

中国科学院大学研究生教材系列

遥感图像处理

赵忠明 孟 瑜 汪承义 等 编著



科学出版社

014033112

TP751
30

中国科学院大学研究生教材系列

遥感图像处理

赵忠明 孟 瑜 汪承义 等 编著



TP751
30

科学出版社

北 京



北航

C1721337

内 容 简 介

本书是中国科学院大学研究生教材系列之一。本书首先介绍遥感的基本原理,然后深入地阐述遥感数字图像处理基础和影像处理技术,包括影像变换、图像增强、辐射校正、几何校正、镶嵌和融合技术等。本书还介绍遥感影像解译的基本技术,包括影像分类和变化检测技术,这有利于进一步挖掘影像信息。最后,本书介绍遥感图像处理云计算技术和具有自主知识产权的遥感图像处理软件 IRSA。

本书可作为遥感专业硕士、博士研究生的专用教材,也可作为遥感及其相关专业的教师 and 科技工作者的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

遥感图像处理/赵忠明等编著. —北京:科学出版社,2014.3

(中国科学院大学研究生教材系列)

ISBN 978-7-03-040182-3

I. ①遥… II. ①赵… III. ①遥感图象-图象处理-研究生-教材 IV. ①TP751

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 048396 号

责任编辑:彭胜潮 苗李莉 朱海燕 / 责任校对:韩 杨

责任印制:赵德静 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年3月第一次印刷 印张:19

字数:430 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书作者名单

(按姓氏汉语拼音排序)

陈建胜 陈静波 贺东旭 黄青青 孔贇琬
孟瑜 汪承义 武斌 杨健 袁媛
岳安志 赵忠明 郑义

前 言

遥感是当代信息科学与技术的主要技术之一。“遥感”(Remote Sensing, RS)一词最初出现于 20 世纪 60 年代初期、第一颗人造卫星发射成功之后,人们将摄像装置搭载卫星上实现对地观测,并将这一套摄像、分析处理影像以及运用影像信息服务于各个社会经济领域的技术称为“遥感”。事实上,早在人造卫星出现很久之前、飞机发明之后,即 20 世纪初,人们就已经开始利用飞机作为摄像机的载体实施航空摄影测绘,这种航空摄影技术开启了遥感技术的先河。随着宇航技术的发展,遥感已将对地球观测延伸到对月球以及宇宙星体表面的观测,遥感技术的内涵与应用从而又得到进一步的拓展。

遥感是人类第一次离开地球去观测地球,由此人们可以在同一个时间断面全面、准确、快速、客观地获取地球表面广域空间直至全球的实时信息。遥感技术为人们深刻、全面认识自身所处的自然环境创造了条件。遥感技术提供的大量影像信息对于人们肆意践踏、破坏地球资源与环境的行为无疑产生了巨大的冲击与震撼,促使人们重新审视自身开发自然的行为与理念,认真思考科学、可持续发展的问题。遥感为监测大气与土地污染、合理利用与规划资源环境、研究地球生态环境演化直至宇宙演化规律等诸多领域提供了强有力的科学技术手段。

遥感技术为推动社会信息化、社会进步起到了关键性的作用。遥感技术是现代地理空间信息的主要信息源;遥感提供多尺度、多层面的时空图像信息,构成人们社会活动、生产活动的基础信息。据统计,国民经济部门有 80% 以上的领域都需要以空间信息技术提供的时空信息为基础构建本行业的信息系统。当前,遥感技术在农业、国土资源管理、水资源管理、矿产资源管理、气象与大气污染监测、防灾减灾、国防等诸多领域都有重要应用,为这些领域提升科技水平、提高管理效益、增进社会生产力发挥了至关重要的作用,促进这些领域向着精确、精准、数字化、可视化方向发展,使生产与管理的决策更科学、合理,从而为国民经济科学、可持续发展提供坚实的技术保障。

遥感图像处理(RS Image Processing)是将遥感影像加工处理,从中提取目标信息的技术。由于遥感平台获取的影像数据夹杂着干扰噪声以及几何变形等多种原因,应用者所要索取的目标信息往往被掩盖在噪声与无关的信息数据之中,目标图像常常产生变形与畸变,因而难以实际使用。遥感图像处理的任务就是从浩繁的影像数据中去伪存真、由表及里,将地物的几何形状、理化性状,如干旱或湿度、污染状况、植物长势等,定量、定性地准确表达出来,为应用者提供优质的信息服务。遥感图像处理是遥感应用的必经技术过程,自遥感出现就产生了遥感图像处理技术。在计算机出现以前以及计算机技术初始阶段,遥感图像处理以光学模拟航空遥感影像处理为主。随着电子技术以及计算机技术的发展与普及,模拟遥感影像逐渐被数字遥感影像所取代,现在遥感图像处理一般是指数字图像的处理技术。

当代,遥感技术向着精准、深层次信息提取和自动智能化的方向发展。遥感图像处理

可以排除云层等大气的干扰,实现遥感与全球定位以及地理信息系统的技术衔接,支持地面变化信息的处理与分析、遥感图像的图谱分析、单目标跟踪分析,遥感图像处理取得了长足的进步。同时随着高空间分辨率、高光谱遥感影像的普及、无人机遥感的异军突起,计算机云计算技术的普遍应用,以及各个遥感应用领域提出的更高的信息需求,遥感图像处理技术面临更大的挑战。遥感图像处理与其他应用技术一样,不断受到相关技术进步以及社会需求两个方面强有力的驱动,技术在驱动中发展。

《遥感图像处理》研究生教材是由中国科学院遥感与数字地球研究所赵忠明研究员领衔的技术团队集体编著完成的。本书在编写思想上,理论与实践并重,以遥感成像原理为基础,系统阐述遥感图像处理技术的机理,旨在为培养遥感应用领域原创性技术人才奠定基础;书中所有技术内容都是作者团队亲身科研攻关实践的总结。因此,可以在诸多同类教材与专著中保持自己的特色。本书力求内容深入浅出,图文并茂,用缜密的逻辑、流畅的语言叙述技术机理与过程,以适应教材的要求。

全书分为 10 章。第 1 章遥感基本原理,叙述遥感图像处理相关的基础知识,作为以下各种图像处理的技术基础;第 2~4 章分别叙述遥感数字图像处理基础和图像预处理技术,包括图像增强和影像变换技术、辐射校正、几何校正等,是图像处理必备的基础性技术;第 5 章遥感影像的镶嵌,介绍影像间配准、影像镶嵌及色调调整技术,为制作大幅影像图提供实用技术;第 6 章遥感影像融合,介绍多幅影像实现像元级融合的方法,以发挥各幅影像的信息特点;第 7 章论述遥感影像分类的多种方法,实现影像的自动识别,获取地物分布的基本信息;第 8 章叙述遥感影像的地面变化信息检测,深层次挖掘地面的动态信息;第 9 章遥感图像处理云计算,介绍运用计算机网络云计算技术进行分布式网络图像处理的技术,以跟踪遥感图像处理的最新发展;第 10 章遥感图像处理软件介绍,介绍中国科学院遥感与数字地球研究所自主研发的 IRSA 遥感图像处理软件,为读者实践提供技术支撑。

为加深读者对书中内容的理解,每章后面附有习题,并备有参考文献供读者查阅。本书最后设有附录,对于专业名词、技术术语进行系统归纳整理,加以解释,并备有中英文对照。

本书在编写过程中,得到了许多老师和朋友的帮助与支持。中国农业大学严泰来教授、西北工业大学赵荣椿教授校阅了本书所有内容,并给出了许多积极的建议。二十一世纪空间技术应用股份有限公司迟耀斌研究员、中国土地勘测规划院刘顺喜教授、中国科学院遥感与数字地球研究所闫冬梅研究员、王刚博士自始至终都给予了大力的支持与帮助,并对本书许多内容提出了很好的改进意见,还要感谢课题组研究生林蕾、杨慧、吴祥、张建和尚晓波为本书的编辑所做的工作。这里谨对所有对于本书的出版给予大力支持与帮助的朋友们表示衷心的感谢。

由于遥感图像处理技术发展很快,本书编著者知识与技术水平有限,又缺乏教材编写经验,加上时间仓促,书中缺点及错误在所难免,恳请读者批评指正。

编著者

2013 年 6 月于北京

目 录

前言

第 1 章 遥感基本原理	1
1.1 遥感物理基础	1
1.1.1 遥感工作模型	1
1.1.2 地物辐射特性	3
1.1.3 地物反射特性	8
1.2 遥感影像获取	9
1.2.1 遥感平台类型	10
1.2.2 主要的遥感传感器	10
1.2.3 遥感数据的接收、传输与归档	11
1.3 目前常用的卫星遥感数据	12
1.3.1 GeoEye 系列数据	12
1.3.2 WorldView 系列数据	13
1.3.3 IKONOS 数据	13
1.3.4 QuickBird 数据	14
1.3.5 SPOT 5 数据	15
1.3.6 TM/ETM 数据	16
1.3.7 环境减灾卫星	17
1.3.8 资源三号数据	18
1.4 遥感影像基本概念	18
1.4.1 卫星影像产品介绍	18
1.4.2 遥感影像分辨率	19
1.4.3 遥感影像数据格式	22
1.5 遥感影像处理的基本问题	24
1.5.1 辐射校正	24
1.5.2 几何校正	24
1.5.3 影像镶嵌	24
1.5.4 影像融合	24
1.5.5 影像分类	25
1.5.6 变化检测	25
1.5.7 高性能计算	25
习题	26
参考文献	26

第2章 遥感数字图像处理基础	27
2.1 图像变换	27
2.1.1 傅里叶变换	27
2.1.2 离散余弦变换	29
2.1.3 小波变换	30
2.1.4 主成分分析	38
2.1.5 缨帽变换	43
2.1.6 彩色空间变换	46
2.2 图像增强	48
2.2.1 空域图像增强技术	49
2.2.2 变换域图像增强技术	61
2.2.3 彩色图像增强技术	64
习题	66
参考文献	66
第3章 遥感影像辐射校正	68
3.1 影像辐射校正	68
3.1.1 辐射误差来源	68
3.1.2 系统辐射校正	69
3.1.3 精辐射校正	70
3.2 影像噪声抑制	77
3.2.1 条带处理方法	77
3.2.2 斑点噪声处理方法	77
3.2.3 薄云处理方法	78
3.2.4 阴影处理方法	82
习题	87
参考文献	87
第4章 遥感影像几何校正	88
4.1 遥感影像的误差来源	88
4.1.1 传感器成像方式引起的图像变形	88
4.1.2 传感器外方位元素变化引起的图像变形	90
4.1.3 地球曲率引起的像点误差	91
4.1.4 大气折射引起的误差	92
4.1.5 地形起伏引起的像点位移	93
4.1.6 地球自转的影响	93
4.2 遥感影像几何校正模型	94
4.2.1 近似几何校正模型	94
4.2.2 严格几何校正模型	100
4.3 遥感影像正射校正	105
4.3.1 控制点和DEM要求	105

4.3.2 遥感影像正射校正方法	106
4.4 影像重采样方法	107
4.4.1 最近邻内插法	107
4.4.2 双线性内插法	108
4.4.3 三次卷积法	108
习题	110
参考文献	110
第5章 遥感影像的镶嵌	112
5.1 镶嵌流程	112
5.1.1 遥感影像镶嵌主要流程	112
5.1.2 遥感影像镶嵌质量评价	113
5.2 遥感影像配准	113
5.2.1 遥感影像配准简介	114
5.2.2 基于灰度的影像配准	117
5.2.3 基于特征的影像配准	118
5.2.4 影像复合配准与优化方法	122
5.3 镶嵌线与重叠区处理	128
5.3.1 镶嵌线生成方法	128
5.3.2 重叠区域处理	129
5.4 色调调整	130
5.4.1 基于统计分析的色调调整方法	131
5.4.2 基于影像变换的色调调整方法	131
5.4.3 基于镶嵌线羽化的色调调整方法	132
习题	133
参考文献	133
第6章 遥感影像融合	135
6.1 遥感影像融合基本流程及层次	135
6.2 像元级影像融合方法	136
6.2.1 基于 IHS 变换的遥感影像融合	137
6.2.2 基于算术运算的遥感影像融合	138
6.2.3 基于主成分变换的遥感影像融合算法	139
6.2.4 基于 GramSchmidt 变换的遥感影像融合算法	141
6.2.5 基于高通滤波的遥感影像融合算法	142
6.2.6 基于小波变换的遥感影像融合算法	142
6.2.7 其他的全色增强融合算法	143
6.3 遥感影像融合模型	143
6.3.1 分量替换融合模型	144
6.3.2 通用融合模型	145
6.3.3 统一理论框架	147

6.4	像元级融合质量评价	148
6.5	特征级影像融合技术	151
6.6	决策级影像融合技术	152
	习题	153
	参考文献	153
第7章	遥感影像分类	155
7.1	遥感影像特征提取	155
7.1.1	光谱特征	155
7.1.2	纹理特征	156
7.1.3	几何特征	161
7.2	特征空间及特征选择	164
7.2.1	特征空间	164
7.2.2	特征选择概念	165
7.2.3	特征评价测度	165
7.3	非监督分类	166
7.3.1	聚类分析	166
7.3.2	常用的非监督分类算法	168
7.3.3	非监督分类的优缺点	173
7.4	监督分类	173
7.4.1	常用的监督分类算法	173
7.4.2	监督分类的优缺点	183
7.5	面向对象分类	183
7.5.1	面向对象分类方法产生背景	183
7.5.2	遥感影像分割	184
7.5.3	基于知识的对象级分类方法	192
7.6	分类过程中辅助数据的整合	197
7.7	分类后处理	197
7.7.1	专题影像格式	197
7.7.2	分类重编码	197
7.7.3	小图斑去除	198
7.8	分类精度评价	198
7.8.1	混淆矩阵与精度指标	199
7.8.2	分类成功指数	200
	习题	201
	参考文献	201
第8章	遥感影像变化检测	204
8.1	变化检测流程	204
8.2	常用的变化检测方法	208
8.2.1	变化信息快速发现方法	208

8.2.2 基于代数运算的变化检测方法	209
8.2.3 基于图像变换的变化检测方法	212
8.2.4 基于分类的变化检测方法	213
8.2.5 面向对象的变化检测方法	214
8.2.6 基于遥感影像与 GIS 数据结合的变化检测方法	218
8.3 变化检测后处理	221
8.3.1 伪变化信息来源	221
8.3.2 变化图斑构建	221
8.3.3 基于植被覆盖度的植被伪变化去除	221
8.3.4 基于面积阈值的伪变化去除	222
习题	222
参考文献	222
第 9 章 遥感图像处理云计算	224
9.1 云计算技术概述	224
9.1.1 云计算的概念	224
9.1.2 云计算的特点	224
9.1.3 云计算的服务类型	225
9.1.4 云计算研究现状	225
9.2 基于 Hadoop 平台的云计算架构	226
9.2.1 HDFS 分布式存储技术	226
9.2.2 HBase 数据管理技术	229
9.2.3 Map-Reduce 编程模型技术	230
9.3 云计算下的遥感影像处理	232
9.3.1 图像并行处理的一般性问题	232
9.3.2 并行环境下的几何校正	234
9.3.3 并行环境下的图像融合	238
9.3.4 并行环境下的图像分割	240
习题	242
参考文献	242
第 10 章 IRSA 软件介绍及应用	244
10.1 IRSA 遥感图像处理软件介绍	244
10.2 IRSA 软件功能介绍	244
10.3 几何精校正	245
10.4 正射校正	249
10.5 融合	254
10.6 镶嵌	255
10.7 投影及格式转换	258

10.8 常用特征提取·····	261
10.9 分类·····	264
附录一 专业词汇表·····	271
附录二 缩写词表·····	284
附录三 典型光学卫星遥感数据产品分级·····	289

第 1 章 遥感基本原理

1.1 遥感物理基础

1.1.1 遥感工作模型

电磁波是遥感获取影像数据的媒介,遥感系统获取的地物电磁波辐射数据源自太阳辐射、遥感系统发射的电磁波或大地辐射。以太阳辐射或地物自身辐射作为主要电磁波波源的遥感称作被动遥感,以遥感系统发射电磁波作为主要电磁波波源的遥感称作主动遥感。

太阳辐射或遥感系统发射的电磁波经过大气吸收与透射两种作用,在透射中还包括折射与散射。大气散射是大气中分子对电磁波的作用,将太阳光向四面八方散开,可分为上行与下行,其中下行部分最后到达地面,同时到达地面的还有大气辐射的电磁波。地表不同地物或同一种地物处于不同的状态,如不同长势的作物、不同形状的岩石、不同含水量的土壤等,对于这些电磁波以不同的反射率向外反射(散射),地物本身也向外辐射电磁波。这些电磁波再次经过大气作用,包括散射、折射、吸收等到达遥感平台,同时到达遥感平台的还有大气本身辐射的电磁波。这些电磁波被遥感传感器截获,按获取的能量不同分为若干波段,经遥感传感器转换成相应的数据并做初步处理,再转换成无线电信号传送到遥感地面站。经地面站的数据处理,形成数字图像或光学影像,提供给用户使用(赵忠明等,2013)。

遥感的工作模型见图 1-1 和图 1-2。

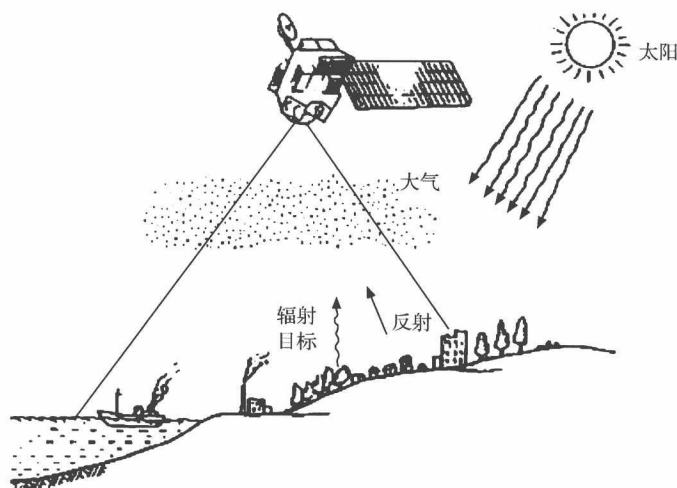


图 1-1 遥感工作模型示意图

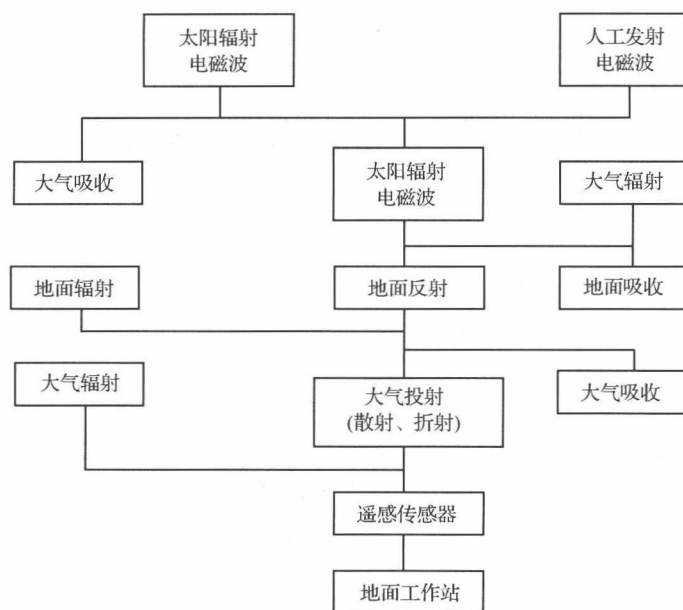


图 1-2 遥感工作模型方框图

介绍遥感工作模型的意义除了解释遥感工作过程以外,也为研究遥感原理提供线索。下面对遥感工作过程的每一环节逐一进行分析。

(1) 遥感传感器接收到的电磁波中混杂着多种噪声信号(Noise),包括电磁波信号从太空到地面、再由地面返回太空的双程路途中大气自身辐射的电磁波,大气散射的来自地面或太阳辐射的电磁波,这两种信号都是电磁波传输路程中出现的非目标地物信号的噪声,因而称作程辐射噪声,又称背景噪声。另外,传感器工作还要产生热噪声,传感器温度越高,热噪声越大,为减小热噪声,卫星遥感平台上一般将传感器置于液态氮中,保持在 -80°C 恒温环境中。当然,雷达遥感自身也发射电磁波,这种发射的电磁波本身就带有噪声,这种噪声被反射回来仍然是噪声,因而雷达遥感中噪声比被动遥感还要大许多。在一些情况下,地物信号可能会被“淹没”在噪声中,很难识别出地物的信息,遥感的工作就要失败。排除遥感噪声,主要是排除程辐射噪声影响的工作称作辐射校正(Radiometric Correction)。

(2) 电磁波要经过大气,大气常常有扰动,表现为风,致使大气对电磁波的折射率不稳定、各地点折射率不一致;再加上地球曲率、遥感平台的姿态等原因的影响,造成遥感影像产生几何畸变,不能完全准确反映地物真实的几何形状以及空间位置。排除遥感几何畸变影响的工作称作几何校正。

(3) 遥感影像的反差通常比一般摄影影像要小,遥感平台飞行越高,其影像反差就越小。这是因为:对于地面上对电磁波吸收作用强、反射率小而呈现暗色调的地物,在遥感影像中对应像元本应呈暗色,但由于程辐射的作用,对应像元并不十分暗;反之,地面对电磁波吸收作用弱、反射率大而呈现亮色的地物,在遥感影像中对应像元本应呈亮色,但是由于大气对电磁波吸收衰减作用,对应像元并不十分亮。综合以上这两种情况,遥感原始影像的反差不理想,特别是卫星遥感更是如此。因为卫星遥感中,电磁波穿越大气的光程

长,大气效应明显。遥感影像反差的降低,不利于人们使用图像对地物的识别,因而使用一些图像处理的方法,加大目标地物与背景的反差是遥感图像处理的一个任务。

(4) 地物表面单元在与遥感传感器构成的立体角范围内,对外来电磁波的反射率和自身辐射量的大小是决定对应遥感图像像元灰度的主要因素,在这个意义上,遥感影像是地面各种地物反射率及辐射量大小的记录。当然,除主要因素以外,还应包括程辐射对产生遥感图像像元灰度的少量贡献。

(5) 人类眼睛的视觉过程与遥感,特别是被动遥感的工作模式,原理上十分相像。事实上,眼睛就是一个功能十分精良的遥感传感器,而大脑则是接收来自眼睛的图像信号处理器,从而产生视觉。只是眼睛使用的电磁波工作波段限于可见光波长范围,相比遥感,波段范围要狭窄很多。遥感图像获取以及图像处理中遇到的种种问题在眼睛视觉中都不同程度地存在,因此,模仿眼睛视觉感受去发现或研究遥感技术中的各种问题,是遥感图像处理研究的一种方法。

1.1.2 地物辐射特性

1. 黑体辐射定律

所谓“黑体”是一种理想化的物体,即对于任何波长的电磁波辐射,都全部吸收的物体。现实生活中不存在黑体,黑色的烟煤,因其吸收系数接近 99%,被认为是最接近黑体的自然物质;太阳也被看作是接近黑体辐射的辐射源。因为黑体可以达到最大的吸收,也可以达到最大的发射,黑体辐射的规律可以推广到普通物体。将物体或物质理想化,进而进行分析研究,而后将研究结果推广到一般,这是物理学研究普遍采用的方法。

运用量子力学的理论,普朗克(Planck)推导出黑体辐射通量密度的表达式为

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \quad (1-1)$$

式中, M_{λ} 为光谱辐射通量密度,单位是 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; λ 为波长,单位是 μm ; h 为普朗克常数,等于 $6.6256 \times 10^{-34} \text{W} \cdot \text{s}^2$; c 为光速,等于 $3 \times 10^{10} \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; T 为绝对温度,单位为 K; k 为波尔兹曼常数,等于 $1.38054 \times 10^{-23} \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

普朗克公式给出了黑体辐射通量密度同温度和波长的关系以及按波长分布的情况,这里的通量是指辐射能(量)流通量,密度是指单位波长的能流通量。图 1-3 所示是根据式(1-1)得到的不同温度条件下黑体辐射的波长分布特性曲线图,其中的虚线与实线相交的点代表黑体在各个温度下辐射最大值所在的位置。从图 1-3 中可以看出:

(1) 黑体辐射的能量只与波长、温度有关,与物质组成无关,发射能量是一个连续的波长谱。

(2) 温度越高,辐射通量密度也越大,构成了一个以绝对温度为参数的曲线族(Curve Family),每条曲线只有一个峰值,不同温度的曲线是不相交的。这就是说,温度高的黑体在任意波长段,其辐射的能量都要比温度低的黑体辐射能量要大。

(3) 随着温度的升高,辐射最大值所对应的波长移向短波方向。

普朗克黑体辐射定律适用于黑体表面温度高于 0K(绝对零度)以上的任何物体。这

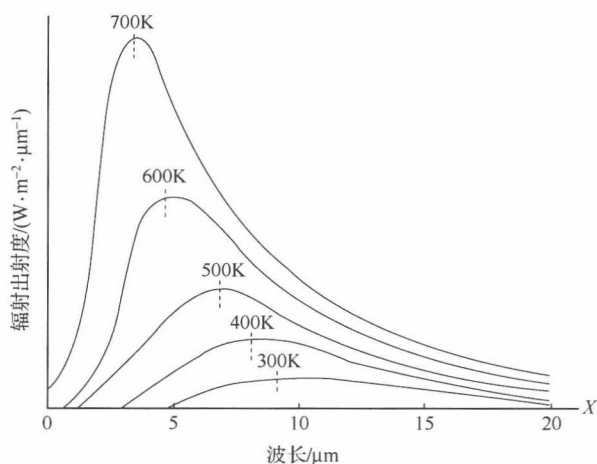


图 1-3 不同温度的黑体辐射特性曲线

就是说,任何黑体,也可以推广到任何物体,只要表面温度高于 0K,都要自发辐射电磁波。现实中不存在黑体,为了对实际物体辐射特性进行定量的研究,就需要引入比辐射率的概念。比辐射率也可以称为发射率,记作 ϵ ,用来表示实际物体辐射出电磁波能量 M_e 与同温度下的黑体辐射出能量 M_b 之比,即

$$M_e = \epsilon M_b \quad (1-2)$$

物质不同,比辐射率也不同。水体、太阳等物体的比辐射率近似为“1”,即可以将水体、太阳近似看作黑体。灌木、麦地、光滑的冰、柏油马路、砂土、混凝土等物体的比辐射率在 0.9 以上,稻田、草地、黄土等物体比辐射率在 0.8 以上。

2. 辐射定律的意义

1) 物体表面辐射电磁波的规律

辐射定律揭示了物体表面辐射电磁波的规律,这一规律可以用式(1-3)表达:

$$M_\lambda = f(\lambda, T) \quad (1-3)$$

即任何表面温度高于 0K(绝对零度)的物体都要向外辐射电磁波能量(功率),这一功率值是电磁波波长 λ 与表面温度 T 的函数。这是式(1-2)的简化表达。遥感正是基于物体,包括太阳以及地表所有物体向外辐射电磁波能量来工作的。

2) 斯忒藩-波尔兹曼定理

对式(1-3)的右边从 0 到 ∞ 积分,则有

$$M = \int_0^\infty f(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4 \quad (1-4)$$

式中, M 为黑体辐射通量密度,单位是 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$,实际意义是单位面积黑体辐射的功率; σ 为斯忒藩-波尔兹曼(Stefan-Boltzmann)常数,其值为 $5.6697 \times 10^{-12} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。

这就是斯忒藩-波尔兹曼定律。这一定律指出,物体向外辐射电磁波在整个波长范围内的总功率与物体表面绝对温度的四次方成正比。如果对式(1-4)两边差分,则有

$$\Delta M = 4\sigma T^3 \Delta T \quad (1-5)$$

这就是说,物体向外辐射电磁波功率的增量与其表面温度的三次方成正比,即:在升温同等幅度情况下,温度越高,辐射能量的增量就越大。应用这一结果进一步得出,温度越高,对于测量物体温度的传感器敏感度要求就越低,温度测试的精度就可以越高。

此外,对式(1-4)进行积分的数学意义是计算函数曲线图 1-3 中某一温度 T 曲线向 X 坐标轴的投影面积。如果将式(1-4)的积分区间由 0 到 ∞ 改成 λ_1 到 λ_2 ,则有

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda, T) d\lambda \quad (1-6)$$

显然,积分区间由 λ_1 到 λ_2 的间距越小,该区的面积就越小,意即物体向外辐射电磁波在这一波长范围内的功率就越小,如果小到一定程度,超越了遥感传感器对电磁波能量的敏感范围,或者这一微小的能量“淹没”在噪声信号之中,传感器“感受”不到信息信号,也就无法成像了。 λ_1 到 λ_2 的间距即为通常所说的遥感波段,从这里可以看出遥感波段不能设置过窄。对于某一个地表温度,在同等积分跨度情况下,积分区间在不同的位置,即具体的 λ_1 或 λ_2 数值不同,区的面积也有显著的不同。例如,积分区间处于曲线的峰值部位,面积显然较大;离曲线峰值部位越远,面积越小。这就是说,在传感器同等敏感度情况下,如果波段处于曲线峰值部位,传感器可以工作;而波段处于远离曲线峰值的部位,传感器就可能因得到的电磁波功率过小而无法工作。黑体辐射特性曲线为波段设置提供了理论根据。

3) 维恩定理

对于式(1-1)求解函数极值,则可得到:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (1-7)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为黑体辐射特性曲线达到峰值时的波长值; T 为当前辐射特性曲线的温度数值。式(1-7)就是维恩定理的数学表达式。

维恩定理指出,物体表面温度 T 与该物体电磁波辐射功率密度达到峰值波长 $\lambda_{\max}$ 的乘积是一个常数。维恩定理有重要的应用价值。当物体表面温度 T 为某一已知值时,使用式(1-7)就可以计算出 $\lambda_{\max}$,也就可以确定遥感探测该物体目标应当选取的波段。因为物体在该波段范围内,电磁波辐射功率密度达到峰值,传感器获取的信号中信噪比就越高,对物体目标的测试就越准确。

例如,地球表面在温暖季节的白天常温约为 300K(即 27℃),将该数值代入式(1-7),得到 $\lambda_{\max}$ 约为 9.66 μm ,而 9.66 μm 是在红外波段,所以地球表面主要辐射不可见的红外电磁波,这一波长区域部分的光人眼看不见。由图 1-3 可以看出,温度越低,曲线的峰值区域越趋于平缓,经实验知,在常温条件下,波长 λ 在 8~12 μm 时,辐射功率都处于较高状态,占据了这一温度下辐射功率的大部分,因而称波长 λ 在 8~12 μm 范围的红外区域为热红外。又如,森林火灾的火焰温度估计为 800K 左右,将该值代入式(1-7),得到 $\lambda_{\max}$ 约为 3.62 μm ,即应选用 3.62 μm 附近的波长区段为检测森林火灾的波段。再有,人的正常体温是 310K(即 37℃),相应的辐射功率密度的峰值波长 $\lambda_{\max}$ 为 9.35 μm ,使用这一波长左右的区域作为红外体温测试仪的工作波段最为合理。

反过来,如果得知某物体辐射特性曲线峰值波长 $\lambda_{\max}$,也可以估计该物体的表面温