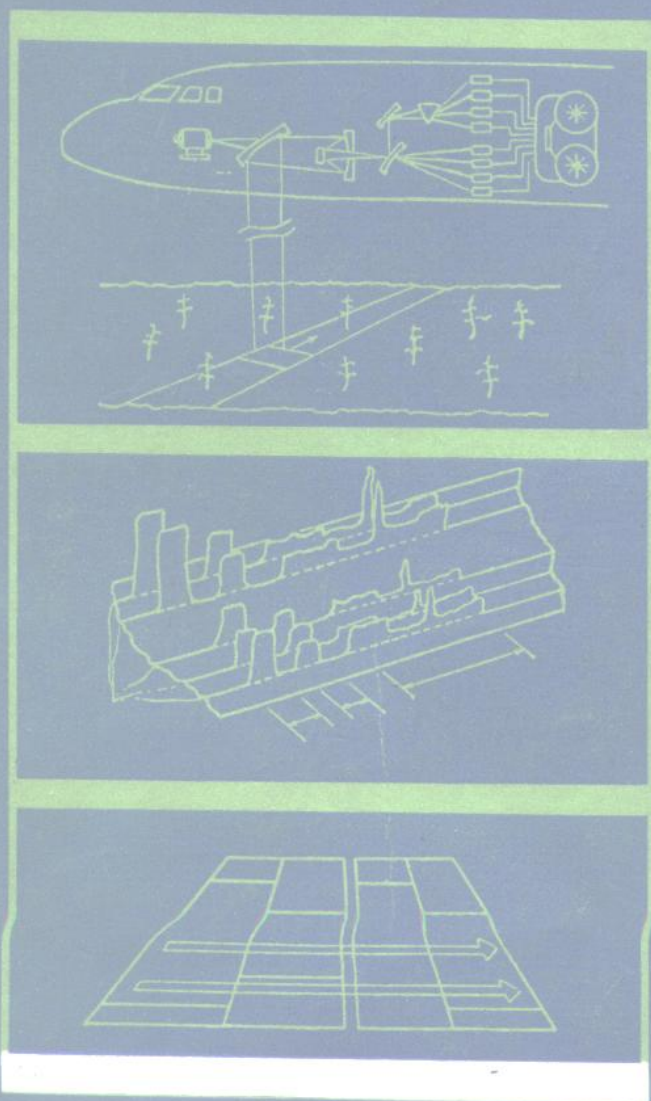


# 遥感概论

马蔼乃 编



科学出版社

87.9  
467

# 遥 感 概 论

马 瀛 乃 编



科 学 出 版 社

1 9 8 4

1111662

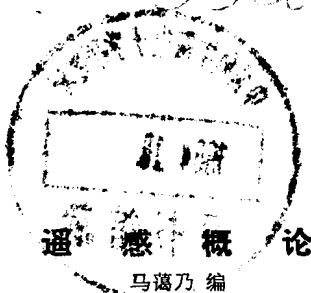
## 内 容 简 介

本书是一本概述遥感原理的基础理论读物。

全书共分五篇,二十三章。第一篇阐述遥感的理论基础,分别介绍电磁波、太阳辐射与地物反射、大地辐射以及人工发射波束等的有关理论。第二篇阐述遥感的技术系统,分别介绍有关地物波谱、大气窗口以及遥感平台、遥感传感器和遥感信息资料的各种类型。第三篇遥感成象原理,分别阐述摄影成象、扫描成象、全息成象的基本理论。第四篇遥感信息解译原理,分别介绍遥感影象目视解译、光学处理以及数据处理的原理与方法。第五篇遥感资料的应用,简述遥感在测绘、农林、水利、地质、海洋、环境监测、工程建设和军事方面的应用。

本书可供农林、水利、工程建设等生产部门,地质、地理、环境保护等科研部门的遥感科学工作者,以及有关大专院校师生参考。

D586/04



### 遥 感 概 论

马蔼乃 编

责任编辑 姚岁寒

科学出版社 出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1984年7月第一版 开本:787×109. 1/16

1984年7月第一次印刷 印张:15

印数:0001—8,000 字数:347,000

统一书号:13031·2593

本社书号:3571·13—18

定价:2.35 元

9381111

# 前 言

自 1975 年起, 编者在北京大学举办的航空地质短训班及校内、外的遥感短训班中曾多次讲授过“遥感遥测的物理基础”、“遥感影象在地质上的应用”及“遥感概论”等课程。本书是在此基础上, 参考了国内外有关遥感的文献, 编写而成的。本书主要介绍遥感的基本原理, 略举一些应用实例。全书共分五篇: 第一篇, 遥感的理论基础; 第二篇, 遥感的技术系统; 第三篇, 遥感成象原理; 第四篇, 遥感信息解译原理; 第五篇, 遥感资料的应用。

本书的编写出版, 是与国内各单位遥感工作者, 特别是北京大学遥感应用研究室同志们们的热情支持和具体帮助分不开的。编者在此对关怀本书出版的诸同志, 致以衷心的感谢。在此尤应感谢北京大学副校长沈克琦教授, 承蒙他热情指导和鼓励, 并全面审阅了书稿。感谢国家海洋局第一研究所薛德镛同志对书稿作了细致的修改。感谢北京大学数学系周芝英同志仔细地审校了第十五章, 遥感应用研究室陈凯、承继成同志审阅了本书的第五篇。

由于编者水平所限, 书中错误不当之处难免, 不足之处肯定不少, 恳请广大读者批评指正!

# 目 录

前言	iv
绪言	1
§ 1. 遥感的概念	1
§ 2. 遥感在现代科学技术领域中的地位	1
§ 3. 遥感发展简况	2

## 第一篇 遥感的理论基础

<b>第一章 电磁波理论</b>	4
§ 1.1 电磁波	4
§ 1.2 波粒二象性	5
§ 1.3 电磁波谱	20
<b>第二章 太阳辐射与地物反射</b>	21
§ 2.1 太阳辐射的光谱特性	21
§ 2.2 地物的反射	24
§ 2.3 彩色原理	28
§ 2.4 紫外反射与近红外反射	32
<b>第三章 大地辐射</b>	33
§ 3.1 大地辐射的波谱特性	33
§ 3.2 黑体辐射	36
§ 3.3 红外辐射	40
<b>第四章 人工发射的探测波束</b>	43
§ 4.1 微波雷达	43
§ 4.2 激光雷达	47
§ 4.3 声纳	51

## 第二篇 遥感技术系统

<b>第五章 地物波谱</b>	55
§ 5.1 地物波谱的测试仪器	55
§ 5.2 地物波谱特性	60
§ 5.3 地面试验场	66
<b>第六章 大气窗口</b>	69
§ 6.1 大气窗口	69
§ 6.2 大气的垂直分层	70
§ 6.3 太阳辐射的衰减与天空辐射	73
§ 6.4 大地辐射的衰减与大气闪烁	76

<b>第七章 遥感平台</b> .....	79
§ 7.1 地面平台 .....	79
§ 7.2 航空平台 .....	80
§ 7.3 航天平台 .....	80
<b>第八章 遥感传感器</b> .....	86
§ 8.1 传感器的种类 .....	86
§ 8.2 传感器的组成系统与性能比较 .....	92
<b>第九章 遥感信息资料</b> .....	96
§ 9.1 遥感图象的种类 .....	96
§ 9.2 遥感磁带的种类 .....	97
§ 9.3 影象上的灰度与磁带上的数据 .....	99

### 第三篇 遥感成象原理

<b>第十章 摄影成象原理</b> .....	101
§ 10.1 摄影成象过程 .....	101
§ 10.2 胶片的感光特性 .....	104
§ 10.3 滤光镜 .....	110
§ 10.4 象片解析 .....	112
§ 10.5 多波段摄影 .....	117
<b>第十一章 扫描成象原理</b> .....	121
§ 11.1 电子扫描成象 .....	121
§ 11.2 光学机械扫描成象 .....	124
§ 11.3 天线扫描成象 .....	131
§ 11.4 固体自扫描成象 .....	138
<b>第十二章 全息成象原理</b> .....	141
§ 12.1 激光全息成象 .....	141
§ 12.2 微波全息成象 .....	145
§ 12.3 声全息成象 .....	146

### 第四篇 遥感信息解译原理

<b>第十三章 遥感影象目视解译</b> .....	148
§ 13.1 影象性质分析 .....	148
§ 13.2 人眼的分辨能力 .....	154
§ 13.3 影象的解译标志 .....	156
§ 13.4 目视解译方法 .....	158
<b>第十四章 遥感影象光学处理</b> .....	160
§ 14.1 影象光学合成 .....	160
§ 14.2 影象密度分割 .....	163
§ 14.3 光学图象信息处理 .....	165
<b>第十五章 遥感影象数据处理</b> .....	170
§ 15.1 遥感影象数据处理系统 .....	170
§ 15.2 影象信息的基本处理方法 .....	174

§ 15.3 图象识别与分类 .....	182
§ 15.4 遥感信息系统 .....	187

## 第五篇 遥感资料的应用

<b>第十六章 遥感在测绘中的应用</b> .....	188
§ 16.1 影象地图 .....	188
§ 16.2 数字化影象测绘 .....	190
§ 16.3 影象镶嵌图 .....	194
<b>第十七章 遥感在农林方面的应用</b> .....	197
§ 17.1 遥感在农业方面的应用 .....	197
§ 17.2 遥感在林业方面的应用 .....	199
§ 17.3 遥感在土地利用调查方面的应用 .....	201
<b>第十八章 遥感在地质方面的应用</b> .....	203
§ 18.1 遥感地质的特点 .....	203
§ 18.2 遥感地质方法的应用 .....	205
<b>第十九章 遥感在水利方面的应用</b> .....	209
§ 19.1 水利遥感的特点 .....	209
§ 19.2 水利遥感的应用 .....	212
<b>第二十章 遥感在海洋方面的应用</b> .....	217
§ 20.1 海洋卫星 .....	217
§ 20.2 海洋卫星的应用 .....	218
<b>第二十一章 遥感在环境污染监测中的应用</b> .....	223
§ 21.1 大气污染监测 .....	223
§ 21.2 水污染监测 .....	224
§ 21.3 地面污染监测 .....	226
<b>第二十二章 遥感在工程建设方面的应用</b> .....	228
<b>第二十三章 遥感在军事方面的应用</b> .....	231
§ 23.1 遥感的军事解译 .....	231
§ 23.2 反遥感的军事伪装 .....	233

# 绪 言

## § 1. 遥感的概念

“遥感”一词 (Remote Sensing) 顾名思义就是“遥远的感知”。通常人们所认为的遥感技术的概念是：从不同高度的平台 (Platform) 上，使用各种传感器 (Sensor)，接收来自地球表层各类地物的各种电磁波信息，并对这些信息进行加工处理，从而对不同的地物及其特性进行远距离的探测和识别的综合技术。

从理论上讲，对整个电磁波波段都可以进行遥感，但实际上由于“大气窗口”和技术水平的限制，目前只能在有限的几个波段上进行。其中最重要的波段为：

可见光 (0.4—0.75 微米) 和近红外 (0.75—2.5 微米) 波段 这是地物对太阳辐射的反射波段，所用的传感器是照相机或多波段扫描仪等。

中红外 (3—5 微米) 和热红外 (8—14 微米) 波段 这主要是接收地物自身热辐射的波段，所用的传感器是热辐射扫描仪等。

微波 (1 毫米—1 米) 波段 在微波波段分主动和被动两种接收方式：主动式微波传感器通常包括侧视雷达、散射计和高度计；被动式微波传感器采用微波辐射计，包括扫描成象的和非成象等类型。

遥感研究的内容，尽管在各应用领域内所研究的对象是千差万别的，但都可以把它们看成是地球表层的地物。所以遥感必须从研究地物的电磁辐射着手：

- (1) 研究地物的电磁辐射特性；
- (2) 研究地物各类电磁辐射的空间分布特性；
- (3) 研究地物电磁辐射随时间的变化。

由于各类地物不是孤立地存在于地球上，相互有联系有影响。若把各专业的研究对象看成是目标地物，则非研究对象的所有地物都可看成是背景地物。研究目标地物的电磁辐射特性及其随时间、空间的变化，必然会受到背景地物的干扰，所以还要研究和排除这些干扰，即是研究地物的电磁辐射随地理环境的变化。

## § 2. 遥感在现代科学技术领域中的地位

自本世纪六十年代以来，世界上的科学技术有了一个突飞猛进的发展。尤其是电子计算机、原子能和空间科学技术，集中地代表了这个时代的科学技术水平。

空间科学技术的发展，使人类征服宇宙的历程，从航空阶段跃入到了航天阶段。遥感技术是空间科学技术中的重要组成部分，被称之为宇宙中的“眼睛”，它是建立在现代光学技术、红外技术、微波技术、雷达技术、激光技术、全息技术、电子学技术、电子计算机技术和信息论等新的技术科学及地球科学理论基础上一门新兴的、综合性很强的科学技术。

利用遥感手段，获取地面的信息，有着许多优越性：(1) 开阔了人们的视野。空中遥



感相当于把人的“眼睛”提高到宇宙空间的高度来俯视地球。使人们可以通过遥感影象比较直观地看到地球的面貌。(2) 遥感技术能够把由于受到人眼生理条件的限制而不可见的信息记录下来,经过转换,成为可见的图象,从而扩大了人的认识领域。(3) 应用遥感技术可以周期地重复观测地球上的同一地区,从而可获得地表各种现象的动态变化资料。正因为这些特点,所以,遥感技术在测绘、农林、地质、水文、海洋、环境监测、工程建设、军事侦察等许多方面都有着广泛的应用。

### § 3. 遥感发展简况

遥感技术在近二十年来得到了迅速的发展。其实,早期的遥感是从航空摄影开始的。1839年达古赫(Daguerre)发表了第一张照片。1858年两个法国人同时在巴黎上空用气球运载照相机第一次成功地获得了巴黎的空中照片。1903年莱特兄弟发明了飞机,为航空摄影创造了条件,1909年瑞特(W. Wright)在意大利第一次用飞机拍摄了圣托西利(Centocelli)地区的照片,从此开始了航空遥感。

在第一次世界大战中,使用了航空照相侦察技术,获取敌方前沿的军事情报。同时,对红外探测器有了实验性的研究,当时的红外探测器已可以探测到1.5公里以外的飞机和300米以外的人体,但还没有航空红外遥感的实际应用。

第一次世界大战后,航空摄影首先应用于地形测绘,继而在森林调查、地质调查等资源调查方面都陆续应用航空像片来作专业性的判读,但判读所使用的仪器仅仅是简单的立体镜和手持放大镜。1924年迈迺斯(Mannes)研制成功了彩色胶片,1937年戈达尔特第一次拍摄了彩色航空照片,这可以说是早期的多波段摄影。

在第二次世界大战中,法西斯德国在战场上使用了地面红外遥感装备;英美在第二次世界大战中虽然也使用了红外技术,但主要集中力量发展了雷达技术。在第二次大战中近红外假彩色航片已被用来揭露目标的伪装。

第二次世界大战后,航空摄影遥感被广泛地应用于各民用部门。五十年代美国的航空红外遥感已能获得地形的热图象。1951年威莱(C. Wilay)提出了合成孔径的设想,1957年密执安大学研制成功合成孔径侧视雷达的样机,并装入C-46F飞机试飞,方位分辨力大为提高。但无论是航空红外遥感还是机载侧视雷达,在五十年代到六十年代之间,主要只是用于军事侦察和地形测绘。

1957年苏联发射成功两颗人造地球卫星,从此世界开始了航天阶段。1959年9月美国海军发射的先锋-2(Vanguard-2),装有两个红外光电管,拍摄了地球上空云层的照片并测量了地球辐射;同年10月苏联发射的月球-3(Луник-3)装有200毫米和500毫米焦距的照相机和电视机,拍摄了月球背面的照片。1960年4月美国国家宇航局(NASA)发射的泰罗斯-1(Tiros-1)上装有电视摄像机和磁带记录器,对全球南北纬 $55^{\circ}$ 之间的云盖进行了电视观测和照相,开始了气象卫星系列的发射,……。正是这样,美国地理学家伊瑞林·普鲁特(Eretyn Pruitt)等在1960年建议用“遥感”(Remote Sensing)这个名词来替代过去的航空摄影。1962年在密执安大学召开的首届“环境遥感讨论会”上正式采用了“遥感”这一术语。

1966年美国地质调查局(Geological Survey)成立地球资源观测系统(EROS)。EROS

资料中心的资料主要靠美国国家宇航局提供的航空遥感资料和航天遥感资料。其中航天遥感资料来自双子星座卫星 (Gemini) 和天空试验室 (Skylab); 而最重要的资料是陆地卫星 (Landsat)<sup>1)</sup> 所提供。由于 Landsat 所提供的多波段影象在世界范围内 (N81°—S81°) 的资源普查和环境监测上起了很大的作用, 因此, 受到世界各国的重视。

目前世界范围内遥感发展的趋势有以下这些特点:

(1) 重视建立统一的管理机构, 并有进一步成立世界性的协调管理机构的趋势。

(2) 进行地面遥感、航空遥感、航天遥感的立体遥感试验, 系统地获取地球表面不同比例尺, 不同地面分辨力的影象数据, 建立地球环境卫星系列。

(3) 传感器的研制正向电磁波谱全波段可能覆盖的方向发展, 向立体遥感、全息遥感, 器件固体化、小型化, 高分辨力、高灵敏度方向发展。

(4) 遥感图象信息处理, 已分别应用光学、电子学、计算机数学方法, 进行了图象的校正、恢复、增强、重构、识别、分类、自动储存与检索等处理技术, 以及向光学-电子计算机混合处理及实时处理方向发展, 图象模式识别与地学数据库结合, 建立遥感信息系统。

(5) 有关遥感的基础理论研究, 正在进行大量的地物波谱测试, 建立地面试验场、地面辐射校准站, 开展地面实况调查, 向同步测试, 实时监测的方向发展。在理论上对地物波谱的机理与模式进行研究, 建立地物波谱与影象特征的关系, 包括大气窗口、海水窗口在内的各种理论研究。

(6) 遥感技术的应用, 目前已在军事侦察, 地图测绘, 资源调查、环境监测及农业生产管理方面, 显见成效, 并向更多的地学科学领域内推广应用。

---

1) 陆地卫星 (Landsat) 原称地球资源技术卫星 (Earth Resources Technology Satellite, 缩写为 ERTS)

# 第一篇 遥感的理论基础

## 第一章 电磁波理论

电磁波的理论是遥感的物理基础。电磁波是自然界中以“场”的形式存在的一种物质。如 $\gamma$ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线、微波、无线电波等。尽管这些物质场具有不同的特性,但从本质上来看都是电磁波。这些不同波长(或频率)的电磁波,按其波长的长短可以依次排列成电磁波谱。本章将简要地介绍电磁波、波粒二象性及电磁波谱。

### § 1.1 电 磁 波

众所周知,波是振动在空间的传播。在空气中传播的声波,在水体中传播的水波,在地壳中传播的地震波,都是振源发出的机械振动在弹性媒质中的传播,这些波称作为机械波。在机械波的情况下,振动着的是弹性媒质中质点的位移矢量。最基本的波动形式有两种:纵波和横波。振动方向与传播方向相同的波叫做纵波,如声波。振动方向与传播方向垂直的波叫做横波,如水波基本上就是横波。地震波则既有纵波,也有横波。

波动的基本特点是它的时空周期性。波动的时空周期性可用波动方程来描述。机械波的一维自由振动方程可写成:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \dots\dots (1-1)$$

式中  $t, x$  分别为时、空变量;  $\psi$  称为波函数在机械波中就是位移矢量;  $v$  为振动沿传递方向传播的速度

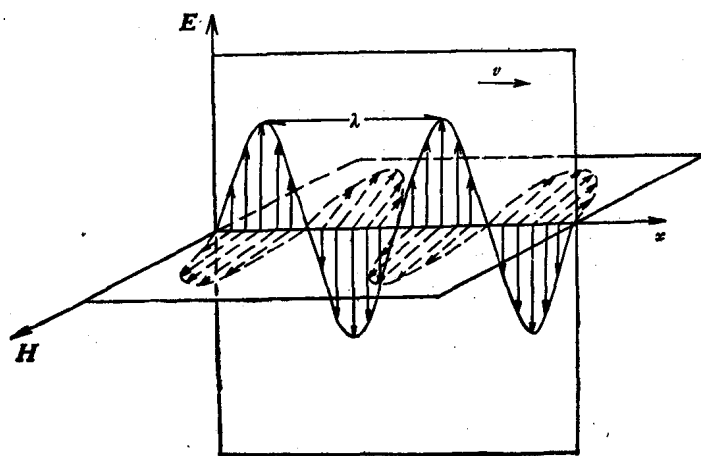


图 1.1 电磁波——横波

光波、热辐射波、微波等是由于粒子的能级跃迁而造成的电磁振动在空间的传播，它们统称为电磁波。在电磁波的情况下，振动着的是空间里的电场强度矢量  $\mathbf{E}$  和磁场强度矢量  $\mathbf{H}$ 。电磁波是横波。如图 1.1 所示。

根据麦克斯韦的电磁场理论，可以写出下列方程组：

$$\begin{cases} \frac{\mu}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} \\ \frac{\varepsilon}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} \end{cases} \quad (1-2)$$

式中  $\varepsilon$  为介质的相对介电常数， $\mu$  为相对导磁率， $c$  为光速。

将(1-2)中第一式对  $x$  微分，(1-2)中第二式对  $t$  微分，消去  $\mathbf{H}$  项，得

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{c^2}{\varepsilon \mu} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial x^2} \quad (1-3)$$

这就是电磁波的波动方程。与(1-1)式对比，有

$$\begin{aligned} \phi &= \mathbf{E} \\ v &= \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \end{aligned}$$

(1-3)式表示电场强度  $\mathbf{E}$  以速度  $\frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$  在媒质中沿  $x$  方向传播。将(1-2)中第一式对  $t$

微分，(1-2)中第二式对  $x$  微分，消去  $\mathbf{E}$  项，可以证明磁场强度也以该速度沿  $x$  方向传播，我们还可以证明同一点的  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  相互垂直， $\mathbf{E}$  的变化与  $\mathbf{H}$  的变化位相相同。在真空中，因为  $\varepsilon = \mu = 1$ ，所以电磁波在真空中传播的速度即为光速  $c$ 。遥感目前所记录的主要是电磁波的电场强度，也就是说波动方程中的波函数代表的是电场强度。由此可见，可以用(1-1)式来概括(1-3)式。

## § 1.2 波粒二象性

电磁波既表现出有粒子性，又表现出波动性。连续的波动性和不连续的粒子性是相互排斥，相互对立的；但两者又是相互联系并在一定的条件下可以相互转化的。可以说波是粒子流的统计平均，粒子是波的量子化。

### 1. 波动性

从光的干涉、衍射、偏振等现象，可以证明光具有波动性。

单色波的波动性可用波函数来描述，波函数的图解如图 1.2。波函数是一个时空的周期性函数。时间的周期性用周期  $T$  或频率  $\nu$  来描述，频率是单位时间内振动的次数，即多少个周期。根据定义，频率是周期的倒数：

$$\nu = \frac{1}{T}$$

在单位圆周长的时段内有多少个周期，即称角频率  $\omega$ ，它可表示为：

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

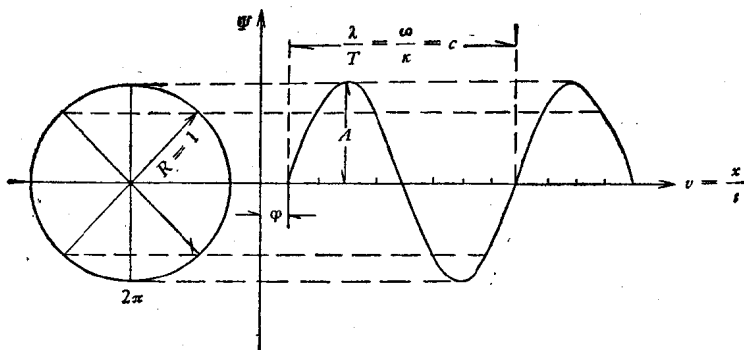


图 1.2 波函数图解

当时间增加  $T$  的整数倍时，振动重复原来的状态。空间的周期性用波长  $\lambda$  或波数  $N$  来描述。波数的定义是单位长距离内有多少个波长。根据定义，波数是波长的倒数

$$N = \frac{1}{\lambda}$$

在单位圆周长距离内有多少个波长，则称圆波数  $\kappa$

$$\kappa = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\pi N$$

相隔波长  $\lambda$  整数倍的点上具有相同的振动状态。

根据波速的定义，在时间  $T$  内振动传播  $\lambda$  长的距离，即可写出波速  $c$  的公式：

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \nu \quad (1-4)$$

光速  $c = 3 \times 10^{10}$  厘米/秒，即所有的电磁波在真空中的传播速度约为每秒 30 万公里。

解波动方程(1-1)，可求出单色波波函数的解析式

$$\psi = A \sin [(\omega t - \kappa x) + \varphi] \quad (1-5)$$

$\psi$   
波函数

$A$   
振幅

$(\omega t - \kappa x)$   
角时  
频间  
率变  
量  
量

$(\omega t - \kappa x)$   
圆空  
波间  
数变  
量  
量

$+ \varphi$   
初位相

位 相

式中的正弦函数也可写成余弦函数，只是初位相不同而已。此解析式与波函数图解对应。

由(1-5)式可见，波函数是由**振幅**和**位相**两部分所组成。一般的成象原理只记录振幅，只有全息成象时，才既记录振幅又记录位相，正是因为记录了振幅与位相全部信息，所以叫做“全息”。

### (1) 光的干涉

在各向同性均匀介质中，从点波源发出的波动，其波面是以该点为中心的球面，称为球面波。所谓“波面”就是在某一时刻空间位相  $[(\omega t - \kappa x) + \varphi]$  相同各点联成的轨迹。走在最前面的波面叫做波前。离开点波源无限远处，球面波的一部分可以近似地看作平面波。例如太阳发出的光波到达地球时，可以看成是平面波，与波面垂直的线即为光线。

惠更斯原理说：波所到达的每一点都可以看做是新的振动中心，从这些点将发出次波来，这些次波的包络面就是新的波前。

光的干涉可以通过杨氏实验来观察，如图 1.3 杨氏 (T. Young) 干涉，令点光源通过针孔  $S$ ，则在  $S$  处形成新的振动中心，发出球面次波。再令次波通过一对彼此靠得很近且与针孔  $S$  等距的针孔  $S_1, S_2$ ，则从  $S_1, S_2$  又发出两列球面次波，它们在重叠区域内相互叠加，在  $P$  处屏幕上可看到彩色条纹，若用单色光源，幕上会呈现出单色明暗相间的条纹。这一现象就叫做光的干涉。

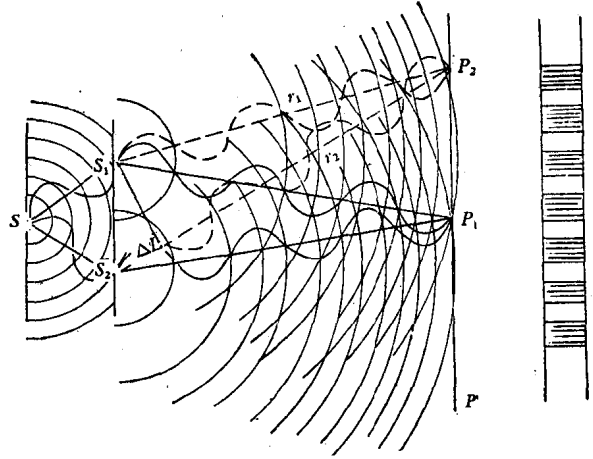


图 1.3 杨氏干涉

图中  $\Delta L = r_2 - r_1$ ，为光程差

干涉现象的基本原理是波的叠加原理。一列波在空间传播时，在空间每一点都引起振动。当两列波在同一空间传播时，空间各点的振动就是各列波单独在该点产生的振动的叠加合成。图 1.3 形象地表示了这种叠加关系。

在屏幕上的  $P_1$  点，由于  $S_1, S_2$  到  $P_1$  的距离相等，如果  $S_1, S_2$  处波的振动初位相等，则两列波到达  $P_1$  点时所引起振动的位相就相同，两者相互加强，呈亮带；而在屏幕上的  $P_2$  点，由于  $S_1, S_2$  到  $P_2$  的距离不等设  $S_1P_2$  为  $r_1$ ， $S_2P_2$  为  $r_2$ ，若

$$r_2 - r_1 = \frac{\lambda}{2}$$

则两列波在  $P_2$  点引起的振动的位相差正好为  $\pi$ ，两者互相削弱，呈暗带。

日常的经验证明，当两盏灯同时照到墙上时，我们看不到干涉条纹。原来普通光源发射的光波是没有固定的位相关系的，没有固定位相关系的两列光波叫做非相干光。非相干光强度 ( $I$ ) 的叠加，即为：

$$I = I_1 + I_2$$

这就是两盏灯比一盏灯使墙壁更明亮而不出现干涉条纹的原因。

在杨氏实验中，通过  $S_1, S_2$  的光波是从点光源  $S$  发出来的次波。由  $S$  发出的次波到  $S_1, S_2$  后又被分割成两列次波，它们之间的位相差是固定不变的，因为  $SS_1, SS_2$  的距离不变。两列频率相同、振动方向相同，且具有固定位相关系的光波叫做相干光。相干光在空间一点叠加后的强度为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1-6)^D$$

1) 由(1-5)式知  $\psi = A \sin[(\omega t - \kappa x) + \varphi]$

在图 1.3 中，设  $S$  为单色光源，因为  $x = 0$ ，

$\therefore \psi_s = A_s \sin(\omega t + \varphi_s)$

$S$  到  $S_1, S_2$  的距离分别为  $x_1 = R_1, x_2 = R_2$  于是有

$\psi_{s_1} = A_{s_1} \sin(\omega t - \kappa R_1 + \varphi_s), \psi_{s_2} = A_{s_2} \sin(\omega t - \kappa R_2 + \varphi_s)$

而  $S_1, S_2$  到屏幕上  $P_2$  点的距离分别为  $r_1, r_2$ ，于是有

$\psi_1 = A_1 \sin(\omega t - \kappa R_1 - \kappa r_1 + \varphi_s), \psi_2 = A_2 \sin(\omega t - \kappa R_2 - \kappa r_2 + \varphi_s)$

式中  $\delta$  称为位相差。

## (2) 光的衍射

光线偏离直线路程的现象称为波的衍射(或绕射),例如波能够绕过障碍物而弯曲地

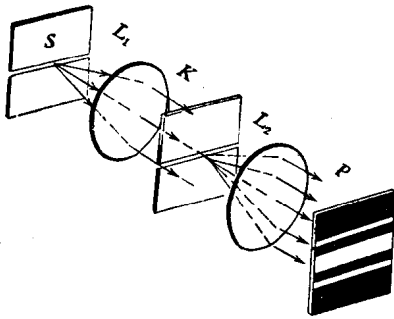


图 1.4 单缝衍射实验

向它后面传播。一般来说,波长与障碍物的线度相比较,波长越大,障碍物越小,衍射现象越显著。水波和声波的衍射现象是日常所见闻的,光波也会发生衍射,不过由于光波的波长很短,平常不易察觉其衍射现象罢了。其实我们只要拼拢手指,对着光源,使指缝与灯丝平行,眼睛紧贴在指缝处,就可以看到彩色的衍射条纹。图 1.4 为夫琅和费衍射装置。光源  $S$  放在透镜  $L_1$  的焦面上,因此从透镜  $L_1$  穿出的光线形成一平行光束。这束平行光照射在单缝  $K$  上,一部分穿过单缝,再经过透镜  $L_2$ ,位于  $L_2$  焦面处的屏幕  $P$  上可观察到衍射条纹。

衍射现象的实质可用次波相干叠加的原理来解释,这个原理叫做惠更斯-菲涅耳原理。该原理说:波前上每个面元都可以看成是新的振动中心,它们发出次波,在空间某点  $P$  的振动是所有这些次波在该点的相干叠加。其实杨氏实验中由  $S_1, S_2$  发出的两列次波就是双缝衍射现象。

在入射光垂直于单缝平面时的单缝衍射图样中,可以看到中央有特别明亮的亮纹,两侧对称地排列着一些强度较小的亮纹。可以证明各条亮线的强度为<sup>9)</sup>:

$$I_{\theta} = I_0 \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \quad (1-7)$$

式中  $\alpha = \frac{\delta}{2}$ , 即位相差的一半。

则  $P_2$  点的合成波函数是

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = A_1 \sin(\omega t - \kappa R_1 - \kappa r_1 + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega t - \kappa R_2 - \kappa r_2 + \varphi_2)$$

所以,位相差  $\delta$  为:

$$\delta = [\omega t - \kappa(R_1 + r_1) + \varphi_1] - [\omega t - \kappa(R_2 + r_2) + \varphi_2]$$

当  $R_1 = R_2$  时,则

$$\delta = \kappa(r_2 - r_1)$$

由图 1.3 可见  $r_2 - r_1 = \Delta L$ , 于是

$$\delta = \kappa \cdot \Delta L = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L$$

式中  $\Delta L$  称为光程差。

又,同频波叠加合成振幅的平方应为:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \delta$$

而  $I = A^2$ , 所以

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \delta$$

- 1) 按惠更斯-菲涅耳原理,波前  $AB$  被分割成无穷多个等宽小块,如图 1.5a, 它们是振幅和位相都相等的次波源。衍射角为  $\theta$  的平行衍射线,经透镜  $L_2$  会聚到屏幕上一点  $P_{\theta}$ , 狭缝上各点发出的衍射线的光程是不同的,从  $A$  到  $B$ , 一个比一个光程长,因而它们在  $P_{\theta}$  处产生的振动位相一个比一个落后,  $B$  点产生的比  $A$  点产生的位相落后了  $\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = \frac{2\pi a \cdot \sin \theta}{\lambda}$ 。每条衍射线在  $P_{\theta}$  点引起振动,即为振动矢量。每个矢量大小相等,但一个比一个偏转了相同的角度,各矢量相加(即首尾相接),如图 1.5c 所示。 $MN$  即为  $P_{\theta}$  处的合成振动。由于相等的小

由(1-7)式可改写为  $\frac{I_\theta}{I_0} = \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2$ , 令  $\alpha = k\pi$ , 其中  $k = 0$ , 为极大值,  $k = \pm 1, \pm 2, \dots$  为极小值, 又  $\alpha = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$ , 于是  $\sin \theta = k \frac{\lambda}{a}$ . 作  $\frac{I_\theta}{I_0} - \sin \theta$  的图解, 如图 1.5(b), 这就是衍射在屏幕上的强度分布.

这里要讲一下光学仪器的分辨本领. 如图 1.6 所示, 当单色平行光束照射到小孔  $K$  上时, 由于小孔衍射, 屏幕  $P$  上出现的不是一个亮点,

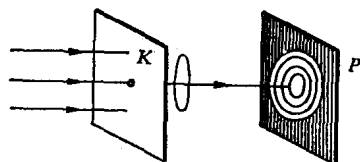


图 1.6 小孔衍射

而是一个亮斑, 而且亮斑周围还有逐渐减弱的明暗相同间的条纹. 若通过物镜观察远处一个物体上的  $a, b$  两点, 可以看到从  $a, b$  发出的光, 在物镜的视场中, 将形成两个亮斑, 分别为  $a$  和  $b$  的象. 如果这两个亮斑分得较开, 就能分辨出  $a, b$  两点; 如果这两个亮斑离得很近, 甚至重叠起来, 两点就分不开. 恰能分辨的张角  $\theta_0$  叫做最小分辨角, 如图 1.7 所示.  $\theta_0$  角的大小与物镜的孔径  $d$  成反比, 与入射光的波长  $\lambda$  成正比, 可由下式表示:

$$\theta_0 = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad (1-8)$$

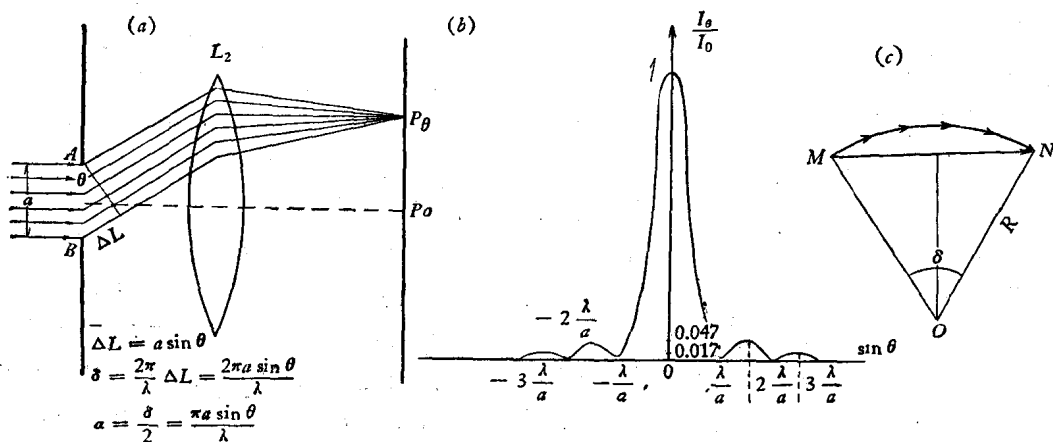


图 1.5 衍射光强度分布

矢量可以是无穷多个, 所以在极限情况下  $M$  到  $N$  是圆弧的一部分, 即  $\widehat{MN}$ . 它所对应的圆心角恰好是总位相差, 即  $\angle MON = \delta$  由图可见,  $P_\theta$  点的振幅  $A_\theta = \widehat{MN} = 2R \sin \alpha = 2R \sin \frac{\delta}{2}$ , 于是有

$$\alpha = \frac{\delta}{2} = \frac{\pi a \cdot \sin \theta}{\lambda}$$

图中半径  $R = \frac{\widehat{MN}}{\delta}$ ,  $\widehat{MN}$  实际上是  $P_0$  点的振幅  $A_0$ , 所以  $R = \frac{A_0}{2\alpha}$ , 代入  $A_\theta$  式, 得

$$A_\theta = A_0 \frac{\sin \alpha}{\alpha}$$

因为  $P_0, P_\theta$  的强度分别为  $A_0^2 = I_0, A_\theta^2 = I_\theta$ , 所以有

$$I_\theta = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2$$

式中  $I_0$  为中央亮纹强度,  $I_\theta$  为与法线夹角为  $\theta$  的衍射方向的强度, 可以证明  $\alpha = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$  是二分之一的位相差  $\frac{\delta}{2}$ ,  $a$  为狭缝宽度.



这就是瑞利判据。最小分辨角的倒数  $\frac{1}{\theta_0}$  叫做光学仪器的分辨本领。合成孔径雷达片的

再现,全息片再现等,都与衍射机理有关。

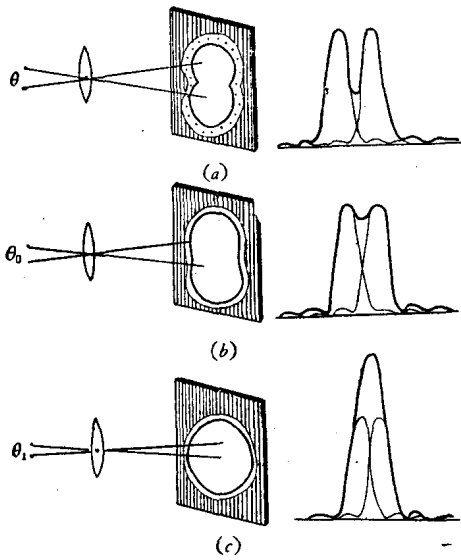


图 1.7 光学仪器的分辨能力

(a) 能分辨 (b) 恰能分辨 (c) 不能分辨

### (3) 光的偏振

电磁波是横波,由两个相互垂直的振动分量即电场强度  $E$  和磁场强度  $H$  来表征。而  $E$  和  $H$  都与电磁波的传播方向相垂直。光是电磁波的特例,在光波中,产生感光作用和生理作用的是电场强度  $E$ ,因此将  $E$  称为光矢量, $E$  的振动称为光振动。

如果光矢量  $E$  在一个固定平面内只沿一个固定方向作振动,则这种光称为偏振光。偏振光的振动方向和传播方向所成的面称为振动面;和振动方向相垂直且包含传播方向的面称为偏振面。分子、原子在某一瞬间所发出的光是偏振的,光矢量具有一定的方向。但光源中由大量的分子或原子所发出的光,一个接一个,

以极快的不规则的次序取所有可能的方向,不可能保持一定的优势方向。所以自然光,如太阳光是非偏振的,在所有可能的方向上, $E$  的振幅都可以看作是完全相等的。

图 1.8 表示了用偏振片所观察到的偏振现象。在光线的路径上依次放两块偏振片  $P_1$  和  $P_2$ ,当自然光经过偏振片  $P_1$  时,只有与  $P_1$  方向一致的分振动  $E_1$  矢量才能通过,与  $P_1$  方向垂直的分振动不能通过,因此通过偏振片的光就成为偏振光了。偏振光再通过第二个偏振片  $P_2$  时,视  $P_2$  所取的方向,如果  $P_2$  与偏振光  $E_1$  成一角度,则偏振光  $E_1$  在  $P_2$  方向的分量可以通过,垂直  $P_2$  方向的分量被挡住,我们令通过的分量为  $E_2$ 。若  $E_1$  的振幅为  $A_1$ ,  $E_2$  的振幅为  $A_2$ ,则光强分别为  $I_1 = A_1^2$ ,  $I_2 = A_2^2$ ,且  $A_2 = A_1 \cos \theta$ ,其中  $\theta$  为  $P_1$  与  $P_2$  的夹角,于是有

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta \quad (1-9)$$

这就是马吕定律。当  $P_2 // P_1$  时,  $\theta = 0^\circ$ ,  $I_2 = I_1$ ;当  $P_2 \perp P_1$  时,  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ,  $I_2 = 0$ ,这叫做消光。

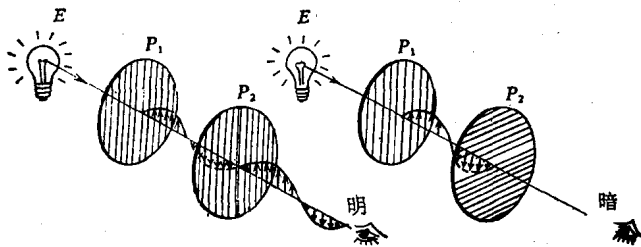


图 1.8 偏振现象

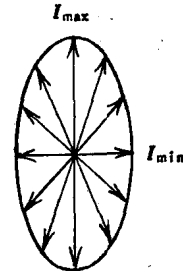


图 1.9 部分偏振光