

密级：



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

高光谱影像多维数据库结构设计与实现

作者姓名：_____刘凯_____

指导教师：_____张立福 研究员 中国科学院遥感与数字地球研究所_____

学位类别：_____工程硕士_____

学科专业：_____电子与通信工程_____

培养单位：_____中国科学院遥感与数字地球研究所_____

2013年 5月

**Design and Implementation of the Multidimensional
Hyperspectral Database System**

By

Liu Kai

A Dissertation Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Master of [Electrical and Communication Engineering]

**The Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy
of Sciences**

May 2013

原创性声明

郑重声明：本人所呈交的学位论文，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经明确标注引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或研究成果。与本人合作并对本文研究做出过贡献的同志均已在论文中予以明确说明,并表示了致谢。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：

日 期：2013 年 5 月

学位论文使用授权说明

本人完全了解中国科学院遥感应用研究所关于收集、保存、使用学位论文的规定：

按照研究所要求提交学位论文的印刷本和电子版本；

研究所有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；

研究所可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；

在不以赢利为目的的前提下，研究所可以公布论文的部分或全部内容。

论文作者签名：

日期：2013年5月

导师签名：

日期：2013年5月

课题来源和经费支持

本论文的研究得到国家自然科学基金项目“高光谱遥感岩矿多维数据库关键技术研究”（41072248）的资助。

摘 要

随着航空、航天遥感器技术以及地面成像光谱技术的迅速发展,高光谱遥感影像数据获取越加频繁,数据量也与日俱增。如何有效的管理和共享海量高光谱数据,是遥感科学工作者面临的一个重要挑战。本文以自主研发的地面成像光谱辐射测量系统(Field Imaging Spectrometer System,FISS)所采集到的高光谱数据为研究对象和主要数据来源,以建立高光谱数据库管理系统为目的,主要完成了以下两个工作:一是对高光谱数据库管理系统进行了总体设计,研究了FISS高光谱数据的存取技术以及光谱的显示方法,并结合多维数据库的理论实现了基于三维球形系统的高光谱数据查询检索和可视化,在这些研究的基础上提出了一种适合高光谱数据的管理格式—*.mdh(Multi-dimensional hyperspectral);二是开发了高光谱数据库管理系统,该系统集成了一些简单的光谱分析方法和基于影像数据的信息提取方法,并提出了一种基于权重光分析的光谱解混方法。

本文主要的成果和结论如下:

1、在对数据库的功能需求和总体设计进行深入分析后,根据 FISS 高光谱数据的特点和系统应用的需求,并以多维数据库理论为基础,设计了以 GeoRaster 对象为核心的高光谱数据存储模型,以此存储模型为基础进行了数据库的物理设计和详细设计,研究表明,该存储模型能够为高光谱数据库系统的数据存储、显示以及光谱分析功能提供有效的支持。

2、结合 FISS 数据存储模型和多维数据库理论,利用基于存储过程的数据入库方法和基于动态数据表转换的数据获取方法,实现了高光谱数据的存储和读取。在此基础上提出了一种适合高光谱数据管理的数据结构—*.mdh,该数据结构可以实现多源数据的存储、检索和三维球形系统可视化,有效的体现高光谱数据图谱合一的特性。

3、开发了以 FISS 数据为基础数据源的高光谱数据库管理系统,实现了数据的导入、查询、可视化功能。利用该系统尝试性的构建了 FISS 样本库,并以此为基础集成了简单的光谱分析功能和高光谱信息提取模块,最后提出了一种基于权重分析的光谱解混方法,为进一步的数据筛选提供了支持。

关键词: 高光谱数据库 数据存储模型 FISS 多维数据库

Abstract

With the rapid development of spaceborne and airborne sensor and ground imaging spectroscopy, hyperspectral remote sensing image data acquisition has become increasingly frequent and the amount of data is also increasing. How to effectively manage and share a mass of spectral data is a key challenge to the remote sensing scientists. In this paper, hyperspectral data collected by the self-developed ground imaging spectral radiation measurement system (Field Imaging Spectrometer System, FISS) is the main data source to be studied. In order to establish a spectral database system, the following two things are should to be carried out: First, the overall design of the hyperspectral database, FISS hyperspectral data access technology as well as the display of the spectrum. Combined these with the theory of multi-dimensional database based on three-dimensional spherical system of , we also come up with hyperspectral data query, retrieval and visualization. On the basis of these studies, a data format called *.mdh is proposed for hyperspectral management, and a hyperspectral database system integrated some simple spectral analysis methods and information extraction methods based on image data is developed. Finally, a spectrum mixing analysis based on weight was presented on this paper.

In this paper, the main results and conclusions are as follows:

1. According to the characteristics of the FISS hyperspectral data and system application requirements, we designed the Hyperspectral data storage model, in which GeoRaster is as the core object. With this storage model, physical database design and detailed design is also been carried out. Research have showed that this model is useful to the the storage and display of hyperspectral database system data, and provides effective support for spectral analysis.
2. Combined with the FISS data storage model, the data storage methods based on the stored procedure and the data acquisition method based on dynamic data table conversion is used to implement the hyperspectral data storage and read. On the basis of these data structure, we proposed a new fomate for hyperspectral data management – *.mdh. This data structure can be used for multi-source data storage, retrieval and three-dimensional spherical system visualization, which is the manifestation of hyperspectral data's spectral and image.
3. The hyperspectral database system, in which the Fiss data is the main data source is deveoped. This system have implemented the data import, query and visualization. Using the database system we attempt to built a FISS sample database and integrate some simple spectral analysis method and hyperspectral information extraction module in it. Finally, a weight spectral unmixing method based on a FISS spectrum sample library is proposed, and it is supportive for further data filtering.

Keywords: Hyperspectral database, Data storage model, FISS , Multidimensional database

目录

第一章 引 言.....	2
1.1 研究背景及意义	2
1.2 研究内容和论文结构	3
第二章 高光谱数据库理论基础	5
2.1 遥感数据库现状	5
2.1.1 遥感影像数据库发展现状	5
2.1.2 地物光谱数据库发展现状	7
2.2 高光谱数据库系统	9
2.2.1 高光谱数据库	9
2.2.2 高光谱数据库管理系统	10
2.3 本章小结	11
第三章 高光谱影像多维数据库的分析与设计	13
3.1 需求分析	13
3.2 总体设计	14
3.2.1 数据模型设计	14
3.2.2 数据索引设计	26
3.2.3 功能模块设计	29
3.2.4 系统开发环境	31
3.3 数据存取与可视化研究	33
3.3.1 高光谱影像数据的存取设计	33
3.3.2 高光谱影像及光谱显示方法研究与实现	35
3.3.3 高光谱数据的三维可视化集成	37
3.4 数据管理格式研究	42
3.4.1 常见的遥感数据管理格式介绍	42
3.4.2 *.mdh (Multi-dimensional hyperspectral) 高光谱数据库管理格式 ..	43
3.5 本章小结	47
第四章 高光谱影像多维数据库的分析功能和系统实现	48
4.1 高光谱数据库的分析功能	48
4.1.1 基于光谱数据模型的分析功能	49
4.1.2 基于影像数据模型的信息提取功能	53
4.1.3 基于权重光谱解混方法的高光谱矿物填图方法	55
4.2 数据库管理系统实现	60
4.3 本章小结	64
第五章 结论与展望	65
5.1 结论	65
5.2 展望	66
参考文献	67
发表文章目录	70
致 谢	71

第一章 引言

1.1 研究背景及意义

高光谱遥感在电磁波谱的可见光和红外波段内能获取许多非常窄的近似连续的光谱数据，它的这种独特性能，特别是在地表物质的分类、识别、有用信息的提取等方面具有明显的优势。它使得宽波段遥感中不可探测的物质，在高光谱遥感中能被探测，是 20 世纪 80 年代以来人类在对地观察方面所取得的重大技术突破之一，是当前遥感前沿技术。

高光谱遥感最显著的特点就是海量的数据，相对其他遥感手段而言，其波段数量呈几倍、十几倍的增长[1]；同时随着传感器的量化级数增加和几何分辨率的提升，同一地区的高光谱遥感影像的数据量往往是其他观测手段的几十倍。与此庞大的数据同等重要的是遥感影像数据获取时的配套参数，包括定标数据、地物光谱数据、控制点数据等等。如何有效的对这些高光谱数据进行管理，提高它们的使用效率，是遥感科技工作者关心的问题。数据库技术和软件技术的发展为有效的管理遥感影像提供了坚实的技术基础，以数据库来管理遥感影像也成为了遥感影像管理的主流方式，国内外众多研究机构在遥感影像管理系统的研究与开发上取得了众多成果。但是目前的影像数据管理系统仍不能很好地针对高光谱数据的特点有效的管理，特别在存储效率、检索速度、大数据量支持等方面表现较差，更没有考虑多数据源、多比例尺、多时相影像数据的统一管理和集成的问题。近年来，随着遥感、测绘、计算机、通讯等技术的发展，特别是互联网大规模 Web2.0 应用的发展，一方面高光谱数据量大幅增加，数据种类更为丰富多样，对影像数据管理系统的伸缩性和灵活性提出了更高的要求；另一方面，高光谱数据的大规模行业化应用，如地质、灾害、海洋等领域，对影像数据库的存储效率和访问性能提出了更高的要求[2]。

数据库技术、存储技术等高技术的发展为多源高光谱数据管理系统提供了解决方案[3]。数据库技术的发展为海量高光谱数据的管理提供了有效的方法。数据库技术经历了第一代数据库（20 世纪 70 年代）的层次型、网状数据库系统发展到第二代（20 世纪 80 年代）的关系型数据库，在很多领域都取得了巨大的成功，随着应用领域的不断扩展，关系数据库的限制和不足日益显现出来。随着面

面向对象技术的出现,面向对象数据库系统成为数据库系统领域研究和新发展的新方向[4, 5]。而随着面向对象方法和技术正逐步融入数据库,网络技术与数据库技术的融合使得数据库技术为高光谱数据的管理提供有益的技术支撑。此外,在数据库恢复、并发控制、事务管理、完整性和安全性的实施、查询处理、优化技术等方面的研究也取得了长足的进展。

由此可知,面对着大量高光谱数据,我们亟待构建一个多源高光谱数据管理系统。此系统将以地面成像数据为基础数据,同时支持航空、星载的多源遥感影像,不仅能够完成数据的有效管理和必要的遥感特性分析工作,还能够进行数据可视化,将高光谱数据的各个属性值以多维数据的形式直观地表示出来,可以从不同的维度观察数据、对数据进行更深入的观察和分析;从而达到高光谱数据库的有效整合,实现数据、显示、模型在整个数据库系统中的集成于统一。

1.2 研究内容和论文结构

本研究的最终目标是建立高光谱数据库管理系统,主要分两个阶段开展研究:第一个阶段是以 FISS 数据为核心设计了一种实用的高光谱数据存储模型,第二个阶段是以 FISS 数据模型为基础,并以 FISS 数据为基础数据,建立了高光谱数据库管理系统。本文主要进行了以下两个方面的工作:一是对高光谱数据库管理系统进行了总体设计,研究了 FISS 高光谱数据的存取技术以及光谱的显示方法,结合多维数据库的理论实现了基于三维球形系统的多源高光谱数据查询检索和可视化,在这些研究的基础上提出了一种适合多源高光谱数据的管理格式—*.mdh;二是开发了高光谱数据库管理系统,该系统集成了一些简单的光谱分析方法和基于影像数据的信息提取方法,并提出了一种基于权重光分析的光谱解混方法,这些方法和模块均有效的利用了数据库系统中所配置的 FISS 光谱样本库。

论文首先在引言中介绍了研究背景和意义,其次从遥感数据库研究现状和高光谱数据库系统两个方面介绍了本文的基础理论知识,然后进行了高光谱数据库管理系统的设计与开发,论文的整体结构如下图所示:

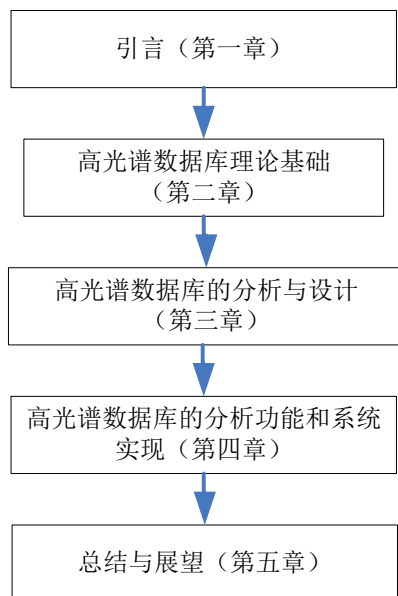


图 1-1 论文整体结构图

第一章， 主要介绍本文的研究背景和意义， 据此引出本文的研究内容和结构。

第二章， 介绍高光谱数据库的理论基础， 包括： 遥感数据库的概念以及高光谱数据库的研究现状； 高光谱数据库的基本概念、FISS 系统介绍， 以及高光谱数据库管理系统的逻辑结构， 并对多维数据库的理论进行了简单的介绍。

第三章， 对高光谱数据库进行需求分析和总体设计， 结合多维数据库的理论设计了 FISS 数据存储模型， 建立系统需要的实体数据表。研究高光谱数据的存取技术、影像和光谱显示方法， 以及基于三维球形系统的高光谱数据可视化技术。

第四章， 开发实现了高光谱数据库管理系统， 集成了一些简单的光谱分析方法和基于影像数据的信息提取方法， 并提出了一种基于权重光分析的光谱解混方法。

第五章， 对全文进行总结， 并对未来需要开展的工作进行了展望。

第二章 高光谱数据库理论基础

2.1 遥感数据库现状

2.1.1 遥感影像数据库发展现状

当前，国内外遥感影像数据库系统从功能上划分主要有三类，一类是数据浏览系统，一类是数据查询分发系统，还有一类即提供数据浏览同时也分发数据。数据浏览系统侧重于影像数据的快速无缝浏览以及提供位置服务等[6]，数据查询分发系统侧重于提供对影像数据的查询以及下载，更多是为科学研究提供数据[7, 8]，第三类系统即可以实现对影像的浏览，也可以实现数据的分发。

1. 国外遥感影像数据库系统现状

➤ Google Earth

谷歌地球（Google Earth, GE）是一款 Google 公司开发的虚拟地球仪软件，它把卫星照片、航空照相和 GIS 布置在一个地球的三维模型上，使用户从一个新的角度浏览地球，其数据来源于商业卫星遥感卫星影像和航片，包括 Digital Globe 公司的 QuickBird，美 IKONOS 及法国 SPOTS。Google Earth 包含全球大部分地区的真彩色遥感影像，并根据用户观察视角不同即时发送给用户不同分辨率的图像。用户可以通过鼠标点击、拖拽来控制飞行高度、方向、角度，也可以通过点击导航板或键盘控制，Google Earth 除了浏览的功能外，还具有量测功能包括位置量测、高程量测、距离量测和垂直跨大率调整。

➤ Microsoft TerraServer

Microsoft TerraServer 影像数据库是美国微软公司借助其网络化的数据库管理软件 SQL Server 和强大的综合研发能力，汇集美国地质调查局、美国航空影像局和俄罗斯空间署的空间数据资源，于 1998 年 6 月建成的影像分发网络数据库。目前，TerraServer 提供的影像的最高地面分辨率可以达到 0.524 米，而数据库的初始容量是 5TB，并且每月都在增加。开发者将原始影像构建金字塔，再将处理后的影像进行无缝拼接，通过 Internet 访问者可以在其中自由地漫游和缩放查询，微软还把自己的电子百科全书的虚拟地球与影像有机地结合，组建了地名数据库，通过这些地名也可以搜寻到需要访问的目标。

➤ NASA WORLD WIND

World Wind 由美国的 NASA(美国航天宇航局)机构开发出来的, 整个系统的开发初衷是面向于专业领域, 利用 NASA 卫星的优势, 给使用者营造一个有关卫星图片的查看平台。NASA World Wind 可以利用 Landsat 7、SPOT、MODIS、GLOBE, Landmark Set 等多颗卫星的数据, 将 Landsat 卫星的图像和航天飞机雷达遥感数据结合在一起, 让用户体验三维地球遨游的感觉。在浏览地球的同时, 还提供了月球数据, 可以对月球进行虚拟的巡航。

此外, EARTHXPLOER 是 USGS (美国地质勘探局, United States Geological Survey) 管理的遥感数据查询与分发系统, 其功能与资源卫星应用中心的数据管理系统大同小异, 存在的差别是它提供了更多的卫星数据, 如 MODIS、Hyperion、ALI、TM、ETM、IKONOS-2 等的查询和分发功能。

2. 国内遥感影像数据库系统现状

国内遥感影像数据库系统的研究起步较晚, 但是在基于广域网和局域网的影像数据库管理系统建设上也取得了一定的成果。

➤ 基于广域网的卫星数据服务系统

主要有中国资源卫星应用中心的数据服务系统和中科院卫星地面站的数据服务系统。

中国资源卫星应用中心的数据服务系统包括 CBERS-01/02 星数据服务系统、CBERS -02B 星数据服务系统和环境减灾卫星数据服务系统, 是典型的遥感影像数据管理与分发系统, 主要提供我国国产陆地卫星数据产品的查询、订购和下载。查询分为文本查询和地图查询。文本查询是指根据一些已知的条件, 直接选择查询参数 (包括: 采集日期, Path/Row, 经纬度, 卫星名, 传感器名, 接收站等), 系统根据选定的这些参数进行查询。地图查询是指用户可以在页面显示的地图上, 用相应的工具选择一个固定的区域进行查询, 目前用户服务系统提供矩形框选择查询和行政区选择查询。用户可以从查询结果中选择仔细需要的图像, 然后点击订购按钮即可实现产品的订购, 订购完成后, 服务器会自动处理订单, 用户只需等待订单完成后就可以进行产品下载了。

中科院卫星地面站 (http://cs.rsgs.ac.cn/cs_cn/query/query_map.asp) 通过在数据库中存储影像的相关属性数据和缩略图片, 提供对卫星影像的检索。

他们通过 WEBGIS 对经纬度坐标的查询,显示查询区域坐标范围内符合相关属性描述(云量、数据获取时间、卫星类型)的影像缩略图。

➤ 基于局域网的影像数据管理系统

主要是国产的武汉吉奥信息工程有限公司的 GeoImageDB。GeoImageDB 是一个基于 COM 的全组件、控制式、支持局域网范围内透明的异构存储与管理影像系统。它是基于 Oracle 数据库并且利用组件技术建立,管理省级和国家级多比例尺、多分辨率、多数据源正射影像数据;做到由全貌到细节、由整体到局部、由低分辨率到高分辨率快速、无缝的进行影像漫游和浏览;支持图像数据集中式和分布式(局域网范围内分布式的存贮)的存贮与管理,为海量数据的应用提供一个高效的无缝平台;支持影像元数据查询、几何范围查询、图幅查询、地名查询等;对影像数据进行实时的压缩和解压,减少影像数据的存储量;提供各种形式的数据分发功能;为影像数据的 WEB 发布和以后的应用研究(如基于影像查询和变化监测等)提供 COM 接口。

此外,解放军信息工程大学测绘学院研制的 Image Map Library (IML)数据管理系统、中国地质大学研制的 MSIDB(多源影像数据库)等都涉及了遥感影像管理的技术,实现了较多的功能,取得了不小的成果。

2.1.2 地物光谱数据库发展现状

高光谱遥感研究的主要内容之一是对地物进行识别和分类,地物光谱数据库在高光谱遥感图像的识别和分类中起着“图例”的作用[9]。地物反射光谱数据库的质量直接影响到高光谱遥感影像的分类精度和识别准确率,测量并建立各种典型地物的光谱数据信息是高光谱遥感理论和应用技术发展的基础,使研究人员有可能通过光谱匹配技术从高光谱遥感图像直接识别地物类型[10],也可直接进行岩石分类及地质填图等工作。

1. 国外地物光谱数据库发展情况

美国在20世纪60年代对岩石红外辐射特性进行研究,此后,Stoner等对土壤光谱的研究、Kahle建它的地质反射光谱数据库以及Collins的工作都取得了较好的成果;美国国家航空和航天局在70年代初建立了地球资源信息系统ERSIS(The NASA earth reSources spectral information system);日本也开展了地物光谱特征的研究,1973年日本的江森康文等对北海道各种植物的反射光谱特性进行了

测定；1980年，美国普渡大学测定了200多条土壤光谱曲线；法国第一大学在这方面也做了大量工作并召开专题讨论会。美国喷气推进实验室对160种矿物在0.4—2.5 μm 反射光谱进行了测量，美国约翰·霍普金斯大学建立了包括多种地物反射光谱的数据库。Wegmüller等建立了用于农作物分类的特征地物反射光谱数据库系统，1998年，Auria建立了云层分类专用反射光谱数据库系统，印度用SAMIR星载微波辐射计数据建立了用于雪、大气效应的反射光谱数据库系统，澳大利亚联邦科学研究院也建立了高光谱遥感地物反射光谱数据库；2004年，美国地质调查局建成了包含800多条曲线的第五版地物反射光谱数据库。

国际上有代表性的地物反射光谱数据库有JPL地物反射光谱数据库(Jet Propulsion Laboratory, 美国喷气推进实验室)、USGS地物反射光谱数据库(US Geological Survey, 美国地质调查局)、JHU地物反射光谱数据库(Johns Hopkins University, 美国约翰·霍普金斯大学)、Astrer地物反射光谱数据库(Advanced spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, 先进星载热辐射与反射辐射计)和IGCP—264数字化地物反射光谱数据库(International Geological Correlation Program, 国际地质对比计划)等。

2. 国内地物光谱数据库发展情况

我国地物反射光谱数据库研究是从1978年腾冲航空遥感试验开始的，该测试历时3年，完成75项专题研究，获得了1000多组树木、农作物、土壤、水体和岩矿等光谱曲线。20世纪80年代，中科院空间科技中心在宁芜地区获得各种光谱曲线1 000多条，中国科学院长春地理所也建立了长春净月潭地物反射光谱数据库系统，中科院遥感所对277种中国典型地物反射光谱特征进行了测量。20世纪90年代，安徽光机所建立遥感卫星辐射校正场并开展了地物反射光谱测量研究。1990年西昌遥感试验场对水体、土壤、植被、农作物等地物进行了测试，在0.4—1.1 μm 范围内测得6816个数据，还对水体、土壤、小麦、植被等地物光谱曲线进行了对比分析。1998年北京航遥中心建立典型岩石矿物反射光谱数据库，包含典型岩石和矿物500余种。2001年，北京师范大学在北京顺义获取了冬小麦光谱测量数据、农学参数等。2005年，中煤航测遥感局建立了黄土高原牛生态环境观测基准带地物反射光谱数据库。此外，国家海洋局进行了以赤潮为重点的光谱测量、地矿部遥感中心在热红外遥感方面的测量和浙江大学以农业为重点的遥感研究

以及南京大学建立的高光谱遥感地物反射光谱数据库系统等都取得了较好的研究成果[11]。

2.2 高光谱数据库系统

2.2.1 高光谱数据库

目前,在遥感技术领域,国内国外都已经建成了一些光谱数据库[12],但其存储内容多为单条光谱曲线的集合[13]。高光谱数据有着其与众不同的特点,高光谱数据库系统是专门面向高光谱数据,体现图谱合一特性,综合了光谱数据库、影像数据库和数据分析功能于一体的专用数据库系统[14, 15]。它与通常意义上的光谱数据库最大的不同在于它不仅存储室内或野外光谱辐射计获取的目标光谱数据,它还可以存储以图像立方体形式存在的高光谱图像光谱数据,并根据用户需要,可以从标准图像数据块中提取所要求的任意象元级上的光谱曲线。

高光谱数据库在以下两个方面具有非常现实的意义:一是面向近地面的地面成像光谱辐射计,二是从航空或航天层次上开展的地面光谱遥感成像测量[16]。目前,国际上主要的光谱辐射计均采用点测量模式,只获得测量对象的光谱曲线[17]。然而任何对地观测都有尺度效应的问题,在遥感器视场角不变的情况下,不同的遥感飞行高度对应不同的象元地面大小。野外光谱测量所对应的地面视场范围与光谱图像象元的大小相对应是图像光谱定标质量好坏的一个关键因素,而目前野外光谱辐射计在均难以做到地面视场的精确设定。地面成像光谱辐射计在高光谱数据库系统中具有不可或缺的作用,它不仅保留了地面光谱测量的特点,也具有精确设定视场范围和高地面分解力的优势,尤其适合于混合光谱研究和可变尺度下的象元光谱组构分析。本文所采用的高光谱数据对象主要为地面成像光谱辐射测量系统 FISS。

地面成像光谱辐射测量系统(Field Imaging Spectrometer System, FISS)是我国第一套地面成像光谱仪[18, 19],由中国科学院遥感应用研究所和中国科学院上海技术物理研究所联合研制,其设计借鉴和参照了中国自行研制的航空推扫成像光谱仪 PHI 的设计原理,主要由三个系统即计算机系统、光机系统和电子学系统构成,其主要技术指标如表所示。

表 2-1 FISS 主要技术参数指标和性能

波段数/个	344
-------	-----

光谱范围/nm	437-902
光谱分辨率/nm	优于 5nm
地面分辨率/mm	最高可优于 2
实验室辐射定标精度/%	优于 5
成像速率/（帧/s）	20
扫描视场/度	-20--20
量化位数/位	12
信噪比	60%波段>500
光谱采样间隔/nm	约 1.4



图 2-1 FISS 实际测量工作图

2.2.2 高光谱数据库管理系统

1. 高光谱数据库管理系统的组成

一个完整的高光谱数据库管理系统应该有如下的组成部分：核心部分是高光谱图像库系统，为了保证数据的多样性，以及和地面光谱的匹配，基于已有技术的光谱数据库辅助系统是必要的；为了扩展数据库的功能，在存储、搜索等基本功能上丰富数据库的应用，建立一个高光谱数据分析系统会有很大的帮助；在整个数据库系统之上，对多源高光谱数据的存储检索以及基于三维球形系统的可视化是本系统的特色；最后由前台界面系统与用户交互，得到其关心的条件并返回其需要的结果。

➤ 高光谱图像库系统：这是高光谱数据库系统的核心所在，它主要负责高光谱样本图像光谱数据以及其对应的属性数据的存储、查询、浏览、添加、修改、删除等基本操作，其中存储的数据以地面成像光谱辐射计 FISS 为主，同时可以存

储航空、航天高光谱成像仪采集的图像光谱数据，其兼容性保证各种光谱波段设置的高光谱成像仪采集的样本均可以存储。

➤ 高光谱数据分析系统：作为一个成熟的数据库应用系统，光有数据库基本的管理功能是不够的，尤其是高光谱数据中富含了很多信息，相应的处理模型、方法是必不可少的一部分[20]，将一些常见的处理方法软件化，可以给高光谱研究应用带来极大的便利。

➤ 前台界面系统：它的目标很明确就是和用户交互，得到其意见并反馈其需要的信息。

2. 多维数据库理论

多维数据库是数据库发展的最新阶段，它把数据组织成利于分析的多维数据立方体，是面向决策支持的海量数据处理的关键因素。其独特的多维数据模型，使得多维数据库需要更少的存储空间且具有更高效的检索速度。多维分析把一个实体的多项重要属性定义为多个维度，使得用户能方便的汇总数据集，简化了数据分析处理逻辑，并能对不同维度值的数据进行比较，从而发现数据的分布规律。自多维数据库提出以来，一个高度抽象的、独立于任何执行的普遍适用的概念模型并没有被设计出来，但是它仍然引起国内外学者极大的研究兴趣。在理论方面，Pedersen[21]等详细描述了多维数据库有别于关系数据库的概念和查询分析方法，针对空间数据立方体，将数据立方体的分析操作分为概括分析、局部分析、全局分析和旋转分析。在应用方面，很多学者对海洋数据、铁路货运数据、医疗信息数据、图书馆数据与油气勘探数据进行多维数据建模以及实现开展了研究[22]。

多维数据库可以简单地理解为：将数据存放在一个 n 维数组中，而不是像关系数据库那样以记录的形式存放。一般地，MDB 是面向查询对象（类），由其度量属性集、构成多维空间的维的集合以及在多维访问中的各点的值的集合共同描述。多维数据库的基本分析包括钻取、切片、切块和旋转。其中，钻取包括上钻和下翻，是对多维数据进行概括分析的方法[23]；切片和切块是对多维数据进行局部分析的方法；旋转是对多维数据进行整体分析的方法。

2.3 本章小结

本章主要从遥感数据库现状和高光谱数据库系统两个方面介绍了本文开展

研究的相关理论基础。首先介绍了遥感数据库，主要是对遥感影像库和地物光谱库的国内外研究现状进行了概述，并对 FISS 系统进行了简单的介绍；然后阐述了高光谱数据库管理系统及其逻辑组成，最后介绍了多维数据库的基本理念和常用的操作，这些基本理论、知识为本文的后续研究奠定了理论基础。

第三章 高光谱影像多维数据库的分析与设计

3.1 需求分析

需求分析的任务是通过调查高光谱遥感要处理的对象，明确用户的各种需求，同时充分了解数据库系统的工作流程，然后在此基础上划分系统的功能[24]。

建立高光谱影像数据库，把得到的大量数据即包括光谱数据（地面成像光谱仪 FISS、点成像光谱仪 ASD 和 SVC、各种机载和星载数据）进行有效编辑和管理，实现快速查询、检索和可视化，并在此基础上进行数据分析，对于高光谱数据应用以及科学研究来说，具有非常重要的意义。充分分析高光谱遥感数据的特点，并以地面 FISS 数据位切入研究点，我们可以认为高光谱数据库应当满足一下要求。

➤ 数据的完整性和一致性

数据的完整性是通过对数据表和表中的列添加约束来实现，高光谱数据包含了影像数据、配套地面测量光谱数据、配套测量参数以及针对应用的属性参数。由于针对不同的应用目的，测量参数和属性参数在命名、格式、值域、数量上都不尽相同，除了积分时间、制冷温度、DN 动态范围、扫描帧速率等测量参数外（针对 FISS），还有面向应用的属性，如飞行高度、测量时间、测量地点、经纬度信息等（针对影像），对应的数据表的结构难以提炼成统一的实体关系模型。所以，在维护这些高光谱数据的过程中，需要对数据模型的进行合理设计，保证数据的完整性和一致性。

➤ 海量数据存储和查询检索

高光谱数据最大的特点就是其海量的数据和大量的波段，随着高光谱数据特别是地面成像光谱数据（FISS）应用的不断推广，其获取的数据将会越来越多这就需要有一个海量的存储系统。在实际应用中，需要对高光谱数据进行空间截取或者光谱波段截取等更加详细的要求，因此需要考虑一个高效的存储结构，提高检索和读取效率。在设计高光谱数据库时，不仅要考虑大容量数据存储的高效性，也要考虑到进行查询检索等相关操作时的灵活性。

➤ 图谱合一的存储与可视化

高光谱遥感的最重要特点是从图像空间能够提取出像元的光谱曲线，直观的

了解地物目标的光谱信息。因此，在数据库存储时应将变化性很强的影像光谱维数据与空间维数据很好的结合在一起。同时，在显示影像空间维信息的同时能够提取出地物的光谱曲线，实现高光谱数据图谱合一的存储与显示，这就需要我们选择一个合适的存储方式和数据模型。

➤ 分析功能

高光谱数据库，不应仅仅是能存储、查询和显示高光谱数据，在光谱曲线显示之后，还应当具有一些光谱分析功能。比如，光谱平滑、光谱重采样、包络线去除以及光谱匹配等，以便帮助用户更好的辨别当前影像有可能包含了那些地物，有利于数据的进一步选择。同时，对于星载/机载的影像数据应该包含一些常用的数据挖掘手段，如地物识别、典型地物探测等。

➤ 系统的互操作性和扩展性

系统目前主要存储的是多源高光谱数据，因此可以从以下两个方面来考虑系统的扩展性：一个是纵向上的扩展，即各种功能的增加和完善，如更多的分析功能或者对数据模型的一些扩展；一个是横向上的扩展，即增加对其它类型成像光谱数据的管理以及增加针对这些成像光谱数据的数据模型，从而使该数据库系统变得更加丰满。所以在系统设计时，考虑到系统的延展性，可扩展性，设计好接口。

3.2 总体设计

3.2.1 数据模型设计

1. 数据模型选取

高光谱影像数据通常以三种格式排列方式：BIL（波段按行交叉）、BIP（波段按像元交叉）和BSQ（按波段顺序），一般成像光谱仪是以BIP方式保存数据，也有些面阵成像光谱仪以BIL方式获得数据。高光谱数据由于波段较多，一般数据量很大，数据的存储格式将会极大的影响数据的处理效率。一般如果要提取某个影像像元的光谱曲线，分析它的光谱特性，这时以BIP方式存储比较合适；如果进行空间分析，则以BSQ存储比较合适。本研究中侧重于地物光谱信息的显示和分析，故采用BIP格式作为其基本的存储方式[27]。

GeoRaster 是一个基于组件的、逻辑分层的通用栅格数据模型。它是基于 Oracle Spatial 选件采用了面向对象关系技术来实现对遥感影像数据的存储和

管理。GeoRaster 主要通过构造遥感影像对象类型,描述遥感影像数据模型的元数据,和一系列强大的过程函数来实现遥感影像的存储、管理与处理[28]。影像数据通过 SDO_GEORASTER 数据类型存储到数据库的影像数据表中,该表存储与该影像数据相关的信息,如获取时间、经纬度等,并不真正存储栅格数据,是影像数据的逻辑实体。栅格数据以分块的形式存储在数据表中,每个块存储为栅格数据表的一条记录。

在物理存储上,GeoRaster 数据使用两种对象类型:SDO_GEORASTER 和 SDO_RASTER。SDO_GEORASTER 包含了栅格数据集和相关的元数据,该对象类型的表称为 GeoRaster 表;SDO_RASTER 包含了栅格数据的每一个块信息,它使用 BLOB 对象存储栅格项数据。在这一存储模式中,多源遥感影像的存储由 GeoRaster 对象信息表、影像数据表和元数据表等表组成,各个表格之间以 Raster ID 进行关联。其中 GeoRaster 对象信息表(GeoRaster table)和影像数据表(Rasterdata table, RDT) Oracle GeoRaster 对象定义,元数据表(Metadata table)由用户自定义。GeoRaster table 用来存储影像类型、空间范围信息以及 XML Schema 格式的元数据信息,RDT 用来存储分块的影像数据,数据块以 BLOB 字段存储;Metatable 是用来存储 GeoRaster XMLSchema 中没有定义的元数据,以及用户为了方便查询自定义的元数据。

GeoRaster 模块还提供了可以对 GeoRaster 数据和元数据进行操作和查询的语言包,包括 SDO_GEOR、SDO_GEOR_UTL 和 SDO_GEOR_ADMIN,这些语言包里包含了很多函数和存储过程,如影像分块、建立空间索引、建立金字塔、像元值获取、波段数获取等,这些函数可以在 PL/SQL 中使用。同时 GeoRaster 还提供 OCI、OCCI、JAVA 等方式进行开发。

SDO_GEORASTER 对象类型的定义是:

```
CREATE TYPE sdo_georaster AS OBJECT (
  rasterType NUMBER,
  sPatialExtent SDO_GEOMETRY,
  rasterDataTable VARCHAR2(32),
  rasterID NUMBER,
  metadata XMLType );
```

SDO_RASTER 对象是实际存储栅格数据的数据对象。栅格数据表是根据此对象建立的对象表。SDO_RASTER 对象类型的定义是：

```
CREATE TYPE sdo_raster AS OBJECT(
    rasterID    NUMBER,
    PyramidLevel NUMBER,
    bandBlockNumber NUMBER,
    rowBlockNumber NUMBER,
    columnBlockNumber NUMBER,
    blockMBR    SDO_GEOMETRY,
    rasterBlock BLOB);
```

2. 数据存储模型设计

本文将多维数据库的理念引入遥感高光谱数据库领域，高光谱多维数据库的主要目标就是利用维的概念为多维分析提供尽可能多的途径，每个维代表一个访问数据库的信息路径。根据时间、空间等各种因素对地物光谱的影响以及对多维数据研究的需要，确定高光谱数据的一些主要维度，包括地物类型(主要是岩矿)维、时间维、采集地点维、行维、列维、光谱维等。

多维数据结构是指多维数据在多维空间里的分布，主要有超立方和多立方两种结构。超立方结构是指用 3 维或更多的维数来描述一个对象，每个维彼此垂直。数据的测量值发生在维的交叉点上，数据空间的各个部分都有相同的维属性。多立方结构是将大的数据结构分成多个多维结构。这些多维结构是大数据维数的子集，面向某一特定应用对维进行分割，它具有很强的灵活性，提高了数据（特别是稀疏数据）的分析效率。

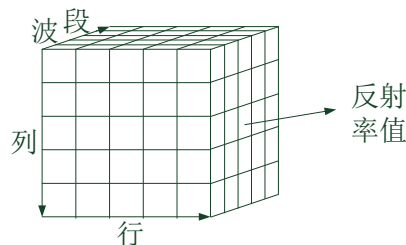


图 3-2 高光谱数据立方体

在这里我们以 FISS 岩矿数据为主要研究对象，对其进行分析和设计。岩矿影像数据立方体，指岩矿高光谱影像数据，由地面成像光谱辐射测量系统(Field

Imaging Spectrometer System, FISS) 测量得到。FISS 高光谱数据具有很高的分辨率 (空间分辨率可达厘米甚至毫米级), 是对目标进行结构光谱分析、混合光谱分解、纯像元提取、空间尺度转换和光谱尺度转换研究的有利数据。FISS 数据是图像数据和光谱数据结合的统一体, 具有行、列和光谱三个维度。它本身具有统一完整性, 与其它影像立方体互相独立。在存储时, 影像立方体作为一个整体存储, 因此确定某个影像立方体后, 才能在影像立方体的行维、列维或光谱维上进行钻取、切片操作。

岩矿多维高光谱数据库要能够根据一个统一的多维数据模型, 将大量的、现实的岩矿数据按照相应的主题转换成统一的格式, 实现以多维方式组织和显示数据, 从而实现复杂岩矿数据的集成、存储和管理, 供人们从不同角度、多方位的认识岩矿数据。其最重要的功能应该是在有效组织数据的基础上进行多维分析。在具体分析时, 能够将岩矿数据按照维层次关系进行聚集, 了解岩矿在各个维度上的分布情况: 在非影像维上, 通过对时间维层次或采集地点维层次的聚集, 可以知道岩矿类型在不同时间、不同地点的分布情况等; 在影像维上, 通过行维、列维和光谱维的层次聚集操作, 得到相应的光谱曲线或反射率值。能够支持进行空间尺度和光谱尺度的转换, 得到不同空间分辨率和光谱分辨率的数据等。

1) 数据库逻辑设计

在关系型数据库中, 对于逻辑层一般采用关系表和视图, 而多维数据库采用的是星型模型和雪花模型。在本文的研究中采用了星型模型来表示多维数据模型, 数据库中包括一个“事实表”, 对于每一维都有一个“维表”。事实表中的每条元组都包含有指向各个维表的外键和一些相应的测量数据, 维表中记录的是有关这一维的属性。事实表中的每一个元组只是包含了一些指针 (外键), 而对应的主键分别放在不同的维表中。每个指针指向一个维表, 这就构成了数据库的多维结构。在每个维表中除包含每一维的主键外, 还有说明该维的一些其它属性字段。

多维波谱数据库包括 FISS 数据库, 实测波谱数据库、航空影像数据库和卫星影像数据库。各个数据库需要存储的信息包括如下:

- FISS 数据信息: 目标类型、采集地点、采集日期、测量高度、快视图、FISS 数据、经度、纬度、配置参数文件、测量情况说明。
- 实测波谱数据信息: 岩矿类型、测量地点、测量仪器、测量日期、测量时间、

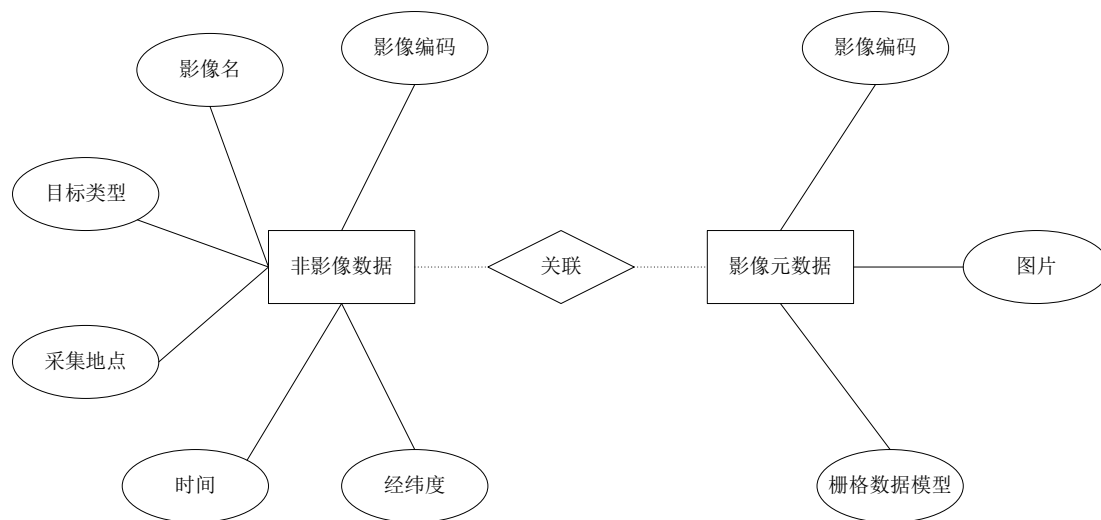
波谱数据、背景照片、经度、纬度。

- 航空影像数据信息：飞机类型、传感器名称、影像成像日期、空间分辨率、测区、航带、中心点经度、中心点纬度、左上角经度、左上角纬度、右上角经度、右上角纬度、左下角经度、左下角纬度、右下角经度、右下角纬度、参数文件、影像快视图、影像文件。
- 卫星影像数据信息：卫星名称、传感器名称、影像成像日期、空间分辨率、轨道号 (PATH、ROW)、中心点经度、中心点纬度、左上角经度、左上角纬度、右上角经度、右上角纬度、左下角经度、左下角纬度、右下角经度、右下角纬度、参数文件、影像快视图、影像文件。

FISS 数据库包含影像事实表、反射率事实表等，反射率数据表以影像立方体的形式存储在影像事实表，影像数据以 BLOB 字段的形式存储。航空和卫星数据库与 FISS 数据库的表达类似，这一设计功能实现了影像中和反射率信息的关联。实测波谱数据库存储实测波谱数据信息，并且存储了背景照片，实现波谱数据和实测地物的关联。多维岩矿波谱数据库管理系统主要涉及 5 个实体：

- 影像元数据
- 栅格数据
- 非影像数据
- 反射率数据
- 用户

它们之间的实体关系如下图所示：



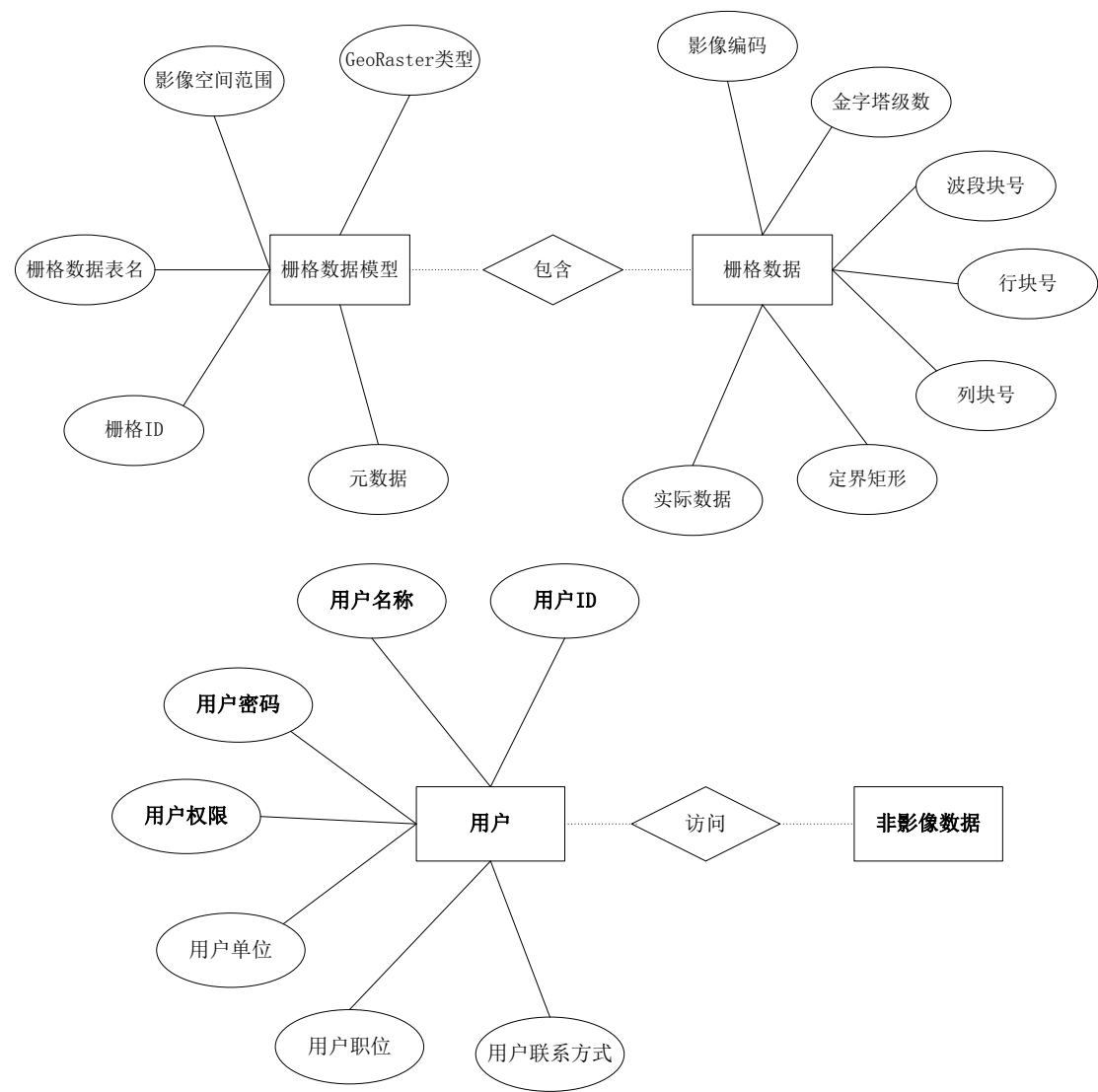


图 3-3 数据库实体关系表

2) 物理设计

数据存储结构设计就是数据表和数据表空间的设计，数据表是数据存储的基本单位，各种数据根据自身的特点以及互相之间的联系，按照 Oracle 规定的-定的数据类型，设定表的字段设置、确定主键、确定连接方式。数据结构设计是整个数据库的根本所在，系统能否高效稳定的运行在很大程度上取决于这部分实现的优劣。对于图片数据等数据量比较大的字段，则需要分配好数据表空间，以保证查询时不必反复的读取这一庞大的空间，从而提高查询效率。

表汇总

英文表名	中文表名	功能说明
FISS_METADATA	FISS 源数据表	管理非影像类型的数据

FISS_GEORASTER	FISS 影像元数据表	存储影像元数据
FISS_RASTER	FISS 栅格数据表	存储栅格数据
FISS_USER	FISS 用户表	管理用户信息
pixelspectable	FISS 影像像元反射率表	存储像元反射率值
SPECDATA	波谱数据表	存储波谱曲线值
AIRFLIGHT_METADATA	航空非影像数据表	管理非影像类型的数据
AIRFLIGHT_GEORASTER	航空影像元数据表	存储影像元数据
AIRFLIGHT_RASTER	航空栅格数据表	存储栅格数据
airpixelspectable	航空影像像元反射率表	存储像元反射率值
SATELITE_METADATA	卫星非影像数据表	管理非影像类型的数据
SATELITE_GEORASTER	卫星影像元数据表	存储影像元数据
SATELITE_RASTER	卫星栅格数据表	存储栅格数据
satepixelspectable	卫星影像像元反射率表	存储像元反射率值

FISS 非影像数据表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENT S
IMG_ID	NUMBER	No		1	1	
IMG_NAME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		2		
RM_TYPE	VARCHAR2(4000 BYTE)	No		3		
IMG_LOC	VARCHAR2(4000 BYTE)	No		4		
IMG_DATE	VARCHAR2(4000 BYTE)	No		5		
IMG_TIME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		6		

IMG_HEIGHT	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		7		
IMG_LONG	NUMBER	Yes		8		
IMG_LAT	NUMBER	Yes		9		

FISS 影像元数据表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENTS
IMG_ID	NUMBER	No		1	1	
IMG_PIC	BLOB	No		2		
IMG_GEOR	SDO_GEORASTER	Yes		3		

FISS 栅格数据表

Column Name	Data Type	Nullabl e	Data Defau lt	COLUM N ID	Primar y Key	COMMEN TS
RASTERID	NUMBER	No		1	1	
PYRAMIDLEVEL	NUMBER	No		2	2	
BANDBLOCKNUMBER	NUMBER	No		3	3	
ROWBLOCKNUMBER	NUMBER	No		4	4	
COLUMNBLOCKNUMBER	NUMBER	No		5	5	
BLOCKMBR	SDO_GEOMET RY	Yes		6		
RASTERBLOCK	BLOB	Yes		7		

FISS 用户表

字段名	数据类型	说明
USER_ID	NUMBER	用户 ID
USER_NAME	VARCHAR2(100)	用户名称
USER_PWD	VARCHAR2(100)	用户密码

USER_AUTHORITY	NUMBER	用户权限
USER_UNIT	VARCHAR2(1000)	用户单位
USER_POSITION	VARCHAR2(100)	用户职位
USER_PHONE	NUMBER	电话
USER_EMAIL	VARCHAR2(100)	电子邮件

FISS 影像像元反射率表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENTS
BANDNO	NUMBER	Yes		1		
REFLECTANCE	NUMBER	Yes		2		

实测波谱数据表

Column Name	Data Type	Nullabl e	Data Default	COLUM N ID	Primar y Key	COMMENT S
SPEC_ID	NUMBER	No		1	1	
ROCK_TYPE	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		2		
LOC_ID	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		3		
SENSOR_ID	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		4		
SPEC_DATE	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		5		
SPEC_TIME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		6		
SPEC_DATA	BLOB	Yes		7		
SPEC_PIC	BLOB	Yes		8		
SPEC_LONGITU DE	NUMBER(7,4)	Yes		9		
SPEC_LATITUDE	NUMBER(6,4)	Yes		10		

航空非影像数据表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENT
IMG_ID	NUMBER	No		1	1	
IMG_NAME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		2		
ST_NAME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		3		
SN_NAME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		4		
IMG_DATE	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		5		
IMG_TIME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		6		
IMG_SCALE	NUMBER	Yes		7		
IMG_SURVEYAREA	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		8		
IMG_FLIGHTSTRIP	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		9		
IMG_CNLONG	NUMBER(8,4)	Yes		10		
IMG_CNLAT	NUMBER(8,4)	Yes		11		
IMG_LFTPLONG	NUMBER(8,4)	Yes		12		
IMG_LFTPLAT	NUMBER(8,4)	Yes		13		
IMG_RTTPLONG	NUMBER(8,4)	Yes		14		
IMG_RTTPLAT	NUMBER(8,4)	Yes		15		
IMG_LFBTLONG	NUMBER(8,4)	Yes		16		
IMG_LFBTLAT	NUMBER(8,4)	Yes		17		
IMG_RTBTLONG	NUMBER(8,4)	Yes		18		

IMG_RTBTLAT	NUMBER(8,4)	Yes		19		
-------------	-------------	-----	--	----	--	--

航空影像元数据表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENTS
IMG_ID	NUMBER	No		1	1	
IMG_PIC	BLOB	No		2		
IMG_GEOR	SDO_GEORASTER	Yes		3		

航空栅格数据表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENTS
RASTERID	NUMBER	No		1	1	
PYRAMIDLEVEL	NUMBER	No		2	2	
BANDBLOCKNUMBER	NUMBER	No		3	3	
ROWBLOCKNUMBER	NUMBER	No		4	4	
COLUMNBLOCKNUMBER	NUMBER	No		5	5	
BLOCKMBR	SDO_GEOMETRY	Yes		6		
RASTERBLOCK	BLOB	Yes		7		

航空影像元反射率表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENTS
BANDNO	NUMBER	Yes		1		
REFLECTANCE	NUMBER	Yes		2		

卫星非影像数据表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENTS
IMG_ID	NUMBER	No		1	1	

IMG_NAME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		2		
ST_NAME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		3		
SN_NAME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		4		
IMG_DATE	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		5		
IMG_TIME	VARCHAR2(4000 BYTE)	Yes		6		
IMG_SCALE	NUMBER	Yes		7		
IMG_PATH	NUMBER	Yes		8		
IMG_ROW	NUMBER	Yes		9		
IMG_CNLONG	NUMBER	Yes		10		
IMG_CNLAT	NUMBER	Yes		11		
IMG_LFTPLON G	NUMBER	Yes		12		
IMG_LFTPLAT	NUMBER	Yes		13		
IMG_RTTPLON G	NUMBER	Yes		14		
IMG_RTTPLAT	NUMBER	Yes		15		
IMG_LFBTLON G	NUMBER	Yes		16		
IMG_LFBTLAT	NUMBER	Yes		17		
IMG_RTBTLON G	NUMBER	Yes		18		
IMG_RTBTLAT	NUMBER	Yes		19		

卫星影像元数据表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENTS
IMG_ID	NUMBER	No		1	1	
IMG_PIC	BLOB	No		2		
IMG_GEOR	SDO_GEORASTER	Yes		3		

卫星栅格数据表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENTS
RASTERID	NUMBER	No		1	1	
PYRAMIDLEVEL	NUMBER	No		2	2	
BANDBLOCKNUMBER	NUMBER	No		3	3	
ROWBLOCKNUMBER	NUMBER	No		4	4	
COLUMNBLOCKNUMBER	NUMBER	No		5	5	
BLOCKMBR	SDO_GEOMETRY	Yes		6		
RASTERBLOCK	BLOB	Yes		7		

卫星影像像元反射率表

Column Name	Data Type	Nullable	Data Default	COLUMN ID	Primary Key	COMMENTS
BANDNO	NUMBER	Yes		1		
REFLECTANCE	NUMBER	Yes		2		

3.2.2 数据索引设计

1. 索引的创建

Oracle 使用索引主要是从完整性方面和性能方面来考虑，完整性是指通过主键和唯一性约束来强制完整性，性能是指在 DML（数据操作语言）语句执行期间提供对表数据的更快的访问路径。索引拥有表的一列或多列的值以及与这些列值相对应的行内部地址（RowID），当 Oracle 需要在表中查找某一指定行时，可以在索引中查找 RowID 并直接从表中提取数据。为了满足完整性和性能的要求，应该在表中建立足够的索引，但这是可能带来更昂贵的 DML 为代价[29]。因此，不能盲目地建立索引，而是应该针对高光谱数据库系统的具体业务情况建立一个合理的索引策略，在这里我们主要考虑了一下几点：

- 值很少的属性、值分布严重不均的属性、经常更新的属性或表不宜建立索引
- 引对于有很多字符的大型字段不宜建立索引
- 表的主键和外键上一般都要建立索引
- 一般说来，同时利用单个表中多个字段的查询时，建立一个复合索引比多个单列索引的效率更高

然而，仅仅制定一些简单的索引策略还是不够的。Oracle 索引的种类很多：B*Tree 索引、位图（BitMap）索引、基于函数（function-based）的索引（简称为 FBI）、反向键值（reverse key）索引、唯一性（unique）索引以及聚簇索引等。在实际应用中，我们需要根据具体的业务情况，在遵照索引策略的基础上恰当地使用索引，这也是高光谱遥感数据库系统需要研究的重点之一。本研究中我们在 FISS_GeoRaster 的 IMG_Id 和 OBJ_TYPE 列上创建复合唯一性索引。FISS_GeoRaster 表结构如下：

```
CREATE TABLE FISS_GeoRaster
(
  IMG_ID NUMBER NOT NULL,
  OBJ_TYPE VARCHAR2(4000) NOT NULL,
  IMG_LOC VARCHAR2(4000) NOT NULL,
  IMG_DATE VARCHAR2(4000) NOT NULL,
  IMG_TIME VARCHAR2(4000),
  IMG_HEIGHT VARCHAR2(4000),
  IMG_LONG NUMBER,
```

```

IMG_LAT NUMBER,
IMG_GEOR MDSYS.SDO_GEORASTER
CONSTRAINT FMD_PK PRIMARY KEY
(
    IMG_ID
);

```

其创建索引的 SQL 语句为:

```

create unique index indx_pk_GeoRaster
on FISS_GeoRaster (IMG_Id, OBJ_TYPE);

```

2. 索引的重建

当表经过大量的 DML 操作以后, 这些表的索引上将会出现空闲空间, 使索引变得很紊乱。从而使索引扫描的效率降低, 因为空闲空间将在索引查询期间导致多余的 I/O 操作。通过一定重建索引操作可以有效地消除空闲空间, 因此在确保可以从重建中获益时可以考虑进行索引重建。

1) 索引的动态配置

索引会在数据库内部进行自身的管理以确保对数据行的快速访问, 然而, 数据表中大量的 DML 操作会导致索引动态地进行自身重新配置, 这些配置主要包括以下三个方面:

- 索引的分割, 当新数据行产生的索引节点要建立在现有级别上时出现。
- 索引的生成, 在某些位置上, 索引达到此级索引的最大容量时会生成更深一级的索引结构。
- 索引节点的删除, 删除表中的数据行后, 索引中相应的节点不会从物理意义上删除, 而是仅仅从逻辑上删除了此索引项, 此时索引树中会留下了一个“死”节点。

2) 重建索引策略

何时才需要对索引进行重建呢? 可以有两种方法: 一方面, 利用 `analyze index indexname compute statistics` 对表进行分析, 察看 `dba_indexes` 中的 `blevel`, 这一列是说明索引从根块到叶快的级别或是深度。如果级别大于等于

4, 则需要重建。SQL 语句如下:

```
select index_name,blevel from dba_indexes where blevel>=4;
```

另一方面, 可以计算索引中被删除项占总的项数的百分比, 如果达到 20% 以上时, 也应当重建。SQL 语句如下:

```
analyze index indexname validate structure;
select (del_lf_rows_len/lf_rows_len)*100||'%' as Ratio from
index_stats where name=indexname;
```

一般说来, 有三种重建索引的方法:

- 删除旧索引, 重新开始建立新索引;
- 使用 alter index indexname rebuild 命令重建索引;
- 使用 alter index indexname coalesce 命令重建索引;

在本数据库系统的用户中存在大量的索引, 为了有效地使用这些索引, 在经过一段时间之后 (期间有大量 DML 操作), 需要对其进行分析和重建。

3.2.3 功能模块设计

在系统功能需求和业务流程分析的基础上, 根据系统的结构设计, 将高光谱数据库划分为数据入库和数据查询、数据可视化和分析、用户管理和系统管理几大功能模块。

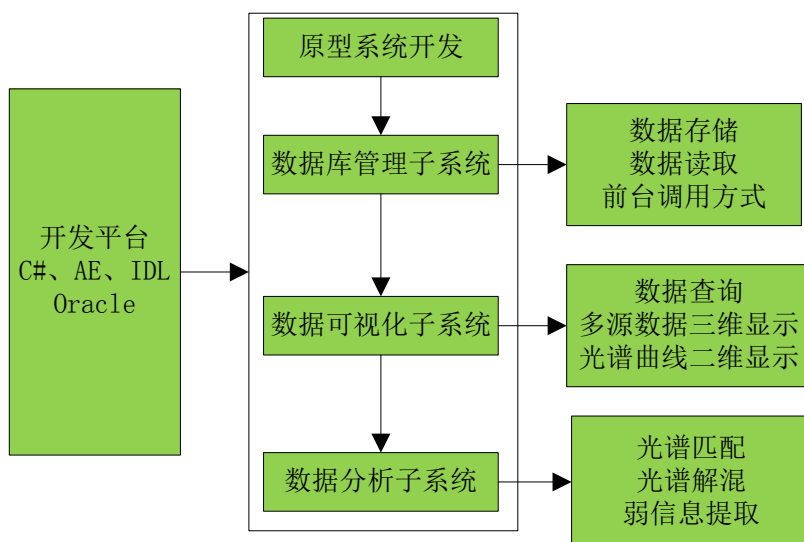


图 3-4 高光谱数据库

1. 数据入库和数据查询

数据入库功能主要实现高光谱数据入库的功能，这些数据不仅包含了地面成像仪 FISS 数据，还应该包含点成像光谱数据、机载/星载高光谱数据。数据在入库之前，需要进行一系列的预处理操作，得到反射率数据，然后还要转换成以 BIP 格式存储的 TIFF 或 GeoTiff 类型数据，入库时进行配套参数的完整性检查以及数据格式检查，保证物理上的完整性和逻辑上的一致性。如合格的，将数据入库，若不合格，则重新进行格式转换或者重新输入参数，直到符合数据入库要求为止。

数据查询主要实现数据的查询，对于地面成像光谱仪，因为它的每一次测量都会有比较明确的目标，可以按照影像拍摄时间、采集地点、主要测量目标名称三个要素来查询。而对于机载或星载高光谱数据可以按照经纬度、主要测量目标名称两个要素来查询。在具体的查询过程中，测量时间查询可以指定某个特定的时间也可以选择某一个时间范围，采集地点查询可以按照行政区划的不同级别层层查询，如按照省、市、县不同级别来查询，经纬度查询可以确定影像的具体范围。

2. 数据可视化和分析

在可视化部分，采用基于球面坐标系的三维可视化组件实现多源数据的查询和交互式操作。首先要能显示满足查询条件的各个影像的属性信息，然后显示 RGB 合成的彩色影像，同时还能显示每一个像元的光谱曲线。在显示影像时，可以对影像进行放大、缩小、漫游等操作。在显示光谱曲线时，可以对曲线进行光谱平滑、光谱重采样、光谱匹配、包络线去除等操作。

同时，我们集成了一些分析模块，如信息提取、混合像元分解等。这些模块均是以光谱库数据为基础，其利用了大量的纯净地面实测光谱，充分发挥了地面成像光谱仪 FISS 数据的优越性。

3. 用户管理和系统管理

主要是实现用户信息添加、修改、删除等操作，系统管理负责数据安全、数据库维护、数据扩充等；安全管理是指建立完整的用户管理体系，对数据进行严格的权限设置，保证存储在数据库中的数据可被正确、合理地使用，对数据进行维护和修改、删除等管理操作。

3.2.4 系统开发环境

系统的开发环境如表 3-1 所示：

表 3-1 系统开发环境

计算机配置	操作系统为 Windows 7
数据库管理系统	Oracle 10G 、 Oracle SQL Developer SQL 语言
开发工具	VS2008 (C#语言) IDL(Interactive Data Language) ADO.NET (数据库接口) Arc Engine

1. 数据库管理系统

本次研究的数据库管理系统是基于 Oracle 数据库，Oracle 是一个成熟的、大型的数据库应用开发软件，它引入面向对象技术，使得对各种复杂数据类型的管理成为了可能。Oracle Spatial 是 Oracle 公司推出的空间数据库组件，其通过 Oracle 数据库系统存储和管理空间数据，本研究所采用的 GeoRaster 数据模型是 Oracle 从 10G 开始引入的 Oracle Spatial 的一个特性。GeoRaster 提供了 Oracle Spatial 数据类型和一个对象关系模式，可以用来存储多维的网格化数据和栅格层，这些数据和栅格层可以参照到地球表面或者本地地球坐标系统中的坐标位置。如果数据是地理参照数据，则可以找到栅格单元所对应的地理位置；而如果给定地球上的位置，则可以找到与该位置相关的栅格层的单元。

2. ADO.NET 数据库接口

ADO.NET 是 Microsoft .NET 应用程序的数据访问模型。它由 ADO 技术发展而成，在某种程度上，ADO.NET 代表了最新版本的 ADO 技术。ADO.NET 由两个核心组件组成：数据提供程序(Data Provider)和数据集(DataSet)。Data Provider 是一组包括 Connection, Command, DataReader 和 DataAdapter 对象在内的组件，它实现了数据库的连接、操作和快速读取访问。DataSet 是 ADO.NET 的非连接结构的核心，其设计目的是为了实现独立于任何数据源的数据访问，在本地内存中实现一个数据缓存，其结构示意图如图所示。ADO.NET 建构于 .NET 框架之内，它的建立和管理都是基于 CLR (Common Language Runtime, 通用语言运行时)，

所以直接或间接地得益于.NET 框架在内存管理、类型转换、对象池等方面的技术改善和优化。

3. 开发语言

本次开发所采用的语言是基于 VS 平台的 C#语言和 IDL (Interactive Data Language) , 也采用了 GIS 的二次开发组件-Arc Engine。

C# (C Sharp)是微软(Microsoft)为.NET Framework 量身订做的程序语言,C#拥有 C/C++的强大功能以及 Visual Basic 简易使用的特性,是第一个组件导向(Component-oriented)的程序语言,和 C++与 Java 一样亦为对象导向(Object-oriented)程序语言。这从根本上保证了 C#与.NET 框架的完美结合。在.NET 运行库的支持下,.NET 框架的各种优点在 C#中表现得淋漓尽致。IDL 是一种数据分析和图像化应用程序及编程语言,使用者可以迅速且方便地运用此软件将数据转换为图象,促进分析和理解。IDL 是完全面向矩阵的,因此它具有快速分析超大规模数据的能力,可以通过灵活方便的 I/O 分析任何数据,支持通用文本及图形数据。IDL 支持 COM/ActiveX 组件,可将您的 IDL 应用开发集成到与 COM 兼容的环境中,从 Visual Basic、Visual C++等访问 IDL,还可以通过动态连接库和 COM 组件方式在 IDL 程序里调用 C、Fortran 等程序;用 IDL DataMiner 可快速访问、查询并管理与 ODBC 兼容的数据库,支持 Oracle, Informix, Sybase, MS SQL 等数据库。可以创建、删除、查询表格,执行任意的 SQL 命令,读取/设置/查询/增加/删除记录等操作。

ArcGIS Engine(AE) 是基于 AO 构建,由一组 AO 核心包和一些 GIS 可视化组件组成,是对 AO 的重新封装和集成。作为嵌入式 GIS,它能为用户提供有针对性的 GIS 功能,并且能完全脱离 ArcGIS 桌面平台独立运行,大大提高了开发的灵活性和软件的伸缩性,目前已成为组件式 GIS 开发的主流方式。ArcGIS Engine 对象库中定义了不同的类,有的类间存在类型继承关系类下面定义了不同接口,接口中包含不同的属性和方法,有的接口间存在调用和相互继承的关系,ArcGIS Engine 通过接口和对象打交道[30]。利用 ArcGIS Engine 进行开发的关键是了解各对象库中的类及类间关系、熟悉各接口、接口间的继承与调用的关系、接口的属性和方法等。

3.3 数据存取与可视化研究

3.3.1 高光谱影像数据的存取设计

1. 数据的存储设计

为了提高海量高光谱影像的数据入库效率，必须从硬件、操作系统平台、应用程序服务器、客户端和数据库等方面来考虑。当研究平台确定之后，影像入库的效率就取决于应用程序和数据库的交互性能。大量研究表明，在存储大二进制对象 (BLOB) 数据时，使用存储过程的效率比单独使用 SQL 语句高[31]。GeoRaste 模块提供了 SDO_GEOR.importFrom() 方法实现数据的导入，该方法可以在 SQL 语言中使用，但是向数据表里添加数据之前，需要为 GeoRaster 对象创建一个唯一的主码，如果使用单独的 SQL 语句实现这些功能，必然会降低系统的效率[32]。为了实现最佳系统性能，本研究采用了基于存储过程的数据入库方法：创建一个存储过程，在里面创建主码，然后进行 GEORASTER 对象的插入以及数据分块、建立空间索引和金字塔等操作。创建完毕后，就可以调用存储过程来实现数据的入库。

为了增加系统的安全性能，Oracle 会设置一定的权限管理，即需要把系统管理员的权限赋予 MDSYS 用户和普通用户读取文件的权限。整个流程要可以分为两个部分，第一部分是赋予用户读取文件的权限，第二部分是调用存储过程将得到授权的文件导入数据库中。

2. 数据的读取设计

1) 高光谱影像数据入库的实现

本研究主要采用了调用存储过程的方式进行数据入库实现，以用户身份连接数据库，其连接对象为 conSpecImport，User ID 和 password；创建调用存储过程的 OracleCommand 对象，并指定其命令类型为存储过程。创建参数数组，参数赋值并指定参数传递方向，并传递参数。其中 strSpecDataDir 为要入库的 IMG 数据的路径，strRasterTab 为栅格数据表，名称为 IMG_RASTER。

```
OracleCommand comSpecImport = new OracleCommand("Import_Spec_Data",
conSpecImport);
```

```
comSpecImport.CommandType = CommandType.StoredProcedure;
```

```
OracleParameter[] parameters = {
```



```

New                                OracleParameter("p_Specdir",
OracleType.VarChar, strSpecDataDir.Length),

new                                OracleParameter("p_rtb",
OracleType.VarChar, strRasterTab.Length)

};

parameters[0].Value = strSpecDataDir; //参数赋值
parameters[1].Value = strRasterTab;
parameters[0].Direction = ParameterDirection.Input; //指定参数
传递方向

parameters[1].Direction = ParameterDirection.Input;
foreach ( OracleParameter parameter in parameters)
{
    comSpecImport.Parameters.Add(parameter);
}

```

2) 高光谱影像数据读取

GeoRaster 模块所提供的 `sdo_geor.getCellValue()` 方法可以从 GeoRaster 对象里面获取单个像元的数值，通过循环处理可获得每个像元所有波段的像素值。为了获取像元的光谱曲线，同时发挥 Oracle 数据库在处理数据表上的优势，本文采用了通过动态数据表转换的光谱数据获取方法，其基本思路是：以数据表作为转换平台，在存储过程里动态创建数据表，循环利用 `getCellValue()` 方法获取像元各个波段的像素值，将这些值存到动态创建的数据表里，利用应用程序查询该数据表来获取像元的光谱数值。另外，在通过数据表转换的数据获取方法中，采用了以波段作为记录的数据表创建方式。

光谱数据读取的存储过程要能动态创建存储光谱数据的数据表，查找相应的 GeoRaster 对象，从中获取像元的像素值。其输入参数为 GeoRaster 对象的 ID 码 `p_rid`，像元的行列号 `pixelRow` 和 `pixelColumn`，返回的参数为 GeoRaster 对象的波段数 `bandNum`。

3) 光谱数据读取的实现

以用户身份连接数据库，连接对象 `conCol`，具体实现方法与上文相应内容

一致：打开连接，创建调用存储过程的 `OracleCommand` 对象，并指定其命令类型为存储过程；创建参数数组，参数赋值并指定参数传递方向，并传递参数。参数数组的成员为 `createPixelSpecTable` 存储过程的参数；调用 `ExecuteNonQuery()` 执行存储过程，并检测是否遇到异常，若遇到异常则抛出异常；获取波段数并创建光谱数组；使用 `ExecuteReader()` 从创建的光谱数据表里查询并取出数据，将数据存放到 `OracleDataReader` 对象中；使用 `Read()` 方法将 `OracleDataReade` 对象的数据读出来并将其转化成数组，该数组就是以 `pixelRow` 和 `pixelColumn` 为行列号的像元的光谱曲线数组。

3.3.2 高光谱影像及光谱显示方法研究与实现

高光谱数据库系统不仅支持影像数据的存储和管理，同时还要能实现数据的显示以及各像元光谱曲线的显示。

1. 影像显示方法研究与实现

`GeoRaster` 对象可以通过以下两种方式来显示：一是调用 `SDO_GEOR.exportTo` 函数将 `GeoRaster` 对象导出并存成某一影像文件，然后使用其它影像显示工具(如 `ENVI`、`ERDAS` 等)来显示该影像；二是使用独立的 `GeoRaster` 显示工具，如 `GeoRasterViewer` 工具[33]。本文在存储高光谱数据的同时，以 `BLOB` 类型的形式存储其 `BMP` 或 `JPG` 格式的彩色合成影像；在显示影像时，先将对应的 `BLOB` 数据导出成对应的 `BMP` 或者 `JPG` 格式，临时存储在某个安全的路径下面。文件可视化时用到了 `ARC ENGINE` 的二次开发接口，在访问栅格数据之前先打开一个工作空间，工作空间必须通过工作空间工厂来创建，可以通过 `RasterWorkspaceFactory` 对象来创建。为了便于对显示的影像进行放大、缩小或者漫游操作，采用了导航图和鹰眼图的功能来显示 `FISS` 数据的彩色合成影像。

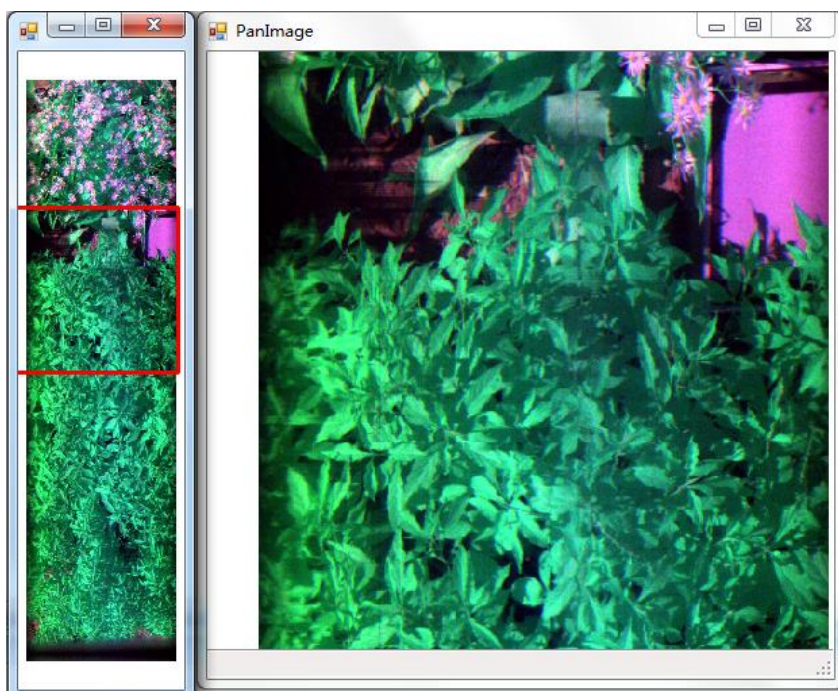


图 3-5 FISS 彩色合成影像导航图和放大图实现效果

2. 光谱显示方法研究与实现

显示了 FISS 的彩色合成影像之后,为充分展现高光谱数据图谱合一的特点,可以设计类似于 ENVI 的 Z-profile 功能: 点击鼠标右键后可以显示像元对象的光谱曲线并进行一些简单的光谱操作。在 PanImage 类中,当右击鼠标,点击显示光谱曲线按钮时,将会返回当前像元的行列坐标,供数据获取程序使用。为了获取光谱曲线数据,在这里首先建立了一个 DRAW 类,其主要包括了以下几个功能函数,

```
public void DrawXY(Graphics g, Panel panSpec) {.....}
//负责绘制 X 轴和 Y 轴的基本部分

public void SetYAxis(Graphics g, Panel panSpec, float
reflecMax) {.....}
//负责绘制 Y 轴上的刻度

public void SetXAxis(Graphics g, Panel panSpec, float xBandMax, float
xBandMin) {.....}
//负责绘制 X 轴上的刻度

public PointF[] TransferToPoint(Panel panSpec, float[] waveLength,
float[] data, float xBandMax, float xBandMin) {.....}
```

//负责将输入的波长数组和反射率值数组转换成可直接用于绘制的 PointF[] 数组

然后在 PanImage 类和 plotFissSpec 类中进行相关操作,实现了从影像上获取光谱曲线的显示。

```
public void GetCoord(out int X, out int Y)
//函数获取当前坐标
public float[] GetFissWavelength()
//函数获取 FISS 数据的波长数组 fWavelength
public float[] GetFissRefData()
//函数获取 FISS 数据的反射率信息数组 fRefData
```

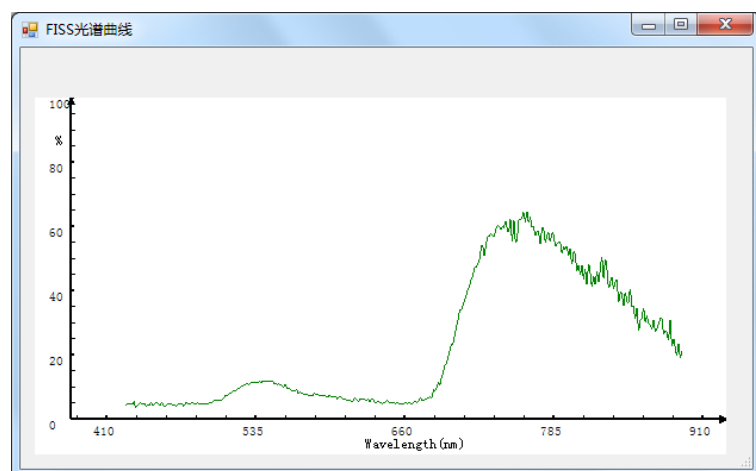


图 3-6 FISS 像元光谱曲线的显示效果图

3.3.3 高光谱数据的三维可视化集成

1. 三维可视化技术

1) 三维可视化组件设计

基于球面坐标系的三维可视化组件,针对大量高光谱数据可视化需求,可以实现基于球面坐标系的三维数据快速可视化以及交互操作[34]。基于球面坐标系的数据引擎除了支持各种应用程序中三维地球球体浏览窗口的功能调用,还支持查询、测量、图层叠加等各种基本可视化功能。

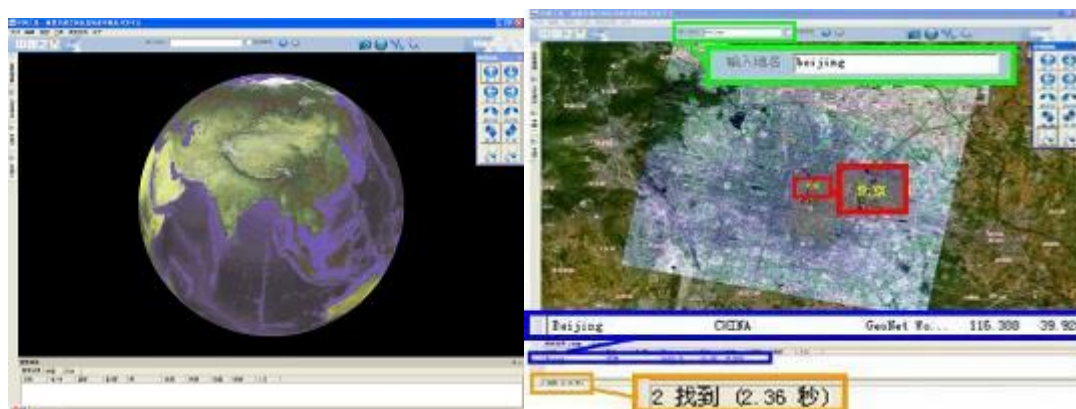


图 3-7 用户界面及地名搜索界面

2) 多分辨率海量空间数据的快速可视化预处理设计

多分辨率海量空间数据的快速显示，需要对不同的空间数据采用一定的存储结构实现高速的多分辨率访问，常采用数据金字塔的结构对数据进行组织。

栅格数据的金字塔：将栅格数据根据不同的分辨率分割，合并，实现以最高分辨率的栅格数据为最低层，逐层向上分辨率递减的“金字塔”形数据组织和存储结构。对每一层的栅格具相同分辨率，上一层的分辨率是下一层的 $1/4$ 。

对栅格数据的金字塔按照通行的方法建立，过程由程序控制实现，极大地提高了数据装载的效率。影像金字塔的生成，有三种主要实现方式：由底向上，由顶至底，由中间开始，上部分，下半部分由底向上。取舍的条件根据原始影像数据的属性，影像数据所属当地的特征，数据金字塔未来需要存放的主机节点，节点主机的性能和网速也是考虑因素。本项目中在全国级的影像使用由上至底的方式，在中小区域一级使用由底向上的方式，在大区域选择由中间开始的方式[35]。

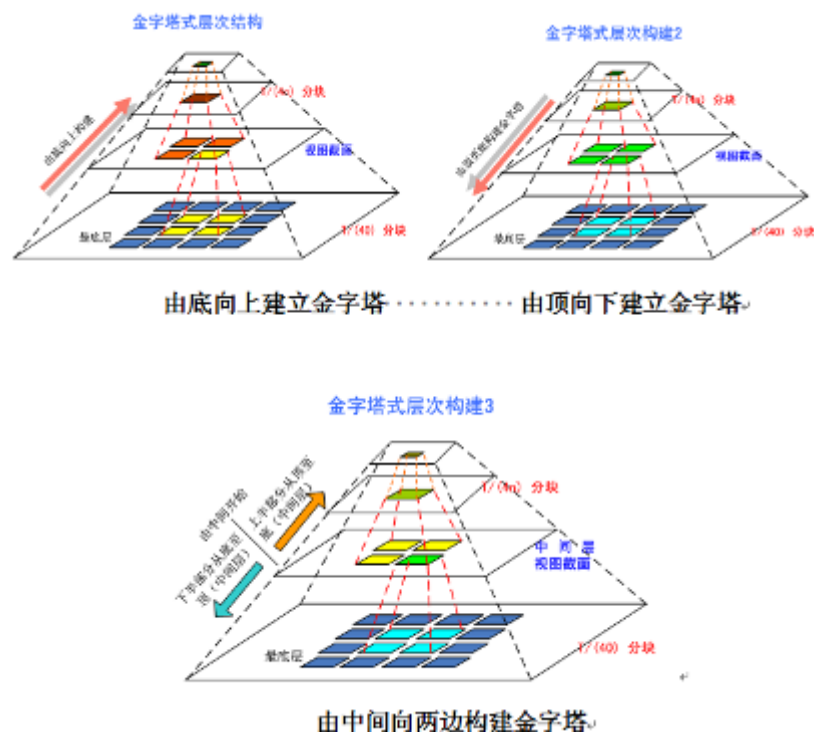


图 3-8 金字塔构建示意图

2) 三维可视化组建功能

1) 实现基于三维地球的海量空间可视化，支持不同尺度、不同类型的 TB 级基础地理数据、遥感数据等球体环境下遥感数据的高效展示。

2) 支持多源空间矢量数据的叠加显示，可实现多层矢量栅格数据海量专题空间数据的叠加显示，数据可以和遥感影像、地形完全贴合，实现多层半透明叠加[36]；

3) 三维可视化功能，支持点与点间的飞行显示、三维影像数据快速飞行浏览、二三维空间数据的联动浏览，定制加载地理、行政、环境等其他相关的信息；

2. 高光谱数据三维可视化

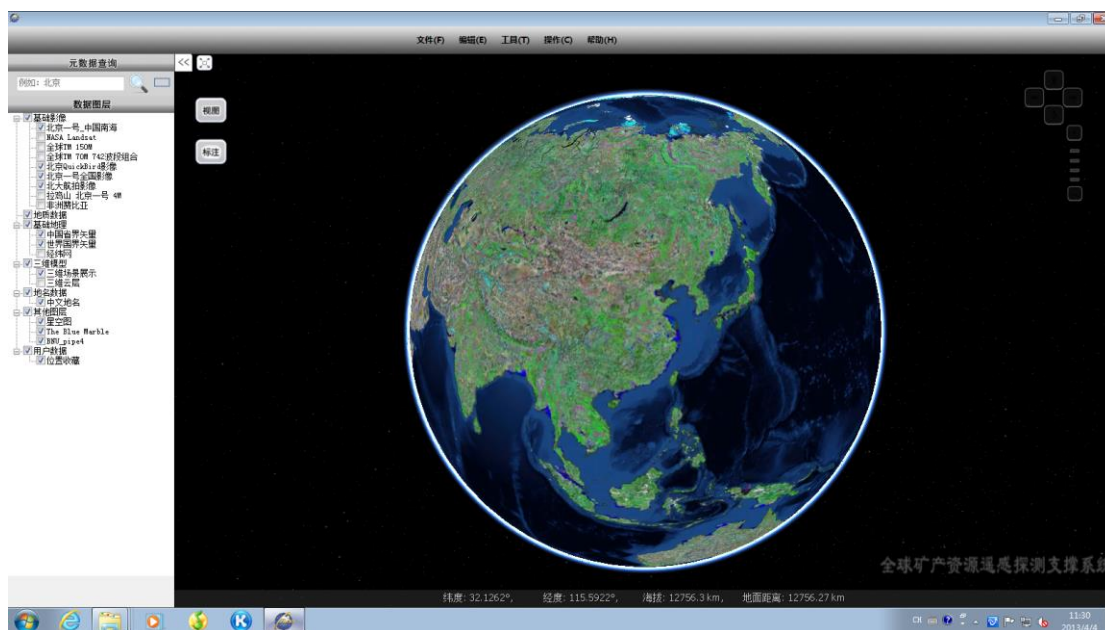


图 3-9 高光谱数据库前台三维球形系统

对于高光谱影像数据，将其录入到三维球形系统中，然后通过经度、维度和文件名三个参数在底层数据库中进行查询，利用并实现波谱合一的显示。在具体的查询检索和可视化过程，最重要的应该是对多源数据进行有效组织的组织并在此基础上进行多维分析：在具体分析时，将高光谱数据按照维层次关系进行聚集，了解研究对象在各个维度上的分布情况：在非影像维上，通过对时间维层次或采集地点维层次的聚集，可以知道研究对象在不同时间、不同地点的分布情况等；在影像维上，通过行维、列维和光谱维的层次聚集操作，得到相应的光谱曲线或反射率值。

数据的录入主要通过 XML 文件的 POI 形式来表示，其代码为：

```
<LayerSet Name="HaidianPOI" ShowOnlyOneLayer="false"
ShowAtStartup="true"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="C:\WorldWind\bin\Debug\Configuration\W
orldXMLDescriptors\EarthLayers\LayerSet.xsd">

  <Icon ShowAtStartup="true">

    <ID>983618</ID>

    <Name>科学园植被扫描1</Name>

    <Latitude>
```

```

        <Value>39.9298578093014</Value>
    </Latitude>
    <Longitude>
        <Value>116.293270838571</Value>
    </Longitude>
    <attrCode>
        <Value>856162304</Value>
    </attrCode>
    <attrSubCode>
        <Value />
    </attrSubCode>
</Icon>
<Icon ShowAtStartup="true">
    <ID>983617</ID>
    <Name>科学园植被扫描2</Name>
    <Latitude>
        <Value>39.9253342245251</Value>
    </Latitude>
    <Longitude>
        <Value>116.300128120138</Value>
    </Longitude>
    <attrCode>
        <Value>856162304</Value>
    </attrCode>
    <attrSubCode>
        <Value />
    </attrSubCode>
</Icon>
</LayerSet>

```


可以看出，前台球型系统与后台数据库的连接主要是通<Name>、<Latitude>、<Longitude>三个参数的传递来实现的，当查询点同时拥有地面成像数据、卫星高光谱数据、机载高光谱数据时，会同时显示多条光谱曲线，可以进行对比分析。

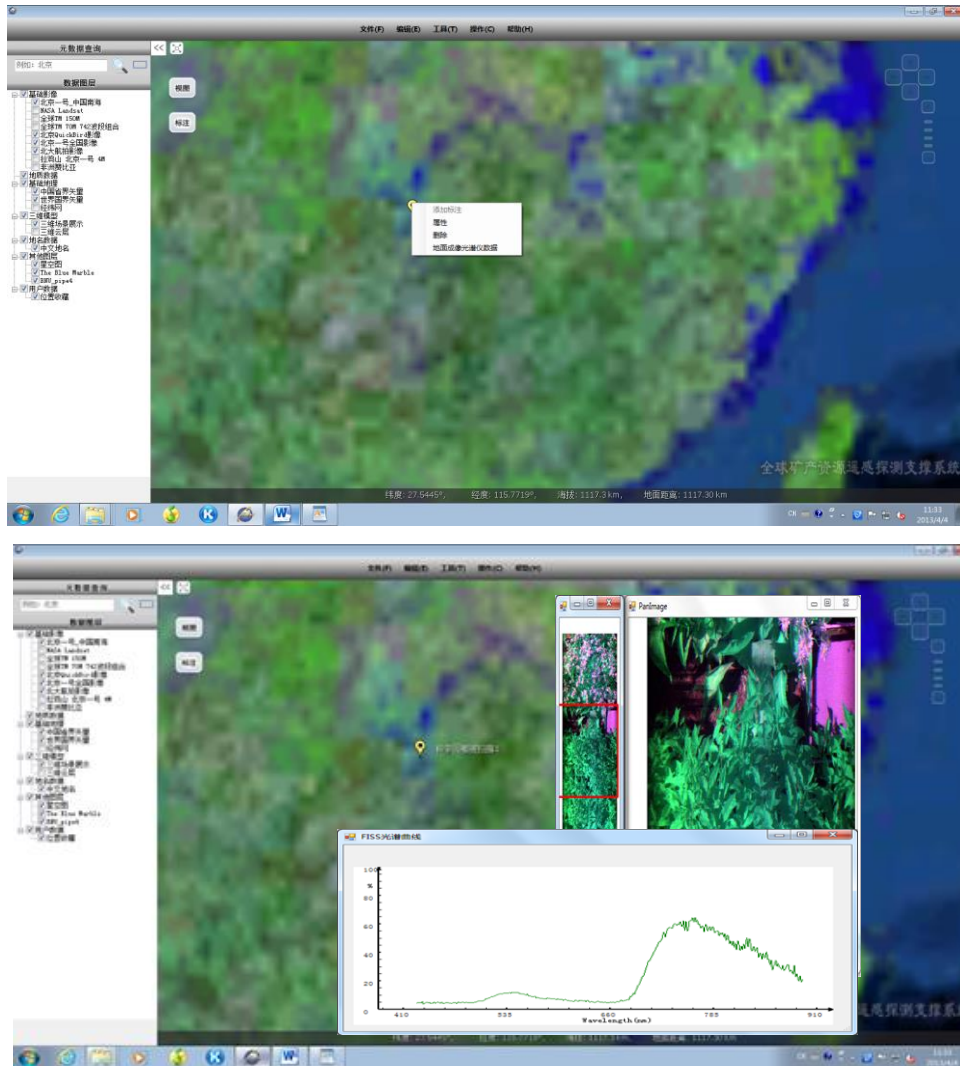


图 3-10 三维球形系统可视化界面

3.4 数据管理格式研究

3.4.1 常见的遥感数据管理格式介绍

1. Tiff 和 GeoTiff

标签图像文件格式 (Tagged Image File Format, 简称为 TIFF) 是一种主要用来存储包括照片和艺术图在内的图像的文件格式。TIFF 是一个灵活适应性强的文件格式, 通过在文件头中包含“标签”它能够在文件中处理多幅图像

和数据, 标签能够标明图像的如图像大小这样的基本几何尺寸或者定义图像数据是如何排列的并且是否使用了各种各样的图像压缩选项。TIFF 可以包含 JPEG 和行程长度编码压缩的图像, 使用无损格式存储图像的能力使 TIFF 文件成为图像存档的有效方法, TIFF 文件可以编辑然后重新存储而不会有压缩损失。其它的一些 TIFF 文件选项包括多层或者多页。

在各种地理信息系统、摄影测量与遥感等应用中, 要求图像具有地理编码信息, 例如图像所在的坐标系、比例尺、图像上点的坐标、经纬度、长度单位及角度单位等等。对于存储和读取这些信息, 纯 TIFF 格式的图像文件是很难做到的, 而 GeoTiff 作为 TIFF 的一种扩展, 在 TIFF 的基础上定义了一些地理标签, 来对各种坐标系统、椭球基准、投影信息等进行定义和存储, 使图像数据和地理数据存储在同一图像文件中, 这样就为广大用户制作和使用带有地理信息的图像提供了方便的途径。GeoTIFF 的扩展方案设计合理, 能够在遥感数据中方便地嵌入地理信息, 方便了数据交换和处理, 这种思想也被用在对其它数据格式的设计中, 其基于已有标准进行扩展, 避免了重新制定新的文件格式给用户带来的麻烦。

2. HDF

由美国伊利诺伊大学(the University of Illinois) 的 NCSA 组织(The National Center for Supercomputing Applications)开发的 HDF (Hierarchical data formats) 文件格式是一种超文本文件格式, 能够综合管理 2D、3D、矢量、属性、文本等多种信息, 帮助科学家摆脱不同数据格式之间相互繁琐的转换, 将更多的时间和精力用于数据分析。HDF 格式能够存储不同种类的 SDS (Scientific Data Set), 包括图像、多维数组、指针及文本数据, 可以提供命令方式, 分析现存 HDF 文件的结构, 并即时显示图像内容。科学家可以用这种标准数据格式快速熟悉文件结构, 并能立即着手对数据文件进行管理和分析, 由于 HDF 的诸多优点, 这种格式已经被广泛应用于目前国外各种卫星传感器的标准数据格式。

3.4.2 *.mdh (Multi-dimensional hyperspectral) 高光谱数据库管理格式

1. *.mdh 数据管理库格式

根据前文的研究, 我们提出了一种专门针对高光谱数据的数据库管理格式——*.mdh (Multi-dimensional hyperspectral), 即多维高光谱数据管理格式, 这种格式主要包括三部分内容:

- SDO_GEORASTER 原生数据扩展类型
- BMP、JPEG 或 TIFF 格式的缩略图或金字塔重采样影像
- .XML 元数据文件

其中 SDO_GEORASTER 原生数据类型，主要负责数据在数据库底层 Oracle 系统中的存储和管理，这一过程是通过 PL/SQL 语言的存储过程实现的；BMP、JPEG 或 TIFF 格式影像主要负责影像在三维球面上的显示，其又可以看作是高光谱影像数据金字塔的最顶层，这一过程是通过 C#和 Arc Engine 来实现的；.XML 元数据文件主要负责的是数据底层和前台三维球形系统的检索，其主要包含了<Name>、<Latitude>、<Longitude>三个传递参数以及一些描述性文字，可以看作连接 Oracle 底层和前台的桥梁，这一过程是通过 C#和 PL/SQL 来实现的。这些具体的实现过程在前文的研究中已经一一实现了。

对于输入数据，例如Tiff或GeoTiff格式的FISS数据，当导入数据库系统后会自动生成*.mdh 格式文件。其第一步也是最重要的一步便是将生成 SDO_GEORASTER原生数据扩展类型，这就要求我们首先对数据进行多维分析，将各种属性信息填充到SDO_GEORASTER的扩展空间中。在这一分析过程中，影像数据作为一个整体存储在多维高光谱数据库中，影像立方体在地物类型、时间和采集地点（经纬度）的可以以任意一种组合下的分布存在；其基于这一点可以从影像立方体里通过多维分析工具——钻取、切片、切块等操作得到相应的反射率值信息。每个影像立方体和它的属性数据可以是一个事实，它存在于多维数据库中；每个反射率值和它对应的行、列和光谱信息也是一个事实，它存在于影像立方体中，对于整个数据库来说，反射率事实表以影像立方体的形式存在于影像事实表中。

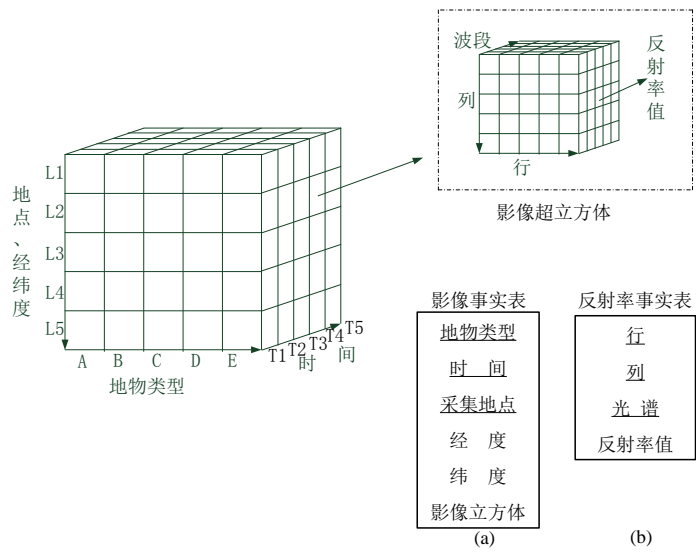


图 3-11 多维高光谱数据结构示意图

在导入过程中其关键技术便是对于每一景影像如何转化为 SDO_GEORASTER 对象，核心功能的实现可以分成以下几个部分：

- a) 创建栅格表，用来存储栅格数据的元数据信息；
- b) 创建栅格数据表，用来存储被分块的栅格数据；
- c) 对每一个 GeoRaster 表创建 DML 触发器；
- d) 读取栅格数据并转换成 GeoRaster 格式的数据，对转换成功的栅格数据创建金字塔对创建成功的 GeoRaster 数据；

```
String s = "CREATE TABLE Img_Data (rasterimage
mdsys.sdo_georaster,georid number(10))";

OracleCommand Com = new OracleCommand("s", conFissImport);
Com.ExecuteNonQuery();

/////////

String s = "create table "+rdtName+ " of mdsys.sdo_raster (primary
key (rasterId,
pyramidLevel,
bandBlockNumber,
rowBlockNumber,
columnBlockNumber))";

OracleCommand Com = new OracleCommand("s", conFissImport);
```

```

Com.ExecuteNonQuery();
String s = "call sdo_geor_utl.createDMLtrigger(' RASTERIMAGES1',
' RASTERIMAGE')";
OracleCommand Com = new OracleCommand("s", conFissImport);
Com.ExecuteNonQuery();
//////////

```

2. 讨论和分析

Tiff和GeoTiff存在着一些局限性，Tiff不能存储地物的属性信息，GeoTiff虽然设计了一定的扩展结构，但其仅限于对有限的地理信息进行填充，对于地物的相关属性信息，如地点、经纬度、时间等并不能合理的管理。HDF是一个能够自我描述、多目标、用于科学数据存储和分发的数据格式，其可以包含关于数据的全面信息，在某个HDF文件中存储符号、数值和图形数据，可以让用户把相关数据目标集中一个HDF文件的某个分层结构中，并对其加以描述，同时可以给数据目标记上标记，方便查取。

Tiff、GeoTiff 和HDF是常用的遥感数据格式，但它们并不是专门针对数据库管理系统而设计的，因此不能利用数据库工具管理复杂的多维属性信息，本文所提出的*.mdh格式是专门针对高光谱数据的管理格式，结合了多维数据管理和分析的理念对高光谱影像数据及其属性信息进行有效的管理，在此基础上可以实现图谱合一的数据可视化。

*.mdh 格式只是高光谱影像数据库存储格式的一种尝试，它主要是为了高光谱数据库的有效存储、检索和可视化而设计的。这种存储格式利用了 Oracle 自带的 GeoRaster 插件，由于该插件并不是专门针对高光谱数据而设计的，必然存在着一些问题：

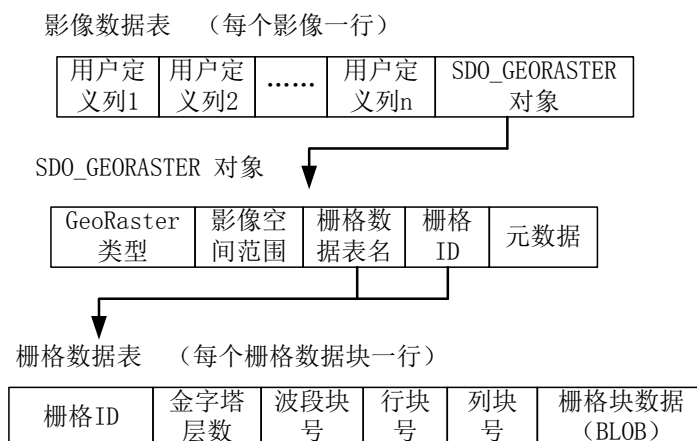


图 3-12 GeoRaster 模型的物理存储结构示意图

从示意图中可以看出，由于高光谱影像数据量很大，GeoRaster 插件对于每一个 SDO_GEORASTER 对象会采用不同的重采样方法生成金字塔，其支持的方法主要包括：最邻近单元，双线性插值和三次卷积或平均值插值，这些插值方法均是基于空间维的采样，但对于高光谱数据而言更加关注的是波谱维的重采样以及基于此的存储和查询，因此按照此种需求应该对相应的重采样函数和数据存取函数进行重构。另外，我们必须注意的是.mbh 是依托于 Oracle 存在，其本质上是一种数据库管理格式，对于 BSQ、BIP、BIL 三种存储方式可以实现多维转化，但是 BLOB 栅格数据快的限制性使其对 BIP 格式具有优越性，而对于 BSQ、BIL 虽然也可以转化，但没有现成的模块可以调用，速度较慢，这也是我们下一步需要解决的问题。

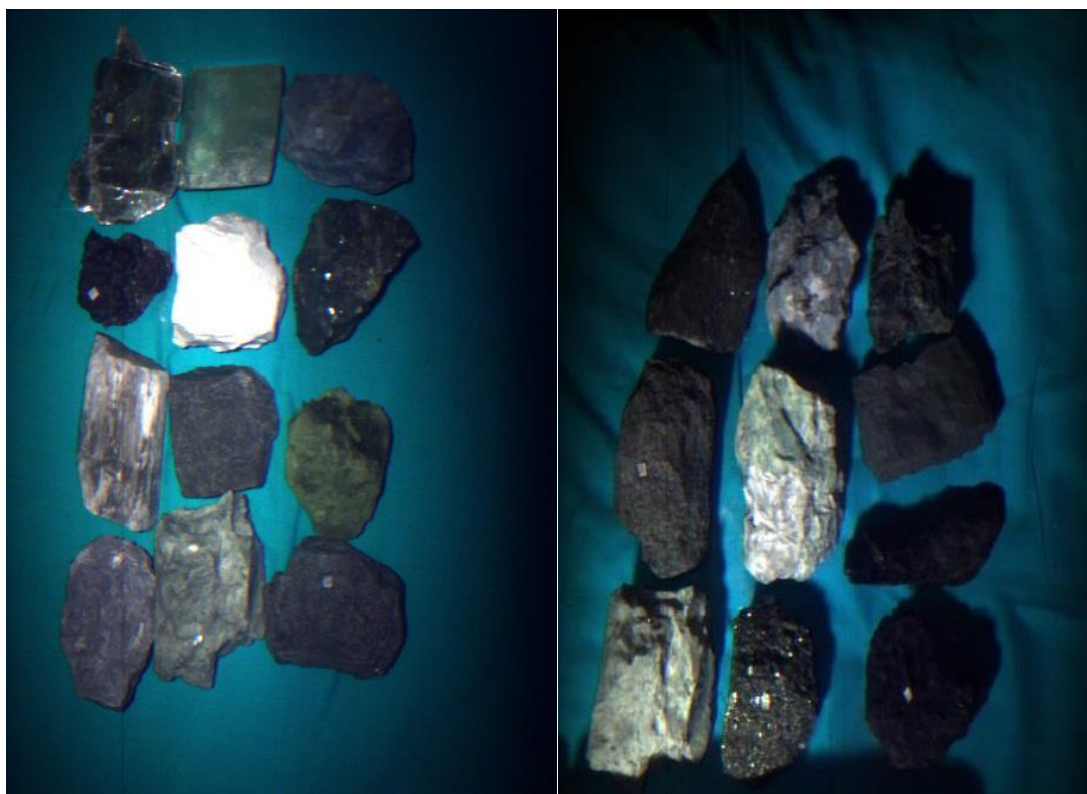
3.5 本章小结

本章主要针对高光谱数据库的进行了需求分析，并以 FISS 高光谱数据为核心数据进行总体结构设计，分别在数据模型设计、数据索引设计、功能模块设计、系统开发环境选取等方面进行了阐述；结合 GeoRaster 模型，设计了 FISS 数据存储模型，基于此模型详细设计了各个实体表，并给出了创建各个表的核心 SQL 语句。本章还研究了高光谱数据库的数据存取技术、影像及光谱的显示方法以及三维球形可视化技术，实现了 FISS 数据合成影像的显示、高光谱数据在数据库层面和三位球形系统上的图谱合一的存储、查询和显示。最后，基于这一流程提出了一种高光谱影像数据的数据管理格式—*.mdh，对其生成过程中的关键技术和存在问题进行了分析。

第四章 高光谱影像多维数据库的分析功能和系统实现

4.1 高光谱数据库的分析功能

根据高光谱数据库的概念，系统在实现对高光谱数据进行管理的同时，还应具备一些基本的分析功能：不仅包含了简单的光谱分析工具，还包含了一些面向高光谱影像数据的分析模块[37]。在本文的研究中，这些分析模块均有一个共同点：都是以光谱样本库数据为基础，需要进行一定的光谱处理，特别是对于影像分析功能，稳定、可靠的地物光谱库是其精确运行的前提，因此建立特定的地面成像光谱 FISS 数据库是必不可少的。在本研究中我们通过实验室测量和野外实测构建了一个小型的地物典型地物光谱库。



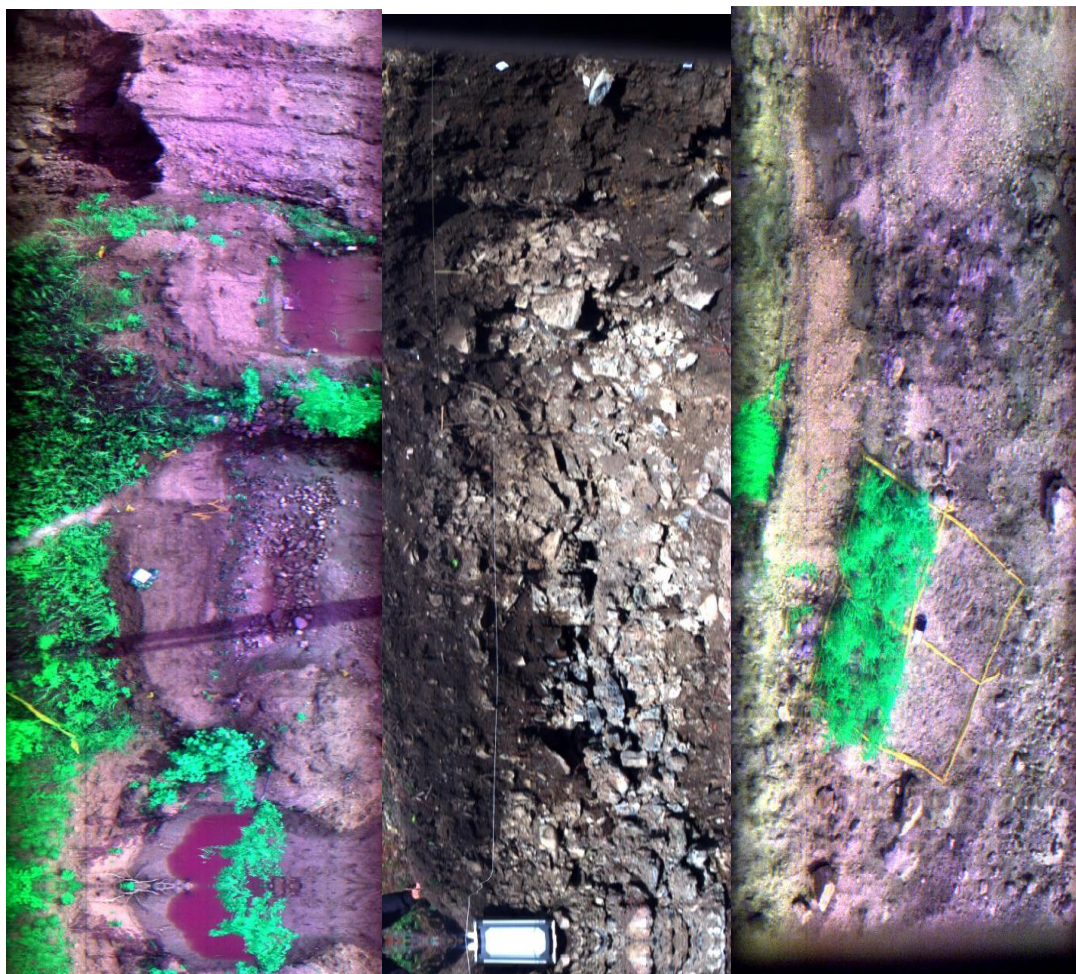


图 4-1 高光谱数据库 FISS 数据

4.1.1 基于光谱数据模型的分析功能

借助于简单的光谱分析工具，将有助于确定光谱曲线本身的特征和其对应的属性参数之间的关系，基于已经开发完成的高光谱数据库，将光谱平滑、光谱重采样、光谱匹配和包络线去除算法集成到了数据库中。

1. 光谱平滑

光谱平滑是对光谱曲线进行低通滤波，去掉高频成分，保留有用低频信息、提高信号质量。基本思路是在平滑点的前后各取若干点来进行“平均”处理，以求得平滑点的最佳估计值，消除随机噪声。目前常常采用的平滑方法有均值滤波与中值滤波。均值滤波是一种典型的低通滤波器，传统的均值滤波是用一个有奇数点的滑动窗口在光谱曲线上滑动，将窗口中心点对应的光谱曲线波段的灰度值用窗口内的各个点的灰度值的平均值代替，如果滑动窗口规定了在取均值过程中窗口各个像素点所占的权重，这时候就称为加权均值滤波。

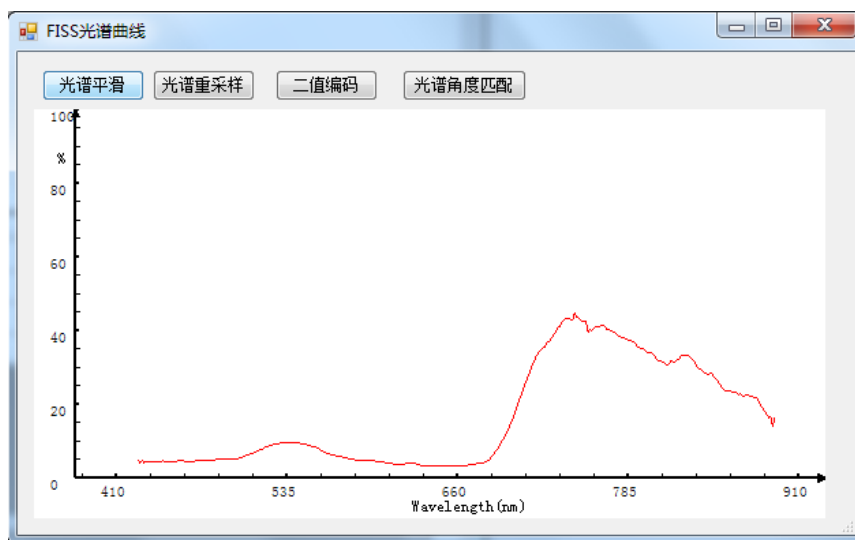


图 4-2 光谱曲线平滑效果图

2. 光谱重采样

光谱重采样主要是在任意的波段间隔中，变换波段间隔重新采样，这样可以放大某部分区间，也可以模拟某个传感器的数据，计算公式为：

$$r'_i = \frac{\sum_{j=i-\frac{b}{2}}^{i+\frac{b}{2}} r_j}{n+1} \quad (4.1)$$

r'_i 为重采样后的 λ_i 反射率值， r_i 为重采样前的 λ_i 反射率值，如果 b 为偶数， n 取 b ，如果 b 为奇数，则 n 取 $b+1$ 。

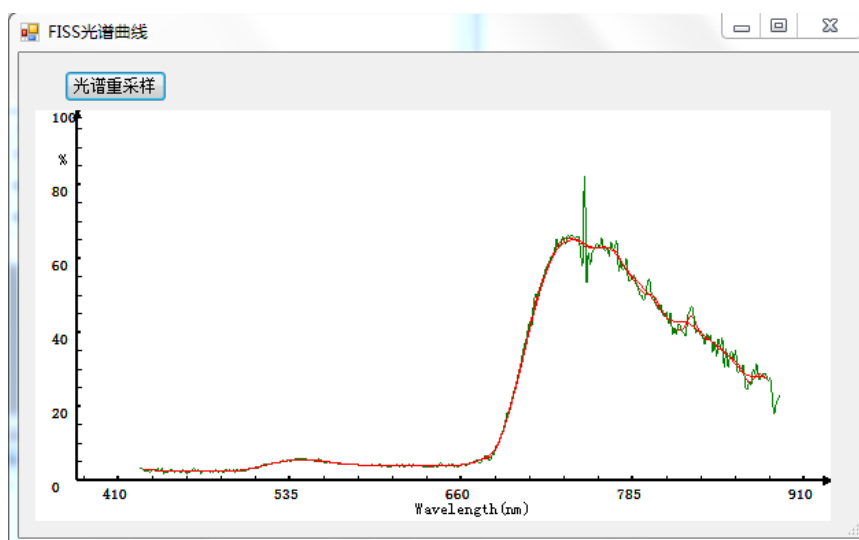


图 4-3 重采样效果图

3. 包络线去除

包络线消除法是一种常用的光谱分析方法，它可以有效的突出光谱曲线的吸收和反射特征，并且将其归一到一个一致的光谱背景上，有利于和其它光谱曲线进行特征数值的比较，从而提取出特征波段以供分类识别。光谱曲线的包络线从直观上来看，相当于光谱曲线的“外壳”，因为实际的光谱曲线由离散的样点组成，所以我们用连续的折线段来近似光谱曲线的包络线，包络线去除（Continuum Remove）方法是利用包络线来对图像的光谱维进行归一化。

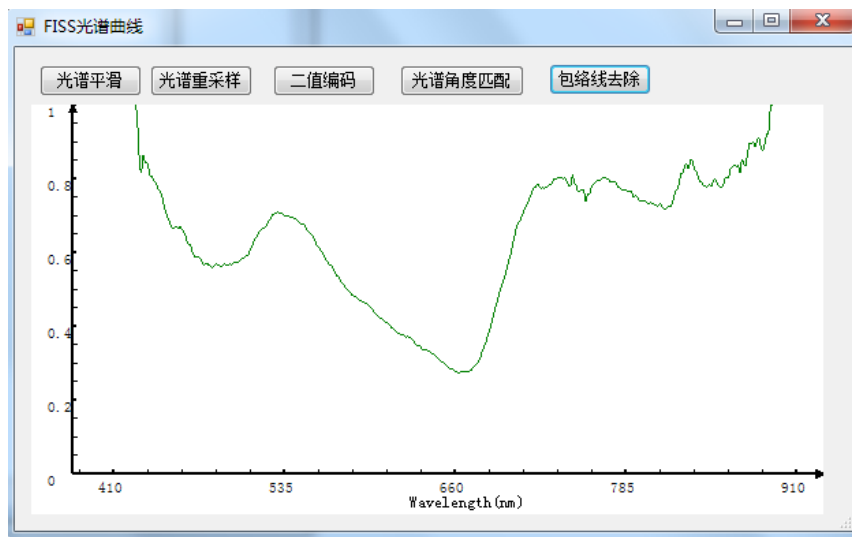


图 4-4 包络线去除效果图

4. 光谱匹配

目前高光谱遥感在地物识别和分类方面应用的主要方法之一是使用光谱匹配算法，在与标准光谱进行光谱匹配的基础上，对图像中的每一个空间像元进行分类，从而达到地物识别的目的。常用的光谱匹配分类方法分为基于距离和基于形状两大类，基于距离的方法主要是计算待分类光谱与标准光谱之间的距离，如最小距离；基于形状的方法是分析待分类地物光谱与标准光谱的形状相似度，使用最为广泛的是对光谱角的计算。最小距离和光谱角模型都基于欧氏空间，最小距离表征两向量间的几何距离，光谱角表征两向量的夹角。最小距离光谱匹配对光谱曲线幅度上的差别比较敏感，而光谱角度匹配则对光谱曲线线形上的差别更为敏感。因此，这两种方法都有着各自的优势，也有其不足之处。当同一地物由于光源影响使光谱的幅度不同时，最小距离匹配算法很容易产生误分；当两种不同地物的波谱形状相近时，光谱角匹配算法的区分效果也会变得很差。针对传统光谱匹配分类方法只考虑距离或形状的不足，综合考虑了传统方法的两个方面，

采用了基于光谱角加权的最小距离匹配高光谱分类算法。

1) 最小距离匹配

最小距离 (Minimum distance, MD) 匹配算法通常是计算图像像元光谱向量与标准光谱向量之间的欧式距离, 其计算公式如下:

$$d_i(t_k) = \left[\sum_{j=1}^N (t_{kj} - r_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

其中, $d_i(t_k)$ 表示图像第 k 个像元的光谱向量与第 i 类标准光谱之间的欧式距离, N 表示高光谱图像的波段数目, t_{kj} 和 r_{ij} 分别表示图像第 k 个像元第 j 波段的光谱值和第 i 类标准光谱第 j 波段的光谱值。光谱向量间的欧式距离越小, 代表测试光谱与标准光谱越接近, 归类的概率越大。但欧氏距离算法并不能很好的表示地物光谱的波形, 受光谱辐射亮度值的影响很大, 尤其在光照不均匀或有阴影的区域, 很容易造成较大的判别错误。

2) 光谱角度匹配

光谱角度 (Spectral angle, SA) 匹配算法是利用测试光谱与标准光谱之间的夹角表示它们的相似性, 其计算公式如下:

$$\alpha_{ki} = \cos^{-1} \frac{\sum_{j=1}^N t_{kj} r_{ij}}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^N t_{kj}^2 \right) \left(\sum_{j=1}^N r_{ij}^2 \right)}} \quad (4.3)$$

其中, α_{ki} 表示图像第 k 个像元的光谱向量与第 i 类标准光谱之间的光谱角度。 α_{ki} 的取值范围为 $[0, \pi/2]$, 光谱角度越小, 代表测试光谱与标准光谱之间的相似性越高, 归类的概率也就越大。光谱角的大小只跟两个光谱向量的方向有关, 与两者辐射亮度的大小无关, 这就减弱了波谱照度和地形因素对匹配结果的影响。

3) 基于光谱角加权的最小距离匹配

当两种地物的光谱波形相近时, 使用光谱角度匹配分类算法容易造成一定的误分, 但由于这两种地物的反射率往往有一定的差异, 在图像上表现为像元的辐射亮度值有较大的不同, 因此可以用最小距离判别的方法加以区分。于是, 我们充

分结合这两种匹配算法的优势，提出基于光谱角加权的最小距离（Spectral angle weighted minimum distance, SAWMD）匹配算法。该算法的基本思想是：利用 1 减去光谱角度余弦的 n 次幂作为权重，求取加权的欧式距离，利用该测度进行地物分类。其计算公式如下：

$$D_i(t_k) = \sqrt{\sum_{j=1}^N (t_{kj} - r_{ij})^2} * \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^N t_{kj} r_{ij}}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^N t_{kj}^2\right) \left(\sum_{j=1}^N r_{ij}^2\right)}} \right]^n \quad (4.4)$$

其中， $D_i(t_k)$ 表示图像第 k 个像元的光谱向量与第 i 类标准光谱之间的权重欧式距离。加入参数 n 的目的是为了调节光谱角测度在该算法中的权重大小，以便充分利用高光谱数据丰富的连续光谱信息。理论上，参数 n 可以取大于或等于 0 的任意实数，当 $n=0$ 时， $D_i(t_k) = d_i(t_k)$ 。测试光谱与标准光谱的波形越接近，光谱角的余弦越接近于 1，求得的权重欧式距离就越小；参数 n 的取值越大，光谱角的权重就越大。该算法不仅保留了光谱角度匹配算法利用波形一致性的优势，还利用光谱间的距离测度解决了对同谱异物（波形相近，反射率不同）的区分问题。

4.1.2 基于影像数据模型的信息提取功能

在本章节的研究中，我们集成了两个基于影像信息提取模块—ICA 和 RX，这两种方法是提取异常信息常采用的工具，但是他们有一个共同的缺点，即提取出来的信息未知，这时可以利用 FISS 地物光谱样本库并结合 4.11 所提到的光谱匹配方法进行匹配，识别其具体类别[38, 39]。

下面我们对这两种方法进行简单的介绍，在实际的集成过程中并没有采取传统的 ICA 方法和 RX 方法，而是采纳了它们的一些改进的方法。

1. ICA 方法

独立成分分析是一种相对较新的技术，始于上世纪 80 年代，在上世纪 90 年代的中期，研究人员演示了鸡尾酒会问题（Cocktail Party Problem），成功地从混杂信号中找到每个人的语音波形，独立成分分析引起了人们的重视。解决鸡尾酒会效应的问题，与高光谱图像光谱解混问题十分相似，在对高光谱图像端元和丰度一无所知的情况下，独立成分分析提供了一种有力的工具，通过非常少先验知识，就能估计出混杂信号中的隐含成分。但是，独立成分分析仍然未能完

全解决高光谱图像的光谱解混问题,其中最重要的原因是高光谱图像无法保证独立成分分析的前提条件,主要表现为:丰度同时具有 ASC 和 ANC 约束,使得成分之间必然存在着相关性,这种相关性难以完全消除,从而破坏了成分之间独立性的前提假设。另一方面,独立成分分析自身也具有两种不确定性:幅值不确定性和次序不确定性,使得独立成分分析难以应用于定量化的分析。以上两个方面导致了独立成分分析无法直接用于高光谱图像光谱解混的应用当中。针对这些关键的问题,罗文斐对丰度约束条件下的成分相关性展开了讨论[40],提出相关性最小化条件下的最佳角度问题,并采用斜交化的方法把成分修正到最佳角度的方向上,得到斜交独立成分分析算法。另一方面,对于独立成分分析造成的不确定性问题,罗文斐采用一种端元定量化以及丰度定量化的策略来修正幅值不确定性,利用初始端元方向来消除次序的不确定性。

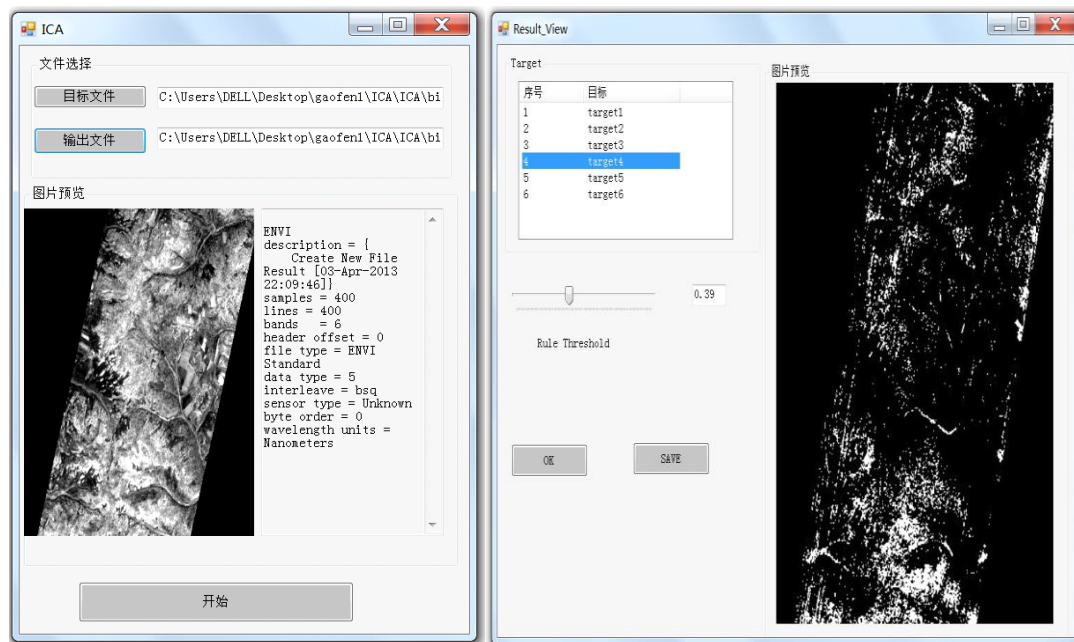


图 4-5 ICA 探测界面

2. RX 算法

RX 是由 Reed 和 Xiaoli Yu 提出的,它在多光谱及高光谱图像异常目标探测方面均取得了显著的成功,是目前较为广泛使用的异常检测方法之一。由多光谱图像发展而来的 RX 异常检测算法是利用最大似然检测得到的恒虚警检测算法,在满足算法的假设条件的前提下,适合于背景分布比较简单情形下的目标检测。因为高斯分布便于处理,多数视觉图像的统计模型都认为服从高斯分布,尽管实际情况并不是这样。算法的假设前提是:背景服从空间均值快变、方差慢变的多维高

斯随机过程。检测处理在被认为是统计均一的图像子块上完成，通过统计处理检测窗口内部的均值和方差来获取 RX 算法的参数，得到的检测结果作为判断检测窗口中心点是否为目标依据。通过平移检测窗口，即可得到整幅图像的检测结果。RX 算法是利用局部正态模型的异常检测算子，其参数是从检测像元的局部近邻中估计出来的，因而 RX 算法的检测窗包括背景窗和目标窗。通常情况下背景窗口要比目标窗口大很多，两个窗口都为奇数大小，且两者的中心点相同。

根据相关文献[41]，采用了改进RX算法——I-RX：基于奇异值分解(SVD)，将高光谱图像投影到背景的正交子空间上，获得仅包含噪声和异常的残留图像。在此基础上，通过计算各样本的空间秩深度将残留图像划分为噪声背景和潜在异常两个样本集，利用噪声背景集估计整幅图像的背景协方差矩阵，并将潜在异常集作为测试样本进行异常检测。

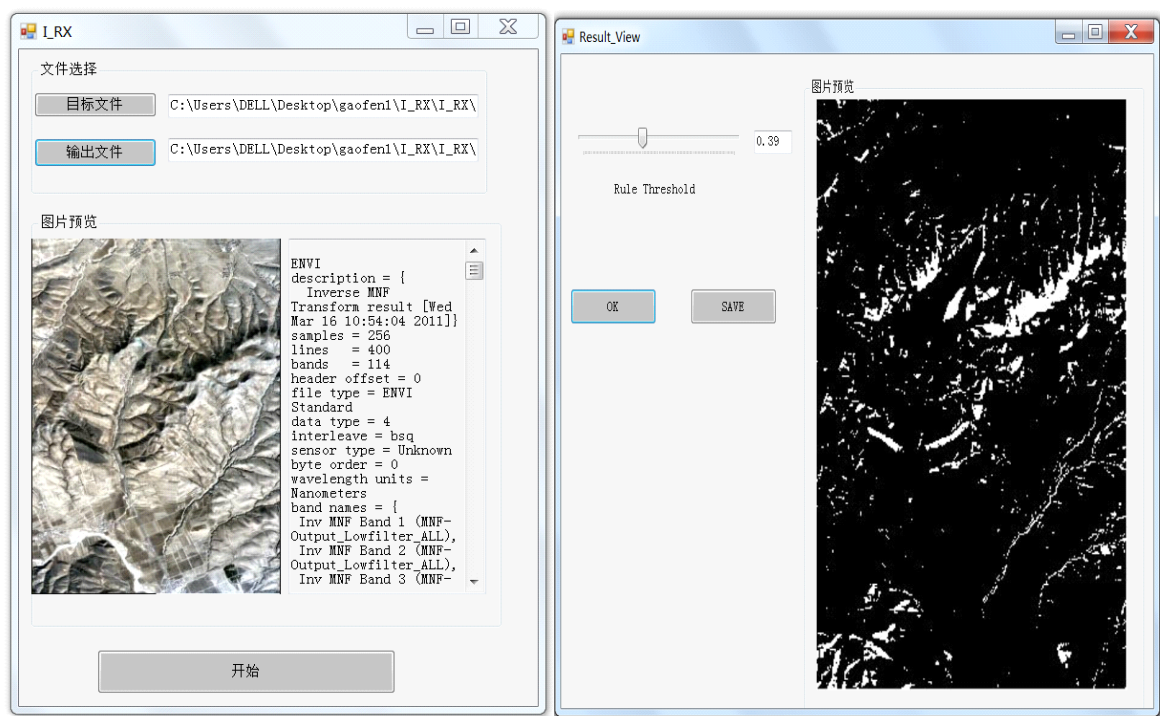


图 4-6 RX 探测界面

4.1.3 基于权重光谱解混方法的高光谱矿物填图方法

1. WLSMA 方法简介

由于遥感器的空间分辨率限制以及自然界地物的复杂多样性，混合像元普遍存在于遥感影像中，光谱混合分析SMA能够较好的解决光谱混合问题并已广泛运用于各个领域。

传统的 SMA 方法认为影像所有像元包含的端元数目固定不变, 没有考虑端元所代表的地物是否真正存在于像元视场内, 也没有考虑“同物异谱”造成的光谱变异问题。基于端元可变思想的迭代光谱解混理论很好的解决了以上问题[42], 该理论允许每一类地物选取多条光谱数据参与解混, 它假设像元里的地物类型有限, 仅用少数几种端元就能对地表进行很好的模拟, 这一理论在实际应用时需要从大量端元组合中迭代搜寻最佳拟合模型将其作为最终反演结果。

这种基于迭代光谱解混理论的方法虽然反演精度较高, 但为了解决光谱变异等问题需要构建大样本量的端元光谱库, 若仅仅从图像中提取端元无法满足这一要求, 必须结合现有的光谱库或野外实测数据[42]。但在实际高光谱矿物填图工作中(特别是前期阶段)往往无法进行有效的野外实地考察, 因此本文提出了一种基于自适应权重的迭代光谱解混方法 WLSMA: 利用图像本身构建小样本容的端元光谱库, 在此基础上进行权重线性光谱解混。该方法不需要大量先验信息, 利用端元可变的思想增强了相似性矿物的可分性, 提高了对矿区地表岩性的认识和模拟能力, 同时在一定程度上改善了迭代光谱解混理论的计算复杂度。

WLSMA 是在线性 SMA 模型基础上提出的一种算法, 其主要是根据矿物波谱曲线特征将所采集端元光谱划分为若干类别, 针对每一类别各选取几个具有代表性的最优端元光谱, 同时在空间上对影像采取窗口迭代处理, 利用所选最优端元光谱构建一个样本库; 最后估算样本库的类内离散度矩阵并将其作为权值阵, 对影像进行迭代光谱线性解混, 生成矿物含量填图结果。

WLSMA 采用基于四端元模型的迭代光谱解混方法对影像进行处理, 即: 引入了 4 种端元组合模块: 1-ends, 2-ends, 3-ends, 4-ends。每一模块均是由相应数目的端元光谱加上一个固定的阴影端元组合而成, 用上述 4 种模块进行线性解混, 选取 $RMSE$ 最小的模块将其解混值作为最终反演结果。通常在线性解混时认为各波段的权重相同即权矩阵为单位阵 E , 其最小二乘目标函数表示为:

$$\min(P * f - P')^T E(P * f - P') \quad (4.5)$$

式中 P' 和 P 分别为混合像元的真实反射率和反演的各端元反射率, f 为丰度值。这种设置各波段为等权的做法显然不利于提高精度, 故本文采用了加权处理, 加权最小二乘的关键是寻找合适的非单位权矩阵 W , 然后进行相关推导。

2. 试验和结果

1) 实验数据

研究中使用了美国内华达州铜矿区的 AVIRIS 高光谱数据 (图 2), 并结合美国地质调查局的分类图进行精度分析。Cuprite 矿区除了少数植被覆盖外大部分为含指示矿物的蚀变带, 是进行遥感地质研究的典型样区。该影像数据为 1997 年 6 月 19 日机载 AVIRIS 获得, 包括光谱范围为 0.372.51 μ m 的 224 个波段, 地面瞬时视场约为 20 m。在经过大气校正的 224 个波段中, 主要考虑用 1.3-2.5 μ m 范围内的短波红外对矿物进行识别, 考虑水汽吸收的影响共选取了 93 个波段。

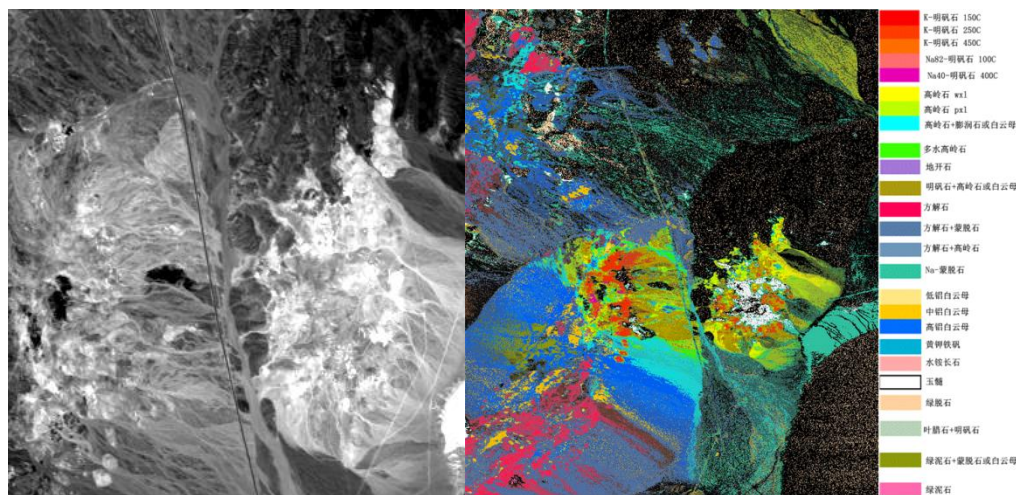


图 4-7 左: 内华达铜矿区 AVIRIS 高光谱数据
右: 研究区域的 USGS 分类图

2) 数据处理

在实验数据中自动提取出 212 条端元光谱数据, 将这些数据光谱聚类 (距离测度为光谱角) 并结合美国地址勘察波谱库进行类别匹配, 最终确定 10 个主要端元集合, 其中 8 个类别为: alunite(明矾石), buddingtonite(水铵长石), Calcite(方解石), chalcedony(玉髓), Kaolinite(高岭石), montmorillonite(蒙脱石), Muscovite(白云母), desert varnish(荒漠漆), 还有两个较复杂的混合矿物光谱, 不能对其识别故命名为 unknow1, unknown2。根据 In_CoB 指标对 10 类端元集合进行筛选, 共选取出 36 条光谱, 其中每一类含有 3-5 条典型光谱数据 (图 4)。对这 36 条光谱数据采取窗口卷积处理 (迭代次数选为 3), 构建一个

样本数为 87 的矿物光谱库，估算光谱库的类内离散度矩阵 S_w ，并利用惩罚因子分析方法进行补偿，得到较为平滑的权值矩阵 \tilde{S}_w^{-1} 。最后，采用四端元模型对影像进行加权线性解混，选取反射率值为 1% 的光谱代表阴影成分端元参与解混，生成矿物类别的丰度。

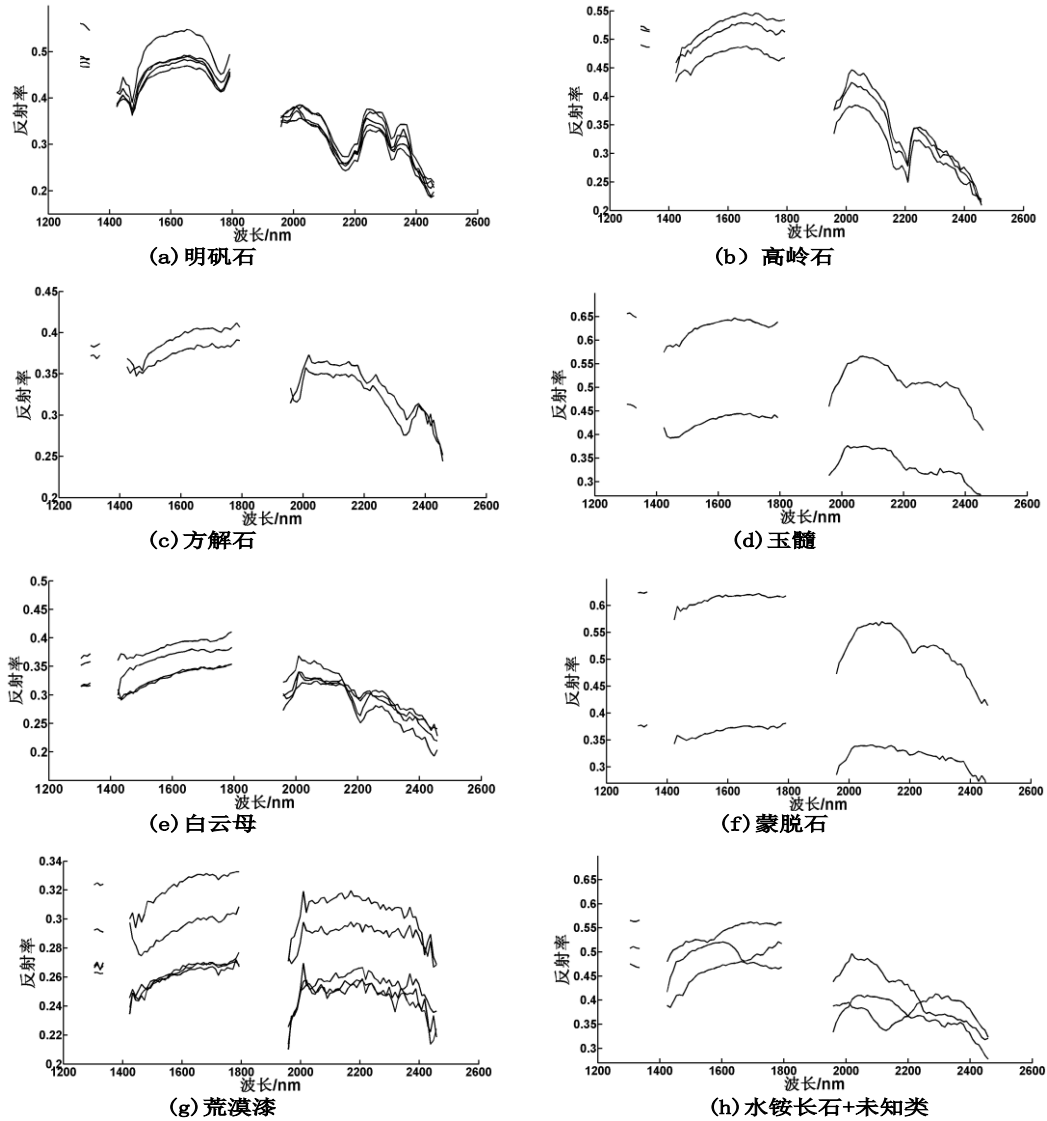


图 4-8 从候选端元挑选的 10 类端元集合

3) 结果与分析

为了分析 WLSMA 实验结果，本文将其与经典的光谱解混算法 ISMA 进行比较：两者都是基于逐像元优化的光谱混合分析方法，Rogge 利用 Cuprite 数据进行 ISMA 实验并与全约束解混方法 FCLS 进行比较，实验结果表明，ISMA 相比传统的解混方法具有独特的优越性，在矿物填图方面能取得较理想的结果。

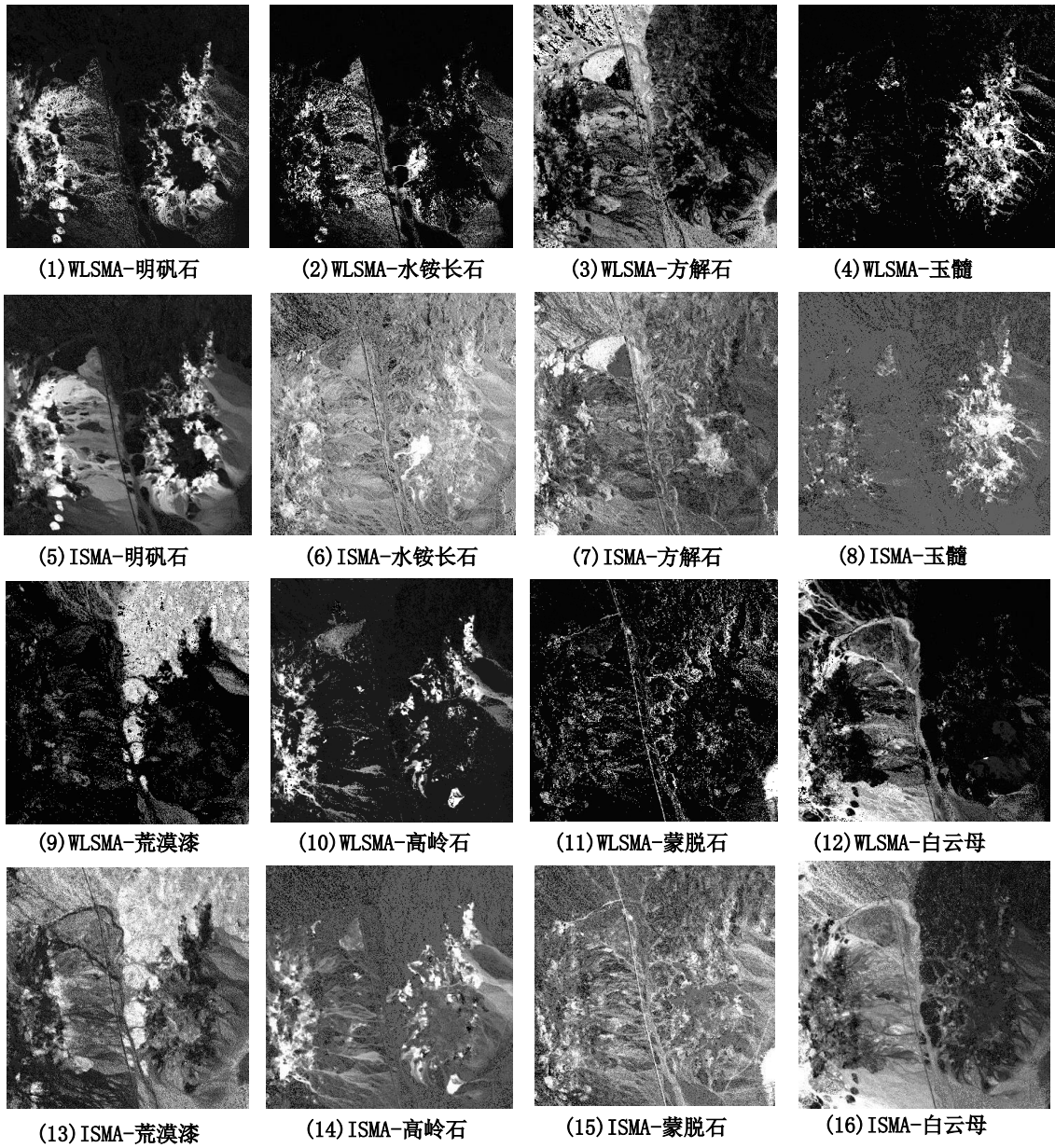


图 4-9 影像主要端元丰度图

ISMA 和 WLSMA 的反演结果与 USGS 软件 Trtracorder (Clark 等, 2003) 处理结果大体上一致, 两者均有较高的精度。但 ISMA 丰度图偏于模糊, 反演结果中低值分布较广, 甚至有些区域大部分为亮度低值, 这与研究矿区的实际情况不符, 实地调查表明该地区主要矿物的分布具有空间积聚性, 多数矿物只分布在特定的蚀变区域 (譬如 buddingtonite 和 chalcedony)。低值的广域分布主要是因为一些端元虽然在解混过程中提升了模型的拟合性能, 但它们不是模型的真实端元, 并不真正存在于该像元的视场内。从图 5 可以看出, WLSMA 具有更为细致的空间分布信息, 由于算法对模型端元数目进行限制, 避免了虚假端元的出现, 大部分区域中同一类别的像元能够清晰的聚集在一起。

4.2 数据库管理系统实现

在前面分析、设计的基础上, 构建了高光谱数据库系统。系统提供了基本的数据库管理功能, 本系统完成了数据导入, 查询检索, 可视化三大功能, 在数据导入部分, 包括导入地面成像光谱系统 (Field Imaging Spectrometer System, FISS) 入库, 地面实测数据以及航空和星载高光谱数据入库; 在查询检索部分, 实现了多源数据的检索; 可视化方面, 实现了影像和光谱的显示, 实现了地面数据光谱的显示, 针对影像还是先了放大缩小等操作。

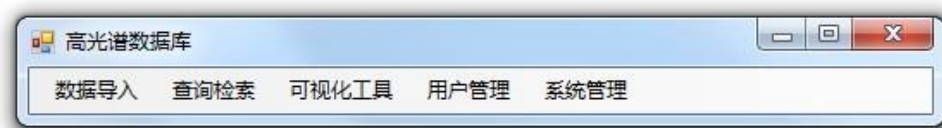


图 4-10 高光谱数据库主界面

1. 数据导入

主要实现 FISS、波谱数据、航空数据和卫星数据入库的功能。FISS 数据在入库之前, 需要进行一系列的预处理操作, 得到反射率数据, 然后还要转换成以 BIP 格式存储的 TIFF 类型数据。

2. 查询检索

主要实现对 FISS 数据、波谱数据、航空数据和卫星数据的查询。

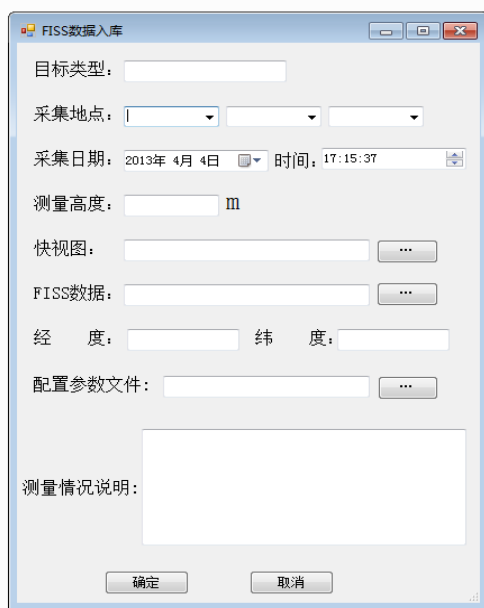
3. 可视化工具

在可视化部分, 首先要能显示满足查询条件的各个影像的属性信息, 其次才是显示 RGB 合成的彩色影像, 同时还能显示每一个像元的光谱曲线。在显示影像

时，可以对影像进行放大、缩小、漫游等操作。在显示光谱曲线时，可以对曲线进行光谱平滑、光谱重采样、光谱匹配、包络线去除等操作。

4. 系统管理

主要是实现用户信息添加、修改、删除等操作。系统管理是指数据安全管理和数据库维护、数据扩充等。安全管理是指建立完整的用户管理体系，对数据进行严格的权限设置，保证存储在数据库中的数据可被正确、合理地使用。同时还需要对数据进行维护和修改、删除等管理操作。



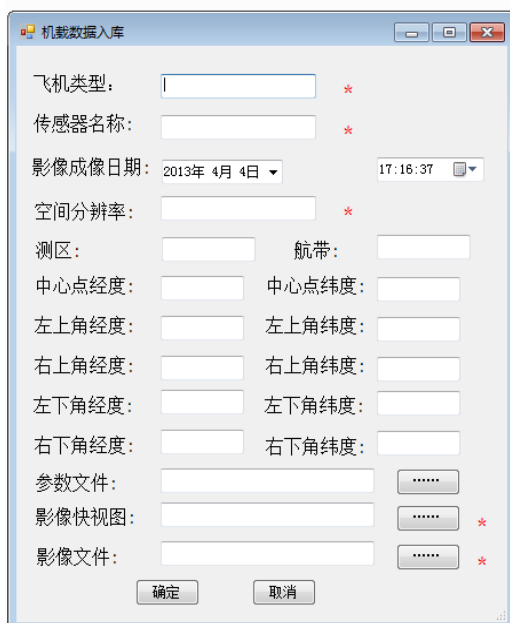
FISS数据入库对话框包含以下字段：

- 目标类型：文本输入框
- 采集地点：三个下拉菜单
- 采集日期：2013年 4月 4日，时间：17:15:37
- 测量高度：文本输入框，单位 m
- 快视图：文本输入框，右侧有省略号按钮
- FISS数据：文本输入框，右侧有省略号按钮
- 经度：文本输入框，纬度：文本输入框
- 配置参数文件：文本输入框，右侧有省略号按钮
- 测量情况说明：多行文本输入框
- 底部有确定和取消按钮



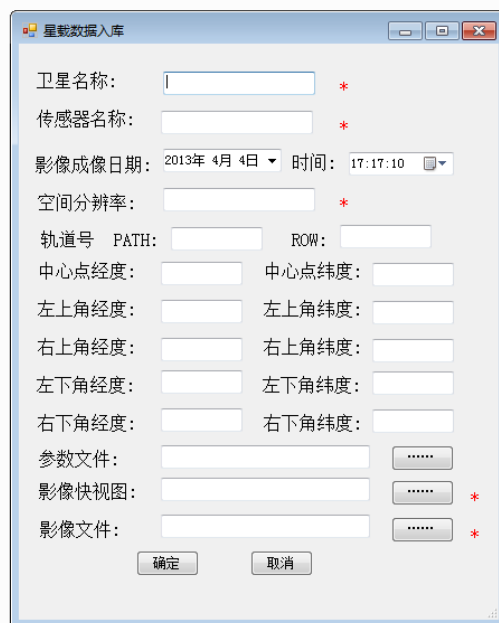
实测波谱数据入库对话框包含以下字段：

- 岩矿类型：文本输入框，右侧有红色星号
- 测量地点：三个下拉菜单，右侧有红色星号
- 测量仪器：文本输入框，右侧有红色星号
- 测量日期：2013年 4月 4日，右侧有红色星号
- 测量时间：17:16:09，右侧有红色星号
- 波谱数据：文本输入框，右侧有浏览按钮和红色星号
- 背景照片：文本输入框，右侧有浏览按钮
- 经度：文本输入框
- 纬度：文本输入框
- 底部有完成和取消按钮



机载数据入库对话框包含以下字段：

- 飞机类型：文本输入框，右侧有红色星号
- 传感器名称：文本输入框，右侧有红色星号
- 影像成像日期：2013年 4月 4日，时间：17:16:37
- 空间分辨率：文本输入框，右侧有红色星号
- 测区：文本输入框，航带：文本输入框
- 中心点经度：文本输入框，中心点纬度：文本输入框
- 左上角经度：文本输入框，左上角纬度：文本输入框
- 右上角经度：文本输入框，右上角纬度：文本输入框
- 左下角经度：文本输入框，左下角纬度：文本输入框
- 右下角经度：文本输入框，右下角纬度：文本输入框
- 参数文件：文本输入框，右侧有省略号按钮
- 影像快视图：文本输入框，右侧有省略号按钮和红色星号
- 影像文件：文本输入框，右侧有省略号按钮和红色星号
- 底部有确定和取消按钮



星载数据入库对话框包含以下字段：

- 卫星名称：文本输入框，右侧有红色星号
- 传感器名称：文本输入框，右侧有红色星号
- 影像成像日期：2013年 4月 4日，时间：17:17:10
- 空间分辨率：文本输入框，右侧有红色星号
- 轨道号 PATH：文本输入框，ROW：文本输入框
- 中心点经度：文本输入框，中心点纬度：文本输入框
- 左上角经度：文本输入框，左上角纬度：文本输入框
- 右上角经度：文本输入框，右上角纬度：文本输入框
- 左下角经度：文本输入框，左下角纬度：文本输入框
- 右下角经度：文本输入框，右下角纬度：文本输入框
- 参数文件：文本输入框，右侧有省略号按钮
- 影像快视图：文本输入框，右侧有省略号按钮和红色星号
- 影像文件：文本输入框，右侧有省略号按钮和红色星号
- 底部有确定和取消按钮

数据查询界面

FISS数据查询 | 波谱数据查询 | 星载数据查询 | 机载数据查询

☒ 目标类型 花岗岩

☒ 采集地点 北京市 东城区

☐ 采集时间 2013年 1月30日 至 2013年 1月30日

查询

	ID	岩矿类型	测量地点	测量日期	测量时刻	测量高度	采集经度	采集纬度	显示影
▶	1	花岗岩	北京市东城区	2013年1月6日	15:50:47	2	12	13	显示影
*									

数据查询界面

FISS数据查询 | 波谱数据查询 | 星载数据查询 | 机载数据查询

☒ 岩矿类型 花岗岩

☒ 采集地点 北京市 东城区

☐ 采集时间 2013年 1月30日 至 2013年 1月30日

查询

	测量地点	测量仪器	测量日期	测量时刻	采集经度	采集纬度	光谱曲线	背景照片
▶	北京市东城区	ADS	2012年12月13日	10:34:51	1	1	显示	显示
*								

数据查询界面

FISS数据查询 | 波谱数据查询 | 星载数据查询 | 机载数据查询

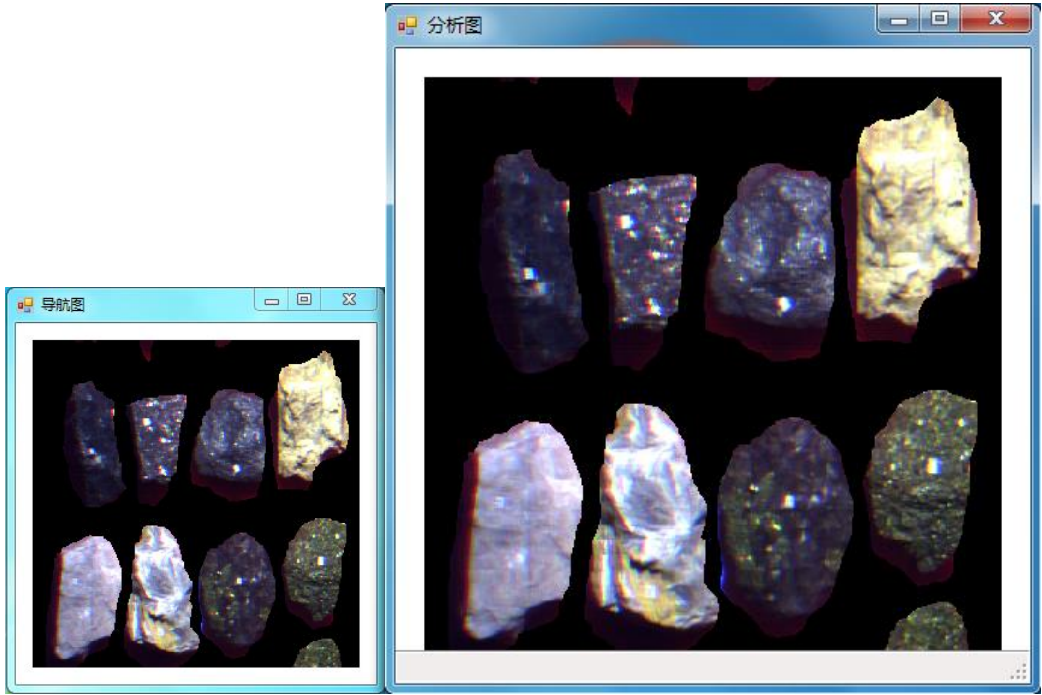
☒ 卫星名称 地球观测卫星

☒ 传感器名称 Hyperion

☐ 成像时间 2013年 1月30日 至 2013年 1月30日

查询

	ID	卫星名称	传感器名称	成像日期	成像时刻	空间分辨率	轨道号PATH	轨道号ROW
▶	2	地球观测卫星	Hyperion	2013年1月6日	13:54:27	1	1	1
	3	地球观测卫星	Hyperion	2013年1月6日	14:00:27	1	1	1
*	1	地球观测卫星	Hyperion	2013年1月6日	13:39:41	1	1	1



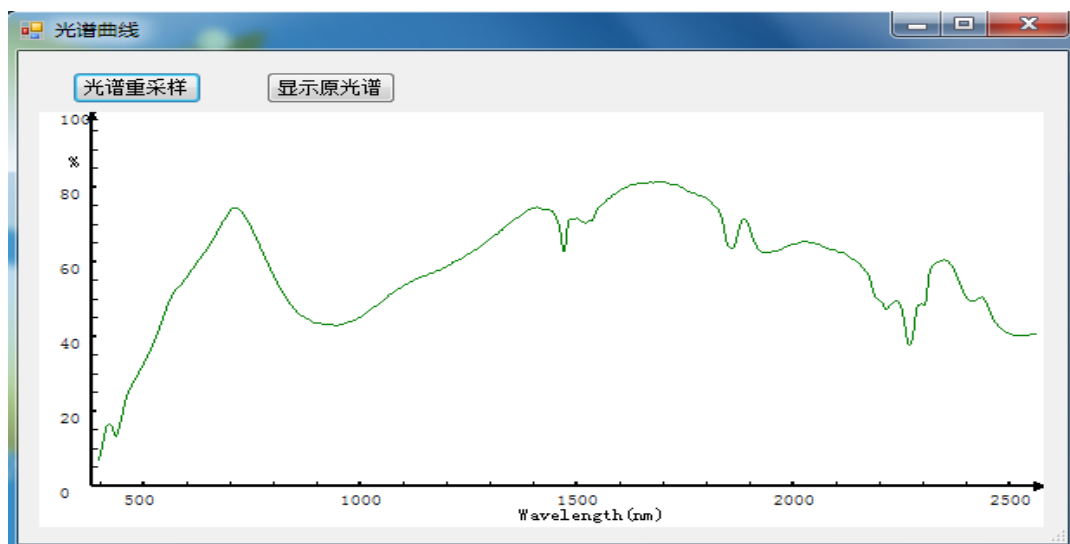


图 4-11 高光谱数据库主要功能界面

4.3 本章小结

本章首先选取一定数量的 FISS 数据建立了一了高光谱矿物样本库，并集成了几个以此样本库为基础的光谱分析方法和基于影像的信息提取模块；然后提出了一种基于权重光分析的光谱解混方法，该方法可以基于 FISS 样本库进行矿物丰度填图，解决了光谱野外采集样本库不足的问题。最后，在选择开发环境里，构建了高光谱数据库系统，实现了 FISS、机载、星载多源高光谱数据的导入，查询检索，三维可视化等功能。

第五章 结论与展望

本文针对高光谱数据库这一研究对象,提出了以FISS数据为核心的多维高光谱数据管理系统,对高光谱数据库设计和建设进行了研究和实施,初步建立了集高光谱数据存储、检索、可视化和分析为一体的数据库系统。本文以建立高光谱数据库为最终目标,主要完成了以下两个工作:一是研究并建立了以FISS数据为核心的高光谱数据库系统,对高光谱数据库进行了需求分析和总体结构设计,并研究了FISS数据的存取技术,结合多维数据库的理论实现了基于三维球形系统的多源高光谱数据查询检索和可视化,在这些研究的基础上提出了一种适合高光谱数据的数据管理格式—*.mdh;二是开发了高光谱数据库系统,该系统集成了一些简单光谱分析方法和基于影像数据的信息提取方法,并提出了一种基于权重分析的光谱解混方法,这些方法和模块均有效的利用了所构建的 FISS光谱样本库,对于FISS数据的应用和推广具有一定的意义。

5.1 结论

1. 在对数据库的功能需求和总体设计进行深入分析后,根据 FISS 高光谱数据的特点和系统应用的需求,并以多维数据库理论为基础,设计了以 GeoRaster 对象为核心的高光谱数据存储模型,并以此存储模型为基础进行了数据库的物理设计和详细设计,研究表明,该存储模型能够为高光谱数据库系统的数据存储、显示以及光谱分析功能提供有效的支持。

2. 结合 FISS 数据存储模型,并利用基于存储过程的数据入库方法和基于动态数据表转换的数据获取方法,实现了高光谱数据的存储和读取。在这些基础上提出了一种适合高光谱数据管理的数据结构—*.mdh,该数据结构可以实现多源数据的存储、检索和三维球形系统可视化,有效的体现高光谱数据图谱合一的显示。

3. 开发了以 FISS 数据为主要数据源的高光谱数据库系统,实现了数据的导入、查询、可视化功能。利用该数据库系统尝试性的构建了 FISS 地物样本库,并以此为基础集成了简单的光谱分析功能和高光谱信息提取模块,最后提出了一种基于权重分析的光谱解混方法,为进一步的数据筛选提供了支持。

5.2 展望

虽然本文对以 FISS 数据为核心的高光谱数据库系统进行了研究和实现，但是由于时间和条件的限制，该数据库系统功能不是很完善、性能也不是很稳定，在全球高光谱数据管理和研究上，还有很多关键的技术有待研究，将来应该从以下方面进一步深入和改进本文的研究：

- 高光谱数据库系统的优化，本系统实现了多源高光谱数据的入库、查询检索、影像与光谱的显示，在研发过程中侧重点于主要功能的实现上，对系统运行的性能如响应时间、入库效率、查找效率等虽有所考虑但并不全面，在后续的研究中应该将重点放在数据索引优化，表空间设计等方面，以期望提高系统的稳定性和实效性。
- 数据存储结构的完善，本文提出了一种适合高光谱数据管理的数据格式—*.mdh，可以实现多源数据的存储、检索和三维球形系统可视化，但是该数据结构是以 Oracle 自带的 GeoRaster 插件为基础，并不能完全满足高光谱数据的要求，因此，在后期的研究过程中我们应该着重于结合高光谱数据的特点对 Georaster 模块进行重构，使之能够更好的满足高光谱数据需求。
- 数据库分析工具的实现，本文中利用到了多维数据库的理念和其简单的分析工具进行数据管理，在后期的数据库优化和运行过程中应该进一步加强对多维数据库理论进行规划和完善；另外，在数据分析模型的研究中并没完全用到 FISS 样本库，这是由于其波段的限制，随着后期波段的增多，应该将重点放在如何更好的利用 FISS 数据进行光谱分析和影像信息提取，以突出其相比于点辐射光谱数据的优越性。

参考文献

- [1] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬, 高光谱遥感: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 张良培, 张立福, 高光谱遥感: 武汉大学出版社, 2005.
- [3] C. Chang, B. Moon, A. Acharya, C. Shock, A. Sussman, and J. Saltz, "Titan: a high-performance remote-sensing database," in Data Engineering, 1997. Proceedings. 13th International Conference on, 1997, pp. 375-384.
- [4] 李宗华, 彭明军, "基于关系数据库技术的遥感影像数据建库研究," 武汉大学学报 (信息科学版), vol. 30, pp. 166-170, 2005.
- [5] 潘红艳, "海量遥感图像数据库设计," 微型电脑应用, vol. 5, p. 022, 2010.
- [6] M. S. Wong, M. L. R. Sarker, J. Nichol, S.-c. Lee, H. Chen, Y. Wan, and P. Chan, "Modeling BVOC isoprene emissions based on a GIS and remote sensing database," International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 21, pp. 66-77, 2013.
- [7] J. Powell, G. Erukulla, M. Buhisi, and B. Velauthapillai, "A relational database management system for atmospheric compensation research," Computers & Geosciences, vol. 37, pp. 588-597, 2011.
- [8] E. Tomppo, H. Olsson, G. Ståhl, M. Nilsson, O. Hagner, and M. Katila, "Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases," Remote Sensing of Environment, vol. 112, pp. 1982-1999, 2008.
- [9] 汤海鹏, 毛克彪, 覃志豪, 吴毅, "遥感分析中小型地物波谱数据库系统的设计与实现," 测绘与空间地理信息, vol. 27, pp. 32-35, 2004.
- [10] 曹入尹, 陈云浩, 黄文江, "面向作物病害识别的高光谱波谱库设计与开发," 自然灾害学报, vol. 17, pp. 73-76, 2008.
- [11] 屈永华, 刘素红, 王锦地, 李小文, 苏理宏, "中国典型地物波谱数据库的研究与设计," 遥感信息, vol. 2, pp. 5-8, 2004.
- [12] 李兴, "高光谱数据库及数据挖掘研究[D]," 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
- [13] S. Bojinski, M. Schaepman, D. Schlöpfer, and K. Itten, "SPECCHIO: a spectrum database for remote sensing applications," Computers & Geosciences, vol. 29, pp. 27-38, 2003.
- [14] 王密, 龚健雅, "基于扩展关系数据库的遥感影像数据库管理系统的研究与实现," 测绘信息与工程, vol. 27, pp. 1-3, 2002.
- [15] A. Hueni, J. Nieke, J. Schopfer, M. Kneubühler, and K. Itten, "The spectral database SPECCHIO for improved long-term usability and data sharing," Computers & Geosciences, vol. 35, pp. 557-565, 2009.
- [16] 张定祥, 李宪文, 杨冀红, "基于高光谱和高分辨率影像的土地利用数据库更新研究," 农业工程学报, vol. 20, pp. 272-276, 2004.
- [17] 李新双, 张良培, 李平湘, "光谱数据库系统的设计及应用," 测绘信息与工程, vol. 29, 2004.
- [18] 刘波, "基于地面成像光谱系统的植物信息提取研究," 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2010.
- [19] 童庆禧, 薛永祺, 王晋年, 张立福, 方俊永, 杨一德, 刘学, 亓洪兴, 郑兰芬, 黄长平, "地面成像光谱辐射测量系统及其应用," 遥感学报, pp. 409-422, 2010.
- [20] M. Datcu, H. Daschiel, A. Pelizzari, M. Quartulli, A. Galoppo, A. Colapicchioni, M. Pastori, K.

- Seidel, P. G. Marchetti, and S. D'Elia, "Information mining in remote sensing image archives: system concepts," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 2923-2936, 2003.
- [21] C. Bréant, G. Thurler, F. Borst, and A. Geissbuhler, "Design of a Multi Dimensional Database for the Archimed DataWarehouse," *Studies in health technology and informatics*, vol. 116, pp. 169-174, 2005.
- [22] 季民, 靳奉祥, 李婷, 赵相, "013 海洋多维数据仓库构建研究," *海洋学报*, vol. 31, pp. 48-53, 2009.
- [23] 邹逸江, "多维空间分析的关键技术——空间数据立方体," *地理与地理信息科学*, vol. 22, pp. 12-16, 2006.
- [24] 李忠, 杜绪奎, 李梅, "遥感影像数据库设计与实现," *测绘与空间地理信息*, vol. 31, pp. 43-45, 2008.
- [25] 张雄飞, "网络环境下的高光谱数据库构建及其应用实践[D]," 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [26] 陈建平, 张立福, 朱文君, "矿产资源与环境遥感本底数据库的设计与建设," *地质通报*, vol. 5, p. 010, 2011.
- [27] 张雄飞, 张兵, 张霞, 郑兰芬, 童庆禧, "高光谱数据在数据库中的高效存储技术研究," *遥感学报*, vol. 8, pp. 407-410, 2004.
- [28] 董广军, 王鹏, 赵楠, "高光谱数据在 Oracle 中的存储及应用技术研究," *测绘科学技术学报*, vol. 23, pp. 174-177, 2006.
- [29] 苏炳均, 李林, 诸昌铃, "基于 Oracle Spatial 的空间数据索引," *现代计算机*, 2004.
- [30] 冯锐, 纪瑞鹏, 武晋雯, 王宏博, 陈鹏狮, 张玉书, "基于 ArcGIS Engine 的干旱监测预测系统," *中国农学通报*, vol. 26, pp. 366-372, 2010.
- [31] 覃环虎, 张立福, 刘凯, "高光谱影像库的数据存取技术研究," *Computer Engineering*, vol. 38, 2012.
- [32] 孙婷, 张立朝, 唐汉松, 赵鹏, 王青山, "基于 Oracle 的高光谱影像数据库研究," *北京测绘*, vol. 2, pp. 1-4, 2007.
- [33] 王爱玲, 李京, 刘素红, 陈云浩, "多尺度遥感影像数据库管理的设计与实现," *计算机工程与应用*, vol. 43, pp. 227-229, 2007.
- [34] 张文元, 付仲良, "基于 ArcGIS Engine 的综合管线三维可视化研究," *测绘通报*, vol. 8, pp. 28-31, 2008.
- [35] 王密, 龚健雅, 李德仁, "大型无缝影像数据库管理系统的设计与实现," *武汉大学学报(信息科学版)*, vol. 28, pp. 294-301, 2003.
- [36] 王海滨, 杨引明, 杨雅薇, 朱雪松, "上海世博会全球对地观测三维可视化系统设计与实现倡," *计算机应用研究*, vol. 28, 2011.
- [37] B. L. Milenova, J. S. Yarmus, and M. M. Campos, "SVM in oracle database 10g: removing the barriers to widespread adoption of support vector machines," in *Proceedings of the 31st international conference on Very large data bases*, 2005, pp. 1152-1163.
- [38] 郑兰芬, 王晋年, "成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究," *环境遥感*, vol. 1, 1992.
- [39] 于宏, 黄树桃, 刘京晶, "基于光谱知识库对高光谱影像目标快速识别方法," *世界核地质科学*, vol. 28, 2011.
- [40] 罗文斐, 钟亮, 张兵, 高连如, "高光谱遥感图像光谱解混的独立成分分析技术," *光谱学与光谱分析*, pp. 1628-1633, 2010.

[41] 蒲晓丰, 雷武虎, 张林虎, 周峰, "基于改进 RX 算法的高光谱异常检测," 中国图象图形学报, vol. 16, pp. 1632-1636, 2011.

[42] L. Li, S. Ustin, and M. Lay, "Application of multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) to AVIRIS imagery for coastal salt marsh mapping: a case study in China Camp, CA, USA," International Journal of Remote Sensing, vol. 26, pp. 5193-5207, 2005.

发表文章目录

- 1、**刘凯**, 张立福, 杨杭, 朱海涛, 姜海玲, 李瑶, "面向对象分析的非结构化背景目标高光谱探测方法研究," 光谱学与光谱分析, vol.33, 2013.(SCI)
- 2、**刘凯**, 张立福, 覃环虎, "基于权重光谱解混方法的高光谱矿物填图," 遥感学报, vol.3, 2013.(CSCD)
- 3、覃环虎, 张立福, **刘凯**, "高光谱影像库的数据存取技术研究," 计算机工程, vol. 38, 2012.(CSCD)
- 4、Muhammad Hasan Ali BAIG, Lifu ZHANG, Shudong WANG, **Kai LIU**, Gaozhen JIANG, Changping HUANG, "Analysis of Different Indices for Water Mapping through MODIS and Landsat TM," AOGS2013.(EI)

致 谢

三年多以前，怀揣着一颗充满向往、崇敬和忐忑的心，来到了中科院遥感所高光谱研究室。今天蓦然发现，研究生毕业之期已然不远，不禁感慨光阴之易逝，岁月之如梭。一路走来，得到了众多师友的帮助与关怀。

衷心感谢我的恩师张立福老师。三年前，承蒙张老师的关爱和帮助，我得以进入高光谱研究室学习。在遥感所求学的三年时光里，老师严谨的治学态度，踏实的工作作风，亲切的待人风格，活跃的学术思维，给我留下了非常深刻的印象并产生了非常深远的影响，正是在张老师的关怀和指引下，我迈入了科研的殿堂。同时在撰写毕业论文的过程中，老师多次主动关心并与我进行讨论，从论文的选题、提纲的拟定再到论文的定稿，倾注了老师大量的心血。

衷心感谢我的导师童庆禧院士。童老师是我国高光谱遥感事业的开山鼻祖，他知识渊博、治学严谨、视野广阔、德艺双馨，从学业上和生活上关心高光谱研究室每个同学的发展与成长，从思想上、方法上引导我们走上通往科学殿堂的道路，是一名卓越的师者与学者。愿在您引领之下，祖国的高光谱遥感科学事业蒸蒸日上。

衷心感谢郑兰芬研究员和王晋年研究员。郑老师在日常学习和工作中给同学们以细致入微的关怀，从思想、学习和生活上全方位的关心着我们的成长和进步。王晋年老师多次参加我们的学术交流会，他在工作、生活等方面给予的关怀和指导以及如何进行科学研究上给予的启发都对我产生了非常深远的影响。

衷心感谢张霞老师、方俊永老师和刘学老师在学习上和生活上给与的关心和帮助，感谢王树东老师、吴太夏师兄、杨杭师兄、岑奕师姐、张晓红师姐、王潇师姐、赵冬师兄所给予的关心和帮助。特别感谢吴太夏师兄、杨杭师兄、岑奕师姐和张晓红师姐在一年多的学习和工作过程中给予的指导和帮助，感谢小周姐、龚正姐和王畅在日常工作中的帮助和关心。

感谢高光谱遥感研究室的师兄师姐们、同学们以及师弟师妹们所给予的关心和帮助，三年里，我们一路走来，因为有你们，我的研究生生活才会如此的丰富多彩，他们是：张学文、孙韬、李颖、黄长平、陈小平、胡顺石、王倩、覃环虎、尚坤、帅通、李晶宜、段依妮、谢一淞、张明、兰穹穹、姜海玲、孙雪剑、赵恒谦、张旭凯、丰明博、朱海涛、张鹏、杨德贺、韩冰、张楠、李雪珂、余晓君、王晶、李亮、张良中、李瑶、石婷婷、王桂珍。在这里特别感谢黄长平师兄和覃环虎师兄，尤其是黄长平师兄在学业中的指导和帮助；特别感谢孙雪剑和姜海玲师姐在生活和野外试验中给予的关心和支持。

特别感谢计通学院 2010 级的那群同学—龙鑫、朱海涛、叶磊、王庆刚、赵永泉、张朝阳、谢燕华，是你们陪我度过了研一的快乐时光，不知道你们是否也跟我一样怀念那段在玉泉路 4 公寓 6 楼的风流岁月。

感谢研究生处吴晓清老师、刘戈平老师和杨硕老师在学习和工作中给予的支持和帮助。

感谢论文的两位评审老师的认真评阅以及提出的宝贵建议，感谢出席论文答辩会的评委

老师们提出的宝贵建议。

即将离开高光谱研究室了，心情难免有一丝淡淡的忧伤。但是，前方的路还很长，既然选择了科研这条路就无需后悔，长风破浪会有时，直挂云帆济沧海。我坚信人生需要拼搏，自己的路只有自己才能走出来。