

机载激光雷达技术在滑坡调查中的应用

—以三峡库区张家湾滑坡为例

杜磊¹, 陈洁^{1, 2}, 李敏敏¹, 李京¹, 高子弘¹

(1、中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2、中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: 机载激光雷达 (LiDAR) 技术具有受天气干扰小、能穿透一定厚度植被获取地表信息和数据处理过程相对简单等优势。通过与定位定向系统 (position orientation system, POS) 集成, 机载激光雷达点云数据可快速生成精细数字高程模型 (digital elevation model, DEM)。DEM 是滑坡调查与监测的一种基础图件, 其精细程度可直接反映地表形态的微小变化。通过 DEM 可在三维环境下准确地对滑坡特征参数进行定量分析。利用 LiDAR 技术对湖北省秭归县张家湾滑坡进行了识别与参数提取的研究和应用: 首先利用航带平差法和不规则三角格网加密对获取的机载激光点云数据进行检校与滤波处理, 制作出高精度 DEM 成果; 然后, 通过 DEM 生成的山体阴影图、坡度图和地表粗糙度图, 实现了对滑坡体的定性定量分析; 最后完成对分析结果的评估。数据结果表明, 机载激光雷达生成的高精度 DEM 可以清晰地识别出滑坡, 并能够准确地对各种滑坡要素进行定量提取和分析。

关键词: 机载激光雷达; 数字高程模型; 航带平差; 滑坡识别; 定量分析

中图分类号: TP 701

文献标志码: A

文章编号: 1001-070X (20xx) 00-0000-00

0 引言

滑坡作为一种全球范围内普遍存在而且频繁发生的地质灾害现象, 对其规律性进行研究和预警一直是地学科研究热点之一。目前滑坡调查的手段主要有野外实地勘查和遥感调查 2 种, 前者作为传统的工作方法, 可近距离现场研究滑坡形态, 圈定滑坡要素, 但其工作耗时久、效率低, 抵达调查区域也受限较多; 卫星遥感技术支持下的滑坡调查, 能快速获取大尺度、多时相的数字遥感数据, 现已形成一套较为完善的“数字滑坡”识别技术^[1]。但该技术的不足之处在于受天气影响较大、且对被植被覆盖的滑坡识别能力有限, 源数据生成的数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 精度较低, 难以刻画地表微小变形的精细特征。

机载激光雷达作为一种主动式航空遥感技术, 理论上可不受天气限制, 其发射的激光点云能够穿透一定厚度的植被并获取地表信息, 数据采集方式相对于航空摄影技术来说能在很大程度上减弱地形切割带来的阴影影响, 构建的 DEM 垂直精度可达 10 cm, 可以精确表达微地貌地形特征^[2], 具备提升滑坡体识别精度的条件。近年来, 美国地质调查局及欧洲太空局等机构均开展了基于机载激光雷达衍生 DEM 的滑坡识别研究, 取得了一定的进展^[3-4]。包括: 基于高精度 DEM 计算滑坡坡度、坡向、地表粗糙度、半方差、分形特征等; 利用傅里叶变换、小波分析等算法开展地形精细参数特征研究^[5], 并探索滑坡分布与上述因子的内在关系。以上研究充分显示了机载激光雷达技术在滑坡调查中的应用潜力。

本文基于机载激光雷达技术获取了试验区点云数据, 通过对点云数据先后开展检校、滤波和分类等数据处理, 构建试验区精细的 DEM 产品, 再利用这些 DEM 产品对试验区的滑坡体进行识别以及重要参数提取, 取得了较好的应用效果。

1 研究区概况和数据源

三峡库区一直以来是我国滑坡等地质灾害的频发区和重灾区。其中张家湾滑坡是库区较为典型的一处滑坡。它位于童庄河右岸, 隶属湖北省宜昌市秭归县郭家坝镇头道河村一组, 是一倾向长江的单斜顺向滑坡, 与入江口相距 1.5 km, 由 6 个滑坡体组成的滑坡群。滑坡体总体前缘高程约 120 m, 后缘高程为 290 m, 分布面积约 $29 \times 10^4 \text{ m}^2$, 总体积约 $555 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡区坡面起伏, 后侧山顶高约 500 m, 前缘为三峡库区水面, 中部及前缘坡面相对平缓, 坡度 $15^\circ \sim 25^\circ$, 后缘及后侧山坡较陡, 坡度 $25^\circ \sim 35^\circ$, 北侧为一堆积层缓坡, 南侧为覆盖层陡坡。区内出露的地层主要为侏罗系砂页岩及三迭系中统巴东组 (T2b) 砂岩、泥灰岩等半坚硬岩类组成。

遥感数据源选择 2009 年获取的巴东—秭归地质灾害易发多发重点区 $1\ 000 \text{ km}^2$ LiDAR 激光数据作为研

基金项目: 中国地质调查局项目, 《数字航空遥感摄影技术规程》制定 (项目编号: 121201108000150012-10) 与三峡库区航空遥感地质调查 (DD20179601);
第一作者简介: 杜磊 (1987—), 男, 长期从事航空遥感及航空遥感地质应用研究。E-mail: 781943277@qq.com

究对象,其真实记录了三峡库区自移民迁建、175 m 水位蓄水和 2008 年汶川震后的坝体微变化,具有开展库区库岸稳定性、地质灾害和生态地质环境变化调查等工作的潜力。

2 技术流程

针对现有滑坡调查技术在复杂地质条件下难以识别滑坡,以及传统基于 DEM 数据识别滑坡方法存在的问题,本文提出了一种从机载激光雷达构建的精细 DEM 中表征滑坡地表特征参数的技术方法,实现了滑坡边界的自动识别和相应参数提取。新方法步骤如下:

- 1) 针对目标区域制定作业计划,使用 POS 辅助机载激光雷达系统对目标区域开展航空遥感数据采集;
- 2) 对飞行获取的机载激光雷达点云数据先后进行检校、滤波和分类等数据处理,得到消除植被覆盖信息的纯地表精细 DEM;
- 3) 从 DEM 中分析、提取出地貌特征并建立纹理特征参数,形成特征参数文件;
- 4) 利用计算机智能分类算法计算目标区域中已知滑坡像元以及非滑坡像元特征参数,结合上一步获取的特征参数文件,确定最优特征参数;
- 5) 选取目标区域内的部分已知滑坡像元和非滑坡像元作为算法训练集,不断优化训练集各元素,综合确定最优特征参数组合。利用智能分类算法预测训练集中的像元属性同时进行精度评价,获得符合预设精度条件的平衡系数;
- 6) 利用获取平衡系数的训练集以及最优参数组合,训练分类模型,预测已知滑坡像元和非滑坡像元的数据集,并分别计算数据集的平均用户精度、平均生产者精度和总体精度;
- 7) 若所计算的精度满足设定阈值要求,则使用满足该平衡系数和最优特征参数组合的智能分类模型预测整个工作区,再采用边缘检测算子计算滑坡边界,最终实现滑坡识别;
- 8) 对识别出的滑坡像元集,通过对应的精细 DEM 提取出滑坡坡度和地表粗糙度等滑坡参数,并完成定量分析。

3 数据处理与 DEM 制作

3.1 数据获取

2009 年 4 至 6 月,使用运 5-B 型飞机作为航空遥感平台,搭载 Leica Geosystem 公司制造的 ALS50-II 机载激光雷达系统,获取目标区域遥感数据资料,包括机载激光点云数据、机载 GPS 数据、机载 IMU 数据和地面 GPS 参考站定位数据等。其中,机载激光点云数据包含激光测距、测角和多次回波强度等信息。获取的原始数据先进行了数据解算、系统误差检校等数据预处理,得到了含地物三维坐标信息的地表激光点云数据。

此次 ALS50-II 机载激光雷达系统飞行相对航高约为 1 000m,航线旁向重叠度为 30%~39%,飞行地速为 150~180 km/h,机载激光空中扫描角度为 45° ,其最大扫描频率设置为 45 Hz,机载激光平均点云密度为 3.2 个/ m^2 。

3.2 点云解算

受系统误差和偶然误差影响,机载激光雷达系统获取的原始激光点云坐标存在系统偏差,都先通过数据检校消除了误差。机载激光雷达点云数据检校一般指检校侧滚角、俯仰角和航偏角 3 个安置角和测距误差。

三个安置角的检校方法如下:首先对检校场的数据开展人工初检校,分别获取较为准确的 3 个安置角检校参数;然后对初检校的机载激光雷达数据开展进一步精检校,获取检校参数的改正值。将上述两次检校参数相加得到安置角最终的检校参数。

完成安置角检校后,利用实测 GPS 点对测距误差进行检校,获取测距检校参数。利用上述安置角和测距检校参数,对试验区域全部机载激光雷达点云数据进行检校,以消除试验区域点云数据系统误差。经验证,试验区域各航带点云匹配效果较好,高程方向相对高差优于 10 cm,平面位置相对差优于 25 cm,结果稳定可靠。

对于数据检校解算依然无法较好消除的残余航带系统误差，本文采用目前已相对较为成熟的 Burman 航带平差方法进行改善，通过 TerraSolid 商业软件系列中的 TerraMatch 模块实现。

生成 DEM 前，先对机载激光点云数据进行滤波分类处理，以区分地面点和非地面点，再利用地面点数据生成所需的高精度 DEM。本文激光点云分类使用基于 MicroStation V8 平台的 TerraSolid 系列软件，利用软件中 TerraScan 和 TerraModeler 等模块实现地面点分类。其中，TerraScan 模块进行地面点分类的原理是基于 Axelsson 提出的不规则三角格网加密改进算法^[6]。TerraScan 模块提供了地面点分类的 Ground 工具命令，该方法利用迭代算法建立不规则三角格网(triangulated irregular network, TIN)表面模型来区分地面点。

开展数据迭代运算前须首先选定若干初始地面点，通过 Max building size 参数调节初始点的选择。实验表明：当 Max building size 取值 30 m 时，不仅可以很好地去掉植被和房屋并保留微地形特征，而且还可以减少手工编辑的工作量。

通过分类前后对比（如图 1）可以看出，经滤波分类后的 DEM 中大部分建筑物和植被被自动滤除。少量剩余建筑物和植被残余信息则用人工编辑的方法予以剔除。

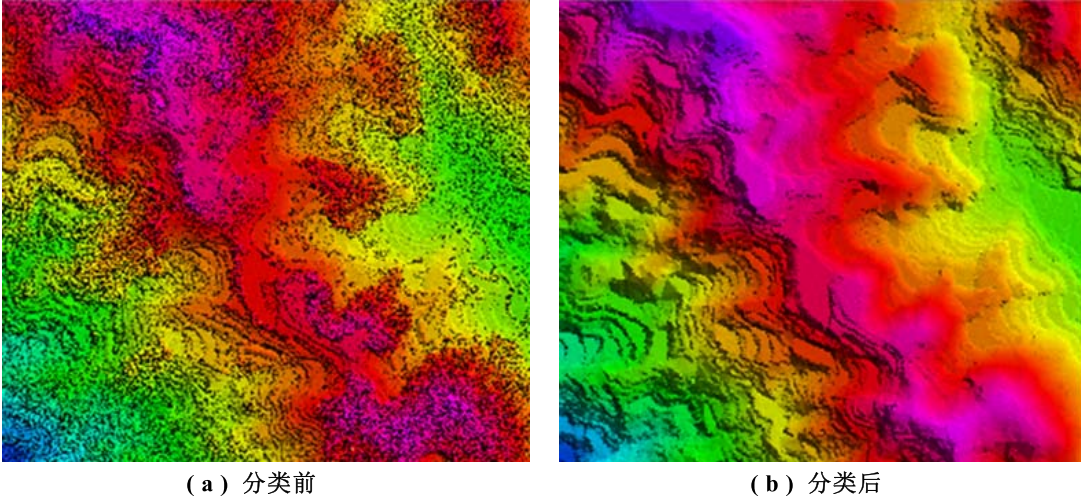


图 1 分类前后 DEM 渲染对比图
Fig.1 Comparison of DEM shading map before and after cloud-point classification

3.3 DEM 制作及评价

先利用机载激光雷达系统获取的海量激光雷达点云数据快速开展目标区域地面三维数字地形模型（digital terrain model，DTM）采集，再对原始点云数据进行系统误差纠正和点云数据分类，有效滤除点云中的非地面点，进而获得目标区域高精度 DEM。为了评价 DEM 产品的精度，在实验区内均匀布设 30 个地面检查点，通过 DEM 读取地面检查点的三维坐标和实测地面检查点的三维坐标进行对比统计，完成对 DEM 的精度质量分析。结果（表 1）表明，生成的 DEM 高程中误差满足 1:1000 比例尺规范精度要求^[7]，可应用于滑坡识别调查。

表 1 DEM 成果精度评价
Tab.1 DEM precision evaluation (m)

类别	X 方向	Y 方向	Z 方向
最大值	0.684	2.943	+0.343
最小值	-2.437	-1.024	+0.075
平均值	-0.464	0.496	+0.180
均方根偏差	1.014	1.245	0.198

4 滑坡调查应用与分析

4.1 解译标志建立

滑坡的解译标志主要为“箕”状色调带和纹理异常带。滑坡体一般位于地质较稳定的自然斜坡凸突的负地形中，滑坡后壁与滑体交接处往往形成洼地，中部则有多级垂直滑动方向的台坎。图 2 是张家湾滑坡的数字正射影像图（digital orthophoto map, DOM），它是通过机载雷达同步获取的航空遥感影像制作而成。由图 2 可以看出，张家湾滑坡是一倾向长江的单斜顺向滑坡群，影像中滑体一般呈浅色调，通常具有一定的挤压、扰动或松脱等特征，岩（土）体破碎，结构松散，耕地、园地及林地被扰动或者破坏比较严重，滑体纹理与背景呈突变关系。

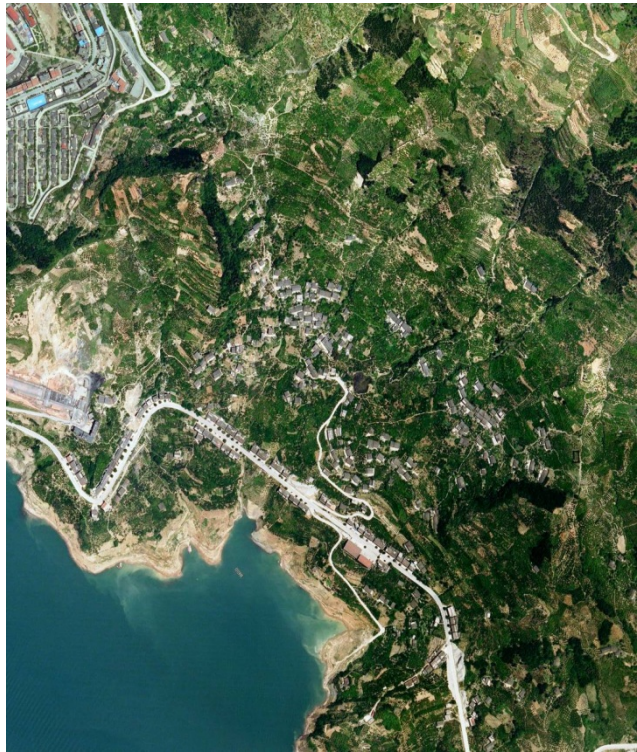


图 2 张家湾滑坡区域数字正射影像图

Fig.2 DOM of Zhangjiawan Village landslide area

本文的野外工作包括前期野外踏勘和解译成果检查验证两部分。野外踏勘主要是对项目工作内容进行地面初步感性认识，结合相应遥感影像特征，建立起遥感解译标志；野外验证则是对室内目视解译结果在实地开展查验，并对解译标志做进一步修正，从而达到理性认识，使遥感解译成果与实际情况更加吻合。

4.2 技术方法

本文从定性和定量两个方面分析了通过机载激光雷达点云数据构建 DEM 所表现的精细微地形地貌信息，开展了滑坡调查与监测技术方法的研究。

定性方法是指针对某一研究区域，通过该区域 DEM 制作不同视角下的山体阴影图。山体阴影图是通过模拟照明光源对 DEM 栅格图的每个栅格单元的影响计算照明值。它不仅能较好地表达目标区域地形的立体形态，而且还可以方便地提取地形遮蔽信息。通过分析不同方位角山体阴影图，可以找出仅依靠单幅图难以发现的微地形变化，尤其是滑坡、断层崖等线性特征。计算照明值时涉及三个重要参数，分别是：太阳方位角、太阳高度角和表面灰度值。本次研究考虑到工作区内干流及支流走向，以相同的太阳高度角（45°），用 180°、135°和 90°等 3 个不同的方位角，生成山体阴影图，表面灰度值设定为 0~255。

定量方法则是指通过目标区域的 DEM 数据提取精细微地形地貌参数，分析滑坡坡度、地表粗糙度、半方差和分维等滑坡要素信息。其中，地表粗糙度是指在指定范围内地表表面积与其在水平方向上的投影面积之比，它能够反映地表形态的宏观变化，是反映地形起伏变化和侵蚀程度的一个重要指标。半方差是指滑坡体相对于周围地形表现在 DEM 数据值上的突变，它反映地表性质的不同距离观测值之间的变化。当取 DEM 为半方差变量时，半方差函数则可以衡量地形的空间自相关性。在相同尺度下，半方差越大，空间地

形变化越大，越有利于识别滑坡体和非滑坡体。分形是指部分与整体以某种形式相似的形；分维是指分形的维数，可用分数表示，用于衡量地形的粗糙度，描述地形的复杂度和空间自相关性。在相同条件下，目标区域分维越大，其地形越复杂，地表越粗糙。

4.3 滑坡识别与定量分析

通过目标区域 DEM 制作不同视角下的山体阴影图，辅以滑坡的坡度图和地表粗糙度图完成滑坡识别；通过计算滑坡体半方差函数和分维完成对滑坡的定量分析。图 3(a)是张家湾滑坡野外实地勘查照片，红线是其中两处滑坡的边界线；图 3(b)是滑坡 DEM 彩色晕渲图，通过对其进行数值分析可认识滑坡地貌形态特征。

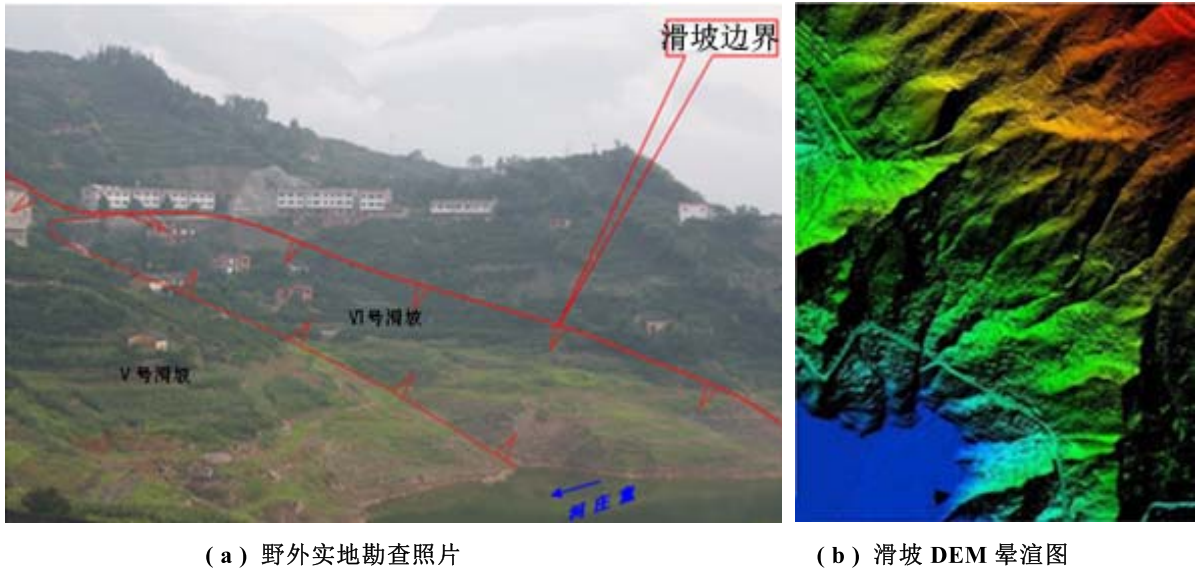


图 3 张家湾滑坡野外实地勘查照片及其滑坡 DEM 晕渲图

Fig.3 Landslide field photo and its DEM shading map of Zhangjiawan Village

图 4 是张家湾滑坡 2009 年山体阴影系列图。a、b、c 分别代表方位角为 90°、135°和 180°的图像。分析三幅图像可知：相比 DEM 数据栅格图像，各方位角山体阴影图在表现滑坡地形的立体形态方面均有显著效果，对类似冲沟等线性地物特征的反映尤为明显；不同方位角山体阴影图在表现滑坡体局部地形地貌特征方面则存在明显差异，比如：当方位角分别为 90° 和 180° 时，山体阴影图反映冲沟等线性地物的能力明显强于方位角为 135° 时的图像。此外，当方位角分别为 90° 和 180° 时，山体阴影图反映局部地貌特征的侧重点又有所不同，而且两者互补能力较强。综上描述，通过机载激光高精度 DEM 数据产品生成的不同方位角的山体阴影系列图，可以清晰地识别出张家湾滑坡滑动的范围，同时还能准确地确定出滑坡的后缘、侧缘和滑舌等三大要素。

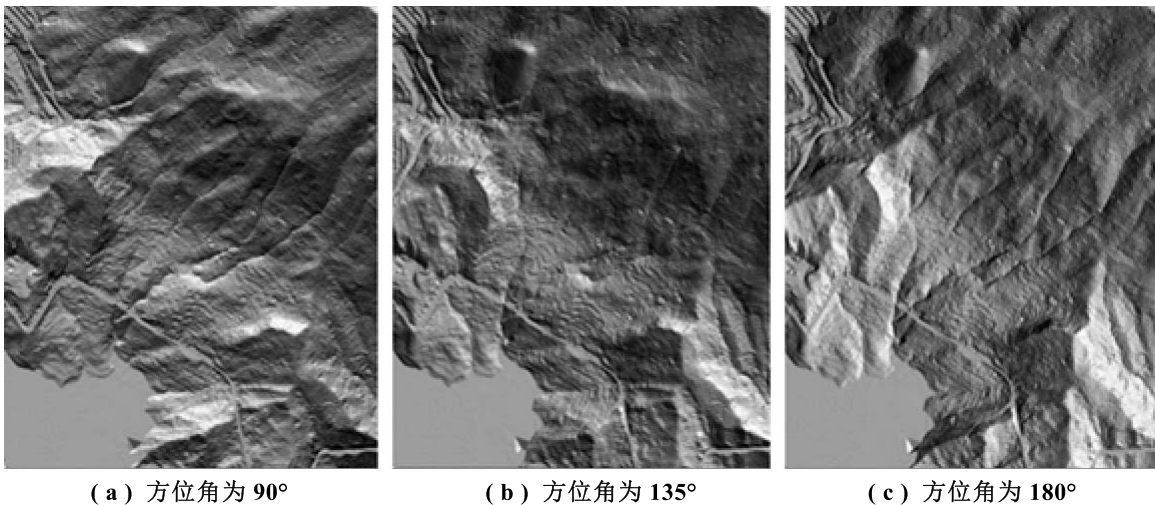


图 4 张家湾滑坡山体阴影系列图

Fig.4 Slide mountain shadow series maps of Zhangjiawan Village

图 5 是张家湾滑坡的坡度图和地表粗糙度图。由滑坡坡度图的分析可知，滑坡侧缘坡度与两侧坡度明显呈跳跃变化，跳跃幅度基本相同；从坡度图上可直接圈定滑坡侧缘边界。滑坡壁、滑舌的坡度值比较集中，两者色彩较为匀滑，形态上基本呈面状分布，可以同滑坡体区分开；在滑坡体与滑舌、滑坡壁与滑坡体的分界处以及滑坡侧缘与其周围地貌处，坡度明显并呈跳跃式增大或变小，而且其跳跃幅度大致相同。因此借助于坡度图也能够圈定滑坡的三大要素。此外，由图 4、图 5 可知，该滑坡群上方的地形封闭特征轮廓清晰，“双沟同源”现象较为明显，此处具备诱发滑坡地质灾害的地形特征。结合山体阴影系列图，可圈出滑坡隐患区域（图 5 中绿色虚线所示区域）。

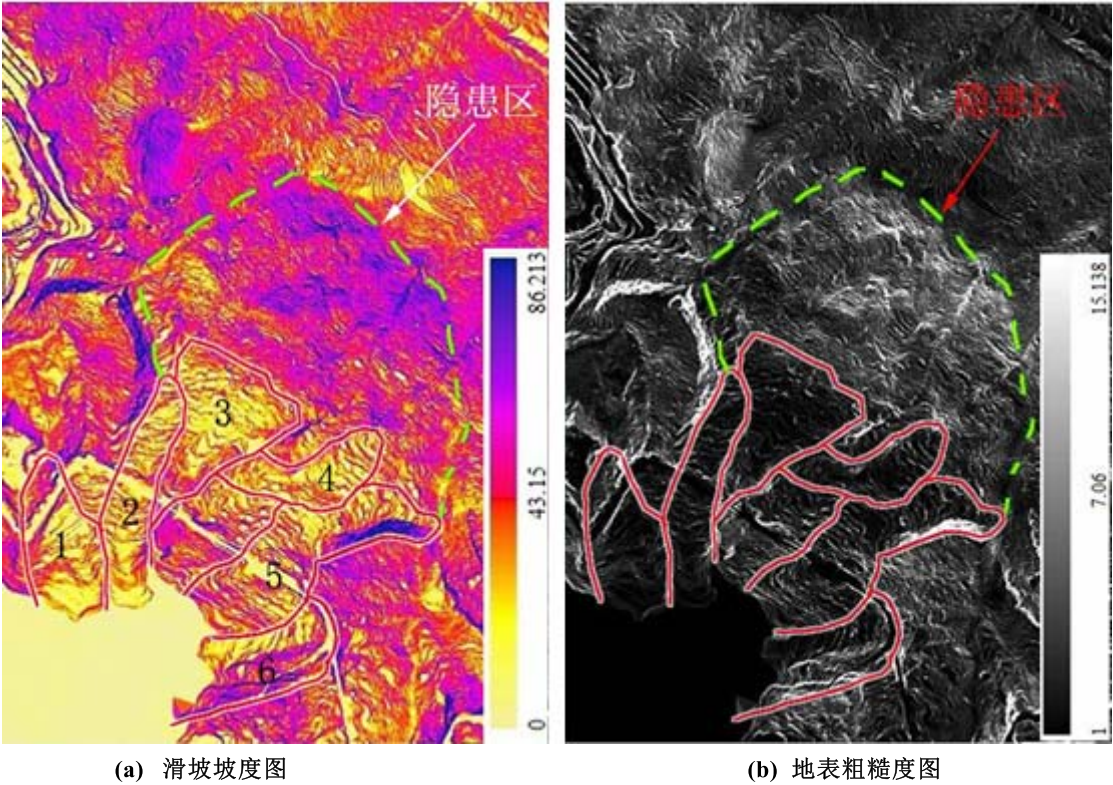


图 5 张家湾滑坡坡度图和地表粗糙度图

Fig.5 Landslide slope map and Landslide surface roughness map of Zhangjiawan Village

从地表粗糙度图的解译显示：滑坡侧缘地表粗糙度与两侧地表粗糙度明显呈跳跃变化，跳跃幅度大致相同，故可从地表粗糙度图上直接确定滑坡侧缘的边界；从滑坡图像灰阶分布看，滑坡壁与滑坡体后部的地表粗糙度值比较集中，其色彩比较匀滑，且形态上呈面状分布，可以与滑坡体其他部分区别开；在滑坡壁与滑坡体、滑坡侧缘与其周围地貌处，地表粗糙度呈明显跳跃式增大或变小，并且其跳跃幅度大致相同。因此借助于地表粗糙度图也能够圈定张家湾滑坡的三大要素。

半方差函数的计算区域分别为滑坡后缘（Upper body, UB）、滑坡体(Body, B)以及滑舌(Toe, T)三部分。图 6 是该滑坡的 UB、B 和 T 的半方差曲线图。由图可知，UB、B 和 T 均有明显的区别，这为滑坡要素识别奠定了数学理论基础；滑坡后缘、滑坡体以及滑舌的半方差函数曲线均随着变距的增大而增大，说明各滑坡要素的地貌相关性较强。滑坡后缘的半方差最大，说明后缘地形空间变化越大；滑坡体次之；滑舌最小，说明滑舌部分的空间地形变化最小。尽管各滑坡要素的半方差函数曲线均随着变距的增大而增大，但是也有明显的不同，如滑坡后缘最大，滑舌最小。

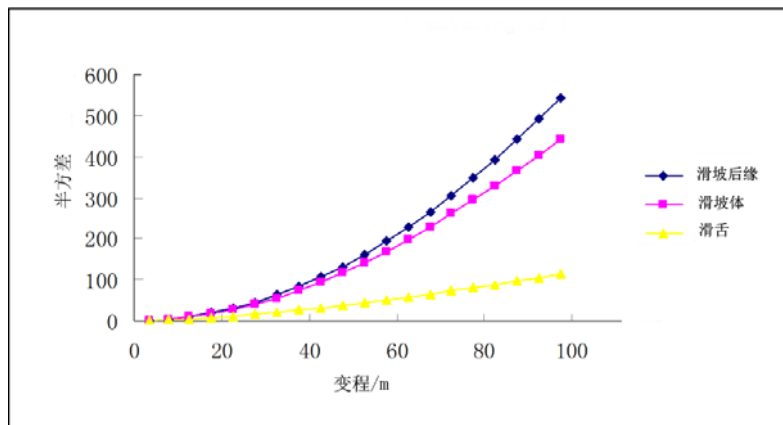


图 6 张家湾滑坡要素半方差曲线图

Fig.6 Landslide elements semivariogram curve map of Zhangjiawan Village

张家湾滑坡要素分维函数的计算区域与半方差函数相同，计算结果见图 7。可知：滑坡后缘的分维范围为 2.31~2.67，有一个值为 3.10；滑坡体分维范围为 2.34~2.70，有一个值为 3.13；滑舌分维范围为 2.48~2.85，有一个值为 3.36。滑坡后缘的分维值最大，说明后缘地形空间变化越大；滑坡体次之；滑舌最小，说明滑舌空间地形变化最小。计算结果表明其与半方差计算结果具有较好的一致性。

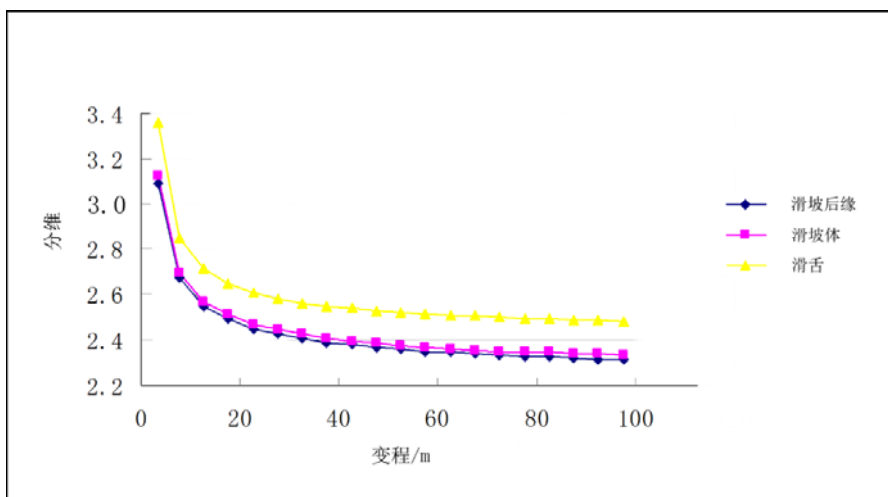


图 7 张家湾滑坡分形维数计算结果

Fig.7 Landslide fractal dimension calculation results of Zhangjiawan Village

5 结论

机载激光雷达技术作为一种新的航空遥感调查与监测手段，在地质灾害调查与监测领域已获得较广泛关注和应用。与卫星和航空影像相比，机载激光雷达具有一定的植被穿透能力，多次回波可以用来精确测量和表达微地貌特征信息，在雾气较大或阴雨天气时也能快速获取真实地形信息，具备提升滑坡体识别精度的条件。具体表现在两方面：一是边坡的整体变化相关的特征，如存在可以被机载激光雷达点云数据派生的 DEM 识别的斜坡凹陷和突变；二是结合机载激光雷达点云数据派生的精细 DEM，随着地面粗糙度的增加，可以识别出一些地表特征，如内部结构变形、裂隙、张裂缝或滑痕等。

本文基于机载激光雷达系统获取的航空遥感数据构建了精细的 DEM，通过对 DEM 产品进行深入挖掘，进行综合对比分析，结合其他地质资料，辅以适当的野外验证，方便、准确地提取出了研究区复杂地质环境下的滑坡信息，应用效果良好，表明采用机载激光雷达技术对地质灾害进行调查与监测是一种直观、快速而经济的方法，尤其对于灾害应急反应和灾后救援具有重要意义。

参考文献(References)：

Ardizzone F, Cardinali M, Galli M, et al. 2007. Identification and mapping of recent rainfall induced landslides using elevation data collected

- by airborne Lidar. *Natural Hazards and Earth System Sciences* (7): 637-650.
- Axelsson P. 1999. Processing of laser scanner data-algorithms and applications. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote Sensing*.
- Li X J. 2012. Complex geological environment landslide recognition based on Lidar technology. China university of geosciences. (李显巨. 2012. 基于 LiDAR 技术的复杂地质环境区滑坡识别研究. 中国地质大学.)
- Nancy F Glenn, David R Streutker, D John Chadwick, et al. 2006. Analysis of Lidar derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity [J]. *Geomorphology*(73): 131-148.
- National administration of surveying, mapping and geoinformation of China. 2011. CH/T 8023-2011, Airborne Laser Radar Data Processing Technical Specifications. China Standard Press, Beijing. (国家测绘地理信息局. 2011. CH/T 8023-2011, 机载激光雷达数据处理技术规范. 北京: 中国标准出版社.)
- Wang Z H. 2005. Digital landslide technology and its application, *Geoscience*(02). (王治华. 2005 年 02 期. 数字滑坡技术及其应用. 现代地质.)
- Zhang X H. Theory and method of airborne Lidar technology. Wuhan University Press. (张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法. 武汉: 武汉大学出版社.)

Application in the field of landslide surveying based on airborne Lidar technology

DU Lei¹, CHEN Jie^{1,2}, LI Mingming¹, LI Jing¹, GAO Zihong¹

1. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;
2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Combined with the positioning and orientation system (POS), the airborne Lidar system acquires the three dimensional coordinate information of ground objects, and has the capability of fast making high precision Digital elevation model (DEM). DEM is a basic map for landslide investigation and monitoring. Its precision can reflect the small ground surface changes directly. The DEM can be used to quantitatively analyze landslide characteristics accurately. There are several advantages of airborne Lidar technology: it is affected little by weather, can penetrate the vegetation layer to obtain the ground surface information and its data processing process is relatively simple. In this paper, the Lidar technology is applied in Zhangjiawan Village, Zigui County, Hubei Province, China. Results show that: based on Lidar technology, landslides can be recognized clearly with slide mountain shadow maps made with high precision DEM. What is more, quantitative analysis can be carried out to measure landslides characteristics.

Key words: Airborne Lidar technology, digital elevation model, flightline adjustment, landslide monitoring, quantitative analysis

doi: 10.6046/gtzyyg.2018.04.16

引用格式: 范景辉,王如意,赵红丽,等.地面沉降光栅立体图研究制作[J].国土资源遥感,2018,30(4):102-107. (Fan J H, Wang R Y, Zhao H L, et al. Research and production of a lenticular stereoscopic subsidence map[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(4): 102-107)

地面沉降光栅立体图研究制作

范景辉¹, 王如意², 赵红丽¹, 李雁明³, 林昊⁴, 燕云鹏¹

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 正元地理信息有限责任公司, 济南 250101;
3. 北京双图华域信息技术有限公司, 北京 100083; 4. 信阳师范学院, 信阳 464000)

摘要: 光栅立体图在人物、风景、地貌的三维表达方面有着较为广泛的应用,但尚未见于区域地面沉降凹陷形态的表达。在阐述光栅立体成像原理的基础上,以J50幅1:100万地面沉降专题图为数据源,对地面沉降速率等值线进行立体仿真,生成仿真场景的不同视角图像序列,抽样合成为光栅底图,进而将该底图与柱透镜光栅板整合印刷,形成地面沉降光栅立体图。研究表明,利用三维地理信息系统、数字图像处理和光栅立体成像技术,可对地面沉降信息进行新颖、直观的表达。

关键词: 光栅立体图; 地面沉降; 三维可视化

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2018)04-0102-06

0 引言

基于光栅立体成像技术制作的光栅立体图能在平面上显示立体效果,可以更直观、形象地展现人物、风景等三维对象或场景,使观察者获得强烈的视觉冲击。在光栅立体成像技术的应用早期,为生成光栅底图,需要特殊的拍摄设备,以获取同一景物具有轻微角度差别的一组图像序列,这种制作方式在应用上存在较大局限性。随着光栅立体成像技术的成熟度和应用程度不断加深,光栅立体图的应用领域逐渐扩展^[1-3]。特别是近年来,计算机技术尤其是数字图像处理及三维仿真技术的飞速发展,光栅立体图的制作也已进入了数字图像处理合成阶段,在平面图像和第三维信息的基础上,使用计算机制作出符合要求的底图,配合一定参数的光栅板即可印刷成形。

目前光栅立体图已成为地形、地貌等地学数据三维表达的重要手段^[4-5],在市场上亦可见利用光栅制作的立体地形图、地貌图和遥感影像图等产品。但是,尚未发现将光栅立体成像技术引入到地面沉

降邻域加以拓展和研究。地面沉降是一种地表高程缓慢、轻微损失的自然现象。与大范围内地形地貌的空间变化特征相比,相同范围内地面沉降的变化梯度很小,且变化方式体现为向下凹陷。对地面沉降进行三维信息表达时,需依据其年均沉降速率或累计沉降量,刻画出沉降范围内的凹陷形态。常规的地表沉降图是在二维平面上利用等高线或者不同的配色来表达三维的信息,无法表现出地面沉降凹陷的纵深感,因此具有较大的局限性。本文对此进行尝试,利用三维地理信息系统、数字图像处理和光栅立体成像技术,以实现地面沉降信息新颖、直观的表达。

1 原理与方法

光栅图由光栅底图及上层覆盖的光栅组成,光栅底图是由互为立体像对的一系列图像合成的。光栅由一组光线分离器(光栅单元)组成^[6],可分为狭缝光栅和透镜光栅。狭缝光栅的光线聚集精确,效果好,但制作的立体图像有些区域被自身不透光部分遮挡,亮度不如透镜光栅制作的立体图亮度高^[7]。柱镜光栅是透镜光栅的一种,经常被用来制

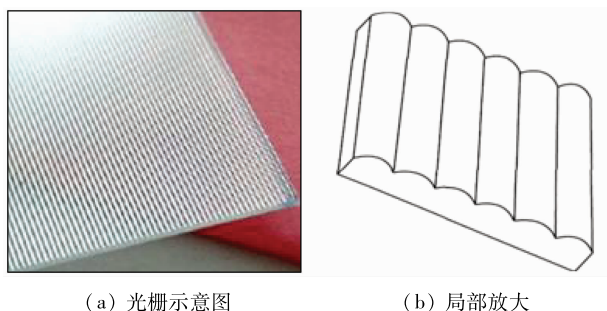
收稿日期: 2017-04-13; 修订日期: 2017-07-07

基金项目: 中国地质调查局项目“全国地表形变遥感地质调查综合研究”(编号: 1212011140042)、“全国地表形变遥感地质调查”(编号: 1212011140040)、“青藏冰川变化与冰湖溃决灾害遥感综合调查”(编号: DD20160342)和地质大数据支撑平台建设(航空遥感中心)(编码: DD20179376)共同资助。

第一作者: 范景辉(1978-),男,博士,教授级高工,主要从事 InSAR 技术应用研究、3S 技术在地质中的应用。Email: jhfan2004@qq.com。

通信作者: 王如意(1990-),男,硕士,主要从事 InSAR 技术应用。Email: ruyi06@163.com。

作商业立体画,应用较为广泛,技术也相对成熟。柱镜光栅是用模具将透明塑料滚压而成,在结构上其一面是由许多结构参数和性能完全相同的小半圆柱透镜线性排列组成,是周期性起伏变化的曲面,另一面是平面,为柱透镜元的焦平面,具体如图1所示。每一个圆柱透镜元相当于一个凸透镜,有独立的光学特性,起着聚光成像的作用,这一特性使得它对图像具有“压缩”和“隔离”的作用^[8]。



(a) 光栅示意图

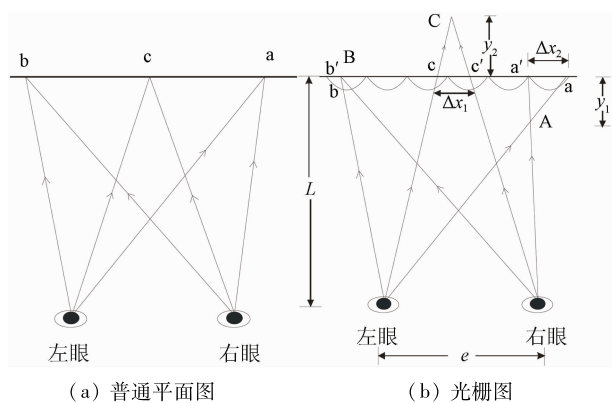
(b) 局部放大

图1 光栅示意图

Fig.1 Sketch of lenticular

1.1 柱镜光栅图的立体成像原理

人的两眼在接收图像信息时,会根据物点光线的入射方向,判定该物点的方位及远近,立体视觉是由于双眼在观察物体时产生的双眼视差,经过大脑处理后而产生。光栅立体图像之所以能给人以立体感,就是基于其处理后的平面图像包含有符合人眼视觉特性的立体信息,同时又能被柱镜光栅精确地折射分像^[9](图2)。



(a) 普通平面图

(b) 光栅图

图2 光栅图像立体感形成原理

Fig.2 Principle sketch of stereo feeling of lenticular image

图2(a)为普通平面印刷产品,印刷面即为像平面,由于双眼观察a,b和c像点时视线交角均位于像平面上,人眼会判定平面印刷品上所有像点均位于同一水平面上,没有立体感。而在图2(b)中,显示了在光栅底图上覆盖光栅板的情形。在光栅板的折射作用下,人的左眼看到像点a,b和c,右眼看到相应的立体像对同名点a',b'和c',由于双眼观看时视角不同而产生距离感:A浮在像平面上方,形成近

景;C位于像平面下方,形成远景;B位于像平面上,形成中景。

设人的双眼距离为 e ,眼睛到光栅立体图的观看距离为 L ,立体像对中2个同名像点间的位错为 Δx ,那么视觉成像点与光栅立体图平面距离 y 为^[4]

$$y = \frac{L}{e \pm \Delta x} \sum \Delta x, \quad (1)$$

式中:“+”为成像在像平面上方;“-”为成像在像平下方。

柱镜光栅成像的理论基础是利用光栅对底图进行折射和分像,再配合人的双眼视差形成立体感,因此有必要理解光栅底图的制作原理。传统光栅底图是由同一景物在不同视角下拍摄的图像按一定规则抽样、组合而成。理论上讲,只有2个或2个以上的互为立体像对的一组图像方可合成立体图像^[6],原理示意图如图3所示。

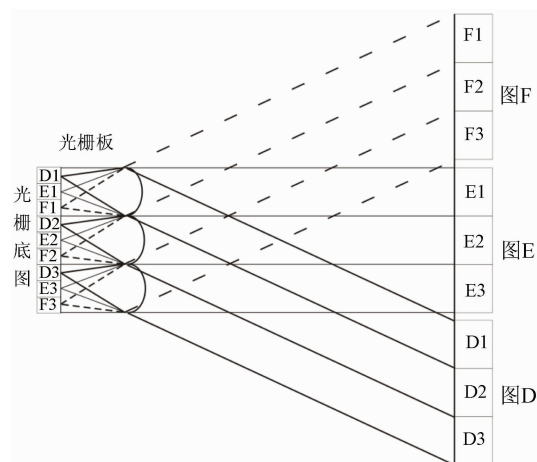


图3 图像合成光栅底图原理示意图

Fig.3 Principle sketch of lenticular base image composed by 3 images

以3幅图像为例,图D,E,F表示同一景物在不同角度下互为立体像对的图像,将每一幅图像分割为3个条带,将切割的9个条带交织起来,这样每个光栅单元下都有3幅图像的一部分信息,整个光栅底图则包含了3幅图像的全部信息。光栅底图的制作原理决定了人眼直接观看光栅底图时只看到模糊不清的竖状条纹影像,只有在相应参数柱镜光栅的折射分像下,将抽样组合的信息还原为原始的立体像对,分别进入左右眼才能再现立体感。

由于柱镜光栅是由在平面上呈线性排列的多个圆柱透镜组成,这种结构使我们只能感觉到水平向的视差信息,这也决定了光栅底图的3个基本特点^[11-15]:①立体图像必须是由对同一景物从不同视角获取的一组图像组成,由于光栅的单向立体特性,要求此组图像具有拍摄高度相同的特性;②所

合成的立体图像由平行于柱状光栅轴向的条纹组成,各个局部条带的交错放置情况如图 3 所示;③为得到好的立体效果,在抽样组合时需首先实现主体景物成像在纸面上,亦即主体景物上点的位错(图 2 中的 Δx)为 0。

1.2 关键参数

光栅的特征是用特定的参数来描述的,主要包括:光栅厚度、光栅线数、光栅视距、光栅透光率、光栅偏差值、光栅像素打印点和折射率等^[6, 11-15]。光栅厚度即为透镜的焦距。光栅线数(lpi)指在与柱镜延长向垂直的方向上,一英寸(约 2.54 cm)距离内柱镜的条数。光栅线数与栅距成反比。光栅视距 D 指人与光栅图像之间可达到最佳立体感的距离,即最佳观察距离。 D 与光栅折射率 n 、光栅焦距 f 、人眼瞳距 e 及栅距 p ,满足公式^[16]为

$$D = \frac{e}{2 \tan \left\{ \arcsin \left[n \sin \left(\arctan \frac{p}{2f} \right) \right] \right\}} \quad (2)$$

由式(2)可以得出,在折射率和焦距一定,并假设人眼瞳距不变的情况下,不同线数的光栅材料,其对应的光栅视距是不同的:栅距越小,光栅线数越密,光栅视距越小;栅距越大,光栅线数越疏,光栅视距越大。因此近距离观察用的光栅板是薄且密的,远距离观察用的光栅板是厚且疏的^[2, 16]。

2 数据源及其处理

2.1 数据源

地面沉降光栅立体图制作的源图是一幅包括地面沉降年均速率等值线并对等值面分级设色的数字平面图,名为“J50 幅地表形变分布图”,具体信息如表 1 所示,地面沉降专题信息的提取和制图方法见参考文献[17-19]。

表 1 地面沉降光栅立体图源数据信息

Tab. 1 Summary information of the source data used to make the lenticular stereoscopic subsidence map

数据信息类型	数据信息内容
地表形变信息来源	ENVISAT ASAR 时间序列数据
提取方法	相干目标短基线时间序列分析
基础地理底图	国家地理信息 1:100 万数字地形图
投影坐标	高斯-克吕格投影、西安 80 坐标系
数据周期	2008 年 1 月—2010 年 10 月
制图时间	2011 年
制图单位	中国国土资源航空物探遥感中心

2.2 处理流程

柱镜光栅立体图的制作流程^[3, 16]主要分为 4 个步骤,即材质选择、制作光栅底图、印刷和印后处

理(图 4)。

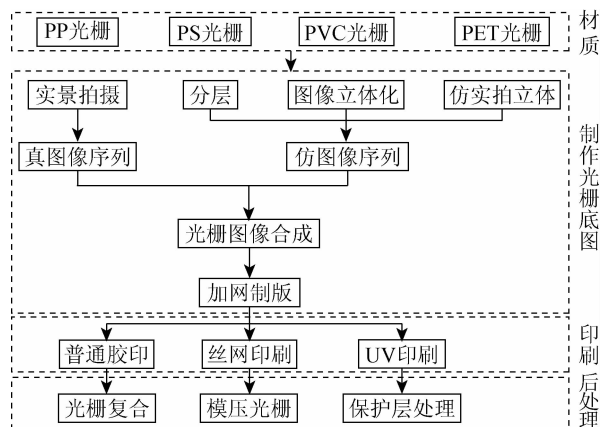


图 4 光栅图制作流程

Fig. 4 Flowchart of the production of a lenticular image

1) 材质选择。根据材质的不同可以将光栅分为 PP(聚丙烯)光栅、PS(聚苯乙烯)光栅、PVC(聚氯乙烯)光栅和 PET(聚对苯二甲酸乙二醇酯)光栅。当前在制作较高精度的光栅立体图时,一般采用 PET 光栅板。这种材质环保无毒,透光度高,化学性能稳定,且具有耐酸、耐碱、不亲水、不亲油等特性。为了使地面沉降光栅立体图的三维效果尽可能细腻,使用高光栅线数的柱镜光栅,其光栅线数约为 90.45 lpi,栅距约为 0.28 mm。光栅材质为 PET,折射率约为 1.59,厚度约为 0.60 mm,成图后适合手持近距离观看。

2) 制作光栅底图。光栅底图是由图像序列抽样合成的,因此图像序列获取质量的高低直接影响到光栅底图的精度。图像序列的获取方法主要有 4 种:①实景拍摄,在数字图像处理技术普及之前使用较多,是早期获取图像序列的主要手段,需要立体相机等特殊设备,限制因素多;②分层,原理是不断复制移动一张图像,通过图像的位移差来近似模拟角度视差,位移量越大,模拟的角度视差越大,景深的绝对值就越大,凹凸效果也就越明显;③图像立体化,利用专业的图像处理软件根据物体的远近关系,勾画等距线进行分层切片,模拟生成多视角图像序列;④仿实拍立体,通过现代计算机技术,在平面坐标要素的基础上,利用第三维度的等值线构建该维度上的数字模型,形成一种计算机虚拟立体显示系统,在系统中可以从任意角度来观测模型,获取图像多视角的信息。在光栅立体图的制作流程中,光栅底图的处理是一个关键环节。光栅立体图的推广在很大程度上得益于光栅底图合成技术的快速发展。随着数字图像处理技术的飞速发展,光栅立体图印刷的图像处理也已进入了数字图像处理合成的阶段,利用计算机完全可以通过带有第三维信息的平

面图像合成光栅底图,得到与实景拍摄相似的效果。因此,第③和④种方法,即图像立体化与仿实拍立体方法,成为了目前主流光栅底图的制作方法。

3)印刷和印后处理。立体印刷的主要方式有3种:①普通胶印,首先印刷立体光栅底图,待纸张上的油墨干燥后,再在底图上覆盖一层与之参数相匹配的柱镜光栅板,然后进行光栅复合;②丝网印刷,是将立体光栅板印刷在印好的立体图像表面,即把光栅看做图文进行印刷,印后需要模压成型;③UV(紫外)印刷,直接在柱镜光栅板的背面(为一平面)上印刷光栅图像,配合紫外源在油墨干燥后覆以油

墨保护层即可。

2.3 关键步骤

在制作光栅底图时,应用了仿实拍立体方法。首先在 ArcGIS 平台中,将 J50 幅地表形变分布图的地面沉降速率值作为模拟三维形态的依据,通过调整夸张因子,获得具有较好效果的三维场景。在此过程中,为了使观察者对不同因子下的三维场景具有更为形象的感受,将各种三维场景输出为红绿三维效果图,观察者佩戴红绿三维眼镜进行比较。以地面沉降显著的沧州市附近局部区域为例,源图和其对应的红绿三维效果如图 5 所示。

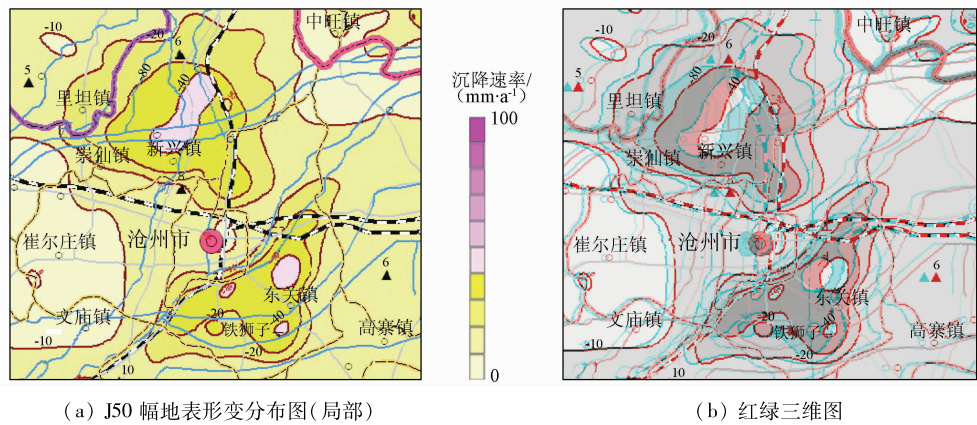


图 5 地面沉降显著区域源图和红绿三维图

Fig.5 Original map and red – green anaglyph of severe subsidence area

经比较确定满意的夸张因子和三维场景后,对场景从 13 个角度获取序列图像,相当于模拟了从

13 个角度进行实景拍摄的镜头,部分角度图像如图 6 所示。

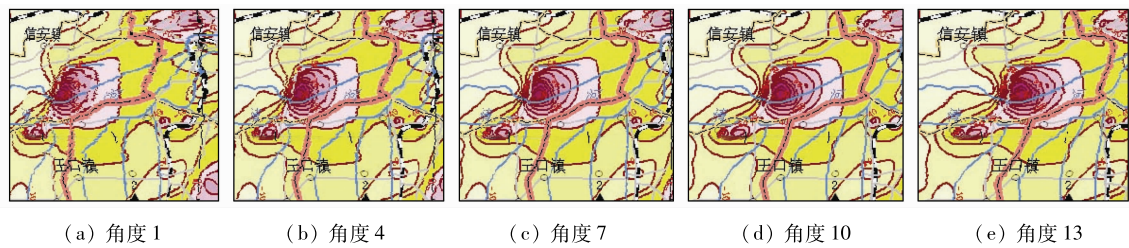


图 6 不同观察角度的地面沉降场景序列

Fig.6 Series viewing images simulated for different angles of a subsidence scene

由图 6 可以发现,在固定地理位置的小窗口内,相同的地面沉降速率等值线在不同观察角度的镜头下的窗口内逐渐向右移,且形状也稍有一定程度的扭曲变化。

根据光栅底图分辨率等于光栅线数与镜头数的乘积,设置光栅底图分辨率约为 1 175. 82 dpi,按图 3 所示的原理将序列图像抽样合成为光栅底图,如图 7 所示。由图 7 可见该研究区光栅底图的合成效果,在地面沉降较为明显的地区是条带状模糊不清的影像;在无形变地区,光栅底图与源图件一致。

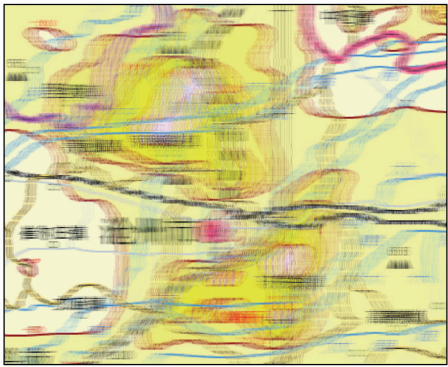


图 7 地面沉降显著区域光栅底图

Fig.7 Lenticular base map of severe subsidence area

对光栅立体图的印刷及印后处理,采用了 UV 印刷和保护层处理技术,光栅底图和光栅板匹配程度高,立体效果明显。

受当前主流柱镜光栅材料特性所限,此次立体图的光栅线数仍不够大,对于地学要素的专业表达而言,清晰度与传统纸质图件相比尚有差距。此外,在本次立体图制作过程中还发现,目前柱镜光栅材料在立体图的幅面尺寸方面也有限制,这给大区域、大幅面地学现象的制图带来制约。相信随着光栅材料的发展,这 2 方面的缺点都将被克服。

3 结论与讨论

本文在阐述柱镜光栅立体图制作原理的基础上,结合现代数字图像处理技术,利用已有的“J50 幅地表形变分布图”二维成果图,研究并制作了 1:100 万标准图幅的地面沉降光栅立体效果图。与已有的常规柱镜光栅立体产品相比,本次制作的立体效果图有 3 方面特点:

1) 对地面沉降凹陷形态的表达形式做了新的探索。传统的人物、风景立体图多侧重表达在像平面之上的凸起形态,与地面沉降特征相比,图幅内场景立体特征更为明显;当前常见的地形地貌立体图,所表达的起伏现象在变化剧烈程度上也比地面沉降更为明显,易于取得较好的立体视觉效果。本次对地面沉降凹陷形态的立体表达体现了新的特点。因此,为了理想表达地面沉降凹陷形态,在三维场景夸张程度调节、光栅底图远中近景设置等方面都做了成功探索。

2) 不同图层之间的匹配精度高。以往三维光栅立体图像制作工艺多应用于摄影、广告等对图元间几何匹配精度没有严格要求的人文艺术领域,而本次光栅立体图包含了基础地理要素、地面沉降等值线和等值面等具有严格地理空间对应关系的不同图层,匹配精度明显高于以往传统产品。

3) 立体图幅面大。本次光栅立体图成品尺寸约为 700 mm × 500 mm,在目前国内同类材质制品中较为突出。

研究表明,对大范围地面沉降的凹陷特征,可基于三维地理信息系统、数字图像处理、光栅立体成像与印刷技术,进行立体表达,图件新颖、直观、便于使用,有着较为广阔的应用前景。随着光栅材料的发展,制作幅面更大、分辨率更高的光栅立体图将成为可能。

本文将光栅立体成像技术引入地面沉降制图方向加以研究,尝试表现地面沉降的三维效果,取得了

不错的效果,但也还存在着不足之处,主要表现在受光栅材质的制约,光栅线数仍不够多,清晰度仍不及传统二维图件,幅面尺寸也有所限制。但这一技术与地图制图行业的结合已经表现出了较大的优势和潜力。未来该技术在地图制图领域的发展和推广,以及在其他学科、行业的探索和研究仍需要做大量的工作。

志谢: 感谢北京万维时空科技有限公司邢耶在地面沉降专题图编制方面所做的工作。

参考文献 (References):

- [1] Roberts D E. History of lenticular and related autostereoscopic methods [Z]. Hillsboro: Leap Technologies, LLC, 2003.
- [2] 史瑞芝. 光栅立体印刷技术综述 [J]. 中国印刷与包装研究, 2009, 1(5): 1-9.
Shi R Z. Summary of grating stereoscopic printing technology [J]. China Printing and Packaging Study, 2009, 1(5): 1-9.
- [3] Johnson R B, Jacobsen G A. Advances in lenticular lens arrays for visual display [C] // Mouroulis P Z, Smith W J, Johnson R B. Current Developments in Lens Design and Optical Engineering VI. San Diego: SPIE, 2005.
- [4] Buchroithner M F, Knust C. True - 3D in cartography - current hard - and softcopy developments [M] // Moore A, Drecki I. Geospatial Visualisation. Berlin Heidelberg: Springer, 2013: 41-65.
- [5] Moellering H. Perspectives on 3D visualization of spatial geodata and future prospects [M] // Buchroithner M. True - 3D in Cartography. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 1-19.
- [6] 史瑞芝, 安敬. 一种基于柱镜光栅成像技术制作立体影像图的方法 [J]. 测绘通报, 2008(11): 31-33.
Shi R Z, An J. A method of composite stereo photomap based on lenticular screen [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2008(11): 31-33.
- [7] 彭爱华, 朱化凤. 应用于立体印刷的矩阵式透镜光栅的原理 [J]. 燕山大学学报, 2010, 34(3): 262-265.
Peng A H, Zhu H F. Principium of matrix lens grating in three - dimensional printing [J]. Journal of Yanshan University, 2010, 34(3): 262-265.
- [8] 李鹏. 立体印刷的成像原理 [J]. 印刷质量与标准化, 2007(3): 8-11.
Li P. The imaging elements of 3D printing [J]. Printing Quality and Standardization, 2007(3): 8-11.
- [9] 周立权. 光栅立体印刷图像处理技术研究 [J]. 包装工程, 2010, 31(3): 107-110, 136.
Zhou L Q. Research on image - processing technology of stereoscopic printing [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(3): 107-110, 136.
- [10] 董永贵, 沈立, 冯冠平, 等. 一种基于柱透镜光栅的计算机辅助彩色立体图片合成方法 [J]. 光学技术, 1999(3): 66-68.
Dong Y G, Shen L, Feng G P, et al. Computer - aided composite method of the lenticular screen covering color stereo - image [J]. Optical Technology, 1999(3): 66-68.

- [11] 康立民. 立体照片的拍摄及合成[J]. 北京机械工业学院学报, 1996, 11(2): 30-42.
Kang L M. Discusses shoot and composite of the stereogram[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery Industry, 1996, 11(2): 30-42.
- [12] 大越孝敬. 三维成像技术[M]. 董太和译. 北京: 机械工业出版社, 1982.
Takanori. Three - Dimensional Imaging Techniques[M]. Dong T H, transl. Beijing: China Machine Press, 1982.
- [13] 侯卫兵. 大幅面彩色喷涂系统及相关技术的研究[D]. 北京: 清华大学, 1997.
- [14] Ignat'ev N K. Two modes of operation of a lens array for obtaining integral photography[J]. Soviet Journal of Optical Technology, 1983, 50(1): 6-8.
- [15] Pollard S B, Mayhew J E W, Frisby J P. Implementation details of the PMF stereo algorithm[M]//Mayhew J E W, Frisby J P. 3D Model Recognition from Stereoscopic Cues. Cambridge: MIT Press, 1991.
- [16] 黄敏, 刘浩学. 立体印刷制作工艺光栅板参数的选择[J]. 北京印刷学院学报, 2005, 13(1): 9-12.
- Huang M, Liu H X. Selecting of the parameters of cylindrical lens sheet imaging in 3D printing[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2005, 13(1): 9-12.
- [17] 范景辉, 李梅, 郭小方, 等. 基于 PSInSAR 方法和 ASAR 数据监测天津地面沉降的试验研究[J]. 国土资源遥感, 2007, 19(4): 23-27. doi:10.6046/gtzyyg. 2007. 04. 05.
Fan J H, Li M, Guo X F, et al. A preliminary study of the subsidence in Tianjin area using asar images based on psinsar technique[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, 19(4): 23-27. doi:10.6046/gtzyyg. 2007. 04. 05.
- [18] 王润生, 熊盛青, 聂洪峰, 等. 遥感地质勘查技术与应用研究[J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1699-1743.
Wang R S, Xiong S Q, Nie H F, et al. Remote sensing technology and its application in geological exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1699-1743.
- [19] 范景辉, 燕云鹏, 葛大庆, 等. 全国地表面变遥感地质(InSAR)调查技术指南[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
Fan J H, Yan Y P, Ge D Q, et al. Technical Guidance on Remote Sensing Geological Survey Based on InSAR for Ground Deformation in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015.

Research and production of a lenticular stereoscopic subsidence map

FAN Jinghui¹, WANG Ruyi², ZHAO Hongli¹, LI Yanming³, LIN Hao⁴, YAN Yunpeng¹

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 2. China Zhengyuan Geomatics Co., Ltd., Ji'nan 250101, China; 3. Beijing Graphics and Image Information Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 4. Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Lenticular stereoscopic images have been widely used in the three - dimensional expression of characters, landscapes and geomorphic features, but they have not yet been found in the visualization of depression shape of regional subsidence. Based on the research and introduction of the lenticular stereoscopic principle, the authors produced a lenticular stereoscopic subsidence map. The J50 thematic map of land subsidence at the scale of 1:1 000 000 was used as the data source. After the three - dimensional simulation using the subsidence isoline, the images series with different viewing angles were generated based on the simulated scene. Then, the images series were sampled and arranged to compose the base map. Finally, the base map was printed on the lenticular plate and properly processed. The research shows that the subsidence field can be innovatively and intuitively visualized using 3D GIS, digital image processing and lenticular stereoscopic technology.

Keywords: lenticular stereoscopic map; subsidence; three - dimensional visualization

(责任编辑: 陈 理)

doi: 10.6046/gtzyyg.2017.04.32

引用格式: 随欣欣,王彦佐,晋佩东,等. 基于 RasterCatalog 的海量遥感数据存储及快速浏览技术研究[J]. 国土资源遥感, 2017,29(4):214-218. (Sui X X, Wang Y Z, Jin P D, et al. Research on mass remote sensing image storage and rapid browse based on RasterCatalog[J]. Remote Sensing for Land and Resource, 2017,29(4):214-218.)

基于 RasterCatalog 的海量遥感数据存储 及快速浏览技术研究

随欣欣¹, 王彦佐¹, 晋佩东¹, 魏英娟¹, 王文凯², 马骏欢²

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 北京吉威数源信息技术有限公司, 北京 100043)

摘要: 高分一号卫星自 2013 年 4 月 26 日发射至今, 已获取了大量的数据, 数据量已达到了 TB 级, 而且还在持续增长。基于高分数据的有效管理、检索和展示的需求, 对海量数据存储模型和影响图像浏览速度的因素进行分析。通过实验验证, 采用压缩质量为 50% 的 JPEG 压缩和双线性插值法构建影像金字塔, 以 64 × 64 切片大小进行数据存储, 并通过构建 GDB RasterCatalog Layer, 能够实现海量遥感数据的存储与快速浏览展示, 满足高分系列卫星在行业应用中数据管理与显示需求。

关键词: 高分数据; RasterCatalog; 快速浏览

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-070X(2017)04-0214-05

0 引言

随着遥感技术的不断发展, 遥感数据的获取途径也在不断的增多, 并且随着空间分辨率、波段数的提高, 遥感影像的数据量级别也在不断增长。中国国土资源航空物探遥感中心(下文简称航遥中心)2016 年 5 月就已存储各类遥感影像数据达 176 万余景, 数据量达 533.9 TB, 其中高分一号卫星影像数据 81.8 万余景, 189.7 TB; 高分二号卫星影像数据 45.5 万余景, 220.2 TB, 且国产卫星数据仍以每天 2 000 余景, 1.0 TB 数据量的增长速度不断增加。航遥中心承担着高分国土资源业务卫星数据的统筹、管理、服务及保障任务, 巨大的数据量对海量数据的高效管理和服务提出了挑战, 急需应用合理的技术高效管理这些海量高分影像, 为应用提供数据支持。近年来, 很多专家和学者针对海量数据的存储管理进行了大量的研究与系统建设, 如许自舟等^[1]进行了海量影像数据存储与发布的技术研究, 表明采用影像压缩、影像金字塔和影像切片等技术能有效提高海量影像数据存储与发布性能; 薛涛等^[2]研究了基于空间数据库、文件目录方式和 Web Service 等方式的数据存储和发布。虽然数据存储

管理方式层出不穷, 但是应用最广泛的是基于关系型数据库 + 空间数据引擎与文件系统相结合的方式实现海量数据的管理^[3-5]。而针对遥感影像数据的浏览展示, 以往主要通过单一 Oracle 关系数据库 BLOB 字段存储, 影像检索及叠加展示效率较低; 而后续的研究主要运用金字塔、影像分块等技术^[6], 能够实现较好的浏览展示效果。

本文通过研究发现, 基于 RasterCatalog 栅格数据组织方式结合影像金字塔、数据压缩技术能够实现海量遥感影像数据的高效存储与快速展示, 其效果明显优于关系数据库 BLOB 字段的影像数据存储方式。

1 影像数据存储技术

近年来, 随着遥感影像数据量的不断增长, 海量遥感影像数据的存储技术也随之迅速发展, 国内外学者提出了以关系数据库、空间数据库为主的栅格数据存储技术^[7], 其中应用广泛的有 Oracle 关系数据库 BLOB 字段存储和空间数据引擎 ArcSDE 存储 2 种。

Oracle 关系数据库 BLOB 字段存储方式易于管理, 具有可伸缩性、安全性及可用性的优点; 空间数

收稿日期: 2016-05-05; 修订日期: 2016-06-21

基金项目: 中国国土资源航空物探遥感中心项目“高分基础数据支撑分系统建设”(编号: 201330106)和“资源一号 02C 卫星应用系统(地矿)影像产品数据整合建库及管理”(编号: 201530605)共同资助。

第一作者: 随欣欣(1983-), 女, 博士, 工程师, 主要从事遥感信息化研究。Email: sxx5666@163.com。

据引擎支持超大型数据集,可灵活、高性能地搜索提取空间数据,是专门为多用户、分布式环境设计开发的体系架构,拥有逻辑上的无缝、连续的非瓦片式的空间目标数据模型,并支持多用户并发查询的快速响应。以下针对关系数据库 BLOB 字段和空间数据引擎的存储原理进行分析。

1.1 关系数据库 BLOB 字段存储

在 Oracle 数据库中,大对象(large objects,LOB)是用来存储大量的二进制和文本数据的一种数据类型(一个 LOB 字段可存储多达 4 GB 的数据)。Oracle8i 以上支持 3 种类型的内部 LOB:二进制数据(BLOB)、单字节字符数据(CLOB)和多字节字符数据(NCLOB)。其中 BLOB 字段适用于存储大量的二进制数据,如图像、视频和音频等。在通常的遥感影像数据管理系统中,影像数据以 BLOB 字段存储在 Oracle 数据库中。BLOB 字段包含 BLOB 列、BLOB 数据段和 BLOB 索引段 3 部分:BLOB 列由 BLOB 定位符和 BLOB 值组成,BLOB 定位符是一个指向 BLOB 字段实际存放位置的指针,BLOB 值存储 BLOB 数据;BLOB 数据段由多个数据块(chunk)组成,每个 chunk 用来存放 BLOB 数据;BLOB 索引段由多个 entry 组成,主要用于存放 BLOB 索引。

遥感影像由于数据量较大的原因,通常存放在 BLOB 数据段中。若 chunk 未超过 12 块,通过 BLOB 定位符指向存储在 BLOB 字段中的影像,不使用 BLOB 索引段;否则需要用 BLOB 索引段进行寻址,数据段中每一个 chunk 地址都存放在 BLOB 索引中,通过索引段寻址方式,可以定位到影像在 BLOB 字段中的存储位置,从而读取高分影像进行展示。这就导致 BLOB 字段存储和网络资源占用大,影响遥感影像的检索获取效率,多用户对海量遥感影像的并发访问受限。

1.2 空间数据引擎存储

空间数据引擎(spatial database engine,SDE)是 GIS 中介于应用程序和空间数据库之间的中间件技术,能够在常规数据库管理系统功能之外获得空间数据存储和管理的能力,具有代表性的是 ESRI 的 ArcSDE。RasterCatalog 数据模型是 ArcSDE 中存储、管理栅格数据的一种组织方式,通过 ArcEngine 提供的接口,将多个独立的影像数据文件无缝地显示在一个 RasterCatalog 图层中,并同时存储影像数据的空间位置信息。

RasterCatalog 图层在 Oracle 数据库中存储在若干张相互关联的表中,其中真正存储栅格影像数据的表包括:附录信息表、分块表、波段表和栅格表。附录信息表存储影像颜色映射、统计信息等;分块

表真正存储栅格像素值;波段表存储影像的所有波段信息;栅格表存储 RasterCatalog 中包含的栅格的属性。对于高分影像数据,SDE 通过建立 Raster_Columns(SRID 外键 < Spatial_References >)元数据表,来建立与导入的业务表(business table)之间的关系。

栅格目录中的每个影像数据都是独立的,利于数据更新和数据库维护,常用于管理分幅数据或者同一地区的多期数据,航遥中心现有影像多数为原始分幅影像,具有数据量大、覆盖面积广和部分地区多次覆盖的特点,使用 RasterCatalog 存储方式能够有效管理影像数据。

2 海量影像数据显示优化技术

2.1 影像数据压缩类型与压缩质量

海量遥感影像数据管理系统在管理海量影像数据时,为了节省数据库中的数据存储空间,在影像数据入库前,对数据进行压缩存储。系统内部在导入栅格影像数据时,可以根据需要选择不同的压缩类型和压缩质量,常见的压缩类型有无压缩、LZ77 和 JPEG 等,其中 LZ77 为无损压缩类型,JPEG 为有损压缩类型,对于 JPEG 有损压缩类型还可以选择不同的压缩质量完成数据压缩。

2.2 影像数据金字塔

对原始图像创建金字塔是改善影像数据显示性能的一种重要方法。影像金字塔的创建过程就是一个重采样的过程,金字塔文件中存放了多种空间分辨率的栅格数据,同一空间分辨率的栅格数据被组织在一个层面(layer)内,而不同空间分辨率的栅格数据具有上下的垂直组织关系:越靠近顶层,数据的空间分辨率越小,数据量也越小,只能反映原始数据的概貌;越靠近底层,数据的空间分辨率越大,数据量也越大,更能反映原始详情。

影像金字塔的各个连续图层间通常以 4:1 的比例进行重采样,常用的重采样方法有最邻近法、双线性插值法和三次卷积法。卫星或航空摄影等 tiff 和 img 格式的影像数据多采用双线性插值法或者三次卷积法^[1]进行重采样,以保证影像平滑显示效果。影像数据越大、金字塔级数越多,创建金字塔花费时间就越长,但在浏览展示时也将节省更多时间。

2.3 影像数据切片

随着遥感技术的发展,卫星遥感影像数据单幅数据量也越来越大,影像切片技术通过将一幅较大影像数据切分成很多小的切片进行存储,在加载影像时,根据视图窗口地理位置加载相应的切片数据,

从而减少数据加载时间,提高数据浏览展示的效率。当利用 RasterCatalog 图层进行影像数据存储时,栅格影像数据(包括金字塔)被切割成一块块存储在 SDE_BLK_<N> 表中,每条记录代表了一个切片。切片默认尺寸大小为 128 像素×128 像素,通常根据实际影像大小对切片尺寸大小进行调整。

3 实例分析

本文在研究影像数据高效展示的基础上,结合现有的影像数据存储技术,以 Visual Studio 2010 作为系统开发平台,Oracle11g 作为数据库管理平台,ArcSDE10.1 作为中间件消息处理技术,构建了影像

处理支撑数据库管理系统。作为一个海量数据管理系统,系统存储管理了大量国产卫星影像数据(如 GF-1 和 ZY02C 等)以及一些其他辅助数据,共计 176 万余景,数据量约 534 TB。

通过对影像数据存储技术、展示技术的对比研究,关系数据库 BLOB 字段存储方式存储时直接存储的是影像文件,占用较大存储空间,因此影像处理支撑数据库管理系统中采用了空间数据库 RasterCatalog 图层方式存储。系统构建了以数据压缩入库,创建金字塔,创建切片生成地图缓存,客户端浏览展示的工作流程,可实现影像数据的高效展示。影像数据存储与展示流程如图 1 所示。

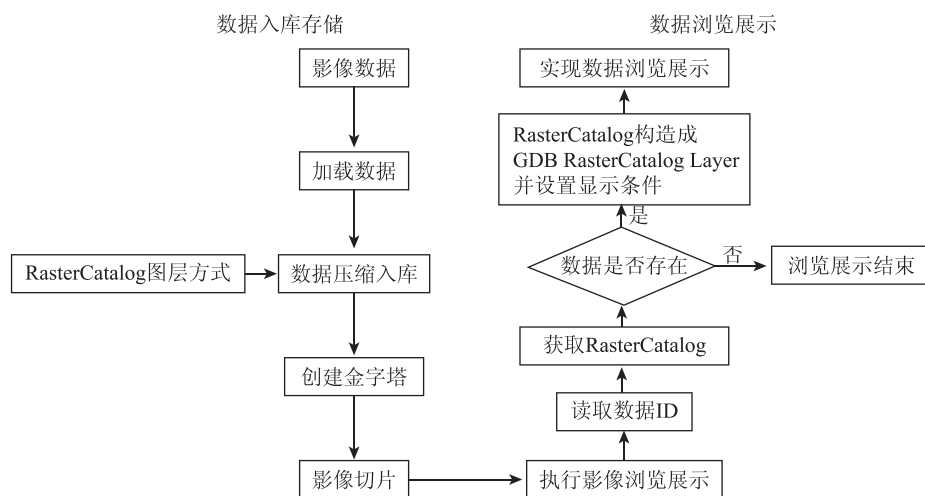


图 1 影像数据存储与展示流程

Fig. 1 Storage and display process of image data

3.1 压缩比对浏览效果的影响

选取一景 4.72 G 大小、tiff 格式无压缩无金字塔的栅格影像数据为数据源,在 ArcCatalog 中进行无压缩、LZ77 和 JPEG 共 3 种压缩类型的压缩测试,得到的测试结果以及视觉效果如表 1 所示。

表 1 压缩类型性能对比

Tab. 1 Performance contrast of compressed format

压缩类型	压缩质量/%	压缩后数据量	压缩比/%	耗时/s	视觉效果
无压缩	—	4.72 G	100.0	0	纹理清晰
LZ77	—	3.92 G	83.1	968	纹理清晰
	100	2.05 G	43.4	223	纹理清晰
JPEG	75	598 M	12.4	171	纹理较清晰
	50	396 M	8.2	146	纹理明显

对比实验结果得出,LZ77 无损压缩视觉效果很好,但因为是无损压缩,存储空间占用较大。压缩质量为 75% 的 JPEG 在压缩比纹理效果相对较好,在 1:3 000 比例尺下,纹理仍然能保持比较清晰;压缩质量为 50% 时,视觉效果较 75% 略差,但整体效果尚可,在 1:3 000 比例尺下,纹理较明显。

通过空间库 RasterCatalog 图层方式入库时,真

正存储栅格像素值的 SDE_BLK_<N> 表存在增长过快的情况,出现 N 倍的存储空间膨胀。考虑到数据存储空间与视觉效果,对比分析无损压缩以及压缩类型为 JPEG,压缩质量分别为 75% 和 50% 这 3 种情况对影像数据入库存储时存储空间膨胀的影响(如表 2 所示)。实验用 RasterCatalog 共 72 条数据,原始数据文件共 11.2 G。存储空间膨胀比率为栅格数据占用存储空间与原始文件大小的比值。

表 2 压缩类型结果对比

Tab. 2 Results of compressed format

压缩类型	压缩质量/%	BLK 表记录数	BLK 表大小/G	平均单条数据占用空间	存储空间膨胀比率/倍
无损压缩	—	19 810	188.2	2.61 G	16.78
JPEG	75	19 810	14.9	212.38 M	1.33
	50	19 810	0.4	5.69 M	0.04

通过对比得出,当压缩类型为 JPEG、压缩质量为 50% 时存储空间膨胀比率最低,有利于影像数据的存储管理。

通过对压缩类型、压缩质量、视觉效果和存储空

间膨胀比率的综合分析,影像处理支撑数据库管理系统采用压缩类型为 JPEG,压缩质量为 50% 进行压缩入库管理,能够满足大范围影像浏览的需求。

3.2 金字塔构建方式对浏览效果影响

数据入库后,为了实现快速浏览展示,程序内部对已入库的数据建立影像金字塔。对以 JPEG 压缩类型、50% 压缩质量进行数据入库的数据分别采用最邻近法、双线性插值法和三次卷积法 3 种常用的重采样方法进行对比(表 3),设置构建 7 层金字塔。

表 3 重采样方法性能对比
Tab.3 Performance contrast of different resampling methods

重采样方法	完成时间/s	金字塔文件数据量/M	视觉效果
最邻近法	410	465	较差
双线性插值法	433	446	很好
三次卷积法	614	432	很好

对比 3 种重采样方法,就压缩速度、文件数据量和视觉效果结合来看,双线性插值法建立金字塔耗时较短,且能够获得很好的视觉效果,但最终文件数据量略大于三次卷积法。而三次卷积法耗时太长,不建议采用,因此影像处理支撑数据库管理系统选取了双线性插值法建立影像金字塔。

3.3 图像切片大小对浏览速率的影响

空间数据库对影像进行存储时,切片大小默认为 128 像素×128 像素。对于无压缩的数据,128 像素×128 像素切片大小的栅格影像数据切片应该包含 16 K 个像素。就高分影像数据而言,影像位深为 16 Bit,即每个像素占据 2 个字节;因此,128 像素×128 像素切片大小将在数据库中占据 32 KB 存储空间。采用 Oracle 数据库进行入库时,默认创建数据库的数据块大小为 8 K,则 128 像素×128 像素切片占据了 2 个数据块,Oracle 读取这个切片就需要做 4 个 I/O 操作。在数据库中,通过尽量减少 I/O 操作来提高数据库访问效率,因此,针对现有高分数据源以及系统部署环境等实际情况,系统采用 64 像素×64 像素作为最优切片大小进行影像切片。

3.4 影像数据展示速度比较

根据现有技术,主要设计如下 3 种技术路线实现影像数据展示。

方式 1:以关系数据库 BLOB 字段作为影像数据存储方式。在数据库中,通过数据 ID 判断影像数据是否存在。如果存在,则下载影像文件并生成坐标参考文件,读取文件并构造 IRasterCatalog Layer,从而实现影像数据的浏览展示;如果不存在,则不进行展示。

方式 2:以空间数据库作为影像存储方式。在

数据库中,通过数据 ID 获取 RasterCatalog 相关表,判断影像数据是否存在。如果存在,则获取数据库中存储的影像数据构建 Raster Layer,实现影像数据的浏览展示;如果不存在,则不进行展示。

方式 3:以空间数据库作为影像存储方式。在数据库中,通过数据 ID 获取 RasterCatalog 相关表,判断影像数据是否存在。如果存在,则直接通过 RasterCatalog 构建成 GDB RasterCatalog Layer 并设置显示条件,实现影像数据的浏览展示;如果不存在,则不进行展示。

在影像处理支撑数据库管理系统中,针对以上 3 种浏览展示技术进行效率测试,结果如表 4 所示。

表 4 影像数据浏览展示性能分析

Tab.4 Performance analysis of image data's browse and display (s)

数据量/景	方式 1	方式 2	方式 3
10	5 ~ 10	5 ~ 10	<1
50	>20	12 ~ 14	<1
100	>40	24 ~ 37	<2
500	>135	96 ~ 120	<3
1 000	>410	230 ~ 325	<5

通过对比分析,方式 3 的数据浏览展示效率最高,且数据量越大,优势更加明显。因此在影像处理支撑数据库管理系统中最终采用该方式实现影像数据的快速浏览展示。

4 应用分析

在相同的环境下,对采用了方式 3 的影像处理支撑数据库管理系统和采用了方式 1 的其他影像管理系统进行了应用对比分析。通过验证分析,针对超大型数据集空间数据库 RasterCatalog 图层存储方式较 Oracle 数据库中关系数据库 BLOB 字段存储方式更具优势。

将 10 000 景高分一号卫星影像数据分别在影像处理支撑数据库管理系统及其他影像管理系统中进行数据入库管理和浏览展示,统计不同数据量执行 10 次操作的平均耗时,结果如表 5 所示。

表 5 不同系统中数据浏览展示性能分析

Tab.5 Performance analysis of different system's browse and display functions (s)

数据量/景	影像处理支撑数据库管理系统(方式 3)	其他影像管理系统(方式 1)
10	0.79	8.29
50	0.98	15.77
100	1.64	32.70
500	2.31	98.92
1 000	4.20	362.90

对比实验结果可以看出,影像处理支撑数据库管理系统较其他影像管理系统在数据浏览展示效率上存在明显的优势,能够较好地实现海量影像数据的快速浏览展示。

5 结 论

本文通过对关系数据库 BLOB 字段存储和空间数据库 RasterCatalog 存储 2 种存储栅格影像的方式进行了对比分析,选择空间数据库 RasterCatalog 作为航遥中心海量数据的存储方案。通过对影响浏览速度的参数进行实验,定量分析了不同的压缩格式、切片大小和金字塔采样方式等对海量数据浏览性能的影响,实验证明当采用压缩质量为 50% 的 JPEG 压缩和双线性插值法构建影像金字塔,以 64 像素 × 64 像素切片大小进行数据存储时,浏览效果最优。在此基础上完成了航遥中心影像处理支撑数据库管理系统 533 TB 数据的入库管理,并通过与前期开发的其他影像管理系统进行了性能对比,验证了该系统能显著提高高分影像的浏览速度,表明了基于 RasterCatalog 栅格数据模型能够实现海量遥感数据的高效存储与快速展示,满足航遥中心现有影像数据的存储管理需求。

参考文献 (References):

- [1] 许自舟,孙淑艳,梁 斌,等. ArcGIS 中海量影像数据存储与发布技术[J]. 海洋环境科学,2014,33(1):99-104.
Xu Z Z, Sun S Y, Liang B, et al. Technique for mass image data management and publication based on ArcGIS[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(1):99-104.
- [2] 薛 涛,刁明光,李建存,等. 资源环境遥感海量空间数据存储、检索和访问方法[J]. 国土资源遥感,2013,25(3):168-173. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 03. 28.
Xue T, Diao M G, Li J C, et al. Approach to storing, retrieving and accessing mass spatial data in resources and environments remote sensing[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(3):168-173. doi:10.6046/gtzyyg. 2013. 03. 28.
- [3] 王昀昀,朱勤东. 基于 ArcSDE 的影像数据入库研究[J]. 测绘通报,2013(1):84-86.
Wang Y Y, Zhu Q D. Research on image data storage based on ArcSDE[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(1):84-86.
- [4] 钟永友. 基于 ArcSDE 的物流信息系统空间数据库设计[J]. 计算机与数字工程,2010,38(1):74-77.
Zhong Y Y. Design of logistics information system spatial database based on ArcSDE[J]. Computer and Digital Engineering, 2010, 38(1):74-77.
- [5] 胡仪员. 基于 ArcSDE for Oracle 的地震灾害紧急救援队数据库系统建设[D]. 成都:西南交通大学,2008.
Hu Y Y. The Construction of Database for Earthquake Disaster Emergency and Rescue Team Based on ArcSDE for Oracle[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [6] 王华斌,唐新明,李黔湘. 海量遥感影像数据存储管理技术研究与实现[J]. 测绘科学,2008,33(6):156-157,153.
Wang H B, Tang X M, Li Q X. Research and implementation of the massive remote sensing image storage and management technology[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(6):156-157, 153.
- [7] 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[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2005,30(2):166-169.
Li Z H, Peng M J. Remote sensing image database based on RD-BMS[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(2):166-169.

Research on mass remote sensing image storage and rapid browse based on RasterCatalog

SUI Xinxin¹, WANG Yanzuo¹, JIN Peidong¹, WEI Yingjuan¹, WANG Wenkai², MA Junhuan²

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;

2. Beijing JW Digital Source IT Co. Ltd., Beijing 100043, China)

Abstract: Since the GF-1 satellite was launched on April 26, 2013, a large quantity of data have been obtained, and the data volumes have entered into the multi-terabyte range, and even continue to grow. For effective management, retrieval and display of high-resolution remote sensing images, the authors take the efficient data storage model and faster browsing into consideration. The related experiments show that the storage and fast browsing of mass data can be realized by constructing the image pyramid by method of JPEG compression quality of 50% and method of quadratic interpolation, storing data with slices of 64 × 64, and creating GDB RasterCatalog Layer, which satisfies the need of industry-specific applications.

Keywords: GF image data; RasterCatalog; rapid browse

(责任编辑:李 瑜)

doi:10.6046/gtzyyg.20xx.0x.xx

引用格式: 随欣欣, 眭素文. 基于 MapGIS 和 ArcGIS 的遥感解译成果图件数据库研究与实现[J]. 国土资源遥感, 20xx, xx(x): xx-xx.

Sui X X, Sui S W. Research and implementation of remote sensing interpretation map database based on MapGIS and ArcGIS [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 20xx,xx (x): xx-xx.

基于 MapGIS 和 ArcGIS 的遥感解译成果图件数据库设计与实现¹

随欣欣, 眭素文

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 遥感解译成果图件来源复杂、格式繁多, 通用的影像数据系统存在无法同时进行图件的符号化显示和图层的空间数据管理等问题, 导致大量经过野外验证的成果图件闲置。本文充分利用 MapGIS 和 ArcGIS 平台在图件数据和空间数据管理方面的优势, 结合用户对遥感解译成果图件服务的需求, 提出了遥感解译成果图件资料和空间要素图层的一体化存储管理方式, 开发了遥感解译成果图件数据库管理系统, 并根据解译成果图件的特点设计了灵活的数据入库工具, 实现了不同格式成果图件资料的信息化及一体化管理, 极大提高了遥感解译成果图件的服务能力和成果价值。

关键字: 遥感解译; 图件; MapGIS; ArcGIS; 数据库

中图分类号: TP 79 文献标志码: A 文章编号:

0 引言

我国历次的遥感调查与地球科学研究积累了丰富的地质资料和基础数据, 尤其是近年来, 随着地质事业的飞速发展, 数据量急剧增多^[1], 形成了大量的图形、图像成果资料。遥感解译成果图件作为成果资料的重要组成部分, 一方面可用于指导生产实践, 更重要是积累经验以备今后的科学研究所用^[2-3]。由于勘察方式和应用领域的不同, 遥感解译成果图件数据格式各异, 受管理水平的局限, 大量的经过野外验证的遥感解译成果资料无法被有效利用。

整理这些解译成果图件, 将过去的“死资料”转换为“活数据”尤为重要, 有效的存储、管理、使用这些日益增长的解译数据, 离不开功能强大的数据库系统^[4]。现有的遥感解译成果数据管理多依托于遥感业务系统^[5-8], 基于同一专业领域存储成果数据, 且管理软件多为单一 GIS 平台, 无法满足多

领域多类型解译成果图件统一存储管理需求。为了更好地利用遥感解译成果图件, 规范数据管理、保障数据安全、实现成果共享, 亟需设计和建设合理的遥感解译成果图件产品数据管理系统。

因此, 本文根据图件数据的特点, 结合业务需求, 基于 MapGIS 和 ArcGIS 设计开发了遥感解译成果图件数据库系统。针对图件资料类型多、格式杂、分散广等问题, 提出了遥感解译成果图件资料和空间要素图层的一体化存储管理方式。信息化的成果管理系统对于降低资料存储成本、提高数据使用效率、提升成果利用价值均具有重要意义。

1 系统总体设计

通过梳理分析遥感解译成果图件, 以及调研内外部用户对解译成果图件服务的要求, 搭建合理的系统框架, 并在此基础上进

¹ 收稿日期: 20xx.xx.xx; 修订日期: 20xx.xx.xx

基金项目: 中国地质调查“航空物探遥感数据集成与服务系统建设”项目(编号: 1212011120425)。

第一作者简介: 随欣欣(1983-), 女, 理学博士, 高级工程师, 主要从事遥感信息化研究。
E-mail: sxx5666@163.com。

行数据库系统及数据库管理系统的设计。

1.1 成果图件分析

遥感解译成果图件来源于遥感业务项目组提交的成果，多以传统记录的方式登记图件名，实体图件存放于资料库房中。上世纪 90 年代前的成果图件多为人工手绘，90 年代后陆续出现了 MapGIS 等软件制作的图件，这两部分图件均为纸介质或者扫描电子图片存储，约 1400 余幅；2000 年以后的成果图件均为电子图件，大多数成果图件都包含矢量数据，约 3500 余幅。

图件数据格式多样，包括纸质图件，Jpg、Bmp 等格式的图片以及 MapGIS、

Shape、e00 等格式的矢量数据。根据用户需求和通用图件管理软件特点，将成果图件整理为 MapGIS 格式的图件文件和 Shape 格式的要素图层两种，在保留了图件符号化特色的同时提高空间查询分析的效率。

1.2 系统框架设计

从成果内容、数据库设计、数据建库、信息管理和系统部署 5 个方面考虑，为本系统规划整体框架。框架主要包括遥感解译成果图件数据库系统，成果数据库设计，数据建库软件，辅助体系（产品目录、要素编码、信息交换体系）以及基础运行环境 5 个部分。具体内容如图 1 所示。

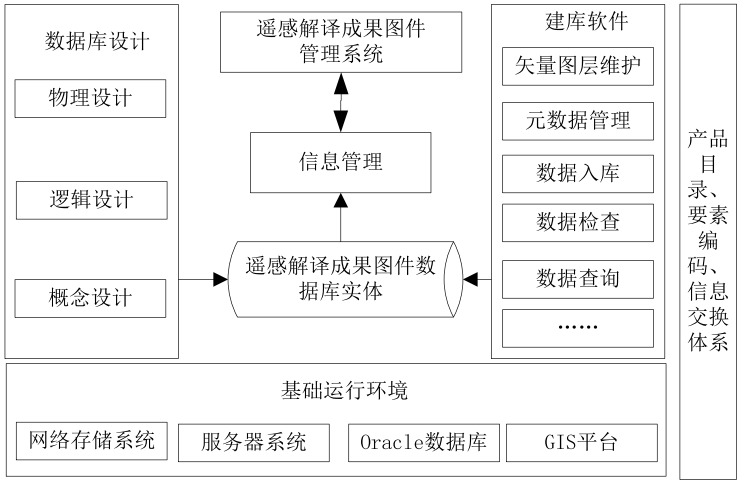


图 1 系统框架图

Fig.1 The system framework

1) 遥感解译成果图件数据库。包括数据库和数据库管理系统两部分。综合考虑图片和矢量两种图件格式，利用 ArcGIS 和 MapGIS 构建数据库，存储管理遥感解译成果图件的所有数据，并提供相应的数据查询、检索、服务等功能。

2) 数据库设计。依据遥感解译成果数据库信息共享服务需求，按照产品分类服务内容和数据要素类型，对数据库进行概念设计、逻辑设计和物理设计，创建数据实体要素和属性表，完成遥感解译成果图件数据库设计。

3) 建库软件。通过构建规范完善的数据库建库软件，实现数据库结构维护、图层维护、数据检查、数据入库等功能，完成解译成果数据库实体建设。

4) 产品目录、要素编码、信息交换体系。该部分是系统建设依据和基础，信息产品建设按照产品目录分类进行规划，并且依

据各产品信息交换和服务的要求，按照规范统一的产品要素编码进行建设。

5) 基础环境。基础环境由网络存储系统、服务器系统、Oracle 数据库、GIS 平台等构成，环境建设过程按照项目组安全服务要求进行。

1.3 数据库设计

通过对遥感解译成果图件内容分析、抽象，了解系统和成果图件处理需求，获取数据库存储的数据内容、结构和特点，分析数据项、数据流及数据处理过程，发掘数据间关联，抽象出数据概念模型，按照关系规范化理论要求将概念模型转化为关系模型，形成逻辑结构，然后选择相应的数据库平台进行物理设计，进而完成数据库设计。

概念设计形成数据实体，遥感解译成果数据内容是解译成果的空间要素，元数据和辅助数据。该数据库以要素图层数据为核心，将成果文件、元数据、辅助数据建立与

之对应的关系，构建数据库概念模型。依据概念设计及数据分析，设计数据库的逻辑结构，将遥感解译成果数据按照层次结构进行管理，逻辑上采用统一存储管理的多层次组织方式，形成数据库逻辑层次结构。对不同数据对象进行对象属性及相互关系设计，形成遥感解译成果数据库逻辑模型。采用 Oracle11G 物理部署遥感解译成果图件数据库，综合考虑空间时间效率、维护代价和应用需求，遥感解译成果数据库采用 GEODATA、METADATA、AUXLDATA 三种模式组织数据，其中 GEODATA 中主要为解译成果数据内容，该类数据管理空间数据；METADATA 中主要为成果元数据内容；AUXLDATA 属于公用共享模式。

数据库存储的遥感解译成果类型包括要素图层、元数据和成果文件。

要素图层为解译成果产品的空间图层，

按照所属类别划分为工程地质、地质灾害、区域国土资源遥感调查等十类，空间图层以 shape 格式保存。所有的要素图层都包含空间信息和属性信息。

元数据由要素图层元数据、数据库元数据以及文件元数据构成。根据管理应用需求，元数据又分为核心元数据、空间数据元数据和管理元数据等。

成果文件以 MapGIS 工程文件格式保存，包含的内容包括点、线、区图层，属性表，图像，符号库，字体库等。图层、图像、表格等可任意组合为新的图件提供给用户使用。

元数据和要素图层中的属性数据存储于关系数据库 Oracle 中，空间数据采用 Oracle Spatial 进行统一组织、存储和管理。成果文件为 MapGIS 工程文件，以文件资料方式统一编目管理，数据库构成如图 2 所示。

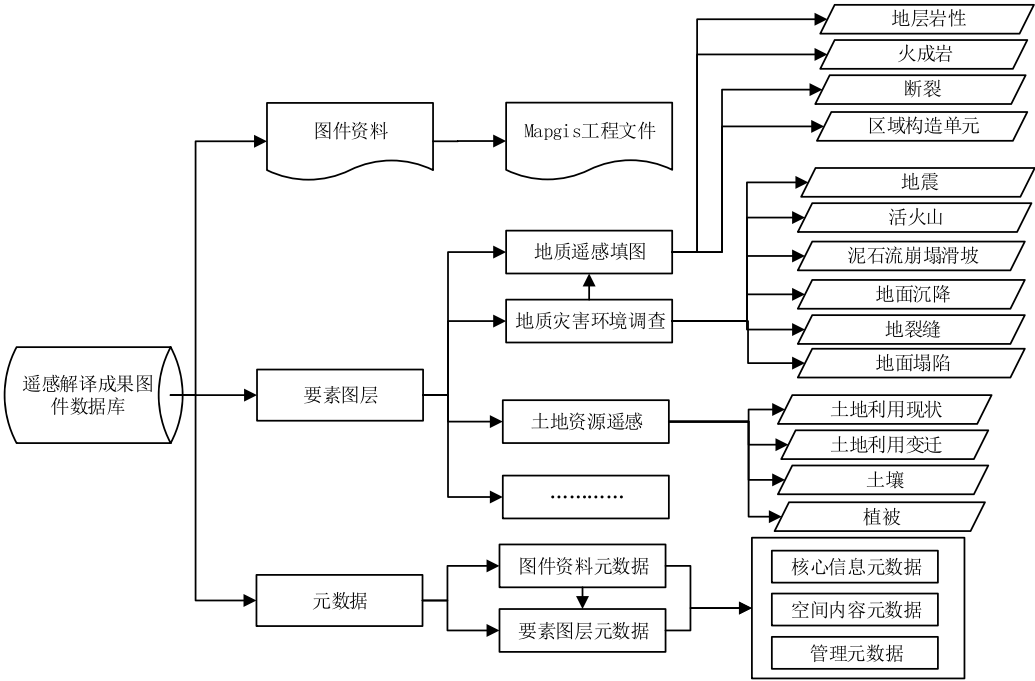


图 2 数据库构成图
Fig.2 The database structure

1.4 数据库管理系统设计

对数据内容、数据格式、数据服务、数据管理等方面进行分析，确定遥感解译成果图件数据库管理系统构成。从功能上分析，

系统包括数据检查、数据入库、数据查询、数据浏览、元数据结构定制、数据维护等内容。管理系统构成如图 3 所示。

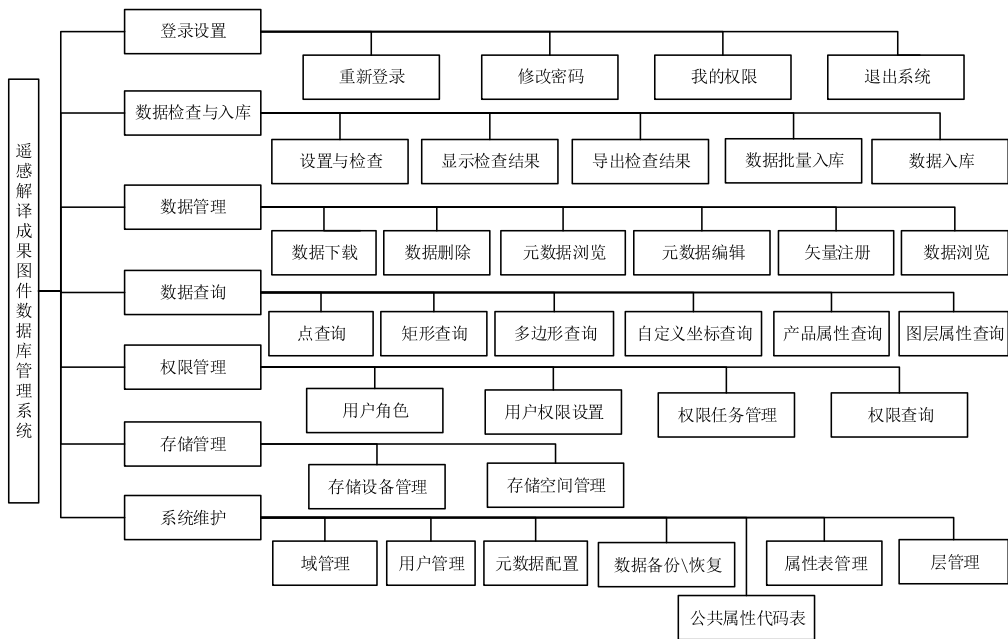


图 3 数据库管理系统构成图

Fig.3 The database management system structure

2 系统实现

2.1 建设流程

根据数据内容、数据特点以及现有数据库相关软硬件资源，依托成熟大型商业化关系数据库管理系统，利用专业化数据库设计工具进行数据库整体框架设计，通过数据整

理、数据入库等工作，建立遥感解译成果图件数据库系统，实现数据建模、检查、入库、编辑、查询等功能。为了确保数据库的科学性，遥感解译成果图件数据库系统建设分 6 个步骤，流程图如图 4 所示。

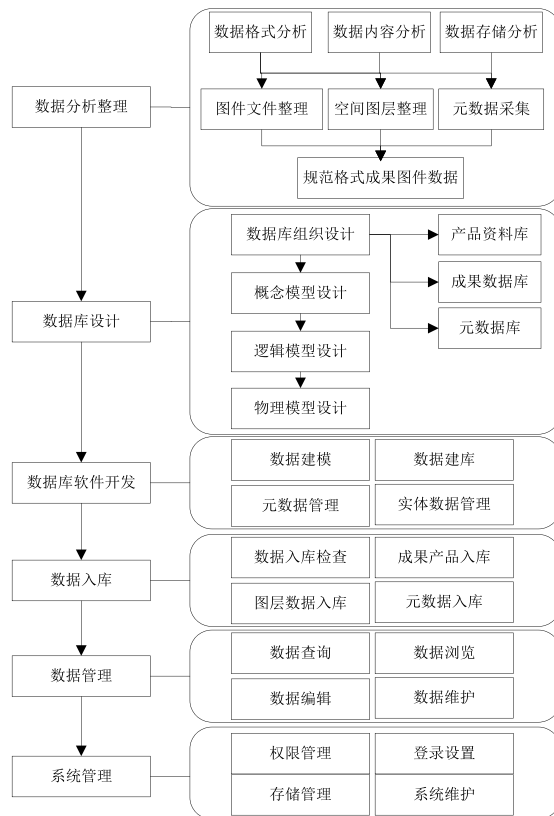


图 4 数据库系统建设流程

Fig.4 Flow chart of database construction

2.2 系统建设

通过数据特性分析与数据库构建思路,设计遥感解译成果图件资料和要素图层一体化的数据库存储系统方案,在统一的数据库框架下,制定数据库命名规范,确定各类表结构和编码规则,通过 ArcSDE10 空间数据引擎在 Oracle10.2 中构建数据库。系统采用 Client/Server 模式,支持对异构的遥感解译成果图件及相关属性数据等的一体化存储和管理。数据库系统建设主要包括图件资料管理、要素图层管理和数据库系统建立。

2.2.1 图件资料管理

图件资料管理是将用户提交的各种原始资料规范整理为 MapGIS 工程文件,以文件的形式保存在系统的资料库中,即将本地文件资料装载到平台资料数据库中,并填写资料元数据。资料入库时不改变原始文件的数据内容和类型,维持源文件的初始状态。

为了保证图件资料的规范性,需对图件资料进行检查,检查条件包括:选择的文件是否正确、元数据模板是否合适、存储资料是否分配以及分配是否恰当等。由于 MapGIS 图件的制图需要用到字体库和符号库,还需将每个 MapGIS 工程所使用的字符库保存,系统提供 MapGIS 图库管理功能。根据图件资料形式提供单文件、文件集和文件夹入库三种灵活的入库方式,大大节省了图件入库工作量。

2.2.2 要素图层管理

要素图层管理是将空间数据保存到数据库中,入库时按照对应的数据集系列规范处理需要入库的数据,并将处理转换后的空间数据保存到 Oracle spatial 数据库中。

要素图层入库的核心是设置入库匹配规则,即点、线、面的 shape 图层与库中已建立的图层匹配,设置数据源属性与产品数据属性之间的映射关系,保持数据库规范。

要素图层数据来自于两部分,一部分由 MapGIS 的矢量文件转换得到,另一部分由其余各类矢量文件转换而得,大多数要素图

层都来自于前者。本系统包含自主开发的格式转换工具,可将 MapGIS 格式的矢量文件转换为 shape 格式,以便完成选定目录下的所有点、线、区文件批量转换。转换工具提供单文件转换、单文件夹转换和批量文件夹转换三种转换方式,可避免大量重复性操作,提高工作效率。其余各类矢量文件需要整理成 shape 格式的矢量文件。

2.2.3 数据库系统建立

本系统采用 Client/Server 体系结构,使用 Microsoft Visual Studio 2010 集成开发环境的 C#开发语言,以 ArcEngine 10 为地理信息系统开发平台,并调用 MapGIS 开发模块进行组件式开发,通过 ArcSDE 10 空间数据引擎在 Oracle 10.2 中构建数据库,以网络磁盘作为系统的管理和数据的存储环境,进行数据库系统的构建。

图件资料库是以文件资料编目方式统一管理的 MapGIS 工程文件集。要素图层库即采用 Oracle Spatial 对矢量数据进行统一组织、存储和管理。元数据库以 Oracle 为基础,管理资料图层等各类元数据信息。对于图件资料库中的数据,利用 PL/SQL 在数据库中建立其与对应要素图层的映射关系表,实现图件资料和要素图层的交互查询和一体化存储管理。

3 系统的运行与应用

遥感解译成果图件数据库系统有效支撑了图件资料和要素图层的一体化存储,提供了实用的图件数据入库和检索工具,实现了成果数据的信息化管理和服务。目前该系统已管理遥感理解译成果图件 1396 幅,图 5 为系统主界面。

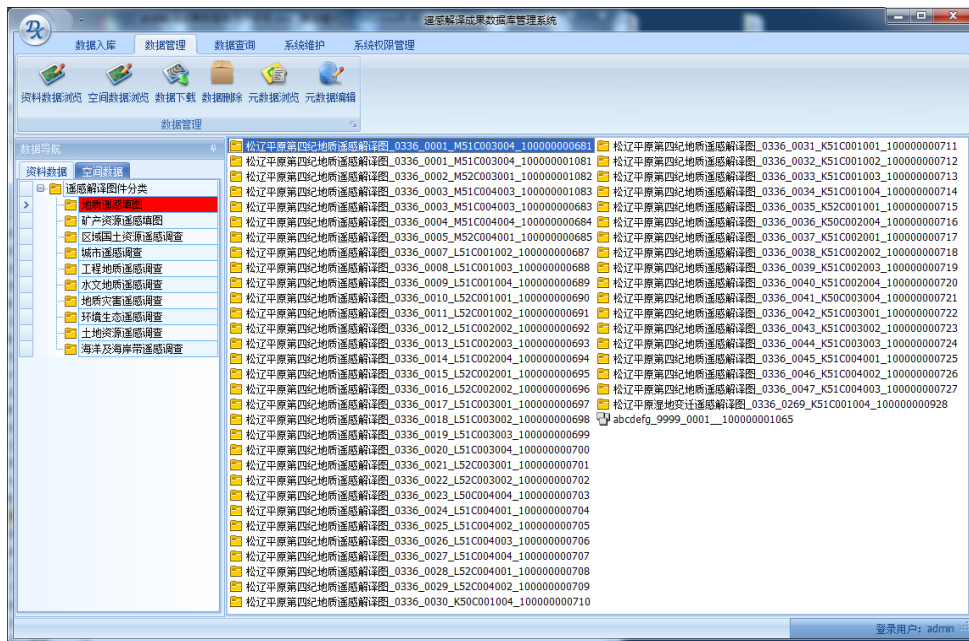


图 5 系统主界面

Fig.5 The system main interface

3.1 数据入库

数据入库模块是系统其他功能的前提和基础，提供图件资料、空间数据、元数据、MapGIS 字符库以及其他辅助数据的入库功能。

图件资料入库前需先从当前主题分配的元数据模板中选择一个，按模板内容填写，并设置存储设备到入库主题。加载待入库资料文件并入库检查，并结合元数据模板提取元数据信息，检查后保存元数据，然后保存资料文件，完成图件资料入库。同时需入库 MapGIS 字符库，便于用户获取相应的图形化产品。

要素图层入库的前提是对应图层的数据结构表已建好。对于由 MapGIS 转换的 shape 图层，需要先入库 MapGIS 图件资料，以便 PL/SQL 在数据库中建立文件资料与图层数据的映射关系表。要素图层入库的核心

是设置数据匹配关系，包括图层匹配和图层属性字段的匹配。由于解译成果图件的属性字段及内容为专家解译填写，命名及值域均不规范，入库时需要分别设置数据源中每个要素层的匹配关系。

3.2 数据管理

数据管理模块提供了数据展示、图件资料浏览、空间数据浏览、元数据浏览、数据下载、数据删除、元数据编辑等功能。系统的数据显示列表提供资料数据和空间数据两种显示方式，如图 6 所示。资料数据显示调用 MapGIS 功能模块，以 MapGIS 原始的图件形式进行展示；空间数据显示调用 ArcGIS 功能模块，以点、线、面的矢量形式展示。

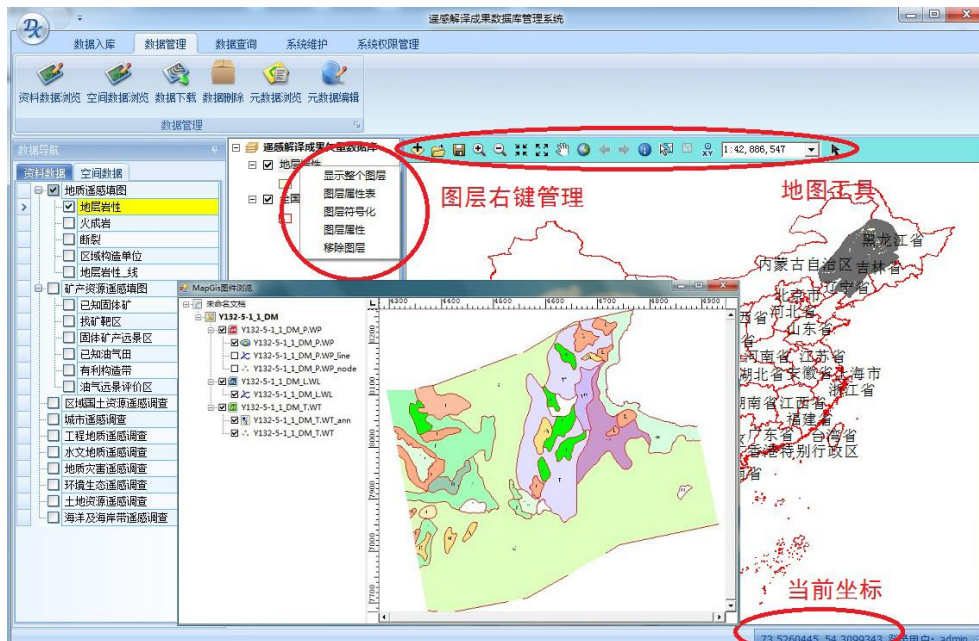


图 6 图件资料和空间数据展示界面
Fig. 6 The display interface of map data and spatial data

3.3 数据查询

系统提供空间和属性两种查询方式，可基于点、线、矩形、多边形、空间范围等进行空间查询，也可以根据图层属性、产品属性、项目编号、产品类型、图件名称、关键字、设定 SQL 语句等方式进行属性查询，所有查询结果可以利用地图工具进行放大、缩小、漫游等操作。

3.4 系统维护

系统维护包括用户权限维护、资料库访问设置、MapGIS 支持工具设置以及图层矢量库体系维护。MapGIS 支持工具是基于 MapGIS K9 进行二次开发的 MapGIS 格式数据与 Shape 格式数据进行转换的工具，利用该工具可以管理查看转换 MapGIS 格式数据。图层矢量库体系维护提供对图层结构、图层字段结构的添加、删除、显示等操作，为本系统针对实际应用开发的特色模块。

4 结语

根据遥感解译成果遥感图件的现状和特点，结合遥感信息化管理和业务应用的需要，研究并提出遥感解译成果图件资料与要素图层的一体化管理机制，开发并实现了基于 MapGIS 和 ArcGIS 平台的成果图件产品数据库管理系统。该系统已在中国国土资源航空物探遥感中心局域网部署运行，入库并

管理了大量整理后的遥感解译成果图件，已向专业人员提供该数据库中的成果图件 60 余次，极大提高了解译成果图件的利用率和成果价值。成果图件产品数据库管理系统的投入应用，使多源成果图件数据的存储与管理更具有灵活性、可扩展性和可维护性，为全面整合遥感解译成果图件、完善统一数据资源框架、开展数据资源集成和综合服务建设提供基础数据支撑。

参考文献(References):

- [1] 王润生,熊盛青,聂洪峰等.遥感地质勘查技术与应用研究[J].地质学报,2011,85(11):1769-1743.
 - [2] 其和日格,韩志军.地质调查信息化建设[J].国土资源信息化,2003,(1):12-16.
 - [3] 茹湘兰,王黔驹,连健等.关于推进原始地质资料社会化服务的对策建议[J].中国矿业,2013,22(7):49-52.
- WANG R S,XIONG S Q,NIE H F,et al.Remote sensing technology and its application in geological exploration[J].Acta Geologica Sinica, 2011,85(11):1769-1743.
- QIHE Rile,HAN Z J.Construction of geology survey infomatization[J].Land and Resources Infomatization, 2003,(1):12-16.
- RU X L,WANG Q J,LIAN J,et al. Proposals in the social service of original geological

- data[J].China Mining Magazine, 2013,22(7):49-52.
- [4] 郭豫宾,何政伟,徐辉熙.应用 MAPGIS 和 ARCGIS 构建矿产规划数据库[J].测绘与空间地理信息,2009,32(5):127-129.
- GUO Y B, HE Z W, XU H X. Using MAPGIS and ARCGIS construct minerals plan database[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2009, 32(5): 127-129.
- [5] 张文,孟令奎,周扬等.多源水利遥感数据的一体化管理机制研究[J].水利信息化,2012,(4):1-5.
- ZHANG W, MENG L K, ZHOU Y, et al. Study on integrated management mechanism of multi-resources remote sensing data for water conservancy[J]. Water Resources Informatization, 2012,(4):1-5.
- [6] 叶水盛,袁鑫.地学综合信息图库管理系统的进一步开发应用[J].吉林大学学报(地球科学版), 2010,40(3):726-732.
- YE S S, YUAN X. Further development and application of geosciences synthetic information maps database management system[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2010, 40(3):726-732.
- [7] 王建敏,孟凡帅,孙琳.地理信息产品综合浏览系统的建立[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2010,30(3):378-381.
- WANG J M, MENG F S, SUN L. Development of integrated browsing system for GIS products[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2010,30(3):378-381.
- [8] 王文志,白云鹏,王磊.地质调查遥感数据服务系统设计与实现[J].地质力学学报,2012,18(3):296-305.
- WANG W Z, BAI Y P, WANG L. Design and implementation of remote sensing data service system for geological survey[J]. Journal of Geomechanics, 2012,18(3):296-305.

Research and implementation of remote sensing interpretation map database based on MapGIS and ArcGIS

Sui xinxin, Sui suwen

(China Aero-Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Remote sensing interpretation map has characteristics including complex sources and various formats, and the traditional image database system cannot simultaneous display map symbols and manage spatial data, which caused large number of maps after field confirmation idle. Taking advantage of the MapGIS and ArcGIS platform in management of the map data and spatial data, considering the needs of users to map service, the method is put forward integrated storage and management of map data and element layers, and the remote sensing interpretation map database system is developed. According to the characteristics of maps, the flexible tool of importing data is designed. This system realizes the information management of the multiple format maps that are scattered stored, which greatly improves the service capability and research value of the maps.

Key words: remote sensing interpretation; map; MapGIS; ArcGIS; database

doi: 10.6046/gtzyyg.2018.03.32

引用格式: 随欣欣, 眭素文, 刘 锐. 面向遥感业务应用的解译成果数据管理系统研究和构建 [J]. 国土资源遥感, 2018, 30(3): 238–243. (Sui X X, Sui S W, Liu K. Research and construction of interpretation result data management system toward remote sensing application [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(3): 238–243.)

面向遥感业务应用的解译成果数据管理系统研究和构建

随欣欣, 眭素文, 刘 锐

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要: 针对遥感解译成果数据存储、管理、应用等方面存在的问题, 结合地质调查信息服务体系建设的需求, 建立了面向遥感业务应用的解译成果数据管理体系。通过对图件资料、要素图层和文本数据的有效组织, 以 ArcGIS 10 和 MapGIS K9 为开发平台, 采用 C# 为开发语言设计并构建了基于 C/S 模式的遥感解译成果数据库管理系统, 开发了实用的数据入库、查询展示、数据体系构建维护工具, 实现了原有不同格式分散存放资料的一体化管理和服务, 保障了遥感解译成果资源的有效利用和可持续发展。

关键词: 遥感解译; 成果数据; 管理系统; 数据库; 一体化

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2018)03-0238-06

0 引言

从 20 世纪 80 年代起, 遥感地质调查技术飞速发展, 相关研究单位广泛开展了遥感矿产资源勘查与地球科学研究, 在区域地质调查、矿产资源勘查、水工环地质调查和地质灾害监测等领域都进行了深入的研究^[1-3], 积累了大量的图形、图像、文字等形式的成果资料。以往受存储管理水平的限制, 这些资料仅能被个别研究人员参考, 使得大量的经过野外验证的数据被闲置, 造成成果资源的严重浪费。目前面向遥感业务应用的管理系统多为单一专题的遥感成果数据管理系统^[4-6], 且现有建库软件主要基于单一 GIS 平台, 无法同时满足图件数据和空间数据的有效编辑、管理、查询和分析的需要。

随着地理信息技术、网络技术的发展, 解译成果数据的高效存储利用与有效挖掘都面临着新的挑战 and 机遇。在原有成果数据的基础上, 如何更好更快地对不同时期不同类别的解译成果进行汇总、整合和建库, 如何更加清晰、便捷、有效地表达不同尺度成果图件内容, 如何更加高效、准确地从大量成果图件中获取满足专业应用领域所需要的信息, 最终为专业领域人员提供合理有效的信息服务, 成为当今

科研人员关心的问题。研究人员充分利用 MapGIS 和 ArcGIS 平台优势, 提出了图件资料和空间数据的一体化存储管理方式, 构建并开发面向遥感业务应用的成果数据管理系统, 为相关研究单位多源遥感成果数据的应用和服务提供了实用性的技术支持。

1 遥感解译成果数据管理系统需求分析

建立完善的遥感解译成果数据综合管理系统, 是实现解译成果数据集中存储、有效管理和高效服务的保障。通过对数据格式、内容的分析, 总结成果数据特点, 本文提出数据库构建的思路和原则, 数据分类体系和数据存储结构。

1.1 数据特点

遥感解译成果数据是根据遥感业务应用处理后所生成的包括图件、矢量、文本等格式数据, 通常类型复杂且数据量大。为了建立有效的成果管理系统, 应对数据格式和内容进行深入分析, 总结数据特点, 更好地利用成果数据。

1.1.1 数据格式分析

遥感解译成果图件来源复杂, 且早期并未对成果数据格式进行规定, 导致解译成果图件数据格式繁多, 包括纸质图或 jpg 等格式的图片 and MapGIS,

收稿日期: 2017-03-02; 修订日期: 2017-05-03

基金项目: 中国地质调查局“航空物探遥感数据集成与服务系统建设”项目(编号: 1212011120425)资助。

第一作者: 随欣欣(1983-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事遥感信息化研究。Email: sxx5666@163.com。

Shape, ArcInfo, MapInfo, e00 等格式的矢量数据。按照现有遥感解译成果图件数据格式,将整理后的遥感解译成果图件归为 2 类:一类是图件数据,一类是空间数据。图件数据以 MapGIS 格式管理,空间数据以 Shape 格式管理。

MapGIS 图件数据是具有标准地理信息,统一数据格式、属性、分层模式的数据,由点、线、面空间图层组成。其保留了图件的产品整饰和符号化,可与专业信息叠合,也可直接打印输出。

Shape 空间数据作为通用的数据库图层文件格式,可有效实现空间叠加、处理转换、统计分析等,满足解译成果图件中对空间信息的检索查询需求。

成果报告格式较为单一,目前均为 doc 格式。

考虑版权等问題,都将整理后的解译成果报告数据保存为 pdf 格式。

1.1.2 数据内容分析

根据遥感解译成果图件内容,参照国土资源部信息高层分类与编码标准^[7],将成果图件分为 10 类:地质遥感填图、矿产资源遥感调查、区域国土资源遥感调查、城市遥感调查、工程地质遥感调查、水文地质遥感调查、地质灾害遥感调查、环境生态遥感调查、土地资源遥感调查和海洋及海岸带等遥感调查。在每一个类别中继续细分出数据库用的图层,描述图层的元数据和定义属性字段。数据内容分类目录如表 1 所示。

表 1 遥感解译成果图件内容分类目录
Tab.1 The directory of remote sensing interpretation map content

编码	类别	类别名称
3361	地质遥感填图	地层岩性、火成岩、断裂、区域构造单位
3362	矿产资源遥感调查	已知固体矿、固体矿产远景区、找矿靶区、已知油气田、油气远景评价区、有利构造带、矿产资源规划、矿山开发占地、矿山开采面、监测区矿权
3363	区域国土资源遥感调查	森林资源、旅游资源、地热资源、草地资源
3364	城市遥感调查	绿化
3371	工程地质遥感调查	地貌、地壳稳定性
3372	水文地质遥感调查	地表水资源、地下水资源
3373	地质灾害遥感调查	地震、活火山、泥石流滑坡崩塌、地面沉降、地裂缝、地面塌陷
3374	环境生态遥感调查	水土流失(土壤侵蚀)、土地沙化盐渍化现状、土地沙化盐渍化变迁、水污染、气象灾害、热岛现象、生态环境评价、气候
3375	土地资源遥感调查	土地利用现状、土地利用变迁、土壤、植被
3380	海洋及海岸带等遥感调查	海岸线、滩涂、海汉、海湾、岛屿

1.2 数据管理模式

结合遥感解译成果图件数据特点和服务需求,将遥感解译成果数据库划分为图件资料库、要素图层库、成果报告库和元数据库,其中图件资料库和成果报告库为文件库,要素图层库和元数据数据库为商用数据库。图件资料库为 MapGIS 工程文件,以文件资料编目的方式进行统一管理。要素图层库是遥感解译图件数据库的核心,以大型关系数据库 Oracle 为基础,矢量数据采用 Oracle Spatial 进行统一组织、存储和管理。成果报告库以资料档案号与成果图件关联,以文件资料的方式进行统一管理。元数据库是以 Oracle 为基础,存储产品资料、要素图层和成果报告的元数据,以及数据管理、服务、集成、运行等元数据。数据存储结构如图 1 所示。



2 成果管理系统设计

遥感解译成果数据的管理系统应以计算机软硬件平台为支撑,以成果资源的统一规划为指导,以数据产品的标准和规范为基础,以遥感解译成果数据库为载体,以数据库管理系统为工具,以维护和更新机制为保障,实现遥感解译成果图件的集中存储与服务^[8]。

2.1 系统架构

系统按照分层、组件式构架的设计思路,将遥感解译成果数据管理系统的整体框架分为 4 层:数据库层、业务逻辑层、应用服务层和用户层,系统总体框架如图 2 所示。最底层为数据库层,由空间数据库、图件文件资料数据库和系统业务数据库组成。倒数第二层为业务逻辑层,以 Oracle 和 ArcSDE 为数据存储平台,在此基础上采用 Visual Studio. net 结合 ArcEngine 和 MapGIS 组件构建业务逻辑关系,为应用服务层提供数据支撑。倒数第三层为应用服务层,系统在统一的用户认证机制下提供数据管理各

项功能,该层平台提供所有技术功能的支撑。最上层为用户层,用户对整个信息管理系统功能的调用都在此进行,整个用户层以电子地图作为系统背景,实现系统的分布式表达和查询。

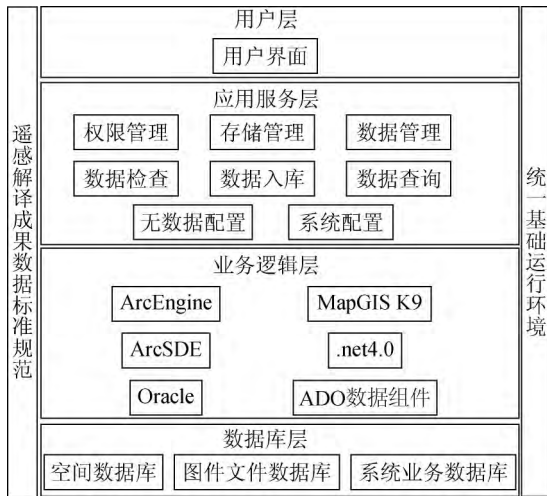


图2 系统整体框架

Fig. 2 Overall framework of system

2.2 数据标准规范

数据的标准规范是建立成果管理系统的基础,制定的内容主要包括:元数据、公共属性代码、层管理和分层属性表,以促进遥感业务间的数据交换与共享。

元数据,是对遥感解译成果数据中图件资料、图层要素、报告的描述,记录了数据源、数据类别、生产时间、空间参考、数据质量等信息。元数据模板分为系统内置模板和用户自定义模板。其中自定义模板在系统内置模板基础上扩充。按照使用范围和使用规则将元数据项分组,依据实际需要选择可用的元数据组,构成一个完整的元数据模板。在元数据配置中可以定制多个元数据模板,在录入元数据时按照元数据标准检查用户提交的数据。当元数据模板无法满足用户需要时,用户可以继承、扩展元数据模板,形成新的元数据模板。

公共属性代码,是构建图层要素中的各个属性代码表的基准,公共属性代码引用国家、行业或者本单位的信息分类标准,结合遥感业务应用的特点,建立完整的基于内容分组的数据编码。

层管理,按照数据内容,将图件的数据层按照表1中的类别进行划分,归属于地质调查业务所属的十大类别,基于公共属性代码表创建。

分层属性表,每个属性表对应一个要素图层,在数据库中所有的属性表名称、类名称、属性类型等信息均使用大写字母保存,不能存在相同名称的属性表,同一属性表中不允许存在名称相同的列,属性表

中的列不允许使用汉字作为列名称。可结合成果图件的内容对分层属性表进行增量更新和维护。

2.3 数据组织与存储

根据系统框架,进一步设计数据库的数据组织和逻辑模型。数据库存储遥感解译成果的空间要素,元数据和成果文件,将数据按照层次结构进行管理,并按每个层次所属的数据分为不同的数据集,逻辑上采用统一存储管理的多层次组织方式,形成数据库逻辑层次结构。各类数据进行规范的数据处理和转换,按照规定的格式入库,确保各类信息能够关联检索。遥感解译成果数据包括图件资料、要素图层、成果报告和元数据。

图件资料是指原始的解译成果图件经过扫描、地理校正、矢量化、属性采集等一系列规范化处理后形成的矢量文件,这类文件以 MapGIS 格式保存,能以图件形式直接提供给用户使用。图件资料为 MapGIS 的工程文件,包含的内容有:图层(点图层、线图层、区图层)、附表、文档、符号库、字体库等。图层、附表、文档等数据任意组合,即可形成一幅新的图件。整合后的图件资料不改变原始文件的内容,仅将用户提交的各种原始资料规范化整理为 MapGIS 工程文件,以保证图件的正确性和规范性。

要素图层基于解译成果产品的空间图层,按照属性结构划分,归属地质遥感填图、矿产资源遥感调查等10类,空间图层以 Shape 格式保存。按照对应的数据集规范处理待入库的要素图层数据,并将处理转换后的空间数据保存到 Oracle spatial 中。要素图层来自于2部分,一部分是由 MapGIS 的矢量文件转换;一部分由各类矢量数据转换,大多数要素图层都来自于前者。要素图层均具有空间信息和属性信息。处理后的要素图层结构需匹配已建立图层库中的某个图层,且图层字段需与库中产品属性字段一一对应,不支持多属性匹配到一个属性和多属性组合后构成一个属性的匹配关系。

成果报告是以项目或课题为单位提交的成果文档,成果报告以 doc 和 pdf 格式的文档保存,并采集相关元数据信息。一项成果报告通常对应多幅成果图件,整合后的成果报告通过档案号标识与图件关联。

元数据是由成果文件元数据、数据库要素集元数据、图层要素元数据组成。根据管理、应用、服务和集成的实际需求,元数据内容有核心信息元数据、空间内容元数据和管理元数据等。

2.4 系统功能

遥感解译成果管理系统功能包括:数据入库、数据查询与展示和数据维护3部分,如图3所示。

其中数据转换功能提供图件资料的点线区图层矢量格式转换和文本格式的转换。各类数据入库功能均自动提取存储、数据组织等元数据信息,并提供单一和批量数据入库模式。元数据模板定制功能,依据实际需要选择、继承、扩展元数据模板,形成新的元数据模板。矢量库体系维护功能,对矢量成果数据库进行结构查看和维护,包括对图层结构的增加、修改和删除。属性代码表维护功能,对各类主题中的属性代码信息进行维护。

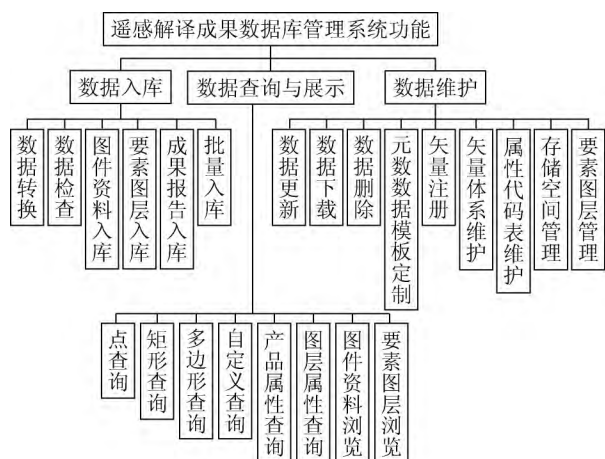


图3 数据库管理系统功能

Fig.3 The function of database management system

3 系统开发与实现

通过对数据特性和系统设计等方面的研究,编制遥感解译成果数据库系统建设方案,在统一的数据库框架下,制定数据库命名规范,确定各类表结构和编码规则,通过 ArcSDE10 空间数据引擎在 Oracle10.2 中构建数据库。系统采用了 C/S 模式,支持对异构的遥感解译成果图件、成果报告、空间属性数据等的一体化存储和管理。数据库系统建设内容包括数据入库、数据查询展示、系统运行与维护。

在数据库的支撑下,遥感解译成果数据管理系统的主要任务是对各类解译成果图件和报告进行统一存储管理,满足遥感业务化应用对成果数据的需求,支持成果数据的及时入库、检索、下载等操作,为各级用户提供快捷的数据服务。

3.1 系统开发

建立遥感解译成果数据系统,解决成果数据管理服务等问题。本系统采用 C/S 体系结构,使用 Microsoft Visual Studio 2010 集成开发环境的 C# 开发语言,以 ArcEngine 10 为地理信息系统开发平台,并调用 MapGIS 开发模块进行组件式开发,通过 ArcSDE10 空间数据引擎在 Oracle10.2 中构建数据库,以

网络磁盘作为系统管理和数据存储环境,构建与运行数据库系统。

遥感解译成果数据库系统以成果数据入库与管理为核心,以数据查询检索和服务为工具,以解译成果数据为支撑,以数据库维护为保障,实现成果数据的信息化管理和维护。截至到 2017 年 3 月,该系统已管理遥感解译成果图件 1 420 余幅,成果报告 310 余本。图 4 为系统主界面。

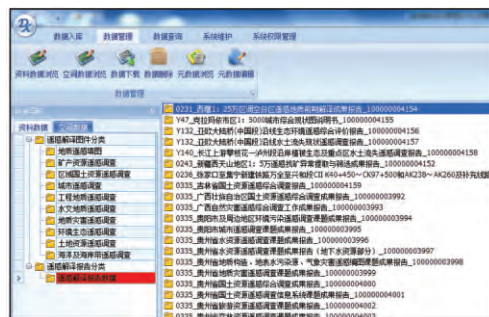


图4 遥感解译成果数据库系统主界面

Fig.4 The system main interface

3.2 数据入库

研究人员开发了图件资料、要素图层、成果报告、元数据、MapGIS 字符库以及其他辅助数据的入库功能。

图件资料图件入库功能提供单文件、文件夹和文件夹入库 3 种方式,提供批量入库 MapGIS 工程文件功能。由于 MapGIS 图件的制图需要用到字符库,系统提供了 MapGIS 图库管理功能和入库字符库。

2 种来源的要素图层入库方式略有不同,由 MapGIS 矢量文件转换而来的要素图层需提前入库图件资料并进行格式转换。MapGIS 软件自带的文件转换功能,只能单独转换点、线、区文件。系统开发了 MapGIS 点线区文件批量转 Shape 的工具,提供单文件、单文件夹和批量文件夹 3 种转换方式,避免了大量重复性操作。先入库 MapGIS 图件资料,PL/SQL 在数据库中建立图件资料与图层数据的映射关系表,有效关联图件资料和要素图层。要素图层入库的一个核心步骤是设置数据匹配规则,包括图层和属性字段的匹配,保证数据结构和入库图层的规范性。由于数据源中的每个要素层的匹配关系需要分别设置,数据入库过程中,图层字段匹配占据相当部分的工作量。图 5 为要素数据入库匹配规则设定。成果报告入库内容为同名的 doc 和 pdf 格式的成果报告文件夹。系统支持单文件和批量文件入库,提供成果报告与成果图件匹配检索和关联。若成果报告与成果图件档案号相同且均唯一,系统则会自动关联该成果报告和成果图件。其余情况需手

动建立关联。

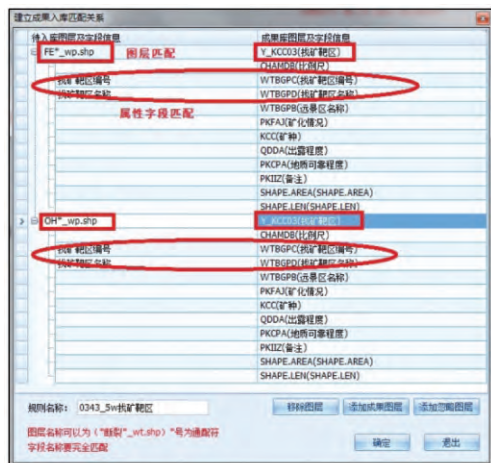


图5 要素图层匹配规则

Fig. 5 The matching rule of element layer

元数据入库包含在图件资料、图层要素和成果报告的入库过程中,在进行数据处理过程中均需按照其对应的元数据结构采集规范的元数据表,对于图形数据还需要制作相应的快视图。

3.3 数据查询与展示

系统提供了通用的点、线、矩形、多边形的空间查询,图层和产品的属性查询,并结合数据特点提供了根据项目编号、产品类型、图件名称、空间范围以及设定 SQL 语句等高级查询方式,所有查询结果可以利用地图工具进行放大、缩小、漫游等操作。

数据展示分为资料数据展示和空间数据展示两部分系统查询显示界面如图 6 所示。资料数据展示

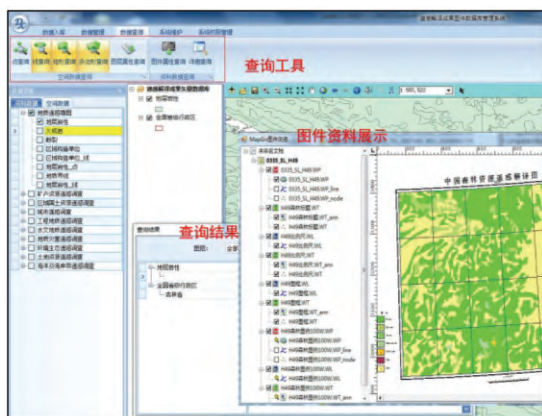


图6 系统查询展示界面

Fig. 6 The query and display interface of system

以列表的形式显示已入库的所有数据资料,系统调用 MapGIS 功能模块进行了组件开发,图件资料可以 MapGIS 原始形式进行展示。空间数据调用 ArcGIS 功能模块,可对图层进行图层属性表、图层符号化、图层属性、移除图层等显示。

3.4 系统维护

系统维护包括用户权限维护、资料库访问设置、

MapGIS 支持工具设置以及图层矢量库体系维护(图 7)。MapGIS 支持工具是基于 MapGIS K9 进行二次开发的 MapGIS 格式与 Shape 格式数据进行转换的工具,利用该工具可以管理、查看、转换 MapGIS 格式数据。图层矢量库体系维护提供对图层结构、图层字段结构的添加、删除、显示等操作,可灵活定制要素图层结构。

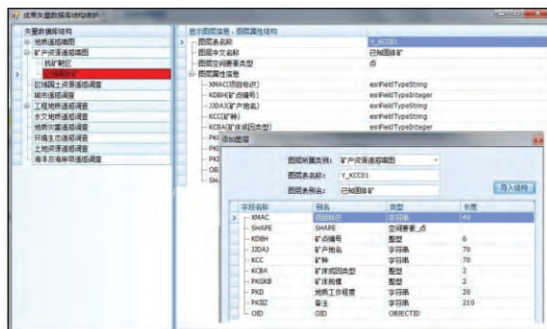


图7 图层矢量库体系维护

Fig. 7 The system maintenance of layer vector library

4 结语

结合遥感业务应用的需要,研究遥感解译成果图件、报告等多类型成果数据的有效组织和存储模式,利用 ArcGIS 和 MapGIS 平台优势设计并实现了遥感解译成果数据库系统,开发了实用的数据转换、入库、展示、体系维护等特色模块。该系统已在中国国土资源航空物探遥感中心内外网部署运行 2 a,有效管理遥感解译成果数据,并已向专业人员提供数据服务百余次,大大提高了解译成果数据的价值。遥感解译成果数据管理系统的成功应用,实现解译成果数据的集中存储、有效管理和高效服务,为开展地质调查信息服务集群体系建设提供了坚实保障。

参考文献(References):

- [1] 王润生. 遥感地质技术发展的战略思考[J]. 国土资源遥感, 2008(1): 1-12, 42. doi: 10.6046/gtzyyg. 2008. 01. 01.
Wang R S. On the development strategy of remote sensing technology in geology[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2008(1): 1-12. doi: 10.6046/gtzyyg. 2008. 01. 01.
- [2] 甘甫平, 王润生. 遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
Gan F P, Wang R S. Study on the Basic and Technical Methods of Remote Sensing Information Extraction[M]. Beijing: Geology Press, 2004.
- [3] 王治华. 面向新世纪的滑坡、泥石流遥感技术[J]. 地球信息科学, 1999, 1(2): 71-74.
Wang Z H. Technique of remote sensing for landslide and debris flows for the new century[J]. Geo-Information Science, 1999, 1

- (2): 71–74.
- [4] 张礼中,张永波,周小元,等. 环境地质空间数据库查询系统设计与实现[J]. 计算机工程与应用,2005,41(29): 190–192.
Zhang L Z, Zhang Y B, Zhou X Y, et al. The query system of environmental geology spacial database [J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(29): 190–192.
- [5] 许登平,李 晖,庞丽杰,等. 全国林地“一张图”数据库建设及扩展应用[J]. 林业资源管理,2015(5): 36–43, 171.
Xu D P, Li H, Pang L J, et al. Research of key technology for national forest – land “one map” database [J]. Forest Resources Management, 2015(5): 36–43, 171.
- [6] 戴建旺,百晓飞. 第二次全国土地调查国家级数据库管理系统关键技术研究[J]. 中国土地科学,2010,24(6): 74–80.
Dai J W, Bai X F. Research on the key technologies of national level database management system for the second national land survey [J]. China Land Science, 2010, 24(6): 74–80.
- [7] 国土资源部. GX199900X–200X 国土资源信息高层分类编码及数据文件命名规则[S].
Ministry of Land and Resources. GX199900X–200X Classification coding standard and data file naming rules of land and resources information [S].
- [8] 徐 园,王卫京,吴 磊. 面向防灾减灾业务应用的数据集成管理体系研究与实现[J]. 中国减灾,2013(9): 48–51.
Xu Y, Wang W J, Wu L. Research and implementation of data integration management system for disaster prevention and mitigation [J]. Disaster Reduction in China, 2013(9): 48–51.

Research and construction of interpretation result data management system toward remote sensing application

SUI Xinxin, SUI Suwen, LIU Kun

(China Aero–Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Aimed at tackling the problems of data storage, management and application of remote sensing interpretation, and considering the needs of geological survey information service system, the authors established interpretation data system toward remote sensing application. Through the effective organization of map data, element layers and texts, with ArcGIS 10 and MapGIS K9 as the platform, and by using C# as the development language, the authors designed and constructed the database management system of remote sensing interpretation which is based on C/S mode. This system provides the flexible tools of importing data, query display and data system construction and maintenance. This system realizes the integrated management and service of the multiple format maps that are in scattered storage which ensures the effective utilization and sustainable development of the resources of remote sensing interpretation data.

Keywords: remote sensing interpretation; result data; management system; database; integration

(责任编辑: 李 瑜)

doi: 10.6046/gtzyyg.2018.02.15

引用格式: 杨达昌,陈洁,高子弘,等. 天宫一号高光谱数据烃类微渗漏信息提取[J]. 国土资源遥感,2018,30(2): 107-113.
(Yang D C, Chen J, Gao Z H, et al. Extraction of hydrocarbon micro-seepage information based on TG-1 hyperspectral data[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018, 30(2): 107-113.)

天宫一号高光谱数据烃类微渗漏信息提取

杨达昌¹, 陈洁^{1,2}, 高子弘¹, 韩亚超¹

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101)

摘要: 烃类微渗漏遥感探测技术是一种油气直接调查方法, 主要依据油气藏上方地表的低价铁富集、粘土矿物丰度高和碳酸盐岩含量高等异常现象。通过分析高光谱遥感油气蚀变信息提取理论, 研究了各种烃类蚀变矿物在天宫一号(TG-1)高光谱数据上的光谱响应特征; 依照突出所需矿物并压制其他地物特征的思想, 选取不同解译标志的强吸收和高反射波段, 采用比值法进行特征信息增强与提取; 开展甘肃省庆阳地区TG-1高光谱数据的油气微渗漏信息提取研究。研究表明, 研究区地表蚀变异常信息的分布与已有地质分析结果有较好的一致性, 与实际的油气区吻合较好, 验证了本文方法的可行性, 显示了TG-1高光谱数据的油气探测潜力。

关键词: 高光谱; 烃类微渗漏; 波段比值; 蚀变异常; 天宫一号

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-070X(2018)02-0107-07

0 引言

地质是高光谱遥感最早应用的一个领域, 也是高光谱遥感应用中最成功的领域之一。特别是由于高光谱数据具有的连续窄波段特性, 能够精细地反映出矿物和岩石的诊断性光谱特征(特征波段宽度和位置等), 光谱分辨率越高, 矿物的吸收、反射诊断性光谱特征就越明显, 这从根本上提升了从遥感图像上提取地质信息的质量和数量。

作为一种直接的油气调查手段, 烃类微渗漏遥感探测技术已在国内外受到广泛关注, 许多学者对此进行了研究。起初, 受限于光谱分辨率, 提取方法主要是基于油气微渗漏会引起上覆盖层的色调异常理论, 通过图像增强的方法对多光谱遥感数据进行处理, 进而实现油气远景区预测。Segal等^[1]通过Landsat TM数据的波段比值和彩色空间变换方法, 证实了由于烃类微渗漏造成的地表岩石蚀变褪色现象。但是, 因为多光谱遥感数据的光谱分辨率不高, 并且引起地表岩石和矿物的色调变化因素较多、机理复杂, 仅依据该现象解释油气微渗漏会造成一定的误判, 使得多光谱遥感油气微渗漏信息探测结果在未知油气区存在多解性。随着近年来高光谱遥感

技术的发展, 油气微渗漏遥感探测手段进一步丰富。Ellis等^[2]建立了油气渗漏区土壤光谱库, 为其他地质研究提供了依据; 周密^[3]利用星载高光谱Hyperion数据提取了东胜地区油气微渗漏的空间分布信息; 李娜等^[4]基于ASTER数据, 开展了基于波段运算和主成分分析的烃类微渗漏蚀变信息提取; 陈圣波等^[5]通过对甘肃庆阳油气区地面黄土样品实测波谱曲线的分析, 明确了油气微渗漏引起的蚀变矿物含量与光谱吸收特征之间的关系。

本文利用天宫一号(TG-1)高光谱数据进行油气微渗漏信息提取, 研究油气微渗漏地表蚀变的光谱响应机理, 实现油气微渗漏共生异常的分类识别, 完成油气微渗漏地表共生异常区的初步圈定, 生成油气勘探综合异常空间分布图, 为油气勘探靶区的圈定和新区油气勘探工作部署提供依据。

1 微渗漏理论及指示标志

1.1 微渗漏理论

埋藏在地下深部、具有动态平衡的油气藏, 其内部具有相较于上覆盖层更高的压力, 这使得油气藏中的烃类物质通过渗透、水动力和扩散的运移方式, 穿过上覆盖层的孔隙、断裂和其他不整合面到达地

收稿日期: 2016-10-31; 修订日期: 2017-02-08

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“高光谱地质调查方法技术研究”(编号: 1212031513012)和“天山—北山重要成矿区带遥感调查”(编号: 121201003000150008)共同资助。

第一作者: 杨达昌(1983-), 男, 工程师, 主要从事航空遥感技术方法及其在地质调查中的应用研究。Email: 187369859@qq.com。

通信作者: 陈洁(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事航空遥感技术方法、数据处理及地质应用研究。Email: 6592296@qq.com。

表,甚至扩散至近地表的空气中。这种微渗漏的烃类物质与土壤和岩石发生蚀变作用,使油气藏上方地表在遥感影像中具有某种特殊的光谱异常表现,通过对烃类微渗漏信息的提取即可实现油气资源的遥感探测。遥感探测微渗漏的指示标志有:热异常晕、红层褪色晕、低价铁富集晕、粘土矿化晕和烃类异常晕。其中热异常晕是由于油气藏上方的地表温度升高引起的异常现象,可利用热红外波段进行温度异常提取;而红层褪色晕是一种非蚀变岩层的褪色现象,可利用可见光波段色彩增强进行信息提取。鉴于本文主要讨论烃类微渗漏引起的矿物和烃类物质的光谱异常信息,故针对后3种异常指示标志进行详细阐述。

1.2 低价铁富集晕

当三价铁离子转化为二价铁离子时,在形成红层褪色晕的同时,也形成了二价铁离子的富集。由于二价铁离子与三价铁离子有着不同的波谱特性,因而出现波谱异常。这种由三价铁离子转化为二价铁离子所形成的遥感影像波谱异常称为低价铁富集晕。由波谱分析知,二价铁离子矿物(如黄铁矿)在1000 nm处有强吸收带,在1000~1500 nm处有宽吸收带;而含有三价铁离子的矿物(如褐铁矿、黄钾铁矾、赤铁矿和针铁矿等)则在800~900 nm处表现出强吸收带,并在400~500 nm处表现为吸收特征。利用该波谱特征差异,可以进行高价铁离子和低价铁离子的区分,提取低价铁富集晕信息,从而达到识别烃类微渗漏的目的。

1.3 粘土矿化晕

在发生烃类微渗漏时,由于微渗漏的液体或气体中所含的硫化物和碳氢化物改变了上覆岩石的氧化-还原环境,使得岩石被酸化,而酸性溶液可使某些在碱性环境中稳定的矿物(如长石和粘土)被蚀变或被其他粘土矿物(如高岭石、绿泥石和蒙脱石等)代替。而这一系列蚀变作用的结果是,在烃类微渗漏上方,粘土矿物的分布与构成被改变,导致在该区域存在粘土矿物的高丰度异常。这种由于烃类微渗漏导致的粘土富集所出现的遥感影像波谱异常称为粘土矿化晕,它们往往具有较强的羟基基团的吸收特征,其波谱特征为:在短波红外波段2200 nm处有很强的羟基吸收带;在2000~2500 nm处较硅酸盐岩、碳酸盐岩呈低反射率。利用这一波谱特征,可以实现粘土矿化信息的提取,识别烃类微渗漏。

1.4 烃类异常晕

在烃类微渗漏过程中,由于烃类物质挥发或渗

漏到地表或近地表,通常会吸附或溶解在土壤孔隙间,使得油气富集区地表形成烃类含量异常。也称为烃类异常晕。因此在高光谱遥感影像上往往出现烃类异常,可以用于标识烃类物质的渗漏范围。

2 微渗漏信息提取

2.1 技术路线

首先,对烃类物质微渗漏现象以及由此引起的地表蚀变进行梳理和归纳;然后,以烃类物质微渗漏引起地表土壤及岩石地球化学异常、地表土壤吸附烃异常等特征建立遥感指示标志;最后,利用所建立的指示标志实现油气微渗漏的高光谱信息提取技术和方法研究,并使用TG-1高光谱数据进行实验验证。技术路线如图1所示。

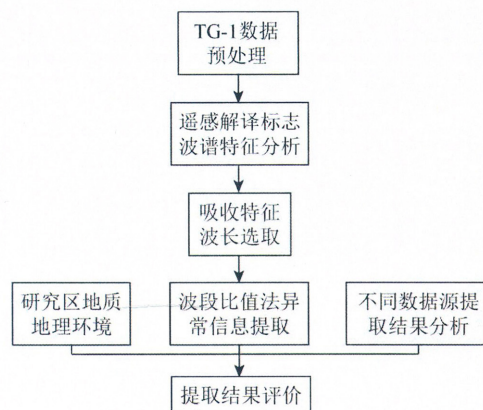


图1 油气微渗漏高光谱信息提取技术路线

Fig.1 Hyper-spectral information extraction procedure of oil and gas micro-seepage

2.2 研究区数据

航天高光谱以卫星作为遥感平台,具有全球覆盖、可获取任意目标光谱信息的优点,美国EO-1卫星搭载的Hyperion和欧空局Proba卫星搭载的CHRIS,已经展示了航天高光谱成像技术的信息获取能力和应用潜力。于2008年发射的环境一号卫星(HJ-1A),是我国首个搭载高光谱仪的卫星,但其主要面向环境与灾害监测预报,其工作谱段(459~956 nm)和空间分辨率(100 m)都严重制约了其在地质和岩矿识别领域的应用。而TG-1目标飞行器,搭载了我国自主研发的、空间和光谱综合指标最高的高光谱成像设备,具有空间分辨率高、波段多、光谱分辨率高的特点,真正意义上实现了“图谱合一”。其主要技术指标及与国际上在轨运行的航天高光谱传感器的参数对比如表1所示。

表1 TG-1 高光谱成像仪及同类型航天传感器技术指标对比
Tab.1 Comparison of TG-1 hyperspectral imaging system and the other space sensors

载荷	主要应用技术指标					
	谱段	光谱范围/nm	有效波段数/个	空间分辨率/m	光谱分辨率/nm	幅宽/km
TG-1 高光谱成像仪	全色	500 ~ 800	1	5	—	20
	可见光—近红外	400 ~ 1 000	64	10	10	10
	短波红外	1 000 ~ 2 500	64	20	23	10
	热红外	—	1	10	—	15
EO-1 Hyperion	可见光—近红外	356 ~ 1 058	70	30	10	7.5
	短波红外	852 ~ 2 577	172	30	10	7.5
Proba CHRIS	模式 1	406 ~ 1 003	62	34	6 ~ 20	13
	模式 2	406 ~ 1 036	18	17	6 ~ 33	13
	模式 3	438 ~ 1 035	18	17	6 ~ 33	13
	模式 4	486 ~ 796	18	17	6 ~ 11	13
	模式 5	438 ~ 1 036	34	17	6 ~ 33	13

通过对比分析,TG-1 搭载的高光谱成像仪可见光—近红外、短波红外高光谱数据的各项指标(如空间分辨率、光谱分辨率)在国内外均处于领先水平,某些性能甚至优于国外同类型数据。另外,由于烃类微渗漏产生的蚀变矿物光谱特征基本都位于1 000 ~ 2 500 nm 波段范围,故本次研究选用甘肃环县—庆阳地区 TG-1 短波红外数据作为研究对象。数据获取时间为2012 年08 月07 日13: 57,为L2 级图像数据产品,格式为标准 GeoTIFF(6.0)。

2.3 数据处理

2.3.1 冗余波段去除

TG-1 高光谱短波红外数据共有75 个波段,其中1~6 波段为与可见光—近红外波段重合,予以剔除;然后再剔除受水汽影响的波段,波谱范围为1 356.35 ~ 1 416.94 nm,1 820.48 ~ 1 931.47 nm 和2 395.5 ~ 2 565 nm,分别对应波段为20 ~ 21、36 ~ 42、69 ~ 75。剩余53 个波段将用于后续数据分析。

2.3.2 坏线修复及条带去除

采用基于多光谱影像的光谱重构方法进行高光谱数据的坏线修复处理,并使用全局去条纹法进行条带去除,即通过像元的列平均值、标准差和波段平均值、标准差之间的差异对像元进行分波段线性化修正,消除垂直条纹的影响。修复结果有较好的目视效果和良好的光谱保真度,基本满足专题制图和信息反演的需要。

2.3.3 大气校正

为了消除因大气散射和吸收引起的地物光谱曲线失真,采用基于大气辐射传输模型的 FLAASH 法

对TG-1 数据进行大气校正。该方法根据高光谱数据获取的时间和地理位置,选择相应的模型完成,模型严密、解算精度高,能较真实地还原地物光谱特征。为了对校正后的光谱数据进行检验和评价,利用研究区内的植被光谱与标准光谱进行吸收特征比对。结果显示,虽然由于两者的光谱分辨率差异较大,重建光谱与标准波谱存在一定的波长位置偏移,但偏移量均在合理的光谱区间内,曲线特征吻合较好,基本满足后续研究要求。

2.4 信息提取

2.4.1 粘土异常信息提取

烃类微渗漏的液体或气体中所含的氢硫化物和碳氢化物改变了上覆岩石的氧化—还原环境,导致粘土矿物的集中分布。将美国地质调查局发布的典型粘土矿物的标准波谱重采样至TG-1 高光谱短波红外谱段范围,同时对其波谱曲线进行包络线去除,对比分析其光谱特征(图2 和表2)。

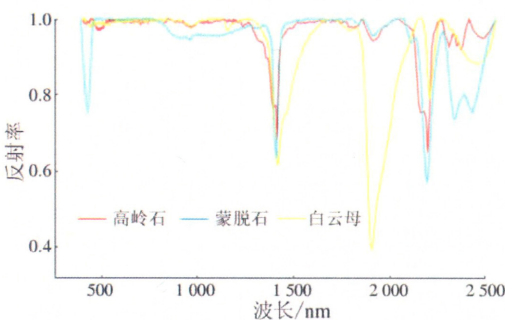


图2 典型粘土矿物去除包络线后的波谱曲线
Fig.2 Continuum removed spectral curves of typical clay minerals

表2 典型粘土矿物标准光谱特征统计
Tab.2 Statistic of typical clay mineral's standard spectral features (nm)

矿物名称	英文	吸收位置	反射位置1	反射位置2	反射位置3	反射位置4
高岭石	Kaolinite	2 205	753.5 ~ 1 273.5	1 503.5 ~ 2 025	2 225 ~ 2 265	—
蒙脱石	Montmorillonite	2 215 和 1 915	753.5 ~ 1 323.5	1 546.0 ~ 1 835	2 055 ~ 2 175	2 255 ~ 2 295
白云母	Muscovite	2 205	750.5 ~ 1 368.5	1 503.5 ~ 2 135	2 255 ~ 2 295	—

从图 2 和表 2 中可以得出如下结论: ①3 种典型粘土矿物的共同吸收波段位于 2 200 nm 附近; ②共同高反射位置为 1 700 ~ 1 800 nm 和 2 100 nm 附近; ③由于 1 700 ~ 1 800 nm 波段处与水汽影响波段接近, 可能会造成错误的信息提取, 故而使用 2 100 nm 附近的波段作为高反射响应波段。

采用能突出所需指示标志并压制其他地物特征的波段进行信息提取, 选定大气校正后短波红外波段的第 47 波段(中心波长为 2 044.827 nm)与第 55 波段(中心波长为 2 210.329 nm)进行比值处理。粘土富集异常信息的提取公式为

$$B_{47/55} = R_{47} / R_{55}, \quad (1)$$

式中: R_{47} 和 R_{55} 分别为第 47 和 55 波段的反射率值; $B_{47/55}$ 为这 2 个波段的比值。

受限于空间分辨率和混合矿物等因素的影响, 实测的波段反射率比值与标准波谱所得的数值之间肯定存在一定的误差, 因此在进行异常信息提取时, 对通过标准光谱曲线计算出的范围进行适当的扩展, 使其更符合实际情况。高岭石、蒙脱石和白云母的标准波谱曲线计算得出的 $B_{47/55}$ 值分别为 1.834,

1.268 和 1.814, 将此标准范围扩展 20%, 得到实际提取的变化范围为 1.01 ~ 2.20。

2.4.2 低价铁离子异常信息提取

二价铁的富集是由于烃类微渗漏使三价铁离子转化为二价铁离子而形成的, 所以在进行低价铁离子的异常信息提取时, 除了要按照上述方法寻找二价铁离子代表性矿物的高反射和吸收波段外, 还需要考虑二价、三价铁离子及混合矿物的共存和区分问题。这 3 种物质的代表性矿物光谱特征如图 3 和表 3 所示。同样, 对这些典型矿物的波谱进行了包络线去除, 能进一步突出吸收和反射特征。

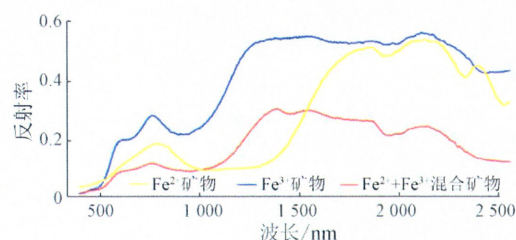


图 3 3 种含不同铁离子的矿物标准波谱曲线对比
Fig. 3 Standard band curve comparison among minerals with three different iron ions

表 3 不同铁离子矿物标准光谱特征统计

Tab. 3 Statistics of spectral features of different iron ions (nm)

矿物名称	英文	吸收位置	反射位置 1	反射位置 2	反射位置 3
赤铁矿	Hematite	835.0 ~ 904.0	710.0 ~ 769.0	1 218.5 ~ 2 355.0	—
Fe³⁺ 矿物 针铁矿	Goethite	883.0 ~ 976.0	728.0 ~ 806.5	1 288.5 ~ 1 612.5	—
黄钾铁矾	Jarosite	871.0 ~ 964.0	676.2 ~ 740.0	1 323.5 ~ 1 418.5	1 570.5 ~ 1 815.0
菱铁矿(Fe²⁺ 矿物)	Siderite	1 000.0 ~ 1 288.5	746.0 ~ 835.0	1 684.0 ~ 1 875.0	2 045.0 ~ 2 205.0
褐铁矿(混合矿物)	Limonite	957.0	740.0 ~ 785.0	1 368.5 ~ 1 885.0	2 115.0 ~ 2 155.0

从图 3 和表 3 中可以看出: ①含二价铁矿物吸收位置波长要大于含三价铁矿物及其混合矿物, 且属于 TG-1 短波红外数据的谱段内; ②含二价铁矿物反射率在 1 200—1 800 nm 处, 急速上升, 而含三价铁矿物反射率几乎无变化, 混合矿物的反射率虽然经历了上升再下降的过程, 但变化幅度不大。

为了突出二价铁矿物并压制其他, 选定短波红外波段的第 34 波段(中心波长为 1 742.99 nm)和第 14 波段(中心波长为 1 196.036 nm)进行比值处理, 低价铁离子富集异常信息提取公式为

$$B_{34/14} = R_{34} / R_{14}, \quad (2)$$

式中: R_{34} 和 R_{14} 分别为第 34 和 14 波段的反射率值; $B_{34/14}$ 为这 2 个波段的比值。

按照式(2)计算表 3 中的 5 种代表性矿物的 $B_{34/14}$ 值分别为 1.028, 1.151, 1.360, 4.839 和 1.520。低价铁的比值最大, 混合矿物的比值介于两者之间。故将实际提取低价铁异常信息的取值范围定为 1.60 ~ 5.80。

2.4.3 烃类异常信息提取

物质烃类运移到上覆盖面时, 通常会吸附或溶解在土壤孔隙间, 导致地表烃类含量异常。烃类物质在 1 725 nm 和 2 270 ~ 2 460 nm 处有明显的吸收特征, 如图 4 所示。

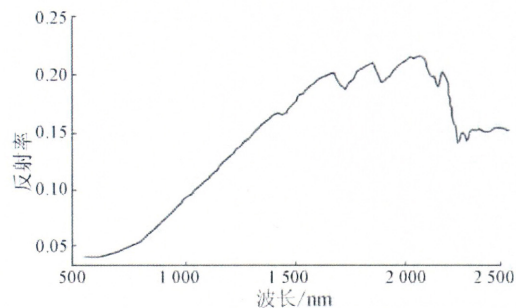


图 4 典型烃类物质反射光谱曲线
Fig. 4 Hydrocarbons spectrum

但由于 2 400 nm 附近位于水汽吸收波段, 不予采用, 且 Kühn 等^[6]也指出 1 730 nm 是烃类探测的关键性特征, 故本文采用该处作为烃类的吸收位置对其进行提取, 同时选取位于 2 个吸收谷之间的高

值位置(2 070 nm)作为烃类的高反射波段。

选定大气校正后短波红外波段的第48波段(中心波长为2 066.381 nm)和第33波段(中心波长为1 717.600 nm)进行比值处理。烃类物质富集异常信息提取公式为

$$B_{48/33} = R_{48} / R_{33}, \quad (3)$$

式中: R_{48} 和 R_{33} 分别为第48和33波段的反射率值; $B_{48/33}$ 为这2个波段的比值。

按照式(3)计算的 $B_{48/33}$ 值约为1.50,故将实际提取烃类异常信息的取值范围定为1.40~1.70。

2.4.4 油气微渗漏综合信息提取

根据粘土矿物蚀变异常、二价铁离子蚀变异常和烃类物质蚀变异常对油气微渗漏的影响程度,建立综合评价模型,得出研究区油气微渗漏情况的综

合评价结果。由已有研究成果^[4]确定各蚀变矿物权重值分别为:粘土矿物为0.97,二价铁离子为0.58,烃类为0.70。油气微渗漏综合信息 Y 提取公式为

$$Y = 0.97 B_{47/55} + 0.58 B_{34/14} + 0.70 B_{48/33} \quad (4)$$

3 结果评价

3.1 提取结果

利用经数据预处理后的TG-1短波红外高光谱数据,选取具有典型反射率特征的波段,采用波段比值法进行粘土矿物蚀变、低价铁蚀变和烃类异常信息提取,其信息专题图如图5所示。基于上述信息,利用油气微渗漏综合信息提取法,获得研究区局部提取结果如图6所示。底图均为全色波段图像。

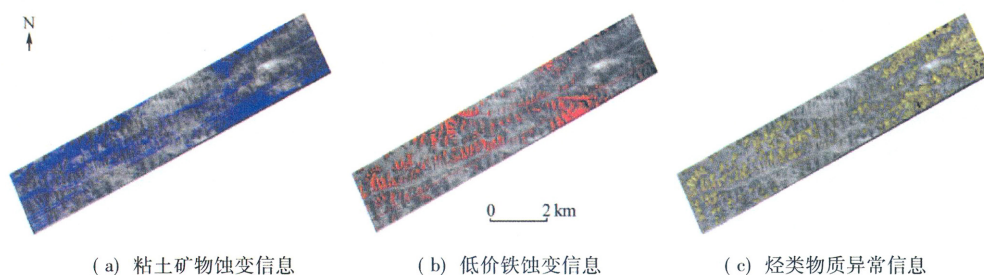


图5 油气微渗漏信息提取专题图

Fig. 5 Extraction thematic maps of oil and gas micro-seepage

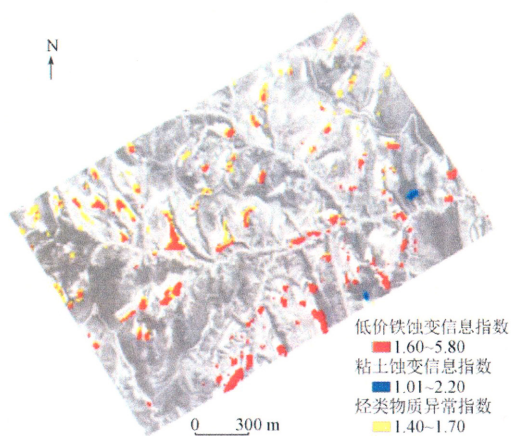


图6 庆阳地区油气微渗漏信息提取专题图

Fig. 6 Comprehensive information extraction thematic map of oil and gas micro-seepage in Qingyang area

从图5中可以发现,3种不同蚀变信息的分布情况较为一致,验证了烃类微渗漏会引起地表物质发生蚀变而造成粘土、低价铁矿物和烃类物质富集理论的可靠性。在图6中,将3种指示标志均有出现的区域视为油气富集靶区,可作进一步研究分析的依据。

3.2 地质分析

根据研究区地质资料,该区域位于鄂尔多斯盆

地的天环凹陷中部,紧邻伊陕斜坡,构造特征为倾角不足 1° 的西倾单斜,鼻状隆起发育。三叠纪时受西南物源控制,沉积物以碎屑岩为主,纵向上岩性变化大,形成局部封闭圈,成为油气聚集有利场所。王建民等^[7]通过对钻井及试采资料的分析,利用密井网绘图方法,结合地质构造和演化特征指出了庆阳地区具有油气富集特征;李振华等^[8]以油气成藏地质学理论为基础,通过成藏条件对比,认为庆阳地区具有良好的油气储藏潜力;杨华等^[9]通过模拟实验和资料分析,得出庆阳地区具有致密气藏形成的有利条件。由此可见,研究区内烃源岩发生过大规模生烃阶段,油气资源富集,存在烃类微渗漏遥感异常指示标志的可能性很大,可利用上述遥感方法进行信息提取。

2015年,张天宇^[10]曾应用快速指数法和光谱角匹配法对庆城地区的Hyperion高光谱数据进行油气微渗漏信息提取,初步圈定了油气空间分布,与实地的采油井分布及已知油田区一致性较好。并且其提取方法同样是基于油气微渗漏理论,遥感指示标志与本文相同,印证了本文方法的可行性。从图6提取结果的异常信息分布情况看,本文提取的异常信息分布与前人的地质分析结果和提取结果也都

吻合较好。

3.3 波谱曲线分析

提取结果表明,数据覆盖区具有明显的烃类微渗漏遥感异常指示标志存在。本文在 3 种异常信息同时存在的地区,划定了一个 15 像素 × 15 像素的区域,进行平均波谱曲线计算。该曲线在 2 200 nm 和 2 300 nm 处存在明显的双吸收峰,并且后者还具有一定的吸收宽度。2 200 nm 处的吸收特征,主要受粘土矿物和烃类矿物影响,而 2 300 nm 处,粘土、碳酸盐岩和烃类物质均表现有吸收特征,其中碳酸盐岩矿物的吸收强度最大,故而造成该波段处存在一定的吸收宽度。

4 结论

基于油气微渗漏理论,选取了 3 种具有显著波谱特性的烃类微渗漏遥感指示标志作为遥感识别目标,在分析了烃类对其上覆盖层蚀变物质光谱吸收特征的基础上,提出运用波段比值法突出异常信息,成功提取了甘肃环县—庆阳地区的 3 种烃类微渗漏蚀变信息,与该地区已有地质调查资料和油气储藏分析结果吻合;对异常信息区的波谱解译也表明,烃类微渗漏的蚀变特征均有所体现,验证了利用比值法进行天宫一号高光谱数据油气微渗漏信息提取方法的准确性和可行性。

本研究在提取烃类微渗漏高光谱异常信息过程中,由于仅采用了普遍的坏线处理、大气校正等方法,地物真实光谱的恢复程度一般;遥感指示标志均只应用比值法进行突出,也给信息提取带来了一定误差。在下一阶段的研究中,应针对天宫一号数据特点和识别目标的波谱特性,综合运用沙漏法、监督/非监督法等提升遥感指示标志的提取效果,探索更实用、更有效的数据预处理技术和方法。

参考文献 (References):

- [1] Segal D B, Merin I S. Successful use of Landsat thematic mapper data for mapping hydrocarbon microseepage - induced mineralogic alteration, Lisbon Valley, Utah [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1989, 55(7): 1137 - 1145.
- [2] Ellis J M, Davis H H, Zamudio A. Exploring for onshore oil seeps with hyperspectral imaging [J]. Oil and Gas Journal, 2001, 99(37): 49 - 58.
- [3] 周密. 油气微渗漏的高光谱信息提取研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.
Zhou M. Study on the Hyperspectral Information Extraction of Oil and Gas Microseepage [D]. Beijing: China University of Geosci-
- ences (Beijing), 2007.
- [4] 李娜, 周萍. 基于 ASTER 数据和反射光谱分析的烃类微渗漏信息提取 [J]. 地质力学学报, 2015, 21(2): 218 - 227.
Li N, Zhou P. Hydrocarbon microleakage information extraction based on ASTER data and reflectance spectroscopy [J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21(2): 218 - 227.
- [5] 陈圣波, 赵靓, 王晋年. 黄土覆盖区油气微渗漏地表蚀变高光谱特征响应机理研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(6): 1616 - 1619.
Chen S B, Zhao L, Wang J N. Study on hyperspectral response to surface alteration by oil and gas microseepage under loess area [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(6): 1616 - 1619.
- [6] Kühn F, Oppermann K, Hörig B. Hydrocarbon index: An algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(12): 2467 - 2473.
- [7] 王建民, 王佳媛. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡上的低幅度构造与油气富集 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 49 - 57.
Wang J M, Wang J Y. Low - amplitude structures and oil - gas enrichment on the Yishan Slope, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 49 - 57.
- [8] 李振华, 陈占军, 余岚, 等. 庆阳地区上古生界天然气资源潜力评估 [J]. 地下水, 2015, 37(6): 245 - 247.
Li Z H, Chen Z J, Yu L, et al. Study on the potential of forming reservoir in Upper Paleozoic layer, Qing - yang area [J]. Ground Water, 2015, 37(6): 245 - 247.
- [9] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 295 - 303.
Yang H, Fu J H, Liu X S, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the Upper Paleozoic of the Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 295 - 303.
- [10] 张天宇. 基于高光谱遥感的黄土覆盖区油气微渗漏信息提取 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
Zhang T Y. Extraction of Micro - Seepage of Oil and Gas Information in Loess Covered Area Based on Hyperspectral Remote Sensing [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [11] 易欢, 李健强, 韩海辉, 等. 遥感技术在阿尔金贝壳滩地区矿产资源综合调查中的应用 [J]. 中国地质调查, 2016, 3(4): 1 - 5.
Yi H, Li J Q, Han H H, et al. Application of remote sensing in integrated survey on mineral exploration in Beketan, Altyn [J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4): 1 - 5.
- [12] 闫柏琨, 董新丰, 王喆, 等. 航空高光谱遥感矿物信息提取技术及其应用进展——以中国西部成矿带调查为例 [J]. 中国地质调查, 2016, 3(4): 55 - 62.
Yan B K, Dong X F, Wang Z, et al. Mineral information extraction technology by airborne hyperspectral remote sensing and its application progress: An example of mineralization belts of western China [J]. Geological Survey of China, 2016, 3(4): 55 - 62.

Extraction of hydrocarbon micro – seepage information based on TG – 1 hyperspectral data

YANG Dachang¹, CHEN Jie^{1,2}, GAO Zihong¹, HAN Yachao¹

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The hydrocarbon microseepage detection method with remote sensing technology is a direct way for oil and gas investigation. According to several anomalous phenomena above oil and gas reservoirs, such as the enrichment of low – grade iron elements, the abundance of clay minerals and high carbonate content, this paper proposes an oil and gas alteration information extraction theory with hyperspectral method. Based on the theory, the authors analyzed the spectral response characteristics of various hydrocarbon alteration materials with hyperspectral data of the Tiangong – 1 (TG – 1) , highlighted targeted mineral feature information and at the same time suppressed the information of other ground objects, selected the high – absorption and high – reflection bands of the different interpretation signs, and then used the band ratio method to highlight and extract feature information. With the TG – 1 hyperspectral data of Qingyang City, Gansu Province, the authors conducted oil and gas micro – seepage extraction and the results show that the distribution of the abnormal information of surface alteration is not only in good consistency with the local geological analysis results but also in good agreement with the actual oil and gas area data, thus verifying the feasibility of the method proposed in this paper and demonstrates the detection potential of TG – 1 hyperspectral data.

Keywords: hyper – spectrum; hydrocarbon micro – seepage; band ratio; alteration anomaly; TG – 1

(责任编辑: 陈 理)

航空 γ 能谱低能区与高能区信息综合应用研究

张虹¹, 周锡华^{2,3}, 米耀辉^{2,3}

(1. 北京信息科技大学, 北京 100085; 2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083;

3. 国土资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083)

摘要:通过低能区特征峰选择和最佳组合, 结合传统采用的高能区标准三窗法, 开展航空 γ 能谱各项修正系数的计算、数据修正以及应用试验等研究工作。提出了利用高能区和低能区中 ^{214}Bi 特征峰测得的U含量的算术平均值作为最终U含量, 有效提高了航空 γ 能谱U含量的测量精度。

关键词:低能区; 特征峰组合; 修正系数; 平均U含量

中图分类号: TL812+.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-0934(2018)2-0235-06

用于矿产资源勘探的航空 γ 能谱测量主要测量对象是 ^{40}K 、U系和Th系核素。航空 γ 能谱测量现采用多道能谱测量(256道或512道)获取0~3 MeV能量范围内的 γ 能谱数据^[1]。在数据处理过程中通常采用标准三窗法, 即采用 ^{40}K 的1.46 MeV特征峰、高能区 ^{214}Bi 的1.76 MeV特征峰和 ^{208}Tl 的2.62 MeV特征峰作为分析的对象^[2]。航空测量过程中 ^{214}Bi 的1.76 MeV特征峰对应能窗计数率较低, 数据统计涨落比较严重, 并且其测量值中有相当一部分是大气Rn的贡献, 给地面U的测量带来较大误差^[3,4]。标准三窗法并未充分利用多道能谱中的所有信息, 尤其是低能区 ^{238}U 衰变系列中 ^{214}Bi 的0.609 MeV、1.12 MeV和2.204 MeV能峰信息, ^{232}Th 衰变系列中 ^{208}Ac 的0.911 MeV和0.969 MeV、 ^{208}Tl 的0.583 MeV能峰信息未

利用^[5]。因此本文对采用航空 γ 能谱低能区和高能区的信息来测定U含量方法进行研究, 并对航空多道 γ 能谱实测数据进行试验, 探讨低能区与高能区信息综合应用提高航空 γ 能谱测量精度的方法。

1 低能特征峰的选择

^{238}U 衰变系列中 ^{214}Bi 的0.609 MeV特征峰较1.12 MeV特征峰位于很高散射背景之上, 同时易受 ^{208}Tl 的0.583 MeV特征峰和 ^{137}Cs 的0.662 MeV特征峰的干扰, 其本底的扣除和康普顿散射的修正难度大, 而 ^{214}Bi 的1.12 MeV特征峰受到其他峰的干扰较小。 ^{228}Ac 的0.911 MeV特征峰, 在较高散射背景之上是 ^{232}Th 衰变系列中低能区相对比较明显的特征峰, 统计涨落误差较小, 也较利于康普顿散射的修正。因此航空 γ 能谱低能区中选用 ^{214}Bi 的1.12 MeV特征峰与 ^{208}Ac 的0.911 MeV特征峰组合作为低能区观测对象, 高能区中仍选用标准三窗法推荐的 ^{214}Bi 的1.76 MeV特征峰与 ^{208}Tl 的2.62 MeV特征峰组合。

收稿日期: 2018-01-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0602100)资助。

作者简介: 张虹(1963—), 女, 辽宁锦县人, 副教授, 主要从事地球物理测量方法与数理统计应用技术研究。

2 能谱数据修正

航空 γ 能谱低能区与高能区信息综合应用的前提是进行数据修正。参照IAEA推荐的航空 γ 能谱标准窗数据修正方法分别对低能区和高能区所选用特征峰对应的能窗数据进行修正^[2]。其中低能区中U窗选用 ^{214}Bi 的1.12 MeV能窗,Th窗选择 ^{228}Ac 的0.911 MeV能窗;高能区中U窗选用 ^{214}Bi 的1.76 MeV能窗,U窗选用 ^{208}Tl 的2.62 MeV能窗。低能区中和高能区中K窗均选用 ^{40}K 的1.74 MeV能窗。

2.1 飞机本底和宇宙射线修正

利用海上高高度飞行采集的标定数据求取的飞机本底和宇宙射线修正系数列于表1和表2,采用该系数对选用的特征峰窗口数据进行飞机本底和宇宙射线修正^[2]。 B_K 、 B_U 、 B_{Th} 、 B_{Utp} 分别表示为K窗、U窗、Th窗和上视U窗的飞机本底(s^{-1})。 C_K 、 C_U 、 C_{Th} 、 C_{Utp} 分别表示为K窗、U窗、Th窗和上视U窗的宇宙射线修正系数。

表1 高低能区各能窗飞机本底

内容	B_K	B_U	B_{Th}	B_{Utp}
高能区飞机本底/ s^{-1}	23.853 9	3.728 2	0.611 1	0.710 7
低能飞机本底/ s^{-1}	23.853 9	7.982 8	11.139 8	0.710 7

表2 高低能区各能窗宇宙射线修正系数

内容	C_K	C_U	C_{Th}	C_{Utp}
高能宇宙射线系数	0.033 0	0.025 3	0.029 6	0.007 5
低能宇宙射线系数	0.033 0	0.031 6	0.050 9	0.007 5

2.2 大气Rn修正

利用动态标定数据分别求取大气Rn修正系数和地面辐射系数,如表3和表4。用该系数对各能窗进行大气Rn影响修正^[2]。表3中 a_{Utp} 、 a_K 、 a_{Th} 分别为下视U窗大气Rn计数与上视U窗、下视K窗和下视Th窗Rn计数的比例系数。表4中 a_1 、 a_2 分别表示为下视U窗、下视Th窗计数对上视U窗计数的影响系数。

$$n_{U,U} = \frac{n_U + n_{Th} \cdot (S_{Th,K} \cdot S_{K,Th} - S_{U,Th}) - n_K \cdot S_{U,Th}}{1 - S_{Th,K} \cdot S_{K,U} - S_{Th,U} \cdot (S_{U,Th} - S_{Th,K} \cdot S_{K,Th})} \quad (4)$$

$$n_{Th,Th} = \frac{n_{Th} \cdot (1 - S_{Th,K} \cdot S_{K,U}) - n_U \cdot S_{Th,U} - n_K \cdot S_{Th,U} \cdot S_{K,Th}}{1 - S_{Th,K} \cdot S_{K,U} - S_{Th,U} \cdot (S_{U,Th} - S_{Th,K} \cdot S_{K,Th})} \quad (5)$$

表3 低能峰和高能峰大气Rn修正系数

系数	a_{Utp}	a_K	a_{Th}
高能区	0.289 19	0.997 98	0.196 38
低能区	0.232 66	0.766 13	0.946 77

表4 低能峰和高能峰地面辐射系数

系数	a_1	a_2
高能	0.041 8	0.021 4
低能	0.020 3	0.005 2

2.3 康普顿散射修正

由于 ^{40}K 特征峰对 ^{214}Bi 的1.764 MeV特征峰和 ^{208}Tl 的2.625 MeV特征峰的散射作用小,进行高能区各能窗数据康普顿散射修正时可不考虑K峰对这两个峰的散射影响,计算公式如式(1)、式(2)和式(3)所示^[2]。

$$N_{U,U} = \frac{N_U - N_{Th} \cdot S_{U,Th}}{1 - S_{U,Th} \cdot S_{Th,U}} \quad (1)$$

$$N_{Th,Th} = \frac{N_{Th} - N_U \cdot S_{Th,U}}{1 - S_{U,Th} \cdot S_{Th,U}} \quad (2)$$

$$N_{K,K} = N_K - N_{Th} \cdot S_{K,Th} - N_{U,U} \cdot S_{K,U} \quad (3)$$

式中: $N_{U,U}$ 、 $N_{Th,Th}$ 、 $N_{K,K}$ 分别为康普顿散射修正后的高能区U窗、Th窗、K窗的计数率, s^{-1} ; N_U 、 N_{Th} 、 N_K 分别为经本底修正后高能区U窗、Th窗、K窗的计数率, s^{-1} ; $S_{U,Th}$ 、 $S_{Th,U}$ 、 $S_{K,U}$ 、 $S_{K,Th}$ 分别为利用静态标定数据求取的高能区各能窗康普顿散射系数(如表5)。

表5 高能区能窗的康普顿散射系数

$S_{U,Th}$	$S_{K,Th}$	$S_{K,U}$	$S_{Th,U}$
0.246 58	0.139 57	0.697 39	0.045 05

进行低能区各能窗数据康普顿散射修正时,由于低能段 ^{214}Bi 的1.12 MeV特征峰和 ^{228}Ac 的0.911 MeV特征峰受到 ^{40}K 特征峰的康普顿散射影响比较严重,因此需考虑它们之间的相互散射作用,其计算式为公式(4)、式(5)和式(6):

$$n_{K,K} = \frac{n_{Th} \cdot (S'_{U,Th} \cdot S'_{K,U} - S'_{K,Th}) + n_U \cdot (S'_{Th,U} \cdot S'_{K,Th} - S'_{K,U}) + n_K \cdot (1 - S'_{Th,U} \cdot S'_{U,Th})}{1 - S'_{Th,K} \cdot S'_{K,U} - S'_{Th,U} \cdot (S'_{U,Th} - S'_{Th,K} \cdot S'_{K,Th})} \quad (6)$$

式中： $n_{U,U}$ 、 $n_{Th,Th}$ 、 $n_{K,K}$ 为康普顿散射修正后的低能区U窗、Th窗、K窗的计数率， s^{-1} ； n_U 、 n_{Th} 、 n_K 为经本底修正后低能区U窗、Th窗、K窗的计数率， s^{-1} ； $S'_{K,U}$ 、 $S'_{Th,K}$ 、 $S'_{Th,U}$ 、 $S'_{U,Th}$ 、 $S'_{K,Th}$ 和 $S'_{U,K}$ 为利用静态标定数据求取的低能区能窗康普顿散射系数（如表6）。

表6 低能区能窗的康普顿散射系数

$S'_{U,Th}$	$S'_{K,Th}$	$S'_{K,U}$	$S'_{Th,U}$	$S'_{Th,K}$	$S'_{U,K}$
0.116 80	0.101 82	0.483 40	0.966 16	0.109 07	0.224 11

2.4 高度修正和含量换算

利用动态标定数据分别求取高能区和低能区各能窗高度修正系数和含量换算系数（如表7）， μ_K 、 μ_U 、 μ_{Th} 分别为K窗、U窗和Th窗计数率的高度衰减系数， S_K 、 S_U 、 S_{Th} 分别表示为K窗、U窗和Th窗计数率的灵敏度系数。利用该系数对各能窗的计数率进行高度修正，并换算成含量。

表7 不同峰位组合计算得到的高度衰减系数和灵敏度系数

采用峰位	高度衰减系数			100 m灵敏度系数/($s^{-1}/10^{-6}$)		
	μ_K	μ_U	μ_{Th}	S_K	S_U	S_{Th}
高能	0.006 240	0.004 479	0.004 969	82.395 5	8.952 6	4.423 8
低能	0.006 402	0.003 469	0.005 678	82.364 9	17.829 5	30.260 3

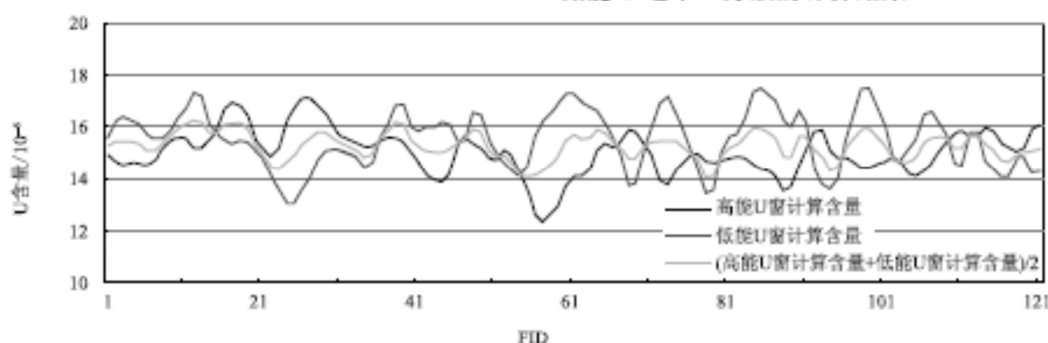


图1 混合模型坪上测定U含量对比图

3.2 动态实测数据高低能峰的综合利用

利用航空 γ 能谱测量动态校准带上实测数据来分析高能区和低能区信息综合应用效果。图2和图3分别利用地面U含量均匀的动态校准带上60 m和90 m高度飞行采集数据求得的U含量图。从图中可以得到：高能U窗和

表7中分别利用高能区特征峰康普顿散射系数和低能区特征峰康普顿散射系数修正后的K窗计数率求得的K窗高度衰减系数和100 m灵敏度系数一致，最终可获得的K含量也一致，说明选用的低能区特征峰有比较好的相关关系，计算求得的低能区特征峰康普顿散射系数比较合理。

3 低能区和高能区信息综合利用

由于 ^{208}Tl 的2.62 MeV特征峰受到低能散射的影响小，并且其能窗有足够的计数，统计涨落引入的测量误差较小，IAEA推荐的通过 ^{208}Tl 的2.62 MeV特征峰能窗测量Th含量已比较理想。因此航空 γ 能谱低能区与高能区信息综合应用主要针对U含量测量来应用。

3.1 静态实测数据高低能区信息的综合应用分析

在航空 γ 能谱标定模型坪的混合坪上进行静态测试，图1分别为利用高能U窗和低能U窗计算得到的U含量，以及低能U窗和高能U窗计算的U含量平均值。图1表明采用平均值获得的U含量涨落要明显小于高能U窗或低能U窗单一方法的计算结果。

低能U窗计算得到的U含量平均值的曲线比起高能U窗或低能U窗单一方法得到U含量的曲线要平滑得多，其稳定度要好于单一方法的稳定度，而且更能反映动态标定带U分布的均匀性。

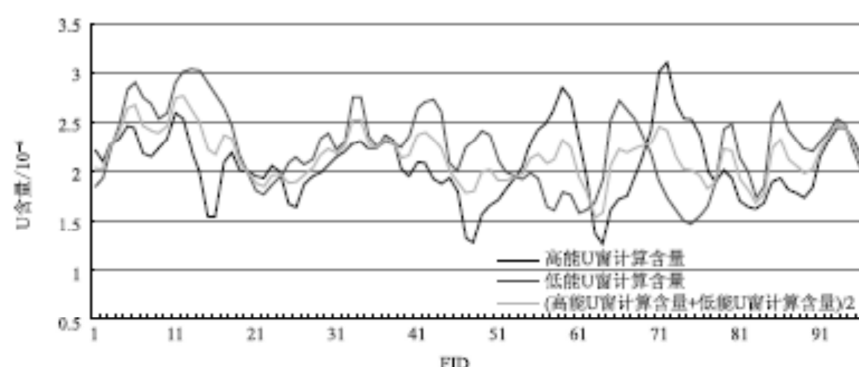


图2 动态标定带上 U 含量比较图 (60 m 高度测量)

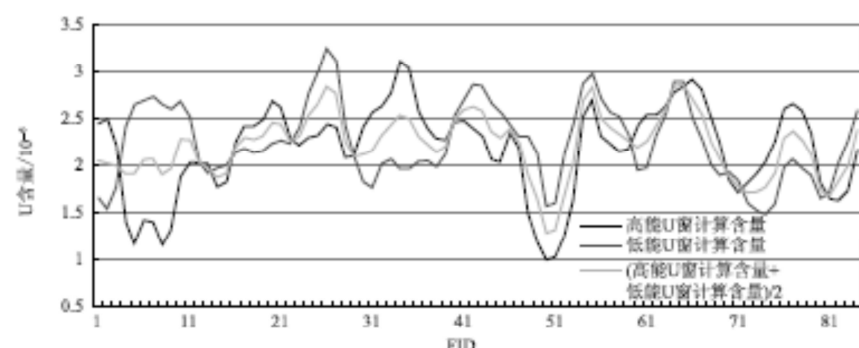


图3 动态标定带上 U 含量比较图 (90 m 高度测量)

为比较计算得到的 U 含量的离散度,引入 U 含量均方差的统计方法,比较三种方法 U 含量的稳定度,其计算式为:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2}}{2n} \quad (7)$$

式中: σ 为 U 含量的均方差; $\bar{X}$ 为 n 个测点 U

含量的平均值; X_i 为第 i 个测点的 U 含量。

表 8 为动态标定带上计算得到的 U 含量对比表。从表 8 可知低能 U 窗和高能 U 窗计算的 U 含量平均值的均方差小于单一由低能 U 窗和高能 U 窗测得含量值的均方差。

表 8 动态标定带上高低能 U 窗计算得到的 U 含量对比表

高度	统计 点数	内容	低能 U 窗测得 U 含量/ 10^{-6}	高能 U 窗测得 U 含量/ 10^{-6}	低能和高能 U 窗测得 U 含量平均值 / 10^{-6}	给定含量/ 10^{-6}
60 m	96	平均值	2.081	2.245	2.163	2.20
		均方差	0.036	0.040	0.025	
90 m	85	平均值	2.234	2.164	2.199	2.20
		均方差	0.052	0.045	0.036	

4 航空 γ 能谱低能区和高能区信息综合应用效果

利用某地区的 256 道航空 γ 能谱数据,分

别对低能区和高能区选用特征峰能窗数据进行本底修正、大气氧修正、康普顿散射修正、高度修正和含量换算。图 4 为某测线高低能 U 窗测得的 U 含量剖面对比图。从图 4 可知:由高

低能 U 窗测得到的 U 含量的平均值涨落较小，比高能或低能 U 窗单一方法测得的 U 含量曲线要平滑，并且真实地反映地质体的变化情况。

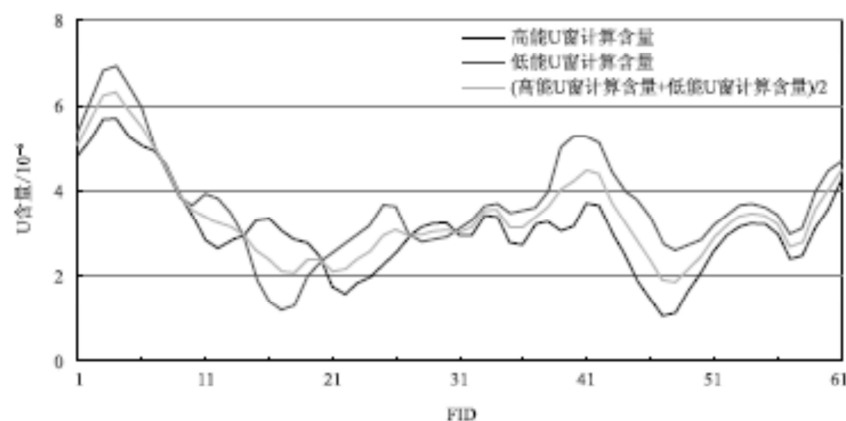


图4 某测线高低能 U 窗得到的 U 含量剖面对比图

图5和图6分别为通过低能U窗和高能U窗计算得到的该区U含量阴影图，从图中可以看出两者之间反映的异常形状大部分相近，但个别地方两者反映区别较大。低能U窗测量结果反映的岩体轮廓更清楚（如图5的中下部），但其跳跃成分较多。图7是低能和高能U窗计算得到的U含量平均值的立体阴影图。

图7 U 含量反映的异常更加清晰，扰动成分明显减少；尾亚岩体等多个岩体以及断裂构造的走向反映得更清楚，U 异常范围与综合推断的范围相近，效果要优于低能或高能 U 窗单一方法计算得到的 U 含量图件，成图质量得到提高。

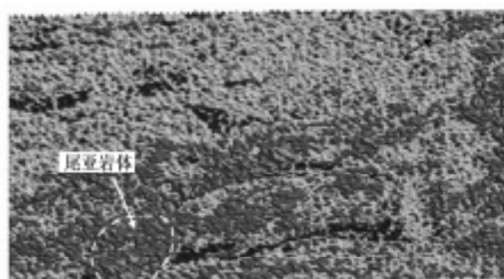


图5 低能 U 窗求得 U 含量立体阴影

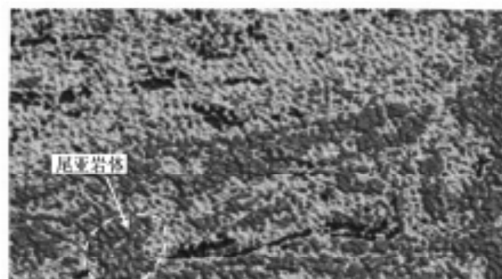


图6 高能 U 窗求得 U 含量立体阴影

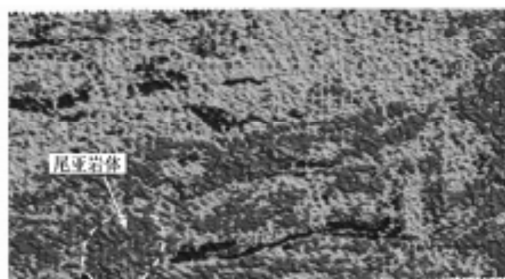


图7 高低能 U 窗平均 U 含量立体阴影

5 结论

本研究针对航空多道 γ 能谱测量 U 含量定量计算误差大的现状,提出利用航空 γ 能谱低能区与高能区综合信息测定 U 含量的方法。开展了低能区峰位的选择和组合,能谱各项修正系数的计算和数据修正处理,并分析和对比高低能信息综合应用计算 U 含量的效果,验证该方法可有效提高了航空多道 γ 能谱 U 含量测量精度。建议继续开展相关研究,进一步对本研究方法进行应用和完善。

参考文献:

[1] 葛良全,熊盛青,曾国强,等. 航空伽马能谱探测

技术与应用 [R]. 北京: 科学出版社,1981:5.

- [2] IAEA, IAEA Technical Reports Series 323: Airborne Gamma Ray Spectrometer Survey [R]. Vienna: IAEA, 1991: 67-70.
- [3] 万建华,熊盛青,范正国. 航空 γ 能谱测量方法技术现状与展望 [J]. 物探与化探, 2010, 33 (11): 844-848.
- [4] 葛良全,谷懿,张庆贤,等. 航空 γ 能谱测量谱线比法大气 Rn 校正的理论研究 [J]. 核技术, 2010, 33 (11): 844-848.
- [5] 倪卫冲. 航空伽马射线全能谱数据分析方法的理论研究 [J]. 铀矿地质, 2011, 27 (4): 231-241.

Integrated Application of Low Energy Information and High Energy Information from Airborne Gamma-Ray Spectrometry

ZHANG Hong¹, ZHOU Xi-hua^{2,3}, MI Yao-hui^{2,3}

(1. Beijing Information Sciences & Technology University, Beijing 100085, China;

2. China Aero Geophysical and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;

3. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology MLR, Beijing 100083, China)

Abstract: By selection and optimum combination of the energy peaks in low energy region of gamma-ray spectrometry, combined with the three standard energy windows in the high energy region, we carry out the research work of calculating the correction coefficient, data correction and application test of the airborne gamma-ray spectrometry. The arithmetic mean of uranium content derived from ^{214}Bi peaks in high-energy region and low energy region is used as the final uranium content, which effectively improves the accuracy of uranium content measurement by airborne gamma ray spectrometry.

Key words: low energy region; peaks combination; correction coefficients; uranium mean content

低频电磁探测技术在煤层气富集区的应用

陈 理^{*①②} 秦其明^③ 王 楠^④ 赵姗姗^③ 张成业^③ 惠 健^③

(①中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083; ②自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室,北京 100083;

③北京大学遥感与地理信息系统研究所,北京 100871; ④中国科学院电子学研究所,北京 100190)

陈理,秦其明,王楠,赵姗姗,张成业,惠健. 低频电磁探测技术在煤层气富集区的应用. 石油地球物理勘探,2018,53(5):1095-1102.

摘要 以沁水盆地胡底矿区为例,根据实际情况设计野外电磁探测方案,开展探测试验;基于多元电磁探测数据,从地质解译、构造及煤储层参数定量评估等多角度实现煤层气富集区探测。研究表明:在地质解译方面,超低频电磁探测数据优势突出,可根据不同地层的电性特征有效识别不同岩层及煤储层;在断裂等构造解释方面,音频大地电磁探测数据获得的视电阻率二维反演结果可准确提取陷落柱及断层信息,且其位置分布及特征与地震数据基本吻合,对小断层识别效果较好;在煤储层参数定量评估方面,超低频电磁探测曲线异常中心深度、范围及幅值平均值分别与煤储层埋深、厚度及含气量相关性较好,为定量评价提供了数据支持,通过采用支持向量机算法构建煤储层含气量评估模型,预测精度达 87.33%,与实测含气量的平均误差仅为 0.17m³/t。基于多元低频电磁探测数据可从多角度为煤层气富集区的圈定提供参考。

关键词 音频大地电磁法 超低频电磁探测 煤层气富集区 断裂构造 储层参数评估

中图分类号:P631 **文献标识码:**A **doi:** 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2018.05.024

1 引言

煤层气作为一种高效、洁净的非常规天然气,已成为重要的补充和接替能源^[1]。中国煤层气资源丰富,但由于煤田地质条件复杂,煤层气区域性差异较大,高产富集区预测不准确,勘探程度相对较低。目前,煤层气富集区勘探主要采用钻井、地震及测井技术,虽然精度高,但风险大、投入高且周期长^[2-4]。随着科学技术的飞速发展,非地震(重力、电法、磁法、化探和遥感等)勘探技术以其成本低、效率高、见效快等优势,在油气勘探领域得到广泛应用,取得了较好的成果,成为了地震勘探的重要补充^[5]。但是,目前利用非地震勘探技术,尤其是电磁探测技术,开展煤层气富集区探测的研究还相对较少^[6-8]。

在煤层气富集区,根据煤层气藏动力学及煤岩流变电磁动力学理论,在动电效应、压电效应、摩擦

起电、岩体变形、裂隙产生及斯捷潘诺夫效应的作用下,含瓦斯煤层会产生大量电磁辐射,这是产生地表电磁异常的重要因素^[8-10]。煤层中瓦斯气体的流动及解吸是产生电磁辐射的原因之一,瓦斯压力越大,流动速度越快,电磁辐射越强^[11]。因此,煤层气藏电磁辐射的特征(幅值及频带)与煤储层的成分、含气性、孔隙度及应力作用密切相关。李建等^[12]发现煤层瓦斯的存在使得超低频电磁探测曲线呈高振幅异常特征,且随压力的增大而增大;蒋洪波等^[13]通过多年对煤层气排采井跟踪实验,也发现随着煤层气的动态排采,超低频电磁探测曲线会产生一定规律的变化;王绪本等^[8]曾利用可控源音频大地电磁探测技术获得较清晰准确的储层信息,并依据电性特征提取了煤层埋深、厚度等物性参数;王楠等^[14,15]基于天然源超低频电磁探测技术,开展了煤储层的识别研究,结合电性特征对煤储层位置的探测精度进行了评价。然而,利用单一方法探测煤层

* 北京市海淀区学院路 31 号,100083。Email:chenlixzy@163.com

本文于 2017 年 10 月 31 日收到,最终修改稿于 2018 年 6 月 4 日收到。

本研究受自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室航遥青年创新基金项目“综合多源遥感数据沁水盆地煤层气富集区识别与提取研究”(2016YFL16)资助。

气仍然存在多解性和不确定性,迫切需要进行基于多元数据、从多角度开展煤层气富集区电磁探测方法的综合研究。

本文综合音频和超低频大地电磁探测技术,分析这两种方法的优势及数据处理方法的差异。利用 V8-AMT 多功能电法仪和 BD-6 超低频电磁探测仪在沁水盆地胡底矿区开展同步探测试验,利用多元数据、从多角度开展煤层气富集区地质解译、断裂等构造解释及煤储层参数定量评估,实现对煤层气富集区的探测。

2 煤层气富集区电磁探测技术

基于大地电磁测深理论,天然源电磁探测技术通过采集电磁信号,获得地下地质体的电性信息,从而达到了解地质构造及找矿等目的,其主要信号来源为“天电”、“地电”和人类生产生活中产生的电磁场。该技术具有装置轻便、效率高、成本低、不受地形限制等优点。由于该技术已相对成熟,其方法原理在此不做赘述,但是不同的电磁探测技术,在探测频率范围、仪器设备、采集方案、数据处理和探测效果等方面均存在一定差异。在此仅对本文涉及两种探测方法进行重点比较和分析。

2.1 音频大地电磁法

音频大地电磁法(Audio frequency Magnetotellurics, AMT)利用天然源音频大地电磁场,频率范围约为 1~10000 Hz,电磁信号主要由雷电引起,一般用于探测浅于 1 km 的地质信息。该方法利用不同物性特征地层产生的电磁差异,从而实现地质体的识别,特别是在构造识别中应用较为广泛,可有效查明断层位置、宽度及走向等参数,为构造及岩性特征研究提供依据^[16,17]。

多功能电法仪 V8-AMT 是目前较常用的音频大地电磁探测设备。利用地面电磁场观测值(E_x , E_y , H_x , H_y , H_z)计算地下岩石的电性参数。基于大地电磁法,传输函数可表示为^[18]

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \\ T_{zx} & T_{zy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$ 为阻抗; $\mathbf{T} = [T_{zx} \quad T_{zy}]$ 为倾

子。根据阻抗 $\mathbf{Z}$ 、磁导率 μ 和角频率 ω 可获得地下地质体的视电阻率

$$\rho = |\mathbf{Z}|^2 / (\omega \mu) \quad (2)$$

AMT 法具有张量测量、无近场效应及资料解释方法较简便等优势,其反演的视电阻率断面对二维构造信息反映逼真。但由于天然源信号较弱,宽频带信号易受干扰,因此数据预处理是获得最优二维反演结果的关键。

2.2 超低频电磁探测技术

超低频(Super-low frequency, SLF)电磁波是指 30~300 Hz 频段的电磁波,该频段电磁波具有穿透能力强、衰减慢、传播过程中受高阻层屏蔽小、探测深度大且受地形影响弱等优势。该技术同样利用煤储层及顶底板围岩的电磁特征差异,基于煤层气富集区电磁场信号的异常特征,开展煤层气富集区预测。不同于 AMT 在构造研究方面的优势,其在识别岩性界面、探测煤层气资源量等方面具有应用潜力^[12]。

天然源超低频电磁探测仪 BD-6 由北京大学自主研发,利用高灵敏度磁探头接收来自地下的天然电磁场信号,通过放大、滤波处理,将不同频率对应的电磁波振幅转换为不同深度的地质体电磁响应强度。探测深度(趋肤深度) δ 与频率 f 的经验公式为^[18]

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (3)$$

通过后续频谱分析、处理与解释,基于超低频电磁异常获得目标体的电性特征,从而实现对地下岩性界面的解译及煤储层参数的定量评估。

3 研究区概况及探测方案设计

3.1 研究区概况

沁水盆地是中国煤炭资源最丰富的区域之一,为煤层气藏的形成提供了良好的物质基础。研究区位于沁水盆地东南部,隶属于山西省晋城市阳城县胡底乡。该区地形地貌^[19,20]复杂,多低山、丘陵,呈现明显的黄土地貌,属于华北古生代克拉通盆地改造变形形成的沉积盆地,地层总体走向为 NNE 或 N,地层平缓,倾角一般小于 10°。该区地层自下而上为奥陶系(O)、石炭系(C)、二叠系(P)、三叠系(T)、古近系(E)、新近系(N)和第四系(Q)。区内构

造较简单,以褶皱为主,断裂稀少,无岩浆岩活动。含煤地层为石炭系太原组和二叠系山西组,煤层埋深小于 800m。主要可采煤层包括山西组 3[#] 煤层和太原组 15[#] 煤层,发育稳定,含气量较高,具有一定的岩性组合规律和地球物理特征,为该区主要目标煤层^[14]。

3.2 野外电磁探测方案设计

以研究区地质资料为基础,通过野外实地踏勘,设计施工方案,采用 V8-AMT 和 BD-6 两种仪器同步测量。

具体工作流程包括:①准备工作,包括收集相关资料(地质、钻井、物探和岩石物性等),了解研究区施工条件(交通、地形和气候等),调查大地电磁信号的干扰源等;②野外实地踏勘,了解研究区地形、地质露头、干扰源分布,提出确保观测质量的措施、设计测点位置、点距、测线及方位等;③观测装置布设,野外观测时除注意提高观测质量,还应按照探测设备的要求严格布设。如 V8-AMT 在布设时应使各个测点上电磁场分量彼此正交等。

对于天然源超低频电磁探测仪 BD-6 而言,暂无勘探规程,测点主要以排采井分布为依据,尽量位于高产排采井附近,避开公路、河流及居民区等区域,磁探头的摆放应尽量远离高压输电线,减少外界电磁干扰的影响^[18]。测点通常等间距分布,点距在一定程度上影响探测结果的横向分辨率,在煤层气排采井或地质条件较复杂(断裂构造)区应适当加密,测线方向一般与相邻两口排采井的连线方向一致(图 1)。

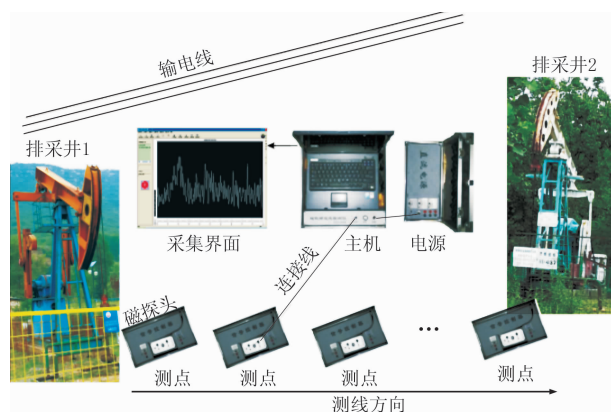


图 1 超低频电磁探测方案示意图

在 BD-6 仪器探测方案设计中,采集参数的设置对采集数据的质量及后续分析尤为重要。其主要参数包括探测深度、垂向采样步长及放大倍率等。

(1)探测深度:根据研究区地质资料分析探测目标的埋深范围,尽可能避开工频干扰影响的深度范围。以该研究区为例,探测深度为 300~1000m。

(2)垂向采样步长:与信号的频率相关,采样步长越小,采样的频点数越多,垂向分辨率越高,获得的地下信息也越丰富,但是相同深度范围的探测时间及数据冗余也随之增加。通常根据不同的探测深度及目标体的垂向电性结构确定,比如 1000m 的探测深度,一般设定 2~3m 步长为宜。

(3)放大倍率:在设备的磁探头和主机上分别设置了两级放大,应根据实地电磁信号的强度通过反复试验选择合适的前置及后置放大倍率,在有效增强信号的同时减少噪声的影响。

4 数据处理

4.1 数据处理流程

目前 AMT 数据处理流程已相当完备,包括:野外数据解编、导入并编辑数据文件(TBL 文件)、傅里叶变换、编辑平滑、极化模式识别、测点处理、静校正、空间滤波、二维反演及地质解释等。与 AMT 数据相比,超低频电磁探测数据的处理仅需要数据格式(RAW 文件)转换、去噪、测线数据生成及反演解译。为了提高数据信噪比及后续反演解译精度,去噪是这两种数据处理都不可或缺的重要步骤。

4.2 噪声去除

由于探测仪接收的是一种综合的宽频电磁信号,具有非稳定时变、有用信息微弱的特征,野外观测中不可避免存在各种干扰。其中,AMT 观测数据为时间域信息,数据去噪处理可以在时间域和频率域分别进行,以消除不同来源的噪声,增强地质体的分辨效果。具体去噪处理手段包括:①利用频谱分析、时空变化滤波消除 50Hz 及其谐波的工频干扰噪声,从时间序列中提取有用的电磁场频谱信息;②利用张量阻抗估计的 Robust 方法获得张量阻抗元素,同时有效压制数据中的非高斯型噪声,降低非构造因素的影响;③对野外观测的单点数据进行“飞点”剔除处理。

针对 BD-6 采集的超低频电磁探测数据,通常其有用信号与噪声都是相互独立的,利用独立成分分析(ICA)^[17]可以有效地将各个独立信号源从观测信号中分离出来,对工频噪声的去除效果尤为显

著。然而,局部仍存在游散电流产生的随机脉冲噪声,利用具有多分辨率及局部显微特性的小波变换可以在有效剔除高频噪声的同时较好地保留有用信息。因此,采用 ICA 和小波变换相结合的方法进行超低频电磁探测数据的噪声去除,即利用 DB4 小波基将Fast-ICA滤波后的信号分解为高频部分和低频部分,并通过自适应阈值对小波系数进行处理,再对信号重构,从而达到有效去除“毛刺”,保留细节信息的效果,更易于后续地质解译。超低频电磁探测曲线去噪效果如图 2 所示。

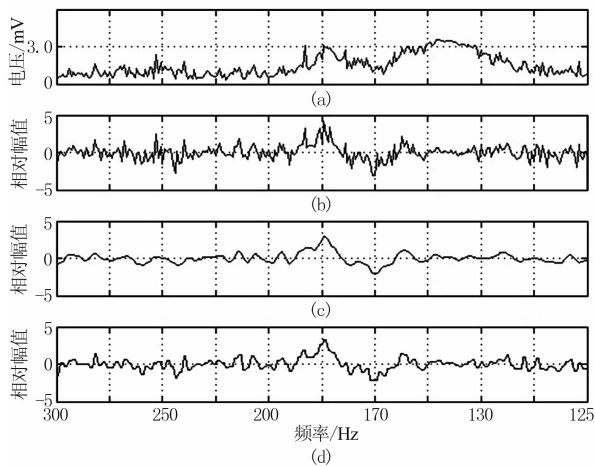


图 2 超低频电磁探测数据去噪结果对比

(a)原始信号;(b)ICA 处理结果;(c)ICA 处理后线性平滑滤波结果;(d)ICA 处理后自适应阈值小波变换滤波结果

从图 2 可以看出,通过 ICA 处理后的曲线,150Hz 和 250Hz 的工频干扰基本被压制,两个高振幅异常得以凸显。在此基础上,经线性平滑滤波的结果过于平滑,剔除了很多有用信息,而自适应阈值的小波变换处理结果则在对随机脉冲噪声有效压制的同时,保留了更多的有用信息,更易于地层信息的提取。

5 结果与分析

5.1 地质解译

不同地层具有不同的物性特征,这是电压幅值差异存在的关键,电压幅值的变动能反映地层间的地质界面。研究区地层表现出如下的岩性特征(图 3)^[21]:①奥陶系石灰岩致密均匀,呈现特高电阻率、高密度和较低自然伽马的特征,超低频电磁探测曲线上往往表现为简单且均匀平稳的高幅值特征;

曲线波形均质性较差,整体呈低幅值特征;③煤层多以中—高电阻率、中密度和较低自然伽马为特征,视电阻率、自然伽马曲线常有大小不等的起伏,在超低频电磁探测曲线上则表现为较高的幅值异常,且波形紧密而均匀。

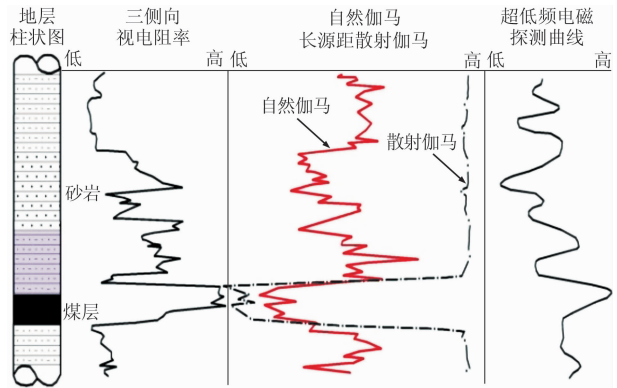
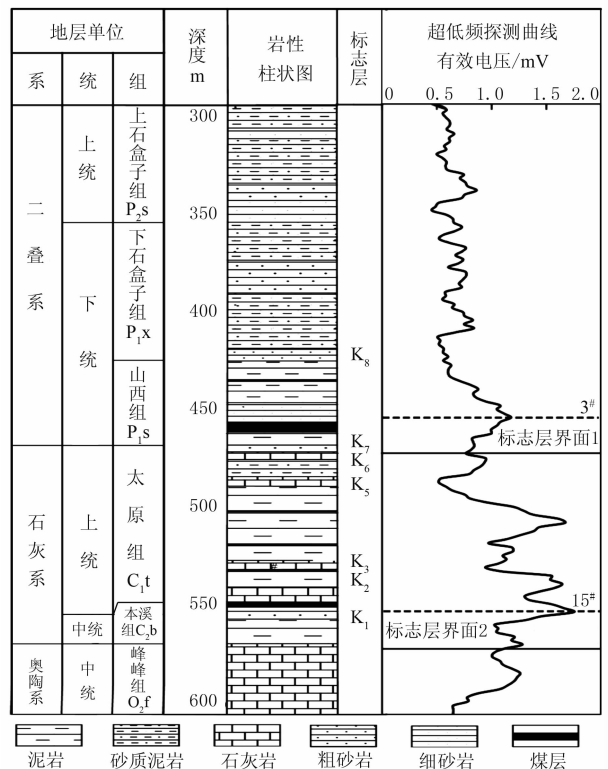


图 3 煤层局部测井曲线与超低频电磁探测曲线对比

利用不同地层的电性特征不仅可以有效划分不同年代的地层界面,也使一些岩性界面得以识别。由于第四系黄土层电磁响应特征不显著,根据实际地质资料,选择 300~1000m 深度为主要研究对象。某排采井地层(300~600m)柱状图与该排采井附近测点的超低频电磁探测曲线对比如图 4 所示。



从图 4 可以看出,经过 ICA 和小波变换综合处理后的超低频电磁探测曲线,基本消除了工频干扰及随机噪声的影响,较好地保留了细节信息。图 4 超低频探测曲线中两条虚线处均呈现相对高振幅异常特征,分别对应山西组 3[#] 煤层和太原组 15[#] 煤层,其异常振幅中心深度分别为 452m 和 550m,与实际煤层埋深对应较好。由于 3[#] 煤层上覆为松散砂岩地层,故上部异常的幅值较低且均质性差,而 15[#] 煤层底板为致密石灰岩,幅值相对较高,变化较小且波形紧密均匀。根据以上特征,图 4 中两条实

线标志层位置被划分为该测点的主要地质界面,与实际地层位置基本吻合。

5.2 构造解释

由于 AMT 法在断裂等构造解释方面的优势,在研究区开展 BD-6 探测的同时,进行了 V8-AMT 探测。L01 测线长度约为 2km,共布设 12 个测点,该测线向东横穿研究区中部,经过多口煤层气排采井,利用共轭梯度法进行测线视电阻率二维反演^[22,23],结果如图 5a 所示。该测线附近与其平行的二维测线 d1 的地震剖面见图 5b。

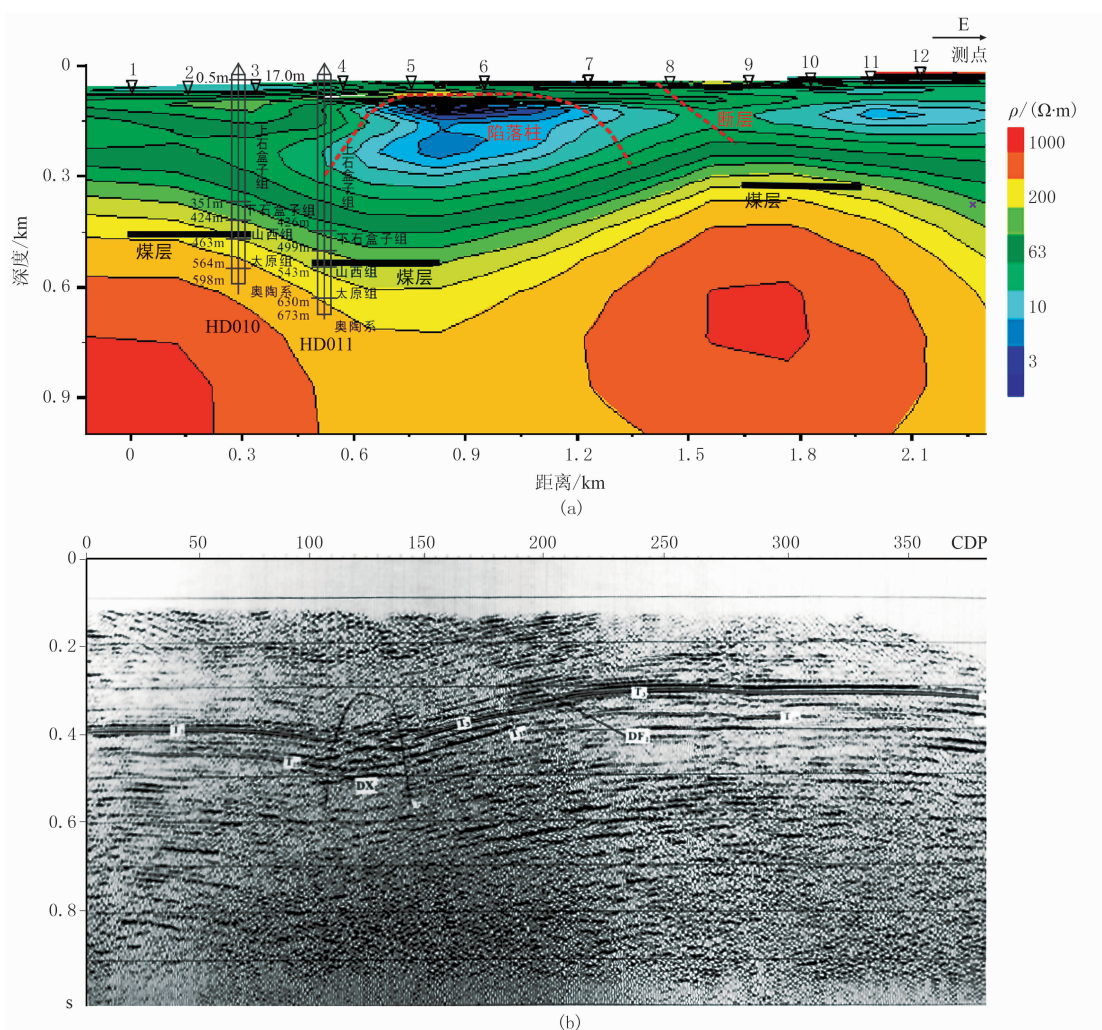


图 5 视电阻率反演结果与地震剖面对比

(a) L01 测线视电阻率反演断面; (b) d1 测线地震剖面

结合煤层气排采井地质资料,400m 以浅为上石盒子组和下石盒子组地层,主要为砂岩泥岩互层,视电阻率反演结果呈明显低阻,并向东逐渐抬升变浅;400~600m 主要为山西组和太原组可采煤层,位于视电阻率逐渐升高部位,呈现明显的向斜特征;

600m 以下为奥陶系石灰岩,呈明显高阻特征,电阻率有逐步升高的趋势。

依据不同地层的电阻率特征,在图 5a 中解释了不同地层(包括上石盒子组、下石盒子组、山西组、太原组和奥陶系)及煤层界面,与该处煤层气排采井柱

状图对应较好。由于高含气量的煤储层显示出高幅值异常特征,且向斜部位为煤层气富集的有利部位,故向斜部位两翼区域为含气量较高的异常区,该部位两个已知排采井的实测煤储层含气量分别达到 $18\text{m}^3/\text{t}$ 和 $17\text{m}^3/\text{t}$,也证实了这一解释。局部地区仍存在低阻异常,主要与局部构造(如陷落柱、断层等)及地层富水性相关。该区构造主要包括横穿测线的固县口隐伏陷落柱(DX₁)和固县河东侧断层(DF₁)。图 5a 测线中部的视电阻率呈明显低阻特征,在二维地震剖面(图 5b)的相同位置同样出现了明显的错动现象,推测可能是陷落柱导致的,但低阻范围明显大于陷落柱实际范围,初步分析可能是陷落柱充水所致,相比而言地震数据可以更准确地确定陷落柱的位置及范围。但对于陷落柱东侧的断层,地震数据错动范围较小,变化微弱,而视电阻率反演结果则存在显著的低阻异常特征,错动明显。相关地质资料表明,该断层为固县河东侧断层,其作为研究区的重要边界,形成断层—水动力封堵型煤层气富集区段,特别在局部的向斜部位形成了煤层气的相对富集区。整体上,反演结果与研究区实际地质、钻井及地震资料吻合较好,通过剖面形式能够更直观、有效地分析断裂构造和高含气量煤储层的分布特征及展布规律,尤其是视电阻率二维反演结果对小断层的识别效果较好。

5.3 煤储层参数定量评估

通过定性分析可以确定超低频电磁探测曲线的异常信息与煤储层物性参数(埋深、厚度及含气量)密切相关,尤其是超低频电磁探测曲线的异常中心深度与煤储层埋深存在一定的对应关系。本文选取沁水盆地胡底煤层气示范区的 8 口排采井,获取相应超低频电磁探测曲线的异常特征参数(异常中心深度、异常范围宽度及异常幅值均值),结合实际钻井资料,通过统计分析超低频电磁探测曲线异常特征指标与煤储层物性参数的相关性,有效实现对煤储层物性参数(煤储层埋深、厚度及含气量)的定量评估。各个排采井 3 号煤储层物性参数及超低频电磁探测曲线异常特征参数如表 1 所示。

根据定量统计分析,异常中心深度与煤储层埋深的相关性最高,达到 0.94,两者具有明显的线性关系,相关系数 R^2 为 0.893,线性回归方程为

$$y = 0.928x + 26.949 \quad (4)$$

煤储层厚度也是影响煤层气富集程度的重要参

表 1 3 号煤储层物性参数及超低频电磁探测曲线异常特征参数

井号	实际埋深 m	实际厚度 m	实测含气量 m^3/t	异常中心深度 m	异常范围宽度 m	异常幅值均值/ nT
1	589.60~594.45	4.85	18.80	588	58	2.41
2	454.55~459.15	4.60	18.40	452	68	2.43
3	531.25~536.36	5.11	17.30	518	74	1.72
4	507.78~512.78	5.00	18.60	526	78	2.40
5	491.58~496.80	5.22	17.38	463	82	2.04
6	485.66~490.40	4.74	18.03	455	65	1.71
7	427.30~432.35	5.05	17.38	420	83	1.72
8	407.67~413.08	5.41	18.00	430	90	2.22

数,但往往由于煤储层较薄而难以定量研究。将超低频电磁探测曲线的异常幅值范围宽度与煤储层实际厚度进行相关分析,相关性达到 0.82,其线性方程为

$$y = 33.098x - 90.656 \quad (5)$$

当煤储层较薄时,超低频电磁探测曲线的异常幅值范围宽度与煤储层厚度实测值之间的线性关系不显著;随着厚度的增加,两者的线性关系逐渐明显,相关系数 R^2 为 0.671。

除了煤储层埋深及厚度外,煤储层含气量被称为评价煤层气富集程度最关键的指标。根据超低频电磁探测曲线异常特征参数与煤储层含气量的相关分析,异常幅值均值与煤储层含气量的相关性最高,达 0.81,其线性回归方程为

$$y = 0.448x + 5.989 \quad (6)$$

但其线性关系并不显著,相关系数 R^2 仅为 0.648。因此,基于异常中心深度、范围宽度和异常幅值均值三个特征参数,采用支持向量机算法构建煤储层含气量的多元评估模型。

本文利用 LibSVM 软件包,基于径向基核函数,采用网格划分法寻找最优参数,构建评估模型。为了定量评价预测精度,分别采用相对误差和绝对误差进行精度评价,其公式分别为

$$\Delta = |V - V_{\text{gas}}| \quad (7)$$

$$\delta = \Delta / V_{\text{gas}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: V 为预测含气量; V_{gas} 为实测含气量; Δ 为绝对误差; δ 为相对误差。预测结果如表 2 所示。从表 2 可以发现:模型预测的煤储层含气量与实测值基本吻合,预测精度达到 87.33%;在验证样本中,

预测值与实测值最大绝对误差为 $0.31\text{m}^3/\text{t}$, 平均误差为 $0.17\text{m}^3/\text{t}$, 最大相对误差仅 1.72% , 整体评估效果良好, 可以满足煤层气富集区煤储层含气量的定量评估要求。由于已知含气量的排采井较少, 而且分布相对集中, 虽然在小样本数据下, 支持向量机获得了较好的评估结果, 但该模型的普适性还有待进一步验证。

表 2 含气量预测结果及误差

井号	V m^3/t	V_{gas} m^3/t	Δ m^3/t	δ (%)
1	18.85	18.80	0.05	0.25
2	18.54	18.40	0.14	0.75
3	17.60	17.30	0.30	1.72
4	18.29	18.60	0.31	1.67
5	17.49	17.38	0.11	0.65
6	17.76	18.03	0.27	1.49
7	17.26	17.38	0.12	0.67
8	18.03	18.00	0.03	0.19

6 结论

利用音频及超低频两种低频电磁探测技术, 基于多元数据, 从多角度在煤层气富集区开展应用研究, 主要结论如下。

(1) 基于超低频及音频电磁探测技术, 开展煤层气富集区野外探测方案的设计及数据处理, 针对超低频电磁探测数据综合利用独立成分分析及小波变换的方法进行噪声去除, 在抑制工频噪声及随机噪声的同时, 较好地保留了细节信息。

(2) 在地质解译方面, 超低频电磁探测数据具有显著优势, 依据不同岩性地层具有不同的电性特征可有效划分标志层界面。

(3) 在断裂等构造解释方面, 基于音频大地电磁探测数据获取的视电阻率二维反演结果, 直观、有效地展示了研究区地层、断裂及高含气量煤储层的分布特征和展布规律, 与地震数据基本吻合, 对小断层识别效果较好, 但对充水的陷落柱范围较难确定。

(4) 在煤储层参数定量评估方面, 通过相关分析发现, 超低频电磁探测曲线异常幅值对应的中心深度、范围宽度及异常幅值均值, 分别与煤储层埋深、厚度及含气量具有较高相关性, 采用支持向量机算法进行含气量的定量评估, 预测精度达到 87.33% 。

基于多元电磁探测数据可以有效实现多角度煤层气富集区应用研究, 但是由于构建模型的实测数

据较少, 煤储层含气量的定量评价还不够完善, 仍有较多参数值得开展研究。后续将增加排采井数量, 并在不同研究区域验证该模型的普适性, 进一步优化模型参数, 提高预测精度。

参 考 文 献

- [1] 李琼, 何建军, 曹均. 沁水盆地和顺地区煤层气储层物性特征. 石油地球物理勘探, 2013, 48(5): 734-739.
Li Qiong, He Jianjun, Cao Jun. Physical characteristics of coalbed methane reservoir in Heshun Area of Qinshui Basin. OGP, 2013, 48(5): 734-739.
- [2] 常锁亮, 刘大锰, 王明寿. 煤层气勘探开发中地震勘探技术的作用及应用方法探讨. 中国煤层气, 2008(2): 23-27.
Chang Suoliang, Liu Dameng, Wang Mingshou. Study on the effect and application methods of seismic technique in CBM exploration and exploitation. China Coalbed Methane, 2008(2): 23-27.
- [3] 冯小英, 秦凤启, 焦勇等. 沁水盆地煤层气地震储层预测技术方法研究. 中国煤层气, 2011(6): 8-12.
Feng Xiaoying, Qin Fengqi, Jiao Yong et al. Study of seismic method for forecasting of CBM reservoir in Qinshui basin. China Coalbed Methane, 2011(6): 8-12.
- [4] 张松扬. 煤层气地球物理测井技术现状及发展趋势. 测井技术, 2009, 33(1): 9-15.
Zhang Songyang. Actualities and progresses of coalbed methane geophysical logging technologies. Well Logging Technology, 2009, 33(1): 9-15.
- [5] 顾军, 高德利, 杨昌龙. 大地电磁测深法探测地下油气资源的解释模型. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(1): 56-61.
Gu Jun, Gao Deli, Yang Changlong. Interpretative model of underground oil and gas resources based on magnetotelluric sounding method. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2006, 30(1): 56-61.
- [6] 魏冬, 王宏语. 地球物理技术在煤层气勘探中的应用. 洁净煤技术, 2011, 17(5): 52-55.
Wei Dong, Wang Hongyu. Application of geophysical technique on coal bed methane exploration. Clean Coal Technology, 2011, 17(5): 52-55.
- [7] 任岐山, 朱亮宝. 煤层气地球物理勘探技术方法. 科技信息, 2014, 31(2): 235-236.
Ren Qishan, Zhu Liangbao. Geophysical technique of coal bed methane exploration. Science and Technology Information, 2014, 31(2): 235-236.
- [8] 王绪本, 陈进超, 郭全仕等. 沁水盆地北部煤层气富集区 CSAMT 勘探试验研究. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4310-4323.
Wang Xuben, Chen Jinchao, Guo Quanshi et al. Research of the CSAMT exploration mode and experiment for the coalbed methane enrichment region in the north Qinshui basin. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4310-4323.

- [9] 王恩元,何学秋.煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究.地球物理学报,2000,43(1):131-137.
Wang Enyuan, He Xueqiu. An experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1):131-137.
- [10] 何学秋,薛二龙,聂百胜等.含瓦斯煤岩流变特性研究.辽宁工程技术大学学报,2007,26(2):201-203.
He Xueqiu, Xue Erlong, Nie Baisheng et al. Research on rheology characteristics of coal or rock containing gas. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(2):201-203.
- [11] 薛二龙,何学秋,聂百胜等.煤岩瓦斯电磁辐射耦合理论研究.中国矿业,2005,14(12):71-73.
Xue Erlong, He Xueqiu, Nie Baisheng et al. Research on coupling theory of coal or rock gas and electromagnetic emission. China Mining Magazine, 2005, 14(12):71-73.
- [12] 李建,丁美莲.超低频地质遥感探测装置在瓦斯气探测中的应用.中国煤田地质,2005,17(4):54-56.
Li Jian, Ding Meilian. Application of ULF geological remote sensing device in gas detection. Coal Geology of China, 2005, 17(4):54-56.
- [13] 蒋洪波,秦其明,李百寿.煤层气排采动态的被动式超低频频谱分析.光谱学与光谱分析,2011,31(7):1898-1901.
Jiang Hongbo, Qin Qiming, Li Baishou. Passive SLF spectrum analysis for tracing the mining dynamic of CBM. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(7):1898-1901.
- [14] 王楠,秦其明,陈理等.天然源超低频电磁探测技术在煤储层识别中的应用.煤炭学报,2014,39(1):141-146.
Wang Nan, Qin Qiming, Chen Li et al. Natural source super-low frequency electromagnetic prospecting in the application of coal-bed methane reservoir identification. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1):141-146.
- [15] Wang Nan, Qin Qiming, Chen Li et al. Dynamic monitoring of coalbed methane reservoirs using super-low frequency electromagnetic prospecting. International Journal of Coal Geology, 2014, 127:24-41.
- [16] 祁晓雨,许广春,李志华.天然源大地电磁法在构造勘察中的应用研究.铁道工程学报,2011,28(12):11-14.
Qi Xiaoyu, Xu Guangchun, Li Zhihua. Research on application of natural source audio frequency magnetotellurics in structure exploration. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(12):11-14.
- [17] 马龙,孟军海,付强等.独立分量分析在重磁数据处理中的应用.石油地球物理勘探,2017,52(6):1344-1353.
Ma Long, Meng Junhai, Fu Qiang et al. Application of independent component analysis in gravity and magnetic data processing. OGP, 2017, 52(6):1344-1353.
- [18] 陈文华.音频大地电磁法及其今后的研究方向.石油地球物理勘探,1981,16(3):62-74.
Chen Wenhua. Audio-frequency magnetotelluric method and the direction in future study. OGP, 1981, 16(3):62-74.
- [19] 王玫珠,王勃,孙粉锦等.沁水盆地煤层气富集高产区定量评价.天然气地球科学,2017,28(7):1108-1114.
Wang Meizhu, Wang Bo, Sun Fenjin et al. Quantitative evaluation of CBM enrichment and high yield of Qinshui Basin. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(7):1108-1114.
- [20] 闫文华,陈宗翠,马喜梅等.煤层气地震解释技术应用及效果——以沁水盆地郑庄区块三维为例.石油地球物理勘探,2012,47(增刊1):66-71.
Yan Wenhua, Chen Zongcui, Ma Ximei et al. 3D seismic interpretation of coalbed methane in Zhengzhuang Block, Qinshui Basin. OGP, 2012, 47(S1):66-71.
- [21] 霍丽娜,张建军,郑良合等.多属性断层解释技术在煤层气储层解释中的应用.石油地球物理勘探,2014,49(增刊1):221-227.
Huo Lina, Zhang Jianjun, Zheng Lianghe et al. Fault interpretation with multiple attributes in coalbed methane interpretation. OGP, 2014, 49(S1):221-227.
- [22] 程正璞,胡祥云,李焯等.民丰凹陷大地电磁探测研究.石油地球物理勘探,2016,51(2):391-403.
Cheng Zhengpu, Hu Xiangyun, Li Ye et al. A magnetotelluric survey in Minfeng Sag. OGP, 2016, 51(2):391-403.
- [23] 张宝强,裴建新,王启.基于构造系统函数的大地电磁时间序列模拟方法.石油地球物理勘探,2018,53(2):410-417.
Zhang Baoqiang, Pei Jianxin, Wang Qi. MT time series simulation based on constructed system function. OGP, 2018, 53(2):410-417.

(本文编辑:刘海樱)

作者简介



陈理 工程师,博士,1986年生;2008年获解放军信息工程大学遥感科学与技术专业学士学位;2011年获中国地质大学(武汉)地球探测与信息技术专业硕士学位;2015获北京大学地图学与地理信息系统专业博士学位;现就职于中国国土资源航空物探遥感中心,主要从事地球物理勘探及遥感地质等领域的科研工作。

doi: 103969/jissn.1003-310620180512

引用格式: 魏丹丹,甘甫平,尚坤,等.CBERS-04 星 PAN/MUX 图像几何定位精度评价[J].无线电工程,2018,48(5):401-405.
[WEI Dandan,GAN Fuping,SHANG Kun,et al.Evaluation of Geometric Positional Accuracy of PAN/MUX Image for CBERS-04 Satellite[J].Radio Engineering,2018,48(5):401-405.]

CBERS-04 星 PAN/MUX 图像几何定位精度评价

魏丹丹¹, 甘甫平¹, 尚坤¹, 梁树能¹, 何娇²

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: CBERS-04 星的成功发射, 为国土资源、农业和林业等诸多领域提供服务支持。图像定位精度是衡量遥感影像应用价值的重要指标, 从业务应用角度出发, 通过对 CBERS-04 星全色/多光谱载荷获取的图像进行无控制点的 RPC 处理后, 结合野外实测的 42 个控制点和利用实测控制点生产的 Worldview-2 正射影像为基础底图, 比较控制点坐标值和图像上量算值的偏差, 分别评价 X 和 Y 方向平均误差, 研究不同遥感影像、不同地形地物类别的几何精度。研究发现 5 m 全色与 10 m 多光谱影像范围一致, 单相机多光谱数据各波段间匹配精度高, 5 m 全色影像与 10 m 多光谱影像分别在 X 方向和 Y 方向上的误差对点位误差有较大影响。

关键词: CBERS-04; RPC; 图像配准; 几何精度评价

中图分类号: TP79

文献标志码: A

文章编号: 1003-3106(2018)05-0401-05

Evaluation of Geometric Positional Accuracy of PAN/MUX Image for CBERS-04 Satellite

WEI Dandan¹, GAN Fuping¹, SHANG Kun¹, LIANG Shu neng¹, HE Jiao²

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China;

2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The satellite CBERS-04 can provide service and support for the land and resources survey, agriculture, forestry and many other fields. Image positional accuracy is an important indicator of the remote sensing image applications. In this article, from the view of business application, the CBERS-04 PAN/MUX image is processed using RPC parameters, and then combined with the field measured 42 points and the Worldview-2 orthographic images coming from those points, which are used as the base map. The deviation of the reference image and correction image is calculated, and then the X and Y direction mean error are evaluated respectively. This study can provide the geometric accuracy of different remote sensing images with different terrain features. In this study it's found that the image range of PAN and MUX are consistent, the bands of MUX matches well with each other, the image position error of PAN and MUX in the X and Y directions produce a greater effect on the point position errors, respectively.

Key words: CBERS-04; RPC; image registration; geometric accuracy evaluation

0 引言

近年来由于遥感技术的不断成熟和发展, 通过遥感图像可以获得越来越多的信息^[1]。例如, 通过遥感图像, 可以测制地形图^[2], 为国土资源、农业和林业等领域提供服务^[3]。但由于各种因素, 如平台位置、运动状态变化和地球的曲率等因素造成的误差影响图像的几何定位精度^[4], 造成图像几何质量下降^[5]。因此, 对遥感图像几何定位精度的评价成为遥感领域的重要研究课题之一^[6]。

地面接收单位接收遥感数据后首先对遥感平台、地球传感器的各种参数进行处理和校正, 但仍不能满足用户的需求, 对于处理过的图像还要进行进一步的几何校正和辐射校正; 即使对接收到的遥感图像进行了一系列校正, 但在定位和定量精度方面仍存在一定的误差, 这就需要对误差进行衡量、计算, 这就使得定位精度成为衡量遥感图像应用价值的重要指标之一。因此, 为能够给用户提供更优质

收稿日期: 2017-07-17

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201511078)

的遥感图像,必须研究图像的定位精度^[7]和变形情况^[8]。本文从用户应用角度出发结合在轨测试工作,对图像几何定位精度开展评价。

图像外部几何定位精度是指图像在地理参考坐标系中的绝对位置精度^[9],也指经过系统几何校正后的图像上的地理位置和真实地理位置之间的差异^[10]。图像的内部几何变形包括长度、角度及放射变形等,图像内部几何定位精度的评价包括图像变形的绝对量评价^[11]和整幅图像变形的一致性评价^[12]。

CEBRS-04 星是中巴资源 04 号陆地观测卫星,其上搭载有 5 m 全色(简称 P5)、10 m 空间分辨率多光谱相机(P10)、20 m 多光谱相机和红外多光谱相机,宽视场成像仪 5 个载荷,本文主要针对 5 m 全色相机和 10 m 多光谱相机。

1 图像定位精度评价

根据行业应用要求,本文主要以遥感影像平面制作规范(GB/T 15968—2008)、数字地形图系列和基本要求(GB/T 18315—2001)和基础地理信息数字产品 1:10 000、1:50 000 数字影像图(CH/T 1009—2001)行业标准或规范为参考。

图像基本几何质量评价包括全色多光谱相对配准精度^[13]和图像定位精度方面的评价^[14]。具体来看主要包括:P5 与 P10 影像范围一致性、P5 和 P10 影像间波段匹配精度评价以及无控制点的 RPC 处理图像定位精度评价^[15]。

根据遥感图像像点位移规律^[16-17],通过比较控制点坐标值(基准图幅匹配)和图像上量算值的偏差,分别评价 X 方向和 Y 方向平均误差,研究不同遥感图像、不同地形地物类别的几何精度。地形地物类别选取平地、丘陵和山地 3 种地区^[18]。

采用 5 m 全色影像、已有的实测高精度几何控制点以及 Worldview-2 正射校正影像为基础,选取待校正影像和基础底图上均有的同名明显特征地物点为控制点。对 10 m 多光谱影像进行几何校正。校正单元选取整个单相机影像,控制点均匀分布,根据地形需要,适当确定控制点数量。

将波段匹配像元错位数、影像图 X、Y 方向平均误差、区域定位平均误差等作为评价图像定位精度优劣的指标。

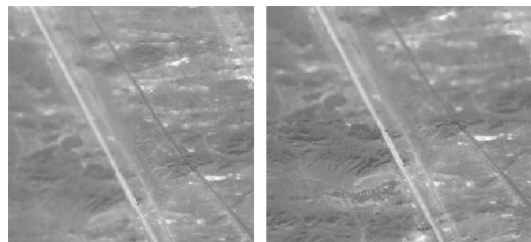
2 测试评价分析

本文选取新疆哈密与云南东川区域作为评价示

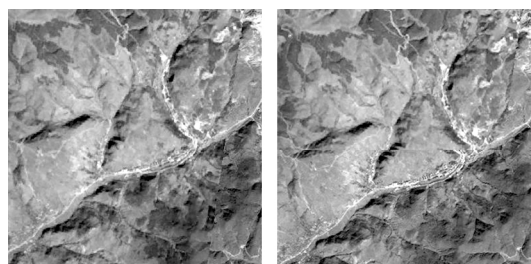
范区,选取该区域 CEBRS-04 星 5 m 全色和 10 m 多光谱影像数据作为评价所用数据,此外还有实测大比例尺几何控制点、0.5 m 分辨率 Worldview-2 正射影像和 Google earth 影像数据作为辅助数据。

2.1 P5 与 P10 影像范围一致性

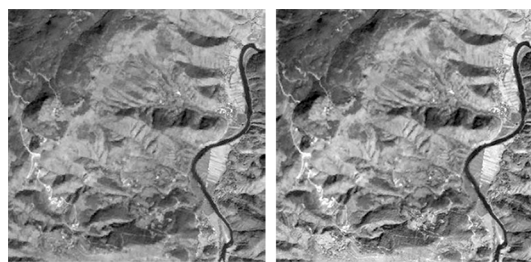
选取新疆哈密、云南东川 PMS 数据,以 P5 影像为基准对 P10 影像进行配准并套合,检查配准后 P5 与 P10 影像的范围一致性。经检查,P5 与 P10 影像的范围基本一致,如图 1 所示。



(a) 新疆哈密 P5 与 P10 影像范围



(b) 云南测试区一 P5 与 P10 影像范围



(c) 云南测试区二 P5 与 P10 影像范围

图 1 测试区影像范围

2.2 P5 和 P10 影像间波段匹配精度评价

从各测试区的影像来看,单相机多光谱数据各波段间匹配精度非常高,不存在波段不匹配情况,进行彩色合成之后不存在错位、重影等现象。

为定量描述 P5 与 P10 影像各波段间配准情况,对测试区部分数据进行了定量分析。针对尾号为 8004 的 P10 多光谱数据,以 P5 数据为基准,对 P5 和 P10 手工选择了 11 个检查点,计算结果表明:所有检查点 X 方向残差平均值为 0.000 623 像元,

Y 方向残差平均值为 0.003 387 像元,平面方向残差平均值为 0.007 707 像元。在采用一次多项式计算模型下,P5 和 P10 检查点 RMS 为 0.766 816 像元,在二次多项式计算模型下,P5 和 P10 检查点 RMS 为 0.015 735 像元,波段匹配性非常好。波段匹配精度目视检查如图 2 所示。

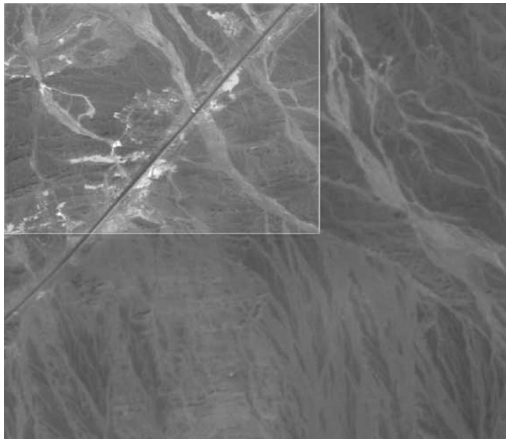


图 2 新疆哈密测试区 P5、P10 波段匹配精度检查结果

云南测试区一的 P10 多光谱数据中,以 P5 和 P10 为例,对 P5 和 P10 手工选择了 9 个检查点,计算结果表明:所有检查点 X 方向残差平均值为 0.005 005 像元,Y 方向残差平均值为 0.000 03 像元,平面方向残差平均值为 0.005 像元。P5 和 P10 检查点 RMS 为 0.378 像元,波段匹配性非常好。波段匹配精度目视检查如图 3 所示。



图 3 云南测试区一 P5 与 P10 波段匹配精度目视结果

云南测试区二的 P10 多光谱数据中,以 P5 和 P10 为例,对 P5 和 P10 手工选择了 8 个检查点,计算结果表明:所有检查点 X 方向残差平均值为 0.000 24 像元,Y 方向残差平均值为 0.004 58 像元,平

面方向残差平均值为 0.004 507 像元,P5 和 P10 检查点 RMS 为 0.288 像元,波段匹配性非常好。波段匹配精度目视检查如图 4 所示。

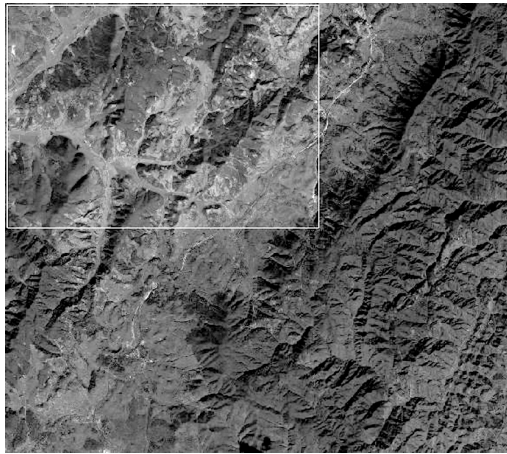


图 4 云南测试区二 P5 与 P10 波段匹配精度目视结果

新疆哈密测试区 P5 与 P10 波段匹配精度检查表如图 5 所示,云南测试区一 P5 与 P10 波段匹配精度检查表如图 6 所示,云南测试区二 P5 与 P10 波段匹配精度检查表如图 7 所示。

Image to Image GCP List										
File Options										
#	Base X	Base Y	Warp X	Warp Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS	
#1+	2683.25	1656.25	1413.50	817.25	1413.5006817.2494	-0.0000	-0.0006	0.0006		
#2+	11857.25	11655.00	6002.00	5814.75	6002.0005814.75260	0.0002	0.0028	0.0028		
#3+	7933.00	2621.00	4039.00	1303.25	4038.9991303.2541	-0.0001	0.0041	0.0041		
#4+	3577.00	6255.00	1861.50	3118.48	1861.5003118.4870	0.0003	0.0029	0.0029		
#5+	10822.00	2093.00	5483.50	1038.98	5483.4991038.9856	-0.0001	0.0013	0.0013		
#6+	5097.00	11838.00	2620.50	5910.48	2620.5005910.4840	0.0001	0.0008	0.0009		
#7+	9404.00	13177.00	4774.50	6577.98	4774.5006577.9870	0.0005	-0.0168	0.0168		
#8+	9370.00	10509.00	4757.50	5244.98	4757.4995245.0266	-0.0015	0.0417	0.0417		
#9+	9315.00	7707.00	4730.00	3844.98	4730.0033844.9793	0.0037	-0.0048	0.0061		
#10+	12234.00	9088.00	6190.00	4532.49	6189.9994532.4776	-0.0007	-0.0076	0.0076		
#11+	7876.00	7712.00	4010.50	3847.98	4010.49763847.9601	-0.0024	-0.0238	0.0239		
Goto On/Off Delete Update Hide List										

图 5 新疆哈密测试区 P5 与 P10 波段匹配精度检查表

Image to Image GCP List										
File Options										
#	Base X	Base Y	Warp X	Warp Y	Predict X	Predict Y	Error X	Error Y	RMS	
#1+	5591.00	9952.17	1876.95	4966.95	1876.8864966.7281	-0.0636	-0.2213	0.2302		
#2+	10420.75	12023.00	5296.95	6001.00	5296.8386000.9621	-0.1111	-0.0373	0.1172		
#3+	11049.00	13332.00	5811.00	6655.00	5810.9266655.1066	-0.0735	0.1066	0.1295		
#4+	4523.00	8509.83	2347.95	4245.95	2347.92814245.7036	-0.0213	-0.2464	0.2473		
#5+	5475.00	6550.92	2823.90	3266.98	2823.9893266.5016	0.0993	-0.4782	0.4865		
#6+	10478.00	13298.00	5325.00	6638.45	5325.4216638.1884	0.4214	-0.2616	0.4960		
#7+	4495.00	3099.00	2333.91	1541.91	2334.01061541.2203	0.1000	-0.6897	0.6969		
#8+	11181.08	8622.00	5676.91	4301.00	5677.13844301.0979	0.2284	0.0979	0.2485		
#9+	12454.17	6558.00	6314.00	3269.00	6313.79913269.4282	-0.2009	0.4282	0.4730		
#10+	4475.86	11628.00	2324.00	5804.00	2324.31055804.2585	0.3103	0.2585	0.4039		
#11+	3254.89	8027.00	1714.00	4004.25	1713.8464004.4941	-0.1540	0.2447	0.2891		
#12+	7424.56	2047.56	3799.00	1015.13	3798.94151015.5071	-0.0581	0.3777	0.3822		
#13+	5906.89	7545.00	3040.01	3763.76	3039.92813763.3244	-0.0813	-0.4356	0.4432		
#14+	11123.00	6868.00	5648.00	3424.00	5648.16063424.4786	0.1600	0.4788	0.5048		
#15+	6136.00	1729.00	3154.63	856.13	3154.6086856.3619	-0.0214	0.2319	0.2329		
#16+	2467.89	5273.89	1320.63	2628.13	1320.34852628.4533	-0.2815	0.3233	0.4286		
#17+	3153.00	9585.00	1662.88	4782.88	1662.88114783.2504	0.0011	0.3704	0.3704		
#18+	10231.88	12023.00	5202.88	6001.13	5202.4016000.9856	-0.4790	-0.1441	0.5002		
#19+	3673.00	2176.88	1922.75	1080.13	1922.98621080.3679	0.2362	0.2379	0.3352		
#20+	11140.88	2748.00	5657.25	1366.00	5657.24911365.3584	-0.0009	-0.6416	0.6416		
Goto On/Off Delete Update Hide List										

图 6 云南测试区一 P5 与 P10 波段匹配精度检查表

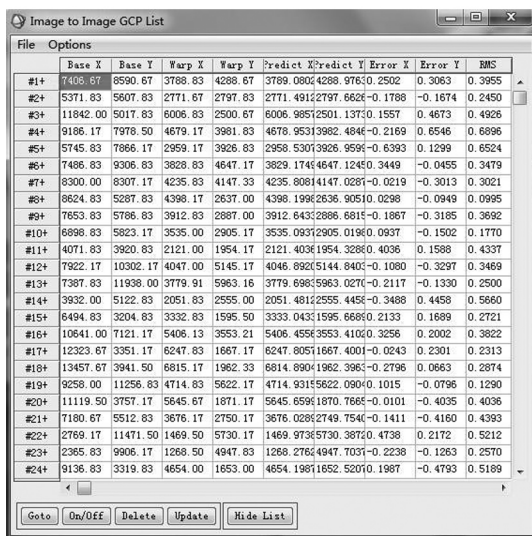


图7 云南测试区二 P5 与 P10 波段匹配精度检查表

2.3 无控制点的 RPC 处理图像定位分析评价

主要是利用新疆哈密试验场示范区黑山口幅系统几何校正后的 2 级产品 P5 全色和 P10 多光谱影像数据,并以野外实测的 42 个控制点和利用实测控制点生产的 Worldview-2 正射影像为基础底图,进行 CBERS-04 卫星 P5 全色和 P10 多光谱影像数据的几何精度初步评价。具体的几何比对如表 1 所示。

表 1 影像坐标与实测几何标志点坐标对比 (s)

序号	控制点 编号	P5 全色影像坐标差值		P10 多光谱影像坐标差值	
		纬度	经度	纬度	经度
1	HM03	-0.48	-4.14	1.12	1.58
2	HM07	-0.74	-3.63	-1.68	1.50
3	HM09	-0.61	-3.24	1.48	1.72
4	HM16	-0.51	-4.39	1.57	1.79
5	HM17	-0.38	-4.38	1.56	0.91
6	HM18	-0.70	-4.44	1.55	1.31

经查询相关资料,在新疆哈密试验场示范区范围内(42°10′~42°20′ N、94°45′~95°00′ E),纬度 1″≈30.8 m,经度 1″≈23.05 m,把表 1 中的单位转换为 m 并取绝对值后,如表 2 所示。

由表 1 和表 2 可看出,CBERS-04 星同名点影像坐标与野外实测坐标相比较:

表 2 影像坐标与实测几何标志点坐标对比 (m)

序号	控制点 编号	P5 全色影像坐标差值			P10 多光谱影像坐标差值		
		纬度	经度	点位 误差 D	纬度	经度	点位 误差 D
1	HM03	14.78	95.43	96.57	34.50	36.42	50.17
2	HM07	22.79	83.67	86.72	51.74	34.58	62.23
3	HM09	18.79	74.68	77.01	45.58	39.65	60.41
4	HM16	15.71	101.19	102.4	48.36	41.26	63.57
5	HM17	11.70	100.96	101.64	48.05	20.98	52.43
6	HM18	21.56	102.34	104.59	47.74	30.20	56.49
7	平均 误差	17.56	93.05	94.82	28.13	33.85	57.55

① P5 全色影像在纬度方向上相差 0.038″~0.74″,约 11.7~22.79 m,平均约 17.56 m;在经度方向上相差 324″~444″,约 74.68~102.34 m,平均约 93.05 m;点位误差 77.01~104.59 m,平均为 94.82 m,如图 8 所示。

② P10 多光谱影像在纬度方向上相差 1.12″~1.68″,约 34.5~54.74 m,平均约 28.13 m;在经度方向上相差在 0.91″~1.79″,约 20.98~41.26 m,平均约 33.85 m;点位误差在 50.17~63.57 m,平均为 57.55 m,如图 9 所示。

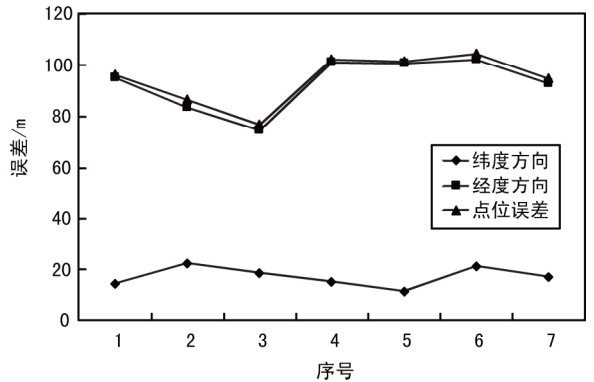


图 8 P5 全色影像几何精度评价

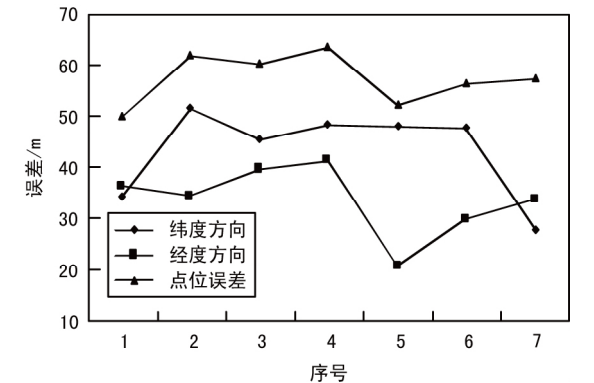


图 9 P10 多波段影像几何精度评价

从图 8 和图 9 可以看出,对 P5 全色影像,其经度方向上的误差对整体的点位误差影响较大;对 P10 多光谱影像,其纬度方向上的误差对整体的点位误差影响较大。

24 结果分析

在对 CBERS-04 星 5 m 全色和 10 m 多光谱影像进行无控制点的 RPC 校正之后,结合已有的野外实测控制点位置和由其校正后得到的 Worldview-2 正射影像,进行全色和多光谱影像数据几何定位精度评价,得到以下结论:① P5 与 P10 影像范围一致;② 从各测试区的影像来看,单相机多光谱数据各波段间匹配精度非常高,不存在波段不匹配情况,进行彩色合成之后不存在错位、重影等现象;③ 无控制点的 RPC 处理影像坐标与实测几何标志点坐标对比发现 P5 影像经度方向上的误差对整体点位误差影响较大,P10 影像纬度方向上的误差对整体的点位误差影响较大。

3 结束语

遥感图像在基础测绘、土地资源调查等应用方面对地面定位、定量精度有较高的要求。本文从全色多光谱相对配准精度、图像定位精度方面展开评价,将波段匹配像元错位数、影像图 X、Y 方向平均误差、区域定位平均误差等作为评价图像定位精度优劣的指标,开展了 CBERS-04 星 5 m 全色与 10 m 多光谱影像范围一致性、影像间波段匹配精度和无控制点的 RPC 处理图像定位精度评价。5 m 全色与 10 m 多光谱影像范围一致性较好,10 m 多光谱数据的波段之间匹配精度高;在图像定位精度上,5 m 全色影像经度方向的误差对整体点位误差影响较大,10 m 多光谱影像的整体点位误差主要来源于纬度方向上的偏移。

随着遥感卫星的广泛应用,对卫星的几何定位精度将是更大的挑战。这意味着不仅对卫星平台、飞行姿态、成像模式的控制程度和稳定性提出了更高的要求,而且需要更加精确的影像像元与地面点位的转换模型和地面参考点测量。

参考文献

- [1] 张增祥,汪潇,温庆可,等.土地资源遥感应用研究进展[J].遥感学报,2016,20(5):1243-1258.
- [2] 夏朝旭,何政伟,于欢,等.面向对象的土地覆被变化检测研究[J].遥感技术与应用,2014,29(1):106-113.
- [3] 潘德炉,何贤强.海洋水色水温遥感应用科学与技术

[M].北京:海洋出版社,2014.

- [4] 陈艺虹.遥感图像几何定位精度评价方法研究[D].南京:南京理工大学,2013.
- [5] 宋伟,朱岱寅,李勇.机载聚束 SAR 图像定位精度研究[J].数据采集与处理,2014,29(4):555-561.
- [6] 明洋,陈楚江,余绍淮,等.多条带 WorldView 卫星图像几何定位精度分析[J].测绘科学,2013,38(1):160-162.
- [7] 李宗华,王新洲,彭明军,等.高分辨率卫星遥感影像在土地利用变更调查中的应用[J].测绘信息与工程,2005,30(4):13-16.
- [8] 白焕成.高分辨率卫星遥感影像在基础测绘中的应用探讨[J].测绘科学与工程,2008,28(2):15-18.
- [9] 陈正超.中国 DMC 小卫星在轨测试技术研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2005.
- [10] 王春媛.遥感图像几何校正及目标识别技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [11] 章学静.像素级图像增强及配准算法研究[D].北京:北京理工大学,2014.
- [12] 李晖,肖鹏峰,冯学智,等.结合光谱和尺度特征的高分辨率图像边缘检测算法[J].红外与毫米波学报,2012,31(5):469-474.
- [13] 朱琳.地理国情普查中遥感影像处理方法的研究[D].西安:西安科技大学,2015.
- [14] 陈亚妮.遥感图像质量评价方法与软件设计[D].杭州:浙江大学,2017.
- [15] 薛万勋.基于边缘特征的遥感图像质量评价方法研究[D].北京:中国科学院大学,2016.
- [16] 张继贤,张永红,林宗坚.SPOT 影像像点位移的研究[J].测绘科学,2000,25(1):19-22.
- [17] 舒嘉,张林海.航摄像片像点位移的精度分析[J].测绘与空间地理信息,2008,31(3):155-156.
- [18] 战鹰,史良树,王金强,等.卫星侧视成像引起的像点位移误差计算方法[J].河南理工大学学报(自然科学版),2015,34(3):370-373.

作者简介



魏丹丹 女,(1985—),毕业于北京师范大学资源学院土地资源管理专业(资源环境遥感方向),博士,高级工程师。主要研究方向:遥感数据仿真与应用评价、高光谱遥感应用等。

甘甫平 男,(1971—),博士,研究员。主要研究方向:遥感地质应用。

尚坤 女,(1986—),博士,高级工程师。主要研究方向:卫星遥感地质应用与高光谱遥感应用。

梁树能 男,(1983—),硕士,高级工程师。主要研究方向:遥感地质应用。

何娇 女,(1991—),硕士。主要研究方向:遥感地质应用。

doi: 10.11720/wtyht.2018.1122

姜作喜, 张虹, 屈进红, 等. 基于交叉点不符值统计的航空重力测量质量评估方法[J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 616–623. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1122>

Jiang Z X, Zhang H, Qu J H, et al. A quality evaluation method of airborne gravity survey based on statistics of discrepancies between measurements at intersection points[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(3): 616–623. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1122>

基于交叉点不符值统计的航空重力 测量质量评估方法

姜作喜^{1,2}, 张虹³, 屈进红^{1,2}, 王志博¹, 王鑫¹, 王蓬^{1,2}

(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 国土资源部 航空地球物理与遥感地质重点实验室, 北京 100083; 3. 北京信息科技大学 经济管理学院, 北京 100192)

摘 要: 介绍了一种航空重力测量质量评估方法, 即通过统计一个架次飞行的测线与全区所有切割线交叉点空间重力异常不符值均方差得到架次/测线精度指标, 以实现每架次测量质量进行量化评估的目的。利用该方法对 3 个 GT-1/2A 航空重力测区原始数据按架次进行了计算和统计, 得出了架次/测线精度指标统计分布规律, 为航空重力测量质量控制提供了新的方法和参考指标。

关键词: 航空重力; 交叉点; 不符值; 均方差; 质量控制

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)03-0616-08

0 引言

航空重力测量由于技术复杂, 测量过程有较多的不确定性^[1], 因此野外数据测量质量量化评价与控制较困难。如果航空重力测区内地面重力测量工作充分, 有较高质量的地面重力数据, 利用航空重力架次测量数据与地面数据进行比对^[2-4], 可以达到检验、控制航空重力测量数据质量的目的。但在实际工作中, 航空重力测量主要用于在地面工作程度不高的海陆交互区或者沙漠戈壁区域进行普查, 导致测区内高质量的重力数据资料缺失或不易搜集。

在 GT-1/2A 航空重力测量中, 重复线或基线测量^[2]一般用来评价航空重力仪动态测量的重复性和一致性, 也可用于对某条测线进行质量检查, 但对于大面积测量、测线较多的情况, 考虑到成本及效率, 无法对每条测线进行重复检查。对于一个架次或每条测线的测量质量, 目前通常根据架次漂移、飞行高度、偏航、GPS 数据质量、超量程点数等指标, 结合以往经验进行判断, 缺少量化评估方法。航空磁

测中四阶差分方法^[5-6]可以识别测线中的尖峰型、阶跃型等高频假值, 评价测线质量, 实现对每条测线的质量控制, 但由于航空重力测量结果是经过滤波的半波长达数千米的低频信号^[7-9], 无法借鉴四阶差分法对航空重力测线数据进行质量评估与控制。

参考加拿大 Sander 公司质量控制方法^[10]和航空磁测总精度评价方法^[5], 笔者提出了基于交叉点误差统计的航空重力架次/测线质量评价方法, 即统计一个架次内所有测线与均匀横切(例如间隔 10 km 或 5 km)所有测线的切割线交叉点处观测值不符值^[11]均方差, 架次所有交叉点不符值均方差为架次测量精度, 每条测线上交叉点不符值均方差为该测线测量精度; 利用每条切割线的交叉点不符值的平均值对切割线数据进行水平调整(消除不同架次间仪器测量水平差异), 然后重新进行交叉点不符值均方差统计, 分别计算得到水平调整后的架次/测线精度指标。笔者开发了实用化的架次/测线精度计算软件, 对 3 个 GT-1/2A 航空重力测区原始数据进行了计算和统计, 得出了 3 个测区的架次/测线精度指标分布规律, 为今后同类型航空重力测量质量评价提供了参考。

收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2017-09-28

基金项目: 国家重点研发计划项目“航空重力测量技术装备研制”第 6 课题“航重勘查系统设计集成与试验”(2017YFC0601706)

作者简介: 姜作喜(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事航空重力数据采集及相关研究工作。

1 架次/测线精度计算方法

1.1 原始测量精度

根据投影坐标计算测线与切割线交叉点位置,交叉点通常不与测点重合,可以采取线性插值的方式计算交叉点位置上测线及切割线上对应的空间重力异常值^[12-13],进而计算得到交叉点处测线与切割线空间重力异常不符值。参考有关文献算法^[2,5],采用均方误差公式

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{2 \times M \times N} \sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^N \delta_{ji}^2 \right)} \quad (1)$$

计算架次测量精度。式中: δ_{ji} 为该架次第 j 条测线上第 i 个与切割线交叉点空间重力异常不符值, $j=1,2,\dots,M,i=1,2,\dots,N$; M 为测线总数, N 为一条测线与切割线交叉点总数。由于测线长度可能不同,每条测线的 N 值不一定相同。

架次内第 j 条测线原始测量精度采用公式

$$\sigma_j = \pm \sqrt{\frac{1}{2 \times N} \sum_{i=1}^N \delta_{ji}^2} \quad (2)$$

计算。式中: δ_{ji} 为第 j 条线上第 i 个与切割线交叉点空间重力异常不符值, $i=1,2,\dots,N$; N 为第 j 条线与切割线交叉点总数。

1.2 切割线水平调整后测量精度

不同架次飞行时,由于仪器状态及飞行条件不同,如飞行高度、测量点位等存在差异,造成仪器测量值存在水平差异^[2,14-16]。在一个架次飞行期间,由于飞行状态、仪器状态基本一致,测线间水平差异较小。全区切割线数据采集通常分多个架次完成,且架次时间间隔可能较长,所以全区切割线与每个架次测线间通常会存在水平差异。因此为了准确衡量测量质量,利用每个架次内的测线数据对全区切割线场值进行水平调整,即求每条切割线上与该架次内各测线所有交叉点空间重力异常不符值的平均值,作为该切割线的水平调整量,切割线空间重力异常扣除水平调整量后得到水平调整后的切割线空间重力异常,之后再利用测线数据和水平调整后的全区切割线数据代入式(1)、式(2)分别计算水平调整后的该架次/测线测量精度。第 j 条切割线水平调整量计算公式为:

$$\bar{\delta}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_{ji}, \quad (3)$$

式中: δ_{ji} 为第 j 条切割线上第 i 个与测线交叉点空间重力异常不符值, $i=1,2,\dots,N$; N 为第 j 条切割线与测线交叉点总数。切割线水平调整计算公式为:

$$g'_j = g_j - \bar{\delta}_j. \quad (4)$$

式中: g_j 为第 j 条切割线原始空间重力异常, $\bar{\delta}_j$ 为式(3)计算得到的第 j 条切割线水平调整量, g'_j 为第 j 条切割线水平调整后的空间重力异常。

2 软件实现

基于 Windows 系统利用 Visual Studio C++ 软件开发环境开发了架次/测线测量精度计算软件。首先从测量数据库中选取需要统计的架次测线和全部切割线的坐标和场值信息输出到文本文件,计算程序读入文本文件,提取测线和切割线的投影坐标信息和空间重力异常值,之后使用搜索算法计算交叉点位置^[17]。通过两步法计算交叉点位置,首先利用切割线和测线两个端点位置和平均点距计算粗略交叉位置,然后在粗略交叉点位置附近搜索得到精确的交叉点位置。利用线性插值算法得到交叉点位置的空间重力异常值^[12-13],计算公式为:

$$g_x = g_0 + (g_1 - g_0) \times (P_x - P_0) / (P_1 - P_0), \quad (5)$$

式中: g_x 为测线/切割线交叉点位置空间重力异常值, P_x 为测线/切割线交叉点位置坐标, P_0, P_1 为测线/切割线上离交叉点位置最近的两个测点的坐标, g_0, g_1 为测线/切割线上离交叉点位置最近的两个测点的空间重力异常值。

计算测线、切割线交叉点位置上空间重力异常差值,即为交叉点位置空间重力异常不符值,代入式(1)~(4)求取架次/测线原始精度及切割线水平调整后精度,将计算结果输出到报告文件。软件计算流程如图1所示。

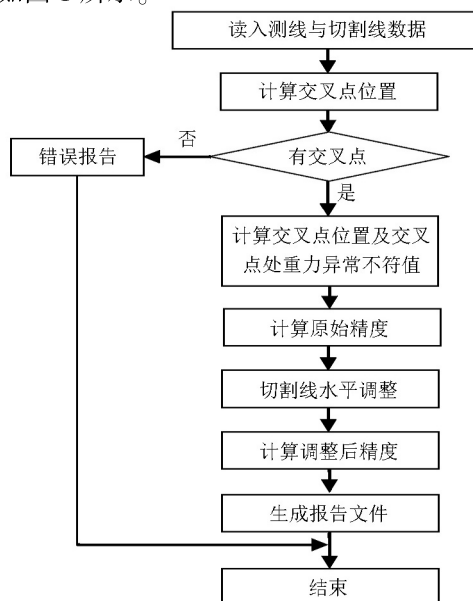


图1 架次/测线精度计算流程

3 实例计算

3.1 3 个测区数据计算与统计

使用前文提出的计算方法及架次/测线精度计算软件对 3 个 GT-1/2A 航空重力测区架次数据进行计算和统计,3 个测区编号为 A1、A2、A3,其中 A1 为近海海域测区,A2、A3 为以平缓地形为主的内陆测区。3 个测区设计飞行地速均为 220 km/h,空间重力异常解算使用的滤波窗口为 100 s(空间分辨率半波长约 3 km)。交叉点高度阈值设置为 50 m^[1],即高度差大于 50 m 的交叉点不参与计算。参与统计的架次至少包含 2 条测线,如果某架次只含 1 条测线,则归入时间临近的架次计算,尽量减小测线间水平差异。

A1 测区使用 GT-1A(SN09)航空重力仪进行测量,飞行平台为 CESSNA 208 型水陆两用固定翼飞机,距离海面高度 400 m 平飞;切割线共 28 条,间距

10 km,测线间距 1 km,共飞行 132 个测线架次,完成 344 条测线。测线与切割线交叉点最大高度差为 36.0 m,交叉点原始异常最大不符值为 8.26 mGal,切割线水平调整后统计的交叉点异常最大不符值为 3.97 mGal。按架次进行精度指标统计,每个架次交叉点数不少于 15 个,架次原始精度最大值 2.16 mGal,不超过 1.4 mGal 架次数占比约为 91.7%;水平调整后架次精度均不超过 0.9 mGal,最大值 0.82 mGal,不超过 0.8 mGal 的架次数占比约为 99.3%,不超过 0.6 mGal 架次数占比约为 87.9%。架次原始测量精度及切割线水平调整后统计的架次精度对比如图 2 所示,精度值分布统计如图 3 所示。

A1 测区每条测线与切割线交叉点数不少于 5 个,测线原始精度最大值 2.5 mGal,不超过 1.4 mGal 测线数占比约为 90.1%;水平调整后统计的测线精度最大值 1.42 mGal,不超过 0.8 mGal 测线数占比约为 97.7%。344 条测线原始精度及切割线水平调整后统计精度如图 4 所示,精度值分布如图 5。

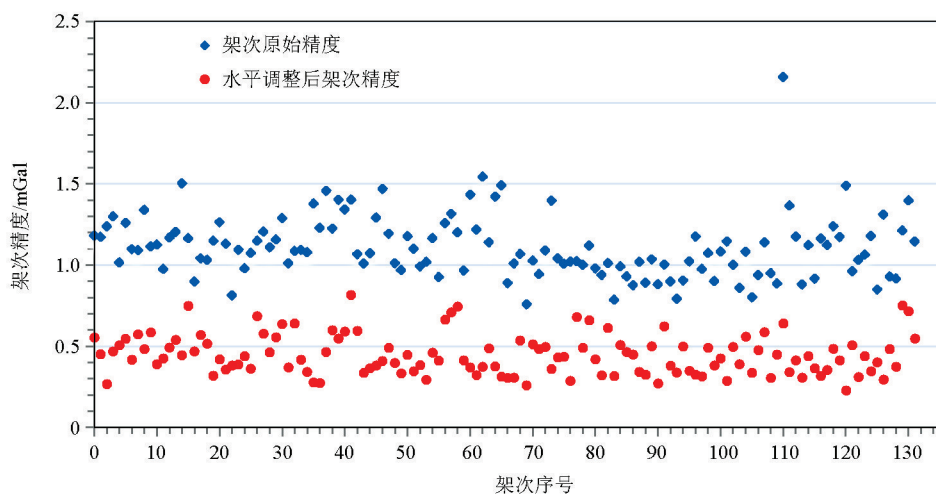


图 2 A1 测区架次原始精度、切割线水平调整后架次精度对比

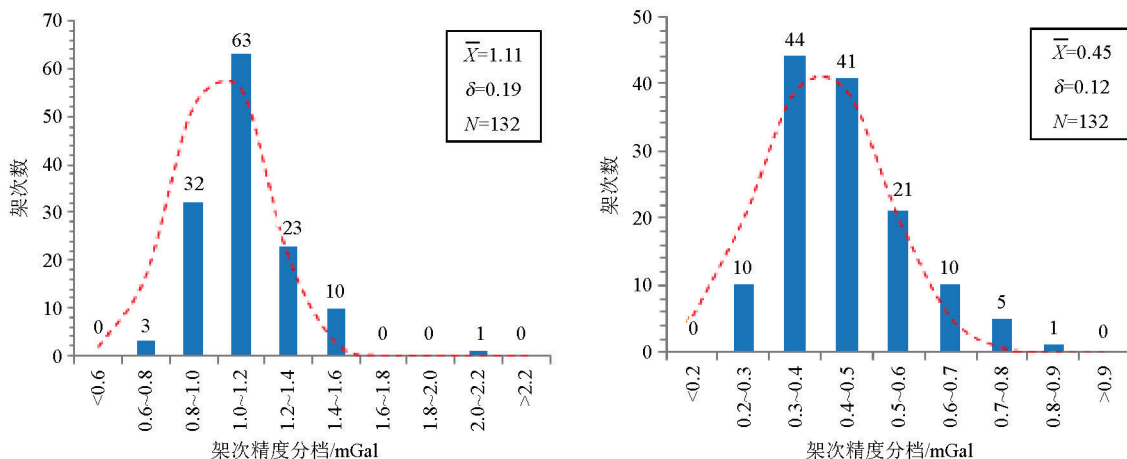


图 3 A1 测区架次原始精度(左)、切割线水平调整后架次精度(右)分布

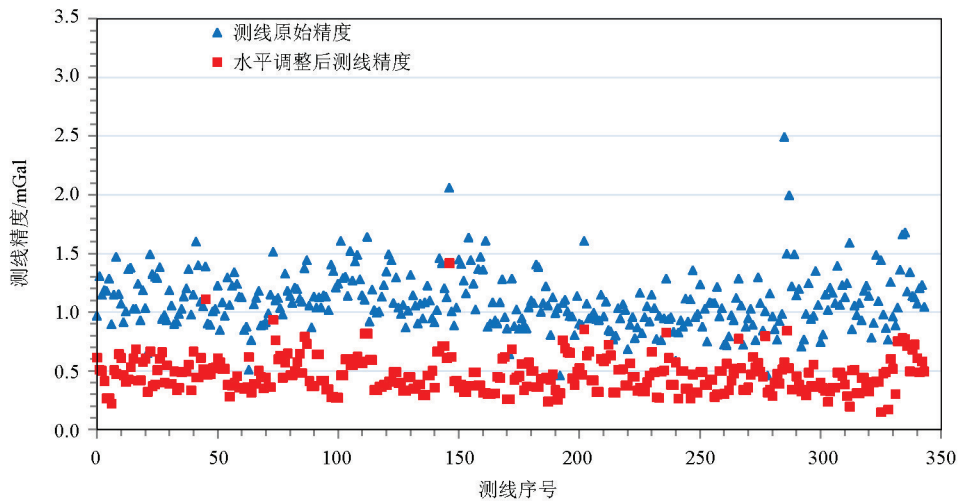


图4 A1测区测线原始精度、切割线水平调整后统计精度对比

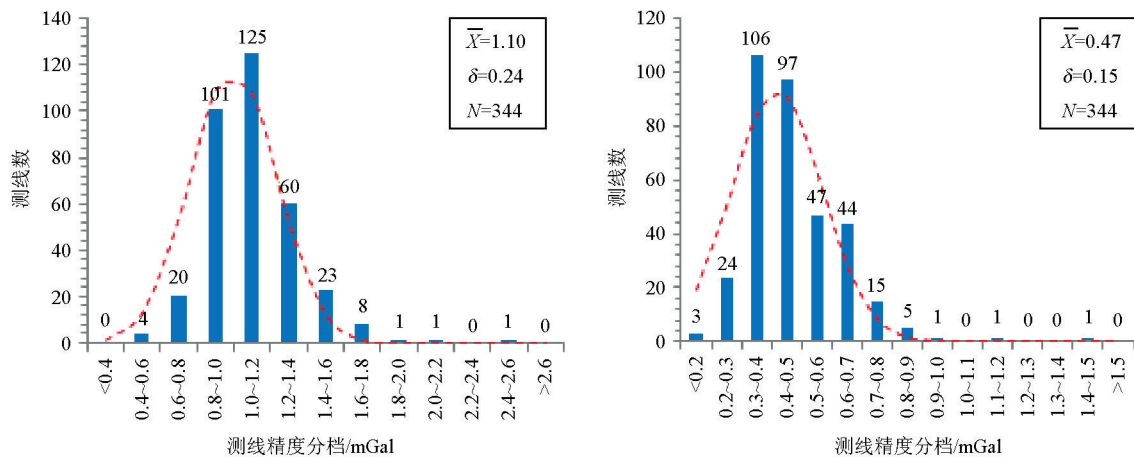


图5 A1测区测线原始精度(左)、切割线水平调整后测线精度(右)分布

A2测区使用GT-2A(SN015)航空重力仪进行航空重力测量,飞行平台为CESSNA 208B型固定翼飞机,测区内地形平缓,以平飞为主,离地高度约400~600 m,个别测线采取缓起伏方式飞行;切割线共69条,间距5 km,方向为EW向,共完成了121个测线飞行架次,测线共计458条,线距1 km,测线方向为SN向。测线与切割线交叉点高差不超过49.9 m,原始交叉点异常最大不符值为8.73 mGal,水平调

整后交叉点异常最大不符值为5.63 mGal。经统计,架次交叉点数不少于29个,架次原始精度最大为3.0 mGal,不超过2.0 mGal架次数占比约为92.6%;切割线水平调整后统计的架次精度均不超过1.0 mGal,最大值0.94 mGal,不超过0.8 mGal架次数占比约为98.3%。A2测区架次原始测量精度分布如表1,切割线水平调整后架次精度统计分布如表2。

表1 A2测区架次原始精度统计分布

统计区间 mGal	<0.8	0.8 1.0	1.0 1.2	1.2 1.4	1.4 1.6	1.6 1.8	1.8 2.0	2.0 2.2	2.2 2.4	2.4 2.6	2.6 2.8	2.8 3.0	3.0 3.2	>3.2	总计
架次频率	0	26	36	19	16	8	7	2	1	3	2	0	1	0	121
占比/%	0	21.5	29.8	15.7	13.2	6.6	5.8	1.7	0.8	2.5	1.7	0	0.8	0	100

表2 A2测区切割线水平调整后架次精度统计分布

统计区间 mGal	<0.2	0.2 0.3	0.3 0.4	0.4 0.5	0.5 0.6	0.6 0.7	0.7 0.8	0.8 0.9	0.9 1.0	>1.0	总计
架次频率	0	5	14	38	30	20	12	1	1	0	121
占比/%	0	4.1	11.6	31.4	24.8	16.5	9.9	0.8	0.8	0	100

A2 测区每条测线与切割线交叉点数不少于 9 个,测线原始精度最大值 3.21 mGal,不超过 2.0 mGal 测线数占比约为 91.7%;切割线水平调整后统计的

测线精度最大值 1.43 mGal,不超过 0.8 mGal 测线数占比为 92.6%。458 条测线原始精度统计分布如表 3,切割线水平调整后统计的测线精度分布如表 4。

表 3 A2 测区测线原始精度统计分布

统计区间 mGal	<0.6	0.6 0.8	0.8 1.0	1.0 1.2	1.2 1.4	1.4 1.6	1.6 1.8	1.8 2.0	2.0 2.2	2.2 2.4	2.4 2.6	2.6 2.8	2.8 3.0	3.0 3.2	3.2 3.4	>3.4	总计
测线频率	0	16	95	125	77	44	34	29	12	6	6	7	4	2	1	0	458
占比/%	0	3.5	20.7	27.3	16.8	9.6	7.4	6.3	2.6	1.3	1.3	1.5	0.9	0.4	0.2	0	100

表 4 A2 测区切割线水平调整后测线精度统计分布

统计区间 mGal	<0.2	0.2 0.3	0.3 0.4	0.4 0.5	0.5 0.6	0.6 0.7	0.7 0.8	0.8 0.9	0.9 1.0	1.0 1.1	1.1 1.2	1.2 1.3	1.3 1.4	1.4 1.5	>1.5	总计
测线频率	0	17	77	113	113	75	29	23	7	2	1	0	0	1	0	458
占比/%	0	3.7	16.8	24.7	24.7	16.4	6.3	5.0	1.5	0.4	0.2	0	0	0.2	0	100

A3 测区测量仪器为 GT-2A(SN013)航空重力仪,飞行平台为 CESSNA 208B 型固定翼飞机,测区内以平原地形为主,西北部为山区,平原地区和山区采用不同高度平飞,平原地区平均离地高度 400~600 m,山区离地高度 400~1 500 m;切割线共 24 条,间距 10 km,切割线方向为东西向;共完成了 75 个测线飞行架次,共计 581 条测线,测线间距 0.5 km,测线方向为南北向。经统计,所有交叉点高度差均不

超过 48.7 m,每个架次交叉点数不少于 17 个,原始交叉点异常最大不符值为 6.50 mGal,水平调整后交叉点异常最大不符值为 4.69 mGal。架次原始精度最大值 1.7 mGal,不超过 1.4 mGal 架次数占比约为 94.7%;水平调整后架次精度最大值 0.83 mGal,不超过 0.8 mGal 架次数占比约为 98.7%。A3 测区架次原始精度统计分布如表 5,切割线水平调整后架次精度统计如表 6。

表 5 A3 测区架次原始精度统计分布

统计区间 mGal	<0.6	0.6 0.8	0.8 1.0	1.0 1.2	1.2 1.4	1.4 1.6	1.6 1.8	>1.8	总计
架次频率	0	13	24	17	17	3	1	0	75
占比/%	0	17.3	32.0	22.7	22.7	4.0	1.3	0	100

表 6 A3 测区切割线水平调整后架次精度统计分布

统计区间 mGal	<0.2	0.2 0.3	0.3 0.4	0.4 0.5	0.5 0.6	0.6 0.7	0.7 0.8	0.8 0.9	>0.9	总计
架次频率	2	4	11	27	11	14	5	1	0	75
占比/%	2.7	5.3	14.7	36.0	14.7	18.7	6.7	1.3	0	100

A3 测区的每条测线与切割线交叉点数不少于 5 个,测线原始精度最大为 2.33 mGal,精度不超过 1.6 mGal 测线数占比约为 93.8%;水平调整后测线

精度最大值 1.32 mGal,不超过 0.8 mGal 测线数占比约为 91.2%。581 条测线原始精度统计分布如表 7,切割线水平调整后统计的测线精度分布如表 8。

表 7 A3 测区测线原始精度统计分布

统计区间 mGal	<0.4	0.4 0.6	0.6 0.8	0.8 1.0	1.0 1.2	1.2 1.4	1.4 1.6	1.6 1.8	1.8 2.0	2.0 2.2	2.2 2.4	>2.4	总计
测线频率	4	39	115	148	115	78	46	26	6	2	2	0	581
占比/%	0.7	6.7	19.8	25.5	19.8	13.4	7.9	4.5	1.0	0.3	0.3	0	100

表 8 A3 测区切割线水平调整后测线精度统计分布

统计区间 mGal	<0.2	0.2 0.3	0.3 0.4	0.4 0.5	0.5 0.6	0.6 0.7	0.7 0.8	0.8 0.9	0.9 1.0	1.0 1.1	1.1 1.2	1.2 1.3	1.3 1.4	>1.4	总计
测线频率	14	59	115	135	92	64	51	21	10	11	5	3	1	0	581
占比/%	2.4	10.2	19.8	23.2	15.8	11.0	8.8	3.6	1.7	1.9	0.9	0.5	0.2	0	100

综合统计 3 个测区的数据分析结果,每个测区统计的架次数不少于 75 架次,每个架次统计交叉点数不少于 15 个,每个测区测线不少于 340 条,每条测线统计交叉点数不少于 5 个;3 个测区统计的原始交叉点空间异常不符值不超过 9.0 mGal,切割线水平调整后不超过 6.0 mGal;原始架次精度不超过 3.0 mGal,切割线水平调整后统计的架次精度不超过 1.0 mGal,原始测线精度不超过 3.5 mGal,切割线水平调整后统计的测线精度不超过 1.5 mGal。3 个测区统计的架次/测线原始精度最大值离散程度较

大,水平调整后统计结果最大值趋近一致,切割线水平调整后统计的精度指标更具有参考意义,可以作为判别架次/测线质量是否合格的参考指标之一。

所统计的 3 个测区涵盖了海洋和陆地两种地形条件,统计样本量大,统计结果能够体现测量数据的质量分布情况,基本反映了 GT-1/2A 航空重力仪在固定翼平台、大面积平飞测量条件下所应达到的架次/测线精度水平。3 个测区的统计情况汇总如表 9 所列。

表 9 3 个测区精度指标统计汇总

测区编号	测区地域	测量仪器	飞行平台	测线方向	飞行速度 km/h	滤波窗口 s	架次数	测线条数	切割线条数	切割线间距 km	测线间距 km	交叉点最大高差 m	交叉点异常最大不符值 mGal	水平调整后交叉点异常最大不符值 mGal	架次原始最大精度 mGal	架次水平调整后最大精度 mGal	测线原始最大精度 mGal	测线水平调整后最大精度 mGal
A1	海域	GT-1A (SN09)	CESSNA208	SN	220	100	132	344	28	10	1	36.0	8.26	3.97	2.16	0.82	2.50	1.42
A2	陆地	GT-2A (SN015)	CESSNA208B	SN	220	100	121	458	69	5	1	49.9	8.73	5.63	3.00	0.94	3.21	1.43
A3	陆地	GT-2A (SN013)	CESSNA208B	SN	220	100	75	581	24	10	0.5	48.7	6.50	4.69	1.70	0.83	2.33	1.32

3.2 指标验证实例

选择实际测量中已经通过其他途经验证为不合格的测线,使用架次/测线质量评价方法,按照前文统计的架次/测线精度指标作为评价标准,检验该方法是否可以判别测线质量情况。以 A2 测区中某架次作为验证架次,该架次共飞行了 6 条测线,通过检查 GPS 数据并结合经验判断的方式,分析其中的 5320 线存在较大假异常,判断为质量不合格,在之后的架次中对该线进行了重飞,重飞线各项质量指标均合格,重飞线编号 5321。将 5321 线数据存入 5320 线所在架次,采用前文架次/测线精度计算方

法进行统计。统计的架次原始精度为 1.59 mGal,未超过 3.0 mGal 的限值;水平调整后架次精度为 1.0 mGal,达到了 1.0 mGal 的限值。5320 线原始精度为 3.09 mGal,不超过 3.5 mGal 的参考指标,但该指标是 5321 线相同指标的 2.2 倍,是该架次最小指标的近 3 倍;5320 线水平调整后统计精度为 2.29 mGal,超过了 1.5 mGal 的参考指标。5320 线交叉点异常最大不符值也超过参考指标。该架次各线统计指标如表 10 所列。5320、5321 线空间重力异常及交叉点异常不符值对比如图 6。

表 10 A2 测区某架次测线精度及交叉点异常不符值统计

线号	原始精度/mGal		水平调整后精度/mGal		原始交叉点最大异常不符值/mGal		水平调整后交叉点最大异常不符值/mGal	
	统计值	是否达标 (≤3.5)	统计值	是否达标 (≤1.5)	统计值	是否达标 (≤9.0)	统计值	是否达标 (≤6.0)
5320	3.09	√	2.29	×	10.39	×	7.65	×
5321	1.43	√	0.66	√	3.25	√	2.35	√
5470	1.40	√	0.67	√	4.01	√	1.66	√
5471	1.29	√	0.67	√	4.01	√	2.09	√
5480	1.18	√	0.72	√	4.24	√	2.30	√
5500	1.11	√	0.65	√	3.66	√	1.92	√
5510	1.54	√	0.88	√	6.49	√	3.27	√

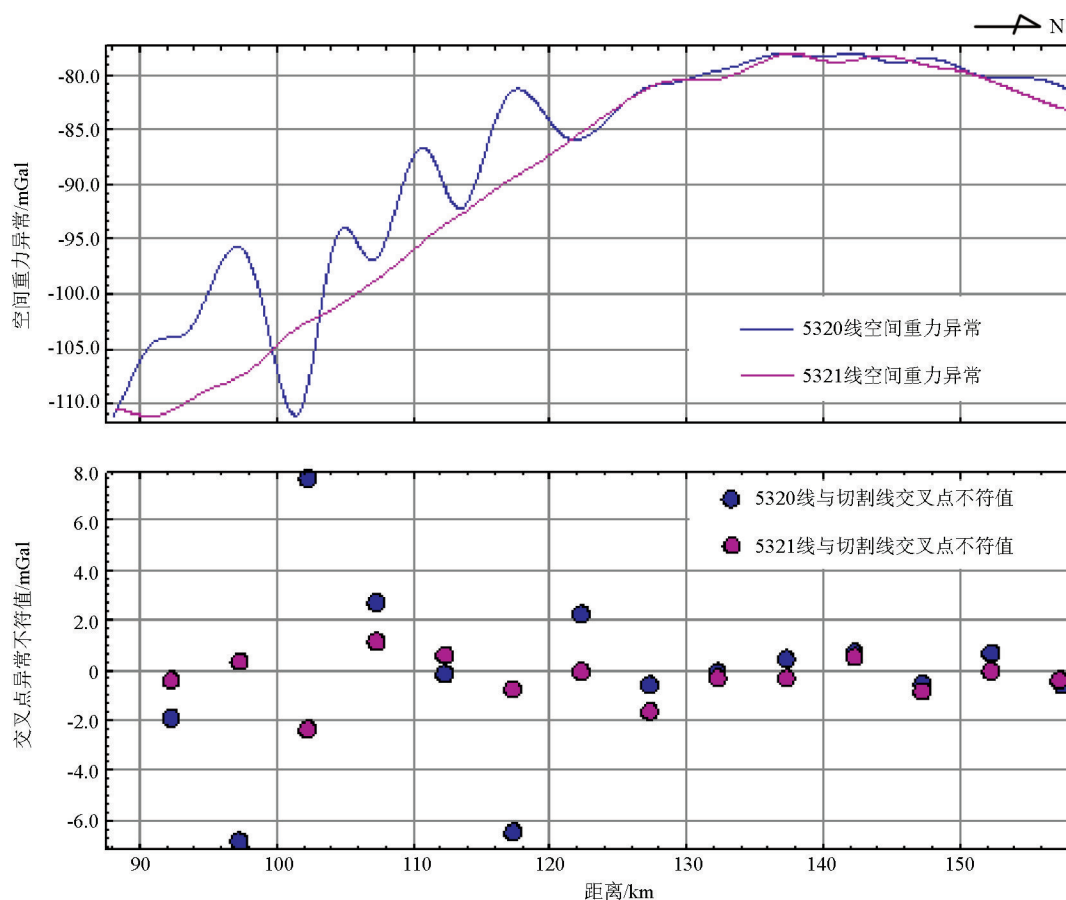


图6 5320、5321线空间重力异常及切割线水平调整后交叉点异常不符值对比

5320线水平调整后测线精度、原始交叉点最大不符值、切割线水平调整后交叉点最大不符值3项指标均超出了参考上限指标,而5321及其他测线各指标均在参考指标范围内;图6中5320线南侧半线(约30 km)与切割线交叉点不符值有3个超过6.0 mGal,而北侧半线交叉点不符值基本与5321线相当,说明5320线南侧半线质量不合格,导致该线统计指标超限。

以往通过测量参数结合经验判断的方式进行质量控制存在较大的不确定因素,而且需要具备丰富的野外数据处理经验,而笔者提出的基于交叉点不符值误差统计的架次/测线质量评价方法是基于直接对重力异常数据的统计、量化评价方法,基本排除了人为误判的可能性,具有较好的可操作性,可以通过逐条测线、逐个交叉点具体量化分析,更客观地评价测线数据质量,是一种比较可靠的质量评价与控制手段。

4 结论

1) 利用架次/测线精度评价方法对3个固定翼飞行平台、大面积平飞条件下的GT-1/2A航空重力

测区数据进行了统计与分析,统计结果显示GT-1/2A航空重力测量架次原始精度应不超过3.0 mGal,切割线场值水平调整后架次精度应不超过1.0 mGal,测线原始精度应不超过3.5 mGal,切割线水平调整后测线精度应不超过1.5 mGal,交叉点异常不符值应不超过9.0 mGal,切割线水平调整后交叉点异常不符值应不超过6.0 mGal。3个测区得到的统计指标接近,基本反映了GT-1/2A航空重力仪在相应测量条件下应达到的质量水平。利用测线数据对切割线空间重力异常进行水平调整后统计的架次/测线精度指标基本消除了不同架次间的水平误差,统计结果更具有参考意义。

2) 文中得出的GT-1/2A航空重力测量架次/测线精度指标统计分布规律是基于3个固定翼飞行平台、大面积平飞测区数据基础上得到的,可以作为同型号航空重力仪、类似测区、相同滤波尺度条件下航空重力测量质量评价与控制的参考指标之一。

3) 如果在航空重力测量中使用交叉点统计的方式进行测线质量控制,应先获取高质量的切割线空间重力异常数据,可以适当加密切割线,如采取5 km间距切割线分布,增加与测线交点数量,从而获取更准确的测线精度指标。

参考文献:

- [1] 申慧群.航空重力测量质量评估要素分析[J].测绘科学与工程,2012,32(1):63-65.
- [2] 郭志宏,熊盛青,周坚鑫,等.航空重力重复线测试数据质量评价方法研究[J].地球物理学报,2008,51(5):1538-1543.
- [3] 孙中苗,翟振和,李迎春.航空重力测量的分辨率和精度分析[J].地球物理学进展,2010,25(3):795-798.
- [4] 翟振和,孙中苗,李迎春,等.航空重力测量在近海区域的精度评估与分析[J].测绘学报,2015,44(1):1-5.
- [5] DZ/T0142-2010 航空磁测技术规范[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [6] 李大明,徐国华.四阶差分法在高精度磁测中的应用[J].物探与化探,1990,14(1):42-46.
- [7] 孙中苗.航空重力测量理论、方法及应用研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2004.
- [8] 孙中苗,夏哲仁,石磐,等.航空重力测量数据的滤波与处理[J].地球物理学进展,2004,19(1):119-124.
- [9] 王静波,熊盛青,周锡华,等.航空重力测量系统研究进展[J].物探与化探,2009,33(4):369-373.
- [10] Sander L, Elieff S. Quality control metrics for airborne gravity data. Sander Geophysics, Ottawa, Canada. <http://sgl.com/technicalpapers/Quality%20Control%20Metrics%20for%20airborne%20gravity%20data.pdf>.
- [11] 李海.航空重力测量测线网平差的理论与方法[D].郑州:中国人民解放军信息工程大学,2002.
- [12] 姜作喜,张虹,郭志宏.航空重力测量内符合精度计算方法[J].物探与化探,2010,34(5):672-676.
- [13] 吕同富,康兆敏,方秀男.数值计算方法[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [14] Green A, Lane R. Estimating noise levels in AEM data[C]// Adelaide: ASEG 16th Geophysical Conference and Exhibition, 2003.
- [15] 骆遥,王林飞,何辉.航空地球物理勘探资料微调平处理[J].物探与化探,2012,36(5):851-855.
- [16] Huang H. Airborne geophysical data leveling based on line-to-line correlations[J]. Geophysics, 2007, 73(3): F83.
- [17] 戢锐,康双双,李川,等.基于 Matlab 的航空重力交叉点搜索[J].工程地球物理学报,2011,8(5):551-555.

A quality evaluation method of airborne gravity survey based on statistics of discrepancies between measurements at intersection points

JIANG Zuo-Xi^{1,2}, ZHANG Hong³, QU Jin-Hong^{1,2}, WANG Zhi-Bo¹, WANG Xin¹, WANG Peng^{1,2}

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Airborne Geophysics and Remote Sensing Geology, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China; 3. Economy and Management College, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: A kind of quality evaluation method in airborne gravity survey is proposed in this paper. The accuracy of the flight and survey line is quantified by calculating the root mean square of discrepancies between measurements at intersection points of survey line and all tie lines. Using this method, data of three survey areas measured by GT-1/2A gravimeter were analyzed, and the statistical distribution of the accuracy of flight and survey lines were obtained. This paper tries to provide a new method and evaluation indexes for quality control procedures in airborne gravity acquisition projects.

Key words: airborne gravity; intersection point; discrepancy; root mean square; quality control

(本文编辑:王萌,叶佩)

doi: 10.11720/wtyht.2018.1259

李芳,王林飞,何辉.基于二维经验模式分解的重力资料多尺度分析[J].物探与化探,2018,42(4):731-737.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1259

Li F, Wang L F, He H. Gravity data multi-scale analysis based on two-dimensional empirical mode decomposition[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 731-737. http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1259

基于二维经验模式分解的重力资料多尺度分析

李芳,王林飞,何辉

(中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘 要: 重力资料是从地表到深部所有密度不均匀体引起的重力效应的叠加。针对不同的工作任务,需要利用不同尺度的重力资料进行研究。二维经验模式分解能够自适应地对非线性、非平稳信号实现多尺度分解。文章研究将二维经验模式分解应用于重力资料的多尺度分析,对重力数据进行二维经验模式分解以得到各级固有模态函数和剩余分量,利用径向对数功率谱分析方法估计各级模态函数所反映的地下场源的近似深度,定性地解释不同深度下的场源产生的异常,较好地揭示场源赋存的地质信息。模型数据和实际数据的测试佐证了该方法技术的可行性。

关键词: 重力资料;二维经验模式分解;多尺度分析;径向对数功率谱

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)04-0731-07

0 引言

重力方法在地球结构及地质构造研究、资源勘探及工程勘察等方面发挥了巨大的作用^[1]。实测重力资料包含了从地表到深部所有密度不均匀体引起的重力效应,信息量十分巨大。因此针对不同的工作任务,需要从重力资料中分离出研究目标所产生的重力异常^[2],比如需要利用实测的重力数据进行某矿区特定地质体的反演解释,则必须首先从总异常中分离出单纯由这个地质体引起的异常,然后利用此异常进行反演解释。对重力资料进行合理的多尺度分析是顺利完成诸如重力场特征分析、断裂构造划分与分析、圈闭岩体、分析矿产有利区域等系列地质任务的保证^[3-4]。

目前,对重力资料进行不同尺度分离的方法很多,比如向上延拓法^[5]、补偿圆滑滤波法^[6]、非线性滤波法^[7]、小波变换法^[8]等。上述方法在处理重力

资料时存在各自的优势及缺陷,一个共性的弊端是几乎所有的处理方法均存在预先处理参数设定的问题,这往往导致处理后的重力数据仍旧存在浅源短波长信息和深源长波长信息的混杂,后续工作无法给出解释工作的可信度。

经验模式分解(empirical mode decomposition, EMD)方法由 Huang 等^[9]于 1998 年提出,被用来处理分析非线性、非平稳信号。它的主要原理概括为,将“复杂”信号分解成若干个从高频到低频排列的固有模态函数(Intrinsic mode function, IMF)和一个剩余分量,从而实现信号不同尺度的分解。已有应用表明该方法不仅具有多分辨率特性、自适应性,且无需任何的先验参数。自方法提出以来,已被广泛应用于计算机图像分析、数据去噪、边缘检测等众多领域^[10-14]。近年来,EMD 方法也被应用到地球物理数据的处理中,取得了较好的应用效果^[15-20]。本研究尝试将二维经验模式分解应用于重力资料的多尺度分析。

收稿日期: 2017-06-12;修回日期: 2017-07-25

基金项目: 国家重点研发计划项目“综合航空地球物理数据处理、解释和管理软件平台研发”(2017YFC0602204);中国国土资源航空物探遥感中心“海南岛及周边航空物探数据库建设”(DD2016014104)

作者简介: 李芳(1990-),女,硕士,于 2015 年 7 月毕业于中国地质大学(北京)地球探测与信息技术专业,现任职于中国国土资源航空物探遥感中心,主要从事地球物理软件研发工作。

1 方法原理

EMD 方法的本质是依据不同的时间尺度特征将原始信号分解为一系列不同尺度的本征模态函数信号,该方法假设任何复杂的信号均由简单的固有模态函数组成,而对于模态函数的形式无特殊要求,即每个模态可以是线性平稳的,也可以是非线性非平稳的。方法的核心原理与小波分解类似,但是小波变换需要人为划定特征时间尺度,而 EMD 方法则能够自适应地依据信号本身的特性设定特征时间尺度。

基于 EMD 算法的多尺度分离计算步骤如下:假设存在一维信号 $x(t)$,利用极值搜索算法找出其极大值、极小值;基于搜索出的极值点,利用插值算法

求取原始信号的上下包络线 $\text{Max}(t)$ 及 $\text{Min}(t)$;计算 $\text{Max}(t)$ 与 $\text{Min}(t)$ 的均值信号 $\text{Mean}(t)$;从原始信号 $x(t)$ 中减去均值信号 $\text{Mean}(t)$ 得到新的信号 $x'(t)$;根据迭代终止条件进行判断,若满足则 $x'(t)$ 作为第一层级的 IMF,此后将 $x(t)$ 与 $x'(t)$ 的差值函数作为新的输入信号进行迭代过程,得到一系列的 IMF。常见的迭代终止条件有两种,一种是使得分解过程中两个相邻分解结果的标准方差值小于设定阈值作为判断某阶分解结束的条件^[21];另外一个终止条件是使得 $x'(t)$ 满足在整个数据空间极大值与极小值和过零点的数目之多相差一个,同时信号 $x'(t)$ 的均值为零。上述的分解过程见示意图 1,最终的信号可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i(t) + \text{Res}(t)。 \quad (1)$$

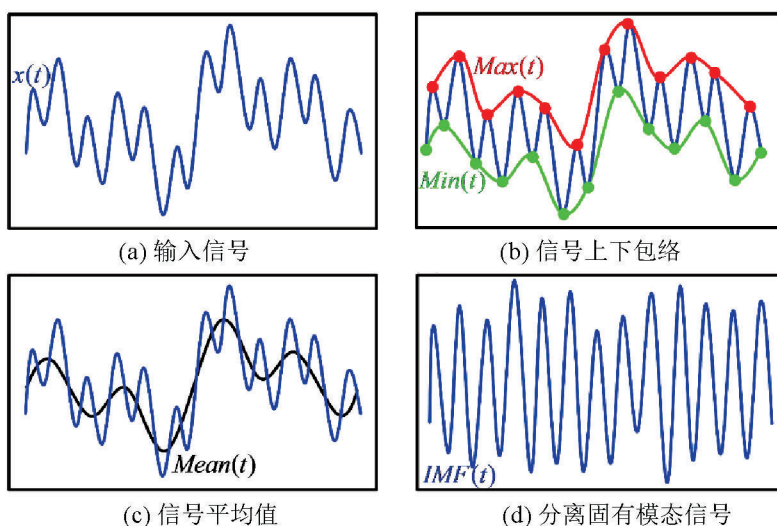


图 1 经验模式分解示意图

对于二维数据,上述分解过程类似,需要做的是将一维 EMD 方法中对于“线”的筛分拓展为对于“面”的筛分,最终得到若干二维固有模态函数和一个剩余分量,二维信号 $S(x,y)$ 可最终表示为:

$$S(x,y) = \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i(x,y) + \text{Res}(x,y), \quad (2)$$

其中: $\text{IMF}_i(x,y)$ 表示第 i 个二维固有模态函数,相应代表了重力数据中相对高频的成分, $\text{Res}(x,y)$ 为多尺度分离之后的剩余场,代表了重力数据中相对低频的成分。

此外,研究中还对上述分解得到的不同尺度重力数据进行了场源深度近似估计,为后续的反演和解释提供重要参考。可以利用各级数据的径向功率对数谱来估计引起该异常的场源对应的深度,从而可以理解特定模式函数所对应的场源地质意义。具

体做法可以概括为,在对数功率谱曲线上,计算拟合频谱中最低波数的斜线,则可以用该直线的斜率来估算场源埋深^[22-23]。经过上述两个过程即可完成重力资料的多尺度分析,给出特定深度场源对应的异常,为后续精细的处理反演解释提供依据。

2 模型试验

建立 3D 密度模型进行方法试验,该模型测区位于方形区域内,数据网度为 200×200 ,点线距均为 100 m。对应的模型剖分空间位于观测区域的垂直正下方。理论模型由两个不同深度层、不同大小和剩余密度值的 8 个长方体组成,图 2a 为该理论模型水平面位置分布。A1, A2 和 A3 为深部模型产生区域异常, B1 ~ B5 为浅部模型产生局部异常。对上述

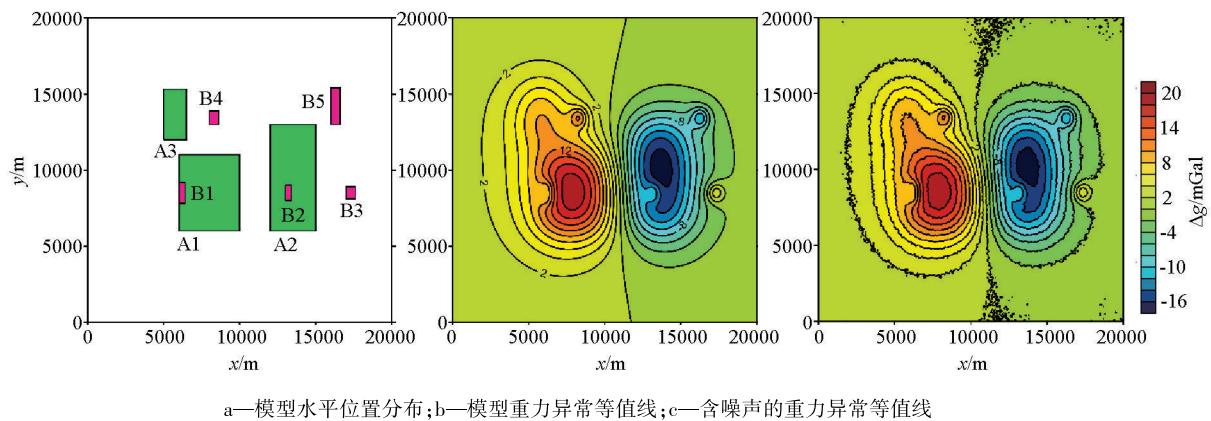


图2 理论模型参数及重力异常

模型进行正演计算,理论重力异常等值线见图 2b,同时对该重力数据引入均值为 0,标准偏差为异常最大值 2% 的高斯随机噪声,加噪异常等值线如图 2c。

对上述加噪重力异常计算径向对数功率谱(图 3),通过分析对数功率谱的形状看出该数据的频率成分主要可以分为 3 个频段,图中彩色线段分别为

3 个频段的功率谱拟合。可以大致概括为:频段 1 的对数功率谱主要对应于模型中 A 层长方体的低频异常信息,频段 2 的对数功率谱主要对应于模型中 B 层长方体的中高频异常信息,而频段 3 的对数功率谱主要对应于模型中所添加随机噪声所产生的高频干扰。则在计算经验模式分解的时候,上述数据可合理地计算为 3 级异常数据。

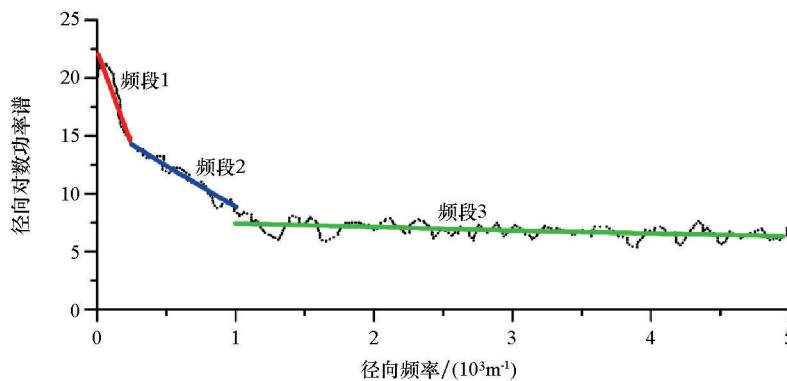


图3 加噪重力异常径向对数功率谱及其分段拟合

基于上述分析对加噪数据进行 EMD 多尺度分离计算,分离产生 2 级 IMF 和 1 个剩余场,见图 4。第 1 级 IMF 对应于频段 3 的高频信息,主要为数据中的噪声,第 1 级 IMF 的剥离产生了类似于去噪的效果;第 2 级 IMF 对应于频段 2 的中频信息,主要为数据中 B 层长方体的产生异常;剩余场为数据中 A 层长方体产生的区域异常。为了验证此次多尺度分离的效果我们将不同层级的 IMF 与理论模型的正演效果进行了对比,看出分离出的局部场数据基本能够反映出浅部场源真实存在的位置及规模,分离出的区域场也很好地体现了深部场源所产生的趋势性异常。在数值上,分离后局部异常数据有些变小,主要由于还存在部分的局部场数据残留在趋势性的异常中,在趋势场异常中体现为数值的变大。这一

点在图 5 所示的 $y=8\,500\text{ m}$ 处截取的剖面对比图中也可以明显看出。总体来说,基于 EMD 算法的重力数据多尺度分离效果较好。

另外,针对所分离不同尺度的重力异常进行了场源深度的近似估算,从图 4 的分解结果重力看出,IMF1 所对应的基本为高频噪声干扰,因此这里的场源深度估算只对 IMF2 及 IMF3 数据进行。图 6 所示分别为 IMF2 和 IMF3 所对应数据的径向对数功率谱曲线及曲线拟合情况。根据拟合得到的波数直线斜率代入计算公式可以估算对应数据的场源近似平均深度。根据图 6 的计算结果,我们得出 IMF2 对应的场源深度大致为 627.5 m , IMF3 对应的场源深度大致为 $2\,672.9\text{ m}$,这与理论模型的实际均深 $6\,000\text{ m}$ 及 $22\,500\text{ m}$ 较为近似。根据估算得到的场源

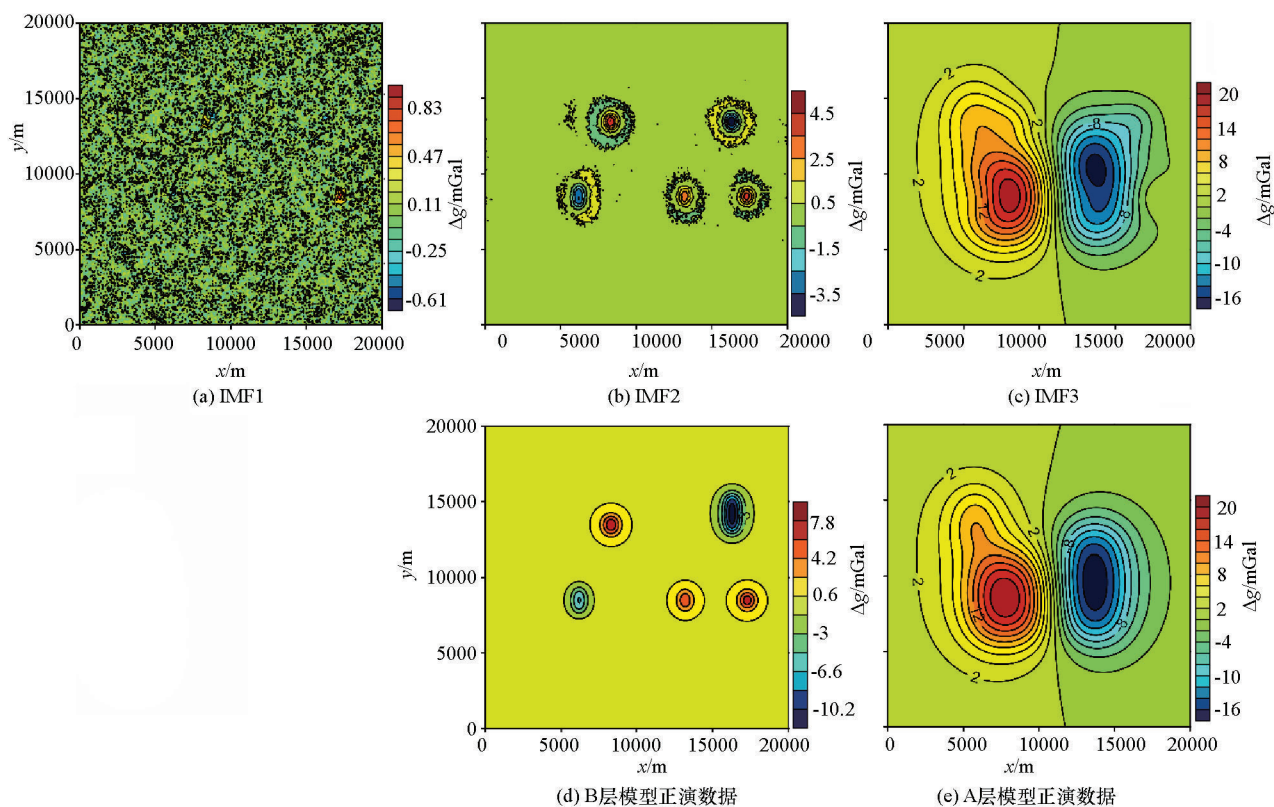


图 4 加噪重力异常 EMD 分解结果及理论正演结果

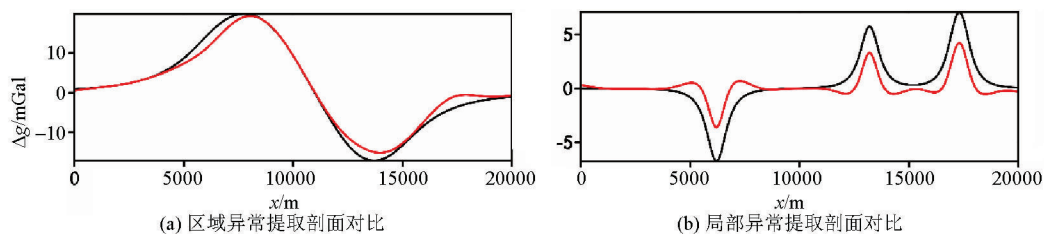
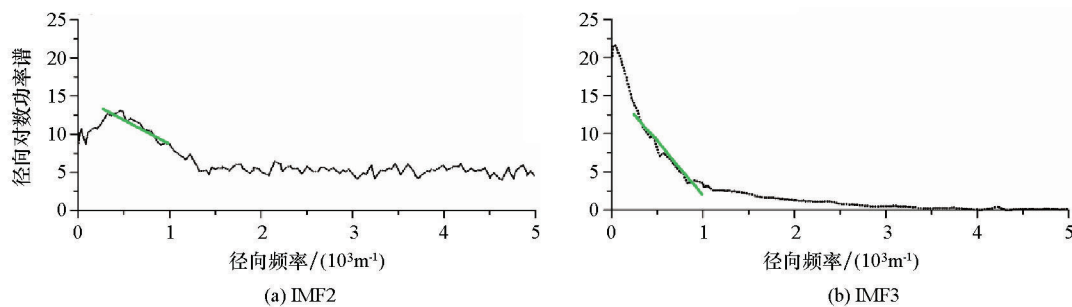
图 5 $y = 8500$ m 剖面的异常分离结果 (红线) 与理论重力异常 (黑线) 对比

图 6 各级固有模式函数的径向对数功率谱曲线

深度可大致判断对应固态模式函数数据的地质意义。

综合上述的模型试验,可以利用二维 EMD 方法对重力数据进行多尺度分解,得到不同层级的异常数据。分解得到的各级模式函数的异常波长与其反

映的场源深度随着分解阶次的增加而增大。再结合功率谱分析方法则可以估算出不同尺度数据的场源大致深度,这有利于后续的精处理反演和地质解释。

3 实际数据处理

将上述基于 EMD 的多尺度分析方法应用于龙门山地区重力异常分析,数据来源于相关文献的矢量化^[24],异常数据等值线如图 7b。研究区布格重

力异常均为负值,异常由 ES-WN 方向逐渐减小,异常幅度变化约在 $-473 \sim 98 \text{ mGal}$ 之间。研究区内龙门山断裂带是一条显著的重力梯度带,近北东走向,梯度带东西两侧重力异常变化逐渐平缓。研究区东侧存在一定区域的局部重力异常高值,推测与莫霍面的隆起有关^[25]。

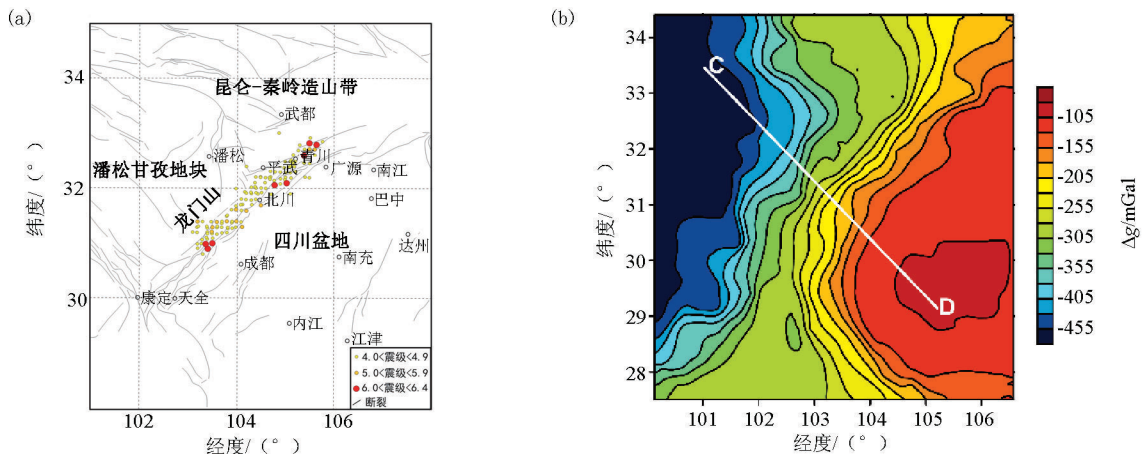


图 7 研究区位置示意^[25](a)与研究区布格重力异常等值线(b)

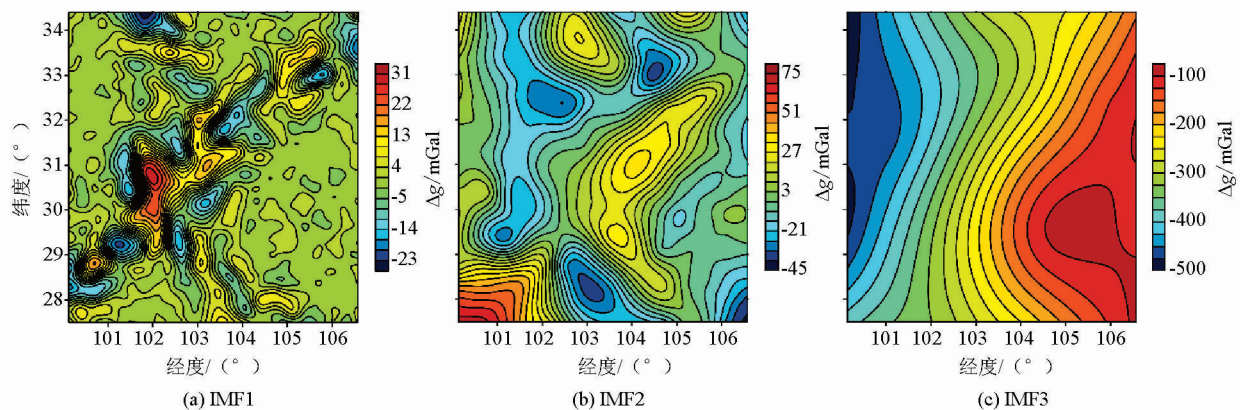


图 8 布格重力异常多尺度分解结果

基于上文理论模型试验结果,笔者将采用 EMD 算法对龙门山地区重力异常进行分离试验,并与已有结果及地质信息进行对比分析。图 8 所示为分离之后的前 3 级异常数据,从分离结果看出 IMF1 对应了原始数据中的高频的局部重力异常,异常呈离散分布,范围相对较小,可能反映了该地区浅部岩体、构造等物性的横向变化。IMF2 对应于原始数据重力的中低频信息,可能对应于相对较深的地层分布的影响,而 IMF3 则对应于更加低频的分量,为该区域重力异常,可能反映了该地区深部地层、基底界面等的起伏变化。

在分离得到的低频区域异常 IMF3 中截取如图 7b 所示的 CD 剖面,剖面异常如图 9a 中绿色曲线,

CD 剖面整体切割龙门山重力梯度带,从 C 到 D 表现出逐渐重力异常增大趋势。图中黑色点状线为已有资料的分离效果及沿 CD 剖面的密度模型^[25],两者吻合较好,从一定角度佐证了基于 EMD 分离效果的可靠性。从密度建模结果看出,在重力梯级带过渡区域出现了明显的地层错位,可能存在后期的地质运动,CD 剖面东南方向的地层构造更加复杂。

另外,图 9 右图为研究区内部分已推断断裂构造与中浅部异常 IMF1 的叠合图^[24]。可以看出大部分推断断裂构造位于异常高低过渡带两侧或者是连接串珠状异常,异常线性构造特征与断裂展布较为一致,也佐证了 EMD 算法的多尺度分离效果。

同时,针对不同尺度的数据进行了场源深度的

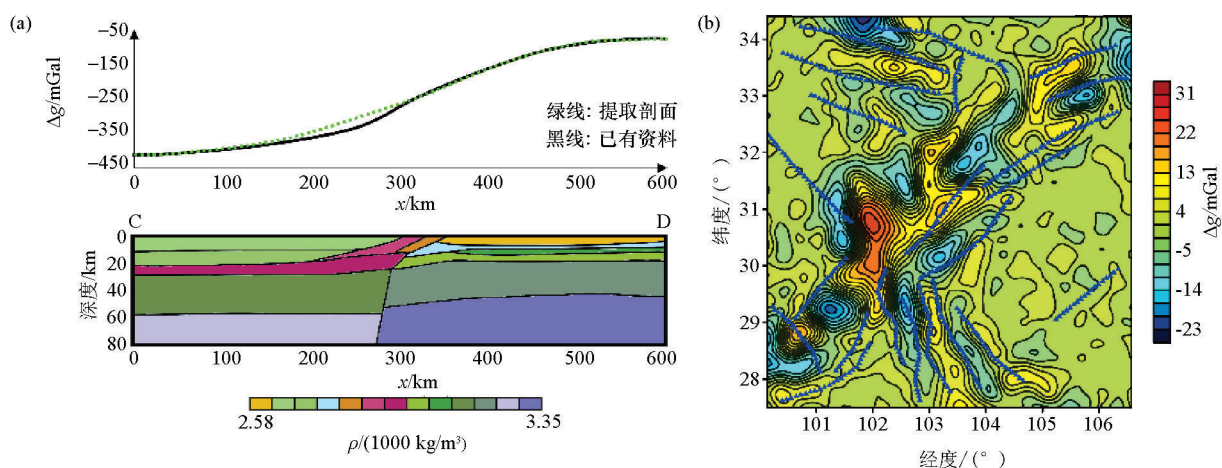


图9 沿CD剖面提取重力异常与已有资料对比(a)与研究区断裂构造与中浅部异常叠合图(b)

近似估计,计算得到 IMF1-3 所对应的深度大致为 4.6 km, 21.4 km 和 43.7 km。不同类型数据所对应场源大致深度的近似给出为后续的处理提供了有力帮助,也能够给出不同尺度重力数据的地质意义。

4 结论

笔者研究利用二维经验模式算法结合径向对数功率谱分析法对重力数据进行了多尺度分析。首先用二维经验模式对重力数据进行不同尺度的分解,分解得到的不同层级的固态模式函数对应了不同频段的重力场信息,可分别对应于高频浅层异常和中低频深部异常。利用径向对数功率谱分析方法估计各级模态函数所反映的地下场源的近似深度,定性地解释了不同深度下的场源产生的异常,较好地揭示了场源赋存的地质信息。建立了理论加噪密度模型进行了算法的测试,分离效果良好。同时将方法技术应用于实际重力资料的处理,分离结果与已有资料对应良好。

参考文献:

- [1] 曾华霖.重力场与重力勘探[M].北京:地质出版社,2005.
- [2] 郭良辉,孟小红,石磊,等.优化滤波方法及其在中国大陆布格重力异常数据处理中的应用[J].地球物理学报,2012, 55(12):4078-4088.
- [3] Wang J, Meng X H, Guo L H, et al. A correlation-based approach for determining the threshold value of singular value decomposition filtering for potential field data denoising [J]. J. Geophys. Eng., 2014, 11(5):055007.
- [4] Wang J, Meng X H, Li F. Improved curvature gravity gradient tensor with principal component analysis and its application in edge detection of gravity data [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 118: 106-114.
- [5] Spector A, Grant F S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data [J]. Geophysics, 1970, 35(2): 293-302.
- [6] 侯重初. 补偿圆滑滤波方法[J]. 石油物探, 1981(2): 22-29.
- [7] Keating P, Pinet N. Use of non-linear filtering for the regional-residual separation of potential field data [J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 73(4): 315-322.
- [8] 侯遵泽,杨文采. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J]. 地球物理学报, 1997, 40(1): 85-95.
- [9] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proc. Roy. Soc. London, 1998, 454: 903-995.
- [10] 张双喜,陈超,王林松,等. 二维经验模式分解及其在位场去噪和分离中的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2855-2962.
- [11] 陈凯. 基于经验模式分解的去噪方法[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(5): 603-608.
- [12] 岳焕印,郭华东. 经验模式分解技术在 SAR 干涉图滤波中的应用[J]. 高技术通讯, 2002, 12(37): 37-40.
- [13] Ghanati R, Fallahsafari M, Hafizi K M. Joint application of a statistical optimization process and empirical mode decomposition to magnetic resonance sounding noise cancelation [J]. Journal of applied geophysics, 2014, 111: 110-120.
- [14] 曾琴琴,刘天佑. 一种基于经验模式分解(EMD)的位场分离方法[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(6): 914-917.
- [15] Hassan H H, Pierce J W. Empirical mode decomposition (EMD) of potential field data; airborne gravity data as an example [C]// 2005 annual meeting, SEG expand abstract, 24, 704-706.
- [16] Cooper S M, Liu T Y, Mbue I N. The empirical mode decomposition (EMD), a new tool for potential field separation [J]. Journal of American science, 2010, 6(7): 183-187.
- [17] He L J, Zhang Y, Zhang Y. Study on application of bidimensional empirical mode decomposition in processing geophysical and geochemical data [J]. Contributions to geology and mineral resources research (in Chinese), 2011, 26(3): 311-315.
- [18] Hou W S, Yang Z J, Zhou Y Z, et al. Extracting magnetic anomalies based on improved BEMD method: a case study in the Pangxi-

- dong area, south China [J]. Computers & Geosciences, 2012, 48: 1–8.
- [19] 周文纳,曾昭发,杜晓娟,等. 基于经验模式分解的重力异常分离[J]. 世界地质, 2010, 29(3): 495–502.
- [20] 易洪春,刘树才,贺克升,等. 基于 EMD 去噪方法研究及其在地质勘探中的应用[J]. 物探与化探, 2013, 37(3): 533–537.
- [21] Chen Q H, Huang N E, Xu Y S, et al. A b-spline approach for empirical mode decompositions [J]. Advances in computational mathematics, 2006, 24: 171–195.
- [22] Spector A, Grant F S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data [J]. Geophysics, 1970, 35(2): 293–302.
- [23] Bhattacharyya B K, Leu L K. Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to two-dimensional structures [J]. Geophysics, 1975, 40(6): 993–1013.
- [24] 石磊,陈石,蒋长胜,等. 基于优化滤波法对芦山地震震区重力异常特征的分析[J]. 地震学报, 2013, 35(5): 704–716.
- [25] Zhang J S, Gao R, Zeng IS, et al. Relationship between characteristics of gravity and magnetic anomalies and the earthquakes in the Longmenshan range and adjacent areas [J]. Tectonophysics, 491 (1/4): 218–229.

Gravity data multi-scale analysis based on two-dimensional empirical mode decomposition

LI Fang, WANG Lin-Fei, HE Hui

(China Aero Geophysics Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Gravity data embody the superimposed effect of all the bodies with uneven densities from the earth surface to the deep sub-surface. And gravity data with different scales are needed for different tasks. The two-dimensional empirical mode decomposition can be adapted to nonlinear or non-stationary signals to achieve the multi-scale decomposition. In this study, the authors applied the two-dimensional empirical mode decomposition to the multi-scale analysis of gravity data. With this method, the gravity data can be decomposed into different intrinsic mode functions and one remaining component. Then, the radial logarithmic power spectrum of various components are computed to get the approximate depth of various sources. Theoretical density model data and real data test support the technical feasibility of the method.

Key words: gravity data; two-dimensional empirical mode decomposition; multi-scale analysis; the radial logarithmic power spectrum

(本文编辑:王萌)