

密级:\_\_\_\_\_



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

## 硕士学位论文

岩心成像光谱数据编录系统设计与实现

作者姓名: \_\_\_\_\_ 张艮中

指导教师: 童庆禧 院 士 中国科学院遥感与数字地球研究所

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: \_\_\_\_\_ 理学硕士

学科专业: \_\_\_\_\_ 地图学与地理信息系统

研究所: \_\_\_\_\_ 中国科学院遥感与数字地球研究所

2014 年 5 月

**The Design and Implementation of Core Imaging**  
**Spectrometer Data Catalog System**

**By**  
**ZHANG Genzhong**

**A Dissertation Submitted to**  
**The University of Chinese Academy of Sciences**  
**In partial fulfillment of the requirement**  
**For the degree of**  
**Master of Science**

**Institute of Remote Sensing and Digital Earth**  
**May, 2014**

# 中国科学院遥感与数字地球研究所

## 学位论文原创性声明和使用授权说明

### 原创性声明

本人郑重声明： 所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。论文中凡引用他人已经发表或未发表的成果、数据、观点等，均已明确注明出处。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其它个人或集体已经发表或撰写过的成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 日期： 年 月 日

### 学位论文使用授权说明

本人在导师指导下完成的论文，知识产权归属中国科学院遥感与数字地球研究所。

本人完全了解中国科学院遥感与数字地球研究所关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意研究所保存或向国家有关部门及机构送交论文的印刷版和电子版，允许论文被查阅和借阅；同意授权研究所采用影印、缩印、数字化或其它复制手段 保存和汇编本学位论文。

本人保证毕业后，以本论文数据和资料发表论文(著作)或使用论文工作成果时，第一署名单位为中国科学院遥感与数字地球研究所，并征得导师同意。

保密论文在解密后遵守此规定。

论文作者签名： 导师签名：

日期： 年 月 日



## 摘 要

由于矿产资源勘查工作的不断深入，目前勘查的主要方向已转向深部，勘查工作的难度越来越大，成本也不断变高。目前地质找矿技术显得比较滞后，人们开始探索用于寻找深部矿的新技术和新方法。基于钻探工程并发挥高光谱遥感技术优势，快速进行深部成矿作用信息的识别和反映以及实现对深部地质体结构和物质成分进行精细探测，成为当前矿产勘查遥感技术的研究关键。利用高光谱遥感技术进行岩心高光谱编录和岩心信息提取研究，是当前岩心地学信息提取研究的新方向。岩心成像光谱数据编录系统是岩心高光谱编录系统的最新阶段，它使用岩心成像光谱数据进行编录，可以实现图谱合一，将为深部找矿提供有效的技术支持。

本文以自主研发的岩心组分成像光谱系统（Imaging Spectrometer System for Analyzing Core components）所采集的岩心成像光谱数据作为数据源，最终目标是建立岩心成像光谱数据编录系统，主要开展了以下两个方面的研究工作：一是进行岩心成像光谱数据编录系统的分析与设计。二是进行岩心成像光谱数据编录系统关键技术研究并实现岩心成像光谱数据编录原型系统。论文的主要成果和结论如下：

1. 建立了以 GeoRaster 对象为核心的岩心成像光谱数据存储模型，在该数据存储模型的基础上，对基于存储过程的岩心成像光谱数据编录方法进行了深入研究。研究表明，该存储模型和数据编录方法可以有效实现岩心成像光谱数据的编录。

2. 在 Qt 开发工具和 C++的支持下，研究了岩心成像光谱数据的可视化。研究表明，数据浏览、光谱曲线显示和直方图统计等方法有效实现了岩心成像光谱数据的可视化。

3. 在成功研究编录技术、影像和光谱曲线显示等可视化技术及信息提取技术的基础上，开发实现了岩心成像光谱数据编录原型系统。该系统基本上具备了对岩心成像光谱数据进行预处理、编录、可视化和信息提取的功能。

关键词：成像光谱 岩心编录 数据存储模型 高光谱数据库 可视化

# **The Design and Implementation of Core Imaging Spectrometer Data Catalog System**

ZHANG Genzhong (Cartography and Geographical Information System)

Directed by Prof. TONG Qingxi, Prof. ZHANG Lifu

## **Abstract**

Mineral exploration becomes more difficult with the depth of the exploration while the cost increases drastically. Because geological prospecting techniques seem serious lag, people began to continuously find new technologies and new methods for exploring deep mines. How to give full play to the advantages of hyperspectral remote sensing technology based on drilling engineering to quickly identify deep mineralization information and realize the fine detection of deep geological structure and material composition is the current key study of remote sensing technology for mineral exploration. Using hyperspectral remote sensing technology to conduct drill core catalog and analysis of spectral features is the new research direction of information acquisition and information mining of the core. The core imaging spectrometer data catalog system is the latest stage of hyperspectral core catalog system, which uses core imaging spectrometer data to catalog and can integrate visualization of hyperspectral data's spectral and image, and will provide effective technical support for deep prospecting.

This study aims to establish the core imaging spectrometer data catalog system based on the imaging spectrometer data collected by Spectrometer System for Analyzing Core components. This study includes two parts: 1) to analyze and design of the prototype system of Core imaging spectrometer data catalog system; 2) to conduct Key technology research and implement the prototype system of core imaging spectrometer data catalog system.

Main results and conclusions are summarized as follows:

1. Core data storage model whose key is GeoRaster Object is proposed. Extensive researches were carried out on data imported and exported method based on

procedure. The experimental results indicate that this model work well at the catalog and Visualization of core imaging spectrometer data.

2. Researches about the visualization of the Core imaging spectrometer data and the visualization of spectral curve are based on Qt and C++. The result shows that flawless combination of data obtaining method, image visualization method and spectral visualization method can support the integrated visualization of spectrum and image of hyperspectral data effectively.

3. On the basis of a successful study of logging technology,image and spectrum curve display ,visualization technologies and information extraction technology, Core imaging spectrometer data catalog prototype system was achieved .The system basically provides preprocessing, core imaging spectrometer data catalog, visualization and information extraction functions.

Keywords: imaging spectrometer, core catalog, data storage model, hyperspectral database, visualization

# 目录

<b>第一章 引言 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 研究内容与论文结构.....	3
<b>第二章 岩心成像光谱数据编录系统基础.....</b>	<b>5</b>
2.1 岩心组分成像光谱系统.....	5
2.1.1 岩心组分成像光谱系统简介.....	5
2.1.2 岩心组分成像光谱系统测量规范.....	6
2.1.3 岩心组分成像光谱系统测量数据预处理.....	8
2.2 岩心高光谱编录系统.....	10
2.2.1 岩心高光谱编录系统概述.....	10
2.2.2 国内外研究现状.....	10
2.3 高光谱数据库.....	11
2.3.1 高光谱数据库的概念.....	11
2.3.2 高光谱影像的几种管理方式.....	12
2.4 本章小节.....	13
<b>第三章 岩心成像光谱数据编录系统的分析与设计 .....</b>	<b>15</b>
3.1 功能需求分析.....	15
3.1.1 系统功能需求.....	15
3.1.2 系统业务流程分析.....	16
3.2 总体结构设计.....	17
3.2.1 体系结构设计.....	17
3.2.2 功能模块设计.....	20
3.3 系统开发环境.....	22
3.3.1 数据库管理系统.....	22
3.3.2 OCCI 数据库接口 .....	23
3.3.3 开发语言.....	23
3.3.2 系统界面.....	24
3.3.3 GDAL 栅格数据处理接口 .....	26



3.4 数据存储模型设计.....	26
3.4.1 岩心成像光谱数据特点.....	26
3.4.2 岩心成像光谱数据存储模型.....	27
3.4.3 岩心成像光谱数据入库的格式.....	27
3.5 数据存储结构设计.....	28
3.6 本章小结.....	31
<b>第四章 岩心成像光谱数据编录系统关键技术研究及其实现 .....</b>	<b>33</b>
4.1 岩心成像光谱数据编录技术的研究与实现.....	33
4.1.1 岩心成像光谱数据入库.....	34
4.1.2 岩心成像光谱数据导出.....	37
4.2 岩心成像光谱数据可视化技术的研究与实现.....	38
4.2.1 岩心成像光谱数据浏览研究与实现.....	38
4.2.2 光谱显示方法研究与实现.....	42
4.2.3 直方图显示研究与实现.....	45
4.2.4 二维散点图显示方法研究与实现.....	47
4.3 岩心成像光谱数据信息提取技术的研究及实现.....	51
4.3.1 光谱吸收指数.....	51
4.3.2 光谱角度匹配.....	54
4.3.3 改进的光谱角度匹配.....	57
4.4 岩心成像光谱数据编录系统的实现.....	60
4.5 本章小结.....	64
<b>第五章 结论与展望.....</b>	<b>65</b>
5.1 结论.....	65
5.2 展望.....	65
<b>参考文献 .....</b>	<b>67</b>
<b>致    谢.....</b>	<b>71</b>



## 第一章 引言

### 1.1 研究背景及意义

随着我国经济的不断发展,对地质矿产资源的需求保持日益上涨的趋势,加大对地质矿产资源调查对我国经济快速健康的发展具有重要意义。地质工作承担着为国家提供矿产资源和地质资料的的任务,是经济建设中一项重要的工作。遥感技术可对地面信息进行初步提取,而且不需要事先设置地面调查点,具有宏观、高效、低成本、信息丰富和易于定位等优势,其提取的信息可以为矿产资源调查提供重点调查区域,可以显著降低矿产资源调查成本并提高调查效率。遥感技术正在成为地质矿产资源调查的一个重要技术手段。

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,它的这种独特性能在地表物质的识别、分类和信息提取等方面具有明显的优势<sup>[1]</sup>。高光谱遥感能够探测多光谱遥感中不能被探测的物质,并具有高光谱分辨率、高空间分辨率和多平台观察(航天、航空和地面)等技术优势,是目前对地观测遥感前沿技术之一。自 AVIRIS(Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer)为代表的航空成像光谱仪获取数据后,高光谱遥感在地质方面的应用一直受到重视<sup>[2]</sup>。一些典型航空成像光谱仪,如美国的 AIS(Airborne Imaging Spectrometer)、HYDICE(Hyperspectral Digital Imagery Collection Experiment)、SEBASS(Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System)和 AVIRIS,加拿大的 FLI(Forward-Looking Interferometer)、CASI(Compact Airborne Spectrographic Imager)和 SFSI(SWIR(Short Wave Infrared) Full Spectrum Imager),澳大利亚的 HyMap(Hyperspectral Mapper)和我国的 MAIS(Modular Airborne Imaging Spectrometer)、OMISI(Operational Modular Imaging Spectrometer)等,以及星载高光谱成像仪,如美国的 EO-1 Hyperspectral Imager(Hyperion),欧空局的 CHIRS(Compact High Resolution Imaging Spectrometer)。在地面成像光谱仪方面,国外很多公司和研究机构专门从事这种设备的研制,如芬兰的 Spectral Imaging Ltd.公司,美国的 Reasonon 和 Surface Opticks Corporation 公司。我国自主研发的基于制冷面阵 CCD 地面成像光谱辐射测量系统 FISS(Field Imaging

Spectrometer, FISS) 是国内第一台地面成像光谱仪。这些成像光谱仪都针对地质应用获取了大量影像数据。由于成像光谱仪具有较高的光谱分辨率, 可对光谱进行特征分析, 并可对地物参数进行定量反演<sup>[3]</sup>。利用地物特征光谱发展了高光谱岩矿识别和填图等技术, 使得成像光谱技术在岩矿识别方面得到了广泛的应用<sup>[4]</sup>。人们利用这些高光谱图像取得了很多成果, 比如岩矿识别及矿物填图<sup>[5-8]</sup>、蚀变和矿化信息提取<sup>[9-11]</sup>等。

钻探探测技术的成本非常高, 是地质勘查最重要的技术手段之一<sup>[13]</sup>。岩心是利用钻探探测技术获取的, 成本较高, 对岩心数据分析和再利用是当前岩心再利用的一个重要方面。我国每年有上百万米的钻探任务, 钻探出了大量岩心, 这些岩心在编录后有一些被建库保存起来, 大量的岩心被抛弃, 造成大量资金和资源浪费, 对今后的研究也非常不方便。为使得钻探所获的岩心数据方便后续的使用与分析, 钻探岩心的蚀变光谱研究是其中至关重要的一个方面。高光谱遥感的发展为岩心数据分析和再利用提供了新的平台和技术方法<sup>[14]</sup>。

由于矿产勘查工作的不断深入, 目前勘查的主要方向已转向深部, 勘查工作的难度越来越大, 成本也越来越高<sup>[12]</sup>。目前地质找矿技术显得比较滞后, 人们开始探索用于寻找深部矿的新技术和新方法。基于钻探工程并发挥高光谱遥感技术优势, 快速进行深部成矿作用信息的识别和反映以及实现对深部地质体结构和物质成分进行精细识别探测, 成为当前地质矿产资源勘查遥感技术的研究热点。利用高光谱遥感技术进行岩心高光谱编录及信息提取研究, 是当前岩心地学信息研究的新方向。利用地面成像光谱仪获取地表岩石矿物和地下岩石矿物的高光谱数据, 并利用获取的高光谱数据进行全面立体的矿物填图, 成为了世界各国研究的热点。美国、澳大利亚等发达国家已大量使用高光谱遥感技术和岩心高光谱编录技术进行精细化的选矿、采矿等工作, 取得了较好的效果。

地质钻孔信息编录是找矿地质勘探工作中的一项经常性的和重要的基础工作。地质钻孔信息编录是正确并系统地将直接观察到的岩心的情况和经综合研究的结果用文字、图片和图表加以说明与表达, 以反映和解决在地质找矿勘探工作中的问题。传统的岩心编录都是工作人员手动进行编录的, 还需要进行费用较高的岩矿分析, 岩心编录后也时常丢失, 耗费了大量的资源而并不能很好地保存和

使用岩心资料。为了较好地对岩心资料进行编录保存,各国研究人员开始利用高光谱遥感技术对岩心进行高光谱测量,并利用获取的岩心高光谱数据进行岩心矿物分析与提取。这种记录方式不受钻探工程师或地质工程师的编录水平的影响,记录的数据较容易为人理解,而且便于保存、查询和更新。与传统编录方法相比,岩心高光谱编录技术可以为用户提供客观的和全数字化的地学和光谱学信息,大大提高了岩心信息的存储、传输、处理、分析及共享能力。美国科罗拉多大学的 Kruse 教授在岩心编录工作中使用了 PIMA (Portable Infrared Mineral Analyzer) 高光谱矿物填图技术<sup>[15]</sup>,指出该技术进行岩心编录的特点是:低成本、高效、数字图像化存储,能够识别出岩心矿物的类别,可以对矿物含量进行定量、半定量的反演甚至可以代替高费用的岩矿分析,并可识别常规方法难以识别的岩心矿物。

我国是一个矿业大国,岩心量巨大并拥有存储量丰富的岩心库。面对大量的岩心数据,我们亟待构建一个岩心成像光谱数据编录系统。此系统将实现对岩心成像光谱数据的编录与存储,同时支持岩心数据的可视化分析和信息提取。国内目前还没有完整的岩心成像光谱数据编录系统,建立具有自主知识产权的岩心成像光谱编录系统对我国矿产勘查具有重要的意义。

## 1.2 研究内容与论文结构

本研究的最终目标是建立岩心成像光谱数据编录系统,围绕着这个目标,分两个阶段开展研究:第一个阶段研究岩心成像光谱数据编录系统的体系结构及存储结构,第二个阶段构建具有预处理、编录、可视化和信息提取功能的岩心成像光谱数据编录系统。在本文中,主要进行了以下两个方面的工作:一是进行岩心成像光谱数据编录系统的设计。在本阶段的研究中,继承前人的岩心高光谱编录系统和高光谱数据库的研究成果基础上,对岩心成像光谱数据编录系统进行分析与设计。二是在第一阶段工作的基础上研究岩心成像光谱数据编录系统的关键技术,研究并实现了岩心成像光谱数据的编录、浏览及光谱曲线的显示和信息提取等功能,最后开发实现了岩心成像光谱数据编录原型系统。

论文首先在引言中介绍了研究背景和意义,其次从岩心组分成像光谱系统、岩心高光谱编录系统和高光谱数据库等三个方面介绍了本文的基础知识,

然后进行了岩心成像光谱数据编录原型系统的设计与开发。论文的整体结构如下图所示：

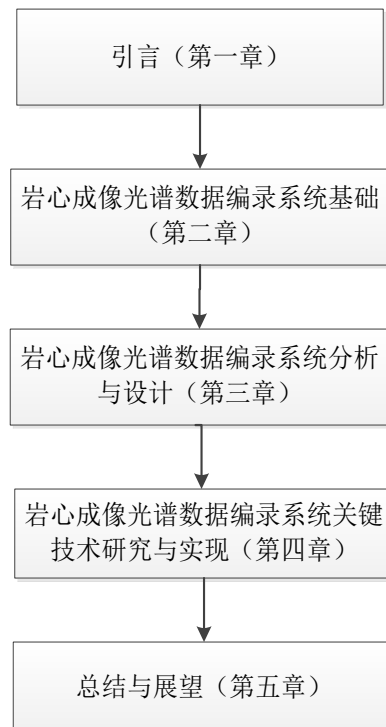


图 1-1 论文整体结构图

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，介绍岩心成像光谱数据编录系统的基础包括：岩心组分成像光谱系统的系统技术指标、测量规范及注意事项以及数据预处理方法；岩心高光谱编录系统概述和研究现状；高光谱数据库的概念和高光谱数据的几种管理方式。

第三章，分析岩心成像光谱数据编录系统的功能需求以及业务流程，设计其体系结构与功能模块，确定其开发环境，设计岩心成像光谱数据存储模型，建立系统需要的数据表。

第四章，研究岩心成像光谱数据的编录技术、影像和光谱显示等可视化技术及信息提取技术，基于以上关键技术开发实现了岩心成像光谱数据编录原型系统。

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 岩心成像光谱数据编录系统基础

利用高光谱遥感技术进行岩心高光谱编录及信息提取研究，是当前岩心地学信息研究的新方向。为迎接这一挑战，岩心高光谱编录系统应运而生并取得了一定的研究成果。岩心成像光谱数据编录系统是岩心高光谱编录系统的最新阶段，它使用岩心成像光谱数据进行编录，可以实现图谱合一。我国第一套岩心组分成像光谱系统所获取的岩心成像光谱数据，是本文的数据源。而本文研究的岩心成像光谱数据编录系统也是专门编录和分析岩心组分成像光谱系统数据的软件系统。本章主要介绍三个方面的内容：一、岩心组分成像光谱系统的组成、技术指标、测量流程以及数据预处理方法；二、岩心高光谱编录系统的简介及国内外研究现状；三、高光谱数据库的概念以及遥感影像数据的几种管理方式。

### 2.1 岩心组分成像光谱系统

#### 2.1.1 岩心组分成像光谱系统简介

岩心组分成像光谱系统（Imaging Spectrometer System for Analyzing Core components）是我国第一套岩心组分成像光谱系统，由中国科学院遥感与数字地球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遥感与数字地球研究所研制的地面成像光谱辐射计（FISS）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 2-1 所示。

表2-1 可见近红外主要技术参数指标和性能

波段数/个	344
光谱范围/nm	400-1000
光谱分辨率/nm	优于 5nm
地面分辨率/mm	最高可优于 3
实验室辐射定标精度/%	优于 5
成像速率/（帧/s）	20
扫描视场/度	-10--10
量化位数/位	12
信噪比	60%波段>500

表 2-2 短波红外主要技术参数指标和性能

波段数/个	256
光谱范围/nm	1000-2500
光谱分辨率/nm	8-12nm
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	-10--10
量化位数/位	14

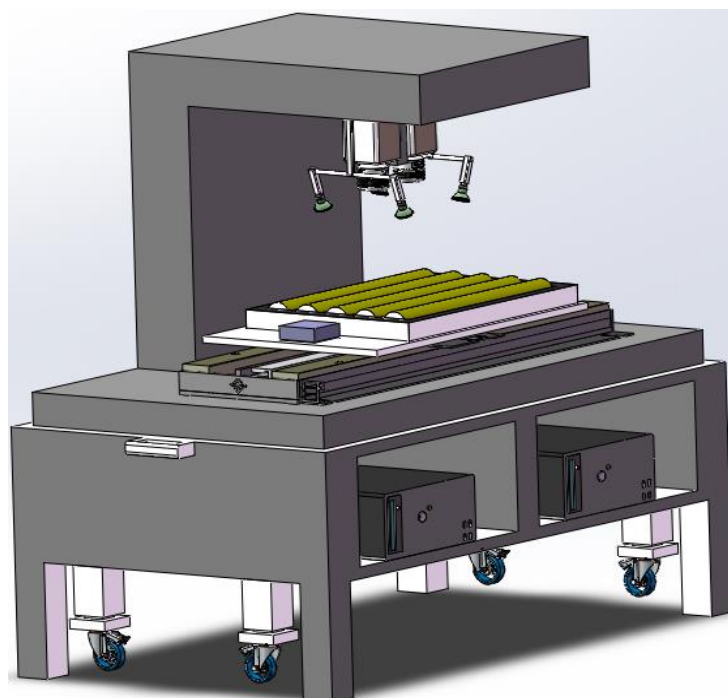


图2-1 岩心组分成像光谱系统三维机械图

### 2.1.2 岩心组分成像光谱系统测量规范

#### 1. 测量流程

1) 根据被测物体和实验目的, 确定观测高度和视场范围, 然后再确定地面覆盖范围和空间分辨率。

2) 根据观测条件, 先进行图像预扫描, 并观测实时光谱曲线来调整积分时间与光圈设置来确定合适的曝光量。由于成像光谱能量细分使得信噪比受限, 总的原则是应该让数据 DN 值处于 CCD 探元响应较好的线性响应范围内防止数据饱和或者曝光不足。



3) 布置好参考板，并且最好使用与被测地物反射率相近的参考板，尽可能保证参考板与被测地物测量条件一致。

4) 盖上镜头盖，测量暗电流图像；之后打开镜头盖，获取地物与参考板数据；测量时应尽量保证被测物体置于视场中心。如需要也可以对太阳直射光进行遮挡获取漫射光下的数据。

5) 实时观察图像和光谱曲线，查看其清晰度、曲线形状等，确保数据没有异常。

2. 推荐参数设置测量时需要设置的参数为积分时间、光圈等级、制冷温度、DN 动态范围、扫描帧速率、视场角等。

光圈等级：F 值可以设置的范围为 2.8-22 之间。配合积分时间确定合适的曝光量。

视场角：视场角可以在正负 20° 之间变化，常规上设置在正负 15° 之内。

积分时间：积分时间可以设置的范围为 1-100ms，为了保证图像尽可能小的失真变形，需要确定一个合适的积分时间。

帧速率：地面成像光谱仪的帧速率通常取决于 CCD 相机的数据传输速率和数据采集模式。本系统中 CCD 相机采用 USB 接口进行数据传输，12 位数据采样，采用了拍照模式（照相机模式）进行数据采集，帧速率最大为 20 帧，一般推荐设置 10 帧。

制冷温度：岩心组分成像光谱系统可以实现比环境温度低约 20-25℃ 的制冷能力，因此设置的制冷温度比当前环境温度低 20-25℃ 均可。

DN 动态范围：可以设置为 0-4095，根据所测地物类型而设置，通常设置为最大值 4095，若测量水体，则应适当降低 DN 量程。

### 3. 注意事项

#### 1) 系统检验与标定

(1) 要每隔一段时间对岩心组分成像光谱系统的进行一次光谱定标、辐射定标、几何定标等。

(2) 应该每半年对参考板进行一次重新标定，同时要配备多反射率等级的参考板。

## 2) 测量条件与环境

(1) 野外测量时，若无特殊需要，应选择地方时9:30-15:30之间、地面能见度不低于10公里、尽可能无云、无风的条件下测量。

(2) 室内测量时，要保证被测物体光照均匀一致，应使用卤素灯等光谱范围宽广的稳定光源，视样品需要可采用冷光源。

(3) 观测几何的要求：如果是为了配合或者模拟航天航空平台的观测，则要注意岩心组分成像光谱系统观测几何条件与航空航天平台观测几何条件的一致性。

(4) 存放环境：要在干燥的环境中存放，湿度不大于60%，温度保持在0-40℃之间。

## 3) 人员与记录

(1) 人员着装：为减少测量人员反射光对测量物体的影响，实验人员应穿着深色衣服。

(2) 人员位置：实验过程中，实验人员应该位于被测物体，避免在目标区走动。

(3) 参数记录：记录岩心组分成像光谱系统使用中的各种参数设置。

(4) 场景记录：对观测目标以及观测环境应该拍摄照片以记录真实情况。

4) 存储空间：由于岩心组分成像光谱系统成像光谱图像数据量较大，每次应保证计算机有足够的存储空间。

### 2.1.3 岩心组分成像光谱系统测量数据预处理

在对岩心组分成像光谱系统进行光谱定标、辐射定标之后，主要进行的预处理工作就是噪声去除和反射率的转换和裁剪。针对岩心组分成像光谱系统测量数据的噪声去除，有如下的几种推荐方法<sup>[16]</sup>：

1. 三维均值滤波处理，计算公式为：

$$Sn_{i,j,k} = \sum_{m,n,q} a_{m,n,q} \times S_{m,n,q} \quad (2-1)$$

其中m, n, q分别代表行列及波段序号。

2. 三维中值滤波，中心像元值取其立方体窗口中数字中值。

3. 先进行PCA（或者MNF）变换，然后利用前面信息量大的几个成分进

行反变换。

4. 先进行PCA（或者MNF）变换，然后对变换后的各个主成分进行滤波，最后再进行反变换，如下图 2-2 所示。

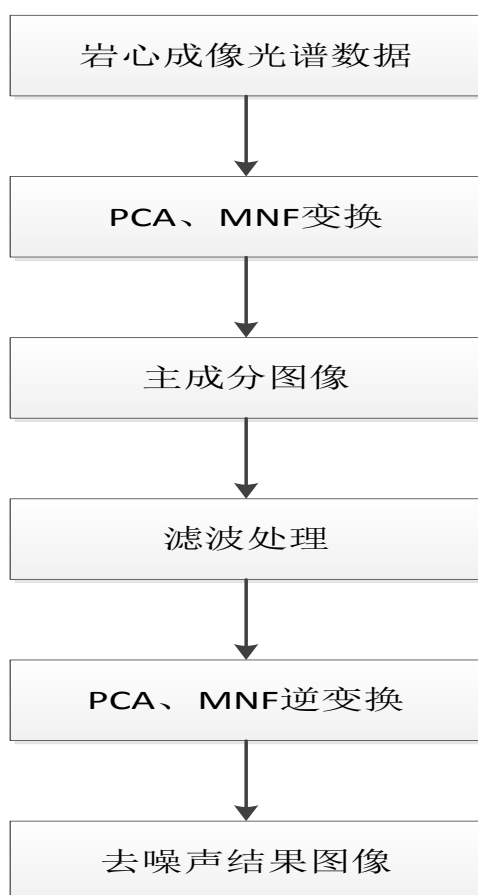


图2-2 岩心成像光谱数据噪声处理流程

岩心成像光谱数据的反射率转换可以采用如下两种方法：

第一种方法类似于传统非成像光谱辐射计的反射率转换方法，利用如下公式：

$$R_{\lambda} = \frac{DN_{\lambda} - D}{W_{\lambda} - D} \times P_{\lambda} \quad (2-2)$$

其中  $R_{\lambda}$  为被测目标反射率， $DN_{\lambda}$  为被测目标 DN 值， $D$  为暗电流， $W_{\lambda}$  为参考板 DN 值， $P_{\lambda}$  为参考板反射率。当岩心组分成像光谱系统参数设置合理的情况下，

暗电流的 DN 值不超过 10，相对于被测目标 DN 值十分微小，可以忽略不计，此时上式可以进一步简化为：

$$R_{\lambda} = \frac{DN_{\lambda}}{W_{\lambda}} \times P_{\lambda} \quad (2-3)$$

此种方法要通过控制曝光将被测物体的 DN 值尽量落于 CCD 响应较好的量化范围内，并且使用的参考板反射率与被测物体接近。

第二种方法类似于经验线性法，该方法假定图像 DN 值与地物反射率 R 之间为线性关系：

$$DN_{\lambda} = a \times R_{\lambda} + b \quad (2-4)$$

通过获取已知光谱反射率的物体（通常情况下为参考板）的 DN 值，通过最小二乘法求解系数 a 和 b，进而可以求取反射率。可见，要采用这种方法最起码需要两种不同反射率的已知物体。

岩心组分成像光谱系统在测量的时候可以方便地获取同等观测条件下的一个或数个参考板数据，用于反射率转换。由此可见，上述两种反射率转换方法对于岩心组分成像光谱系统都是简单易行的。

岩心组分成像光谱系统测量数据的裁剪主要利用预处理的裁剪程序将转换好的反射率数据裁剪成宽度相等的岩心成像光谱反射率数据。

## 2.2 岩心高光谱编录系统

### 2.2.1 岩心高光谱编录系统概述

当前，国际上遥感技术先进的国家，如澳大利亚、英国、德国、芬兰等相继建立了符合各自需求的钻孔岩心高光谱编录系统，并已应用于包括铀矿、铜矿、金矿等多种矿产资源勘查中。我国在该领域的研究刚刚起步，初步构建了一些岩心高光谱编录系统并成功应用于矿产资源调查，需要在岩心高光谱编录系统建设和实际运行使用上进一步加大投入。目前对于岩心高光谱编录系统还没有一个明确的概念。黄艳菊等<sup>[17]</sup>认为岩心高光谱编录系统至少应解决三个问题：（1）岩心高光谱数据的存储与管理（2）地质特征信息的提取及信息提取效率（3）地物光谱特征信息的分析与提取。

### 2.2.2 国内外研究现状

国外的岩心高光谱编录系统得到了较好的发展并向产业化方向发展。美国科罗拉多大学的 Kruse 教授 (1996) 成功将 PIMA (Portable Infrared Mineral Analyzer) 高光谱矿物填图技术用于岩心编录<sup>[15]</sup>。澳大利亚科工组织 (CSIRO) 成功研制了 HyLogging 高光谱岩心编录系统, 并向产业化方向发展<sup>[18,19]</sup>; 英国的 Spectra-Map 高光谱岩心编录系统和加拿大的 SisuRock 高光谱岩心编录系统正在运行中<sup>[20,21]</sup>; 德国也有运行中的 Multi-Sensor Core Logger (GEOTEK) 高光谱岩心编录系统<sup>[22]</sup>。国际大陆科学钻探计划 (ICDP) 支持小组与德国 SmartCube 公司合作开发出了目前在科学钻探项目中属于最先进的 DIS (Drilling Information System) 钻井信息系统。

我国在该领域的研究刚刚起步, 初步构建了一些岩心高光谱编录系统并成功应用于一些矿产资源的调查中。胥燕辉等对岩心光谱进行了编录, 绘制了地质光谱柱状图, 并利用光谱反射值成功定量估算了铁的品位, 为国内学者进行岩心编录技术研究起到了一定的示范作用<sup>[23,24]</sup>。但由于该编录使用文本存储相应的钻孔数据, 并没有构建一个编录系统。针对这一问题, 黄艳菊等提出了岩心高光谱编录的数据存储模型, 并开发了钻探岩心高光谱数据管理与分析系统<sup>[17]</sup>。该系统可以查看和存储岩心数据, 并能够对岩心矿物进行光谱特征分析, 为岩心矿物的识别提取奠定了基础。张杰林等针对铀矿勘查钻孔岩心高光谱数据构建了钻孔岩心高光谱编录技术系统, 并成功应用于江西桃山花岗岩型铀矿地质勘查和相山铀矿田深部成矿环境研究<sup>[25]</sup>, 相关技术方法成功申报了软件知识版权。核工业北京地质研究院新近引进了可见光—短波红外波段的岩心高光谱编录系统, 实现了钻孔岩心的成像光谱测量, 利用成像光谱技术同时获得岩心高分辨率光谱信息和图像信息, 实现了图谱合一的测量, 使先进的航天航空地面的成像光谱探测技术延伸至深部地质勘查。

## 2.3 高光谱数据库

### 2.3.1 高光谱数据库的概念

高光谱遥感技术及应用的不不断发展使得高光谱数据的管理成为一个新的技术难点。数据库技术的进步为高光谱遥感领域面临的这一问题提供了新的解决方案。针对这一问题, 张雄飞对高光谱数据库进行了研究并提出了高光谱数据库的概念, 高光谱数据库系统是一个能体现高光谱数据的图谱合一特

点数据库系统，该系统综合了影像数据库、光谱数据库和光谱信息分析提取及数据挖掘等功能<sup>[26]</sup>。李兴进一步发展了高光谱数据库的概念，提出高光谱数据库不仅存储光谱仪测量的光谱数据还存储高光谱图像光谱数据，并能够将高光谱影像数据和光谱数据有机的融合起来，能对高光谱影像进行综合分析与应用<sup>[27]</sup>。覃环虎等基于 GeoRaster 模型研究了高光谱影像库的数据存取技术<sup>[28]</sup>，并在数据库层面上实现高光谱数据的图谱合一，取得了较好的效果。

### 2.3.2 高光谱影像的几种管理方式

目前管理遥感影像数据主要有文件模式、文件与关系数据库混合模式、纯关系数据库模式、对象关系数据库模式和面向对象数据库模式等几种方式<sup>[29]</sup>。高光谱影像数据管理方式也基本为上述方式。下面介绍各个管理模式相应的优缺点。

#### 1. 纯文件管理模式

这种管理方式将遥感影像数据和相应属性数据以文件的形式存放在文件目录下。该方式根据用户管理需要设计具体的文件存储结构来进行数据的存储。若文件存储结构设计合理，该方式避免了文件在数据库中的导入导出，可以实现最高的管理效率。但是，这种方式也存在很多缺点，如数据安全性难以保证，较难实现多用户之间的数据共享和并发控制，而且当数据文件量多时会引起管理上的混乱，同时备份也比较烦琐。

#### 2. 文件与关系数据库混合管理模式

混合管理模式是指遥感影像数据以文件的形式管理，而用关系数据库来管理与之相关联的属性数据（元数据），影像数据和影像数据的属性数据通过它们之间的关键字进行关联，具有较高的管理效率。在该数据管理模式下，影像数据与属性数据只是用关键字进行关联，在组织、管理以及检索查询上几乎是独立的。但是，因为文件系统缺少数据安全性、数据一致性、数据完整性、并发控制以及数据恢复等基本功能<sup>[30]</sup>，利用文件与关系数据库进行遥感数据管理，还不能说建立了严格意义上的遥感影像数据库管理系统。

#### 3. 纯关系数据库管理模式

纯关系型空间数据库管理系统是指只利用成熟的关系数据库对遥感影像数据和属性数据进行管理。纯关系型数据库管理模式是管理遥感影像数据经常使用的方式之一。纯关系数据库管理模式进行遥感数据数据管理较为方便，它以大二

进制对象（BLOB）的方式将遥感影像数据存储在数据库中，有时会将大的影像数据分解成较小的影像数据块，将分解后的影像数据块再以多个记录的形式存储在数据库中。目前，Oracle、SQL SERVER、MySql 等数据库均提供了 BLOB 类型，BLOB 类型最大值为 4G。这种数据管理方式使得属性数据与遥感影像数据可以实现较好的无缝集成管理，减少了数据的冗余度，具有数据安全性和完整性好，数据独立性强，易于实现并发控制，数据库备份和恢复简便等优点。

#### 4. 对象关系数据库管理模式

对象关系数据库管理模式将遥感影像数据作为对象来进行管理，并通过提供的方法访问遥感影像数据及其属性数据。对象关系数据库管理模式在关系数据库基础上，通过引入对象模型，从而可以管理遥感影像等复杂数据。对象关系数据库管理模式进行遥感影像数据管理目前的应用较少，主要有用户自定义的对象和数据库提供对象两种方式对遥感影像进行管理。如 Oracle 数据库的 GeoRaster 模块就是在 oracle 数据库基础上引入了对象模型实现的数据库模块，该模块以对象的形式可以管理遥感影像。为了存储遥感影像数据和结合关系数据库数据存储数据的优势，一些数据库厂商在关系数据库的基础上开发了用于存储遥感影像的专业程序比如 ArcSDE 和 SuperMapSDX+空间数据库引擎，该类专业程序通过一定的对象模型将遥感影像数据映射到关系数据库的一个或多个数据表中，从而能以对象的方式实现遥感影像数据的存储管理。

#### 5. 面向对象数据库的管理模式

该管理模式通过使用面向对象的数据库来管理遥感影像数据，从而可以非常自然的支持对象语义上的操作。面向对象数据库的管理模式是高光谱数据库的发展方向，但是目前面向对象数据库还处于研究阶段，还没有出现比较成熟的面向对象数据库管理系统。而且由于遥感影像数据本身的复杂性，使得从底层开发面向对象遥感影像数据库管理系统也十分的困难。

### 2.4 本章小节

本章主要从岩心组分成像光谱系统、岩心高光谱编录系统以及高光谱数据库三个方面介绍了本文开展研究的相关理论基础。首先简单介绍了岩心组分成像光谱系统的主要参数、测量流程、参数设置、注意事项以及数据预处理的内容以及方法。其次介绍了岩心高光谱编录系统及其国内外研究现状。最后阐述了高光谱

数据库概念的提出及其发展过程，总结了遥感影像数据的几种管理方式。这些基本理论知识为本文的后续研究奠定了基础。



## 第三章 岩心成像光谱数据编录系统的分析与设计

目前岩心高光谱编录系统基本都是针对点光谱进行编录存储和分析的,如何结合岩心成像光谱数据特有的特点,设计面向岩心成像光谱数据编录和初步分析的编录系统,是亟待解决的一个重要问题。本章将针对岩心成像光谱数据功能需求,分析系统的业务流程,设计系统的体系结构和功能模块,简单介绍系统的开发环境,提出数据存储模型,并在 Oracle 数据库里设计各个数据表。

### 3.1 功能需求分析

#### 3.1.1 系统功能需求

建立岩心成像光谱数据编录系统,把测量到的岩心成像光谱数据进行有效编录和长期的安全存放,实现可视化和信息提取,对于岩心数据再利用和促进科学研究来说,具有非常重要的意义。考虑到岩心成像光谱数据特有的特点并结合其它高光谱遥感应用的特点,岩心成像光谱数据编录系统要满足以下的功能需求。

##### 1. 数据存储

岩心成像光谱数据最大的特点就是数据量大和波段数量多,每景数据根据数值类型的不同,一般都在 300M 以上,如果一个钻孔有一千景数据,其数据量很容易就达到 TB 级。随着岩心组分成像光谱系统应用的不断推广,其获取的数据将会越来越多,极有可能达到 PB 级,这就需要有一个海量的存储系统,还需要考虑一个高效的存储结构,以提高检索和读取效率。所以,在设计岩心成像光谱数据存储时,既要考虑大容量数据存储的高效性,也要考虑到操作的灵活性。

##### 2. 数据的完整性

从广义的角度来理解,岩心成像光谱数据编录系统不应只包括成像光谱数据,同时还应包括岩心的一些属性数据如经纬度信息等。如何将这些信息整合到一起,保证数据的完整性,需要对数据存储模型以及数据存储结构进行深入的研究。

##### 3. 数据的快速检索

岩心成像光谱数据与其它的高光谱数据略有不同,其辅助数据和属性较为简单,因此其查询检索也显得相对简单,但是,随着数据记录的增加,也要考虑一个合适的索引结构,来提高查询效率。

#### 4. 图谱合一的存储与显示

岩心成像光谱数据具有图谱合一的特点，从图像的某个像元中能提取出地物的光谱曲线。岩心成像光谱数据图谱合一的存储有利于岩心成像光谱数据的管理与分析。在数据库存储时，应将图像光谱维数据与图像维空间维数据有机的结合起来，从而实现岩心成像光谱数据图谱合一的存储。同时，在显示的时候，也要不仅能够显示成像光谱数据的，而且能提取出地物的光谱曲线，实现岩心成像光谱数据图谱合一显示。为了实现图谱合一的存储于是想，需要我们研究并选择一个合适的的数据模型和存储方式。

#### 5. 可视化分析功能

岩心成像光谱数据编录系统不应仅仅是能编录、查询和显示岩心成像光谱数据，为了发挥成像数据高空间高光谱分辨率的优势，在光谱曲线显示之后，还应当具有一些可视化分析功能。比如，直方图、二维散点图等，以便帮助用户更好的对岩心成像光谱数据进行分析。

#### 6. 信息提取功能

岩心成像光谱数据编录系统还应提供一些矿物信息提取功能。岩心矿物信息的提取能够发挥高光谱遥感技术优势，快速识别反映深部成矿作用的示矿信息，实现深部地质体结构和物质成分的识别探测，从而对深部找矿提供技术支持。

#### 7. 系统的扩展性

系统目前主要编录的是岩心成像光谱数据，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，如增加更多的可视化分析功能和信息提取功能或者对数据模型的一些扩展如增加一些属性字段等；一个是横向上的扩展，即增加对其它类型成像光谱数据的编录。在系统设计时，要考虑到系统的扩展性并设计好相应的接口。

### 3.1.2 系统业务流程分析

岩心成像光谱编录系统的业务流程一定程度上决定了岩心成像光谱数据编录系统的系统结构和功能模块的划分。传统的岩心高光谱编录的业务流程主要是基于点光谱的，其核心在于光谱曲线存储和发布，重点在于点光谱，而不

是成像光谱。在分析岩心成像光谱数据编录的功能需求后，将岩心成像光谱数据编录系统的重点向成像光谱转移，使该系统既有数据编录功能也具有一些成像光谱数据的处理功能。为此，设计了如图 3-1 所示的岩心成像光谱数据编录系统业务流程图。

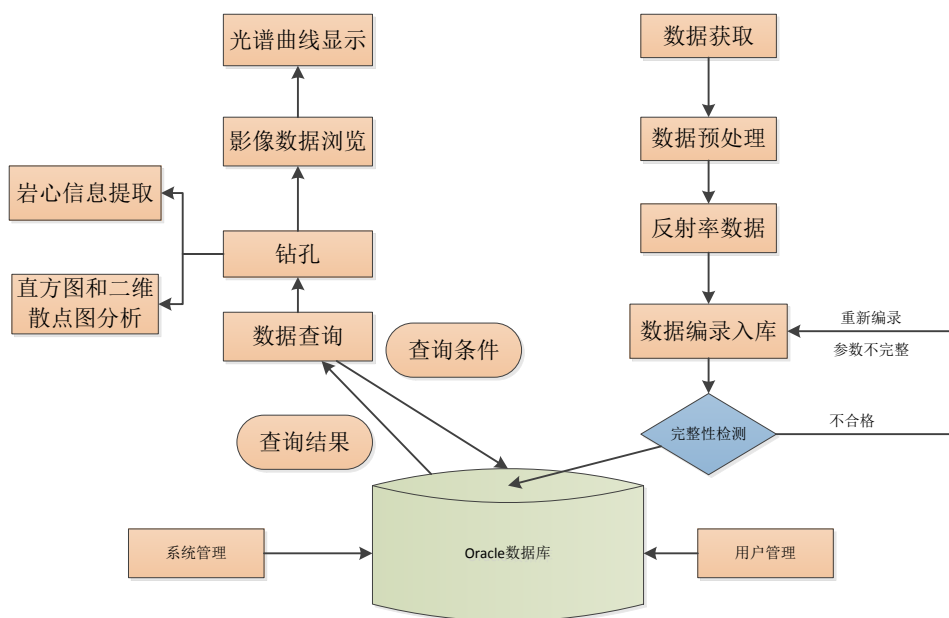


图 3-1 岩心成像光谱数据编录系统业务流程图

## 3.2 总体结构设计

### 3.2.1 体系结构设计

#### 1. 系统结构设计的原则

本系统采用面向对象方法进行设计。系统结构设计应该遵循面向对象软件体系架构设计的一般性原则，主要有开闭原则、接口隔离原则、依赖倒转原则里氏倒转原则、合成聚合复用原则、迪米特原则和单一原则，每个原则的具体内涵如下：

##### (1) 开闭原则（Open-Close Principle）

开闭原则要求设计要“对扩展开放”即对扩展要有有较好的支持，而“对更改封闭”即对修改要进行严格限制。满足开闭原则的模块或组件需达到以下两个条件：一是，针对新的用户需求，模块的功能可以被扩展；二是模块的源代码是不能被修改。开放封闭原则是面向对象设计几个原则中最重要和最为抽象的原则，是面向对象设计的核心原则，其他一些原则是它附属的原则，主要对它进行补充和完善。

## (2) 接口隔离原则(Interface Segregation Principle)

接口隔离原则可以有效支持面向对象的抽象化。这个原则增加了类的复用率和灵活性。根据接口隔离原则 (Interface Segregation Principle) 为每个类型的客户端提供特殊的接口, 当某类型客户端接口需要修改时, 就不会影响其他类型的客户端接口。从另一方面来说, 如果一个接口提供了对所有类型客户端的支持, 则针对某个类型客户端需求而改变该类型的某个接口方法可能会对其他类型客户端造成影响, 容易造成系统的不稳定, 也降低了系统的灵活性。在实际应用中, 对系统进行设计时, 把客户端划分多个类别, 针对每个类别创建自己的特殊接口, 可以增加类的复用率和灵活性, 也有利于系统的扩展。

## (3) 依赖倒转原则 (Dependence Inversion Principle)

依赖倒转原则的含义是进行系统设计时要依赖于抽象而不是具体化, 抽象不应依赖于具体细节, 具体细节应依赖于抽象。另一种对该原则的描述是: 针对抽象接口编程, 不针对具体的实现编程<sup>[32]</sup>。依赖倒置原则要求设计要依赖抽象接口、抽象函数和抽象类而不是具体的函数和类。进行系统设计时, 我们要用抽象思维来思考系统和模块, 对系统和模块进行抽象, 而不是一开始就思考系统和模块需要具体的类。人分析问题是整个问题进行抽象构思, 而不是先考虑细节, 所以面向抽象设计基本与人的思维相符。面向抽象的设计使得依赖接口而不是依赖于实现, 可以方便功能的扩展, 这个原则可以很好的支持开闭原因。

## (4) 里氏倒转原则 (Liskov Substitution Principle)

里氏代换原则含义是子类必须能够替换基类, 若该子类不能够替换基类, 则不应当将该类设计为子类。使用指向基类的指针或者引用, 并不需要知道该指针或引用指向的具体派生类<sup>[31]</sup>。用户可以将子类对象当着基类对象使用, 但是用户不能将基类当着子类使用。里氏倒转原则可以很好的支持继承复用, 该原则使得不需要修改基类模块就可对基类模块的功能进行扩展, 与开放封闭原则关系紧密。

## (5) 复合/聚合复用原则(Composition/Aggregation Reuse Principle)

设计人员应首先考虑使用类的复合及聚合, 而不是使用类的继承。这个就是所谓的“Favor Composition over Inheritance”。在实践中, 类复合及聚合往往会比继承具有更好的效果, 应优先考虑。

### （6）迪米特原则

迪米特法则也称作最少知识原则，该原则由于首次运用在 Demeter 系统中并取得了较好的效果，所以定义该法则为迪米特法则。它的内涵是“一个对象对另外一个对象应尽可能少作了解”，是一个关于如何松耦合（Loosely-Coupled）的法则。迪米特原则可以有效减少类和组件的耦合，从而增加类和组件的复用。

### （7）单一原则

发现职责并把这些职责分离。

## 2. 岩心成像光谱数据编录系统体系结构设计

岩心成像光谱数据编录系统设计的关键一步是进行体系结构设计。需要设计一个合理的岩心成像光谱数据编录系统结构，从而体现编录系统的扩展性能、跨平台性能和网络性能。目前比较流行的系统体系结构是三层的浏览器/服务器（Browse/Server）结构。客户机/服务器（Client/Server）结构，虽然在某些方面有所不足，但是在系统结构设计、开发等方面的难度和复杂性较低，也在被广泛的使用。岩心成像光谱数据编录系统主要编录、管理及分析岩心成像光谱数据，其长远的发展规划是用 B/S 结构和 C/S 结构相结合的模式，即网络版和桌面版。本文只讨论桌面版的体系结构、详细设计和及其实现。桌面版岩心成像光谱数据编录系统体系结构由三层组成，包括用户表现层、应用接口层和数据服务层。

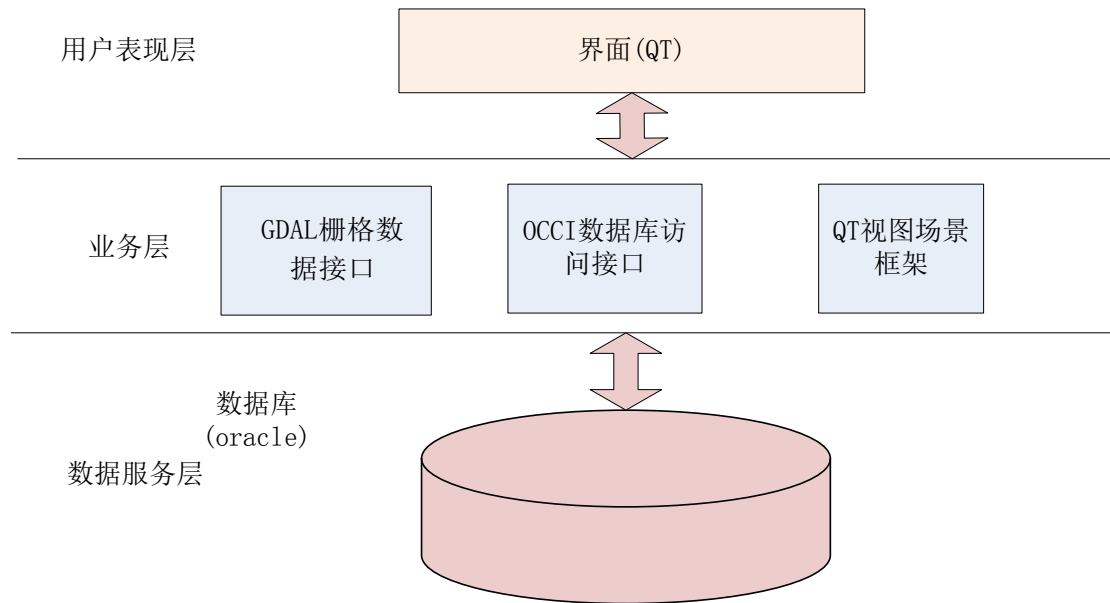


图 3-2 岩心成像光谱数据编录系统体系结构图

**用户表现层：**用户表现层是连接用户和应用业务层的纽带，它把用户的请求转化为相应的业务逻辑，提交给业务接口层，并处理业务层的返回结果。本研究用户表现层主要是岩心成像光谱数据编录系统的界面，实现用户应用需求的输入以及处理结果的展示，包括预处理、编录、可视化和信息提取等功能。

**应用接口层：**主要是实现和 Oracle 数据库进行通信的 OCI 数据库接口，以及用来支持栅格影像显示的 Qt 中的 Graphics View 框架，以及用于栅格数据读取和处理的 GDAL 接口。这些接口在整个系统的开发中发挥非常重要的作用。

**数据服务层：**主要包括岩心成像光谱数据及其属性参数。岩心成像光谱数据的特点决定了其数据存取方式需要认真研究，不仅要考虑海量的岩心成像光谱数据在数据库中的存储，还要考虑对岩心成像光谱数据编录和可视化，更要考虑存储空间的扩展。为了降低应用层与数据服务层的耦合，方便数据的移植，需要认真进行数据存储结构设计，以便改善性能，降低系统开销，提高处理效率，方便系统维护和功能扩展。

### 3.2.2 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，将岩心成像光谱数据编录系统划分为如图 3-3 所示的几大功能模块。

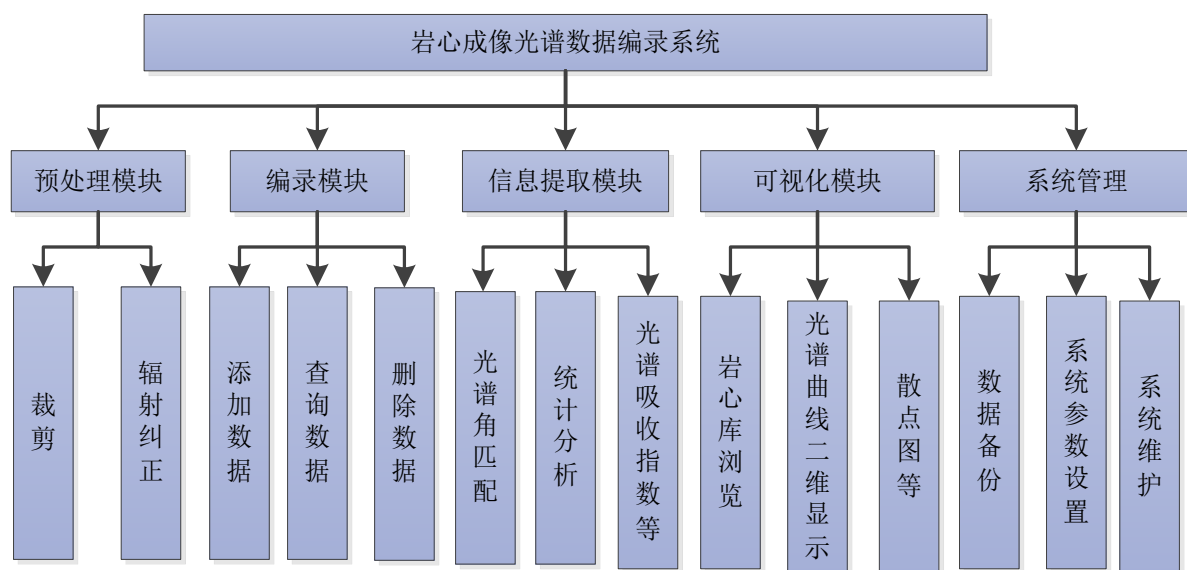


图3-3 岩心成像光谱数据编录系统功能模块组成图

### 1. 预处理块

岩心成像光谱数据在编录之前，需要进行一系列的预处理操作包括辐射纠正和裁剪，最后得到裁剪后的岩心反射率数据。

### 2. 编录模块

主要对预处理后岩心成像光谱数据进行编录存储。编录时，进行配套参数的完整性检查以及数据格式检查。如合格的，将数据编录存储，若不合格，则重新进行重新输入参数，直到符合数据编录存储要求为止。

### 3. 信息提取模块

信息提取模块主要实现光谱角匹配、光谱吸收指数等传统矿物信息提取方法，并可对提取的结果进行一些统计分析。在进行光谱角匹配时需要从标准光谱库中选择标准光谱。

### 4. 可视化模块

可视化模块主要实现岩心库浏览、光谱曲线的二维显示和二维散点图等功能。在可视化部分，首先要选择需要可视化的钻孔，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。在浏览影像时，可以对影像实现放大、缩小、旋转等操作。可视化部分还可以对岩心成像光谱数据进行直方图统计和二维散点图统计，便于对岩心成像光谱数据进行分析。

### 5. 系统管理模块

系统管理是指数据备份、系统参数设置和系统维护。系统参数设置用于设置连接数据库的一些参数如用户名、密码等。数据备份用于对需要的数据进行备份。系统维护主要进行一些系统维护操作比如删除临时文件等操作。

### 3.3 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	内存为 4.0G
	CPU 为 AMD Athlon(tm) II X3 425 Processor 主
	频为 2.7GHZ
	操作系统为 Windows 7
数据库管理系统	Oracle 11g
开发工具	VS2010 (C++语言)
	Qt (界面和图形视图场景)
	Qwt (绘图库)
	GDAL (栅格数据处理接口)
	OCCI (数据库接口)

#### 3.3.1 数据库管理系统

本次用于岩心成像光谱数据编录系统的数据库管理系统为 Oracle 数据库，Oracle 是一个成熟的、大型的商业数据库，它在传统的关系数据库的基础上，引入了面向对象技术，使得可以管理遥感影像这种复杂数据的类型。从 1978 年 Oracle1 诞生至今，Oracle 已经发展到了 11G，它具有以下主要特点<sup>[33]</sup>：

1. 遵守数据存取 SQL 语言
2. 支持大容量数据库和高性能的多用户事务处理。

Oracle 可支持几百 TB 数据库。支持大量用户能够同时在同一数据上执行并发操作，保证数据的一致性和数据有较高的使用效率。

3. 更好的安全性和完整控制。



Oracle 提供用户鉴别、特权（可到列级）、角色、日志、触发器、备份等功能，可以有效保证数据的安全性与完整性。对数据安全性要求较高的系统（如银行系统）大都选 Oracle 作数据库管理系统(DataBase Management System,DBMS)。

#### 4. 硬件环境独立。

Oracle 具有良好的硬件环境独立性，支持大型机、中型机、小型机和微机系统。对 IBM、DEC、AT&T、DG、SUN Appolp、Wang、HP 等硬件环境都有较好的支持。它也用于国内的联想等系列微机上。

#### 5. 可移植性和可兼容性强。

Oracle 数据库具有较强的可移植性和可兼容性，不仅可以在不同型号的机器上运行，而且可以运行在不同操作系统上。

#### 6. 支持分布式处理和分布式数据库。

### 3.3.2 OCCI 数据库接口

OCCI 是一个提供了 C++应用程序连接 ORACLE 数据库中 API 接口。OCCI 使得 C++开发者可以最大限度使用 ORACLE 数据库提供的功能，包括 SQL 语句处理和对象处理。OCCI 提供用于访问标准数据的库文件的和能够以 C++应用程序运行时链接的动态链接库，从而可以不嵌入 SQL 或者 PL/SQL 就可实现数据库的访问。使用 OCCI 主要具有以下优点：

1. 利用 C++和对象导向的编程范例
2. 简单易用
3. 与 JDBC 比较相近，容易学会
4. 可以像操作 C++实例对象一样操作用户定义的数据库对象

### 3.3.3 开发语言

本次开发采用的语言是 VS2010 平台的 C++语言。VS2010 的 C++很好支持了模板函数处理，可以使用单个函数处理不同的数据类型。C++语言是一种面向对象程序设计语言，它在 C 语言的基础上添加了面向对象等特性，比 C 语言更容易学习和使用。C++语言保留了 C 语言的简洁高效和移植性强等特点，具有非常强的编程能力。C++编写的程序结构清晰、并易于扩充修改，适合对各种类型应用软件和系统软件进行底层开发。C++程序运行效率高，运行速度仅比汇编语

言慢 10%—20%左右。目前，C++在程序设计中得到了广泛的应用，是最受欢迎和使用人数最多的编程语言之一。C++具有以下突出特点：

1. C++是 C 语言的超集。它保持了 C 语言的简洁高效和移植性强等特点，并添加了面向对象编程等特点。C++语法更为严格，C++比 C 语言使用更安全。
2. C++保持了与 C 语言的兼容性。绝大多数 C 语言编写的程序可直接或稍加修改即可在 C++环境中运行，C++程序中可以使用很多 C 语言写的库函数。
3. 支持面向对象程序设计。C++在支持面向过程的程序设计基础上，添加了面向对象的程序设计的支持。
4. 相比 C 语言，C++程序在可重用性、可扩充性和可维护性等方面都得到了较大的提高，使其可以从底层开发大中型的系统软件和应用软件。
5. C++支持面向过程程序设计、面向对象程序设计和泛型程序设计等多种程序设计风格。

### 3.3.2 系统界面

#### 1. Qt 简介

Qt 是挪威 Trolltech 公司开发的一个跨平台的图形界面框架，该框架可以提供图形用户界面的大部分功能需求。自 Trolltech 公司 1996 年以来推出 Qt1.0 版以来，已经发展到了现在的 Qt5.0。Qt 开发用户界面简单方便并可部署到多个桌面和嵌入式操作系统，不需重复编写源代码，使 Qt 开发变的十分有意义。Qt 的开发是面向对象的，扩展性强，并可以进行组件编程<sup>[34]</sup>。Qt 同 X Window 上的 Motif，Openwin，GTK 等图形界面库 Windows 平台上的 MFC，OWL，VCL，ATL 是同类型的界面库。Qt 具有下列优点：

（1）优良的跨平台特性：Qt 支持 Microsoft Windows 95/98，Microsoft Windows NT，Linux，Solaris，SunOS，HP-UX，Digital UNIX (OSF/1，Tru64)，FreeBSD，BSD/OS，SCO，AIX，OS390，QNX 等操作系统。

（2）面向对象：Qt 的良好封装机制使得 Qt 具有较高的模块化程度，并具有良好的可重用性，用户使用 QT 进行开发简单方便。Qt 使用 signals/slots 类型来代替 callback 类型，这使得组件和类之间通信变得极为容易。Qt 是基于 C++ 构造，所以具有 OOP(object oriented programming)的优点。

(3) 易用性: Qt 是一个 C++ 工具包, 它由几百个 C++ 类构成包括多达 250 个以上的 C++ 类, 还提供基于模板的 collections, serialization, file, I/O device, directory management, date/time 类。在程序中使用这些类。

(4) 运行速度快: Qt 非常容易使用, 速度也很快。GUI 工具包通常速度不快, 针对这一问题 Qt 开发者的优化了 Qt 使得速度也很快。

(5) 支持处理正则表达式、2D/3D 图形绘制和 OpenGL 绘制功能, 并提供大量的开发文档。

## 2. Qt 图形视图框架(Graphics View 框架)

本次利用 Qt 提供的图形视图框架 (Graphics View 框架) 进行岩心成像光谱数据的浏览。图形视图框架使用模型-视图结构实现了大量图形管理和显示, 并支持放大缩小、旋转和碰撞检测等多种功能。Graphics View 框架结构主要包含了场景类 (QGraphicsScene)、视图类 (QGraphicsView) 和图元类 (QGraphicsItem)。场景类用于对添加到场景中的图元进行管理, 视图类用于显示场景中的图元。一个场景可以使用多个视图进行不同的显示, 一个场景可以包括多个不同类型的图元。Qt 图形视图框架的主要特点如下:

(1) Graphics View 框架可以利用 Qt 绘图系统进行反锯齿, 并可以使用 OpenGL 的高性能优势提高绘图性能。

(2) Graphics View 支持事件传播, 图元能够处理键盘事件和鼠标事件。其中, 鼠标事件包括鼠标单击和双击等。

(3) Graphics View 框架通过二元空间划分树 (BSP, Binary Space Partitioning) 可以实时地显示大场景, 可支持大量图元的同时实现显示和图元的快速查找。

## 3. Qwt

本次利用 Qwt 框架进行一些曲线及直方图等图形的显示。Qwt 框架实现了多种标准图元。如网格 (QwtPlotGrid 类)、标签 (QwtPlotMarker 类)、标尺 (QwtPlotScaleItem 类)、显示 SVG 格式图形文件的图元 (QwtPlotSvgItem 类)、频谱图 (QwtPlotSpectrogram 类)、曲线 (QwtPlotCurve 类)、柱状图 (QwtPlotHistogram 类)、间隔区域 (QwtPlotIntervalCurve 类)、三维散点图

(QwtPlotSpectroCurve 类)等。用户可以通过继承 QwtPlotItem, 从而实现符合自己需要的图元。

### 3.3.3 GDAL 栅格数据处理接口

本次开放利用 GDAL 进行岩心成像光谱数据的处理。GDAL(Geospatial Data Abstraction Library)是一个操作各种栅格地理数据格式的库, GDAL 是一个在 MIT/X 许可协议(MIT 许可证源自麻省理工学院 Massachusetts Institute of Technology, MIT 又称 X 条款或 X11 条款)下的开源栅格空间数据转换库, 它使用一个抽象数据模型来描述所支持的多种文件格式 ("BMP"、"JPEG"、"GTiff"、"HFA"、"BT"、"ECW"、"FITS"、"GIF"、"HDF4"、"Hdr"等)。除此之外, 这个库还同时包括了操作矢量数据的 OGR (OpenGIS Simple Feature Reference Implementation) 库, 一般将这两个库合称为 GDAL/OGR, 或者简称为 GDAL。这就使得 GDAL 库可以操作栅格数据和矢量数据。由于 MIT 协议的开放性, 任何开发人员不需要原作者的授权都可以基于 GDAL 库进行软件开发与发布, 许多著名的 GIS 软件都是用了 GDAL/OGR 库, 如 ESRI 的 ArcGIS 9.2, Google 的 Google Earth 以及开源的 GRASS GIS 系统等。GDAL 多种编程语言 (C、C++ 和 Python 等) 提供了二次开发接口, 包括读取、写入、转换和处理等功能接口, 方便用户进行二次开发。

## 3.4 数据存储模型设计

### 3.4.1 岩心成像光谱数据特点

岩心成像光谱数据是典型的高光谱影像, 具有与高光谱影像一样的各种数据格式。高光谱影像数据主要有三种格式: BIP (波段按像元交叉格式)、BIL (波段按行交叉格式) 和 BSQ (按波段顺序格式)。设 P、R、B 分别表示像元维、行向维和波段维, 高光谱影像 D 可用一个三维数组表示: BIP 格式为 D (P,R,B); BIL 格式为 D (P,B,R); BSQ 格式为 D (R,B,P) [35]。三种格式存储的影像数据各有利弊, 需要根据具体的需要选择具体的数据存储格式。成像光谱仪一般获取数据的格式是 BIP 格式的, 也存在成像光谱仪获取数据是 BIL 格式的, 如岩心组分成像光谱系统获取数据的格式就是 BIL 格式。BIP 格式有利于光谱分析。如果影像是以 BSQ 或者 BIL 格式存储, 不能顺序读取

光谱曲线数据，需要从不同的地方读取出光谱曲线数据，相比 BIP 格式将需要较多的时间。BSQ 格式存储的影像有利于进行空间分析。BIL 格式位于 BIP 和 BSQ 之间，该格式对空间分析和光谱分析都不利。由于岩心成像光谱数据编录系统主要对光谱信息进行显示和分析，因此为岩心成像光谱数据选用 BIP 格式作为存储方式。

3.4.2 岩心成像光谱数据存储模型

为借鉴岩心高光谱编录系统和高光谱数据库的优点，参考黄艳菊等提出的岩心数据存储模型<sup>[17]</sup>和覃环互等提出的基于GeoRaster的高光谱数据的存储模型<sup>[28]</sup>，提出了岩心成像光谱数据存储模型，如图3.4。在岩心数据存储模型的设计中，岩心成像光谱数据是以对象的形式存储在数据库中的，使得成像光谱数据与属性参数集成在一起，提高了数据的易用性和使用效率。

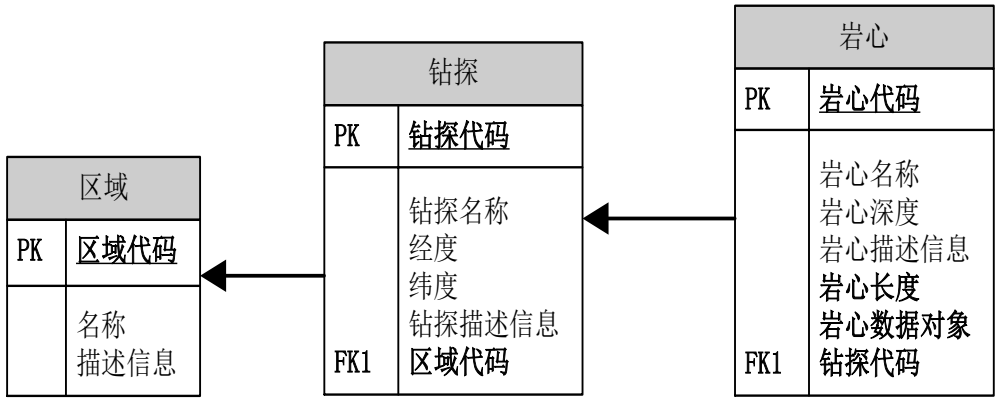


图 3.4 岩心成像光谱数据存储模型

区域的属性主要包括了对区域的描述，包括在数据库中的唯一标识、区域名称和区域描述信息。钻探的属性主要包括了对钻探的描述，在数据库中的唯一标识、钻探名称、钻探区域描述信息、经纬度信息以及钻探关联的区域信息。岩心的属性主要包括了对岩心数据本身的描述，包括在数据库中的唯一标识、岩心名称、岩心采集深度、岩心的描述、岩心存储对象、岩心的长度以及岩心关联的钻探信息。

3.4.3 岩心成像光谱数据入库的格式

在 Oracle11g 中，GeoRaster 支持的栅格数据类型为：TIFF、GeoTiff、BMP、GIF 和 PNG。在 GeoRaster 支持的栅格数据类型中，只有 TIFF 和 GeoTIFF

格式可存储成像光谱数据。BIP 是以光谱维顺序逐像素点存储图像，BIP 格式的影像数据对读取光谱曲线较为有利。因此，需先将成像光谱数据转换成 BIP 格式的 TIFF (GeoTIFF) 文件类型，再进行岩心成像光谱数据入库操作。

### 3.5 数据存储结构设计

数据存储结构设计主要是对数据表和数据表空间进行设计。数据表是数据存储的基本单位，根据岩心成像光谱数据存储模型和各种数据自身的特点以及相互之间的关系，并依据 Oracle 规定的数据类型，设置表的字段、主键、外键和连接方式<sup>[36]</sup>。数据结构设计优劣决定着整个数据库设计的优劣和系统能否高效稳定的运行。为了提高查询效率，分配好相应的数据表空间给影像数据等数据量较大的字段，避免查询时反复读取这一庞大空间。充分考虑系统的需求，并结合岩心数据的特点以及所设计的数据存储模型，本次研究中设计了四个数据表，分别是 Region 数据表、Drilling 数据表、Rock 数据表和 Rock\_RASTER 表。

1. Region 数据表，用来存储岩心采集区域的信息，其字段名、数据类型和说明如表 3-2 所示。

表 3-2 Region 表

字段名	数据类型	说明
Region_ID	NUMBER	区域唯一编码，主键
Region_Name	VARCHAR2(32)	岩心区域名称
Region_Description	VARCHAR2(256)	岩心区域描述

使用 SQL 语言在 SQLDeveloper 工具创建该表的代码如下：

```
CREATE TABLE Region
(
    Region_ID NUMBER NOT NULL ,
    Region_Name VARCHAR2(32),
    Region_Description VARCHAR2(256) ,
    CONSTRAINT Region_PK PRIMARY KEY( Region_ID )
```

);

2. Drilling 表, 用来存储岩心钻探时的参数, 包括岩心钻探编码、钻探名称、钻探地点的经度和纬度、对钻探的描述信息以及岩心钻探区域参照。

表 3-3 Drilling 表

字段名	数据类型	说明
Drilling_ID	NUMBER	钻探唯一编码, 主键
Drilling_Name	VARCHAR2(32)	钻探名称
Longitude	NUMBER	经度
Latitude	NUMBER	纬度
Drilling_Description	VARCHAR2(256)	钻探描述
Region_ID	NUMBER	岩心钻探区域参照

使用 SQL 语言在 SQL Developer 工具创建该表的代码如下:

```
CREATE TABLE Drilling
(
    Drilling_ID NUMBER NOT NULL ,
    Drilling_Name VARCHAR2(32),
    Drilling_Description VARCHAR2(256) ,
    Longitude NUMBER ,
    Latitude NUMBER ,
    Region_ID NUMBER ,
    CONSTRAINT Drilling_PK PRIMARY KEY( Drilling_ID ) ,
    FOREIGN KEY(Region_ID) REFERENCES Region(Region_ID)
);
```

3. Rock 表, 用来存储岩心岩心成像光谱数据以及其它对岩心进行描述的信息, 当需要对岩心影像进行操作时, 首先要获取 Rock 表中的 GeoRaster 对象。

表 3-4 Rock 表

字段名	数据类型	说明
-----	------	----

Rock_ID	NUMBER	岩心唯一编码，主键
Rock_Name	VARCHAR2(32)	岩心名称
Rock_Depth	NUMBER	岩心深度
Rock_Description	VARCHAR2(256)	岩心的描述
Rock_Object	SDO_GEORASTER	存 储 岩 心 数 据 的 Georaster 对象
Rock_Length	NUMBER	岩心长度

Drilling_ID	NUMBER	钻探的编码
-------------	--------	-------

使用 SQL 语言在 SQL Developer 工具创建该表的代码如下：

```
CREATE TABLE Rock
(
    Rock_ID NUMBER NOT NULL ,
    Rock_Name VARCHAR2(32) ,
    Rock_Description VARCHAR2(256) ,
    Rock_Length NUMBER NOT NULL ,
    Rock_Object MDSYS.SDO_GEORASTER ,
    Drilling_ID NUMBER NOT NULL ,

    CONSTRAINT Rock_PK PRIMARY KEY( Rock_ID ) ,
    FOREIGN KEY(Drilling_ID) REFERENCES Drilling(Drilling_ID)
);
```

5. Rock\_RASTER 表，用来存储实际的栅格数据块，是上文所介绍的 SDO\_RASTER 的实例化，该表通过 RASTERID 字段与 Rock 表中的 GEORASTER 对象相关联。



表 3.5 Rock\_RASTER 表

字段名	数据类型	说明
rasterId	NUMBER	影像唯一编码, 主键
pyramidLevel	NUMBER	金字塔级数
bandBlockNumber	NUMBER	波段块号
rowBlockNumber	NUMBER	行块号
columnBlockNumber	NUMBER	列块号
BLOCKMBR	SDO_Geometry	定界矩形
RASTERBLOCK	BLOB	存储实际数据

使用 SQL 语言在 SQL Developer 工具创建该表的代码如下:

```
create table Rock_RASTER of mdsys.sdo_raster

(primary key(rasterId, pyramidLevel, bandBlockNumber,
rowBlockNumber, columnBlockNumber))

lob(rasterblock)store as(

chunk 32768

cache reads

nologging

pctversion 0

storage ( pctincrease 0));
```

### 3.6 本章小结

本章主要针对岩心成像光谱数据编录系统的功能需求以及业务流程进行了分析, 根据系统结构设计的原则, 提出了岩心成像光谱数据编录系统的体系结构并进行了阐述。采用模块化的思想, 将系统功能划分为预处理、编录、可视化、信息提取、系统管理等五大功能模块, 详细论述了每个模块的功能。介绍了系统开发时所采用的 Oracle 数据库、OCCI 数据库接口、C++语言、Qt 开发工具、支持影像可视化的 Qt 图形视图框架 (Graphics View)、Qwt 绘图库和栅格数据处理接口 GDAL。详细分析了岩心成像光谱数据的特点, 对现有的岩心成像光谱数据进行了分析, 介绍了 GeoRaster 模型并提出了岩心

成像光谱数据的数据存储模型，最后详细设计了各个数据表的结构，并给出了创建各个表的SQL语句。

## 第四章 岩心成像光谱数据编录系统关键技术研究及其实现

对于岩心成像光谱数据编录系统来说,如何实现岩心成像光谱数据的编录、可视化和信息提取是需要研究的问题。为了解决这个问题,本章对岩心成像高光谱数据库的数据编录技术、影像和光谱曲线显示的可视化技术及信息提取技术进行了研究,并在确定的开发平台上实现了这些技术。基于这些关键技术,开发实现了岩心成像光谱数据编录原型系统。

### 4.1 岩心成像光谱数据编录技术的研究与实现

岩心成像光谱数据编录系统主要目的就是对岩心成像光谱数据进行编录。编录模块可以提供对一个钻孔所有的岩心成像光谱数据的编录。要实现对一个钻孔的岩心成像光谱数据的编录,首先新建好的相应的数据库并添加相应的区域信息和钻孔的信息,然后将预处理完后的岩心成像光谱数据按照在钻孔中所处的顺序依次存储到的岩心表(Rock 数据表)中。宋国兵等研究表明,对于大二进制对象(BLOB)数据的存储,使用存储过程比单独使用 SQL 语句的效率高<sup>[37]</sup>。GeoRaster 模块可使用 SDO\_GEOR.importFrom()和 SDO\_GEOR.exportTo()方法导入和导出影像数据,但是该方法需要利用 SQL 语句实现。如果单独使用 SQL 语句实现这些功能,并不具有较好的系统效率。为了提高系统的性能,提高数据入库和导出效率,使用基于存储过程的岩心成像光谱数据导入和导出的方法:创建存储过程进行 GEORASTER 对象的导入和导出。这样可以减少应用程序与数据库之间的交互次数,能够提高系统运行的效率。存储过程创建后,就可以调用创建好的存储过程来实现岩心成像光谱数据的出入库。由于 Oracle 权限管理的原因,先使用系统管理员的权限使 dbuser 用户和普通用户获取读取文件的权限。因此,整个编录过程分为两步,一是使用户获取读取文件的权限,二是调用存储过程实现授权数据文件的导入或导出,如图 4-1 所示。

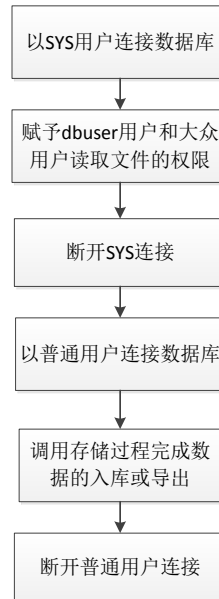


图 4-1 岩心成像光谱数据入库或导出流程

#### 4.1.1 岩心成像光谱数据入库

##### 1. 存储过程设计

岩心成像光谱数据的入库首先要为岩心成像光谱数据设置主码，然后通过初始化、导入等步骤，将岩心成像光谱数据导入到数据库中。其输入参数为岩心 ID，岩心名称，岩心深度，岩心的描述，岩心成像光谱数据路径、岩心长度、钻探 ID 和栅格数据表名。其核心实现代码如下：

```

create or replace procedure Import_Rock_Data (p_Rock_ID in NUMBER,
      p_Rock_Name in VARCHAR2,
      p_Rock_Description in VARCHAR2,
      p_Rock_Depth in NUMBER,
      p_Rock_Length in NUMBER,
      p_Rock_Dir in  VARCHAR2,
      p_Drilling_ID in NUMBER,
      p_rtb in varchar2)
as
geor MDSYS.SDO_GEORASTER;
begin

```

```
insert into Rock values (p_Rock_ID, p_Rock_Name, p_Rock_Description,
p_Rock_Depth, MDSYS.SDO_GEOR.init(p_rtb),p_Rock_Length,
p_Drilling_ID);
```

--取出 Rock\_Object 字段, 放入 geor 变量中

```
SELECT Rock_Object INTO geor FROM Rock WHERE Rock_ID =
p_Rock_ID FOR UPDATE;
```

--调用 importFrom 方法, 写入 p\_Rock\_Dir 路径对应的 tif 文件

```
mdsys.sdo_geor.importFrom(geor, null, 'TIFF', 'file',p_Rock_Dir);
```

```
UPDATE Rock SET Rock_Object=geor WHERE Rock_ID =
p_Rock_ID;
```

```
commit;
```

```
end ;
```

## 2. 基于存储过程的岩心成像光谱数据入库实现

1 dbuser 用户和大众用户获取读取文件权限的实现

① 以系统管理员账号连接数据库。

```
if( NULL==this->sysName || NULL==this->srvName ||
NULL==this->sysPW )
{
this->DisplayOutputInfo("ERROR","sys 用户名、密码、服务名为空");
return 0 ;
}
conn = env->createConnection(this->sysName,
this->sysPW,this->srvName);
```

② 构造 dbuser 用户获取读取文件权限表达式。

```
// Permit DBUSER To Write
sprintf_s( buffer, 300, "%s%s%s%s%s", "begin
dbms_java.grant_permission('", pNameUp,"', 'SYS:java.io.FilePermission',
'',pFullPath, '', 'write') ;end ;");
```

③构造普通用户获取读取文件权限表达式，将②中代码的 `dbuser` 改成 `PUBLIC` 即可。

④利用以上构造的两个权限表达式分别创建 `Statement` 对象。

⑤调用 `Statement` 对象的 `execute()`方法分别执行这两条语句，即可完成赋予权限的功能。

⑥关闭数据库连接

## 2 使用存储过程进行数据导入的实现

①以用户身份连接数据库，使用 `Environment` 类的静态方法创建 `Environment` 的对象，然后利用其 `createConnection()`方法，创建连接对象，创建之前需要给该方法指定用户名、密码等参数。

②利用创建的连接对象，构建用于执行存储过程的 `Statement` 对象，该对象用于执行数据入库过程函数。

```
// Import
Statement *stmt ;

stmt = conn->createStatement("begin
Import_Rock_Data(:1, :2, :3, :4, :5, :6, :7,:8); end;");
```

③为数据入库过程传递执行中所需要的具体参数。其中:5 对应准备入库的影像数据的路径，:7 对应于为栅格数据表的名称，这里为 `rock_raster`。

```
stmt->setInt(1, 1005);
stmt->setString(2, "Rock1004");
stmt->setString(3, "Description here.");
stmt->setDouble(4, 10.1);
stmt->setString(5, fileFullPath);
stmt->setInt(6, 101);
stmt->setDouble(7, 10.1);
stmt->setString(8, "rock_raster");
```

④ 使用对象 `Statement` 的 `execute()`方法，执行存储过程，使用 `try.....catch` 结构检测是否遇到异常，若遇到异常则抛出异常。

⑤最后关闭数据库连接。

在 VS2010 的 C++ 语言和 Oracle 11g 数据库平台下采用 OCCI 方式连接 ORACLE，以上流程实现了 Tiff 格式岩心成像光谱数据的入库。

### 4.1.2 岩心成像光谱数据导出

#### 1. 存储过程设计

岩心成像光谱数据的导出需要岩心 ID 和输出路径参数。导出的文件类型为 TIFF。其核心实现代码如下：

```
create or replace procedure exportImage(rockid in number, file_dir in
varchar2)
as
geor MDSYS.SDO_GEORASTER ;
begin
--取出 Rock_Object 字段，放入 geor 变量中
select Rock_Object into geor from Rock where Rock_ID = rockid ;
--导出文件
sdo_geor.exportTo(geor, ', 'TIFF', 'file', file_dir) ;
end ;
```

#### 2. 基于存储过程数据导出的实现

①用普通用户身份连接数据库，具体实现与上文实现方法一致。使用 Environment 类的静态方法创建 Environment 的对象，然后利用其 createConnection()方法，创建连接对象，创建之前需要给该方法指定用户名、密码等参数。

②利用创建的连接对象，构建执行存储过程的 Statement 对象，该对象用于执行数据导出过程函数。

```
// Export
Statement *stmt ;

stmt = conn->createStatement("begin ExportImage(:1, :2); end;");
```

③为数据导出过程传递执行中所需要的具体参数。其中:1 对应准备导出岩心影像的编号，:2 对应于岩心影像导出的路径。

```
stmt->setInt(1,1005);
```

```
stmt->setString(2,pFullPath);
```

④调用对象 `Statement` 的 `execute()` 方法, 执行存储过程, 使用 `try.....catch` 结构检测是否遇到异常, 若遇到异常则抛出异常。

⑤最后关闭数据库连接。

在 VS2010 的 C++ 语言和 Oracle 11g 数据库平台下采用 OCCI 方式连接 ORACLE, 以上流程实现了 Tiff 格式的岩心成像光谱数据的导出。

## 4.2 岩心成像光谱数据可视化技术的研究与实现

岩心成像光谱数据编录系统提供可视功能, 用于对岩心成像光谱数据进行浏览和可视化分析。可视化模块可以提供对岩心成像光谱数据的浏览、光谱曲线显示并可提供直方图统计、二维散点图的功能, 便于对岩心成像光谱数据进行可视化分析。

### 4.2.1 岩心成像光谱数据浏览研究与实现

岩心成像光谱数据编录系统不仅仅是能够存储和管理岩心成像光谱数据, 同时还要能实现岩心成像光谱数据的浏览。目前, `GeoRaster` 对象只能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) 来显示该数据; 二是使用独立的 `GeoRaster` 显示工具, 如 `GeoRasterViewer` 工具。这两种方式都可以显示岩心成像光谱数据, 但是又各有不足, 第一种方式可以显示像元的光谱曲线, 但是在数据导出的过程中需要花费大量的时间, 在本系统的开发环境中, 经研究发现, 使用 `SDO_GEOR.exportTo` 方法导出一个 30MB 的数据需要 15 秒左右, 而一个钻孔往往包还上千个岩心成像光谱数据, 很难支持快速浏览。第二种方式不需要将数据导出, 但是又无法支持像元光谱曲线的显示, 同时也没用支持 C++ 的开发接口。因此, 这两种方式都不适合用来进行一个钻孔的岩心成像光谱数据的显示。因此本研究采用一个折中的方案来进行岩心成像光谱数据的显示, 即先将一个钻孔所有的岩心成像光谱数据导出到一个指定的文件夹中, 文件的名称命名按照岩心成像光谱数据的岩心 ID 进行命名, 然后再进行读取和浏览显示。为了便于对一个钻孔



中所有的岩心成像光谱数据进行显示、放大、缩小或者旋转操作，采用了 Qt 中 Graphics View 框架来显示一个钻孔中的所有岩心成像光谱数据。实现主要过程如下：

(1) 首先新建一个继承自类 QGraphicsScene 的类 CMyGraScene 和一个继承自类 QGraphicsView 的类 CMyGraView。

(2) 然后创建一个继承自 QGraphicsItem 类的 CDrillRasterDataItem 和 CCoreRasterDataItem 的类。CDrillRasterDataItem 类代表一个钻孔的所有岩心成像光谱数据，CCoreRasterDataItem 类对象代表钻孔中的一个岩心成像光谱数据。由于一个钻孔中包含多个岩心，故 CDrillRasterDataItem 类对象包含多个 CCoreRasterDataItem 类对象。CDrillRasterDataItem 和 CCoreRasterDataItem 类的定义如下：

```
class CCoreRasterDataItem:public QGraphicsItem
{
public:
friend class CDrillRasterDataItem;
enum { Type = UserType + 101 };
int type() const
{
return Type;
}
~CCoreRasterDataItem();
CCoreRasterDataItem(const QString &strFileName, const QRect& rect,
QGraphicsItem * parent = 0);
QPainterPath shape() const;
void paint(QPainter *painter, const QStyleOptionGraphicsItem *item,
QWidget *widget);
private:
void fillPixMap();
private:
```

```

    QRectF m_boundingBox;

    QPixmap m_coreMap;

    int m_nW;

    int m_nH;

    int m_bandIndex[3];

};

class CDrillRasterDataItem:public QGraphicsItem
{
public:
    CDrillRasterDataItem();

    CDrillRasterDataItem(const QRect& rect, QGraphicsItem * parent = 0);

    ~CDrillRasterDataItem();

    enum { Type = UserType + 102 };

    int type() const
    {
        return Type;
    }

    void addItem(CCoreRasterDataItem*pItem);

    QPainterPath shape() const;

    void paint(QPainter *painter, const QStyleOptionGraphicsItem *item,
    QWidget *widget);

private:
    QMap<int,CCoreRasterDataItem *> m_childItem;

    QRectF m_boundingBox;

    int m_bandIndex[3];

};

```

岩心成像光谱数据的绘制通过 CCoreRasterDataItem 类中的 paint 函数实现，CDrillRasterDataItem 的 paint 函数并不做任何事情。CCoreRasterDataItem 类中的 paint 函数通过 QPixmap 对象进行岩心成像光谱数据的显示。QPixmap

对象通过调用 GDAL 从文件夹中读取相应的岩心成像光谱数据创建而成。

Paint 函数的实现如下：

```
Void CCoreRasterDataItem::paint(QPainter*painter,const
QStyleOptionGraphicsItem *item, QWidget *widget)
{
    painter->drawPixmap( m_boundingBox.toRect(), m_coreMap );
}
```

m\_coreMap 为一 QPixmap 对象，利用 GDAL 从岩心成像光谱数据中读取三个波段的数据所构成。构建 QPixmap 对象的核心代码如下：

```
QImage myImage(nw, nh, QImage::Format_RGB32);//QImage 显示对象
//读取 R 波段数据
float *pBufferR=new float[nw*nh];
pCoreRasterData->readData(m_bandIndex[0],0,0,nw,nh,nDataType,(void*
)pBufferR);
//读取 G 波段数据并
float *pBufferG=new float[nw*nh];
pCoreRasterData->readData(m_bandIndex[1],0,0,nw,nh,nDataType,(void*
)pBufferG);
//读取 B 波段数据
float *pBufferB=new float[nw*nh];
pCoreRasterData->readData(m_bandIndex[2],0,0,nw,nh,nDataType
//构建显示对象
QRgb rgb;
for(int i=0;i<nh*nw;i++)
{
    int
    nvalR=((double)pBufferR[i]-dMinR)/(((double)dMaxR-dMinR)*255+
    0.5;
    int
```

```

nvalG=((double)pBufferG[i]-dMinG)/(((double)dMaxG-dMinG)*255+
0.5;
int
nvalB=((double)pBufferB[i]-dMinB)/(((double)dMaxB-dMinB)*255+
0.5;

myImage.setPixel(i%nw,i/nw,QColor(nvalR,nvalG,nvalB).rgb());
}

```

m\_coreMap=QPixmap::fromImage(myImage);//将 QImage 转换为 QPixmap

(3) 新建一个 CDrillRasterDataItem 类对象，按照岩心 ID 顺序构建 CCoreRasterDataItem 对象并添加到 CDrillRasterDataItem 类对象中去并根据岩心成像光谱数据的长宽和 ID 顺序设置好相应的显示区域(m\_boundingBox)，调用 QGraphicsScene 提供的 addItem 函数将 CDrillRasterDataItem 类对象添加到图形场景中去。图 4.2 为岩心成像光谱数据浏览示意图。

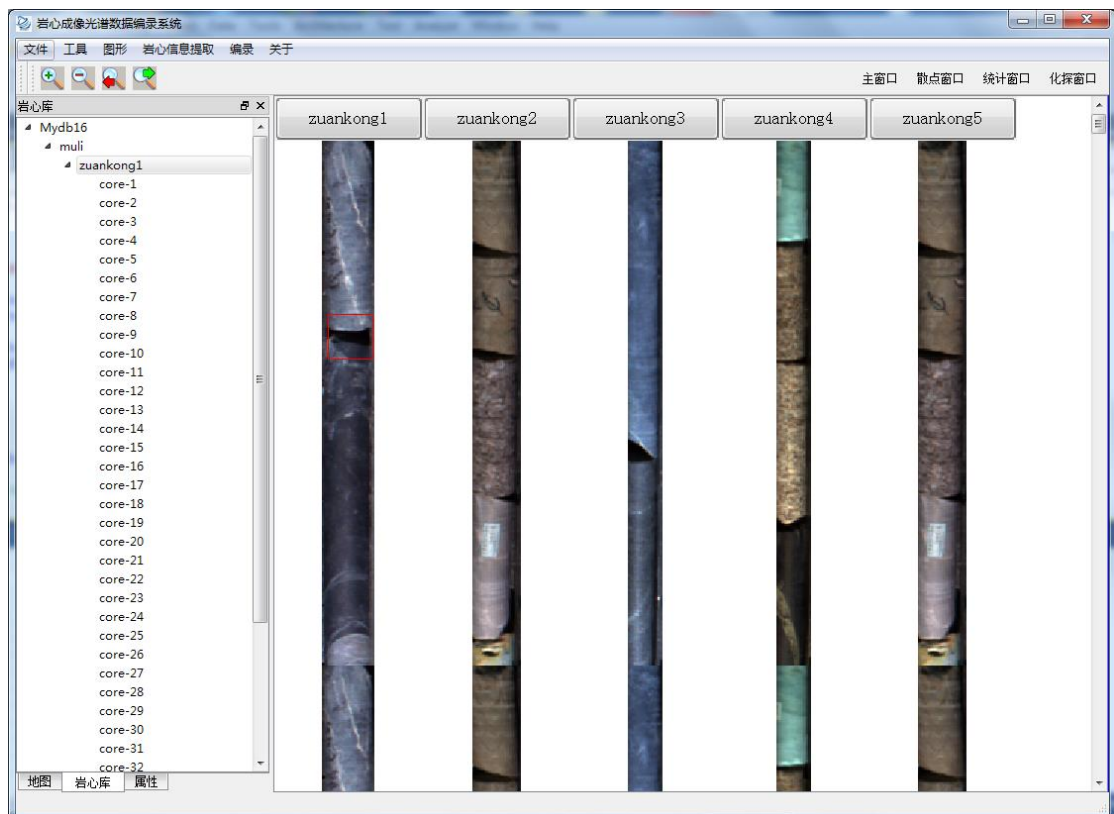


图 4-2 岩心成像光谱数据浏览示意图

## 4.2.2 光谱显示方法研究与实现

显示了岩心成像光谱数据彩色合成影像之后，为充分展现岩心成像光谱数据图谱合一的特点，特意设计了在QGraphicsView视图窗口右键可以显示对应像元的光谱曲线。这里有两个问题需要解决，一是单击鼠标左键时获得光谱曲线数据，二是对光谱曲线数据进行可视化显示。本次开发利用QGraphicsView中的mousePressEvent事件进行光谱曲线数据的获取，并使用Qwt提供的QwtPlotCurve图元进行光谱曲线的显示。

### 1. 光谱曲线数据的获取

通过在MyGraView类中mousePressEvent事件中获取岩心成像光谱数据的光谱数据。获取的过程如下：

- (1) 将QGraphicsView视图中的坐标转换到场景坐标。

```
QPointF pt=event->posF();//得到左键单击的坐标位置
QPointF scenePt=this->mapToScene(pt.rx(),pt.ry());//视图坐标转换
//到场景坐标
```

- (2) 得到这点场景坐标的CCoreRasterDataItem类对象

```
QList<QGraphicsItem*> itemList=this->items(pt.rx(),pt.ry());//得到当前坐标
//所在位置的
//QGraphicsItem对象列表

int ncount=itemList.size();//该点对应的所有QGraphicsItem对象
CCoreRasterDataItem *item=NULL;
for(int i=0;i<ncount;i++)
{
    item= qgraphicsitem_cast<CCoreRasterDataItem*>(itemList[i]);
    if(item!=NULL)//若该QGraphicsItem对象类型为CCoreRasterDataItem
    {
        break;
    }
}
```

- (3) 若CCoreRasterDataItem类对象不为空，将场景坐标转换CCoreRasterDataItem的局部坐标即是岩心成像光谱数据的行列号

```
itemPt=item->mapFromScene(scenePt.rx(),scenePt.ry());//转换到
//QGraphicsItem的局/部坐标
```

(4) 根据行列号读取所对应的光谱曲线数据

```
pCoreRasterData->readPixel(itemPt.rx()+0.5,itemPt.ry()+0.5,lstData);//读取
光谱曲线数据
```

## 2. 光谱曲线的显示

光谱曲线的显示通过Qwt提供的QwtPlotCurve图元实现。QwtPlotCurve是Qwt提供的曲线图元，可以用于显示曲线数据。实现过程如下：

(1) 创建QwtPlotCurve图元，并将获得的光谱曲线数据添加到创建QwtPlotCurve图元中。

```
QwtPlotCurve *pCurve=new QwtPlotCurve(strCurveName);//创建图元
pCurve->setSamples(xData,yData);//设置光谱曲线数据
```

(2) 新建一个继承自QwtPlot的类CMyCurveWidget将获得的光谱数据添加到CMyCurveWidget类对象中去。

```
pCurve->attach(&m_pCurveWidget);// m_pCurveWidget为
//CMyCurveWidget类对象
pCurve->setPen(QPen(QColor(0,0,255)));//设置曲线颜色
```

岩心成像光谱数据的像元光谱曲线的显示效果如下 4-3 图所示。

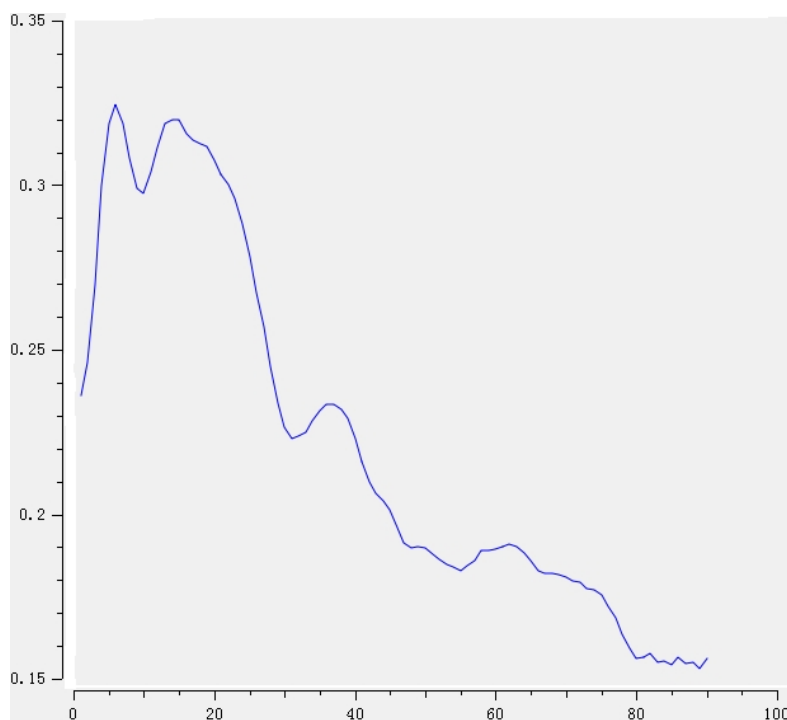


图4-3 像元光谱曲线的显示效果图

### 4.2.3 直方图显示研究与实现

可视化模块还提供了直方图统计功能以便对岩心成像光谱数据进行直方图统计。图像直方图通过图形化的方式显示像素值的出现频率，一般统计范围为[0-255]。图像直方图是用来进行图像二值化的有效手段之一，可用于光谱匹配算法结果的二值化。对于有一个波峰的图像的直方图，二值化的阈值应是位于波峰右侧的某个值。要进行岩心成像光谱数据的直方图显示同样要解决两个问题，一是直方图的统计，二是直方图的界面显示。本次开发利用GDAL中的GetHistogram函数进行直方图统计并利用Qwt提供的QwtPlotHistogram图元进行直方图显示。

#### 1. 直方图统计

岩心成像光谱数据的反射率数值范围都在(0, 1)内，所以首先要先设置统计间隔数（一般统计间隔数为256），然后得到统计波段数据的最小值和最大值，再用最大值减去最小值除以统计间隔数得到统计间隔，最后统计反射率数值落在每一个间隔内的频数。GDAL的GetHistogram函数可以方便获取栅格数据的直方图。GDAL的统计直方图的函数原型为：

```
CPLerrGDALRasterBand::GetHistogram ( double dfMin, double dfMax, int
nBuckets,int * panHistogram,int bIncludeOutOfRange, int bApproxOK,
GDALProgressFunc pfnProgress, void * pProgressData );
```

其中，dfMin和dfMax指统计直方图的最小值和最大值；nBuckets表示直方图统计的统计间隔数；panHistogram为用来存储直方图的数组，其数组大小等于nBuckets；bIncludeOutOfRange用于判断是否统计区间外的值；bApproxOK用于判断是否进行粗略统计，粗略统计可以提高统计的速度但不准确；pfnProgress和pProgressData表示进度条的回调函数和进度条数据，一般可设置为NULL。利用GDAL的GetHistogram函数进行直方图的核心代码如下：

```
//先计算图像的最小最大值
double pMinMax[2];
m_pDataSet->GetRasterBand(nbandIndex)->ComputeRasterMinMax(false,pMi
nMax);
//再进行直方图统计
int panHistogram[256];
m_pDataSet->GetRasterBand(nbandIndex)->GetHistogram(pMinMax[0]-0.5,p
MinMax[1]+0.5,nBuckets,panHistogram,false,false,NULL,NULL);
```

## 2. 直方图的显示

直方图的显示由使用由Qwt提供的QwtPlotHistogram图元和QwtPlot类来实现。QwtPlot类继承自QFrame类用于显示Qwt提供的图元。QwtPlotHistogram是Qwt提供的直方图图元，可以用来进行直方图显示。实现过程如下：

- (1) 新建一个继承自QwtPlotHistogram图元类的Histogram类。
- (2) 新建一个Histogram类对象并设置直方图统计数据。

```
Histogram *pHis=new Histogram();
QVector<QwtIntervalSample> samples(numValues);
double dscale=(dfmax-dfmin)/numValues;
for ( int i = 0; i < numValues; i++ )
{
    QwtInterval interval(dfmin+i*dscale, (i+1)*dscale+dfmin);
```



```

        samples[i] = QwtIntervalSample(values[i], interval);
    }
    //将Histogram类对象添加到CHisPlot类中去
    pHis->setData(new QwtIntervalSeriesData(samples));

```

其中dfmin, dfmax为统计波段的最小值与最大值, numValues为统计间隔数, values 为统计完成的直方图数据。QwtInterval、QwtIntervalSample 和 QwtIntervalSeriesData 都是Qwt提供的数据类。QwtInterval表示统计间隔, QwtIntervalSample表示统计间隔和统计间隔所对应的数值。QwtIntervalSeriesData表示一系列的QwtIntervalSample。

(3) 新建一个继承自QwtPlot的类如CHisPlot类, 新建一个CHisPlot类的对象, 将Histogram类对象添加到CHisPlot类中去。

```

CHisPlot *phisPlot=new CHisPlot();

pHis->attach(&phisPlot);//

```

直方图的显示效果如下图4-4所示。

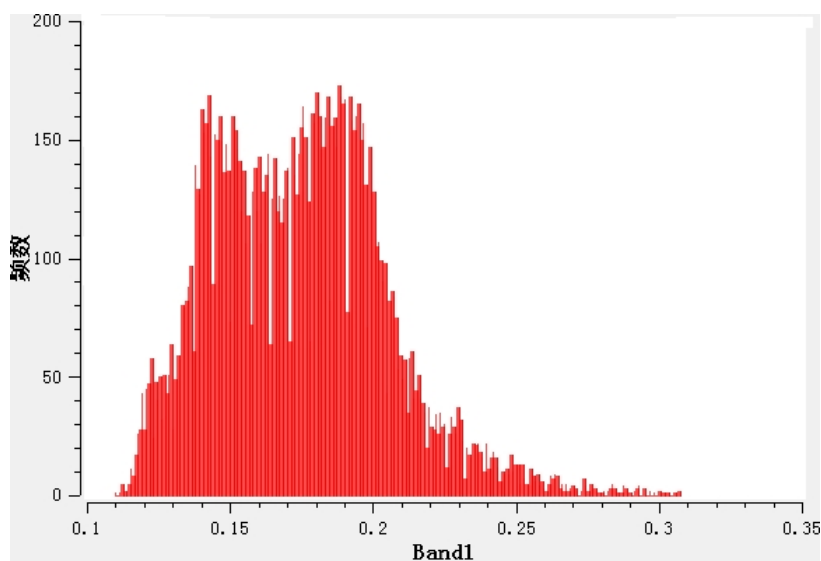


图 4-4 直方图绘制效果图

#### 4.2.4 二维散点图显示方法研究与实现

可视化模块还提供了二维散点图显示功能以便对岩心成像光谱数据进行散点图分析。遥感图像的二维散点图是表达两个波段组合光谱空间结构信息的最佳图示方式<sup>[38]</sup>, 所以提供二维散点图分析功能对岩心成像光谱编录系统具有重要

的意义。二维散点图上一点坐标 (x, y) 对应着图像上任一像素在两个波段 (波段 X 和波段 Y) 上的 DN 值, x 坐标对应着像素在波段 X 上的像元值, y 坐标对应着像元在波段 Y 上的像元值。图像上的任一像元在二维散点图上都有一点对应, 而任一像元在波段 X 和波段 Y 的 DN 值有可能是相等的, 这样二维散点图上的任一点可能对应着多个像元, 对应的个数称为频数。这样可以对不同的频数设置不同的颜色, 增强二维散点图的显示效果和分析能力。要进行岩心成像光谱数据的二维散点图显示同样要解决两个问题, 一是二维散点图的统计, 二是二维散点图的可视化显示。本次开发利用 GDAL 进行二维散点图统计并利用 Qwt 提供的 QwtPlotSpectrogram 图元进行二维散点图的显示。

## 1. 二维散点图的统计

由于岩心成像光谱数据的反射率数据范围在 (0, 1) 之间, 和直方图统计一样在进行二维散点图统计时, 需先对每个波段设置统计间隔数, 一般都设置为 256, 再利用 GDAL 读取统计波段的数据<sup>[39]</sup>并计算图像上每个像元在统计波段上的 DN 值所对应的统计间隔序号 (0-255), 最后用一个二维数组 (一般每个维度都为 256) 统计每个散点的频数。实现二维散点图的核心代码如下:

```
computeRasterMaxAndMin(nBandx,pMinMaxX);//得到波段 X 的最小值和最
//大值

computeRasterMaxAndMin(nBandy,pMinMaxY);//得到波段 Y 的最小值和最
//大值

m_pDataSet->GetRasterBand(nBandx)->RasterIO(GF_Read,0,0,nw,nh,(void*)
pDataX,nw,nh,(GDALDataType)dataTypeX,0,0);//读取波段 X 数据
m_pDataSet->GetRasterBand(nBandy)->RasterIO(GF_Read,0,0,nw,nh,(void*)
pDataY,nw,nh,(GDALDataType)dataTypeY,0,0);//读取波段 Y 数据
//初始化 vecScatter
vecScatter.resize(yScale);
for(int i=0;i<yScale;i++)
    vecScatter[i].resize(xScale);
    for(int i=0;i<yScale;i++)
    {
```

```

        for(int j=0;j<xScale;j++)
        {
            vecScatter[i][j]=0;
        }
    }

    //进行二维散点统计

    double xInverval=(pMinMaxX[1]-pMinMaxX[0])/(xScale-1);//波段 X 的
                                                    //统计间隔

    double yInterVal=(pMinMaxY[1]-pMinMaxY[0])/(yScale-1);//波段 Y 的
                                                    //统计间隔

    int xpos=0;
    int ypos=0;
    for(int i=0;i<nh;i++)
    {
        for(int j=0;j<nw;j++)
        {
            xpos= ( pDataX[i*nw+j]-pMinMaxX[0])/xInverval;
            ypos=( pDataY[i*nw+j]-pMinMaxY[0])/yInterVal;
            vecScatter[ypos][xpos]++;
        }
    }
}

```

其中, nBandx 和 nBandy 表示需要统计的波段序号。xScale 和 yScale 为统计间隔数, 一般设置为 256, pMinMaxOutX 和 pMinMaxOutY 为波段的最小值与最大值。vecScatter 为输出的二维散点图数据。

## 2. 二维散点图的可视化显示

二维散点图的显示主要利用 Qwt 提供的 QwtPlotSpectrogram 图元类、QwtPlot 类和 QwtMatrixRasterData 类来实现二维散点图的显示。

QwtPlotSpectrogram 为 Qwt 提供的频谱图图元类, QwtMatrixRasterData 类主要为 QwtPlotSpectrogram 提供频谱图数据。二维散点图显示的实现过程如下:

- (1) 新建一个继承自 QwtMatrixRasterData 类的 SpectrogramData 类
- (2) 新建 SpectrogramData 类并设置数据

```
SpectrogramData *pData=new SpectrogramData();
pData->setValueMatrix(matrixData,ncol);//设置图元数据
pData->setInterval(Qt::XAxis,QwtInterval( pMinMaxX[0],pMinMaxX[1])); //
设置坐标数据
pData->setInterval(Qt::YAxis,QwtInterval(pMinMaxY[0],pMinMaxY[1]));
pData->setInterval(Qt::ZAxis,QwtInterval(0,maxz));
pData->setResampleMode(QwtMatrixRasterData::ResampleMode::BilinearIn
terpolation); //设置采样方式为双线性采样
```

其中, pMinMaxX 为波段 X 的最小值与最大值, pMinMaxY 为 Y 波段的最小值与最大值; maxz 为频数最大值 matrixData 为统计的二位散点图数据。

- (3) 新建一个 QwtPlotSpectrogram 图元类对象并设置图元数据

```
d_spectrogram = new QwtPlotSpectrogram();
d_spectrogram->setData(pData);
```

- (4) 新建一个继承自 QwtPlot 的类 C2dScatterPlot 类, 新建一个 C2dScatterPlot 类的对象, 将 QwtPlotSpectrogram 类对象 d\_spectrogram 添加到 C2dScatterPlot 类中去。

```
d_spectrogram->attach(&m_p2dScatterPlot);// m_p2dScatterPlot 为
//QwtPlot 类对象
replot();//重新绘制
```

二维散点图的显示效果图如下图 4.5 所示:

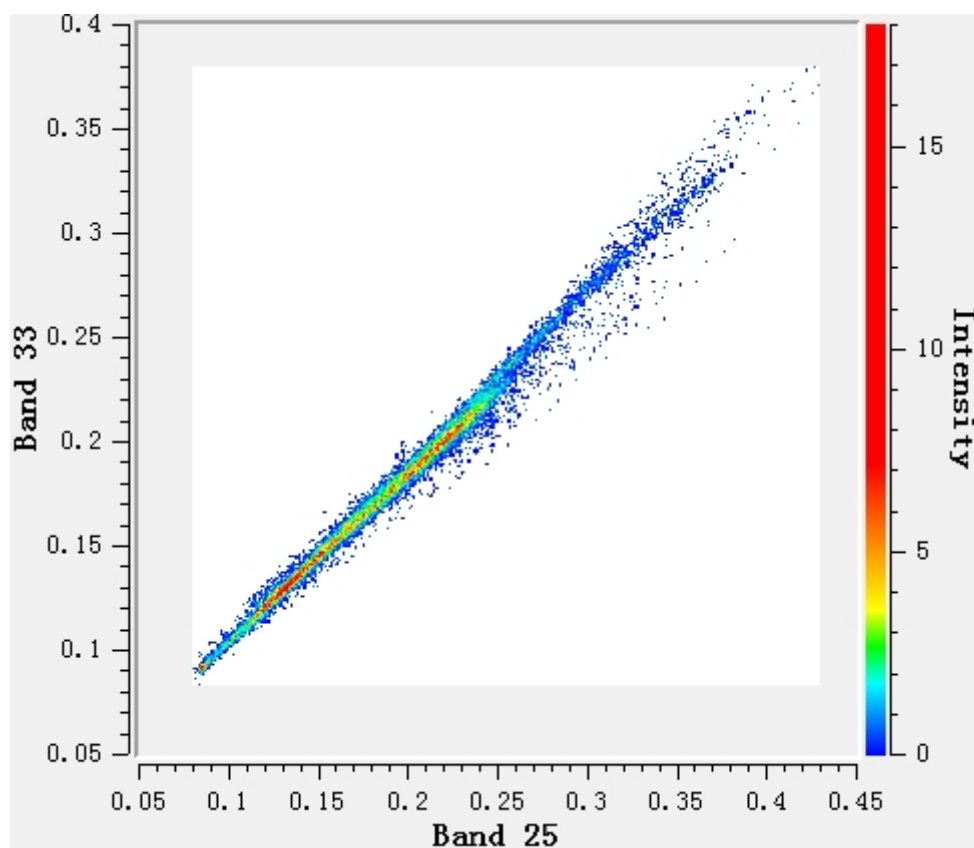


图 4.5 二维散点图显示效果图

### 4.3 岩心成像光谱数据信息提取技术的研究及实现

岩心矿物信息的提取对于矿产勘查具有重要的意义。本文主要研究和实现了光谱吸收指数、光谱角度匹配、改进的光谱度匹配等算法。信息提取主要针对钻孔，需要处理钻孔中的每个岩心成像光谱数据。

#### 4.3.1 光谱吸收指数

矿物在0.4-2.5 $\mu\text{m}$ 波谱范围之间有一系列可用于诊断矿物类型的吸收特征，主要为金属阳离子的电子转移（主要为 $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Fe}^{3+}$ ）和由于 $\text{Mg-OH}$ 、 $\text{Al-OH}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 等分子团的振动而形成的光谱吸收特征。不同的矿物的光谱吸收特征在波峰波谷形状、吸收特征位置、吸收特征宽度、吸收特征深度等特征并不相同。王晋年等<sup>[40]</sup>基于矿物光谱吸收特征建立了光谱吸收指数(SAI)技术进行高光谱矿物填图。图4.6为光谱吸收指数的示意图。

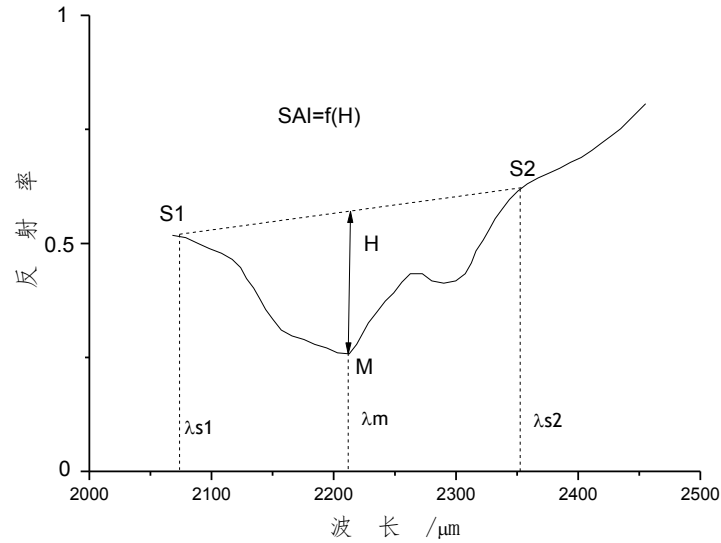


图4.6 SAI示意图

矿物的光谱吸收特征由矿物光谱吸收谷点M、吸收右肩部S1和吸收左肩部S2构成。SAI在本质上表达了地物光谱吸收系数的变化特征<sup>[41]</sup>。SAI计算公式<sup>[40]</sup>为：

$$SAI = \frac{d \times \rho_{s1} + (1 - d) \times \rho_{s2}}{\rho_m} \quad (4-1)$$

式中， $d = \frac{\lambda_{s2} - \lambda_m}{W}$ ， $W = \lambda_{s2} - \lambda_{s1}$ ， $\rho_{s1}$ 和 $\lambda_{s1}$ 为吸收左肩端S1的反射率和波长； $\rho_m$ 和 $\lambda_m$ 为吸收点M的反射率和波长； $\rho_{s2}$ 和 $\lambda_{s2}$ 为吸收右肩端S2的反射率和波长。利用光谱吸收指数可以进行岩心矿物信息提取。要实现光谱吸收指数算法首先要选择光谱吸收左肩波段、光谱吸收点波段和光谱右肩波段并利用GDAL中的RasterIO函数读取这三个波段的数据，然后针对钻孔中的每个岩心成像光谱数据的每个像元数据利用光谱吸收指数的算法进行计算，最后将每个像元计算的数值写入到相应的输出文件中。算法的作用对象是一个钻孔的数据，需要对钻孔中的每个岩心成像光谱数据调用该算法，并将每个岩心成像光谱数据的处理结果输出到对应选择的目录中。

算法实现主要过程如下：

- (1) 读取岩心成像光谱数据的光谱吸收左肩波段、光谱吸收点波段和光谱吸收右肩波段的数据
- (2) 针对岩心成像光谱数据的每个像元调用光谱吸收指数算法
- (3) 针对钻孔中的每个岩心成像光谱数据调用该算法并输出对应的文件

光谱吸收指数的核心代码如下：

```
//创建输出文件
GDALDataset * pOutDataset=
createTiff("GTiff",nw,nh,GDT_Float32,1,strOutPath.toStdString());
//读取左肩波段数据
m_pDataSet->GetRasterBand(bandx)->RasterIO(GF_Read,0,0,nw,nh,(void*)pB
ufferX,nw,nh,(GDALDataType)dataTypeX,0,0);
//读取光谱吸收点波段数据
m_pDataSet->GetRasterBand(bandy)->RasterIO(GF_Read,0,0,nw,nh,(void*)pB
ufferY,nw,nh,(GDALDataType)dataTypeX,0,0);
//读取右肩波段数据
m_pDataSet->GetRasterBand(bandz)->RasterIO(GF_Read,0,0,nw,nh,(void*)pB
ufferZ,nw,nh,(GDALDataType)dataTypeX,0,0);
double d=( pWave[2]- pWave[1])/( pWave[2]- pWave[0]);
    for(int i=0;i<nh;i++)
    {
        for(int j=0;j<nw;j++)
        {

            pout[i*nw+j]=(pBufferX[i*nw+j]*d+(double)pBufferZ[i*nw+j]*(1-d))/
                pBufferY[i*nw+j];
        }
    }
pOutDataset->GetRasterBand(1)->RasterIO(GF_Write,0,0,nw,nh,(void*)pout,n
w,nh,GDT_Float32,0,0);
```

其中，bandx 为光谱吸收左肩波段，bandy为光谱吸收点波段，bandz为光谱吸收右肩波段。pWave为波长数组。strDir为输出文件的目录。图4.7为Al-OH矿物的光谱吸收指数提取效果图,图4.8为提取结果的剖面图。

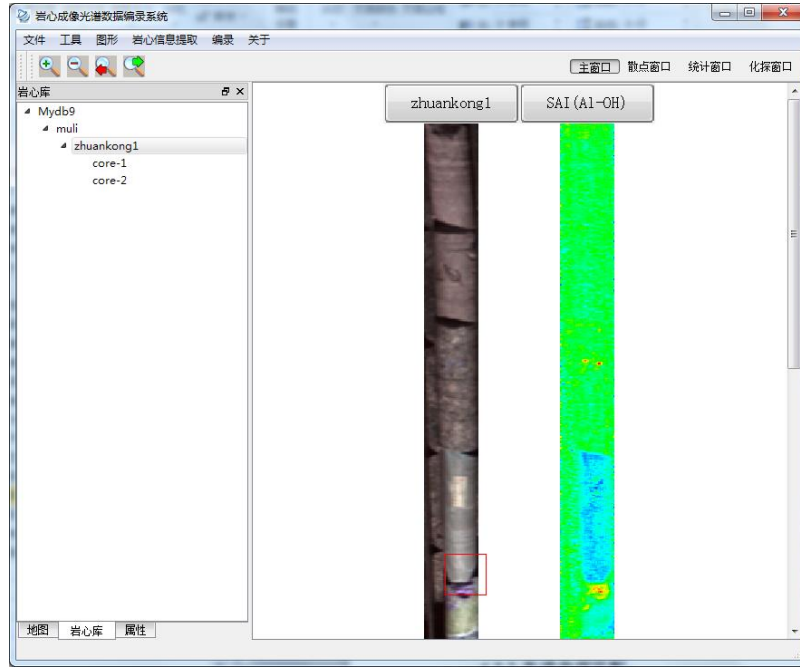


图4.7 Al-OH矿物光谱吸收指数提取效果图。

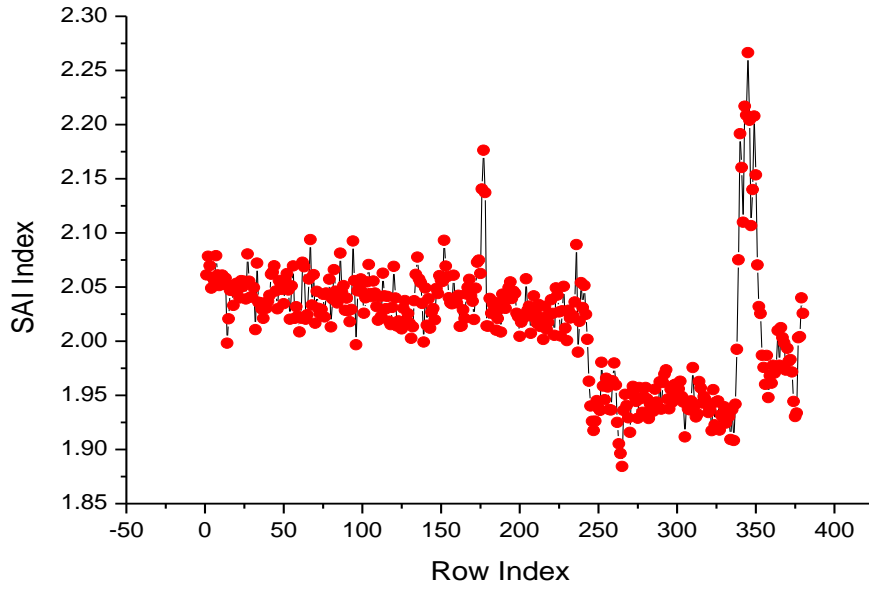


图4.8 Al-OH矿物光谱吸收指数提取结果剖面图（列号31）

### 4.3.2 光谱角度匹配

光谱角 (spectral angle, SA) 是两个具有相同波谱区间的光谱向量在欧氏空间所形成的夹角，如式(4-2)<sup>[42]</sup>所示：

$$\cos \alpha = \frac{\vec{t} \cdot \vec{r}}{\|\vec{t}\| \times \|\vec{r}\|} = \frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left(\sum_{i=1}^{nb} t_i^2\right)^{1/2} \times \left(\sum_{i=1}^{nb} r_i^2\right)^{1/2}} \quad (4-2)$$



式中,  $nb$  为波段数,  $\vec{t} = (t_1, t_2, \dots, t_{nb})$  和  $\vec{s} = (s_1, s_2, \dots, s_{nb})$  分别表示测试光谱向量和参考光谱向量。 $\alpha$  光谱向量在欧氏空间的夹角, 即光谱角。 $\alpha$  的大小范围在  $[0, \pi/2]$  之间,  $\alpha$  值越小表示两光谱向量的相似性越好, 识别和归类精度也就越高。光谱角的大小只和测试光谱和与参考光谱的光谱矢量方向有关, 与辐射亮度无关。图 4-9 为二维欧氏空间的光谱角示意图

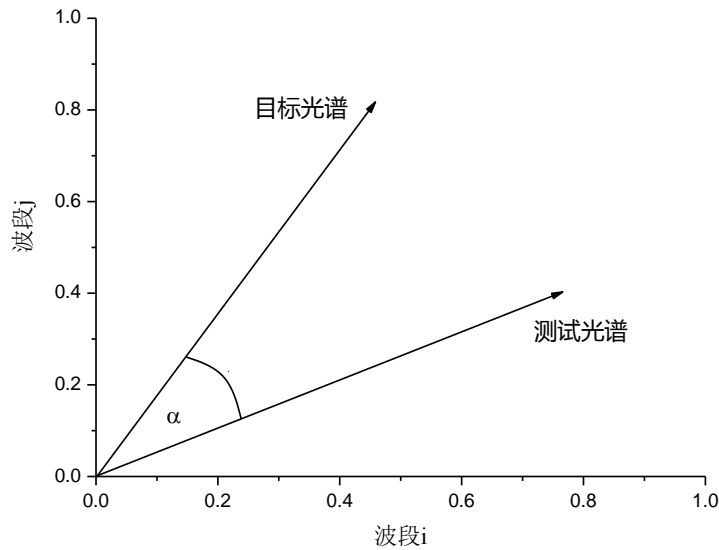


图4-9 二维欧氏空间的光谱角示意图

利用光谱角度匹配选择波谱库中的矿物波谱可以提取目标矿物信息。要实现光谱角度匹配首先要选择参考光谱。然后针对钻孔中的每个岩心成像光谱数据的每个像元的反射率数据利用光谱角度匹配进行计算。最后将每个像元计算的数值写入到相应的输出文件中。算法的作用对象是一个钻孔的数据, 需要对钻孔中的每个岩心成像光谱数据调用该算法, 并将每个岩心成像光谱数据的处理结果输出到对应选择的目录中。

光谱角度匹配主要实现过程如下:

- (1) 利用GDAL的RasterIO函数读取岩心成像光谱数据所有波段的数据
- (2) 读取矿物参考光谱数据
- (3) 针对岩心成像光谱数据的每个像元调用光谱角匹配算法
- (4) 针对钻孔中的每个岩心成像光谱数据调用该算法并输出对应的文件

读取数据等代码在光谱吸收指数功能中已有介绍, 在此不在重复。计算光谱角的核心代码如下:

```

double sum=0;

double sumvecX2=0;

double sumvecY2=0;

int nsize=vecValx.size();

for(int i=0;i<nsize;++i)
{
    sum=sum+vecValx[i]*vecValY[i];

    sumvecX2=sumvecX2+vecValx[i]*vecValx[i];

    sumvecY2=sumvecY2+vecValY[i]*vecValY[i];

}

double samval=0;

samval=sum/(std::sqrt(sumvecY2)*std::sqrt(sumvecX2));

double angle=std::acos(samval);
    
```

其中 vecValx 为标准光谱的光谱值, vecValY 像元光谱曲线数据, angle 为光谱角。

图 4-10 绢云母矿物提取效果图。图 4-11 为列号为 31 的光谱角度匹配提取绢云母矿物结果剖面图, 由于光谱角越小目标光谱与测试光谱的相似性越好, 故对光谱角进行了取反。

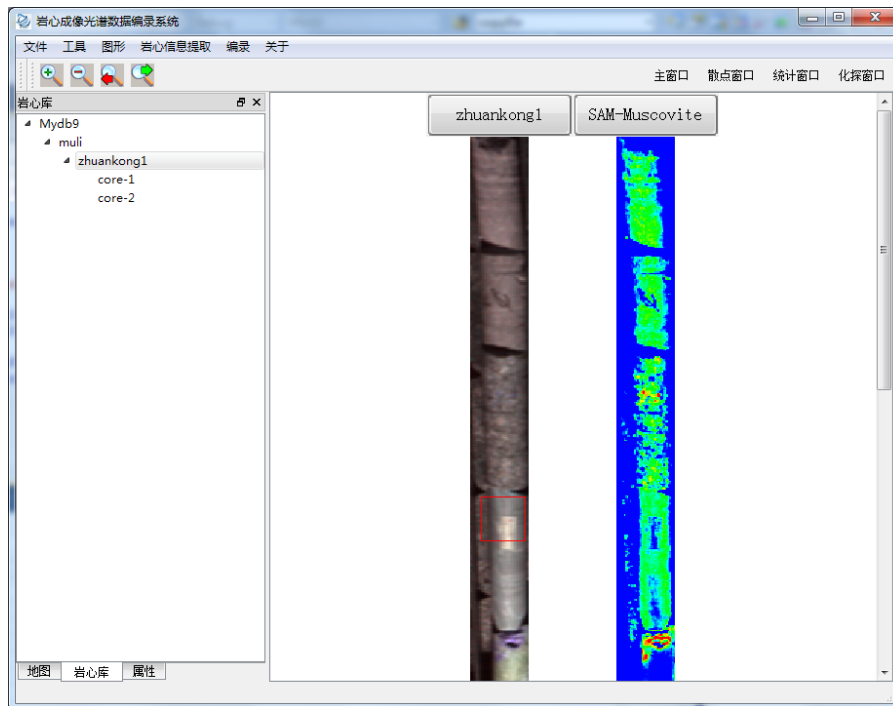


图 4-10 光谱角度匹配提取绢云母矿物效果图

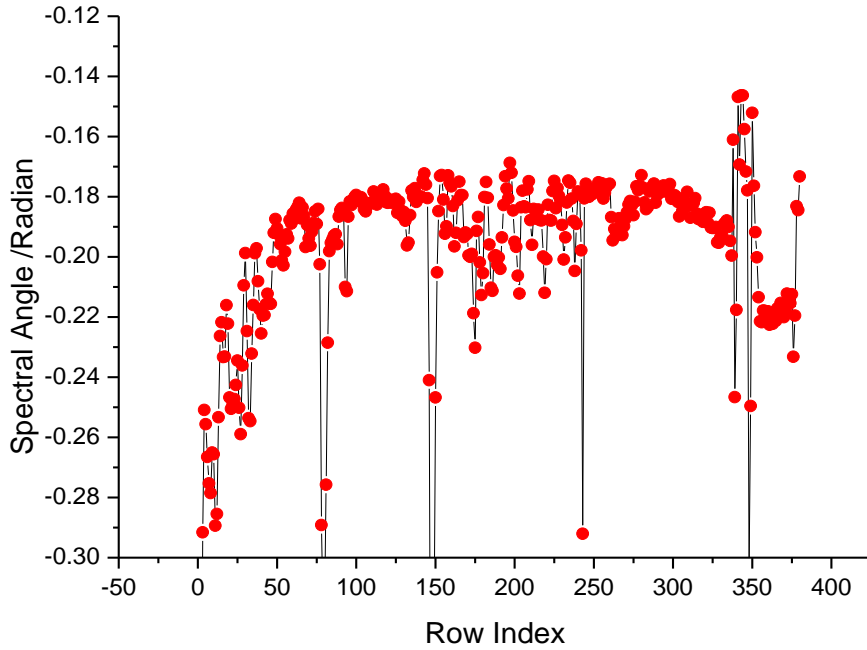


图 4-11 光谱角度匹配提取绢云母矿物结果剖面图（列号 31）

#### 4.3.3 改进的光谱角度匹配

光谱角度匹配(Spectral angle mapping, SAM)是一种基于光谱曲线整体相似性的算法,在高光谱遥感信息分类中应用广泛<sup>[43-48]</sup>。光谱角度匹配利用整个光谱曲线进行计算,是一种全局性的描述指标,对相似光谱曲线的地物具有较差的区分能力<sup>[47-48]</sup>。目前主要通过设置局部区间权重和选取波段组合的方法对光谱角度匹配进行改进。何中海等提出了权重光谱角度匹配(WSAM),该算法在局部特征设置权重增大相似光谱曲线之间的差异,在高光谱矿物填图应用中取得了较好的效果<sup>[49]</sup>。吕银亮等通过应用部分波段组合计算光谱角以达到对局部特征识别的目的,该方法成功应用于小麦产量的监测研究<sup>[50]</sup>。其它学者也针对光谱角度匹配进行了不少改进。唐宏等深入分析了光谱角度匹配的误差源,提出了多种改进的光谱角度匹配<sup>[51]</sup>。谷延峰等提出了一种基于正规化角度的光谱角度匹配(AR-SM)并将核函数引进了该算法(Kernel-based AR-SM),取得了较好的高光谱目标探测效果<sup>[52]</sup>。但是,地物光谱存在不确定性的问题<sup>[53-54]</sup>,本文针对这一问题提出了一种考虑了地物光谱不确定性影响的光谱角度匹配,以提高地物识别的精度。

实际情况中,由于地物光谱不确定性的影响,同种地物的测试光谱与参考光谱往往会有一定程度的光谱差异。光谱角度匹配在计算两条光谱曲线的相似性

时并没有考虑地物光谱不确定性的影响，因此往往会不能正确识别出目标地物。为了克服地物光谱的不确定性，进行如下改进：对于测试光谱设置一个光谱差异向量  $\vec{c}$ ，以弥补地物光谱不确定性的影响。原光谱角计算公式变化为式（4-3）：

$$\cos \alpha' = \frac{(\vec{t} + \vec{c}) \cdot \vec{r}}{\|\vec{t} + \vec{c}\| \times \|\vec{r}\|} \quad (4-3)$$

为了简化模型，现假设光谱差异向量  $\vec{c}$  的各分量大小都为一相等的光谱差异量  $n^{[12]}$ 。问题转化为：在  $\cos \alpha'$  最大的情况下，求取  $n$  值的大小。利用式（4-3）对  $n$  进行求导，并令导函数等于零，最后求出的  $n$  值的表达式如式（4-4）。这样就可以将式（4-4）值代入式（4-3），求得考虑地物光谱不确定性情况下的测试光谱向量和参考光谱向量之间的光谱角。

$$n = \frac{(\vec{t} \cdot \vec{s}) \times \sum t_i - \sum S_i \times \sum t_i^2}{\sum t_i \times \sum S_i - nb \times (\vec{t} \cdot \vec{s})} \quad (4-4)$$

要实现改进的光谱角度匹配首先要选择参考光谱。然后针对钻孔中的每个岩心成像光谱数据的每个像元的反射率数据利用改进的光谱角度匹配进行计算。最后将每个像元计算的数值写入到相应的输出文件中。算法的作用对象是一个钻孔的数据，需要对钻孔中的每个岩心成像光谱数据调用该算法，并将每个岩心成像光谱数据的处理结果输出到对应选择的目录中。

改进光谱角度匹配主要实现过程如下：

- （1）利用GDAL的RasterIO函数读取岩心成像光谱数据所有波段的数据
- （2）读取矿物参考光谱数据
- （3）针对岩心成像光谱数据的每个像元调用改进的光谱角匹配算法并输出对应的文件

改进光谱角度匹配的核心代码如下：

```
for(int i=0;i<nsize;++i)
{
    sum=sum+vecValx[i]*vecValY[i];
    sumX+=vecValx[i];
    sumY+=vecValY[i];
    sumvecX2=sumvecX2+vecValx[i]*vecValx[i];
}
```

```

//sumvecY2=sumvecY2+vecValY[i]*vecValY[i];
}
//求出光谱差异量n
double n=(sum*sumX-sumY*sumvecX2)/(sumX*sumY-nsite*sum);
QVector<double> vecXMy;
vecXMy.resize(nsize);
for(int i=0;i<nsize;i++)
    vecXMy[i]=vecValx[i]+n;
double angle= sam(vecXMy,vecValY);//考虑光谱差异量后
//在调用光谱角算法

```

其中  $\text{vecXMy}$  为加上了光谱差异量的标准光谱的光谱值,  $\text{vecValY}$  为像元光谱曲线数据,  $\text{angle}$  为考虑地物光谱不确定性情况下的光谱角。图 4-10 改进光谱角度匹配提取绢云母矿物效果图。对比图 4-13、图 4-11 和图 4-9, 可以发现改进角光谱匹配结果与光谱吸收指数结果较为一致。图 4-13 的最高值为-0.148104 弧度, 图 4-11 的最高值为-0.152107 弧度, 与相比光谱角匹配相比改进光谱角匹配结果提高了目标光谱与测试光谱的匹配效果。

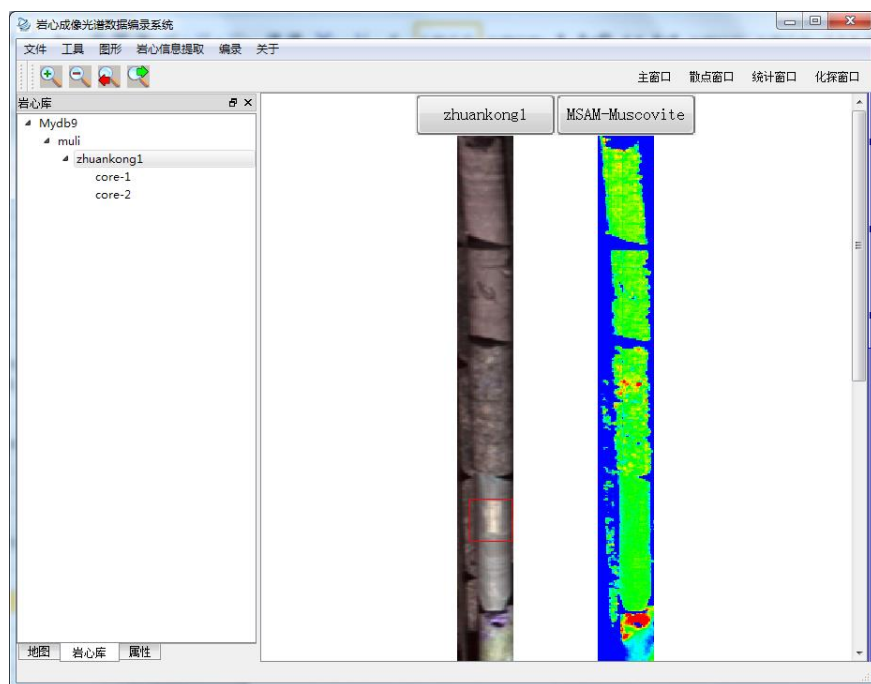


图 4-12 改进光谱角度匹配提取绢云母矿物效果图

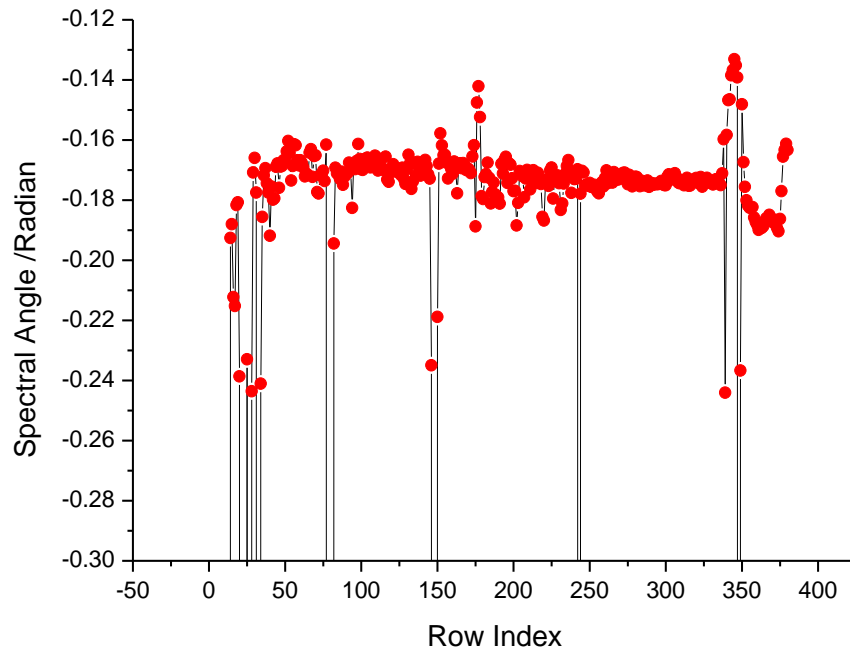


图 4-13 改进光谱角度匹配提取绢云母矿物结果剖面图（列号 31）

#### 4.4 岩心成像光谱数据编录系统的实现

在进行了完整的分析、设计与关键技术突破的基础上，实现了岩心成像光谱数据的原型系统。系统提供了基本的岩心成像光谱数据的预处理功能、编录功能、可视化功能、信息提取等功能。实现了岩心成像光谱数据的预处理、编录、可视化和信息提取。以下图片显示了原型系统的效果。

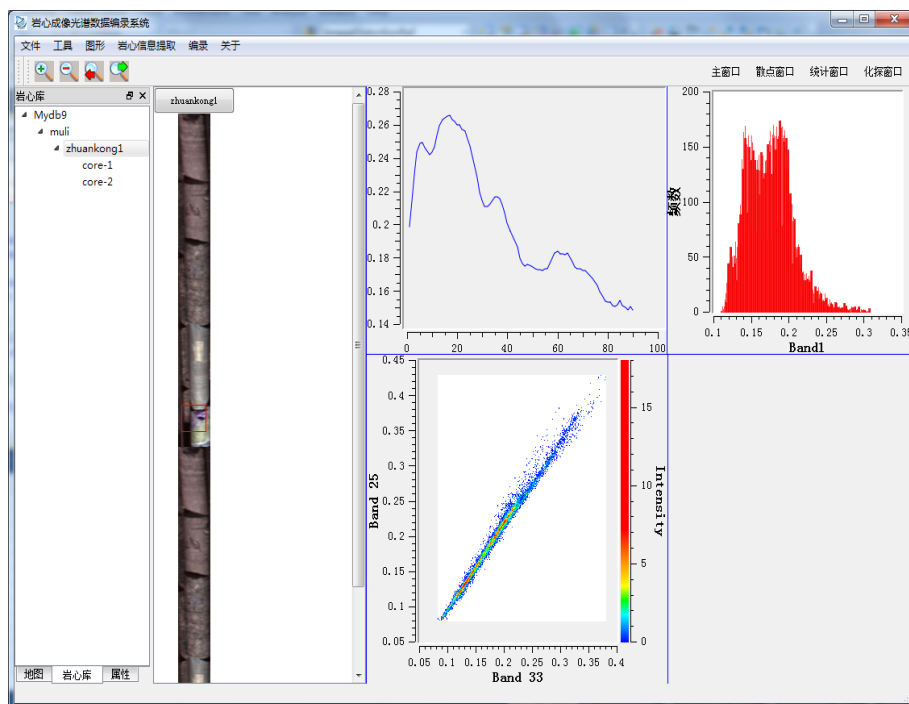


图 4-14 岩心成像光谱数据编录系统主界面

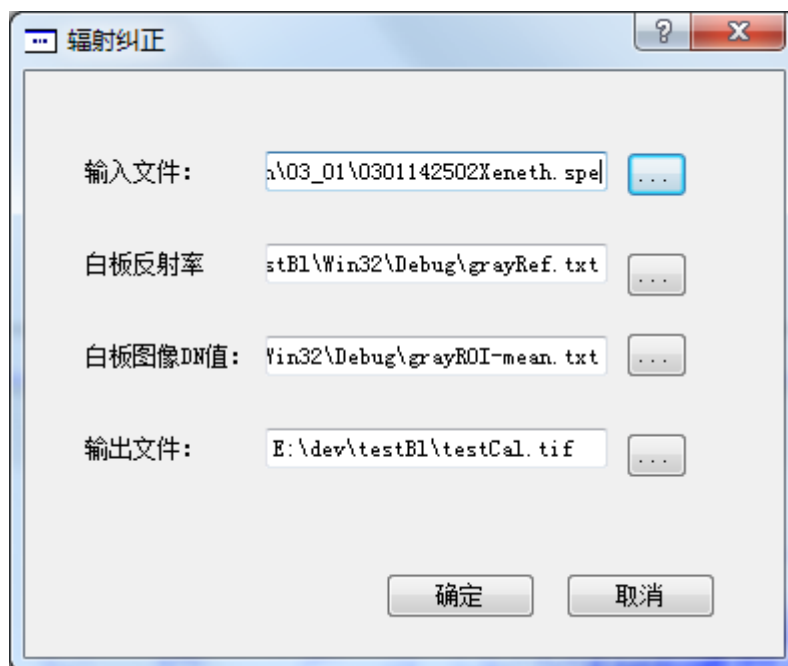


图 4-15 岩心成像光谱数据编录系统辐射纠正界面

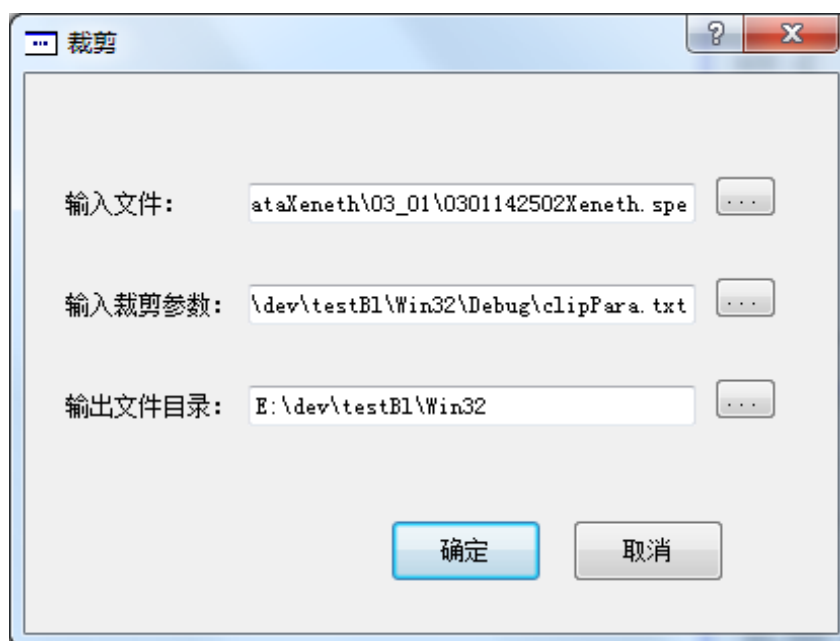


图 4-16 岩心成像光谱数据编录系统裁剪界面

岩心成像光谱数据编录

区域信息

编号	名称	描述信息
1 10001	muli	muli district

添加

删除

钻孔信息

编号	名称	描述信息	纬度	经度	编号
1 10001	zhuankong1	muli-zhuanko...	45.2	90.6	10001

添加

删除

岩心信息

编号	名称	深度	长度	描述信息	编号
1 10001	core-1	0	10	core_des	10001
2 10002	core-2	10	20	core_des	10001

添加

删除

确定

取消

图 4-17 岩心成像光谱数据编录系统编录界面

直方图

统计最小值

统计最大值

统计波段

band 1

输入文件:

/dev/testB1/Win32/Debug/mydb8/10001/10001/10001

...

确定

取消

图 4-18 直方图参数界面





图 4-19 二维散点图参数界面

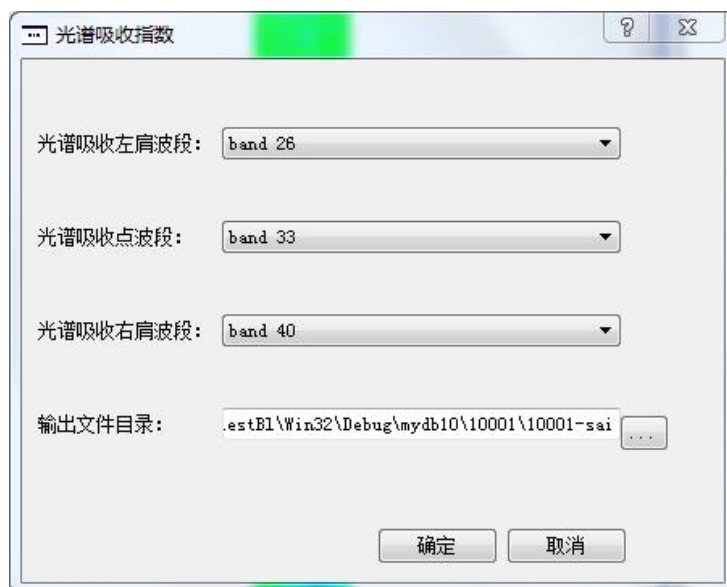


图 4-20 光谱吸收指数界面



图 4-21 光谱角度匹配界面



图 4-22 改进的光谱角度匹配界面

## 4.5 本章小结

本章主要研究了岩心成像光谱数据的数据编录技术、影像浏览和光谱曲线显示等可视化技术及矿物信息提取技术。提出了基于存储过程的数据出入库方法，通过将岩心成像光谱数据导出到文件夹的方式，实现了岩心成像光谱数据的浏览。基于 Qwt 研究并实现了光谱曲线、直方图和二维散点图的显示。利用 GDAL 研究并实现了岩心成像光谱数据的矿物信息提取。通过这些方法实现了岩心成像光谱数据的编录、可视化和信息提取。在选择的开发环境里，实现了岩心成像光谱数据编录系统的原型系统。

## 第五章 结论与展望

本文以建立岩心成像光谱数据编录系统为最终目标，主要完成了以下两个方面的工作：一是进行岩心成像光谱数据编录系统的设计，即第一阶段的研究。本文借鉴了岩心高光谱编录系统和高光谱数据库的研究成果，对岩心成像光谱数据编录系统进行分析与设计。二是在第一阶段工作的基础上研究岩心成像光谱数据编录系统的关键技术，设计并实现了岩心成像光谱数据的编录、浏览及光谱曲线的显示、直方图和二维散点图的统计和信息提取等功能，最后开发了岩心成像光谱数据编录原型系统，为岩心成像光谱数据编录系统的实际应用奠定了一定的基础。

### 5.1 结论

1. 在深入分析岩心成像光谱数据编录系统的功能需求和业务流程、全面设计其体系结构和功能模块以及仔细选择开发环境的基础上，根据岩心组分成像光谱系统的数据的特点和系统应用的需求，提出了以 GeoRaster 对象为核心的岩心成像光谱数据存储模型。研究表明，该存储模型能够为岩心成像光谱数据编录系统的编录和可视化提供有效的支持。

2. 基于岩心成像光谱数据存储模型，提出了基于存储过程的数据入库方法，该方法实现了高光谱数据图谱合一的存储；提出基于存储过程的数据出库方法，该方法实现了从数据库中获取岩心成像光谱数据。在 Qt 开发工具和 C++ 的支持下，研究了岩心成像光谱数据的可视化。研究表明，数据浏览、光谱曲线显示和直方图统计等方法有效实现了岩心成像光谱数据的可视化。

3. 开发了岩心成像光谱数据编录原型系统，实现了岩心成像光谱数据的预处理功能、编录功能、直方图统计等可视化分析功能和光谱吸收指数等信息提取功能，为岩心成像光谱数据编录系统的实用化奠定了基础。

### 5.2 展望

虽然本文对岩心成像光谱数据编录系统进行了比较深入的研究和实现，但是由于时间和条件的限制，岩心成像光谱数据编录系统离一个功能完善、性能稳定的系统还有不小的差距，在岩心成像光谱数据编录系统的研究上，本文仅仅是拉开了万里长征的序幕，还有很多关键的东西有待研究。展望未来，

应该从以下方面进一步深入和改进本文的研究：

1. 岩心成像光谱数据编录系统的功能完善。本原型系统基本实现了岩心成像光谱数据的预处理、编录、影像与光谱的显示和信息提取等功能，尚有待对结果的统计分析功能和系统管理等功能尚未完成，在以后的研究中，应逐步完善这些功能。

2. 岩心成像光谱数据编录系统性能的改善。本原型系统在研发过程中，将侧重点放在了主要功能的实现上，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，应进一步研究如何能使系统的性能有更大的改善。

3. 数据存储系统的改善。未来将需要对大量的岩心成像光谱数据进行存储，在后续的研究中，需要结合最新的存储技术、存储系统如分布式存储、集群存储、对象存储等，充分发挥Oracle数据库的优势，来对存储系统进行改进。

## 参考文献

- [1]童庆禧, 张兵, 郑兰芬.高光谱遥感[M].高等教育出版社, 2006.
- [2]Cloutis E A. Review Article Hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(12): 2215-2242.
- [3]浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M].高等教育出版社, 2000.
- [4]燕守勋, 张兵, 赵永超, 等. 高光谱遥感岩矿识别填图的技术流程与主要技术方法综述[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(1): 52-63.
- [5]Kruse F A, Boardman J W, Huntington J F. Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2003, 41(6): 1388-1400.
- [6]Hubbard B E, Crowley J K. Mineral mapping on the Chilean-Bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: Data dimensionality issues and solutions[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99(1): 173-186.
- [7]王晋年, 郑兰芬. 成象光谱图象光谱吸收鉴别模型与矿物填图研究[J]. 环境遥感, 1996, 11(1): 20-31.
- [8]甘甫平, 王润生, 杨苏明. 西藏 Hyperion 数据蚀变矿物识别初步研究[J]. 国土资源遥感, 2002, 4: 44-50.
- [9]Neville R A, Staenz K, Szeredi T. Mineral reflectances extracted from SFSI imagery in Nevada[C]. Proceedings of SPIE The International Society For Optical Engineering, 1997: 147-157.
- [10]刘庆生, 燕守勋, 马超飞, 等. 内蒙哈达门沟金矿区山前钾化带遥感信息提取[J]. 遥感技术与应用, 1999, 14(3): 7-11.
- [11]甘甫平, 王润生, 郭小方, 等. 利用成像光谱遥感技术识别和提取矿化蚀变信息——以河北赤城—崇礼地区为例[J]. 现代地质, 2000, 14(4): 465-469.
- [12]王晋年,李志忠,张立福,童庆禧. “光谱地壳”计划——探索新一代矿产勘查技术[J]. 地球信息科学学报,2012,03:344-351.
- [13]左悦. 地质勘查钻孔岩芯信息多媒体数据库管理系统[D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2006.
- [14]杨国防. 岩心光谱测量与蚀变矿物信息提取[D]. 东华理工大学, 2012.

- [15]Kruse F A. Identification and mapping of minerals in drill core using hyperspectral image analysis of infrared reflectance spectra[J]. International journal of remote sensing, 1996, 17(9): 1623-1632.
- [16]刘波. 基于地面成像光谱系统的植物信息提取研究[D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2010.
- [17]黄艳菊, 张杰林, 王俊虎. 钻探岩心高光谱数据管理与分析系统的构建[J]. 世界核地质科学, 2010, 27(003): 159-163.
- [18]Dramatic new core logging system[EB/OL].  
[http://www.amira.com.au/documents/Events/core\\_logging.asp](http://www.amira.com.au/documents/Events/core_logging.asp)
- [19]Logging cores just got faster[EB/OL]. <http://www.abc.net.au/science/newsstories/s509234.htm>
- [20]<http://www.spectra-map.co.uk>
- [21]<http://Mineng.com/ana/35.html>
- [22][http://www.rcom-bremen.de/English/Multi-Sensor\\_Core\\_Logger.html](http://www.rcom-bremen.de/English/Multi-Sensor_Core_Logger.html)
- [23]胥燕辉. 铁矿岩心高光谱编录初探[J]. 地质找矿论丛, 2006, 21(s): 113-117.
- [24]胥燕辉, 田庆久. 磁铁石英岩型铁矿岩心光谱编录研究[J]. 国土资源遥感 (3): 70-73.
- [25]张杰林, 黄艳菊, 王俊虎, 等. 铀矿勘查钻孔岩心高光谱编录及三维矿物填图技术研究[J]. 铀矿地质, 2013, 29(4): 249-255.
- [26]张雄飞. 网络环境下高光谱数据库构建及其应用实践[D]. 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.
- [27]李兴. 高光谱数据库及数据挖掘研究[D]. 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.
- [28]覃环虎, 张立福, 刘凯. 高光谱影像库的数据存取技术研究[J]. 计算机工程, 2012, 38(16): 65-69.
- [29]向娟, 李钢. 高光谱遥感影像管理系统的设计与实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2008(05).
- [30]王焕宝. 多维数据库研究[J]. 芜湖职业技术学院学报, 2001, 3(1): 19-20.
- [31]张宇, 庄晋林. 面向对象设计原则和设计模式的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2007, 28(1): 63-65.

- [32]李英军, 马晓星, 蔡敏, 等. 设计模式: 可复用面向对象软件的基础[J]. M1, 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [33]窦风云. 基于 Oracle 数据库的海量空间信息系统的优化[D]. 天津大学, 2006.
- [34]张兴财, 杨康, 崔向. 基于 ARM 的嵌入式 LINUX 系统中 GUI 的研究和实现[J]. 沈阳理工大学学报, 2007, 25(5): 23-26.
- [35]白继伟. 基于高光谱数据库的光谱匹配技术研究[D]. 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2002.
- [36]孙婷, 张立朝, 唐汉松, 等. 基于 Oracle 的高光谱影像数据库研究[J]. 北京测绘, 2007(02): 1-4.
- [37]宋国兵, 陈奇. 文件数据的数据库 Blob 存储及效率分析[J]. 计算机工程与设计, 2010(021): 4625-4627.
- [38]张远飞, 袁继明, 杨自安, 等. 基于物理意义的二维散点图类型划分与遥感蚀变信息提取[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(2): 57-62.
- [39]Warmerdam F. The geospatial data abstraction library[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 87-104.
- [40]王晋年, 郑兰芬. 成象光谱图象光谱吸收鉴别模型与矿物填图研究[J]. 环境遥感, 1996, 11(1): 20-31.
- [41]苏红军, 杜培军. 高光谱数据特征选择与特征提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2006, 4: 003.
- [42]Baugh W M, Kruse F A, Atkinson Jr W W. Quantitative geochemical mapping of ammonium minerals in the southern Cedar Mountains, Nevada, using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 292-308.
- [43] Cho M A, Debba P, Mathieu R, et al. Improving discrimination of savanna tree species through a multiple-endmember spectral angle mapper approach: Canopy-level analysis[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2010, 48(11): 4133-4142.
- [44] 张良培, 张立福. 高光谱遥感[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [45] Kruse F A, Lefkoff A B, Boardman J W, et al. The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data[J]. Remote sensing of environment, 1993, 44(2): 145-163.

- [46] 冯维一, 陈钱, 何伟基, 等. 基于三维光谱角统计的光谱图像信息提取方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 5: 034.
- [47] 朱再春, 陈联裙, 张锦水, 等. 基于信息扩散和关键期遥感数据的冬小麦估产模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 187-193.
- [48] Park B, Windham W R, Lawrence K C, et al. Contaminant classification of poultry hyperspectral imagery using a spectral angle mapper algorithm[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(3): 323-333.
- [49] van der Meer F. The effectiveness of spectral similarity measures for the analysis of hyperspectral imagery[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2006, 8(1): 3-17.
- [50] Crosta A P, Sabine C, Taranik J V. Hydrothermal alteration mapping at Bodie, California, using AVIRIS hyperspectral data[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 309-319.
- [51] 何中海, 何彬彬. 基于权重光谱角制图的高光谱矿物填图方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2200-2204.
- [52] 吕银亮, 李少昆, 王克如, 等. 基于改进光谱角算法的小麦产量监测研究[J]. 新疆农业科学, 2011, 48(001): 1-5.
- [53] 唐宏, 杜培军, 方涛, 等. 光谱角制图模型的误差源分析与改进算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(8): 1180-1183. Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(8): 1180-1183.
- [54] Gu Y, Wang C, Wang S, et al. Kernel-based regularized-angle spectral matching for target detection in hyperspectral imagery[J]. Pattern Recognition Letters, 2011, 32(2): 114-119.
- [55] 唐攀科, 王润生, 杨苏明等. 成像光谱地物识别影响因素的不确定性浅析--以矿物识别为例[J]. 地质与勘探, 2006, 42(2): 74-78.
- [56] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 1981, 86(B4): 3039-3054.



## 致 谢

研究生毕业之期即将到来,不禁感慨光阴如白驹过隙转眼即逝。研究生期间,得到了众多师友的帮助与关怀,在此先表示最诚挚的感谢!

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拓者。童老师知识渊博、治学严谨、视野广阔、德艺双馨,给我产生了很大的影响,愿在您引领之下我国的高光谱遥感事业取得更大的成就!

衷心感谢我的导师张立福老师,感谢老师平时耐心细致的指导。老师严谨的治学态度、踏实的工作作风、亲切的待人风格和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。在我毕业选题和写作小论文的过程中,老师多次主动关心并与我进行讨论,倾注了老师大量的心血。大恩不言谢,学生唯有更加勤奋努力,才不会辜负您的栽培与期望。

衷心感谢郑兰芬研究员和王晋年研究员。郑老师和王晋年老师多次参加我们的学术交流会,他们在工作、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。

感谢张霞老师、王树东老师、吴太夏师兄、杨杭师兄、黄长平师兄、张红明师兄、付东杰师兄和岑奕师姐所给予的关心和帮助,以及在工作中所给予的大量支持、帮助、关心和理解。

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。因为有你们,我的研究生生活才会如此的丰富多彩,他们是:帅通、段依妮、孙雪健、赵恒谦、张旭凯、陈小平、胡顺石、王倩、尚坤、李晶宜、姜海玲、孙雪剑、刘凯、赵恒谦、张旭凯、丰明博、朱海涛、张鹏、王强、庄智、余晓君、李雪珂、王桂珍、石婷婷、孙艳丽、李瑶和陈浩。特别感谢帅通师兄和孙雪健师兄在我碰到疑问的给予的耐心解答。

感谢研究生处吴晓清老师和杨硕老师、遥感学报编辑部阎珺老师和所办路遥老师在学习和工作中给予的支持和帮助。

最后,我要衷心感谢我的父母和亲人,父母的养育之恩,无私的关爱,无限的宽容和无尽的支持,是我多年来一直不断拼搏奋进的动力。感谢我的亲人们对我的关爱和帮助;感谢奶奶和外婆对我的呵护和慈爱。

感谢所有关心和帮助过我的人们!衷心祝愿我国的遥感事业取得更大的成就!