

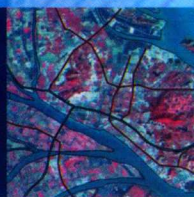


普通高等院校应用型人才培养“十三五”规划教材

# 遥感与数字图像处理

YAOGAN YU  
SHUZI TUXIANG CHULI

主 编 ● 赵 虎 周晓兰  
          ● 聂 芳 马永俊



非外借

普通高等院校应用型人才培养“十三五”规划教材  
本教材承国家自然科学基金委员会资助(项目名称:一种测定月球表面  
密度的新方法探索与研究;项目批准号:40802083)  
本教材承湖北文理学院协同育人专项经费资助

# 遥感与数字图像处理

主 编 赵 虎 周晓兰  
      聂 芳 马永俊

西南交通大学出版社

-----  
图书在版编目 ( C I P ) 数据

遥感与数字图像处理 / 赵虎等主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2019.1  
普通高等院校应用型人才培养“十三五”规划教材  
ISBN 978-7-5643-6669-8

I. ①遥… II. ①赵… III. ①遥感图像—数字图像处理—高等学校—教材 IV. ①TP751.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 290798 号  
-----

普通高等院校应用型人才培养“十三五”规划教材

**遥感与数字图像处理**

主编 赵虎 周晓兰 聂芳 马永俊

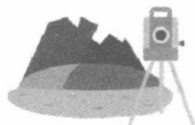
责任编辑	姜锡伟
封面设计	何东琳设计工作室 西南交通大学出版社
出版发行	(四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	<a href="http://www.xnjdcbs.com">http://www.xnjdcbs.com</a>
印 刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	12.25
字 数	240 千
版 次	2019 年 1 月第 1 版
印 次	2019 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-6669-8
定 价	34.00 元

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 前 言



遥感技术，作为“3S”技术之一，能大范围、动态、快速、周期性地获取地表信息。其获取的数据广泛应用于各个领域。从可见光遥感、红外遥感到微波遥感再发展到今天的高分遥感（高空间分辨率遥感）和高光谱遥感，从干涉遥感到偏振（极化）遥感，遥感技术开始全面向系统化、定量化发展。在遥感收集数据已经成熟的同时，处理海量数据的遥感数字图像处理软件也日臻完善，知名的软件有 ERDAS，ENVI，PCI，ERMAPPER。这些软件都是对遥感数字图像进行专业处理与分析的极佳软件。

本书可作为综合性大学和高等师范院校地学类专业学习遥感知识的教材，也可供摄影测量与遥感、地理科学、地理信息系统等专业的学生阅读与应用。

本书主要阐述两方面的内容：第一部分为遥感的理论基础，第二部分为遥感数字图像的处理。

在讲解遥感学中的理论基础时，书中穿插了部分著名科学家的逸闻趣事。这样编写的目的是让学生了解世界上著名科学家解决了什么问题，同时了解他们面对困难问题是如何思考、如何解决的，从而诱导或者启发学生按照这种思路去思考问题，或者得以借鉴。目前，很多教材都仅仅限于讲定律本身的内容，而忽视定律从提出到发展、最终成立的发展历史，造成的结果是当今的大学生仅仅知道这些定律本身的内容，对定律的应用和深层含义一无所知。例如“如何测定太阳的温度？”这一问题，很多学过遥感课程的大学生依然回答不了。但如果问学生斯特藩-玻尔兹曼定律是什么，很多学生却能清晰地回答。稍微看看历史，斯特藩恰恰就是使用他的斯特藩-玻尔兹曼定律得到太阳表面温度的，这极大地启发了我们对遥远事物的感知。

再比如今天的“太阳常数”一定要在人造卫星上测定，而不能在地球表面测定，这是因为早期的物理学家就犯过这种错误。他们由于都没有考虑到地球上大气对光的吸收，而使“太阳常数”比今天的数值要小一半。如果你知道了这些历史，那么在讨论“太阳常数”时，你就会时时刻刻警惕大气对它的巨大干扰。但如果你不知

道这些历史，你就不知道测定“太阳常数”的目的是什么。

第二部分讲解遥感数字图像的处理。这是目前遥感数字图像应用最广泛的问题。大家知道，以前的遥感图像都以像片形式存储、解译，而今天面对计算机技术的迅猛发展，图像都要数字化。怎样处理这些数字化的遥感图像，本书从原始遥感图像的开始接收到最后校正后的遥感影像的应用，从遥感数字图像最初的获取、存储、显示，到最后对遥感影像进行图像校正、图像增强、图像分类，都一一做了明确的阐述，而这些内容也是遥感应用中最基本的内容。

本书在编写过程中参考了多种材料，参加编写的还有浙江师范大学的周晓兰、马永俊同志，以及湖北文理学院的聂芳同志。全书由赵虎统稿。但囿于编者水平，书中还有很多不足之处，还请读者批评指正（意见或建议请发邮件，邮箱地址：Arthur@pku.org.cn）。

最后，感谢国家基金委（项目名称：一种测定月球表面密度的新方法探索与研究；项目批准号：40802083）和湖北文理学院，他们给了我们一笔基金，使我们能安心地工作与写书。

编 者

2018年9月

# 目 录



---

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 遥感的基本概念 .....	1
1.2 遥感的发展历史和趋势 .....	1
1.3 我国遥感的发展历史 .....	4
第 2 章 电磁辐射与电磁辐射定律 .....	8
2.1 电磁波的特征 .....	8
2.2 电磁波谱 .....	19
2.3 电磁辐射定律 .....	21
2.4 太阳辐射及大气对辐射的影响 .....	38
2.5 地球的热辐射与地物的反射波谱特征 .....	48
第 3 章 遥感数字图像的获取与存储 .....	53
3.1 遥感平台与传感器的特征 .....	53
3.2 遥感数字图像的获取与数据格式 .....	60
3.3 遥感数字图像的级别与图像特征 .....	66
第 4 章 遥感数字图像的统计特征 .....	70
4.1 数字图像的直方图 .....	70
4.2 直方图的线性拉伸 .....	73
4.3 直方图的均衡化 .....	75
4.4 直方图的规定化 .....	77
4.5 单波段图像的统计特征 .....	79
4.6 多波段图像的统计特征 .....	80
第 5 章 图像的色彩体系与彩色合成 .....	82
5.1 颜色体系 .....	82
5.2 色彩变换 .....	87

5.3	数字图像的彩色合成	89
第 6 章	遥感数字图像的校正	93
6.1	辐射传输与辐射校正	94
6.2	遥感图像的几何纠正	98
第 7 章	图像的数据压缩与图像变换	107
7.1	主成分变换	107
7.2	缨帽变换	108
7.3	傅里叶变换	112
7.4	滤波器	118
7.5	同态滤波	122
第 8 章	数字图像的滤波	125
8.1	图像噪声	125
8.2	图像平滑	128
8.3	图像锐化	133
8.4	代数运算	139
第 9 章	微波(雷达)遥感	143
9.1	雷达遥感与侧视雷达	143
9.2	合成孔径侧视雷达的数字成像处理	151
9.3	干涉合成孔径雷达(INSAR)的基本原理	153
9.4	侧视雷达图像的特征	157
第 10 章	遥感图像分类与遥感制图	165
10.1	遥感图像分类概述	165
10.2	非监督分类	167
10.3	监督分类	174
10.4	遥感制图	176
第 11 章	高光谱遥感与偏振光遥感	179
11.1	高光谱遥感的特点	179
11.2	偏振光遥感	181
参考文献		187

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 遥感的基本概念

遥感 (Remote Sensing) 是一种远距离的, 不直接接触目标地物, 利用地物的电磁波特性进行地物识别的探测技术和方法。它通过对目标进行探测, 获取目标地物的特征信息, 然后对所获取的信息进行加工处理, 从而实现对目标进行定位、定性或定量的描述。

利用从目标反射和辐射来的电磁波, 接收从目标反射和辐射来的电磁波信息的设备称之为传感器 (Remote Sensor), 例如热红外成像仪、摄影相机。而搭载这些传感器的载体称之为遥感平台 (Platform), 如 U2 侦察机、无人机、人造地球卫星等。由于地面目标的种类及其所处环境条件的差异, 同时也由于地面目标物理性质的不同, 其反射或辐射不同波长电磁波的能力不同。遥感正是利用这个性质, 根据地面不同目标反射或辐射电磁波的特性不同, 通过观察和判读目标地物的电磁波信息, 来判断所监测的目标地物的物理属性和几何特征。

遥感的应用领域非常广泛, 根据其尺度不同, 可以应用在大气、海洋和陆地监测方面。从近距离的摄影测量到大范围的陆地、海洋信息的采集, 以至全球范围内的环境、气候变化监测, 遥感技术都可以发挥巨大的作用。例如: 在陆地遥感中, 利用遥感技术可以进行全球范围内的植被分布监测、农作物类别和长势监测、环境变化监测, 进而制作全球或者局部区域的影像地图, 掌握全球范围内的自然环境变化; 在海洋遥感中, 利用遥感技术可以监测海水温度、海面水位、海水组成、浑浊状态等; 在大气遥感中, 利用遥感技术可以调查大气中的二氧化碳、甲烷等各种气体的组成, 可以监测气团的生成、运动方向、速度, 进而进行准确的天气预报。目前, 气象数值预报的准确性和精确度如此之高, 都是得益于气象卫星的发射。

## 1.2 遥感的发展历程和趋势

遥感这一名词最早被提出是在 20 世纪 60 年代。最早使用“遥感”一词的是 1960



年美国海军研究局的艾弗林·普鲁伊特 ( Evelyn. L. Pruitt )。他为了全面概括探测目标的技术和方法, 把以摄影方式和非摄影方式获得被探测目标的图像或数据的技术称作“遥感”。1961年, 在美国国家科学院 ( National Academy of Sciences ) 和国家研究理事会 ( Nation Research Council ) 的资助下, “环境遥感国际讨论会”在密歇根大学的 Willow. Run 实验室召开, 遥感一词被正式采用。

遥感根据传感器与地面距离的远近划分为航空遥感和航天遥感。

航空遥感技术主要发展于两次世界大战期间, 当时主要应用在军事上。在战争期间, 航空摄影成了军事侦察的重要手段, 并形成了一定的规模。我们知道, 1903年, 莱特兄弟发明了人类历史上第一架飞机。1915年年底, 世界上就有了第一台航空摄影专用相机, 此后航空摄影技术被广泛应用于军事侦察领域。在此之前, 人们还用气球、鸽子、风筝等作为摄影平台进行摄影。例如 1858年, Gaspard Felix Tournachon 用气球拍摄了巴黎的“鸟瞰”照片, 可以说是最早的航空摄影。第一次世界大战结束后, 航空摄影方法开始应用在地质、土木工程中的勘察和制图, 农业中的牧场、土地调查等民用领域也得到应用。第二次世界大战中, 随着伪装技术的不断改进, 普通的航空照相技术已不能完全准确地获取敌方目标的信息, 因此出现了彩色、红外和多光谱照相技术。

航天遥感, 又称为卫星遥感, 因为传感器搭载在卫星之上, 离地面高度至少为 400 km, 其广泛的应用始于 20 世纪 70 年代, 这些都得益于人造卫星的成功发射。1957年 10 月 4 日, 第一颗人造地球卫星在苏联发射成功, 这意味着航空遥感开始向航天遥感发展。1958年 2 月 1 日, 美国发射了第一颗人造卫星——“探险者 1 号”。我国发射的第一颗人造卫星是“东方红 1 号”, 时间是 1970年 4 月 24 日。目前, 人造卫星已经成为发射数量最多、用途最广、发展最快的航天器件。而在卫星上安装各种传感器, 可以用于各种科学探测和研究、天气预报、土地资源调查、土地利用、区域规划、通信、跟踪、导航等各个领域。

下面讲一下美国陆地卫星发展规划。美国陆地卫星计划是目前运行时间最长的地球观测计划。该计划在 1966 年发起时被称为“地球资源卫星计划 ( Earth Resources Technology Satellites Program )”。此计划 1969 年在休斯斯塔芭芭拉研究中心 ( Hughes Santa Barbara Research Center ) 启动, 该中心率先进行设计和制造 3 架多光谱扫描仪; 同一年, 人类登月。9 个月后, 也就是 1970 年秋天, 陆地卫星需要搭载的多光谱扫描仪 ( MSS ) 的原型机完成, 并在测试中成功对美国优胜美地国家公园的著名景点“半圆顶”进行了扫描。

1972 年美国发射了第 1 颗地球资源技术卫星 ERTS-1, 1975 年发射了第 2 颗地球资源技术卫星, 由于在第 2 颗卫星发射前整个计划更名为陆地卫星 ( LandSat ) 计划, 因此第 1 颗地球资源技术卫星 ERTS-1 被称为 LandSat-1, 第 2 颗卫星被称

为 LandSat-2。1979 年，美国总统吉米·卡特签署 54 号总统令，将此计划从美国国家航空航天局转移到美国国家海洋和大气管理局，建议发展成长期的卫星计划，在陆地卫星 3 号之后追加发射 4 颗卫星，直到 LandSat-7，并建议成立民营的陆地卫星公司。后来在 1985 年，地球观测卫星公司（EOSAT）成立，该公司为美国国家海洋和大气管理局挑选美国休斯飞机公司和 RCA 公司合作成立，双方签下 10 年合约。

该计划原本发射 7 颗卫星后不再发射新的卫星，想用高分辨率卫星取代这种低分辨率的卫星，但在实际应用中，这个计划并没有结束。LandSat-7 是 1999 年 4 月 15 日发射的，至今仍能正常作业，但扫描路线校正器有缺陷（2003 年 5 月发现），影响了影像图的使用。1994 年，美国总统克林顿签署法案，宣布解除 1m 分辨率卫星影像商业销售的禁令。这样在 21 世纪初，大量的高分辨率卫星成功发射并应用于民用商业中。由于高分辨率卫星其地面分辨率（1m）远远优于 Landsat 卫星（15m）的分辨率，因此今天的城市遥感监测都基本上使用 IKONOS、QuickBird、EarthEye 这样的高分影像卫星。

高分影像卫星尽管优势明显，但是由于其数据量庞大，对于大范围陆地监测反而不利，因此 2013 年 2 月 11 日，美国又延续这个计划，发射了陆地卫星 8 号，这是目前此计划最新的卫星。它在美国范登堡空军基地搭载擎天神五号运载火箭 401 型发射成功。该卫星携带陆地成像仪（Operational and Imager，简称“OLI”）和热红外传感器（Thermal Infrared Sensor，简称“TIRS”），它们属于扫描式成像仪。TIRS 是有史以来最先进，性能最好的热红外传感器。TIRS 将收集地球热量流失，目标是了解所观测地带水分消耗，特别是干旱地区水分消耗。它们将持续提供宝贵的地球数据和图像，用于农业、教育、商业、科学和政府领域。

2015 年 4 月，NASA 和 USGS 又正式宣布将继续研发新一代 LandSat-9 号卫星，预期将于 LandSat 卫星计划 50 周年的 2023 年发射并接替 LandSat-8 号的任务。

在美国推行陆地卫星计划的同时，其他国家也开展了自己的对地观测系统研究。例如 20 世纪 80 年代，法国相继发射了 SPOT 系列卫星，欧空局相继发射了 ERS 系列卫星，日本发射了 JERS 系列卫星，印度相继发射了 IRS 系列卫星，俄罗斯发射了 ALMA22 卫星（1996 年）和 RESOURCES2 卫星（1995 年），这些卫星多数已进入商业运行阶段，众多商业遥感卫星的应用使航天遥感技术进入了全面发展和应用的新阶段。

除我们常说的可见光遥感技术外，热红外遥感和微波遥感技术是近十几年来发展起来的具有美好应用前景的两类遥感技术。利用热红外成像技术可以探测到地球表面的温度变化情况，而地球表面的温度又和地表层中的热辐射有关。由于热红外成像技术主要是利用地面目标的热辐射信息来成像，因此可以日夜获得目标的数据，

是一种全天时的遥感技术。微波遥感技术是地面目标反射从雷达发射出来的电磁波成像的，由于它采用主动式地向目标发射电磁波的探测方法，并且微波波段不受阴雨天的干扰，因此可以在阴雨天和夜晚成像，也是一种全天候的遥感技术。

随着传感器技术、航空和航天平台技术、数据通信技术的发展，现代遥感技术已经进入一个能够动态、快速、准确、多手段提供多种对地观测数据的新阶段。新型传感器不断出现，已从过去的单一传感器发展到现在的多种类型的传感器，并能在不同的航天、航空遥感平台上获得不同空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率的遥感影像。现代遥感技术的显著特点是尽可能地集多种传感器、多级分辨率、多波段和多时相技术于一身，并与全球定位系统（GPS）、地理信息系统（GIS）、惯性导航系统（INS）等系统相结合以形成智能型传感器。

目前，遥感应用正由定性向定量、静态向动态方向发展。航天遥感影像的空间分辨率已经达到米级，甚至是分米级，例如 QuickBird 卫星，其全色波段影像的分辨率是 0.61 m，等于对 LandSat 卫星影像放大了 25 倍。光谱分辨率已达到纳米级，波段数已增加到数十甚至几百个。卫星的回归周期可达几天甚至十几小时，如 NOAA 的一颗卫星，每天可对地面同一地区进行两次观测。微波遥感已逐渐采用多极化技术、多波段技术及多种工作模式。加拿大 1995 年发射的 RADARSAT、欧空局的 ERS-1、日本的 JERS-1 和印度的 IRS-1C 等卫星中的微波传感器已采用了多极化技术、多波段技术和多种工作模式。

与遥感应用紧密相关的遥感信息处理理论和技术也有了实质性的进展，在遥感信息模型研究方面，已有热扩散系数遥感信息模型、表观热惯量遥感信息模型、土壤含水量遥感信息模型、作物旱灾损失估算遥感信息模型、土壤侵蚀量遥感信息模型、土地生产潜力遥感信息模型、三维海洋温度遥感信息模型、地质构造应力场遥感信息模型等许多成熟的研究成果。

在遥感数据处理软件方面，国际上相继推出了一批高水平的遥感影像处理商业软件包，如加拿大 ERM 公司研制的 ER MAPPER、美国 ERDAS 公司推出的 ERDAS IMAGINE、美国 Exelis Visual Information Solutions 公司的旗舰产品 ENVI 等。所有这些都为遥感影像的快速处理奠定了坚实的基础。

### 1.3 我国遥感的发展历程

从 20 世纪世界 70 年代开始，我国先后发射了系列返回式遥感卫星。1970 年 4 月 24 日，我国发射了第一颗人造卫星“东方红 1 号”，随后又发射了数十颗不同类

型的卫星。太阳同步卫星“风云 1 号”(FY-1A, 1B)和地球同步轨道卫星“风云 2 号”(FY-2A, 2B)的发射,以及返回式遥感卫星的发射与回收,使我国开展宇宙探测、通信、科学实验、气象观测等研究有了自己的信息源。

1999 年 10 月 14 日,中国-巴西地球资源遥感卫星 CBERS-1 的成功发射,以及后续的中巴地球资源卫星 02 星、02B 星、02C 星的发射,凝聚着中巴两国航天科技人员十几年的心血。它们的成功发射与运行开创了中国与巴西两国合作研制遥感卫星、应用资源卫星数据的广阔领域,结束了中巴两国长期单纯依赖国外对地观测卫星数据的历史,被誉为“南南高科技合作的典范”。2014 年 12 月 7 日,中国和巴西联合研制的地球资源卫星 04 星在太原成功发射升空。同时,“北斗”GPS 定位导航卫星及“清华 1 号”小卫星的成功发射,丰富了我国卫星的类型。随着我国遥感事业的进一步发展,我国的地球观测卫星及不同用途的多种卫星也逐渐形成了观测体系。

自 2006 年开始,我国开始实施《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》。其中,高分辨率对地观测系统(简称“高分专项”)是此纲要中所确定的 16 个重大专项之一。高分辨率对地观测系统由天基观测系统、临近空间观测系统、航空观测系统、地面系统、应用系统等组成,于 2010 年经过国务院批准启动实施。2013 年 4 月 26 日,首发星“高分一号”在酒泉卫星发射中心成功发射。计划至 2020 年前后建成全系统。中国高分辨率对地观测系统工程将统筹建设基于卫星、平流层飞艇和飞机的高分辨率对地观测系统,完善地面资源,并与其他观测手段结合,形成全天候、全天时、全球覆盖的对地观测能力。

高分辨率对地观测系统计划发射 9 颗卫星,是分别用于农业、城市、环保等部门的卫星系列。到目前为止,该计划已经成功发射 8 颗卫星,这样基本打造出新一代高分辨率对地观测系统。可以说,“高分专项”是一个非常庞大的遥感技术项目,在这些卫星中,“高分一号”为光学成像遥感卫星;“高分二号”也是光学遥感卫星,但全色和多光谱分辨率比一号分别都提高一倍,达到了 1 m 全色和 4 m 多光谱;“高分三号”为 1 m 分辨率的雷达遥感;“高分四号”为地球同步轨道上的光学卫星,全色分辨率为 50 m;“高分五号”是高光谱遥感卫星,不仅装有高光谱相机,而且拥有多部大气环境和成分探测设备,如可以间接测定 PM<sub>2.5</sub> 的气溶胶检测仪;“高分六号”的载荷性能与“高分一号”相似;“高分七号”则属于高分辨率空间立体测绘卫星。“高分”系列卫星覆盖了从全色、多光谱到高光谱,从可见光到雷达,从太阳同步轨道到地球同步轨道等多种类型,构成了一个具有高空间分辨率、高时间分辨率和高光谱分辨率能力的对地观测系统。

表 1-1 是我国高分卫星发射时间与搭载的传感器列表。

从传感器和获取的影像数据来看,高分一号卫星所获取的影像数据包括 2 m 分

分辨率全色（黑白）/8 m 分辨率多光谱（彩色）的数据，以及 16 m 分辨率多光谱宽幅（200 km）影像。高分二号（GF-2）卫星比高分一号卫星分辨率更高，其空间分辨率优于 1 m，搭载两台高分辨率 1 m 全色、4 m 多光谱相机，具有亚米级空间分辨率、高定位精度和快速姿态机动能力等特点，有效地提升了卫星综合观测效能，达到了国际先进水平。高分二号是我国目前分辨率最高的民用陆地观测卫星，星下点空间分辨率可达 0.8 m，标志着我国遥感卫星进入了亚米级“高分时代”。这些卫星获得的数据，可以大量应用在国土资源部、住房和城乡建设部、交通运输部和国家林业局等部门，同时还将为其他用户部门和有关区域提供示范应用服务。

表 1-1 高分影像卫星系列发射时间表

发射时间	星名	传感器
2013-04-26	GF-1	2 m 全色/8 m 多光谱/16 m 宽幅多光谱
2014-08-19	GF-2	1 m 全色/4 m 多光谱
2016-08-10	GF-3	1 m C-SAR
2015-12-09	GF-4	50 m，地球同步轨道凝视相机
2018-05-09	GF-5	可见短波红外高光谱相机 全谱段光谱成像仪 大气气溶胶多角度偏振探测仪 大气痕量气体差分吸收光谱仪 大气主要温室气体监测仪 大气环境红外甚高分辨率探测仪
2018-06-02	GF-6	2 m 全色/8 m 多光谱/16 m 宽幅多光谱
计划 2019 年	GF-7	高空间分辨率立体测绘
2015-06-26	GF-8	光学遥感卫星
2015-09-14	GF-9	亚米级光学遥感卫星

高分三号卫星为 1 m 分辨率雷达遥感卫星，也是中国首颗分辨率达到 1 m 的 C 频段多极化合成孔径雷达（SAR）成像卫星，由中国航天科技集团公司研制。高分四号运行在距地 36 000 km 的地球静止轨道上，与此前发射的运行于低轨的高分一号、高分二号卫星组成星座，具备高时间分辨率优势。高分四号卫星是中国第一颗地球同步轨道遥感卫星，采用面阵凝视方式成像，具备可见光、多光谱和红外成像能力，可见光和多光谱分辨率优于 50 m，红外谱段分辨率优于 400 m，设计寿命 8 年，通过指向控制，可实现对中国及周边地区的观测。

目前，“高分专项”累计分发数据约 1 500 万景，数据量超过我国以往遥感卫星历史数据总和，已全面进入了各主要应用领域。由于“高分专项”的实施和高分数据的应用，近年来在我国国内市场，国外卫星数据价格大幅度降低，分辨率低于 2 m 的国外卫星数据已基本退出国内市场。总之，高分辨率对地观测系统的实施，将为中国现代农业、防灾减灾、资源环境、公共安全等重要领域提供信息服务和决策支持，满足国家经济建设和社会发展需求，对于促进中国空间基础设施建设，培育卫星应用企业集群和产业链，推动卫星应用和战略性新兴产业发展具有重大意义。

## 第2章 电磁辐射与电磁辐射定律

不同类型的地物具有反射或辐射不同波长电磁波的特性，遥感技术就是利用不同地物反射和辐射电磁波的不同特性来探测地面目标的。因此，关于电磁波辐射的基本原理就成为遥感技术的理论基础。本章详细讲述电磁辐射定律。

### 2.1 电磁波的特征

#### 2.1.1 电磁波的概念与波动说

电磁振动的传播是电磁波，是能量传递与释放的一种方式。该学说最早是惠更斯提出的。为直观起见，以最简单的绳子抖动为例，在绳子的一端上下振动，振动就会沿绳子向前传播。从整体看，振动给人的感觉是波峰和波谷不断向前运动，但实际上，绳子上的质点仅仅做上下运动，而并没有向前运动。可见波动是各质点在平衡位置振动而能量向前传播的一种现象。

如果质点的振动方向与波的传播方向相同，称为纵波。例如弹簧的振动，振动方向与波的传播方向相同。声波也是一种纵波。若质点振动方向与波的传播方向垂直，称为横波。如上述绳子的抖动产生的波。水波也是横波。电磁波是典型的横波，而且比水波、机械波复杂。在电磁波中，电场的振动与磁场的振动方向都与电磁波的传播方向垂直。

根据几何原理，过一点且垂直于某一直线的直线有无数条，但过一点且垂直于某一直线的平面有且仅有一个。实际上这些无数条直线的集合就是这个平面。因此，垂直于电磁波的传播方向的直线可以很多，这些直线的方向可以代表电磁波电场的振动方向。在电磁波中，电场可以在这个平面内各个方向振动，这种现象造成了电磁波的复杂性。

如果在电磁波中，电场的振动方向固定为某一特定方向，其他方向没有振动，那么这样的电磁波就是最简单的电磁波。这种电磁波称为线偏振电磁波。如果电磁

波在这个平面内的不同方向都有振动，电场的振幅大小不相等，那么会形成偏振现象，或称为极化现象。在英语中，偏振和极化是共用同一个英语单词（polarization）的。实际上只要是横波，都存在偏振现象，只是人们必须借助仪器才能觉察到偏振现象的存在。图 2-1 为电磁波的传播示意图。

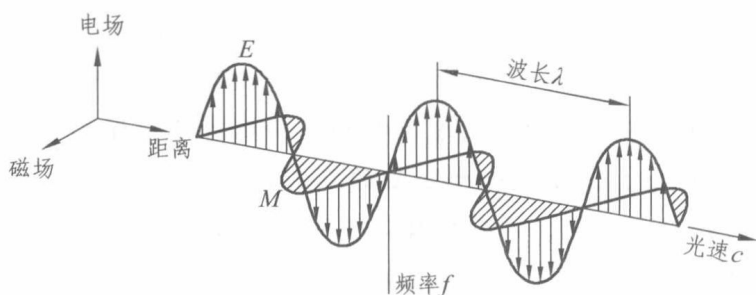


图 2-1 电磁波的传播示意



惠更斯（克里斯蒂安·惠更斯，Christiaan Huygens，1629 年 4 月 14 日—1695 年 7 月 8 日），荷兰物理学家、天文学家和数学家，土卫六的发现者。他还发现了猎户座大星云和土星光环。

惠更斯是波动学说的创立者。在光学方面，他创立了光的波动说，并把以太作为光传播的介质，在《光论》一书中提出了惠更斯原理，解释了冰洲石的双折射现象。但由于同时代的牛顿名气要比他大，因此波动说在很长一段时间内没有得到应有的重视，直到 1800 年以后，才引起物理学家的重视。

惠更斯出生在海牙，其父康斯坦丁·惠更斯（Constantine Huygens，1596—1687）为外交家，是数学家笛卡儿的朋友，家境富裕。惠更斯 16 岁后进入莱顿大学学习法律与数学，两年后又转到布雷达的奥兰治学院（Orangetcollege）继续学习，学生时代他接受过笛卡儿的指导。1651 年，他发表了第一篇论文，内容为求解曲线所围区域的面积；1655 年成为法学博士；1663 年成为英国皇家学会会员；1666 年成为荷兰科学院院士，同一年在路易十四的邀请下成为法国皇家科学院院士。利用巴黎天文台（1672 年竣工），他进一步进行了天文观测。

1684 年，他出版了 *Astroscopia Compendiaria*，介绍了他新发明的空中望远镜（Aerial telescope）。1695 年 7 月 8 日，惠更斯死于海牙，被埋葬在 Grote Kerk 大教堂。他指导过莱布尼兹学习数学，与牛顿等人也有交往，终生未婚。

惠更斯一生研究成果丰富，在多个领域都有所建树，许多重要著作是在他逝世后才发表的。在数学方面，他在布莱兹·帕斯卡鼓励之下，1657 年发表了《论



赌博中的计算》，被认为是概率论诞生的标志。同时对二次曲线、复杂曲线、悬链线、曳物线、对数螺线等平面曲线都有所研究。他还发现旋轮线也是最速降线。

在《摆式时钟或用于时钟上的摆的运动的几何证明》《摆钟论》等论文中，惠更斯提出了钟摆摆动周期的公式： $2\pi\sqrt{l/g}$ 。1656年，他设计并制造出了利用摆取代重力齿轮的摆钟。他还研究了完全弹性碰撞，证明了碰撞前后能量和动量的守恒。研究成果在其死后发表于《论物体的碰撞运动》一文中。

在天文学方面，惠更斯研究了透镜的相关物理原理，并发明了惠更斯目镜。1655年，惠更斯提出，土星被一个坚硬的环围住，一个薄又扁，向黄道倾斜的环。他用自制的折射望远镜，首次发现了土星的卫星——土卫六；同年，惠更斯观察到了猎户座大星云并将它画了下来。1659年，他的画被公布在 *Systema Saturnium* 上。1659年，惠更斯利用自己磨制的望远镜，发现了土星的光环。他用他自制的望远镜成功地把星云分成不同的恒星。惠更斯还发现了几个星云和一些双星。

## 2.1.2 电磁波与麦克斯韦方程

1845年，关于电磁现象的三个最基本的实验定律——库仑定律（1785年）、毕奥-萨伐尔定律（1820年）、法拉第定律（1831—1845年）已被总结出来，法拉第的“电力线”和“磁力线”概念已发展成“电磁场概念”。

1855年至1865年，麦克斯韦在全面审视库仑定律、毕奥-萨伐尔定律和法拉第定律的基础上，把数学分析的方法带进了电磁学的研究领域，由此诞生了麦克斯韦方程。麦克斯韦方程如下：

$$\begin{cases} \oiint_S D \cdot dS = q_0 \\ \oiint_S B \cdot dS = 0 \\ \oint_L E \cdot dl = -\iint_S \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS \\ \oint_L H \cdot dl = I_0 + \iint_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot dS \end{cases}$$

1864年，麦克斯韦在安培、法拉第等人的研究基础上，发表了论文《电磁场的动力学理论》，提出电场和磁场以波的形式，并且以光速在空间中传播，并提出光是引起同种介质中电场和磁场中许多现象的电磁扰动，同时从理论上预测了电磁波的存在。

麦克斯韦认为：当电磁振荡进入空间时，变化的磁场激发了涡旋电场，变化的