

丛 书 序

古往今来，人类所有活动几乎都与地理位置息息相关。随着科学技术的快速发展与普及，地理信息科学与技术以及在此基础上发展起来的“数字地球”“智慧城市”等，在人们的生产和生活中发挥着越来越重要的作用。

近年来，我国地理信息科学高等教育蓬勃发展，为我国地理信息产业的发展提供了重要的理论、技术和人才保证。目前，我国已有近 200 所高校开设地理信息科学专业，专业人才培养模式也开始从“重理论、轻实践”向“理论与实践并重”转变。然而，现有的地理信息科学专业教材建设，一方面滞后于专业人才培养的实际需求，另一方面，也跟不上地理信息技术飞速发展的步伐。同时，新技术带来的教学方式和学生学习方式的变化，也要求现有教材体系及配套资源做出适应性或引领性变革。在此背景下，科学出版社与中国地理信息产业协会教育与科普工作委员会共同组织策划了“普通高等学校地理信息科学教学丛书”。该丛书从学科建设出发，邀请海内外地理信息科学领域著名学者组成编委会，并由编委会推荐知名专家或从事一线教学的教授担任各分册主编。在编撰中注重教材的科学性、系统性、新颖性与可读性的有机结合，强调对学生基本理论、基本技能与创新能力的培养。丛书还同步启动配套的数字化教学与学习资源建设，希望借助新技术手段为地理信息科学专业师生提供方便快捷的教学与实习途径。相信该丛书的出版，会大大提升该专业领域本科教材质量，优化辅助教学资源，对提高理论与实践并重的专业人才培养质量起到积极的引领作用。

我相信，在丛书编委会及全体编撰人员的共同努力下，“普通高等学校地理信息科学教学丛书”一定会促进我国新一代地理信息科学创新人才的培养，从而为我国地理信息科学及相关专业的发展做出重要的贡献。

中国科学院院士
中国工程院院士



丛书前言

地理信息，在经济全球化和信息技术快速发展的 21 世纪，已然在人类经济发展与社会生活中扮演重要角色。自 1992 年 Michael F. Goodchild 提出地理信息科学应当是一门独立的学科以来，在学界的共同努力下，已经在空间数据采集与处理、地学数据挖掘与知识发现、空间分析与可信性评价、地学建模与地理过程模拟、协同 GIS 与可视化、地理信息服务、数字地球与智慧城市、虚拟地理环境、GIS 普及及高等教育等诸多研究方面取得了重要进展。与此同时，由于地理信息科学的概念以及研究背景、目标的复杂性，目前关于地理信息科学的核心理论框架体系，仍然存在不同的理解，需要广大学者深入探索与凝练。

在 2012 年教育部颁布的《普通高等学校本科专业目录(2012 年)》中，地理科学类专业中的“地理信息系统”更名为“地理信息科学”，标志着地理信息的高等教育进入一个崭新的发展阶段。随着我国各项事业及各相关部门信息化进程的加快，地理信息相关专业人才具有广泛的社会需求。地理信息科学专业人才应当具备坚实的地理学、测绘科学及现代信息技术基础知识、具有处理与分析地理信息的能力，能从事地理信息科学问题的研究与开发，能胜任包括城市规划、资源管理、环境监测与保护、灾害防治等领域的地理信息资源开发、利用与管理工作。地理信息科学专业人才的培养，对于全面提升我国地理信息产业与地理信息科学发展水平具有极其重要的作用。

中国地理信息产业协会教育与科普工作委员会，多年来通过多种途径，积极推进我国地理信息高等教育水平提高，所组织的全国高校 GIS 教育研讨会、全国高校 GIS 青年教师教学技能培训与大赛、全国大学生 GIS 技能大赛、全国 GIS 博士生论坛等活动，都已经成为国内有影响的品牌活动。高校专业教材是本科教学的重要资料，近十年来，我国已出版多套有关地理信息系统的系列教材，在专业教学中发挥了十分重要的作用，其中，由科学出版社出版的“高等学校地理信息系统教学丛书”，在我国 GIS 教育界产生了重要影响。在此基础上，科学出版社、教育与科普工作委员会联合组织编撰的“普通高等学校地理信息科学教学丛书”，拟面对学科发展的新形势，系统梳理、总结与提炼以往的研究成果，编写出集科学性、时代性、实用性于一体的系列教材。

为保证本丛书顺利完成，在工作委员会及科学出版社的协调下，首先成立了由地理信息科学高等教育领域的知名学者组成的丛书编写委员会。其中，由我国该领域院士及知名学者任顾问，对丛书进行方向性指导，各教材主要编写人员既有我国地理信息科学领域的知名专家，又有新涌现的优秀青年学者，他们对地理信息科学的教育教学有很强的责任心，对地理信息学科的发展与创新开展了广泛而深入的研究；他们在学术研究和教学工作中亦能紧密联

系、广泛开展学术与教学的交流合作。

本丛书将集成当前国内外地理信息科学研究领域的主要理论与方法，以及编著者自身多年的研究成果，对今后相关研究工作有十分重要的参考价值。我们希望本丛书不仅适合于地理信息科学专业的在校学生使用，而且也可作为相关专业高校教师和研究人员和工作的参考书。本丛书的出版发行，盼能推动我国地理信息科学的科学研究与拓展应用，促进中国地理信息产业的发展。

国家级教学名师

汤国安

2014年8月4日

第四版前言

随着遥感观测技术的迅速发展，遥感数字图像在生活和社会经济建设中发挥着越来越重要的作用。遥感图像不仅是科学研究和工程设施建设的基础数据，同时已经成为人们生活的一部分。遥感图像不断扩展着人类认知世界的广度和深度。

本教程第一版于 2007 年出版，由韦玉春、汤国安、杨昕、汪闽编写。教程第二版于 2015 年出版，重点是增加图像处理实例，完善基本概念的表达、定义和图像处理方法，统一不同章节中的文字表述方式，补充更多的参考论文引注。教程第三版于 2019 年出版，调整了一些内容的前后次序，增补了新的资料。教程第四版以第二版和第三版为基础，面向大类培养和专业教学的要求，根据遥感的发展：修改了原来的一些表述，进一步统一了教材中的专业概念；调整了第三版中的部分章节结构，对“图像校正”一章的内容进行了较大幅度的修改，适当减少了“图像分割”一章中的“数学形态学”部分的内容，增补了一章新的内容“图像特征的提取和选择”。

遥感数字图像处理继承和使用了数字图像处理和分析的方法，并具有自身的特色。本次修订的主要目的是期望将地学知识、数学原理、数据科学和计算机视觉等有机地结合起来，以进一步提高处理的精度和效率，强化培养批判性思维。

本教程参考了多种材料，可能的不当之处还请读者不吝指教。

建议读者结合作者主持的国家级一流本科课程(线上)“遥感数字图像处理”和国家资源共享课程“遥感地学分析”(网址见附录 4)中的相关资料使用本教程。我们建立了 QQ 群(群号：214778640)，用于索取遥感数据文件和讨论教材使用中遇到的问题。

作者录制了部分重点和难点内容的讲解视频，可通过扫描书中的二维码直接观看。

作者还提供了部分彩图，请扫描二维码  浏览。

各章的思考题并不限于本书中的内容，还请读者自行查阅相关资料。

韦玉春

2026 年 4 月

南京师范大学地理科学学院，仙林

第三版前言

随着对地观测技术的迅速发展，遥感图像在社会生活和经济建设中发挥着越来越重要的作用。遥感图像已不仅仅是科学研究和工程建设的基础数据，同时，伴随着 Google Earth 的使用，已经成为普通人生活的一部分。遥感图像正不断扩展人类对世界的认知广度和深度。

本教程第一版由韦玉春、汤国安、杨昕编写，汪闽负责编写了第十章中的高空间分辨率图像处理内容。教程第二版由韦玉春和汪闽进行修编，重点是修订第一版中错误，增加图像处理实例，完善基本概念的表达、定义和图像处理方法，统一不同章节中的文字表述方式，补充更多的参考文献引注。教程第三版由韦玉春修编，调整了一些内容的前后次序，根据当前遥感技术的发展进行了增补。详细的修订说明、略去的第二版内容，以及书中提到的相关数据和彩图已上传至网上(获取方式见附录 4)。

研究生丛茂勤、罗宏、袁兆杰等帮助进行了基础材料和文字的整理工作，特此致谢。

遥感数字图像处理与其他学科相比显得非常年轻。如何将地学专业知识与数学原理和方法有机地结合起来进行更有效的图像处理，还需要做更多的工作。

本教程在编写中参考了多种材料，但由于受学识水平的限制及遥感图像处理复杂性的限制，难免会有不当之处，还请读者不吝指教。

“爱课程”网站中的在线开放课程“遥感数字图像处理”和资源共享课程“遥感地学分析”提供了遥感图像处理应用实例和资料，可供读者参考使用。

各章的思考题并不限于书中的内容，还请读者自行查阅相关资料后回答。

作者录制了相关重点和难点视频，读者可通过扫描书中二维码观看。

韦玉春

2018 年 11 月

南京师范大学地理科学学院，仙林

第二版前言

随着对地观测技术的迅速发展，遥感图像在社会生活和经济建设中发挥着越来越重要的作用。遥感图像已不仅仅是科学研究和工程建设的基础数据，同时，伴随着 Google Earth 的使用，已经成为普通人生活的一部分。

遥感数字图像的处理，就是对遥感数字图像的计算机处理。与工业和医学数字图像不同，遥感数字图像类型更为多样，涵盖的内容和处理对象更为复杂。因此，遥感数字图像的处理，不仅需要掌握已有的数字图像处理方法，而且需要具有相应的地学知识，是科学和艺术的有机结合。

本教程面向大学本科教学，按照“基础知识—图像处理应用”来组织相关内容。教程分 10 章。

第 1 章主要介绍图像、遥感数字图像和遥感数字图像处理的基本概念、软硬件要求和特点。第 2 章重点介绍获取图像的遥感传感器特征、图像的数据格式和级别。第 3 章介绍遥感图像模型、图像表示方法、基本的统计特征和图像处理中需要掌握的基本概念。第 4 章主要介绍图像的显示和拉伸。第 5 章图像校正属于图像的预处理工作，其目的是校正成像过程中各种因素影响导致的图像失真。第 6 章和第 7 章是图像增强方法。第 8 章图像分割用于将图像划分为不同的区域或从背景中分割出感兴趣的地物目标并进行后处理，主要用于高空间分辨率图像。第 9 章介绍分类的基本原理、基本概念和常用的方法，对分类方法和存在的问题进行阐述和总结。第 10 章主要讲述遥感信息提取的方法，包括图像特征、高光谱分辨率、高空间分辨率图像的处理和变化检测。

需要说明的是，教程中的方法适用于多光谱、高光谱和高空间分辨率图像，主要的内容也可用于微波图像的处理。但是，考虑到微波图像成像原理的复杂性和预处理的复杂性，教程中没有包括微波图像处理的内容。

本教程第一版主要由韦玉春、汤国安、杨昕编写，汪闽负责编写了第十章中的高空间分辨率图像处理内容。教程第二版由韦玉春和汪闽进行修编，重点是修订第一版中错误，增加图像处理实例，完善基本概念的表达、定义和图像处理方法，统一不同章节中的文字表述。为了便于深入学习，增加了更多的参考论文。此外，考虑到篇幅问题，部分内容以 PDF 文件方式保存在本书所附的光盘中。

研究生袁兆杰、包玲、徐宁、张静、徐彬、彭礼红、杨大伟、单静、徐建军、徐谨等进行了基础材料和文字的整理工作，特此致谢。

遥感数字图像处理与其他学科相比显得非常年轻。如何将地学专业知识、图像处理原理和处理方法有机地结合起来进行更有效的图像处理，还需要做更多的工作。

本教程虽然在编写中参考了多种材料，但由于受学识水平以及遥感图像处理复杂性的限制，难免会有不当之处，恳请读者不吝指教。

“爱课程”网站中的“遥感地学分析”课程提供了遥感图像处理应用实例和资料，读者可以参考使用。

另外，各章的思考题并不限于本书的内容，需要读者自行查阅相关资料来回答。

韦玉春

2014年7月

南京师范大学地理科学学院，仙林

目 录

丛书序

丛书前言

第四版前言

第三版前言

第二版前言

第 1 章 概论	1
1.1 图像和遥感数字图像	1
1.2 遥感数字图像处理	2
1.3 数字图像处理的两个观点	7
1.4 基础理论和知识要求	8
1.5 章节内容组织	8
思考题	11
第 2 章 遥感数字图像的获取和存储	13
2.1 遥感数字图像的获取	13
2.2 遥感数字图像的类型	25
2.3 遥感数字图像的存储	26
2.4 遥感数据	30
2.5 遥感数据的查询和下载	32
2.6 本书遥感数据说明	34
思考题	35
第 3 章 遥感数字图像表示和度量	37
3.1 遥感图像模型	37
3.2 遥感图像的数字表示	40
3.3 图像的统计	42
3.4 图像中像素的空间关系	50
3.5 图像特征	52
3.6 遥感数字图像处理的空间概念和对象	53
思考题	55
第 4 章 图像的显示和拉伸	57
4.1 数字图像的显示	57
4.2 图像的彩色合成	64
4.3 图像拉伸	71
思考题	81
第 5 章 图像校正	83

5.1 辐射传输和辐射误差	83
5.2 辐射定标与辐射校正	91
5.3 用户实施的辐射校正	93
5.4 遥感图像的几何误差	101
5.5 几何纠正的内容和模型	102
5.6 基于多项式模型的几何精纠正	105
5.7 图像匹配	116
思考题	117
推荐阅读	118
第6章 图像变换	119
6.1 傅里叶变换	119
6.2 波段运算	125
6.3 K-L 变换	131
6.4 缨帽变换	135
6.5 彩色变换	142
6.6 数字图像融合	148
思考题	149
第7章 图像滤波	150
7.1 基本概念	150
7.2 空间域图像平滑	157
7.3 空间域图像锐化	163
7.4 频率域滤波	176
7.5 空间域滤波与频率域滤波的对比	183
思考题	183
第8章 图像分割	185
8.1 图像分割方法和流程	185
8.2 典型的图像分割方法	187
8.3 数学形态学方法	201
8.4 区域标识	211
思考题	213
第9章 图像特征的提取和选择	214
9.1 概述	214
9.2 图像特征的类型和构成	215
9.3 光谱类特征	215
9.4 结构类特征	215
9.5 几何类特征	223
9.6 特征提取	224
9.7 特征选择	224
思考题	228

第 10 章 遥感图像分类	229
10.1 概述	229
10.2 相似性度量和分类器	232
10.3 工作流程	240
10.4 非监督分类	244
10.5 监督分类	249
10.6 其他分类方法	257
10.7 分类后处理	273
10.8 图像分类的精度评估方法	274
10.9 遥感分类制图	278
10.10 提高分类精度的策略	280
拓展阅读	282
思考题	283
第 11 章 遥感信息提取	285
11.1 遥感信息的类型	285
11.2 类别信息的提取	288
11.3 目标信息的提取	288
11.4 成分信息的提取	304
11.5 变化信息的提取	305
11.6 遥感信息提取的精度评估方法	308
11.7 不同方法的性能比较	312
思考题	313
主要参考文献	315
附录 1 遥感数字图像处理的软件	322
附录 2 实验内容和实验安排	323
附录 3 实验教程中的数据文件	325
附录 4 本书网站资源内容	326

本教材配套有实验教程《遥感数字图像处理实验教程》（第二版，科学出版社，2018），提供多类型遥感图像和数据，图像处理步骤详细、图文并茂。实验中的练习和问题思考可以帮助巩固所学的知识，提高解决实际问题的能力。



书号：978-7-03-057071-0

第1章 概 论



遥感数字图像是通过遥感方式获得的以数字形式存储和表达的图像。遥感数字图像处理是以物理学、地学、数学和计算机等知识为基础,对遥感数字图像进行的操作和分析,其核心内容是处理方法的原理、不同方法间的联系、解决问题的工作流和数据流。

1.1 图像和遥感数字图像

1.1.1 图像和数字图像

在中文词典中,“图像”指视觉感知的,或通过绘制、拍摄等展现的形象。在英语词典中,有三个词与图像有关,分别是 picture、image 和 pattern。图像对应的英文词为 image,指通过镜头等设备得到的视觉形象,或以某一技术手段再现于二维画面上的视觉信息。通俗地说,图像是通过技术手段把目标进行再现后产生的形象,是二维数据阵列的光学模拟或二维的辐射场。

根据人眼视觉的可视性,图像分为可见图像和不可见图像。可见图像包括图片、照片、素描和油画等,以及用透镜、光栅和全息技术产生的各种光学图像。不可见图像包括非可见光学成像(如紫外线、红外线、微波成像)和不可见的测量值(如温度、压力、人口密度)的分布,处理后可表达为可见图像。

根据获取和存储方式,图像分为数字图像和模拟图像。数字图像指数字存储的、用计算机直接处理的图像,其空间坐标和图像数值用离散数字表示。在计算机内部,数字图像为二维阵列(网格),属于不可见图像。模拟图像又称为光学图像,指通过胶片等传统摄影方式获取的、计算机无法直接处理的图像,属于可见图像。

利用计算机技术,模拟图像与数字图像之间可以相互转换。模拟图像转变成数字图像称为模/数转换,即 A/D 转换;数字图像转变成模拟图像称为数/模转换,即 D/A 转换。

数字图像最基本的单位是像素。像素对应于 A/D 转换中的取样点,是计算机图像处理的最小单元;一般情况下,像素的长宽相等,具有特定的空间位置和属性。像素的基本属性为像素值。在遥感图像中,像素值的高低反映了目标物(观测对象)辐射能量的高低。

1.1.2 遥感数字图像

地物能够反射、吸收、发射不同波长的电磁波,利用这种特性,遥感系统可以探测地物,获取遥感数字图像。

遥感数字图像(remote sensing digital image)是以数字形式存储和表达的遥感图像。图像中的像素值又称为亮度值(或灰度值、灰度级)。其中,像素值是最中性的名称,在英文中,直接称为 DN(digital number)。严格上讲,显示的图像像素值才可以称为灰度级或亮度值。

像素值的高低由遥感传感器探测到的地物电磁波辐射强度决定。由于地物电磁波性质的差异和大气的影晌,相同地物在不同波段、不同时期、不同传感器的图像中的像素值不同。

图像内的每个像素对应于三维世界里的一个实体(称为“纯像元”)、实体的一部分或多个实体(称为“混合像元”)。在太阳的照射下,一些电磁波被这个实体反射,一些被吸收。

实体发射和反射的电磁波与大气的散射一起到达传感器被记录下来,成为特定像素的像素值。

初始获取的遥感数字图像中,像素值是相对的数量级,仅在一景图像内才能相互比较。相同位置不同日期、不同传感器的图像中的像素值无法直接比较。**只有当两景图像被同一物理过程获取时、两景图像的像素值经过标准化处理去除了不同物理过程的影响后(即图像校正),其间的像素值进行比较才有意义。**

遥感数字图像与模拟图像是两类不同的图像,其典型差异如表 1.1 所示。

表 1.1 遥感数字图像与模拟图像的差异

模拟图像	遥感数字图像
来自于模拟方式	来自于数字方式
通过摄影系统产生	通过扫描和数码相机的摄影和摄像产生
没有像素	基本构成单位是像素
没有行列结构	具有行和列
没有扫描行	显示后可能会观察到属于噪声的扫描行
没有数据	0 是数值,不表示没有数据
任何点都没有编号	每个像素都有确定的数字编号
受电磁波谱的成像范围限制	可以是电磁波谱的任意范围
一旦获取,其颜色就是确定的	没有特定的颜色,可以根据需要合成产生不同的颜色用于显示
单色或彩色	多个波段(3~8000)
使用胶片、相纸等为存储媒介	以数字方式存储于磁盘、磁带、光盘等媒介

遥感数字图像是人类视觉的扩展。一般认为,人类的视觉系统能够观测到的光谱范围为 400~700nm,灰阶为 15~30 级,对大于 25Hz 以上的部分不敏感;观测到的空间范围受视场限制而有限。此外,人眼没有经过校验,每个人通过观测得到的感知并不相同,具有主观性。遥感数字图像的传感器经过了定标而具有了可供比较的标准,图像的波段为 3 个到数千个,图像的空间范围从数厘米到数千千米,提供了不同视角和不同层次的观测结果。人类视觉系统与遥感数字图像的紧密结合,极大地增强了处理分析大范围复杂空间问题和环境问题的能力。

“Earth as Art”网(<http://eros.usgs.gov/image-gallery>)和“Earth Observatory”网(<https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/>)提供了众多美丽壮观的对地观测遥感图像和代表性的地理景观图像,读者可以免费浏览,用来丰富自己的视野。

1.2 遥感数字图像处理

1.2.1 遥感数字图像处理的内容

遥感数字图像处理是使用计算机图像处理系统对遥感数字图像中的像素进行系列操作的过程。简单地说,就是对像素所施加的操作,处理的结果仍然为数字图像。

在狭义上,遥感数字图像处理不同于遥感数字图像分析。遥感数字图像分析是将像素值转换为其他含义的量值的过程,遥感数字图像处理是图像分析必需的手段和步骤。在广义上,遥感数字图像处理包括了遥感数字图像分析的部分内容,如图像分割、图像分类等信息提取。

本书使用广义的遥感数字图像处理概念。

遥感数字图像中的信息量多。传统的模拟图像受媒介限制无法完全表达和处理这些信息，数字图像处理能有效地提高处理精度和信息提取效率。

遥感数字图像处理的内容包括以下几点。

(1) 图像校正：也称图像恢复、图像复原、图像预处理，主要是对图像质量退化问题进行校正处理，包括两部分内容，辐射校正和几何纠正。在进行信息提取前，有必要对遥感图像进行不同程度的校正处理，以使图像尽可能地表达实际地物的辐射信息和空间信息。

(2) 图像增强：是一系列的图像处理方法，其目的是压抑、去除噪声，突出图像整体或图像中特定地物的信息，使图像更容易处理、解释、判读和理解。相关方法包括两类：一类是增强视觉信息的彩色合成显示和图像显示拉伸，另一类是增强地物信息的图像变换、图像平滑、锐化、图像融合等。

图像增强的结果可作为新的图像特征 (image feature)，这在图像分析中非常重要。增强过程本身不会增加信息，但改变了信息的表达方式，通过突出特定的整体或局部信息，使得图像更易于可视化解释和理解，更易于进行信息提取。图像增强可通过人机交互进行，使用的方法和算法取决于具体应用。

(3) 信息提取：指基于地物的图像特征和特定的规则从校正后的遥感图像中提取各种有用信息的过程。主要方法包括图像分割、图像分类、目标识别、遥感反演、遥感变化检测等，处理结果为遥感专题图。

遥感数字图像处理是遥感对地观测过程的一个重要组成部分 (图 1.1)，提取的遥感信息可直接服务于资源管理、区域规划、区域可持续发展等，可为发展新的对地观测技术提供基础依据。

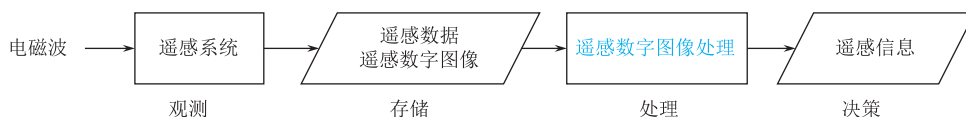


图 1.1 遥感对地观测与遥感数字图像处理

1.2.2 遥感数字图像处理系统

遥感数字图像处理需要借助于图像处理系统来完成。遥感数字图像处理系统属于计算机信息管理系统，其中硬件、软件和网络部分很重要。硬件指进行图像处理所必需的设备，软件指进行图像处理的各程序。

1. 硬件

遥感数字图像处理使用的硬件包括五部分：计算机、数字化设备、存储设备、显示和输出设备、操作台。

1) 计算机

计算机是图像处理的核心，大容量内存、高主频的 CPU、大容量的 GPU 有助于加快处理进度。常用的计算机有个人微机、图形工作站、小型机和计算机集群。

计算机内存提供了快速的数据存取能力。64 位操作系统的计算机内存可以达到 32G 以

上。内存容量越大, 图像处理的效率越高, 因此, 使用 64 位操作系统进行图像处理是必要的。

2) 数字化设备

为了采集数字图像, 需要两种装置: 一种是传感器, 它把接收到的电磁辐射能量转变成与能量成正比的(模拟)电信号; 另一种是数字化设备, 把模拟电信号或模拟图像转换成数字(离散)的形式。这些设备安装在遥感系统的遥感平台上。

在桌面上, 数字化设备有数码相机、数码摄像机和扫描仪等。打印输出后的图像(模拟图像)通过数字化设备(一般是扫描设备)转换为数字图像后才能进行计算机处理。

3) 存储设备

遥感数字图像的数据文件及其处理产生的图像文件需要大容量存储设备来保存。数据存储需要的空间与数据类型密切相关。例如, 存储一幅 1024K 字节的 8 位图像需要 1MB 的存储空间。一景正常的包括 7 个波段的 Landsat5 的 TM 图像文件至少占用 200MB 的存储空间, 一景 Landsat8 的 OLI 图像或高光谱图像往往需要 1GB 的存储空间。

典型的存储设备包括光盘、光盘塔、磁盘、磁带等。光盘可存储 GB 级的数据; 一个光盘塔可包含几十到几百张光盘。磁盘的存储容量为 TB 级。磁带以顺序方式存取数据, 可存储 GB 到 TB 级的数据, 特点是容量大、价格低廉, 是长久保存数据的主要方式, 现在仍在使用。

为了加快数据处理和存取效率, 有必要使用固态硬盘等作为临时的数据存取盘。高效的图像处理往往使用磁盘阵列来存取数据。

4) 显示和输出设备

显示器是基本的图像输出设备, 通过图像显示可辅助判断处理结果的正确性。专业的高分辨率大尺寸显示器和多屏显示器有助于提高图像处理的效率。为了保证显示结果的可比性, 显示器需要定期进行专业的色彩校正。

显示的图像可以通过硬拷贝转换为幻灯片、照片或透明胶片。

打印设备用于输出图像到特定的媒介上, 实现高分辨率大幅面彩色图像的打印输出。打印设备不同, 输出图像的分辨率和色彩不同。在打印前需要对相关的设备(打印设备与显示设备等)进行统一的色彩校正。

5) 操作台

操作台是安置数字化设备、输出设备和图像处理设备的辅助平台。良好的图像处理环境应该宽敞, 通风, 适当避光。

2. 软件

遥感数字图像处理软件由图像处理控制程序、管理程序和图像处理功能模块组成。除了专业的遥感图像处理系统如 PIE、ERDAS、ENVI、PCI 外, 还有各种面向专业应用领域的图像处理软件包和高级语言程序库等。

遥感数字图像处理系统的典型功能包括: ①不同传感器图像数据的存取和转换; ②几何纠正; ③辐射校正; ④图像增强和处理; ⑤统计分析; ⑥图像变换; ⑦图像分类; ⑧专题制图; ⑨专业工具, 如高光谱图像处理、地形分析、雷达图像处理工具等。

与办公软件相比, 图像处理系统中的各个功能模块显得比较分散, 各个菜单之间的联系不紧密。从某种意义上看, 图像处理系统是一个综合的工具箱, 工作流程需要结合具体的工作要求来确定。实际的图像处理需要联合使用多个功能菜单。只有熟练掌握了图像处理的基

本原理,才能用好图像处理系统,有效的解决实际问题。

下面是典型的遥感数字图像处理工具^①。

1) PIE 遥感与地理信息一体化系统

PIE 是我国新一代遥感与地理信息一体化处理和分析系统。PIE 基础软件工具能够进行空天地多源异构遥感影像的预处理、精细三维模型的构建、行业专题产品的生产、二三维场景的可视化展示分析等。其中,PIE 桌面软件工具集包括了用于光学、雷达、高光谱、无人机数据生产的专业处理软件 PIE-Basic(遥感图像基础处理软件)、PIE-Ortho(卫星影像测绘处理软件)、PIE-SAR(雷达影像数据处理软件)、PIE-Hyp(高光谱影像数据处理软件)、PIE-UAV(无人机影像数据处理软件),用于遥感影像解译的专业分析软件 PIE-SIAS(尺度集影像分析软件),用于空间信息多维表达的地理信息可视化软件 PIE-Map(地理信息系统软件),用于专业级激光雷达数据处理的软件 PIE-Lidar(激光点云数据处理软件),用于全自动构建实景三维倾斜摄影模型的软件 PIE-Smart(全自动建模软件)以及精细化单体建模及 Mesh 网格模型修饰处理的软件 PIE-Model(实景三维建模单体化软件)。特色是全面支持中国卫星遥感数据的读写、处理和云处理能力。

PIE-Engine 时空遥感云服务平台对 PIE 基础软件工具集及多项行业应用进行标准化集成和运行,依托于云计算基础设施,具备云端海量多源异构数据的管理、生产、分析、解译、推理、发布、共享全生命周期应用服务能力,提供面向各行业的算法插件集成、业务流程定制化闭环服务。PIE-Engine 遥感云服务平台包括 PIE-Engine NativeSphere 混合云底座,PIE-Engine Server 数据共享服务,PIE-Engine Factory 数据处理服务,PIE-Engine Studio 遥感计算服务,PIE-Engine AI 智能解译服务,PIE-Engine Knowledge 知识图谱服务,PIE-Engine UAV 无人机应用服务,PIE-Engine SAR 卫星应用服务,PIE-Earth 智慧地球以及 PIE+时空遥感云服务移动端。

软件网址: <https://www.piesat.cn/website/cn/pages/product/dl-center/software-download.html>。

软件介绍: <https://www.piesat.cn/website/cn/pages/product/software/>。

2) ERDAS IMAGINE 遥感图像处理系统

ERDAS IMAGINE 是专业遥感图像处理系统,包括面向多种应用领域的产品模块、不同层次用户的模型开发工具。产品按照模块组成和用户类型进行划分,可根据应用要求选择不同功能模块进行组合,以充分利用软硬件资源。ERDAS IMAGINE 系统的特色是专家模型系统、可视化建模工具和与 ArcGIS 软件的兼容和集成。

ERDAS IMAGINE 系统是基于文件的图像处理,图像处理的结果保存到磁盘文件中。实际图像处理时需要预留较大的存储空间。

软件网址: <https://www.octave.com/products/geospatial-intelligence/imagine>。

3) ENVI 遥感图像处理系统

ENVI(environment for visualizing images)遥感图像处理系统可以与 ArcGIS 集成应用。

ENVI 包含齐全的遥感图像处理功能,如几何纠正、定标、多光谱图像分析、高光谱分析、雷达分析、地形地貌分析、GPS 连接、正射图像图制作、三维景观生成、数据输入/输出等。ENVI 的特色是丰富的高光谱数据处理工具和 IDL 开发语言。IDL 语言降低了系统扩展

^① 由于这些软件网址会发生变化,有关的网址信息在纸质教材中不再更新,读者可自行查找最新信息。

的门槛，可以有效地提高工作效率。

ENVI 的处理结果可以存入硬盘也可以临时存入内存，增加了处理的便捷性。配置大内存的计算机系统可以提高 ENVI 的图像处理效率。

博客：ENVI-IDL 技术殿堂，<https://www.cnblogs.com/enviidl/>。

4) PCI Geomatica 遥感图像处理系统

PCI Geomatica 最后的名称为 2020 年的“Geomatica Banff”，在 2021 年后改名为“CATALYST Professional”，用于图像处理、制图、GIS、雷达数据分析以及资源管理和环境监测，包括数百个模块，是一个非常全面的遥感图像处理系统。PCI 的特色是处理速度快，功能丰富的工具箱和建模系统。

5) 面向对象的遥感图像处理软件

高空间分辨率遥感图像便于提取几何特征，其处理方法与一般的多光谱遥感图像不同。与此有关的遥感图像处理软件产品包括：①易康(eCognition)，Trimble 公司产品，利用图像的色调、形状、纹理、层次等信息，通过图像分割和模糊决策等方法进行图像分类和信息提取(<https://geospatial.trimble.com/en/products/software/trimble-ecognition>)。②FeatureObjEX，PCI Geomatica 中的模块，基于图像的纹理、色彩和形状提取目标要素。③ENVI EX，ENVI5.0 以后产品中的模块，进行面向对象的特征提取和图像分类。④ERDAS Objective，ERDAS IMAGINE 产品中的模块，基于图像的几何、纹理等特征进行信息提取。

注意：面向对象的处理是计算密集的，需要高性能的计算机支持。

6) 免费的遥感图像处理软件

除了上述商业化软件，还有一些免费的或虽然不免费但可下载全功能模块进行小数据量处理的软件，它们各具特色。

ILWIS：可免费下载使用的图像处理软件包，功能较全。网址：<https://www.utwente.nl/en/itc/ilwis/download/ilwis33/>。

MultiSpec：免费的遥感图像分类软件，提供了一些新的算法。网址：<https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>。

ImageJ：免费的 Java 运行环境下的图像处理软件，可用于遥感图像处理，功能较多。网址：<https://imagej.net/ij/>。

TNTmips：可下载使用的全功能模块的空间分析和与遥感图像处理软件包。网址：<http://www.microimages.com/products/>。

其他：一些开源软件中也包括图像处理的功能，如 QGIS、GRASS、Python、OpenCV 等。

遥感数字图像处理软件的选择

软件的选择取决于工作目标、性质和遥感图像的数据量。每个软件都有自己的优点，也有自己的短处。一般而言，小数据量、多交互操作和探索性分析、高光谱图像的处理，ENVI 比较合适。大数据量、较少探索性分析的工程性图像处理，PIE、ERDAS 和 PCI 可能更合适。

对于特定传感器图像的处理，一定要深入阅读软件的“白皮书”，结合图像数据特点和工作要求来选择遥感处理软件和相关模块。

一定要阅读随软件发行的文档和软件网站的文档，注意在该软件版本中解决了哪些缺陷，还有哪些缺陷没有解决。

软件不能解决所有的遥感图像处理和遥感信息提取问题。

编程语言和工具 Python 和 MATLAB 中的一些模块也可用于遥感数字图像处理和遥感信息提取,更便于灵活地解决问题和算法开发。

1.3 数字图像处理的两个观点

数字图像最早的应用之一是报纸业。早在 20 世纪 20 年代的图片传输系统就可以跨大西洋传送图片并打印出来。当时的图像效果比较差,仅仅能够满足新闻的时效性要求。

数字图像处理的历史与数字计算机的发展密切相关。计算机为数字图像处理提供了存储、显示和传输等技术,推动了数字图像处理的发展。

第一台可以执行有意义的遥感图像处理任务的大型计算机出现在 20 世纪 60 年代早期。1964 年,位于美国加利福尼亚的喷气推进实验室利用计算机技术改善了空间探测器发回图像的效果。当时,“旅行者 7 号”卫星传送的月球图像由计算机进行了处理,以校正航天器上电视摄像机产生的各种图像畸变。

20 世纪 60 年代末 70 年代初,图像处理技术开始应用于医学图像、地球遥感监测和天文学等领域。20 世纪 70 年代发明的计算机轴向断层技术(CT)是图像处理在医学上最重要的应用之一。断层技术的发明人英国工程师 Godfrey N. Hounsfield 先生和美国物理学家 Allan M. Cormack 教授共同获得了 1979 年的诺贝尔生理学或医学奖。

20 世纪 90 年代后,随着计算机技术迅速发展和图像处理系统的成熟,对地观测技术和遥感数字图像处理技术得到了迅速普及和应用。

当前,对于数字图像处理存在两种观点:离散方法和连续方法。

1. 离散方法

该观点认为,一幅图像的存储和表示均为数字形式,数字是离散的,因此,使用离散方法进行图像处理才是合理的。与该方法相关的一个概念是空间域。空间域图像处理以图像平面本身为参考,直接对图像中的像素进行处理。

2. 连续方法

该观点认为,图像通常源自物理世界,其数值服从可用连续数学描述的规律,因此具有连续性,应该使用连续数学方法进行图像处理。有关这方面的详细内容请参阅《现代数字图像处理》(法 Henri Maitre 等著,孙洪译,电子工业出版社,2006)。

与连续方法相关的一个概念是频率域。频率域基于傅里叶变换,频率域的图像处理是对傅里叶变换后产生的反映频率信息的图像进行处理。完成频率域图像处理,往往要变换到空间域进行图像的显示和对比。

从本质上看,计算机所处理的数字图像等价于它所表示的连续图像。通过适当的图像显示或打印过程,可以将数字图像恢复为原有的连续图像。采用数字方法可以达到原有物理过程才能产生的效果。

遥感数字图像处理的方法和技术虽然大多来自数字图像处理,但是,遥感数字图像的传感器特性、时空特性和巨大的数据量决定了所使用方法的特殊性。一般数字图像处理算法往往难以直接用于遥感数字图像处理。

1.4 基础理论和知识要求

遥感数字图像处理以物理学、地学、数学等为基础，与社会经济发展紧密相连，给人类社会带来了巨大的效益。有效的学习、掌握和应用遥感数字图像处理技术，需要具备以下基础理论与基本知识。

1. 物理学

遥感建立在电磁辐射与地物相互作用的基础上，遥感数字图像是地物电磁辐射特性的图像表示。遥感传感器是按照光学和电子技术原理设计和制造的，不同传感器获得的图像具有各自的几何特征和物理特征。同时，图像转换和图像处理的很多方法也基于光学、电子光学原理。因此，物理学中的电磁辐射、信号处理、光学和电子光学等方面的知识不可缺少。

2. 地学

遥感数字图像处理的目的是更好地探测、提取空间信息。现代遥感技术除了在军事领域的应用外，主要以地球资源的探测和环境监测为目的。只有具备自然地理和人文地理知识，了解资源分布及其与周围环境的相互关系，以及地理要素的分布规律，才能采用适当的遥感图像处理方法进行有效的信息提取工作，监测地理环境的变化，并预测其发展方向。所以，具备丰富的地学知识是进行遥感数字图像处理的基本条件。

在地学中，地理信息系统是在计算机硬件和软件支持下，通过综合分析各种地理数据进行模拟、决策、规划、预测和预报的技术。遥感可以快速获取现势性的地物信息，遥感图像与 GIS 数据库中数据的叠合分析，可大大提高 GIS 的决策能力。地理信息的空间分析和建模对于遥感数字图像处理和信息提取同样重要。

3. 数学

在遥感图像处理过程中，无论是遥感平台的运行特征、传感器的性能参数和电磁辐射特性，还是遥感数据的传输和遥感图像的信息提取等都以一定的数学模型为基础，并运用计算技术进行定量计算。所以，要深入掌握遥感数字图像处理技术，必须具备扎实的数学基础。数值分析、线性代数、概率论与数理统计等是需要掌握的重点内容。

4. 信息理论

遥感作为一项信息工程，包括遥感信息的获取、记录、传输、信息处理和决策等内容。遥感数字图像处理是信息处理的主要组成部分。掌握了信息论的原理和方法，才能在理论指导下进行遥感数字图像处理工作。

5. 计算机技术

计算机是图像处理的关键设备，直接影响到图像处理的能力。进行数字图像处理不仅要掌握计算机的一般操作技能和计算机程序设计语言，更要掌握数据结构和数据库原理等知识。

1.5 章节内容组织

章节内容从前到后依次是“基础—预处理—处理和应用”（图 1.2）。图中，箭头方向表示工作流程。

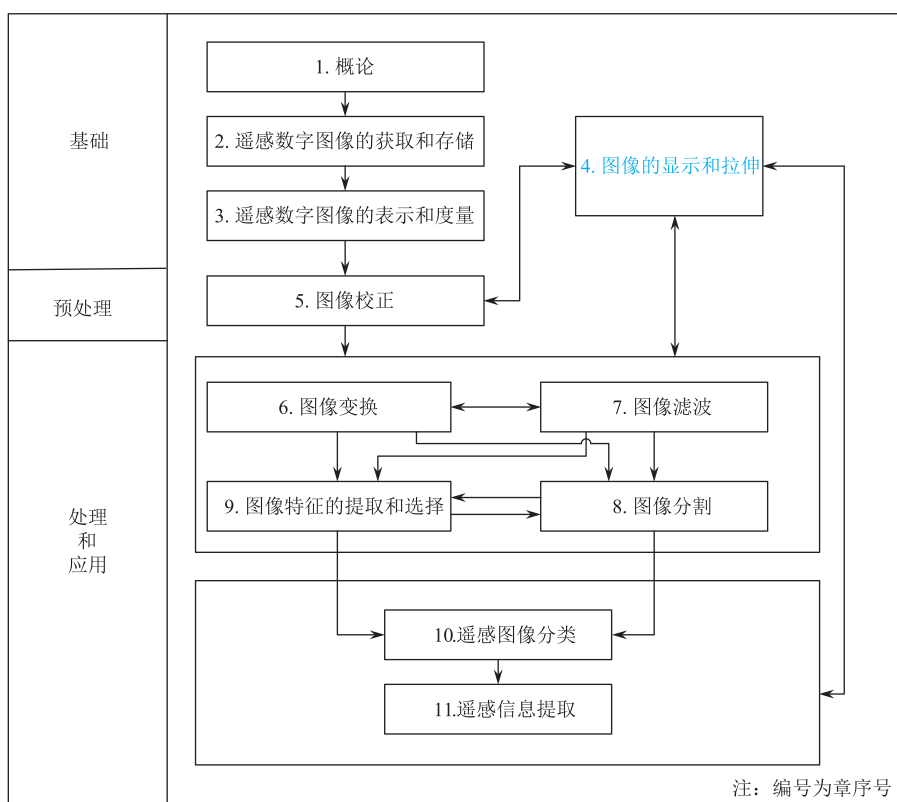


图 1.2 遥感数字图像处理的章节关系和工作流程

遥感数字图像处理的关键是如何针对特定的工作要求构建有效的处理流程。在学习过程中，应注意总结各种处理方法、处理效果及其间的关系，逐步形成自己的工作流程。

各章节主要内容如下。

第1章主要介绍遥感数字图像的基本概念，主要的图像处理软件和图像处理要点。

第2章介绍遥感数字图像的获取和存储相关内容。遥感数字图像处理的对象是遥感传感器获得的遥感数据，不同的遥感数据具有不同的特点。因此，需要我们首先掌握遥感传感器的基本特征，以便结合应用的要求选择合适的遥感数据。遥感数据由遥感数字图像和元数据文件等构成，具有不同的级别和格式。遥感数字图像处理首先是对遥感数字图像中的像素进行的系列操作，图像处理过程就是文件的存取过程 and 数据处理过程。

第3章“遥感数字图像的表示和度量”是图像处理的基础。不同类型的遥感应用，其图像模型和表示方式不同，通过图像的统计可获得对图像的一般性了解，在图像-光谱-特征空间三个视角上对不同层次的处理对象进行处理和信息提取。

第4章“图像的显示和拉伸”是最基本的，也是使用最多的处理方法，是连接数字图像和人类视觉的桥梁。图像显示可帮助工作人员有效地理解数字图像中的内容、对比分析处理结果。图像拉伸用来增强图像的显示，突出图像中的信息，提高视觉对图像的感知能力。

第5章“图像校正”属于预处理工作，其目的是去除和抑制成像过程中各种因素影响导致的图像失真。图像校正内容包括辐射校正和几何纠正，前者将像素值从灰度级转变为辐亮

度或反射率,后者利用已有的地图投影和地理坐标修正图像中像素的位置,使得处理后的数字图像能够与基础地理信息相匹配或在空间上可以相互叠合匹配。考虑到校正过程需要进行图像的合成显示和拉伸等处理,所以将图像显示的内容放在了图像校正的前面。

第6章和第7章的“图像变换”和“图像滤波”用来增强图像中的有用信息。通过图像变换,数字图像中的波段产生了不同的组合,具有了新的含义。通过图像滤波,考虑了邻域关系的影响。这两章的内容也用来提取图像特征。

第8章“图像分割”用于将图像划分为互不交叠的区域或从背景中分割出感兴趣的地物目标。所使用的图像特征来自图像的波段、第6章和第7章提取的特征。基于分割的结果,可以提取几何类图像特征,可以进行图像分类。

第9章“图像特征的提取和选择”是对6,7,8章内容的总结和拓展。图像特征是遥感信息提取的基本依据。合适的、足够数量的图像特征才能保证遥感信息提取的精度。

第10章“遥感图像分类”根据选定的分类系统按照图像特征的相似性原则对相似的像素进行归并。图像分割结果可作为分类中的训练区和分类对象,这种方法被称为“面向对象的分类”。

第11章“遥感信息提取”介绍了主要的遥感信息类别和提取方法,为学习更复杂的图像处理方法提供知识准备。

更深入的学习和研究,需要明确区分图像处理与图像分析的概念。严格地讲,图像处理是对图像像素进行操作的过程。图像分析是将图像像素值转换为非像素表示的过程,是一个决策过程;通常利用数学模型并结合图像处理技术来分析图像特征和像素构成关系,然后提取特定的信息。图像分析之后,像素值表示的含义发生了变化。分析之前,遥感数字图像中的像素值是地表辐射信息的度量,分析之后,像素值为特定类别的编号或某个物理量的量值。

例如,设图像像素值为 x ,那么,“ $x+1$ ”是图像处理,+是对像素 x 所施加的操作。“如果 $x>1$,那么 x 为林地”,产生这个判断的过程是图像分析,而其中的比较($x>1$)和赋值(x 为林地)是图像处理。图像分析和图像处理密不可分,不同的是,图像处理强调操作,图像分析强调判断和推理。

需要区分图像处理和图像预处理的概念。图像预处理具有相对性,指当前工作之前需要进行的准备工作,其主要目标是校正图像的某种退化(如模糊、变形等)等。图像预处理操作不会增加信息量,相反,一般都会降低图像的信息量。

“图像处理—遥感图像分类—遥感信息提取”是从简单到复杂的三个阶段。

“遥感信息提取”是一个常见的概念。遥感数字图像处理的最终目标是进行遥感信息提取。将遥感图像视为数据,则存在如下关系:

$$\text{遥感信息} = f(\text{遥感数据})$$

其中的 f 就是图像处理。高质量的数据可以得到高质量的信息。

遥感信息提取的内容包括:①单一地物信息提取。构建遥感波段的组合或算法,提取特定的地物信息,包括特殊地物及其状态识别,如灾害状况、历史遗迹等的识别和管理评估。②类别信息提取。利用图像的空间、时间和光谱信息对地物进行识别并归类。③成分信息提取。利用光谱信息推算、估计地物的生化-物理参数,如温度、粮食产量、生物量等。④变化