1,2,5)合成图，多时相亮度合成图，局部增强叠加云图，单轨展宽云图，植被指数图，海冰分布图及海面温度、射出长波辐射、云参数等三项电码、字符打印资料。

二、静止气象卫星

静止卫星也称地球同步卫星，只有美国、日本、欧空局、印度(表 8－9、图 8－1) 几个国家和地区发射了同步气象卫星。其中美国研制、发射最早，数量最大。日本发射的气象卫星定位于东经 140°上空与我们关系最大。下面分别简述一下。

表 8－9　世界各国静止气象卫星辐射计的主要性能

项目＼卫星		GOES－D.E.F	GMS	Meteosat	Insat
国家		美国	日本	欧空局	印度
姿态控制方式		自旋(100 周/分)	同左	同左	三轴稳定
扫描方向及速率		W→F(100 周/分)	同左	E→W(100 周/分)	E→W 和 W→E,50 次/分
步进方向		N→S	同左	S→N	N→S
扫描线数		1821	2500	2500	1137
扫描时间		1821	25	25	23
瞬时视场角 (μrad)	VIS	21×25	31×35	70	76
	IR	192 或 384	140	140	306
星下点分辨率 (km)	VIS	0.9	1.25	2.5	2.75
	IR	7 和 14	5	5	11
波长 (μm)	VIS	0.55－0.75	0.55－0.75	0.4－1.1	0.55－0.75
	IR	12 个通道	10.5－12.5	10.5－12.5,5.7－7.1	10.5－12.5
探测器类型	VIS	PMT	PMT	Si	Si
	IR	HgCdTe,InSb	HgCdTe	HgCdTe	HgCdTe
外形尺寸(cm)		152×65×79	152×65×79	180×88×72	
重量(kg)		78.5	71	52	39
功耗(w)		30	24	17	23

(一)美国同步气象卫星(SMS/GOES)系列

这一系列有前后三代：

①第一代地球同步业务气象卫星(SMS/GOES)

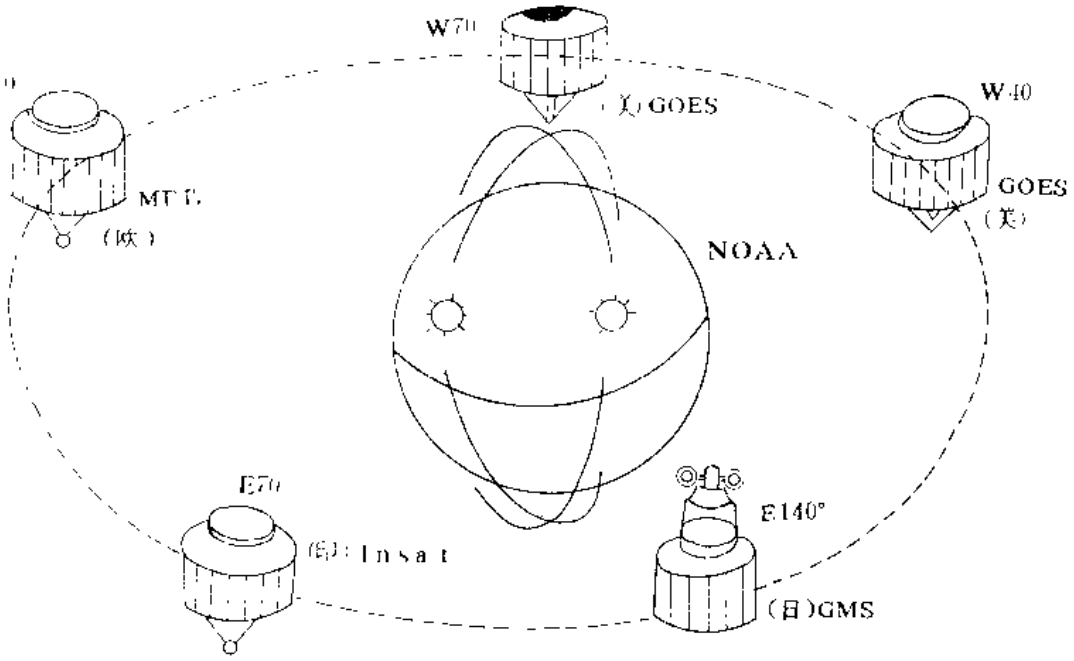


图 8—1　世界天气监测网气象卫星空间位置图

②第二代地球同步气象卫星(GOES-D,E,F,H)

③90 年代陆续发射第三代地球同步气象卫星(GOES-I,J,K,L,M)

SMS/GOES 立轴自旋稳定,自旋周期 100 周/分钟。

主要仪器是可见光—红外自扫描辐射仪,二个通道:

0.55—0.75μm　　分辨率 0.8km

10.5—12.5μm　　分辨率 6.4km

所谓云图为圆盘形图像,不做经纬度注记。

第二代地球同步卫星,其特点是以改进的甚高分辨率扫描辐射仪大气探测器(AVHRR/VAS)取代第一代的可见光--红外自旋扫描辐射仪(VISSR),其主要性能、工作方式见表 8—10。

表 8—10　AVHRR/VAS 工作方式(用于 GOES-D 卫星)

工作方式	波　　段	分辨率	注
方式 1	红　外　10.5—12.6μm	7km	30 分钟全盘图,取图范围缩小,则所需时间相应减少,最少可为 3～5 分钟。
	可见光　0.55—0.75μm	1km	
方式 2	0.55　0.75μm 10.5—12.6μm 加上任何两个通道	14km	
方式 3	12 个通道	14km	这两种方式只能任取一,探测范围 20°(N→S)内,探测时间 1 小时。
方式 4	12 个通道中除五个通道外	7km	

第三代地球同步卫星较第二代有较大改进。五通道成像仪和大气垂直分布探测器性能见表 8—11、8—12。

表 8—11　大气垂直分布探测器波段

通道	中心波长 (nm)	半功率带宽 (nm)	最大亮温 (K)	NEAN ($mwm^{-2}sr^{-1}cm$)		探测目的
				规定	期望	
1	680	13	260	0.66	0.25	温度探测
2	696	13	260	0.58	0.25	
3	711	13	270	0.51	0.25	
4	733	16	290	3.15	0.25	
5	748	16	300	0.11	0.20	
6	790	30	315	0.25	0.15	
7	832	50	330	9.16	0.06	表面温度，云检测
8	907	50	335	0.16	0.06	
9	1030	25	310	0.33	0.12	O_3 总含量
10	1345	55	300	0.16	0.05	水汽探测
11	1425	80	285	0.12	0.04	
12	1535	60	265	0.15	0.04	
13	2188	23	310	0.913	0.004	
14	2210	23	295	0.913	0.004	温度探测
15	2245	23	275	0.913	0.004	
16	2420	40	330	0.0080	0.003	
17	2513	40	335	0.0082	0.003	表面温度，云检测
18	2671	100	335	0.0036	0.002	
19	14367	1000	不用	0.10%	0.04%	云检测

表 8—12　五通道成像仪的波段特性

通　道	波　段 (μm)	瞬时视场 (μrad)	敏感元件	*NEΔT* 或 *S/N*	
				规　定	期　望
1	0.55—0.75	28	硅	150∶1	500∶1
2	3.80—4.00	112	碲化铟	1.4K	0.08K
3	6.50—7.00	224	碲镉汞	1.0K	0.50K
4	10.5　11.20	112	碲镉汞	0.35K	0.10K
5	11.5—12.5	112	碲镉汞	0.35K	0.12K

（二）日本葵花气象卫星系列（GMS）

1977 年至现在已发射 4 颗，各自发射日期：LGMS-1 是 1977 年 7 月 14 日；GMS-2 是 1981 年 11 月；GMS-3 是 1984 年 3 月；GMS-4 是 1989 年 9 月 6 日；预计 1994 年发射 GMS-5。1996 年后将发射新的一代 GMS。GMS 系列是世界气象组织计划中的一颗，位于东经 140° 上空，高约为 35800km，倾角为 0°，周期为 1 天。GMS 1 外形见图 8—2。自旋稳定 100 周/分钟，垂直地面，载可见光—红外自旋扫描辐射仪（成像）和空间环境监视仪。前者对地扫描，后者监测空间。我们只讲可见光—红外自旋扫描辐射仪（VISSR）的性能和结构（见图 8—3，表 8—13）。

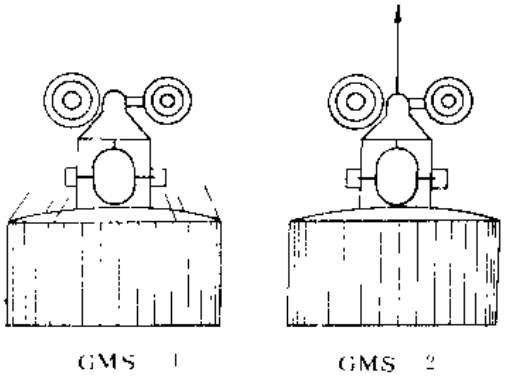


图 8—2 GMS-1,2 外形
(据日本宇宙开发事业团,1982)

表 8—13 GMS-1VISSR 性能简表

观测波长	0.6～0.75μm(可见光)	10.5～12.5μm(红外)
地面分辨率	1.25km	5km
扫描线数	2500×4 条	2500 条
结 构	参见图 8—3	

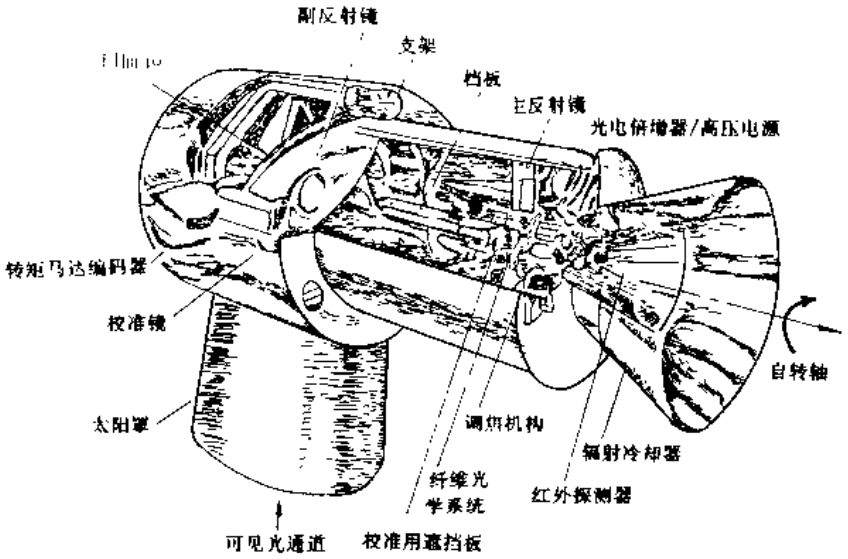


图 8—3 GMS 可见光—红外自旋扫描辐射仪(VISSR)结构图
(据日本宇宙开发事业团,1982)

辐射计孔径 40.6mm,焦距 291mm 远镜头,光轴平行于星体自旋轴。扫描镜 45°倾斜,65×42mm 椭圆形,随星体每分钟 100 转,并利用卫星由东向西自转的过程进行扫描。卫星每

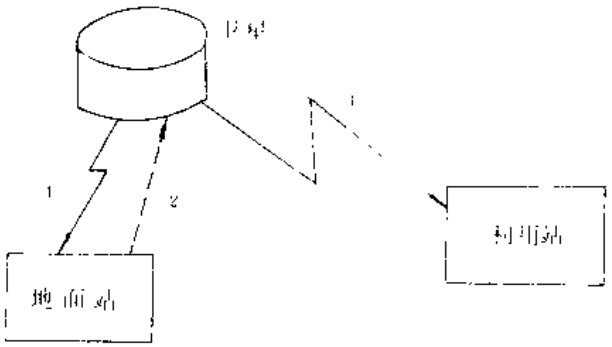


图 8—4 GMS 数据传输示意图

①②③为数据传输顺序

转一周，扫描镜由东向西扫一次，每扫一次扫描棱镜由北向南递进 70μrad，25 分钟移 10°，25 分钟扫描全半球，共 2500 扫描线，25 分复位，响应波段 0.6—0.75μm 光电倍增管，分辨率 1.25km；10.5—12.5μm 碲镉汞元件，分辨率 5km。提供资料方式：二次传输(图 8—4)。GMS 1 到 GMS-5 无重大改变。GMS-5 与 GMS-4 相比，增加一个波段，即 6.5—7.0μm 波段。GMS 系列提供图像：

图像种类
- 全景圆形图像
- 日本邻区局部放大图像
- 分割圆形为七扇形图像
- 极地立体投影图像
- 墨卡脱投影图像

各种图形均有可见光、红外及等温、分层等图像。地面站还可提供放大缩小、数字图像处理、附加及投影变换等。

至于欧洲、印度的静止气象卫星就不介绍了。

第二节 “水星”系列—“双子星座”系列—“阿波罗”系列—天空实验室

“水星”号、“双子星座”号、“阿波罗”号是美国最早发射的载人飞船，天空实验室是最早的空间站，构成一个系列计划。从开始的“水星”、“双子星座”、“阿波罗”计划到“阿波罗”计划补充和延伸的“天空实验室”，它们密切相关。

总的来说在阿波罗-9 以前，携带的成像传感器是手提式像机，对地拍摄是随机性的。阿波罗-13 才装有多种固定的和机动的像机，其目的是为获得月球上选定部位的系统覆盖图像。对地遥感观测是一种附带性的。在水星—阿波罗系列载人飞船得到地面照片的启发下，又补充了阿波罗后期计划和天空实验室计划。1973 年 5 月发射的“天空实验室”载有一系列地球遥感的实验设备，目的是专门用于对地观察。

下面分别介绍这几个系列。

一、“水星”系列

是美国早期的载人宇宙飞船。从 1961 年到 1964 年共飞行 4 次，是为人类登月作准备。

“水星”系列是椭圆低轨飞船。高度为：近地点 161km，远地点 260km 左右。小倾角(32°)，短寿命(1—3 天)，三轴控制稳定，乘 1 人，溅落式回收。三种手提式像机(70mm，55mm，16mm)。附带对地随机摄影，生成无规律的倾斜像片。

二、“双子星座”系列

1964 年—1966 年进行 10 次飞行，除双子星-11 是变化高度达中轨外，其余仍属椭圆低高度(160—320km)轨道。低倾角(30°—35°)，寿命一周，乘员两人，溅落式回收。

“双子星座”主要任务仍为阿波罗试验，对地摄影是次要的。

得到的胶片，彩红外效果不好。彩色照片已公开，计 1100 幅彩片，但都是倾斜像片。同时因云、火箭和飞船排出的气体凝聚在航天器窗口，使得图像质量降低。

三、“阿波罗”计划

这个计划是很宏伟的。而且也完成得很出色，不论在航天、登月和遥感等技术工作上，还是在研究、构思等方面都是值得借鉴的。这项计划耗资 240 亿美元，动员包括各个专业 100 万科技人员参加(现在有些人也称为“阿波罗”式的科研方式—多学科分工配合的方法)，在世界上产生了巨大的影响。

此计划在 1967 年—1972 年，共试飞行 17 次。

轨道有：地球卫星轨道、月球卫星轨道、月球弹道轨道。

传感器：在“阿波罗”系列中各次飞行所用传感器不同。

“阿波罗”1—8 号使用手提式像机；“阿波罗”-9 号装载 65 型多波段摄影机；“阿波罗”10—14 号开始使用多种像机，而“阿波罗”15—16 号装载 76mm 制图像机、全景扫描像机；“阿波罗”17 号载用侧视雷达、红外扫描仪。

其中 50—65 型是 4 台同步摄影相机，三台多波段黑白摄影，波段为

0.47—0.61μm——姑且称波段 1。

0.59—0.76μm——姑且称波段 2。

0.68—0.89μm——姑且称波段 3。

第四台为彩红外摄影。

“阿波罗”—17 所载的侧视雷达，只专用于对月球遥感，波长达 60m。

四、天空实验室

是一种轨道载人空间站，在 1972 年底“阿波罗”完成的登月计划后，于 1973 年 5 月 14 日发射的，高度 435km，倾角 50°。

发射时是不载人的，后来乘员分三批乘阿波罗飞船，指令服务舱与天空实验室对接，每批完成任务后返回，这三次时间分别为：

73.5.25—73.6.22	编号 SL-2
73.7.28—73.9.25	编号 SL-3
73.11.26—74.2.8	编号 SL-4

各次所得到的资料由阿波罗飞船返回时带回地球，溅落回收。天空实验室于 1979 年 7 月 11 日坠落于澳大利亚西南海面。

天空实验室携带遥感设备有：

①A—190A——多波段像机；

②S—190B——大地地面像机；

③S—192——多波段扫描仪；

④S—191——分光计；

⑤S—193——雷达散射计、雷达高度计；

⑥S—194——微波辐射计。

其中前三项是成像设备，在这作简单介绍。

(一)S-190A——多波段像机

S-190A 是六台像机对准同一天底点进行同步摄影(表 8—14)。用 1、5、6 波段可合成与陆地卫星 MSS4,5,6 相当的假彩色合成片。

表 8—14 S—190A 多波段相机主要特征

相 机	波段 μm	胶 片	地面分辨率
1	0.7—0.8	红外黑白	145m
2	0.8—0.9	红外黑白	145m
3	0.5—0.9	红外彩色	145m
4	0.4—0.7	标准彩色	85m
5	0.6—0.7	黑 白	60m
6	0.5—0.6	黑 白	60m

(二)S-190B——大地地面像机

S-190B 是一种长焦距单镜头像机，可拍标准彩色片、彩红外片、消蓝黑白片。可放大到 1:5 万或 1:10 万。

(三)S-192——多光谱扫描仪

它是光学机械扫描成像设备，前倾弧形扫描。分光镜＋棱镜光谱分割，为 13 个波段，各波段性能见表 8—15。

表 8—15 S—192 扫描仪波段表

波段号数	波谱数值(μm)	波 段
1	0.41—0.45	蓝
2	0.44—0.52	蓝—青—绿
3	0.49—0.56	绿
4	0.53—0.61	黄 绿
5	0.59—0.67	橙 红
6	0.64—0.76	红
7	0.75—0.90	近红外波段
8	0.91—1.08	
9	1.00 -1.24	
10	1.10—1.35	
11	1.48—1.85	
12	2.00—2.43	
13	10.20—12.5	热红外

“天空实验室”上述三种资料地面覆盖情况虽然各有自己的范围，但其轴线位置是一致的(图 8—5)。

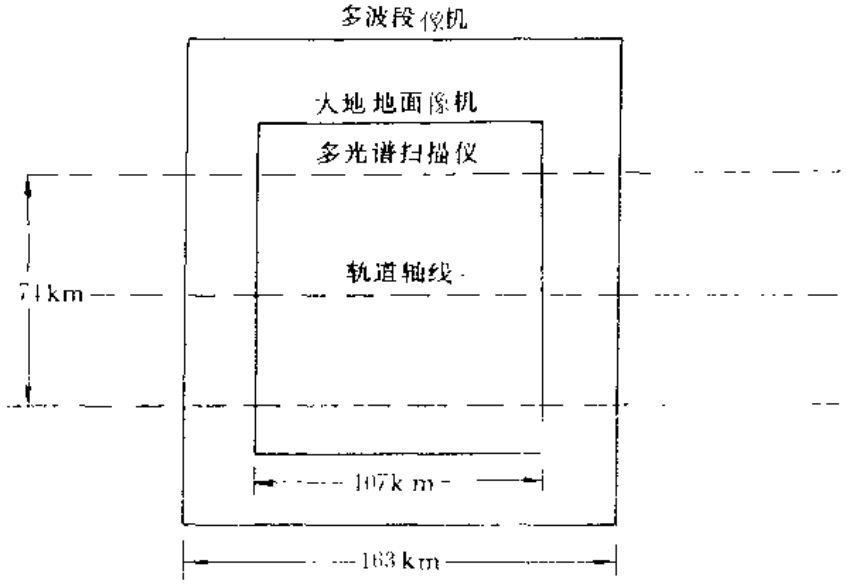


图 8—5　天空实验室三种图像地面位置关系图

上面三种仪器得到的为垂直图像。

除上述三种外，还有手提式像机(70mm)。

天空实验室拍摄了两万多张地球资源图像，均属于实验性，但对地球资源遥感的历史意义不容低估，而且有些图像至今还有重要的科学意义。

第三节　地球资源卫星类(一)
——美国陆地卫星系列(Landsat)

陆地卫星是美国国家航空和宇宙航行局(NASA)自 1972 年开始发射的，用以收集农业、林业、土壤、地质、水利、环境、生态等地球资源资料的卫星系列。目前为止，陆地卫星所收集的地球资源资料是大多数国家遥感工作者的主要研究对象。

陆地卫星迄今为止共发射了 6 颗，其发射情况见表 8—16。

表 8—16　陆地卫星发射情况表

编　号	发射日期	停用日期	曾用代号
Landsat-1	1972.07.23	1978.01.06	E-1
Landsat-2	1975.01.22	1980.05	E-2
Landsat-3	1978.03.05	1980.03.09	
Landsat-4	1982.07.16	1983.02.15	
Landsat-5	1984.03.01		
Landsat-6	1993.10.发射失败		

陆地卫星最初称为“地球资源技术卫星”(Earth Resources Techology Satellite)。NASA 在最初发射地球资源技术卫星的过程中，通过其地球资源调查计划和其他有关联邦机构共同支持的研究活动取得了陆地卫星方面的成果。这些研究活动导致产生了 专门用于围绕地球作轨道飞行的从事陆地观察的卫星的概念，研究的中心越来越集中于陆地资源的调查，所以从 1975 年开始，“地球资源技术卫星”更名为“陆地卫星”，用以强调“陆地资源调查”。

Landsat-1 号和 Landsat-2 号在设计上是完全一致的(图 8—6)，只是在轨道的相位上相差 180°，两星围绕地球运转共同组成一个观测系统，每 9 天就可对地球进行一次重复观测。Landsat-1 号停止工作以后，又发射了 Landsat-3 号代替了 Landsat-1 号的工作。星上装载的主

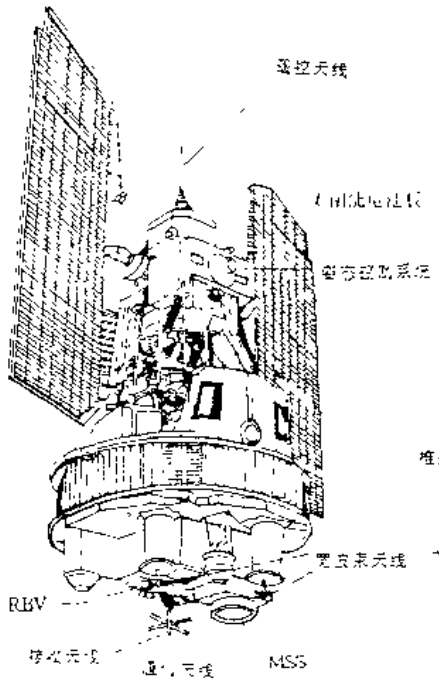


图 8—6 陆地卫星 1 号星体外形图
(据王长耀，1985)

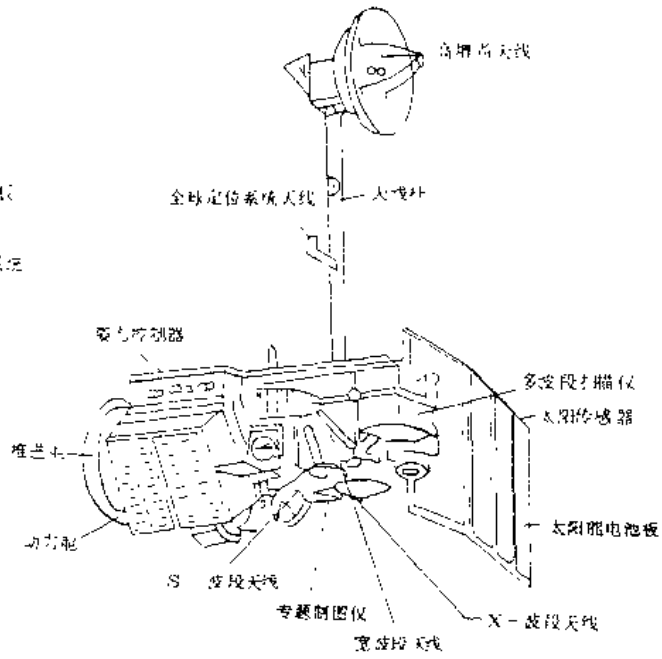


图 8—7 陆地卫星 4、5 号星体外形图
(据朱启疆，1985)

要传感仪器是多光谱扫描仪(MSS)和反束光导管摄像机(RBV)。

Landsat-4 号和 Landsat-5 号也是一对双星，其星内结构及装载的仪器设备也都一样(图 8—7)。原计划两星同时工作，以缩短全球覆盖的周期，因 Landsat-4 号发射不久出现故障，所以将 Landsat—5 号提前发射，用以代替 Landsat-4 号。星上装载的主要传感器是多光谱扫描仪(MSS)和专题制图仪(TM)。

Landsat-6 是最新一代的陆地卫星，计划取代已升空服役达 9 年多的 Landsat-5 号。星上装载了增强型专题制图仪(ETM)。其遥感图片的质量比专题制图仪有较大的改善。但发射失败。

Landsat-7 号卫星在不久的将来也将发射，它上面装载的传感设备除 ETM 外，还将装载一台多光谱线列阵仪(ALS)，成像对应地面幅宽 41km，可离开垂直观察位置，向两侧观察，其最大侧摆以星下点为中心，两边各达 635km。因此不同航带重叠图像可进行立体成像。

陆地卫星计划自实施以来，整个系统采用了一系列先进的技术设备。随着科学技术的不

断发展，陆地卫星系统不论是从地面接收处理设备，还是星体的遥感仪器、收集系统都有了不断的提高。陆地卫星从其星体结构来看，到目前为止可以分为三个阶段：Landsat-1，2，3 号是第一个阶段，Landsat-4，5 号是第二阶段，Landsat-6 号卫星以后是第三阶段。这三个阶段的陆地卫星，其星载设备不尽相同，所用的传感器在性能上也有所区别。在下面我们将简要地介绍一下它们在传感器、飞行轨道、传输接收方式以及不同传感器在遥感图像方面的特点。

一、陆地卫星轨道

陆地卫星因其担负的资源遥感任务，需要具有较长的工作寿命，能稳定工作数年，在大范围遥感的基础上，又要保证高分辨率，对不同地区的图像要保证比例尺一致，图像定位误差要小，以便于校正，同纬度和同地区多次图像光谱条件近于一致。所以陆地卫星的轨道被设计成中高度、近圆形、太阳同步的近极地轨道，使卫星上仪器所获取的图像和资料满足资源遥感的工作需要。陆地卫星轨道参数见表 8—17：

表 8—17　陆地卫星轨道参数览表

卫星编号	高　度 (km)	倾　角 (°)	周　期 (min)	日　圈 数	准回归 周期(天)	覆盖全球 所需圈数	降交点时间
landsat-1	920	99.906	103.14	14	18	251	8:59
landsat 2	920	99.210	103.15	14	18	251	9:08
landsat-3	920	99.117	103.15	14	18	251	6:31
landsat-4,5	705	98.220	98.90	14.5	16	233	9:45
landsat 6		98.200	98.90	14.5	16	233	9:15

陆地卫星对地面的覆盖与轨道有很大关系，陆地卫星 1，2，3 号同一天第一圈与第二圈在赤道上间距 2875km，恰好相当于 18 条轨道覆盖宽度。相临两圈轨道在赤道上间隔 159km，成像宽度为 185km，重叠约 26km。陆地卫星 4，5，6 号则采取以 7 递进，在 16 天覆盖全球地面一次。

二、传感器概况

陆地卫星的传感器，从 RBV 和 MSS 到 TM，已有很大的进步，不久再到 ETM，其性能将越来越好，获取的信息将越来越丰富。下面分别作简要介绍，并主要将 MSS 和 TM 作一对比。

1. RBV(反束光导管摄像机)

在 Landsat-1，2 上的载有 3 台 RBV，构成三个波段，但都因发生故障，很短时间就停止工作。Landsat-3 改为并列的 2 台 RBV，各自对应地面 98×98km，边缘互相重叠 13km，覆盖地面 183km。2 台均用 0.505—0.75μm 宽波谱带。地面分辨率 30m。图像质量优于 MSS。但由于耗电量大，易出故障，在以后的卫星中未再采用。

2. MSS(多光谱扫描仪)、TM(专题制图仪)和 ETM(增强型专题制图仪)

陆地卫星 4，5 号所载的 MSS 是一种由扫描系统和多光谱探测器阵列元件组成的光学机械扫描器，与陆地卫星 1，2，3 号所载的 MSS 是相似的。

MSS 和 TM 同是光学机械扫描成像仪器，总的成像原理是一致的。其差别主要是在扫描镜的扫描方式、波段范围与分辨率。基本情况见表 8—18 和表 8—19

表 8—18　MSS 和 TM 扫描镜主要参数

传感器	总视场角 (°)	像元视场 (urad)	地面总扫描宽度(km)	赤道重叠	扫描方式
MSS	11.56	86	185	14%	单向
TM	15.03	42	185	7.6%	双向

表 8—19　陆地卫星 MSS 与 TM 波谱、几何分辨率比较表

MSS 波段号	波段范围 (μm)	辐射分辨率 (NEP＊)	几何分辨率 (m)	TM 波段号	波段范围 (μm)	辐射分辨率 (NEP)	几何分辨率 (m)
				1	0.45　0.52	0.8%	30
4	0.5—0.6	0.57%	80	2	0.52—0.60	0.5%	30
5	0.6—0.7	0.57%	80	3	0.63—0.69	0.5%	30
6	0.7—0.8	0.65%	80	4	0.76—0.90	0.5%	30
7	0.8—1.1	0.70%	80				
				5	1.55—1.75	1.0%	30
8	10.4—12.5		120	6	10.4—12.5	0.5% KNETD＊＊	120
				7	2.08—2.35	2.4%	30

＊NEP 为等效反射噪信百分数

＊＊KNETD 为等效温差噪信百分数

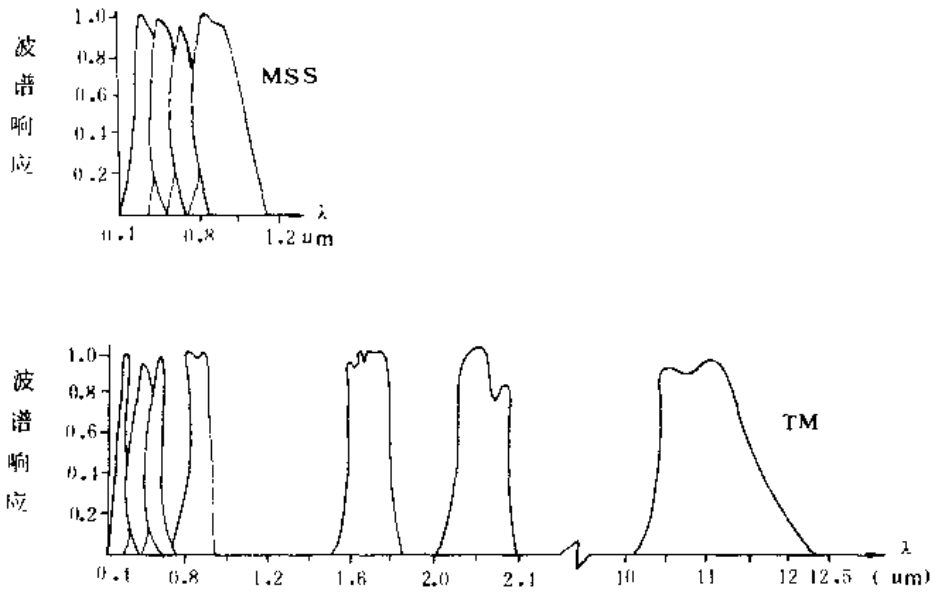


图 8—8　MSS 与 TM 波谱对比图

（据赵华昌，1986）

由于 TM 对应每个探测器的视场小，像元所对应地面面积小，几何分辨率在光谱灵敏度的保证下，得到充分提高，双向扫描增加了单位面积能量积累时间，也是几何分辨率和光分辨率提高的条件。MSS 四个波段(4,5,6,7 波段)24 个成像板及 8 波段的 2 个成像板共 26 块成像板；而 TM1—5,7 波段有 96 个成像板及 6 波段的 4 个成像板共 100 块成像板。虽然每幅像元数多了，但由于单位时间成像个数也多，所以整幅图像成像时间并无多大的变化。

由上表可以看出，在可见光和近红外光谱带 TM 分辨率为 30m，MSS 分辨率为 80m。TM 的几何分辨率比 MSS 有明显提高。

TM 波段数增加到 7 个，其中有 2 个波段(TM2,3)与 MSS4,5 相当，另一波段(TM4)跨在 MSS6,7 两波段结合处，所以 TM 和 MSS 具有一定的光谱上的可比性，同时又超越了 MSS 的范围(图 8—8)。

ETM 是陆地卫星 6 号装载的传感器，与 TM 相比它增添了一个地面分辨率为 15m 的全色波段，其波段技术参数见表(8—20)，其图片质量较之 TM 将有较大的改善。

表 8—20　Landsat—6 ETM 波段技术参数

波段号	波段宽度(μm)	探　测　器	IFOV (μrad)	地面分辨率
PAN	0.50—0.90	SiPD(32)	18.5×21.3	13×15
1	0.45—0.52	SiPD(16)	42.5	30
2	0.52—0.60	SiPD(16)	42.5	30
3	0.63—0.69	SiPD(16)	42.5	30
4	0.76—0.90	SiPD(16)	42.5	30
5	1.55　1.75	SiPD(16)	42.5	30
6	10.4—12.5	HgCdTe(4)	170	120
7	2.08—2.35	SiPD(16)	42.5	30

根据以上的图表可以看出，ETM、TM、MSS 相比较，在波段设置、波段辐射分辨率、几何分辨率上有以下几个特点：

(1)TM、ETM 总体波段范围宽，有可见光、近红外、远红外、(ETM 和 TM 在波谱范围及波段划分上是一样的，只是 ETM 多出一个全色波段)。

(2)ETM 和 TM 波段多，它压缩了 MSS6,7 两个波段，另外增加了三个波段如下：

蓝绿波段：0.45—0.52μm

近红外波段：1.55—1.75μm

2.08—2.35μm

(3)相比之下 MSS 单个波段宽度较 TM 要宽。

(4)TM、ETM 的光谱分辨率、几何分辨率较 MSS 大为提高。

在信息量的获取方面，MSS、TM、ETM 的信息获取量是逐步提高的。下面对 MSS 和 TM 信息量做一比较(表 8—21)。

表 8—21

项　目	MSS	TM
量化级	128(4,5,6 波段) 64(7 波段)	256
各波段像元数	3240×2340 =7581600 =7.6×10⁶	1--5 波段及 7 波段: 6166×6166 =38023666=3.8×10⁶ =7.6×10⁶×5 6 波段　1542×1542=237764
一景总信息量	32 兆字节	230 兆字节=3.2 兆×7.2

可以看出 TM 量化等级多,等面积像元多,因而总信息量也大。

三、陆地卫星资料的传输

陆地卫星 1,2,3 号的数据传输采用两种方式:当卫星运行在美国本土地面站可接受的范围时,它将传感器所获得的信息实时地传送给地面接收站;当其运行至地面站接收范围之外时,卫星将传感器获取的信息转化为数字信息存入磁带,待经过地面站接收的空间范围时再传给地面站,由地面站进行加工、处理,获取所需信息。

陆地卫星 4,5 号的资料传输较之前三颗卫星要先进得的多,是通过设置于西半球、定点于西经 41°和西经 171°的两颗地球同步中继卫星进行传输的。

中继卫星的发射晚于陆地卫星 4 的发射,在此之前,陆地卫星 4 的 MSS 图像仍由以前的地面站进行接收,而 TM 数据则由设置于戈达德空间飞行中心的可搬运式地面站和加拿大地面站接收。中继卫星发射后,除北纬 50°到南纬 50°和东经 67°到东经 82°之间的一小块区域外,其他地区均可迅速地获取 MSS、TM 数据。美国本土地面站通过中继卫星可实时接收陆地卫星所获取的世界各地的 MSS 和 TM 数据资料。

现在,世界上已有十多个国家建设了陆地卫星地面接收站。我国在北京建立了一个地面站,运行几年来,效果良好,但固定的一个地面站其接收范围有限(直径约 35 幅图像长度的圆形区),在此范围之外,接收效果不好或接受不到。所以我国仅北京一个地面站还不够,拟再建广州地面站和乌鲁木齐地面站。

四、陆地卫星的计算机磁带产品

陆地卫星传送的 MSS 和 TM 图像数据,经过各种处理和校正后,一般都生产为高密度磁带(HDT)和计算机兼容带(CCT)产品,这两种产品的区别是所用磁带的磁道数和记录密度不同,在读取数据时所用方式不同。

一般用户多使用 CCT 磁带产品。这种产品分两种:①只进行了辐射校正处理的,称部分处理产品;②在辐射校正基础上进行了几何校正,称完全处理的产品。

数据在计算机磁带上是以文件的方式存放的,而文件又是由记录组成的,每一个记录就对应一个数据。CCT 磁带有两种国际标准记录格式:

(一)BSQ 格式

这种记录格式以每一波段组成一个文件,文件中每一个记录对应于一个扫描行数据,有多少扫描行,一个文件就有多少个记录。这种记录格式易于单独提取某个波段,使用比较方便。

(二)BIL 格式

这种记录格式只有一个文件。每个波段的每一个扫描行仍占一个记录，按波段顺序进行排列，即先排各波段的第一扫描行，再排各波段的第二扫描行……。这种记录格式易于提取一景图像中的某一部分。

我国自建成地面站以来，也采用国际标准记录格式制作磁带产品。这种格式的磁带在数据文件之上建立了一个类似于磁盘卷标的目录文件，其中存放对每个数据文件数据结构的描述及访问数据文件的指针等内容。

五、图像特点及应用

对 TM 和 MSS 相似的一般性特点就不讨论，在这讨论如何利用其高分辨率、多时相和多波段的特点。

(一)利用图像高分辨率的特点

MSS 地面几何分辨率为 80m，已经相当不错，而主题制图仪分辨率为 30m、线状物体地面分辨率可达 15m。30 m 物体在 1∶100 万的地图上只有 0.03mm，在 1∶50 万图像中为 0.06mm，在 1:10 万图像中为 0.3mm。从解译角度和手工编绘角度考虑放大到 1∶10 万或 1∶5 万为宜。TM 比 MSS 的几何分辨率的优点尤其体现在把图像放大到 1∶5 万和 1∶10 万。

在美国华盛顿市区的图像放大到 1∶5 万时，白宫、椭圆形草坪、华盛顿碑及其阴影、国会大厦、国防部五角大楼、机场、桥梁都清晰可见。

(二)综合利用多时相的特点

陆地卫星自 1972 年发射以来，到现在已积累了大量图像，可供利用的图像甚多，对同一地区来说，不同季节、不同条件下、不同太阳时间得到的图像可以找到许多，对一个地区可以从多角度提供资料，我们可以综合利用这些资料，对某一地区进行科学研究。

(三)利用其波段多和信息量大的特点

1. TM 有蓝光波段，因此可以进行真彩色合成。

2. MSS、TM 都可以进行多种组合的假彩色合成，可获得不同的信息。

3. 利用不同波段、不同物体的波谱特性识别地物。MSS 利用 0.5～1.1μm 波段范围已能识别一些地物；TM 波段范围的扩大，识别地物的能力也随之扩展，对于不同波段，应用的着重点也不同(表 8－22)。

表 8－22　TM 各波段应用范围简表

波段	用　　途
TM1	对水体是穿透力强的波段。用于海岸带、湖滨带水体制图，对叶绿素、叶红素的浓度敏感，用于区别针叶林、阔叶林，区分土壤与植被
TM2	对叶绿素敏感，是健康植物的反射峰，用以估计作物长势，也可以用于研究水质、水深
TM3	是叶绿素的吸收带，用于圈定植物区、覆盖率，区别植物种类，还可以研究人工建筑
TM4	水体强烈吸收，可以用于圈定水体边界，对植物密度和生物量进行测量，因为植物对此波段反射强烈，并可用于地质构造的研究
TM5	对植物和土壤中含水量反应敏感，并可以区分云和雪
TM6	是热红外波段，可用于寻找热异常、热分布，研究植被热影响分析、土壤水分状况及识别其他水热条件图
TM7	用于识别土壤、岩石、人工建筑及水热条件制图等

(据赵华昌，1981)

4. 利用大量数据进行数字图像处理，提取有用信息。

第四节　地球资源卫星类(二)
——法国斯波特卫星系列(SPOT)

一、斯波特系统概况

1978年2月法国总理主持的一次会议上批准了一项发展"地球观测试验系统"(法文"systems probatoired observation de la terrestre"缩写为"SPOT")的计划，由法国空间研究中心负责设计制造。曾计划1984年5月发射第一颗卫星。

拟定的整个任务是：

1. 试验目前和将来研制遥感设备；

2. 为制图和资源开发建立一个档案库和世界范围可利用的数据库；

3. 重复观测以改进对植物类型的识别和产量预报的试验；

4. 测1:25万平面(地形)图及按1:10万、1:5万地图规范更新地图，建立感兴趣地区立体像对档案库。

计划规定的主题是观察土地利用情况，包括监视城市发展、制作农业地图、矿产资源图、水资源图。这一计划曾在布拉格的第28届国际宇航联合会上介绍过。计划一经公布即引起人们的关注，模拟试验的结果更增加了人们的兴趣。

SPOT整个系统包括平台、传感器、控制中心、任务中心、地面接收站、图像预处理部分和

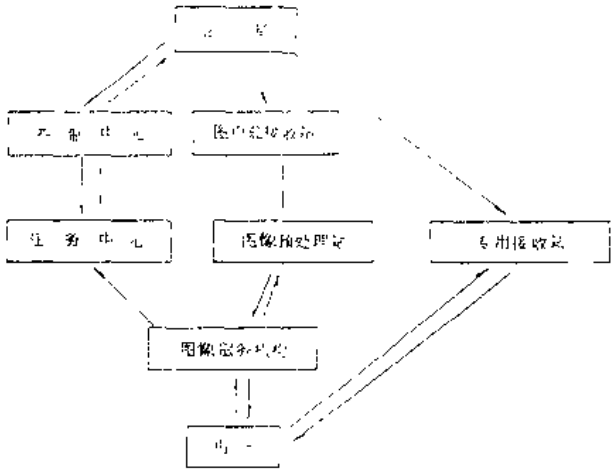


图8—9　SPOT系统各部关系示意图
(据CNES,1982)

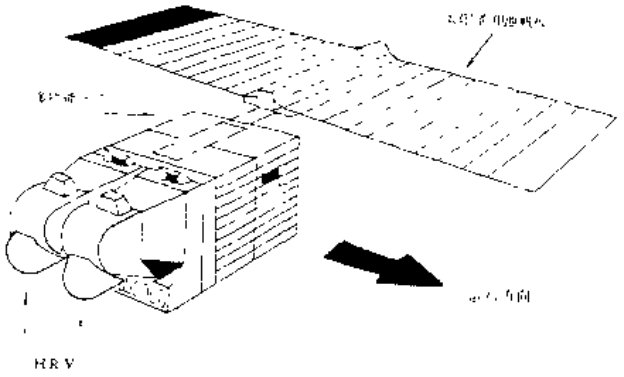


图8—10　SPOT-1卫星外形图
(据CNES,1982)

图像服务机构等等。整个系统及各部之间的关系如图8—9所示。

不断修改后的SPOT计划共发射五颗卫星，陆续发射而使资料延至2000年不间断。

SPOT-1由一开始计划1984年发射，几经推迟，终于在1986年2月22日在法属圭亚那库鲁区，用法国自己研制的阿丽安火箭发射了，SPOT-2也于1990年1月22日发射。

二、SPOT-1星体及其轨道

SPOT-1星体外形似长方形箱状，体积为$2\times2\times3.5m^3$，重1750kg，太阳能电池帆板在星体旁侧，长15.6m。星体包括两部分：多功能平台(服务舱或称仪器服务舱)和有效载荷(图8

－10)。

卫星轨道为圆形近极地太阳同步轨道。卫星轨道主要参数见表 8－23。

表 8－23　SPOT-1 轨道主要参数表

项　　目	参　　数
半轴长	7200.5km
平均高度	832km
赤道上高度	832km
降交点时间	10:30±15min
周期	101.46min
圈/天	14±5/26
轨道倾角	98.7°
赤道上轨道间距	108.1km
准回归周期	26d

卫星轨道高度和轨道面倾角是为适应太阳同步轨道的需要而选择的。由于轨道平面与太阳方向的角度是终年不变的，所以卫星总是在同一地方时经过地球特定区域的上空。

三、平台及传感器特性

多任务平台和有效载荷是卫星体的两大部分，它们的基本性能分述如下。

(一)多任务平台基本功能

(1)控制轨道精度；

(2)控制三轴姿态稳定；

(3)电源供给；

(4)辅助遥测；

(5)接收指令；

(6)检测有效载荷工作及拟定有效载荷工作计划。

(二)有效载荷基本特性

有效载荷包括像机、遥测磁带记录仪和遥测发射机。

SPOT-1 携带的是两台相同的叫“高分辨率可见光传感器”(High Resolu Tion Visible Sensor 简称 HRV)的 CCD 像机。是美国产 CCD 器件，法国自装像机。采取线阵推扫式成像。像机结构特点是可控反射镜能改变观察角，使之离开天底点进行观察(图 8－11)。

在改变观察角时，受指令控制，反射镜转动到指定的档位，对准目标工作，工作时反射镜不动。

HRV 工作波段是由可见光到近红外(0.50μm－0.89μm)。有两种记录模式：(1)全波段(黑白)模式，观察较宽的波段范围；(2)多波段的模式，观察较窄的三个波段。

HRV 主要性能见表 8－24。

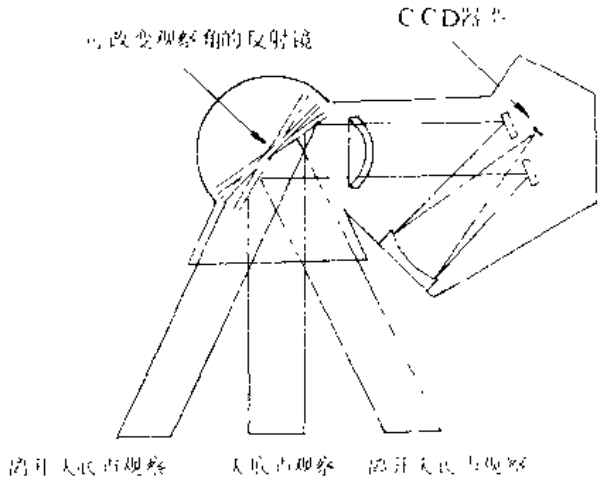


图 8—11　HRV 结构示意图

（据 CNES，1982）

表 8—24　HRV 主要性能表

模式 / 参数 / 性能	多　波　段	全　波　段
波段范围	XS1：0.5—0.59μm XS2：0.61—0.68μm XS3：0.79—0.89μm	P：0.51—0.73μm
视场角	4.13°	4.13°
垂直观察像元尺寸	20m×20m	10m×10m
线阵上像元数	3000 个	6000 个
垂直观察时像幅地面长宽	60km×60km	60km×60km
倾斜像幅地面最大宽度	80km	80km
视场可控制转动视场转角	0±45 档　计 91 档　每档 0.6°　计±27°	
视场转动地面最大控制距离	±475km　　计 950km	
光灵敏度	可探测 5%地面反射率变化	

通过上表可以看出 SPOT-1 的 HRV 比美国陆地卫星 MSS、TM 在设计上有几个独到之处：

①采用线阵式电荷耦合像机；

②几何分辨率高，全波段达 10m，多波段为 20m；

③可改变观察角。虽然准回归周期是 26 天，但可以在多个轨道上观察同一有兴趣的地区，并能形成立体像对。

但也有它的不足之处：

①在光谱上，SPOT-1 的 HRV 只有全波段和三个波段的多波段两种模式，而且限于

0.5—0.89μm 内。多波段的三个波段相当于 TM 的 2,3,4 波段,HRV 缺少蓝光波段,因此不能合成真彩色图像。与 TM 相比,缺少近红外 1.55—1.75μm,2.08—2.35μm 和热红外 10.40—12.5μm 三个波段,这样就缺少一些土壤岩石、某些矿产信息及热特性方面的信息。

②陆地卫星-4,5 号准回归周期 16 天,而 SPOT-1 准回归周期为 26 天,对地面各点年重复次数陆地卫星比斯波特卫星多 8.8 次,显然平均有效机率陆地卫星比斯波特卫星多 30%。

③由于目前 CCD 器件工艺水平,在斯波特卫星的 HRV 全波段模式的 CCD 是由 4 个线阵拼接而成,各自性能差异据说在高倍率增强处理时会在图像中出现四个色调差异带的现象,有可能在以后的斯波特产品上得到改善;

④HRV 光谱分辨率与 TM 相当,有时有效量化级别要低于 TM;

⑤单幅面积相当于 TM 图像的九分之一,对大面积成图,要增加色调均衡,调节、拼接、镶嵌等工作量;

⑥对于精度相当或小于 1:10 万比例的规范要求的大面积成图,使用 HRV 图像成本要远远高于使用 TM 图像,因为单位面积图像 HRV 价格高于 TM 图像价格。

四、视野模式

(一)过天底点视野模式

SPOT-1 重复观测周期是 26 天,计绕地球 369 圈。由于轨道倾角及地球旋转,轨道呈"S"型(图 8—12)。其覆盖模式在以往资料没有公布过,据一些资料推算编绘如图 8—14 供参考。

在轨道上,两台 HRV 垂直地面过天底进行观测,形成两个扫描带,其中心线即为轨道轨迹线,每个扫描带宽 60km,中间重叠 3km,两个扫描带共宽 117km(见图 8-13)。相邻轨道在赤道上的间距为 108km,在正常情况下,赤道上相邻轨的扫描带可有 4.3km 左右的重叠。

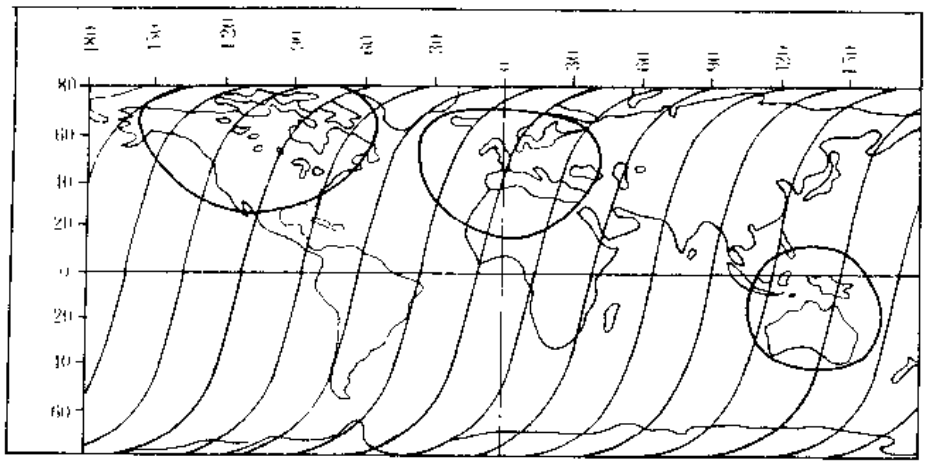


图 8—12 SPOT-1 轨道形状示意图

(据 CNES,1982)

(二)离开天底视野模式

由于 HRV 的反射镜可以在垂直于运行方向上的±27°范围内做 91 个档位角度的变化,

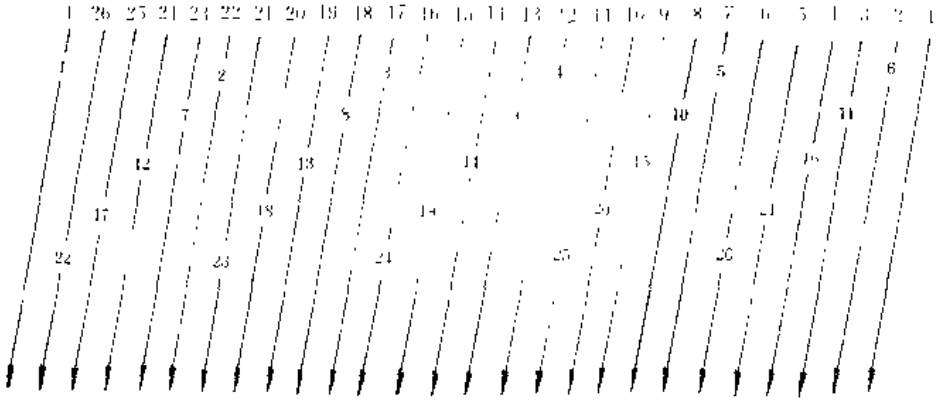


图 8—13　SPOT-1 轨道覆盖模式图

（据资料结算编绘）

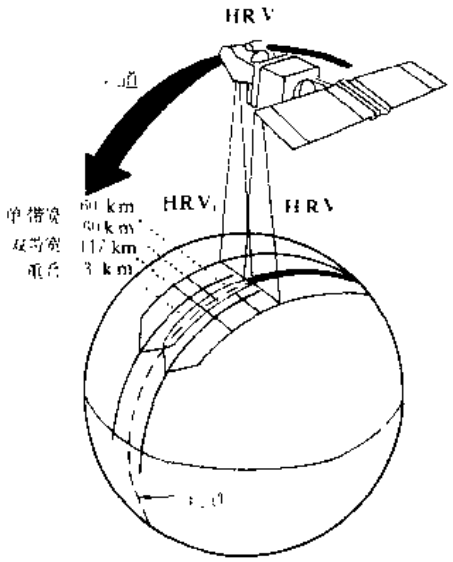


图 8—14　天底视野扫描带示意图

（据 CNES,1982）

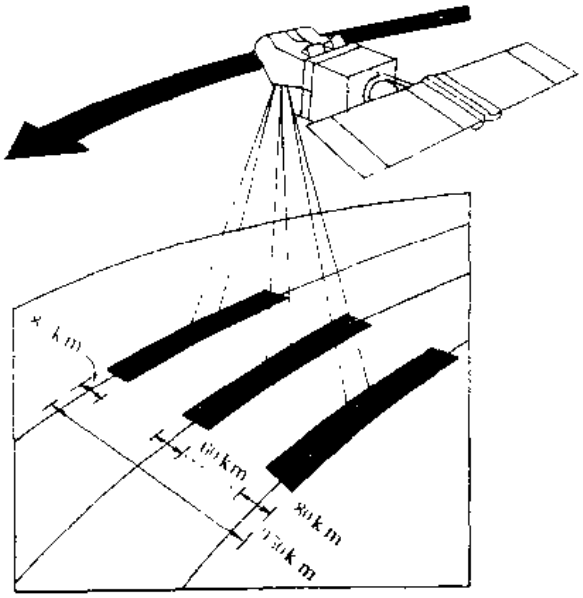


图 8—15　全部视野扫描范围示意图

（据 CNES,1982）

因而形成了 90 种与天底视野不同的角度，把观测范围扩到 950km，最边缘像幅宽达 80km（图 8—15）。

离开天底的视野在 950km 范围内不受轨道的限制，这种能力使之在地球表面某一特定区域相隔一天或数天重复获取图像及立体像对。位于赤道的特定的地面点，在一个回归周期（26 天）内能获得图像 7 次（图 8—16A，B）。在纬度 45°时可以有 11 次重复得到同一图像的机会（图 8—16B，C）。重复间隔 1—5 天，在短期内重复获得同一地区图像是很有意义的。

立体像对最理想的两张图像时间间隔是一天，并有尽可以大的基高比（B/H）。在 26 天内，赤道上有 4 次隔一天，且基高比等于 0.75；在纬度 45°时，也有 4 次隔一天，基高比近于

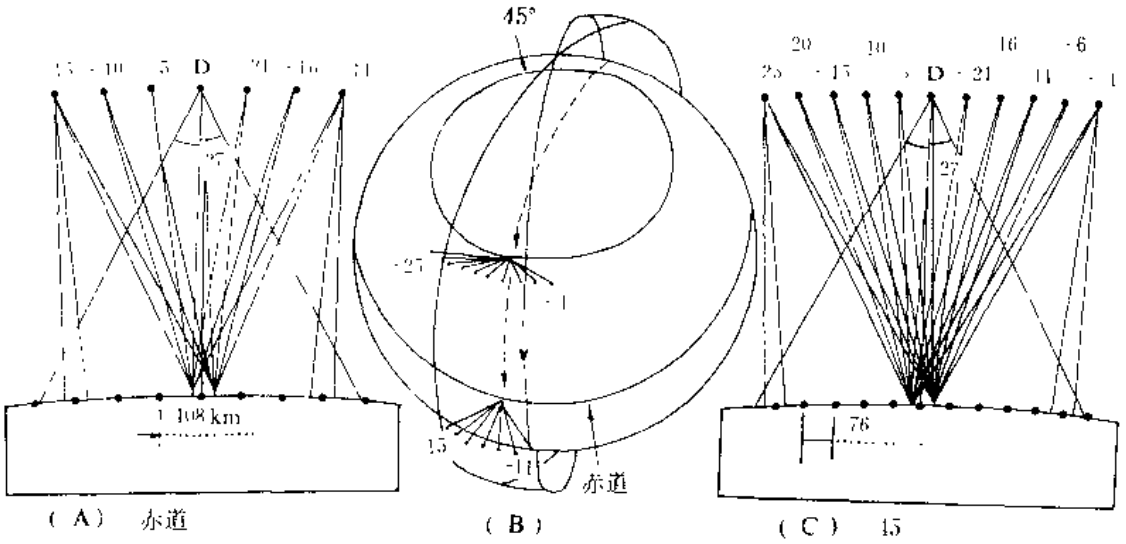


图 8—16　纬度 0°、45°时重复获得图像机率示意图

(据 CNES, 1982)

0.5；同时有连续三天三幅一组图像，第一幅和第三幅构成像对(第二幅为垂直图像)，基高比为 0.92；在纬度 60°处，相邻日期像对基高比仅为 0.3，但在 26 天内有两次机会可获得基高比为 0.66 或 1 的三幅一组图像。

五、图像主要特征

1. 垂直图像每幅为近于正方形的菱形，各边对应地面长度为 60km，倾斜图像对应地面宽度变化范围为 60—80km。

2. 在可忽略卫星仰俯变化的正常图像中，各扫描线可视为中心投影中的主纵线扫描，图像为相同投影特征扫描线的集合，即动态多主纵线中心投影集合图像。

3. 正常情况下以垂直图像覆盖全球，也可以得到倾斜图像。

4. 相邻轨道垂直图像的重叠是靠 HRV 成像覆盖宽度及与轨道间距差来实现的，在赤道重叠约 4.3km，向两极重叠大。两台 HRV 垂直成像时，两图像重叠由 HRV 间的状态和高度决定的，是 3km。

5. 不同轨道可对同一地区重复成像，可得立体像对，因而有利于摄影测量，形态地学及水文等方面的研究。

6. 几何分辨率较高，全波段为 10m，多波段为 20m。

7. 光谱特征。全波段属可见光波段，但缺少蓝光、紫光。多波段与陆地卫星 MSS4，5，7 接近，但带宽度较 MSS 为窄，与 TM2，3 波段更为接近(图 8—17)，但要比 MSS、TM 波段数少，尤其比 TM 波段数少得多。

六、图像产品

图像数据是经过预处理后提供给用户利用的。按处理质量标准分四个级别的五个等级，即 1A 级，1B 级，2 级，3 级，4 级。其中 1A 级，1B 级，2 级由法国斯波特图像公司(SPOT IMAGE)负责，3 级，4 级由法国地理研究院负责。

各等级质量分别为：

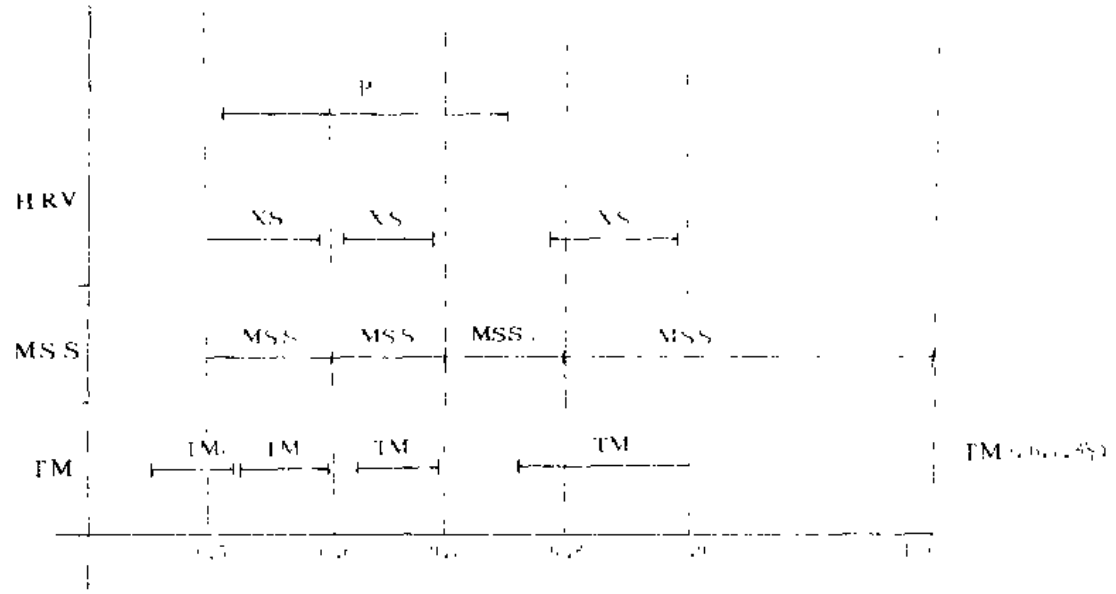


图 8--17 HRV、MSS、TM 波谱响应范围对比图

1 级预处理，是进行基本辐射测量校正，不进行或进行初步几何校正。1 级分为两等，即 1A 级和 1B 级。

1A 级不进行几何校正。辐射测量校正也只考虑对探测器灵敏度的校正，即校正每一条扫描线的 6000 个探测器之间性能差异，这一级图像不能进行立体观察。

1B 级进行初步几何校正。这一校正仅考虑地球旋转、地球曲率、卫星速度、高度变化、投影效应影响等因素。辐射测量校正是在 1A 级基础上再进行卫星运动和消除模糊的校正。这一级可以进行立体观察。

对垂直图像来说，预定经过 1 级处理必须获得如下精度：局部比例尺变化小于 1%，图像定位精度优于 2km。目前看，比预期的效果好，说明卫星运行稳定，传感器姿态控制也好。

由于同时记录，多波段三个通道像元重叠误差仅 0.3 像元，因此三个通道重叠无需校正。

2 级预处理，这一级是以一系列地面控制点对图像进行二维几何校正，不包括地势校正。

3 级处理将进一步校正，对任何角度的图像进行校正，消除视差等任何一种误差，将产生正射像片。

4 级处理是形成立体数字图像，即除去平面配准以外，还要有高度数据，得到的是(三维)地形数字模型数据，可以形成立体地形图件。

此外，图像公司还有一种产品，称为“S”，不列入上述各级处理产品，是一种各时期均可以重叠的处理的图像。

1 级、2 级和 S 级产品有 CCT 磁带、胶片和像片，据斯波特图像公司材料，从 1986 年起有如下规格产品：

1. CCT 磁带采用陆地卫星地面站规定格式

1A，1B，2 级，S 级的全波段(CCTs)和多波段(CCT)磁带都有两种规格，一种是 6250 位/英寸，一种是 1600 位/英寸。在多波段记录中 6250 位/英寸为谱段逐行交替记录，1600 位/英寸有谱段逐行交替记录和谱段顺行记录二种格式。

2. 胶片

胶片种类，比例尺和尺寸有以下几种(表 8—25)。

表 8—25　SPOT 胶片产品简表

精度级°	比例尺	胶　片　规　格
1A	1∶40 万	24cm×24cm
1B	1∶40 万	24cm×24cm
1B	1∶25 万～1∶20 万	48cm×48cm
2 级和 S 级	1∶40 万	36cm×35cm
2 级和 S 级	1∶25 万～1∶20 万	60cm×70cm

在多波段胶片中有黑白和彩色二种，同比例尺胶片尺寸一样。

3. 像片

像片有以下几种(表 8—26)：

表 8—26　SPOT 像片产品简表

精度级别	比　例　尺	像片尺寸规格
1B 级	1∶25 万—1∶20 万	48cm×48cm
	1∶12.5 万—1∶10 万	96m×96cm
2 级和 S 级	1∶25 万—1∶20 万	60cm×60cm
	1∶12.5 万—1∶10 万	120m×120cm

多波段像片有黑白和彩色二种，同比例尺像片尺寸一样。

第五节　地球资源卫星类(三)
——日本、印度地球资源卫星简介

一、日本地球资源卫星(JERS-1)

日本地球资源卫星是日本宇宙开发计划的一部分。第一颗地球资源卫星已于 1992 年 2 月 11 日升空。

卫星取圆形太阳同步准回归轨道，高度 568km，倾角 97.7°，周期 96 分钟，回归周期 44 天。卫星采用动量飞轮并三轴稳定。

卫星本体为 $1\times1.8\times3.1m^3$ 的长方体(图 8—18)。太阳电池板面积为 $8\times3.4m^2$。星体重 1410kg。

卫星有效载荷三台遥感仪器，其中可见光近红外辐射计(VNR)和短波红外辐射计(SWIR)合称光学传感器(OPS=Optical Sensor)，具有在同一轨道中的立体观测能力(表 8—27)。

表 8－27　JERS-1 所载传感器性能简表

仪器名称	波段号	观测波段	地面分辨率	精　度	视　场
VNR	1	0.52－0.60μm	18m×24m		75km
	2	0.63－0.69μm			
	3	0.76－0.80μm（立体观测）			
	4	0.76－0.80μm			
SNIR	5	1.60－1.71μm	18m×24m		75km
	6	2.01－2.12μm			
	7	2.13－2.25μm			
	8	2.27－2.40μm			
SAR		L 波段（1.275GHz）HH 极化	18m×18m	30m－2.0km（星下点）	75km

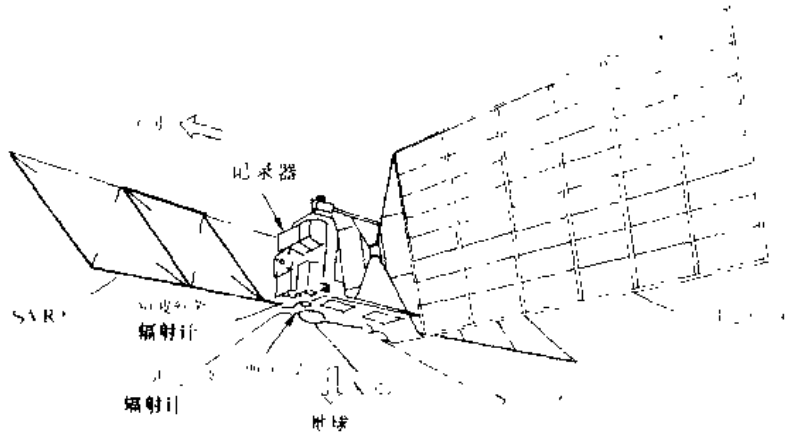


图 8－18　日本 JERS-1 卫星外形图

（据龚惠兴，1992）

VNR 称 4 个波段，实为三个波段，有二个均为 0.76－0.86μm，一是垂直观测地面，一是倾斜观测地面，二者在同一轨道中作立体观测。传感器是 4096 像元 CCD 像机。

SWIR 为 1.6－2.4μm 四波段传感器，也为 4096 像元 CCD 像机，工作温度 80K，致冷机制冷，施密特校正塞格林光学系统。

SAR 为合成孔径雷达。观测角离开天底 35°。

包括合成孔径雷达在内的三种成像设备载于同一平台，且地面分辨率基本一致，视场完全相同，同一平台立体成像是较其他系列的重大改进。合成孔径雷达在卫星中为地球资源长期使用，这是首例。

日本 1995 年以后还发射"先进地球观测卫星(ADEOS)"(图 8－18)。计划 2000 年以前共发射 2 颗。主要目的为：证实 OCTS 及 AVNIR 二台传感器的性能以接替 MOS 和 JERS 二

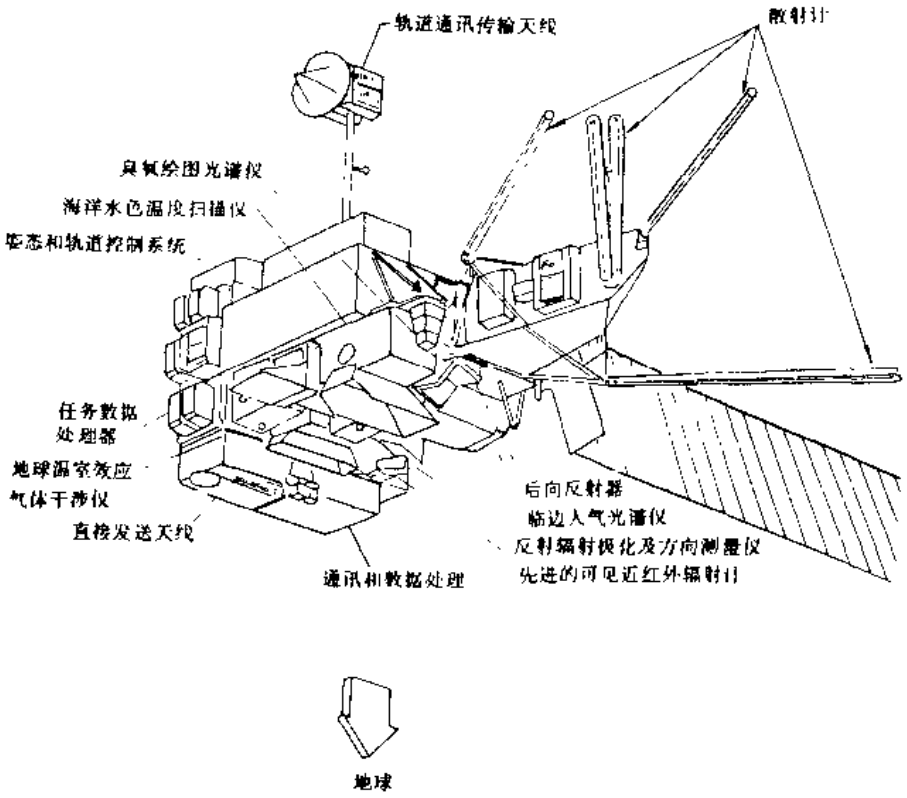


图 8－19　日本计划部的 ADEOS 卫星外形图

（据龚惠兴，1992）

颗卫星对地观测任务，促进国际合作，研究未来平台技术。

卫星本体特点重量大（3500kg），有效载荷多（1300kg），仪器种类多（8 种），功能较全，仪器性能好，分辨率高。核心遥感器是 OCTS 和 AVNIR。8 种仪器是：

1. 海洋水色和温度扫描仪（OCTS），11 个波段：0.402－0.442μm，0.433－0.453μm，0.480－0.500μm，0.501－0.530μm，0.555－0.575μm，0.745－0.785μm，0.845－0.880μm，3.55－3.85μm，8.25－8.75μm，10.5－11.5μm，11.5－12.5μm。瞬时视场：0.85mrad，扫描视场：±45°，对应地面宽度 1400km。探测器：SiInSb，HgGdTe。结构见图 8－20。

2. 先进的可见光近红外辐射计（AVNIR）

波段分为多波段和单波段二种。多波段分为四个波段：0.42－0.52μm，0.52－0.60μm，0.61－0.69μm，0.76－0.89μm；单波段为分 0.52－0.69μm。地面分辨率多波段为 16m，单波段为 8m。CCD 像机，其光学结构及定向镜结构见图 8－21。

3. NSCAT 辐射仪用于测量全球海面风场。

4. 臭氧绘图光谱仪（TOMS）用于测量 O_3 和 SO_2，大气吸收及大气中 O_3、SO_2 的总量。

5. 地球反射辐射极化及方向性测量仪（POLDER）用于测量大气反射辐射的极化及方向性。传感器为 CCD 面阵器件。

6. 地球温室效应气体干涉监测仪（IMG），主要用于监测 CO_2、CH_4、NO_2 及其它温室效应气体。

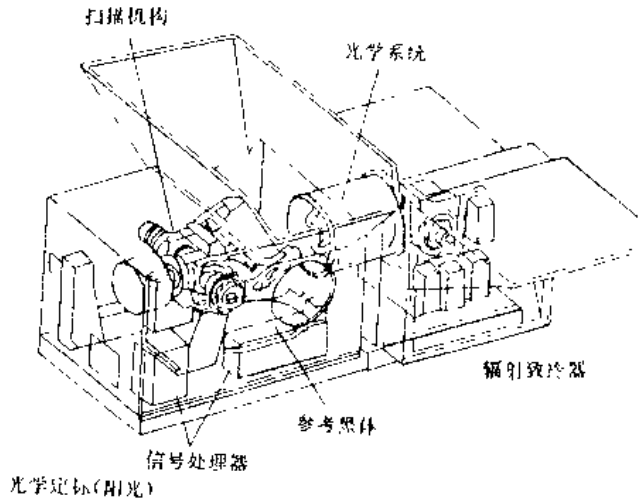


图 8—20 OCTS 结构示意图
(据龚惠兴,1992)

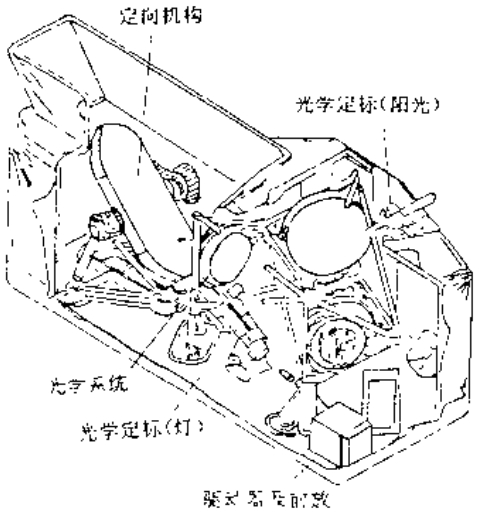


图 8—21 AVNIR 的光学系统和定向镜的结构示意图
(据龚惠兴,1992)

7. 改进的临边大气光谱仪(ILAS)主要用于测量太阳升起、落山时以太阳为背景的地球边缘大气透射、辐射光谱。

8. 后向反射器(RIS),主要用于大气 O_3,O_2 及氟碳化合物等。

从上述可以看出,日本发展遥感事业的计划起点高,规模大,范围广,预计很快能赶上一些起步早的国家。

二、印度遥感卫星(IRS-1A)

印度遥感卫星 IRS 1A 是于 1987 年 3 月 17 日发射成功的一颗地球资源卫星。

卫星运行轨道为圆形近极地太阳同步轨道,高度 904km,倾角 99.049°,偏心率 0.004,周期 103.19266 分,回归周期 22 天,每日运行 14 圈,降交点时间为上午 10:25。

星体三轴稳定,重 975kg,太阳能电池板 8.5m²,携带二种成像传感器:LISS-1,LISS-2,二者均为 CCD 像机。

LISS-1 为四个独立镜头,形成 4 个波段:0.45—0.52μm,0.52—0.59μm,0.62—0.68μm,0.77—0.86μm。焦距 162.2mm,视场角 9.4°,瞬时视场 80mrad,每行 2048 个像元,覆盖地面宽度 148km,地面几何分辨率为 72.5m,灰阶 128 个。

LISS-2 为二台各四个独立镜头的同样的传感器,称 LISS-2A 和 LISS-2B。每个传感器镜头均为焦距 324.4mm,视场角 4.7°,瞬时视场 40mrad,2048 像元,覆盖地面宽度 74km,地面几何分辨率为 36×25m,灰阶 128 个。LISS-2A 和 LISS-2B 排列与 SPOT 的 HRV 相似,二台并排对地观测,各扫 74km,中间重叠 3km,组合覆盖宽度 145km。波段与 LISS-1 相同。

传感器经过地面校准,并有星上校准和若干地面试验区的光谱测量数据,以保证卫星实际数据的辐射校正。

发射后几个月进行质量评价,认为与美国陆地卫星图像质量相当。

第六节　海洋卫星类

从60年代气象卫星系列陆续上天后，除了获得大量气象、气候学信息外，还同时提供了大量海洋信息，特别是海面温度、海流运动、海冰、海水混浊度等信息。这引起了海洋学界的极大兴趣，海洋遥感便逐步发展起来，并被普遍认为它对海洋学研究是卓有成效的，从而促进了海洋卫星的发展。海洋卫星主要用于海洋温度场；海流位置、海流界线、流向、流速；海浪周期、速度、波高；水团温度、盐度、颜色、叶绿素含量；海冰类型、密集度、数量、范围以及水下信息、海洋环境、海洋净化等。

一、美国海洋卫星

1978年6月26日，美国发射了第一颗海洋Seasat-1。这颗实验卫星因电源系统发生故障仅工作了105天。为近极地太阳同步近圆形轨道。轨道高度790km，轨道倾角108°。卫星能覆盖全球95%的地区，即南北纬72°之间地区。每绕地球一圈约需100分钟。一次扫描覆盖海面宽度为1900km。卫星上载有5种传感器，其中3个为成像传感器。

1. 合成孔径侧视雷达(SAR-A)

工作频率为1.27GHZ，相当于21mm波长(L波段)。极化方式为HH。空间分辨率达25m，扫描宽度100km。图像很好，可以获取海面波浪的波长、波向、表面风速以及大规模海洋地形、海洋动力学方面的资料，可用于海岸带和海冰等相对静止目标的监测与制图，也可用于测定海面结构(波长、重力波、风场)测定船位、航向、航速等，以及观测大、中尺度的海洋动力现象(洋流、涡流、内波等)。同时还能获得少量陆地图像，对线性形迹、地面粗糙度等提供重要情报。

2. 多通道扫描辐射计(SNMR)

为一种被动式成像微波遥感仪器。共有5个通道，其中毫米波段1个(波长8.11mm)，厘米波段4个(波长分别为1.43，1.67，2.81，4.54cm)。空间分辨率为22—100km，扫描带宽度600km，辐射分辨达零点几摄氏度。在有云条件下，测温精度为±2K，测风精度为±2m/s。根据测量天线的亮度温度可以测定接收辐射的数量，并通过对比分析获得海面温度、海面风速、冰况、泡沫区范围以及大气水汽量。

3. 可见光—红外辐射计(VIR)

可获取可见光和红外影像，以识别云、主要水团以及陆上特征。其可见光波长0.52—0.73μm，穿透力强；热红外波段波长为10.5—12.5μm，测海面、海水温度及温度梯度。空间分辨率2—5km，扫描宽度1900km。

Seasat-1开创了海洋遥感-微波遥感的新阶段，为观察海况，研究海面形态，海面温度、海面风场、海冰、大气含水量等开辟了新途径。同时在军事、科研、经济等方面具有重大意义，因而由美国国家宇航局(NASA)、国家海洋大气局(NOAA)、美国海军共同提出一个带有研究探索性质的实用性业务计划——国家海洋卫星系统。将发射一些新型海洋卫星如海军海洋遥感卫星(NROSS)、海洋拓扑实验卫星(TOPEX)、海洋水色成像仪卫星(OCI)等同步观测海洋的专用卫星。其传感器均在Seasat基础上有所提高，如海岸带水色扫描仪(CZCS/2)有9个通道；大天线多通道微波辐射计(LAMMR)天线直径4m，波段增至7个；雷达散射计(SCATT)，雷达高度计两个；地面分辨率10km的可见光—红外仪器。这些计划携带的遥感

仪器将为天气预报、气候研究、海冰、海浪、海风、海温、海面起伏、叶绿素含量等方面的研究以及海洋声传播预报提供近实时资料。

二、日本海洋观测卫星(MOS-1)

(一)概况

日本的海洋观测卫星已于1987年2月19日在种子岛宇宙中心发射,顺利地进入极轨道。被宇宙开发事业团命名为"桃花一号"(MOMO-1)。2月23日,宇宙开发事业团地球观测中心首次接受到了该星发回的良好的图像资料,25日公开发表了利用可见光近红外辐射计观测的长崎县大树湾地区图像,东西长40km,南北长36km,图像上能分辨出长崎机场的跑道和大村市街道,并能清楚地看到连接长崎机场和大村市的宽7.5m的桥梁。

1990年2月7日又成功地发射了第二颗(MOS-1B)入轨后命名为"桃花-1B"(MOMO-1B)。

MOS-1任务如下:

(1)确立地球观测卫星的基本技术;

(2)确认可见光近红外辐射计和可见光热红外辐计及微波辐射计的功能和性能,并以海洋为中心进行实验性全面观测地球;

(3)资料收集系统的基础实验;

(4)掌握太阳同步轨道的发射技术;

(5)掌握太阳同步极轨道的跟踪控制技术;

(6)掌握地球观测卫星运行技术。

MOS-1星体为箱形,分为观测任务模块部分和公共部分,有三片可叠式太阳能电池帆板(图8—22)。星体三轴稳定,动量飞轮控制,预计寿命2年。

MOS-1为太阳同步准回归轨道,轨道参数如表8—28。

表8—28 MOS-1轨道基本参数

项　目	数　据
轨道高度	907.8km
轨道长半径	7286.9km
轨道倾角	99.1°
偏心率	<0.004
周期	6190.5s
准回归周期	17(d)
每个回归周期的圈数	237
每天圈数	14—1/17
过降交点时间	10：05
相邻轨道赤道处间距	157km

卫星携带三种传感器:多波段电子自扫描辐射计(MESSR)、可见光—热红外辐射计、微波辐计(MSR)。

轨道覆盖模式与陆地卫星1号覆盖模式相似。

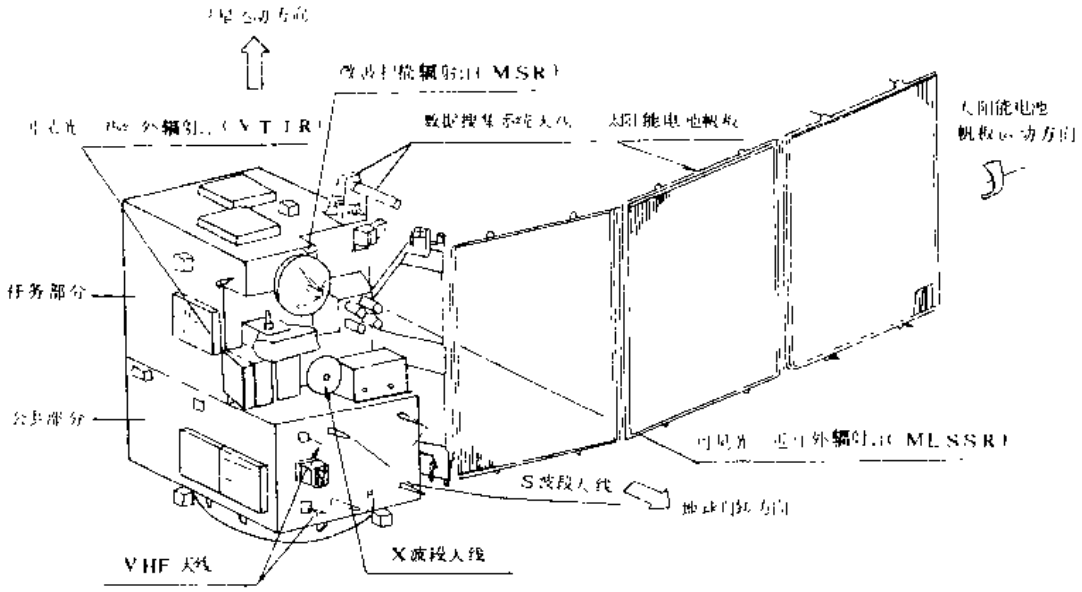


图 8—22　日本 MOS-1 卫星外形图

（据日本宇宙开发事业团，1987）

（二）传感器的性能

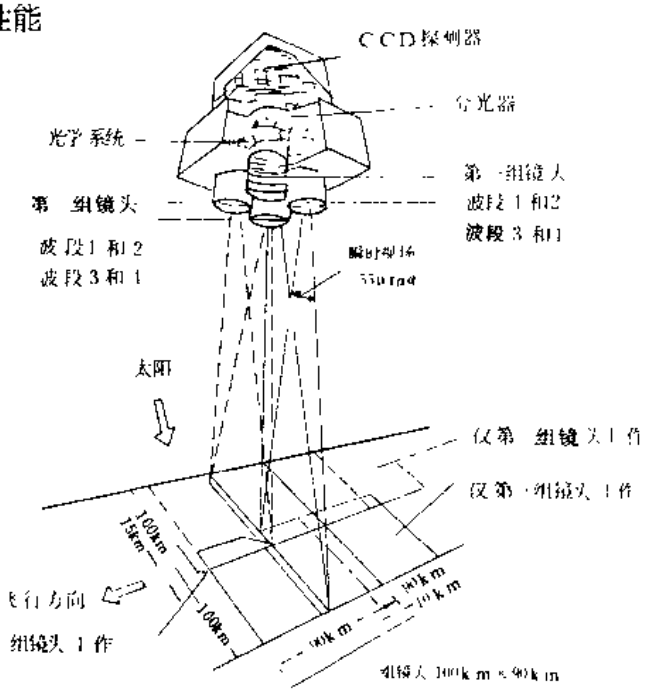


图 8—23　MESSR 图像地面覆盖示意图

（据日本宇宙开发事业团，1987）

1. 多波段电子自扫描辐射计(MESSR)

多波段电子自扫描辐射计(日本人称“电子扫描可见光红外辐射计”，所用英文名为 Multispectral Electronic Self Scanning Radiometer，缩写为 MERRS)，是一种 CCD 像机，由两台平行轨道的像机组成。每台像机包含二套光学器件，一个可见光范围，一个在近红外波段。每

台像机地面扫描宽度100km，两台并用时重叠15km，其地面扫描宽度为185km，每台像机由2048位CCD器件构成，对应地面分辨率为50m。能在图像中观察到7.5m宽的桥，显然是因为与背景亮度差很大和呈线性特征的原因。MESSR特性见表8—29。二组镜头可以独立工作也可同时联合工作，其图像覆盖情况如图8—23。

MOS-1B的MESSR与MOS-1相比的不同之处是CCD器件改为4096像元，这样就不存在二块2048像元的图像拼接重叠。扫描地面宽度为200km。整套设备均由NEC公司制造。

表8—29 MESSR特性表

项目		参数
波段	1	0.51—0.59μm
	2	0.61—0.69μm
	3	0.73—0.80μm
	4	0.80—1.1μm
瞬时视场		55μrad
地面分辨率		50m
扫描周期		7.6μs
每线像元数		2048
扫描地面宽度		100km
磁带格式		与陆地卫星TM格式相同

2. 可见光—热红外辐射计(Visible and Thermal Infrared Radiometer，缩写为VTIR)。

可见光—热红外辐射计是一个转动镜式光学机械扫描仪，包括一个可见光波段，三个热红外波段。VTIR特性见表8—30。热红外是以内部黑体和深空为标准。

VTIR的用途是监测海洋水色和海洋表面温度。

表8—30 VTIR特性表

		可见光	热红外
波段长	1	0.5—0.7μm	
	2		6.0—7.0μm
	3		10.5—11.5μm
	4		11.5—1.5μm
瞬时视场角		1±0.1mrad	13±0.3mrad
地面分辨率		900m	2700m
扫描镜		15mm转动扫描镜	
转动周期		1/7.3s	
探测器		硅光二级管	碲镉汞
信噪比		>5.5db	
ΔNEP			>0.5K(300K时)
量化级		256	256
数据率		16Mbit/S	
地面扫描宽度		1500km	

3. 微波辐射计(MSR)

MSR是用来探测蒸汽、雪、冰量，具有50cm抛物面天线，作用2个波段，圆锥形扫描。主

要性能见表 8—31。

表 8—31　MSR 主要特性表

项　目	1	2
频率	23.8±0.2GHz	31.4±0.25GHz
波束宽度	1.89°±0.19°	1.31°±0.13°
地面分辨率	32m	23m
积分时间	10 及 47ms	10 及 47ms
扫描宽度	317km	317km
天线	50cm 孔径抛物线	同前
扫描方式	圆锥式　机械	同前
扫描周期	32s	32s
量化度	1024	1024
数据率	2Kbit/S	2Kbit/S
灵敏特性	水蒸气、水滴、雪、风	水、水滴、雪、油膜
可能应用范围	水蒸气量，锋面观测(冷锋面及暖风面)雨区测量降雪测量	冰测量、气温测量、油污测量、降雪测量等

从 MOS-1 的特点来看，虽说名称是海洋观测卫星，但 MESSR 图像用于陆地遥感性能要优于美国陆地卫星的 MSS 图像。

在 MOS 卫星发射后，它的数据为 NASDA 地面站接收，而且东京大学、泰国、澳大利亚、加拿大及南极的 Showa 基地亦接收 MOS 卫星的图像数据。

三、欧洲遥感卫星一号(ERS-1)

欧洲遥感卫星(European Remote Sensing Satellite-1)是一颗新型的卫星。从其携带的传感器种类和其用途来看是一颗海洋卫星，陆地资源方面不是其主要目的。

ERS-1 主要用于海洋学、冰川学、海冰制图、海洋污染监测、船只定位、导航、水准面测量、海洋岩石圈的地球物理及地球固体潮、土地利用制图等领域。

卫星总体立足于法国 SPOT 卫星现有技术，并有所发展。卫星为圆形近极地太阳同步轨道，高度 675km，高度和轨道三轴稳定，偏航控制星下点照准和滚动任选。寿命 3 年。总重 2400kg，总长 11.8m，太阳能电池帆板 11.7×2.4m²，合成孔径雷达天线 10×1m²，散射计天线三个，前后向 3.6×0.25m²，中间方向 2.3×0.35m²，雷达测高仪天线直径 1.2m。

卫星携带 7 种仪器：①有源微波仪；②测风散射计；③雷达测高仪；④轨道跟踪扫描辐射计和微波探测器；⑤精密测距测速仪；⑥激光反射器；⑦星载处理系统。其中有源微波仪(AMI)综合了合成孔径雷达、波浪散射计和风散射计的功能。合成孔径雷达有两种工作模式：合成孔径侧视雷达成像模式(SARIM)和合成孔径雷达波束模式(SARWM)。前者以 10m 天线平行轨一侧扫描，带宽 100km。间隔工作，每次不超过 10 分钟。星上不存储数据，形成图像只能在地面站接收范围内获得。VV 极化，地面几何分辨率 30m。后者以约 200km 的间距、抽样扫描，每次形成 5km×5km 的图像。这样可以有较低的数据率，因此能够在星上储存，也可以在星上范围内提供 10km×5km 的图像。

由于该卫星载有多种新仪器，尤其是 AMI，它的工作将对海洋大气、环境等领域有着重

要的意义。

四、加拿大雷达卫星(Radarsat)

加拿大雷达卫星是加拿大第一颗遥感卫星。是由加拿大总策画，设计制造SAR；美国提供散射计和AVHRR及发射服务；购买德国多线性阵列多光谱扫描传感器；英国建造卫星本体；最后由加拿大总装、试验完成的。预定1994年发射，设计寿命5年，接受维修和添加燃料后，寿命可延至10年。卫星工作目的是为农业、能源、水文、水域、水覆盖、冰山移动、海洋信息和非再生资源等部门提供服务。

主要传感器是合成孔径雷达、散射计、多光谱扫描仪和先进的甚高分辨率辐射计等四台仪器。从工作任务和设备上可以看出主要是为获取海洋信息，其次是资源、农业。因此暂时归入海洋卫星类中。由它和日本将要发射的先进地球卫星(ADEOS)是一种海洋—地球资源综合用途的卫星，代表着新的一种发展动向。

加拿大雷达卫星拟采用圆形近极地太阳同步轨道，高度792km，倾角98.6°，周期100.7分钟，准回归周期24天。

携带成像传感器主要性能：

1. 合成孔径雷达(SAR)是一套多波束合成孔径雷达，基本能见表8—32。从左侧扫描地面，有五种工作模式：

①标准模式：每一波束照射带宽100km，七付波束重叠，总照射带宽500km，分辨率28m×25m；

②宽照射带波束模式：每波束宽150km，两付波束不重叠，总照射带宽300km，分辨率28m×25m；

③高分辨力模式：五付波束，每付波束照射45km，极少重叠，总照射带宽200km，分辨率9m×10m；

④低分辨力扫描SAR模式：有两种扫描方式：照射带宽300km扫描，分辨率30m×35m；照射带宽500km扫描，分辨率55m×32m；

⑤试验波束模式：在500km照射带宽外再加300km照射，分辨率28m×31m。

表8—32　加拿大雷达卫星SAR基本参数简表

项　　目	参　　数
工作频率	5.3GHz
射频带宽	11.6MHz，17.3MHz，30MHz
采样率	12.9MHz，18.5MHz，32.3MHz
脉冲宽度	42μs
脉冲重复频率	1270—1390
雷达平均数据率	73.9—100Mbps
采样比特数	4Bit/Q通道
极化方式	HH
入射角	20°—45°可变

2. 多光谱扫描仪(MSS)是由多线性阵列式传感器组成有4个工作波段(0.45μm—0.50μm，0.52μm—0.59μm，0.62μm—0.68μm，0.84μm—0.88μm)地面覆盖宽度为417km，

地面分辨率 30m。

3. 先进甚高分辨力辐射计(AVHRR)有 5 个工作波段(0. 58μm—0. 68μm, 0. 725μm—1. 1μm, 3. 55μm—3. 93μm, 10. 3μm—11. 30μm, 11. 5μm—12. 5μm),覆盖地面宽度 300km,分辨率 1300m。

携带的非成像传感器有散射计。用于测量海洋表面风速、风向。测量风带精度约±10%,风向精度 20°,向卫星两侧各覆盖宽度 600km。

除掉以上介绍的卫星外,原苏联的"宇宙 243"、"宇宙 1076"、"宇宙 1151"、"国际宇宙 20"、"国际宇宙 21"都是用于海洋观测的卫星。

第七节　美国航天飞机及其重要遥感试验系统

美国"创业号"航天飞机的试飞成功,揭开了航天史上新的一页。在以后航天飞机的飞行中多次进行过对地遥感系统的试验。

1986 年 1 月 20 日美国航天飞机"挑战者号"爆炸成为世界一大新闻,这一事件为世人所关注,可是一般人并不知道或不注意"挑战者号"也为遥感做出过贡献。

航天飞机是一种机动性很强的航天器。但在遥感飞行中其轨道与一般地球卫星轨道相同。

以 1984 年 10 月挑战者号飞行为例。轨道倾角近 60°(图 8—31),周期约 90 分钟。航天飞机轨道高度是可变的,不同圈过同一地面点高度可不同,不同点高度也可不同。那次飞行,作了不同高度的试验,清楚地表明了它的机动性。

对遥感较为重要的几次飞行试验(表 8—33)。

表 8—33

日　期	型　号	传　感　器
1981 年 11 月	哥伦比亚号	SIR-A SMIRR
1983 年 11 月	哥伦比亚号	MC
1984 年 10 月	挑战者号	SIR-B,LFC
1994 年 4 月	发现号	SIR-C

一、1981 年 11 月哥伦比亚飞行遥感试验

载有五种传感器:①合成孔径雷达 SIR-A;②多光谱红外辐射计(SMIRR);③大气污染测定仪(MAPS);④海洋颜色测定仪(OCE)、⑤地形特征识别及定位试验设备(FILE)。

与成像有关的传感器是第①、②、⑤项。而第⑤项 FILE 是一种 CCD 像机,基本上是失败的,在对地遥感上取得三项重大成果:

(一)SIR A 成像面积达一千万 km^2,地面分辨率达到 35m,超过设计指标,提高了波束入射角(47°)。我国境内也有三个航带(图 8—25)。

(二)获得了揭示撒哈拉沙漠地区砂砾层底下的地质特征,发现东撒哈拉沙漠下面的古河道,证明对研究干旱区地下资源和地质构造的潜力,并为今后分析卫星轨道雷达图像奠定了基础。

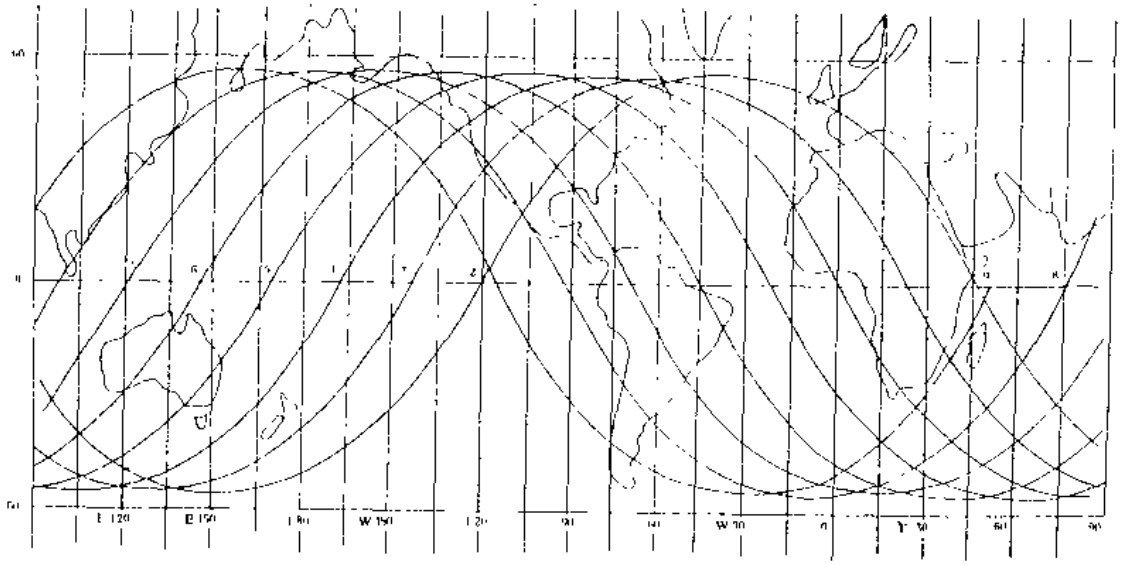


图 8—24　美国航天飞机挑战者号 84 年 10 月飞行 1—9 圈轨道轨迹示意图

(据 NOAA,1984)

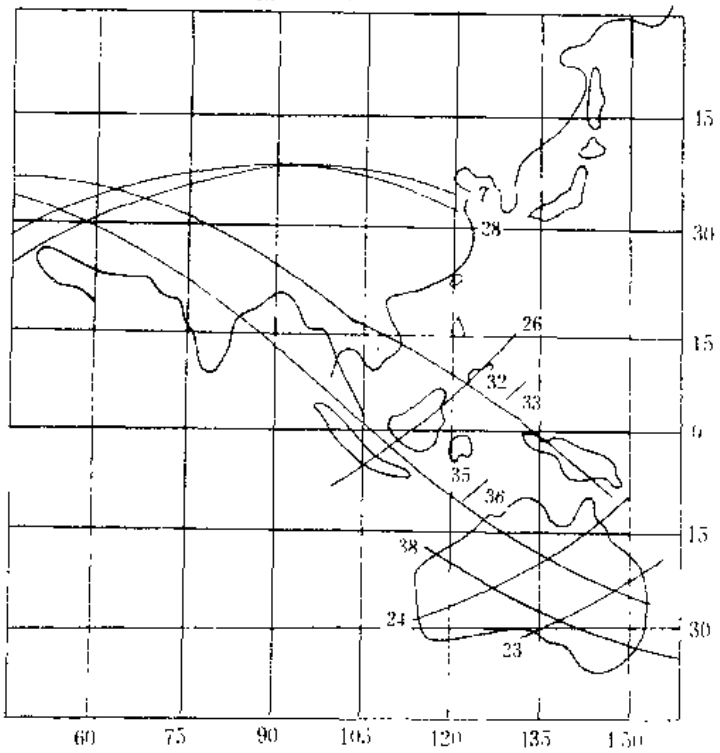


图 8—25　哥伦比亚航天飞机 1981 年 11 月飞行 STR-A 试验中国附近航带

(据 NOAA,1982)

(三)第②项是多光谱红外辐射计,工作 186 分钟,有 70 分钟在无云条件下工作,其中第 16 圈得到了埃及东南部与实验室作的土壤、岩石标本波谱数据一致的数据资料,从而证明用这种仪器(SMIRR)从空间获得 2.0—2.4μm 波段辐射数据,可以直接区分碳酸盐和粘土矿。

二、1983 年 11 月哥伦比亚号飞行与欧洲太空实验室

这次飞行成功主要是载了欧洲太空实验室。欧洲太空实验室的计划始于1973年，由奥地利、比利时、丹麦、法国、西德、西班牙等11国参加的欧洲空间局决定研制，10国和49个公司参与设计制造，耗资17亿美元以上，共70多项空中研究项目，其结果是成功的。最初持怀疑态度的美国也改变了想法，决定购买"太空实验室2号"。

"欧洲太空实验室"原计划1980年7月发射，由于航天飞机推迟飞行和美国的怀疑态度而推迟安排，到1983年11月航天飞机第9次飞行时才发射。

"欧洲太空实验室"全部飞行过程是在航天飞机的机舱中，人们称它是"没有翅膀的鸟"，因此其轨道与航天飞机低轨是一致的，可以说美国航天飞机系列的一部分，也可以说是欧美合作的产物。

这次飞行轨道基本参数：高度250km，倾角57°，周期90分钟，速度7.55km/s，仅在N38°以南，S40°以北范围进行摄影及扫描。

这个实验室与以往所有空间实验室相比，有自己的优点：

1. 可使用多次，设计寿命为十年，预计可飞行50次；

2. 乘员多(6人)；

3. 可连续24小时工作；

4. 能提供有利的生活和工作环境，使得身体健康的科学家可以在实验室可靠地工作和生活。对身体要求不象以往挑选宇航员那样严格；

5. 实验项目多(70余项)，范围广。

在实验的70多个项目中涉及八个科学领域：

①宇宙医学；　②宇宙生物学；　③天文学；

④太阳物理；　⑤等离子物理；　⑥大气物理；

⑦空间加工；　⑧地球观测。

这个实验室是积木式，由两节密封舱和一节"U"形托盘组成，它们全部固定在航天飞机的货舱里。每节密封舱长2.7m，直径4.1m，内部可利用空间为22m³；托盘长3m，宽4m，高2.2m。根据需要可以有13种"积木式组合"方式。

用于地球观测的高分辨率的照像机—蔡司RMKA 30/23航摄机(MC)性能如下：

镜头焦距：305mm

快　门：1/100秒，1/250秒，1/500秒，1/1000秒

光　圈：f/56，f/8，f/11

胶片分辨率：40线对/mm

地面几何分辨率：10m

地面覆盖面积：188×188km²

片　种：黑白片、彩色红外片

像片几何特点与其他摄影无异，在我国西部摄有少量照片，质量比MSS、TM好。

三、1984年10月挑战者号飞行的遥感试验

有两种成像传感器得到较好的效果，即B型合成孔径雷达(SIR-B)和大幅像机(LFC)。

(一)合成孔径雷达(SIR-B)

雷达试验16小时，完成50%的任务。其中8小时图像记录在机中光学记录器上，8小时图像用数据方式发回地面。虽只完成任务的一半，成绩仍是可观的。工作覆盖面积约4千万

km^2。SIR-B 性能与海洋卫星 SIR 及 SIR-A 比较，有明显改善(表 8—34)。

表 8—34　SIR-A　SIR-B 性能与海洋卫星 SIR 性能比较

参　数	SEASAT-SIR	SIR-A	SIR B
H(轨道高度)	800km	260km	352;274;225km
U(频率)	1.28GHz	1.28GHz	1.28GHz
S(极化)	HH	HH	HH
F(覆盖宽)	100km	50km	20—50km
ω(视角)	20°	47°	15°—60°
D(天线尺寸)	10.7×2.16m²	9.4×2.16m²	10.7×2.16m²
η(带宽)	19MHz	6MHz	12MHz
ΔD(方位分辨率)	25m	40m	14—46m
ΔR(距离分辨率)	25m	40m	20—30m
处理方式	数　字	光　学	光学、数字

SIR-B 的特点：

①可变视角共有 6 个档次(图 8—26)；

②可变发射方向；

③高分辨率；

④带宽增加，SIR-B 带宽 12MHz，SIR-A 带宽仅 6MHz；

⑤天线面积加大，SIR-B 为 10.7×2.16m²，SIR-A 为 9.4×2.16m²；

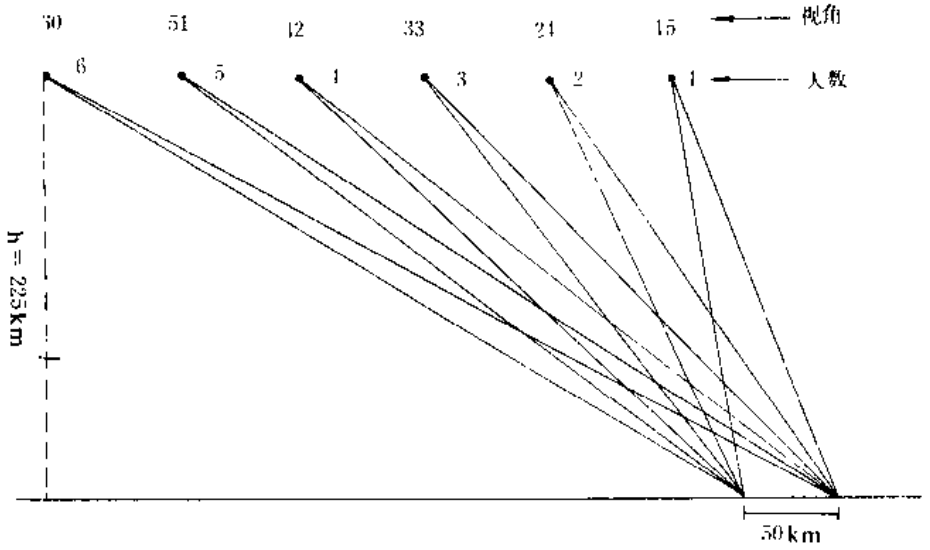


图 8—26　SIR-B 多视角对同一地区成像示意图

(据 NOAA，1984)

⑥SIR-B 为两种记录方式，即有光学记录也有磁带数字记录。

2. 大像幅像机(LFC)

大像幅像机是在 1984 年 10 月航天飞机第 41-G 飞行任务完成试验，所摄的全部底片已

经移交给美国地质勘测所 EROS 数据中心。

这次航天飞行 8 天，取得 2140 张照片，覆盖了北半球绝大部分试验地区。尤其是欧、美两个主要 LFC 试验区，完成计划面积的 80%—90%，有关科学家对此试验甚为满意，我们看到这些片也是非常振奋，令人感兴趣。

像机是航摄仪改制而成，其基本参数如下：

镜头焦距：305mm

镜头孔径：f/6.0

像幅尺寸：27.9cm×15.7cm

航向重叠：10%—80%

基高比：0.3—1.2

飞行高度：在 1—22 圈　370km　使用 8 圈

在 23—36 圈　272km　使用 12 圈

在 37—128 圈　239km　使用 59 圈

共计用 79 圈。

从 237km 高点测量地面范围：179×356km²

原始底片比例尺：1：773022

使用四种底片：黑白(二种)，彩色，彩红外

图像特征：

①是画幅式，长宽比为 2：1；

②中心投影，由于高度大，所以很接近于正投影，校正方便；

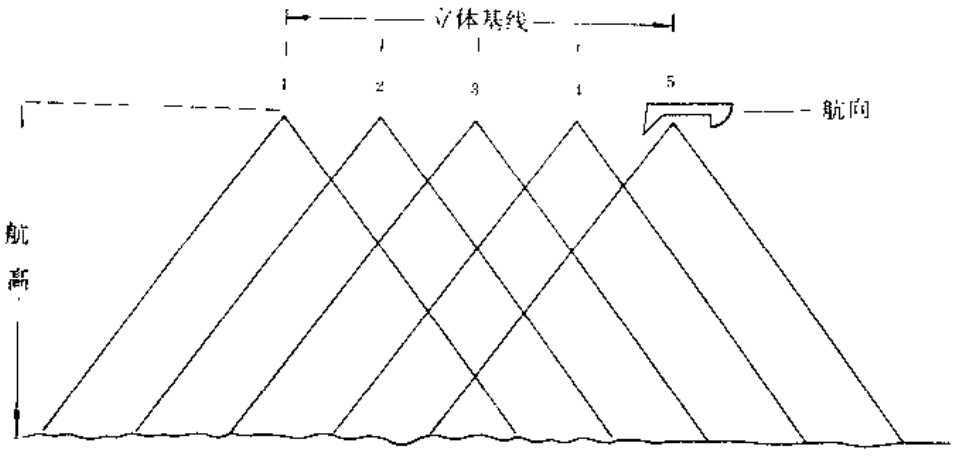


图 8—27　LFC 相片重叠格式

(据 NOAA，1984)

③航向重叠率高，基高比大，经校正后可以进行立体观察(图 8—27)；

④解像力很高：黑白片 200—300 线对/mm，彩色片 100 线对/mm，因此可放大 15 倍以上而保持清晰的图像；

⑤光谱特性：Ⅰ．可摄影波段；Ⅱ．片种全。

试用情况：

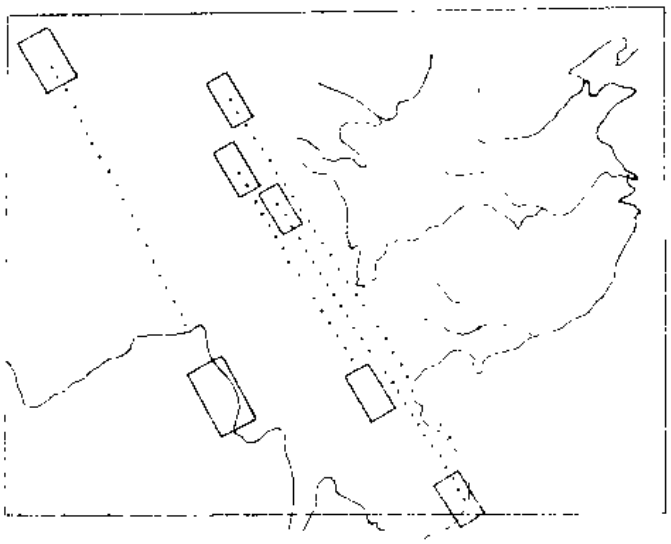


图 8－28　挑战者号 1984 年 10 月飞行携带 LFC 在中国西部附近航带示意图

(据 NOAA,1984)

Ⅰ. 可成地形图,比例尺到 1∶5 万。我国已试用其做珠穆朗玛峰区地形图。

Ⅱ. 可完成 1∶5 万专题调查。我国已有用其做 1∶5 万土地利用等方面调查,效果较好。

五、1994 年 4 月发现号航天飞机飞行的遥感试验

此次飞行主要的遥感试验是合成孔径雷达 SIR－C。这是最新的一代星载合成孔径雷达,具称其特点是:①多波段(同时可在 L、C、X 波段工作);②多极化(前二个波段有 HH、VV、HV、VH 四种极化方式,X 波段为垂直极化);③分辨率高(距离分辨率有两种:15m 和 7.5m);④实时传输,磁带记录。在我国上空有工作航带,我国配合有机载合成孔径雷达飞行。

主要参考文献

1. 陈述彭，1990，遥感大辞典，科学出版社。
2. 陈述彭等，1990，遥感地学分析，测绘出版社。
3. 菲利普 N. 斯莱特等，陈宁锵等译，刘益司等校，遥感手册第二分册， 国防工业出版社。
4. 菲利普 N 斯莱特等，陈宁锵等译，1982，遥感手册第三分册， 国防工业出版社。
5. 奥尔登. P. 科尔洁科雷塞斯等，汪一飞等译，1980，遥感手册第四分册， 国防工业出版社。
6. 马蔼乃，1981，遥感概论，科学出版社。
7. 卡农公司图像研究室，1983，遥感，科学出版社。
8. F. F 萨宾，1980，遥感原理和判释，北京大学。
9. 母国光等，1987，光学，人民教育出版社。
10. 赵凯华、陈熙谋，1984，电磁学，高等教育出版社。
11. 王为民，1980，电磁场理论，华中工学院。
12. 吕斯骅，1981，遥感物理基础，商务印书馆。
13. 孙星和，1990，宇航遥感物理基础，地震出版社。
14. 付献彩等，1993，物理化学(下)，高等教育出版社。
15. K. I 雅各布森、R. E 雅各布森，石俊英等译，1983，成像过程的机理和应用，化学工业出版社。
16. 菊池真一，丁一译，1983，照相化学，科学出版社。
17. 王为民，1993，近代物理，吉林教育出版社。
18. 俞浩清，1985，摄影与空中摄影学，测绘出版社。
19. 贺修桂等，1983，摄影手册，中国摄影出版社。
20. A. B 克利克苏诺夫，俞福堂等译，1986，红外技术原理手册，国防工业出版社。
21. J. M. 劳埃德，尹白云、臧传衡译校，1981，热成像系统，国防工业出版社。
22. 卢国铭、姜遵富、方水绥，1984，遥感技术基础，科学出版社。
23. 濮静娟，1992，遥感图像目视解译原理与方法，中国科学技术出版社。
24. 潘宗福等，1993，摄像机、录像机的使用与维护，新时代出版社。
25. 孙景鳌，1988，电视摄像机与视频处理，电子工业出版社。
26. 段玉平，1988，摄像机、录像机原理、配接、维修，中国广播电视出版社。
27. 潘时祥，1990，像片判绘，解放军出版社。
28. Dr. K. W. Wong, E. V. Gamble, R. E. Riggins, 1973, Photogrammetric Engineering, Vol 39 No. 7/8 1973
29. S. 温德罗斯等，舒宁荣译，1990，地球资源的多光谱摄影术，地质出版社。
30. Y. Talmi, 1981，电视型多道检测器，分析化学译文集，地质出版社。
31. 王以铭，1987，电荷耦合器件原理与应用，科学出版社。
32. 上海半导体器件所，1975，国外电荷耦合器件，上海科技情报所。
33. 国防电子工程编辑部，1984，现代电子学，科学出版社。
34. 孟 侃，1982，微波遥感，华中工学院出版社。
35. 杨士中，1981，合成孔径雷达，国防工业出版社。
36. 魏文元等，1985，天线原理，国防工业出版社。
37. F. T. 乌拉比等，侯世昌等译，1988，微波遥感，科学出版社。
38. 王长耀，1985，空间遥感图像的分析应用，国际工业出版社。
39. 龚惠兴，1982，日本的对地观测卫星遥感技术与应用。
40. 朱启疆，1985，第四/五号陆地卫星及其技术进展，遥感地质。
41. 彭望禄，1991，遥感数据的计算机处理与地理信息系统，北京师范大学出版社。
42. 杨凯、卢健、林开愚、蓝云超、孙家柄等，1988，遥感图像处理原理和方法，测绘出版社。

43. 美国地质调查局、美国大气海洋局，1987，陆地卫星 4/5 号用户手册，科学出版社。
44. NOAA，1983，Landsat Data Users Notes.
45. NOAA，1983，Landsat DataUsers Notes .
46. D. L. Williams，1983，陆地卫星 D 数据获取及其应用计划，遥感技术论文集。
47. 赵华昌、华润葵，浅谈 TM 信息的应用，遥感信息，1986，NO. 3。
48. CNES，1982，SPOT Satellite--based Remote Sensing System
49. R. ROSSO，1983，SPOT 遥感卫星图像几何质量的评价，遥感技术论文集， 测绘出版社。
50. 日本宇宙开发事业团地球观测中心，1987，地球观测数据利用手册，遥感技术中心。
51. 张志强，一门新兴边缘学科——卫星海洋学，遥感技术与应用，1993，NO. 2。
52. 彭以祺译，欧洲遥感卫星一号，遥感技术动态，1983，NO. 4。