

编号：2008AA121100

国家“863”计划重点项目“宽幅高光谱小卫星载荷关键技术研究”资助

高光谱遥感技术原理 及矿产与能源勘查应用

GAO GUANG PU YA O G A N J I SHU YUAN LI
JI KUANG CHAN YU NENG YUAN KAN CHA YING YONG

《主编 汪大明 李志忠 王香增 何凯涛 王晋年

地 质 出 版 社

国家“863”计划重点项目“宽幅高光谱小卫星载荷关键技术研究”
(编号: 2008AA121100) 资助

高光谱遥感技术原理 及矿产与能源勘查应用

主编 汪大明 李志忠 王香增 何凯涛 王晋年

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书主要包括高光谱遥感基本原理和高光谱遥感信息获取及处理技术方法,更涵盖了宽幅高光谱成像仪载荷研制,星载高光谱成像数据模拟、定标与处理,高光谱地质应用系统建设与典型应用示范等技术专题及应用案例分析。全书以地质应用需求为牵引,在统一的线索下,为读者展现了载荷研制、数据处理与地质应用技术的全貌。

本书可供广大从事高光谱地质遥感的专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高光谱遥感技术原理及矿产与能源勘查应用 / 汪大明等
主编. —北京:地质出版社,2013.10

ISBN 978-7-116-08544-2

I. ①高… II. ①汪… III. ①光谱分辨率-光学遥感-应用-矿产勘探②光谱分辨率-光学遥感-应用-能源-地质勘探 IV. ①TP722②P624-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 241490 号

Gaoguangpu Yaogan Jishu Yuanli ji Kuangchan yu Nengyuan Kancha Yingyong

责任编辑:李莉李华

责任校对:王瑛

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010)82324508(邮购部);(010)82324567(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:889mm×1194mm 1/16

印 张:21.25 图版:15面

字 数:635千字

版 次:2013年10月北京第1版

印 次:2013年10月北京第1次印刷

定 价:150.00元

书 号:ISBN 978-7-116-08544-2

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

高光谱遥感技术原理 及矿产与能源勘查应用

指 导 汪 民 童庆禧 薛永祺 钟自然 姜建军
李金发 周成虎 李加洪 李增元

主 编 汪大明 李志忠 王香增 何凯涛 王晋年

副主编 赵慧洁 刘银年 党福星 杨日红 肖晨超
胡道功 郭 涛

编写人员 (以姓氏拼音为序)

常 睿 陈圣波 陈小梅 曹金舟 邓小炼
杜培军 董沐鑫 方洪宾 付 琨 付金华
高瑞民 甘甫平 龚 正 郭 科 侯春堂
胡玉新 胡玉杰 黄定华 贾国瑞 蒋光伟
李 娜 李倩倩 刘德长 刘 佳 孟月玥
倪国强 屈永华 任来义 沈为民 宋宏儒
孙德新 王茂芝 王晓方 王跃明 温 静
吴秋华 吴小娟 韦志辉 肖 亮 肖政浩
许 宁 颜昌翔 杨 杭 杨瑞琰 叶发旺
于 光 张登荣 张丽霞 张立福 张松梅
张 志 赵文吉 赵英俊 郑洪瑞 周 萍

主要作者介绍

- 汪大明** 男，1982年3月出生，中国地质调查局油气资源中心副处长，博士，高级工程师，主要从事高光谱遥感和地质信息化领域研究。
- 李志忠** 男，1963年1月出生，中国地质调查局油气资源中心副主任，硕士，教授级高工，长期从事遥感地质科研与矿产能源勘查应用。
- 王香增** 男，1968年12月出生，陕西延长石油集团副总经理，博士，教授级高工，长期从事油气勘探开发工作。
- 何凯涛** 男，1970年11月出生，国土资源部科技与国际合作司调研员，博士，高级工程师，主要从事地学信息技术、地质学与地质遥感领域研究。
- 王晋年** 男，1966年9月出生，中国科学院遥感与数字地球研究所副所长，研究员，主要从事空间遥感技术、高光谱遥感、遥感应用与标准化方面的研究。
- 赵慧洁** 女，1966年2月出生，北京航空航天大学仪器科学与光电学院党委书记，博士，教授，长期从事高光谱遥感成像探测、建模、仿真处理等领域研究。
- 刘银年** 男，1971年8月出生，中科院红外探测与成像技术重点实验室副主任，博士，研究员，主要从事高光谱成像技术研究工作。
- 党福星** 男，1967年6月出生，中国国土资源航空物探遥感中心工作，博士，教授级高工，主要从事遥感图像处理、矿产和油气遥感信息提取、宽覆盖机载高光谱成像仪研制与地质应用系统研究工作。
- 杨日红** 男，1974年10月出生，中国国土资源航空物探遥感中心工作，博士，副研究员，主要从事遥感地质调查与评价技术研究与应用。
- 肖晨超** 男，1982年11月出生，中国国土资源航空物探遥感中心工作，博士，工程师，主要从事遥感地学建模、遥感信息化建设方面研究。
- 胡道功** 男，1963年11月出生，中国地质科学院地质力学研究所新构造与活动构造研究室副主任，博士，研究员，主要从事区域地质与新构造研究。
- 郭涛** 男，1972年11月出生，中国地质科学院地质力学研究所科技信息室副主任，博士，高级工程师，长期从事矿田构造和构造地球化学研究。

序 言

高光谱遥感技术发展于 20 世纪 80 年代初期，自世界上第一台成像光谱仪在美国喷气推进实验室诞生以来，作为遥感技术家族的新成员，在不断提高技术水平的同时更是在地球科学和资源环境领域寻求应用的开拓。高光谱遥感技术的应用遍及水质和水环境、森林植被、农业土壤、大气探测、海洋环境、冰雪覆盖等方面。但是，对固体地球的探测，或以地质岩石矿产资源为主体的应用展现了巨大的潜力并一直都是高光谱遥感技术应用的重点领域。高光谱遥感成为遥感发展的重要前沿之一。

跟踪国际发展、立足创新、服务需求是我国高光谱发展之初的指导思想。20 世纪 80 年代中后期，在黄金地质找矿需求的驱动下，根据当时我国的发展水平，中国遥感科技工作者提出了利用矿物光谱特征突出的短波红外光谱区开展地质矿物遥感研究。一种被称之为“红外细分光谱扫描仪”的短波红外成像光谱仪在中国科学院上海技术物理所研制完成。运用这种新型遥感技术，在我国新疆等地的黄金资源勘探中直接发现和提取了蚀变带和矿化带，并由此圈定了找矿靶区，找矿勘探取得了重要突破。成像光谱技术的成功应用激励了中国高光谱遥感的发展。在国家科技攻关计划、科技支撑计划以及“863”高技术发展计划的支持下高光谱遥感得到了迅速发展，一系列新型高光谱成像仪研制成功并在国内外得到成功应用。MAIS, OMIS, PHI 除在国内多学科应用中发挥很好作用外也在国外有了一定的名气。除了机载成像光谱仪外星载成像光谱仪在我国也呈现了良好的发展势头。神舟 3 号中分辨率成像光谱仪、风云 3 号气象卫星上的光谱成像仪、环境一号卫星上的傅立叶分光成像仪以及探月卫星上的高光谱成像仪等都体现了我国高光谱遥感发展的进程。我们有理由期待今后会有更大的发展和跨越。

随着我国经济社会的发展，对高光谱遥感的需求空前增长，成为牵引发展的动力；而我国高光谱遥感技术的进步也同时驱动着应用的发展。随着高光谱成像仪光谱分辨率和空间分辨率的不断提高，高光谱遥感的应用领域也不断拓展，一系列新的应用方向，如全球变化温室气体监测、环境污染要素检测、生态质量评估、农作物品质检测和精准农业应用、月球和行星探测等得以涌现和深化并成为高光谱遥感技术不断发展的动力。

地质矿产领域的高光谱遥感应用从其发展伊始就是高光谱应用和发挥应用效益的重要支撑点。矿产资源与能源勘查、岩石矿物的识别、矿物丰度制图以及成矿远景区和找矿靶区的圈定一直是高光谱技术发展和应用的主要方向。十分欣慰的是我国高光谱遥感的发展一直受到国家的高度重视和持续的支持。而一批又一批的遥感科技工作者在这个领域里执著探索，不断创新并取得新的成果更是推动我国高光谱遥感发展的基因。以本

书编著者为主体的研究集体，以我国高分辨率对地观测系统发展的重大专项和“863”高技术领域的支持为契机，针对矿产资源和化石能源的遥感探测、城市环境监测等应用的迫切需求，开展了系统、综合和深入的研究，获得了一批很有价值的成果。本书的编著就是这方面研究和成果的荟萃和结晶。

纵观全书，本书涉及地物光谱成像原理与技术，地物光谱的遥感重建，面向应用，特别是针对矿产和油气资源的数据处理与建模；在广泛、深入和综合遥感探测与应用的基础上，初步建立了高光谱地质应用系统平台，为今后地质矿产和油气资源勘探的业务化应用打下了良好的基础。十分难能可贵的是在研究中他们与应用实践紧密结合，选择了新疆东天山多金属成矿区和鄂尔多斯盆地东北部的榆林气田分别作为岩矿资源和油气资源高光谱遥感的实验区，开展了较大规模的应用性和验证性试验。试验研究获得的一些令人鼓舞的成果，进一步证实了高光谱遥感在岩石分类、矿物识别和油气异常信息探测与提取的有效性。他们在书中的这些内容丰富而翔实的论述体现了我国在高光谱遥感技术发展和应用研究的最新进展。

可喜的是，本书作者团队视推进高光谱遥感发展为己任，坚持不懈、锲而不舍，长期以来在高光谱遥感理论、技术和应用研究方面进行了坚韧不拔的研究。他们在将高光谱遥感与矿产和能源勘查的应用实践相结合中所积累的丰富实践经验和体现出的扎实理论功底形成了团队的研究特色，而在研究中相互配合、相互衔接、优势互补又体现了他们的团队合作精神。

高光谱遥感的发展方兴未艾，仍然有许多未知数需要我们去探索，仍有许多难关有待我们去攻克。我相信，只要保持和发扬这种不畏艰难、努力攀登的科学精神，我们一定能够一步步迈上更高的台阶，攀上遥感科学技术的制高点。

在本书即将问世之际，我除对作者团队坚持不懈的努力和为高光谱遥感技术的发展所做的杰出贡献以及取得的斐然成绩深表敬意之外，更期待本书在促进高光谱以至遥感科学技术的发展，启示和激励更多的年轻科技人员从事开拓性、创新性和艰巨性的科学研究中发挥应有的作用。

我热烈祝贺本书的出版！



2013年7月18日 于北京

前 言

随着我国经济的发展,矿产资源和能源紧缺的问题进一步凸显,针对资源和能源的精细勘探与节约综合利用已成为当前我国工业化、城镇化、信息化和农业现代化可持续发展的重要内容。自20世纪80年代初第一台高光谱成像仪问世以来,就在岩矿探测识别与定量分析中得到广泛应用,随着近年来高光谱成像仪研制与应用技术的不断发展,当前高光谱遥感技术在矿产与能源勘查中正发挥着更为重要的作用。

基于此,国家科技部和国土资源部实施了“863”项目“宽幅高光谱小卫星载荷关键技术研究”。该项目紧密围绕我国高分辨率对地观测系统发展对高光谱探测技术的迫切需求,结合矿产资源探测、城市环境监测等应用需求,开展宽幅高光谱成像仪关键技术研究,星载高光谱成像数据模拟、定标与处理关键技术研究,进行高光谱成像数据地质应用系统建设与典型应用示范研究;突破宽幅高光谱载荷集成、高光谱数据定量化处理与应用等相关关键技术,完成宽幅高光谱成像仪原型样机研制,建立星载高光谱遥感定量处理与应用模型,研发星载高光谱成像数据地质应用示范系统,为发展我国高光谱卫星及定量化应用打下坚实的基础。

本书是基于“宽幅高光谱小卫星载荷关键技术研究”项目(编号2008AA121100)的系列成果,结合编写组各位专家在高光谱成像仪器研制、高光谱数据模拟、定量处理与分析及资源能源遥感勘查等领域长期丰富的经验积累,经过多次讨论与修改,逐步形成并定稿。本书主要内容包括宽幅高光谱成像仪载荷技术研究、星载高光谱成像数据模拟、定标与处理技术、地质应用系统建设与典型应用示范三部分内容。此外还包括高光谱遥感原理、国内外研究现状、高光谱遥感信息获取和处理等基础与背景信息的介绍。本书各个章节之间以地质应用需求为牵引而规划展开,力求能在统一的线索下,为读者展现载荷研制、数据处理与地质应用技术的全貌。

本书共分11章,由汪大明、李志忠、王香增、何凯涛和王晋年担任主编,总体策划并参加了部分章节的编写。具体分工如下:1由李志忠、何凯涛、王晋年、赵慧洁、张松梅、胡道功等编写;2由汪大明、刘银年、王跃明、李娜、杜培军、方洪宾、侯春堂、刘肖姬等编写;3由赵慧洁、党福星、贾国瑞、沈为民、邓小炼、郭科、于光等编写;4由赵慧洁、张立福、蒋光伟、颜昌辉、胡玉新、黄定华等编写;5由汪大明、杨日红、党福星、肖晨超、肖政浩、孟月玥、李倩倩等编写;6由郭科、杨瑞琰、刘佳、刘德长、赵英俊、张登荣等编写;7由张立福、屈永华、杨日红、龚正、郭科、王茂之、黄定华、杨瑞琰、肖亮等编写;8由汪大明、李志忠、刘德长、王晓方、付金华、宋宏

儒、高瑞民、张丽霞、郭涛、王华睿等编写；9 由王香增、李志忠、倪国强、党福星、汪大明、陈小梅、肖政浩、韦志辉、赵文吉、杨杭、曹金舟、任来义、胡玉杰、吴小娟、董沐鑫等编写；10 由张立福、陈圣波、常睿、王晋年、赵英俊、周萍、温静、孙德新等编写；11 由汪大明、肖晨超、付锬、胡玉新、许宁、何凯涛、郑洪瑞等编写。全书由汪大明、李志忠、王香增、何凯涛和肖晨超等负责统稿和最后的审定工作。

为了尽可能全面地反映近年来高光谱遥感技术的有关新进展，本书编者在已有素材的基础上，还借鉴、吸收、参考了国内外相关研究的最新成果，并得到国内同行的大力支持。在此向国家遥感中心、中国国土资源航空物探遥感中心、中国科学院遥感所、中国地质调查局油气资源中心、北京航空航天大学、中国科学院上海技术物理所、中国地质大学、成都理工大学、北京理工大学、中国地质科学院地质力学研究所、核工业地质研究院、陕西延长石油集团、中石油长庆石油公司、北京师范大学、中国科学院电子所、航天科技集团八院、吉林大学、南京理工大学、苏州大学、杭州师范大学、首都师范大学、三峡大学，以及北京国遥新天地技术公司等单位表示感谢！

限于作者水平，书中难免会有纰漏和不当之处，敬请读者批评指正。

本书编写过程中得到了汪民副部长、童庆禧院士、薛永祺院士、钟自然教授、姜建军教授、李金发教授、周成虎研究员、李加洪研究员、李增元研究员等许多专家的指导，在此表示衷心感谢！

在项目执行过程中得到了科技部张国成司长、廖小罕主任、金奕明主任；国土资源部鞠建华副司长、高平副司长、马岩处长、单卫东处长；中国地质调查局叶建良主任、连长云主任、秦绪文处长；中国国土资源航空物探遥感中心王平主任、熊盛青总工程师；北京航空航天大学张广军副校长；核工业地质研究院李子颖院长；中国科学院上海技术物理研究所何力所长、龚海梅副所长、丁雷副所长；中石油长庆石油公司杨华副总经理、姚涇利院长、魏新善博士等项目主要参加单位领导的大力支持配合，在此一并表示衷心感谢！

编者

2013 年 7 月

目 录

序 言 前 言

1 概 论	(1)
1.1 光谱与成像光谱学	(1)
1.2 高光谱遥感概述	(2)
1.3 高光谱遥感地质	(7)
2 地物光谱与高光谱成像仪	(10)
2.1 地物的光谱特征	(10)
2.2 高光谱成像仪的发展现状	(11)
2.3 高光谱成像仪关键技术	(21)
2.4 载荷性能指标及影像因素分析	(38)
3 光谱数据重建	(42)
3.1 大气及其影响	(42)
3.2 大气辐射传输理论	(43)
3.3 传感器的辐射定标	(44)
3.4 大气校正	(70)
4 星载高光谱数据模拟	(76)
4.1 可见-短波红外高光谱成像数据模拟	(76)
4.2 热红外高光谱成像数据模拟	(104)
5 面向矿产资源的高光谱数据预处理	(127)
5.1 高光谱数据预处理流程	(127)
5.2 辐射亮度还原	(128)
5.3 系统误差校正	(129)
5.4 系统几何校正	(137)
5.5 反射率反演	(139)
5.6 <i>MTF</i> 检测与补偿	(150)
6 面向矿产资源的高光谱数据建模与分析	(156)
6.1 光谱特征分析与提取	(156)
6.2 基于合成核支持向量机的地物精细分类	(163)
6.3 混合像元分解	(177)
7 典型岩矿波谱服务	(187)
7.1 波谱数据处理与分析	(187)
7.2 波谱库与知识库建设	(187)
7.3 岩矿波谱知识库	(188)
7.4 波谱服务实例分析	(190)
8 矿产资源高光谱遥感探测应用	(196)
8.1 研究区背景	(196)

8.2	数据采集	(199)
8.3	矿产资源高光谱遥感探测总体方案	(206)
8.4	高光谱构造信息提取	(207)
8.5	高光谱岩性信息提取	(207)
8.6	高光谱矿物信息提取	(216)
8.7	高光谱远景成矿区预测	(234)
9	油气高光谱遥感探测应用	(238)
9.1	应用环境介绍	(238)
9.2	油气高光谱遥感探测总体方案	(245)
9.3	航天高光谱油气探测技术	(249)
9.4	航空高光谱油气探测技术	(254)
10	热红外高光谱遥感应用	(260)
10.1	热红外遥感研究概述	(260)
10.2	试验数据获取	(262)
10.3	热红外高光谱遥感数据预处理	(265)
10.4	典型矿物热红外遥感分析	(281)
11	高光谱地质应用系统	(289)
11.1	系统总体建设思路	(289)
11.2	系统关键技术	(291)
11.3	分系统功能与架构设计	(301)
	主要参考文献	(323)
	图版	

1 概 论

随着我国工业化的进程，矿产资源的需求越来越大，矿产资源对国民经济发展的瓶颈制约凸显。采用新技术、新方法，通过实现地质工作的现代化来加强各种矿产资源的勘查力度，扩大矿产资源储量，是保障我国可持续发展所需的矿产资源战略的重要途径。

成像光谱技术，即高光谱遥感，是当前遥感技术的前沿领域，它利用很多很窄的电磁波波段从感兴趣的物体获取有关数据，包含了丰富的空间、辐射和光谱三重信息，其最重要的特征和标志就是光谱与图像组合为一体，在电磁波谱的可见光、近红外、中红外和远红外波段范围内，可以获取上百个非常窄的光谱波段信息。由于其极高的光谱分辨率，使得原来在宽波段遥感中不能被识别的物质在高光谱遥感中能被探测，并且可进行定量研究。

高光谱遥感技术作为对地观测中的一项重要前沿技术，在研究地球资源、监测地球环境中发挥着极其重要的作用。高光谱遥感传感器的光谱分辨率已达纳米级，空间分辨率可达几米，对应图像上任一像元反演的地物光谱可与实验室实测光谱或者波谱库中标准波谱进行对比分析，便于利用计算机自动进行地物的光谱分类和匹配识别研究。

正是高光谱遥感技术的独特优势，使得这一技术在地质矿产勘查、油气微渗漏、大气环境、海洋环境、植被的精细分类以及土壤、军事等方面展现了巨大的应用前景。

1.1 光谱与成像光谱学

1.1.1 光谱学

光谱学是光学的一个分支学科，研究各种物质光谱的产生及其同物质之间的相互作用，通过物质与不同频率的电磁波之间的相互作用来研究其性质的一种方法。光谱是电磁辐射按照波长的有序排列。根据实验条件的不同，各个辐射波长都具有各自的特征强度。根据研究光谱方法的不同，习惯上把光谱学区分为发射光谱学、吸收光谱学与散射光谱学。

有的物体能自行发光，由它直接产生的光形成的光谱叫做发射光谱。发射光谱可分为三种不同类别的光谱：线状光谱、带状光谱和连续光谱。线状光谱主要产生于原子，由一些不连续的亮线组成；带状光谱主要产生于分子，由一些密集的某个波长范围内的光组成；连续光谱则主要产生于白炽的固体、液体或高压气体受激发发射电磁辐射，由连续分布的一切波长的光组成。

当一束具有连续波长的光通过一种物质时，光束中的某些成分便会有所减弱，当经过物质而被吸收后所对应的光谱称为吸收光谱。几乎所有物质都有其独特的吸收光谱。例如，在白光通过气体时，气体将从通过它的白光中吸收与其特征谱线波长相同的光，使白光形成的连续谱中出现暗线。此时，这种在连续光谱中某些波长的光被物质吸收后产生的光谱被称作吸收光谱。通常情况下，在吸收光谱中看到的特征谱线会少于线状光谱。

散射光谱方面，当光照射到物质上时，会发生非弹性散射，在散射光中除有与激发光波长相同的弹性成分（瑞利散射）外，还有比激发光波长长的和短的成分，这一现象统称为拉曼效应。这种现象于1928年由印度科学家拉曼所发现，因此这种产生新波长的光的散射被称为拉曼散射，所产生的光谱被称为拉曼光谱或拉曼散射光谱。

通过光谱的研究，人们可以得到原子、分子等的能级结构、能级寿命、电子的组态、分子的几何

形状、化学键的性质、反应动力学等多方面物质结构的知识。对于地质矿产遥感而言，光谱特征与不同物质及其组合之间的特定对应关系是高光谱地质矿产资源遥感的重要基础。

1.1.2 成像光谱学

成像光谱学 (imaging spectroscopy) 是在 20 世纪 80 年代开始建立的，在传统光谱学基础上，将传统的光谱学和成像技术结合起来，在电磁波的紫外、可见光、近红外和中红外区域，获取许多非常窄且光谱连续的图像数据的技术。这种技术设计出的新型遥感仪器，叫成像光谱仪 (imaging spectrometer)。成像光谱仪通常以上百个光谱通道连续记录影像数据。

光谱成像技术根据不同的方面可以分成不同的类型。依据波段数量与光谱分辨率分类可分为：在可见光 - 近红外区间只有几个波段的多光谱成像技术、在可见光 - 近红外区间有几百个波段的高光谱成像技术以及在可见光 - 近红外区间有数千个波段的超光谱成像技术；依据探测器工作方式可分为：掸扫式光谱成像、推扫式光谱成像及凝采式光谱成像。

1.2 高光谱遥感概述

所谓高光谱遥感，即高光谱分辨率遥感，指利用很多很窄的电磁波波段（通常 $< 10\text{nm}$ ）从感兴趣的物体获取有关数据；与之相对的则是传统的宽光谱遥感（通常 $> 100\text{nm}$ ）且波段并不连续。高光谱图像是由成像光谱仪获取的，成像光谱仪为每个像元提供数十至数百个窄波段光谱信息，产生一条完整而连续的光谱曲线。它使本来在宽波段遥感中不可探测的物质，在高光谱中能被探测。

近 20 年来，高光谱遥感技术迅速发展，它集探测器技术、精密光学机械、微弱信号检测、计算机技术、信息处理技术于一体，已成为当前遥感领域的前沿技术之一。

1.2.1 高光谱遥感的起源和发展

随着基础理论和材料科学的不断进步，近 20 年来，高光谱遥感技术迅速发展，已成为除雷达遥感、激光遥感、超高分辨率遥感等技术以外，当前遥感领域的又一重要研究方向。

1.2.1.1 国外的高光谱成像仪研制情况

由于高光谱遥感在地物属性探测方面的巨大潜力，成像光谱技术得到了普遍重视。

(1) 机载高光谱成像仪

1983 年，第一幅高光谱影像由美国研制的航空成像光谱仪 (AIS-1) 获取，标志着第一代高光谱成像仪的面世。1987 年，美国宇航局 (NASA) 喷气推进实验室 (JPL) 研制成功航空可见光/红外成像光谱仪 (AVIRIS)，这标志着第二代高光谱成像仪的问世。

(2) 星载高光谱成像仪

在航天领域，由美国喷气推进实验室研制的对地观测计划中的中分辨率成像光谱仪 (MODIS)，随 TER2RA 卫星发射，成为第一颗在轨运行的星载成像光谱仪，从 2000 年开始向地面传送图像。

2000 年，NASA 发射的 EO21 卫星上搭载的高光谱成像仪 (Hyperion)，地面分辨率为 30m，已在矿物定量填图方面取得了很好的应用效果。2002 年美国的海军测绘观测 (NEMO) 卫星携带的海岸海洋成像光谱仪 (COIS) 具有自适应性信号识别能力，满足军用和民用的不同需求。另外，2007 年 6 月交付美 Kirtland 空军基地的高光谱成像传感器将通过 Tac2Sat23 卫星载入太空。

目前，许多国家都在积极研制自己的高光谱传感器，已明确有发射计划的有德国环境监测与分析计划的 EnMAP，南非的多传感器小卫星成像仪 MSMI 和加拿大高光谱环境与资源观测者 HERO。

1.2.1.2 国外高光谱影像分析技术的研究现状

在成像光谱仪快速发展的同时，地物光谱数据库、高光谱影像分析技术研究也得到了迅速发展。

地物光谱数据库技术方面,以美国最为先进,有代表性的主要有 JPL 标准波谱数据库、USGS 波谱数据库、ASTER 波谱数据库和 IGCP2264 波谱数据库。此外,美国空军部门和环保局针对大气污染和空气成分的诊断建立了 AEDC/EPA 光谱数据库,并针对美国海军研究室研制的 HYDICE 成像光谱仪建立了森林高光谱数据库等。部分其他国家也展开了光谱数据库技术研究和建设工作,如英国在 20 世纪 90 年代初针对海水颜色研究建立了海水光谱数据库。

美国国家航空航天局 (NASA)、欧洲航天局 (ESA)、日本国家空间发展局 (NASDA) 和大学及研究所都有专门的高光谱影像应用分析的研究机构。

国外商业遥感图像处理系统,相继增加成像光谱数据处理模块,其中具有代表性的有 RSI 公司的 ENVI, PCI Geomatics 公司的 PCI, MicroImages 公司的 TNTmips 等。

1.2.1.3 国内高光谱遥感技术发展现状

我国紧密跟踪国际高光谱遥感技术的发展,并结合国内不断增长的应用需求,于 20 世纪 80 年代中后期着手发展自己的高光谱成像系统。主要的成像光谱仪有中国科学院上海技术物理研究所研制的推扫式成像光谱仪 (PHI) 系列、实用型模块化成像光谱仪 (OMIS) 系列、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的高分辨率成像光谱仪 (C2HRIS) 和西安光机所研制的稳态大视场偏振干涉成像光谱仪 (SLPIIS)。中国科学院上海技术物理研究所研制的中分辨率成像光谱仪 (CMODIS) 于 2002 年随“神舟”三号发射升空,并成功获取航天高光谱影像,其获取影像从可见光到近红外共 30 个波段,中红外到远红外的 4 个波段,空间分辨率为 500m。

2007 年 10 月发射的“嫦娥 1 号”卫星已携带中国科学院西安光学精密机械研究所研制的干涉成像光谱仪升空,用于获取月球表面二维多光谱序列图像及可分辨地元光谱图,通过与其他仪器配合使用对月球表面有用元素及物质类型的含量与分布进行分析,获得的数据用于编制各元素的月面分布图。

从 2007 年到 2010 年,我国将组建环境与灾害监测预报小卫星星座,将携带超光谱成像仪,采用 0.45~0.95 μm 波段,平均光谱分辨率为 5nm,地面分辨率为 100m。

我国在积极研制具有自主知识产权的成像光谱仪的同时,在地物光谱数据技术、高光谱影像分析技术等方面的研究中也取得了一系列可喜的成果。

20 世纪 90 年代初期,中国科学院安徽光学精密机械研究所、遥感所等单位对大量的典型地物进行了波谱采集,建立了我国第一个综合性“地物波谱特性数据库”。1998 年,中国国土资源航空物探与遥感中心建立了“典型岩石矿物波谱数据库”,其中包含了我国主要的典型岩石和矿物 500 余种。2000 年,中国科学院遥感所基于 GIS 和网络技术研制了典型地物波谱数据库及其管理系统,记录了 10000 多条地物波谱,并能动态生成相应的波谱曲线和传感器模拟波段,实现了波谱数据库与“3S”技术的链接。

1.2.2 高光谱成像仪简介

1.2.2.1 国外高光谱成像仪系统介绍

(1) 航空高光谱成像仪

1983 年,世界上第一台成像光谱仪 AIS-1 (Aero Imaging Spectrometer-1) 在美国喷气推进实验室研制成功,并成功应用于植被研究、矿物填图等方面,向世界展示了高光谱成像技术具有的潜力。此后,美国机载先进的可见光红外成像光谱仪 (AVIRIS)、加拿大的荧光成像光谱仪 (FLI) 和在此基础上发展的小型机载成像光谱仪 (AIS)、美国 Deadalus 公司的 MIVIS, GER 公司的 79 波段机载成像光谱仪 (RODIS-10 和 RODIS-20)、美国海军研究所实验室的超光谱数字图像采集试验仪 (HYDICE) 先后研制成功 (表 1.1)。

表 1.1 国外主要的机载高光谱成像仪信息

传感器	中文名称	国别/运营商	启用/年份	波段数	波长/ μm
AVIRIS	机载可见光日-近红外成像光谱仪	美国/NASA, Ames	1987	224	0.41 ~ 2.45
CASI	紧密机载成像光谱仪	加拿大国际研究有限公司	1990	288	0.43 ~ 0.86
MAS	MODIS 机载模拟器	NASA Ames & GSFC	1992	50	0.54 ~ 14.52
CHRISS	紧密机载高分辨率成像光谱仪	美国科技应用国际股份有限公司	1992	40	0.43 ~ 0.86
AISA	应用机载成像光谱仪	芬兰/Specim Ltd.	1993	286	0.45 ~ 0.90
DAIS 3715	数字机载成像光谱仪	德国/GER	1994	37	0.40 ~ 12.0
DAIS 7915				79	
DAIS 16115				160	
DAIS 21115				211	
YDICE	高光谱数字图像采集实验	美国/海军研究实验室/ERIM	1994	206	0.40 ~ 2.50
				126	0.40 ~ 2.50
Hymap	机载高光谱扫描仪系列	美国/JPL	1996	1	3.00 ~ 5.00
				1	8.00 ~ 10.00
ASI VNIR - 640	机载光谱成像仪	挪威/Norsk Elektro Optikk AS	2003	128/64	0.4 ~ 1.0
ASI VNIR - 1600				160	0.4 ~ 1.0
SWIR - 320i				160	0.9 ~ 1.7
SWIR - 320m				256	1.3 ~ 2.5
APEX	机载棱镜实验传感器	欧空局	2004	312	0.38 ~ 1.0
				199	0.94 ~ 2.5
AHI	机载高光谱成像仪	美国 Hawaii 大学		32/256	7 ~ 11.5

近年来,成像光谱技术在资源调查、农作物长势、病虫害、土壤状况、地质勘查等方面的成功应用让世界看到了这项新技术的巨大前景与潜力,世界上一些有条件的国家竞相投入到成像光谱仪的研制和应用中来。各国在研制的同时纷纷参考已有成像光谱仪的先进技术,使得新研制的系统在继承了老系统各种优势的同时,很多方面得到了进一步的提高,在稳定性、探测效率、综合性能等方面均得到了很大的进步。其中,具有代表性的有美国的 Probe、澳大利亚的 HyMap、美国 GER 公司为德士古 (TEXACO) 石油公司专门研制的 TEEMS 系统等。

Probe - 1 和 Probe - 2 是 Earth Search Sciences 公司开发的另一个有影响的航空成像光谱仪系统,该系统在 0.4 ~ 2.5 μm 区有 128 个波段,光谱分辨率为 18nm。

HyMap 即“高光谱制图仪”(hyperspectral mapper)的简称,是以澳大利亚 Intergrated Spectronics 公司为主研制的。HyMap 在 0.25 ~ 0.45 μm 光谱范围有 126 个波段,同时在 3 ~ 5 μm 和 8 ~ 10 μm 两个波长区设置了两个可供选择的波段,共有 128 个波段。其数据在光谱定标、辐射定标和信噪比等方面都达到了较高的性能,总体光谱定标精度优于 0.5nm;短波红外波段 (2.0 ~ 2.5 μm) 的信噪比都高于 500:1,有的波段其信噪比甚至高达 1000:1。

TEEMS 是德士古能源和环境多光谱成像仪 (Texaco energy & environmental multispectral imaging spectrometer) 的简称。这是一台由美国地球物理和环境研究公司 (GER) 应德士古的技术要求与德士古的专家合作专门研制的具有 200 多个波段、性能十分先进的实用型高光谱成像仪。该系统在紫外、可见光、近红外、短波红外、热红外波段等波谱均具有成像能力,从而在石油地质勘探特别是在勘探与油气藏有关的特征中具有很大潜力。

近年来热红外成像光谱仪已有了实质性的进展。最具有代表性的是美国宇航公司研制的空间增强宽带阵列光谱仪系统 (spatially enhanced broadband array spectrograph system, SEBASS)。SEBASS 有两个光谱区:中红外,3.0 ~ 5.5 μm ,带宽为 0.025 μm ;长波红外,7.8 ~ 13.5 μm ,带宽为 0.04 μm 。它

在中波红外区和长波红外区分别有 100 个、142 个波段；所使用的探测器为两块 128 * 128 的 Si: As 焦平面，有效帧速率为 120Hz，温度灵敏度为 0.05℃，信噪比 >2000。热红外成像光谱仪为更好地反映地物的本质提供了珍贵的数据，已经被应用于探矿、地质填图、环境监测、农林资源制图、植被长势等诸多领域。

(2) 航天高光谱成像仪

美国先后研制出中分辨率成像光谱仪 (MODIS)，EO - 1 高光谱卫星，并与日本合作研制出的先进星载热发射反射辐射计 (advanced satellite thermal emission/reflection radiometer) 以及美国军方的 “Might - Sat” 高光谱卫星，在航天成像光谱技术研究方面一直在世界遥遥领先。

MODIS 是 EOS - AM1 卫星 (1999 年 12 月发射) 和 EOS - PM1 (2002 年 5 月发射) 上的主要探测仪器——中分辨率成像光谱仪，也是 EOS Terra 平台上唯一进行直接广播的对地观测仪器。通过 MODIS 可以获取 0.4 ~ 14μm 范围内的 36 个波段的高光谱数据，为开展自然灾害、生态环境监测、全球环境和气候变化以及全球变化的综合性研究提供了重要的数据源。

MODIS 是搭载在 terra 和 aqua 卫星上的一个重要的传感器，是卫星上唯一将实时观测数据通过 x 波段向全世界直接广播，并可以免费接收数据并无偿使用的星载仪器。MODIS 可获取 0.4 ~ 14μm 范围内的 36 个波段的高光谱数据，为开展生态环境研究、自然灾害监测、全球环境和气候变化等研究提供了重要的数据源。

ASTER 搭载在 Terra 卫星上的星载热量散发和反辐射仪，是于 1999 年 12 月 18 日发射升空的，由日本国际贸易和工业部制造。一个日美技术合作小组负责该仪器的校准确认和数据处理。ASTER 是唯一一部高分辨解析地表图像的传感器，其主要任务是通过 14 个频道获取整个地表的高分辨解析图像数据——黑白立体照片。ASTER 能在 4 到 16 天之内对同一地区进行成像，具有重复覆盖地球表面变化区域的能力。ASTER 数据特点之一是基于用户要求的观测，即根据用户提出的要求来随时随地地获取影像。ASTER 的宽谱覆盖和高分辨能力给科学家们在诸如监测冰河的前进与退却，对潜在的活火山的监测，鉴别作物能力，对云层形态及物理状况的监测，湿地评估，热污染监测，珊瑚礁的退化，土壤及地质的表面温度绘图，以及测量地表的热平衡等众多学科领域提供了可供鉴定的信息。

美国宇航局 (NASA) 的地球轨道一号 (EO - 1) 是美国 NASA 新千年计划的一部分，在 2000 年 11 月 21 日发射。地球观测 1 号卫星与 LandSat - 7 覆盖相同的地面轨道，两颗卫星对同一地面的探测时间相差约 1 分钟的时间。EO - 1 带有三个基本的遥感系统，即高级陆地成像仪 (advanced land imager, ALI)，高光谱成像仪 (HYPERION) 以及大气校正仪 (liner etalon imaging spectrometer arrey atmospheric correction, LAC)。EO - 1 上搭载的高光谱遥感器 hyperion 是新一代航天成像光谱仪的代表，也是目前唯一在轨的星载高光谱成像光谱仪以及唯一可公开获得数据的高光谱测量仪，共有 242 个波段，光谱范围为 400 ~ 2500nm，光谱分辨率达到 10nm，空间分辨率为 30m。

2000 年 7 月，美国发射的 MightSat - II 卫星上搭载的傅立叶变换高光谱成像仪 (fourier transform hyperspectral imager, FTISI) 是干涉成像光谱仪的成功典范。

欧洲空间局于 2001 年 10 月成功发展了基于空中自治小卫星 PROBA 小卫星的紧密型高分辨率成像光谱仪 (CHRIS)，并发射成功。CHRIS 在 415 ~ 1050μm 的成像范围内有五种成像模式，不同的模式下其波段数目、光谱分辨率和空间分辨率不等，波段数目分别是 18, 37 和 62，光谱分辨率为 5 ~ 15nm，空间分辨率为 17 ~ 20m 或者 34 ~ 40m。CHRIS 能够从五个不同的角度 (观测模式) 对地物进行观测，这种设计使得其能获取地物反射的方向性特征。

欧洲空间局继美国 AM - 1 MODIS 之后于 2002 年 3 月又成功发射了 Envisat 卫星，这是一颗结合型大平台先进的极轨对地观测卫星。其中分辨率成像光谱仪 (MERIS) 为一视场角为 68.5°的推扫型中分辨率成像光谱仪，其地面分辨率为 300m，在可见光 - 近红外光谱区有 15 个波段，可通过程序控制选择和改变光谱段的布局。

日本继 ADEOS - 1 之后于 2002 年 12 月发射了后继星 ADEOS - 2，其上搭载了日本宇宙开发事业团的两个遥感器 (AMSR 和 GLI) 和国际或国内合作者提供的三个遥感器 (POLAR, ILAS - II, Sea-

Winds)。GLI 在可见光 - 近红外和短波红外分别有 23 个、6 个波段，而在中红外和热红外则有 7 个波段。到目前为止，已发射的具有代表性的星载成像光谱仪如表 1.2 所示。

表 1.2 国外主要星载高光谱成像仪

传感器	中文名称	国别/运营商	启用/年份	波段数	波长/ μm
MODIS	中分辨率成像光谱仪	美国喷气推进实验室	1999	36	0.459 ~ 14.38
FTVHSI	Fourier 可见光成像光谱仪	Kestrel Corp, FIT	2000	145/256	0.45 ~ 2.35
HRST	高再用性空间运输计划	美国/JPL	2000	210	0.40 ~ 2.50
FTHSI	傅立叶高光谱成像仪	美国空军研究室	2000	256	0.35 ~ 1.05
Hyperion	卫星成像光谱仪	NASA Goddard 空间飞行中心	2000	220	0.40 ~ 2.50
CHRIS	紧密式、推扫式成像光谱仪	欧空局	2001	62	0.415 ~ 1.05
COIS	空间技术开发公司海军实验室	空间技术发展公司/海军研究实验室	2002	210	0.40 ~ 2.50
GLI	高级地球观测卫星	日本/NASDA	2002	36	0.38 ~ 1.20
ARIES - I	澳大利亚资源信息环境卫星	澳大利亚空间有限公司	2005	64	0.40 ~ 1.05 2.00 ~ 2.50
PRISM	—	欧空局 ESA/EOS	2005	200	0.45 ~ 2.50

1.2.2.2 我国高光谱成像仪系统介绍

(1) 航空高光谱成像仪

我国成像光谱仪的发展经历了从多波段扫描仪到成像光谱扫描，从光机扫描到面阵 CCD 探测器固态扫描的发展过程。

“八五”期间，新型模块化航空成像光谱仪 (modular aero imaging spectrometer, MAIS) 的研制成功标志着我国的航空成像光谱仪技术和应用取得了重大突破。此后我国自行研制的推扫型成像光谱仪 (PHI) 和实用型模块成像光谱仪系统 (OMIS) 在世界航空成像光谱仪大家庭里占据了重要的地位。

(2) 航天高光谱成像仪

我国于 2002 年 3 月发射的神舟 3 号无人飞船中就搭载了一个中分辨率的成像光谱仪 (CMODIS)，该仪器共有 34 个波段，波长范围在 0.4 ~ 12.5 μm 。此外，环境减灾卫星搭载了 115 个波段的高光谱遥感器。“风云 - 3”气象卫星搭载的中分辨率成像光谱仪具有 20 个波段，成像范围包括可见光、近红外、中红外和热红外；“嫦娥一号”卫星搭载了我国自行研制的干涉成像光谱仪来探测月球物质。

1.2.3 高光谱遥感成像特点与数据表达

高光谱成像获取的图像包含了丰富的空间、辐射和光谱三重信息。其主要特点是将传统的图像维与光谱维信息融合为一体，在获取地表空间图像的同时，得到每个地物的连续光谱信息。高光谱数据是一个光谱图像的立方体，它由空间图像维、光谱维（从高光谱图像的每一个像元中可以获得一个“连续”的光谱曲线）和特征空间维（高光谱图像提供的是一个超维特征空间，挖掘高光谱信息需要深切了解地物在高光谱数据形成的 N 维特征空间中分布的特点与行为）。

1.2.4 高光谱遥感的主要应用领域

由于高光谱遥感能提供更多的精细光谱信息，有些学者将高光谱遥感的研究从最开始的矿物识别扩展到了水体、植被与生态、环境资源勘探等方面，但目前主要集中在地质、植被和水环境等研究领域。

1.2.4.1 在植被监测中的应用

高光谱遥感由于其具有超高的光谱分辨率，为植被参数估算与分析，植被长势监测及估产等方面