

国家安全地球物理丛书（十二）



# 地球物理与信息感知

刘代志 主编




西安地图出版社

《国家安全地球物理丛书》(十二)

# 地球物理与信息感知

中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会  
陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会

刘代志 主编

 西安地图出版社

©刘代志 2016

图书在版编目(CIP)数据

地球物理与信息感知/刘代志主编. —西安:西安地图出版社, 2016.9

(国家安全地球物理丛书;十二)

ISBN 978-7-5556-0293-4

I. ①地… II. ①刘… III. ①地球物理学—研究  
IV. ①P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 198852 号

著作人及著作方式:刘代志 主编

责任编辑:陈扬眉

书 名 地球物理与信息感知

---

出版发行 西安地图出版社

地址邮编 西安市友谊东路 334 号 710054

印 刷 西安地质矿产研究所印刷厂

规格开本 787mm×1092mm 1/16

印 张 21.25

印 数 200

字 数 540 千字

版 次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5556-0293-4

定 价 60.00 元

---

版权所有 侵权必究

凡购本社图书,如有印装问题,请联系发行部调换。服务热线:029—87604375

## 《国家安全地球物理丛书》(十二) 编委会

主 编：刘代志

副主编：李夕海 徐白山 刘志刚

编 委：(按姓氏笔划为序)

王仕成 龙 凡 刘代志 刘怀山 徐白山

刘志刚 李夕海 张金城 牛 超

## 《国家安全地球物理丛书》编审委员会

顾 问：刘光鼎 (院士) 何继善 (院士) 许绍燮 (院士)

魏奉思 (院士) 万卫星 (院士) 徐文耀 (研究员)

主任委员：刘代志

副主任委员：龙 凡 靳 平 王仕成 刘怀山 张金城

秘 书 长：李夕海

委 员：(按姓氏笔划为序)

于德浩 王仕成 王庆宾 王晓航 龙 凡 边少锋 刘 刚

刘代志 刘光斌 刘怀山 刘志刚 刘 波 孙凤华 孙更文

孙新利 朱培民 杜爱民 李夕海 李天河 李艾华 李学正

李卧东 吴时国 何 彬 余志勇 张玉兔 张全虎 张金生

张金城 陈 洁 查石祥 查亚兵 周坚鑫 高增勇 徐白山

陶 勇 童思友 曾新吾 韩天成 靳 平

# 前 言

国家安全(军事)地球物理学也是一门以观测为基础的应用科学,以重力、磁、电、震等各种物理方法、手段感知地球各圈层中的目标及其物理环境,以解决国防和军事应用中的各种问题。

去年10月下旬,我们在古城西安召开了第十一届国家安全(军事)地球物理学学术研讨会,主题是“国家安全与军事地球物理”,主要研讨地球物理应用前沿中各种方法技术问题。今年将在我国的重工业基地——辽宁省鞍山市召开第十二届国家安全(军事)地球物理学学术研讨会,会议的主题是:地球物理与信息感知。本集所收录的51篇论文,内容主要涉及固体地球物理信息感知与应用、国防工程地球物理信息感知与应用、海洋地球物理信息感知与应用、空间环境地球物理信息感知与应用、遥感地球物理信息感知与应用、军控核查中的地球物理信息感知与应用,以及与国家安全地球物理相关的其他内容。

国家安全(军事)地球物理专业委员会一直得到中国(陕西省)地球物理学会的指导和老一辈地球物理学家们的关爱,火箭军工程大学王耀鹏校长和科研部首长也一直予以大力支持和指导,使我们能持续地、高质量地出版好《国家安全地球物理丛书》。我们将不辱使命、不忘初心,继续推动国家安全(军事)地球物理学科建设向前发展。

值此本辑丛书出版之际,谨向各位首长、专家和同行们表示最诚挚的谢意。

刘代志

2016年7月21日

# 目 录

地震横波探测冒落带和裂隙带特征的研究 .....	潘庆芳 徐白山 梁晓强 刘志龙 陈敬东 (1)
基于重力张量数据的目标体边界识别与增强算法的研究* .....	张 超 王庆宾 吴 亮 黄佳喜 冯进凯 (7)
基于岩石物理建模估算横波速度* .....	林 琦 (14)
基于磁梯度张量的磁异常在线定位方法分析与评估 .....	刘继昊 李夕海 于 帆 (19)
地震事件位置合理性研究 .....	郑学锋 沈旭峰 徐 雄 孙昱薇 (31)
RVSP 数据处理研究* .....	陈 明 童思友 王林飞 (36)
基于垂线偏差的局域似大地水准面精化方法 .....	曲政豪 邢志斌 戴 鑫 (41)
基于改进广义 S 变换的随机噪声压制研究 .....	王春霖 刘怀山 岳 龙 (50)
点质量数据的局部应用与分析 .....	黄佳喜 王庆宾 张 超 冯进凯 (57)
无人机载航空瞬变电磁法探矿技术的研究 .....	刘 博 徐白山 李传栋 毛宏博 宋 炎 张家龙 (61)
基于地磁台阵观测数据的地磁场日变化区域尺度特性分析* .....	牛 超 徐步云 李义红 曾小牛 刘代志 (67)
基于 STA/LTA 与多道互相关结合的地震波初至自动拾取方法* .....	林凡生 邹志辉 (74)
航空重力测量垂直加速度改正的卡尔曼滤波处理 .....	王 乐 王跃钢 腾红磊 周 颖 (81)
基于 Qt 的无动校正速度分析实现* .....	王 杰 童思友 邓雨男 李林伟 (87)
基于维纳滤波的 OBS 上下行波分离* .....	高 航 童思友 孙传禧 李林伟 (92)
地下封闭爆炸烟囪应力计算与分析 .....	李学政 沈旭峰 张诚臻 王敏超 崔甲甲 (97)
基于 C# 的野外实时处理软件开发 .....	邓雨男 童思友 孙 剑 朱伟强 莫延刚 (103)
地下工程勘探时遥感信息与物探的结合 .....	钟世航 任宝宏 王 荣 王泽峰 (110)
Kingfisher 油田建设项目地质灾害危险性评估 .....	张善法 单凤兰 周 飞 (117)
大型地下工程中在被覆或岩体表面测量围岩松弛带深度 .....	王 荣 (124)
复杂山区深层地下水探测技术实践运用 .....	韩若飞 江 升 刘 菲 (131)
井中(地一井) TEM 模拟 .....	刘玉莉 林立松 王吟泽 孔 娟 王志刚 (145)

GPR 图像目标定位精度研究 .....	李传栋 徐白山 宋 炎 毛宏博 张家龙 (150)
工程岩体级别遥感预先判定方法* .....	王 康 于德浩 周宇翌 龙 凡 杨清雷 杨 彤 (154)
基于横波地震的战备水源探测方法研究 .....	毛宏博 徐白山 宋 炎 李传栋 刘 博 张家龙 (160)
基于 SPOT 数据的地表水体提取方法适用性研究* .....	李 霞 于德浩 杨清雷 龙 凡 徐兴宇 刘金龙 (166)
桩基础立体检测方法的研究 .....	梁晓强 徐白山 潘庆芳 刘志龙 李世龙 (173)
重要设施面临的自然灾害威胁及对策 .....	杨建明 唐 莉 (177)
海洋拖缆镜像偏移成像技术研究* .....	韩同刚 童思友 孙传禧 许达贞 (182)
天然气水合物立体观测震源特性分析* .....	吴树梁 刘怀山 (188)
基于网格自动搜索拟合曲面法垂直缆初至波二次定位* .....	邱泽鹏 童思友 孙传禧 (195)
空间目标无源定位方法研究 .....	刘 宇 刘 涛 何 兵 林浩申 (199)
空间辐射探测器数字脉冲平滑拟合处理方法 .....	王 振 魏志勇 皮本松 赫连高航 苏慧雯 冉佑权 (206)
基于梯度粒子群算法的卫星编队构型重构设计 .....	潘点恒 何 兵 刘 刚 林浩申 谢 慧 (212)
基于地基 GPS 信号的电离层层析方法概述* .....	卢世坤 李夕海 李义红 牛 超 刘代志 (220)
基于某地区电离层不均匀特点的短波三维射线追踪仿真* .....	侯维君 李义红 徐步云 牛 超 刘代志 (227)
基于雷达目标散射特性测量实验系统高精度测量的技术研究 .....	宋 炎 徐白山 李彦鹏 李传栋 毛宏博 刘 博 (234)
地物目标近地面多波段散射特性测量实验设计* .....	黄世奇 刘志刚 王艺婷 刘代志 苏培峰 (240)
一种基于曲线的 SAR 图像匹配方法 .....	李 彬 郭 帅 (246)
基于地理信息的动中通阴影判断分析 .....	刘 杉 贾维敏 吴诗琪 胡朝军 (252)
基于加权空-谱联合的遥感图像聚类* .....	何 芳 贾维敏 王标标 李 冰 (257)
基于双树复小波变换的影像融合算法研究 .....	杨 楠 曲泽良 朱 伟 (262)
基于非负一平滑约束的高光谱稀疏表示目标检测算法研究 .....	廖佳俊 刘志刚 蔡 尚 姜江军 (268)
基于小波包和高阶统计量的热红外舰船目标检测改进算法 .....	马 兰 陈筱勇 吴 群 (276)

基于改进包络线去除法的波段选择研究* .....	王 喆	王百合	王艺婷	刘代志	(283)
天津“8·12”爆炸次声波分析.....	任文涛	韩 勇	叶依众		(288)
基于尺度选择的单阵源次声检测研究 .....	苏培峰	李夕海	刘代志	孟 亮	(294)
基于时间关联符合法的铀属性测量实验 .....	徐 野	许 鹏	刘文辉		(299)
利用模糊模式识别方法分析运载火箭的分离事件 .....	教亚飞	李彦鹏	秦玉亮		(304)
基于 Cyclone 的三维管线建模研究 .....	刘胜男	徐白山	贺黎明	陈敬东	(310)
附录：第十一届国家安全地球物理专题研讨会会议纪要.....					(314)



# 地震横波探测冒落带和裂隙带特征的研究

潘庆芳<sup>1</sup> 徐白山<sup>1</sup> 梁晓强<sup>1</sup> 刘志龙<sup>2</sup> 陈敬东<sup>1</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110016;

2. 鞍钢集团关宝山矿业有限公司, 生产技术室, 鞍山 114044)

**摘要** 水库下厚煤层大跨度一次性开采将使采空区上覆岩体发生复杂的岩石移动和变形, 造成了冒落带和导水裂隙带的发育, 对煤矿是一种重大的地质灾害隐患。准确地提供采空区上覆岩冒落带高度、导水裂隙带埋藏深度及发育情况信息, 是安全采煤设计的基础。针对传统探测方法的观测时间长、工程量大等问题, 研究了水体上地震横波反射法的方法, 通过研究地震横波煤层开采前、中、后上覆岩冒落带和裂隙带的发育变化。并在辽宁省大平煤矿的实践探测, 表明利用地震横波反射法探测水库下冒落带和裂隙带的效果直观, 地震横波反射法探测煤层高角度小裂隙和小断层等方面的问题较地震纵波法具有显著的优越性。

**关键词** 地震横波反射法 覆岩 冒落带 导水裂隙带

## The study of seismic shear wave detection caving zone and fissure zone characteristics

PAN Qingfang<sup>1</sup> XU Baishan<sup>1</sup> LIANG Xiaoqiang<sup>1</sup>

LIU Zhilong<sup>2</sup> CHEN Jingdong<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110016;

2. Iron and Steel Group, Baoshan Mining Co. Ltd, Production technical room, Anshan 114044)

**Abstract** One time mining of thick coal seam under the reservoir will cause the complex rock movement and deformation of the overlying rock in the goaf. That will cause the development of the caving zone and the water flowing fractured zone, which is a serious geological hazard. It is the foundation for safe mining design to accurately provides the height of overlying strata and the buried depth and development of water flowing fractured zone in goaf. In view of the traditional detection method of observation time, large quantities, this paper studies the method of seismic transverse wave reflection method on water. According to the study of seismic wave before mining, after overburden rock caving zone and fractured zone of developmental changes and the detection of the practice of Liaoning Province Daping Coal Mine, it indicate that seismic transverse wave reflection method can detect caving zone and fracture zone under the reservoir intuitively, and seismic wave reflection method has obvious advantages compared with the seismic wave method to detect the problems of the small fracture and small fault in the high angle of the coal seam.

**Key Words** Seismic shear wave reflection method overlying strata caving zone Water conducting Fractured Zone

# 1 引言

煤炭是我国的主体能源,近年来随着煤炭产量的大幅提高,“三下开采”中的灾害事故隐患之一就是工作面顶板突水淹井事故。水下采煤必然会使采场周围的岩层发生变形、断裂和移动的现象,逐渐形成冒落带、裂隙带和弯曲带。若存在上覆含水层,并在采动围岩中形成导水通道,就可能形成矿井水害。对矿井水灾害预防的传统方法除了对水文地质条件调查分析以外,还有测绘地形形变监测、岩移带观测,然而水体覆盖下的这些观测都将变得很难。需要了解煤矿采空后覆岩“三带”埋藏深度及发育高度与上覆含水层及水体赋存状态的准确信息,“三带”发育高度是能否导致采区水体渗漏的重要数据,这将至关重要。

对“三带”的探测,以往传统方法是以钻探为主要手段,它具有直观、准确等优势,但工程费用较大,同时测试成果仅为几个点的资料,常常受到较大的限制,且不能全面地反映上覆岩破坏的整体情况,在水库内钻探将会引发隐患事故。针对以上问题,本文利用横波地震反射法结合前期钻探资料对大平煤矿开采后覆岩的破坏情况进行探测跟踪对比研究,继而分析得出大平煤矿水库下采煤后上层覆岩冒落带和裂隙带发育高度及变化趋势,为防止矿井水灾提供指导依据。

## 2 横波地震反射法原理

### 2.1 地震波传播的基本原理

地震勘探就是用人工的方法引起地壳振动,利用精密仪器记录地面上各点震动的情况。一般是通过炸药或者可控震源等来实现击振,继而形成地震波。在地震波向下传播的过程中,因为不同地层岩性的差异导致波阻抗不同,从而在界面处会产生不同程度的反射和折射,在地面上用专门的地震数据采集装置—检波器来接收,从而以一定形式记录下了地下反射波的信息。然后根据地震波从地面开始向下传播的时刻(即爆炸的时刻)和地层分界面反射波到达地面的时刻,得出地震波从地面向下传播到达底层分界面,又反射回地面的总时间,再用其他方法测定出地震波在岩层中传播的速度,就可以推算出地层分界面的埋藏深度。如此延伸到一条测线进而测网就可以获得地下地质构造情况。下面是地震波的传播工作原理示意图(图1),其中设激发震源到接收检波器的距离(炮检距)为 $x$ ,由震源激发产生的横波经由反射界面到检波器的传播时间(双程旅行时)为 $t$ , $M$ 为共中心点或共深度点(反射界面水平时),设地震波在岩层中的传播速度为 $v$ ,则反射界面的深度可以表示为

$$h = \sqrt{\left(\frac{v^2 t^2 - x^2}{2}\right)} \quad (1)$$

### 2.2 横波特点

地震波包括体波和面波两大类,体波是在介质的整个体积内部进行传播,根据传播特征的不同,可分为纵波(P)和横波(S)。二者在传播特征上的区别是:纵波是质点振动与地震波的传播方向一致,横波是质点的振动方向与地震波的传播方向相互垂直。而当遇到水和

空气时,横波停止传播,其波的能量转换成纵波继续传播,透过水体后纵波又可以产生横波,利用横波的这个特点就可以分辨出含水裂缝。

地震波的分辨率与波长有关,即波长越小分辨率越高。波长的大小是由速度决定的,速度越高波长也越大。由标准岩石样品的实验数据得出:对同一岩石来说,其地震纵波速度与横波速度的关系为  $V_p = \sqrt{3}V_s$ , 通过实践验证,近地表地层中横波速度的特点是表层速度偏低,随深度增加略有增加,波速变化不大<sup>[1]</sup>,因此,在近地表条件下,横波与纵波的传播速度有时不成比例,通过资料解释认为横波地震的分辨率也比纵波高,当满足一定的地球物理条件时能够查明 0.5 m 左右厚的薄层,可以作为勘察精细地质问题的主要手段<sup>[2]</sup>。

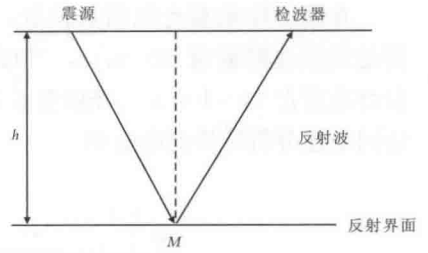


图 1 地震波的传播工作原理示意图

### 3 水库上横波地震工作方法

对水库下综合采掘产生的采空区上覆岩冒落带和裂隙带进行探测,研究横波地震反射法在水域下覆岩“三带”发育的可行性,继而确定上覆岩冒落带和裂隙带的发育现状及影响因素。

本次水上探测是选择当地气温较低的水面结冰季节条件,可以与陆上探测方法基本相同。采用横波地震反射法进行勘探,横波的激发应具有明显的方向性,目前野外使用较多的是叩板法,即在放置地面的木板上增加重物或在木板下钉上铁钉耙,使木板与地面紧密接触并和测线相垂直,水平检波器的最大灵敏度方向和测线方向相垂直以保证 SH 波的接收,敲击木板两端,产生极性相反的 SH 波记录,波形记录也比较清晰,不足之处是能量小,传播距离短。为了加大勘探深度,本次采用类似纵波的激发方法,用 18 磅大锤激发。对于 500 m 深层以下勘探,可以采用推力在 1 t 以上的机械震源激发。

### 4 实例分析

针对辽宁省大平矿水库下综放面进行冒落带和裂隙带发育高度的探测,目的是了解其发育情况,为防止水库地表水进入矿井形成水灾,提供治理的理论依据。本次探测结合测区安全性、施测条件和实际探测的要求,共布设测线 8 条,探测面积 0.7 km<sup>2</sup>,并布设了 5 个钻孔作为验证孔,各方法同时进行。

野外采集参数:采样率 0.5 ms,炮检距 5 m,记录长度 4.096 s,偏移距 10 m,线距网格 20 m×100 m,震源采用锤击方式。图 2 为地震横波反射法时间剖面图。

横波地震反射时间剖面图中竖直线左侧为未采区域,右侧为采后区域。上部的横向橙色线所处的位置,反射波稳定性好,形成的反射波能量强,同相轴较连续,相位基本一致,可以全区连续追踪,这是典型的地层层位反映,根据分析推断为第四系底界面。第二条橙色线经分析也是一个层位,是白垩系地层,其反射波大致可连续追踪,相位间有差距,造成这种现象的主要原因是层位上有 2 个断层,导致波形特征不是很明显,红色线为断层。横向蓝色线位置表示煤层。

在图 2 中的蓝色线所处位置，反射波错断且有些零乱，相位差异较大，属冒落区域，根据地震波速经验值 520 m/s，可推测出冒落带埋藏深度为 250~300 m，最深可至 340 m，其发育高度在 20~100 m。经钻孔验证冒落带埋藏深度为 270~320 m，其发育高度约 70.94 m，这同上述分析结果是吻合的。

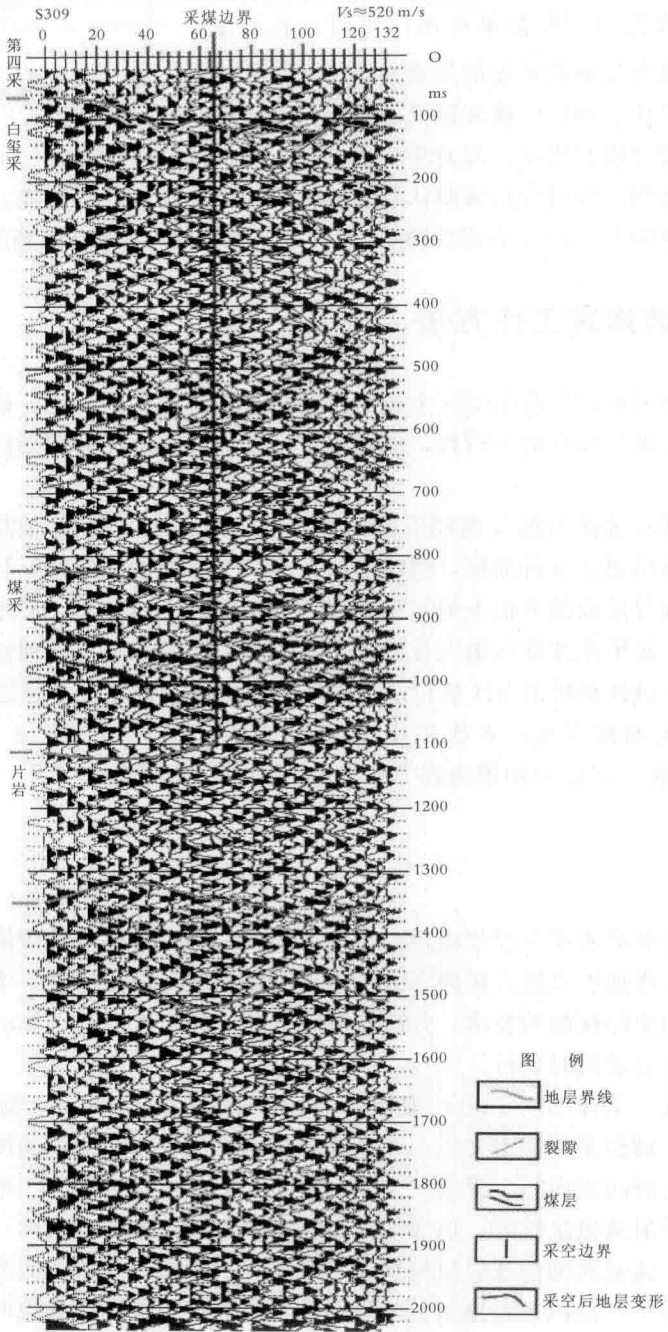


图 2 横波地震反射时间剖面

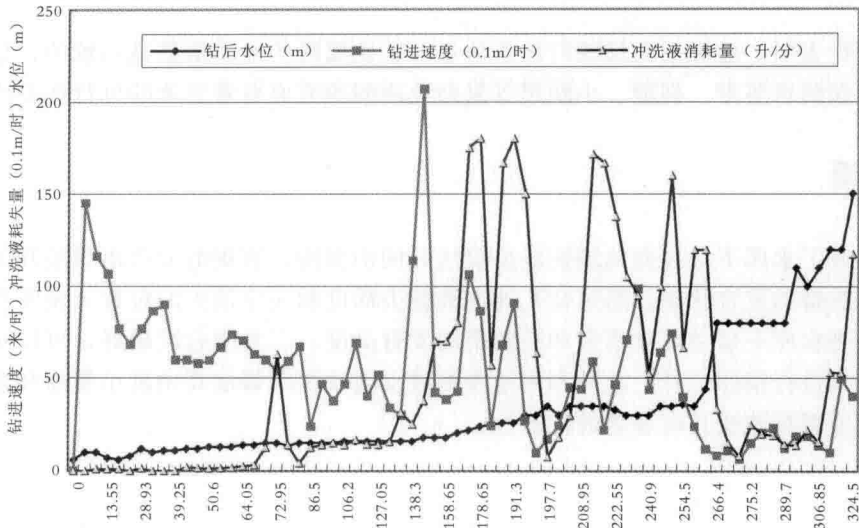


图3 2号钻孔(中部)冲洗液耗失量、水位、钻速与钻孔深度变化曲线图

图2中红色线条所在的反射波性质相同, 落差相近的相邻剖面上的断点可按地质规律组合起来, 出现断层绕射点, 根据这些规律, 判断为裂隙, 共存在有20条新裂隙, 均在地表下垂深80~560 m之间, 主要集中在-150 m至煤层顶板之间。主要是受邻近采空区采空后产生岩移活动造成的。一部分裂隙与采空区相连且保持完整性, 其形成导水裂隙带, 图2中导水裂隙带埋藏深度为150~230 m, 裂隙发育到达第四系, 其发育高度为190~210 m, 经钻孔资料验证导水裂隙带埋藏深度为130~270 m, 发育高度为197.21~221.54 m这与上述分析结果相吻合。

在图2中的紫色线所处区域反射波连续较差, 相位落差相近的断点可以按一定规律组合, 推断为地层变形所致。

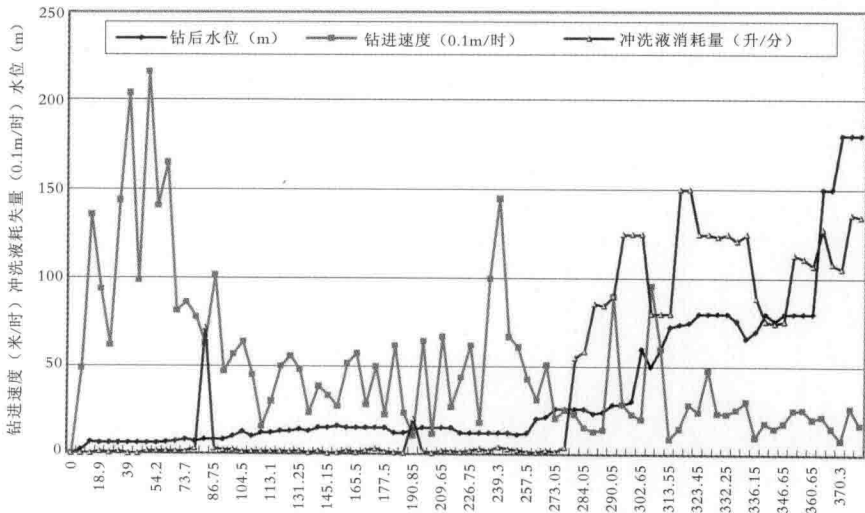


图4 3号钻孔(运顺)冲洗液耗失量、水位、钻速与钻孔深度变化曲线图

上述分析表明，地震剖面反映的地质信息与钻孔反映的地质信息是一致的，地震横波反射法在解决探测冒落带、裂隙、小断层等复杂地质问题方面有着显著的可行性和优越性。

## 5 结 语

本文研究了水库下综放面地震横波反射法时间剖面图，直观的分辨出煤层开采后上覆岩冒落带和裂隙带的发育状态。通过钻孔冲洗液漏失深度和完全消失的位置，表明利用地震横波反射法探测水库下采空区冒落带和裂隙带的发育高度，二者吻合度较好，可以对上覆岩石冒落的效果进行很好诠释。此外利用地震横波反射法探测煤层高角度小裂隙和小断层等方面的问题较地震纵波法具有显著的优越性。

## 参考文献

- [1] 张达敏. 探索横波地震的理论误区 [J]. 工程地球物理学报, 2005, 2 (2): 140-144.
- [2] 何樵登. 地震勘探原理和方法 [M]. 北京: 地质出版社, 1986.

# 基于重力张量数据的目标体边界识别与增强算法的研究\*

张超 王庆宾 吴亮 黄佳喜 冯进凯

(解放军信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450052)

**摘要** 边界增强与识别在重力数据处理中占据了重要地位。与传统重力异常数据相比, 重力张量及其高阶分量对于直接反映异常体的边界具有更高的精度。当异常数据中的所有网格点的值均较低时, 通过 Sigmoid 变换, 可以实现高异常值网格数据的拉升, 同时压缩低灰度级像素, 从而凸显地质体边界, 提高边界增强后图像的识别效果。利用张量及其分量构建了常用的边界识别算法, 通过组合体模型进行了多种边界识别算法的试算以比较分析各自的效果, 并对结果进行了 Sigmoid 变换。结果表明: 对于张量高阶分量组合形式, 水平梯度模、解析信号能基本反映浅异常体的边界,  $g_{zz}$  水平梯度模能较好反映浅异常体边界, 但三者均不能识别深异常体边界; Tilt 梯度、Theta 效果不理想; ITA<sub>2</sub> 能在有效均衡不同强度异常信号的同时, 清晰地识别不同深度异常体的边界; 采用 Sigmoid 变换, 可以明显提高边界识别的识别效果。

**关键词** 重力张量 边界识别 水平梯度 解析信号 Sigmoid 变换

## The Research on Algorithms of Anomaly Boundary Recognition and Enhancement Based on Gravitational Tensor

ZHANG Chao WANG Qingbin WU Liang HUANG Jiaxi FENG Jinkai

(Institute of Surveying and Mapping, The PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450052)

**Abstract** Boundary enhancement and recognition occupies the important position in magnetic data processing. Compared with the traditional gravity anomaly data, gravitational tensor data has a higher accuracy in directly reflecting the boundary of the anomaly. High abnormal values can be pulled up with low gray-scale pixels compressed at the same time by Sigmoid transformation, when all the value of the grid point is lower, thus highlighting geological boundary and enhancing image recognition effect. This paper calculates many kinds of gravity anomaly processing algorithms based on tensor components, Sigmoid transformation included, and then analyzes their effects through combination model. The results shows that: the horizontal gradient, analytic signal and the horizontal gradient of,  $g_{zz}$  can reflect the boundary of the shallow anomaly with the horizontal gradient of,  $g_{zz}$  a better effect, but none of them can recognize the boundary of deep anomaly; The results of Tilt gradient and Theta diagram method is not ideal; and by contrast, the ITA<sub>2</sub> can effectively balance the different intensity anomaly and at the same time clearly identify the different depth of anomaly boundary; Sigmoid transformation is proposed, which can distinctly improve the recognition effect of boundary identification.

**Key Words** Gravitational tensor Boundary recognition Horizontal gradient Analytical signal

\* 基金项目: 973 国家计划 (6132220202) 资助。

# 1 引言

重力勘探方法属于应用地球物理地质勘探与矿藏寻找技术的一个重要分支。由于矿产资源或地下地质构造的密度一般同附近的岩体有着显著的不同,因此,重力勘探在寻找矿产资源与地质构造研究中具有重要的应用价值。重力勘探具有测量成本低、工作效率高、数据采集快、覆盖范围广、测量过程不受地域条件制约等诸多优势,因此得到广泛应用,成为地球物理勘探的诸多方法中不可或缺、不可替代的一种重要方法<sup>[1]</sup>。地质体边界是地质体的断裂带、相异地质体之间的分界线。在这些位置处,由于重力能在一定程度上表现出数值的不连续性,呈现出重力异常的较大变化。利用这一特点,可以通过重力异常的较大变化率寻找对应的地质体边界线,从而为地下地质结构的分析提供支持。

边界增强与识别在重力数据处理中占据了重要地位。原始实测重力异常数据对地下异常体信息反映并不突出,直接据此并不能准确划分出地质体的边界。因此需要对原始异常数据进行相应滤波处理来增强对地质体边界的识别。重力异常水平梯度的极大值和垂直梯度的零值基本反映地质体边界,边界提取算法也是基于此提出的<sup>[2]</sup>。常用的异常数据处理滤波器主要都是基于水平梯度和垂直导数的各种组合来构建,以增强异常地质体的边界特征从而实现边界识别。本文利用张量及其高阶分量构建了常用的边界识别算法,通过组合体模型进行了多种边界识别算法的试算以比较分析各自的效果,并对结果进行了 Sigmoid 变换。

## 2 重力异常及梯度张量

建立一个局部坐标系,以地面某一点  $O$  为坐标原点,坐标轴  $\zeta$  轴沿重力方向垂直向下, $\xi$ 、 $\eta$  轴在水准面上,以下所有的计算都在局部坐标系下进行。设异常体剩余密度为  $\sigma$ ,则引力位:

$$U(x, y, z) = f \iiint_{\Omega} \frac{\sigma d\xi d\eta d\zeta}{[(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2 + (\zeta-z)^2]^{1/2}} \quad (1)$$

重力张量是重力位的二阶导数,全张量重力  $\nabla g$  可写成矩阵的形式:

$$\Gamma = \nabla g = \begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于在地球外部,位场满足 Laplace 方程  $U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} = 0$ ,以及重力场的无旋性,即  $U_{xy} = U_{yx}$ ,  $U_{xz} = U_{zx}$ ,  $U_{yz} = U_{zy}$ ,因此重力梯度张量中只有 5 个独立分量。

## 3 边界增强与识别算法

### 3.1 边界识别算法

与传统重力异常数据相比,重力张量数据对于直接反映异常体的边界具有更高的精度。通过梯度张量及其高阶分量的不同组合,把多个分量的信息集中增强,突出边界信息,从而



辅助数据处理和解释。

位场数据的边界提取算法主要包括 Pedersen 等提出的 2 个张量不变量组合<sup>[3]</sup>、水平梯度模法 (The total horizontal derivatives, 简称 THDR)<sup>[4]</sup>、解析信号法 (The analytic signal amplitude, 简称 ASA)<sup>[5]</sup>、Tilt 梯度法<sup>[6]</sup>、Tilt 梯度的水平导数法<sup>[7]</sup>、Theta 图法<sup>[8]</sup>、 $g_{zz}$  的水平梯度模法<sup>[9]</sup>, 等等, 然后利用图中的极值点、零点或其他特征点来识别边界。

对于各张量高阶组合形式的表达式见表 1。

表 1 常见张量高阶组合形式的表达式

张量高阶组合方式	表达式
水平梯度模	$THDR = \sqrt{g_{zx}^2 + g_{zy}^2}$
解析信号	$AS = \sqrt{g_{zx}^2 + g_{zy}^2 + g_{zz}^2}$
Tilt 梯度	$T_{dr} = \tan^{-1}\left(\frac{g_{zz}}{\sqrt{g_{zx}^2 + g_{zy}^2}}\right)$
Theta 图法	$\cos\theta = \frac{THDR}{AS} = \frac{\sqrt{g_{zx}^2 + g_{zy}^2}}{\sqrt{g_{zx}^2 + g_{zy}^2 + g_{zz}^2}}$
改进二阶倾斜角 $ITA_2$	$ITA_2 = \arctan\left(\frac{k * (\sqrt{g_{zx}^2 + g_{zy}^2})}{abs(g_{zz})}\right) \quad k = abs\left(\frac{\min(g_{zz})}{\max(g_{zz})}\right)$
$g_{zz}$ 水平梯度模	$g_{zz\_THDR} = \sqrt{\left(\frac{\partial g_{zz}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g_{zz}}{\partial y}\right)^2}$

### 3.2 重力张量数据对比度增强

采用对比度增强方法对重力张量网格数据进行对比度拉伸, 增强数据的对比度, 扩展其中的强异常与弱异常区域的对比效果, 可以增强边界识别和检测的效果。这里主要运用 Sigmoid 变换对网格值进行处理。

Sigmoid 变换方程式原型为

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (3)$$

Sigmoid 曲线呈现为 S 状, 通过将其作用于异常数据, 可以实现高异常值网格数据的拉伸, 同时压缩低灰度级像素<sup>[10]</sup>。这在一定意义上符合异常体边界初步增强后, 进一步提高边界对比度的要求, 从而凸显地质体的边界, 提高边界增强后图像的视觉效果。通过引入合适的参数, 可以在一定程度上改变响应曲线的形状, 从而使变换算法更加实用。引入参数后的模型为

$$f(i, j) = \frac{f_{\max}}{1 + \alpha^{-0.1 \times (I(i, j) - \beta)}} \quad (4)$$

其中,  $f_{\max}$  为异常数据最大值,  $I(i, j)$  为原位于网格  $(i, j)$  的异常值,  $f(i, j)$  为网格  $(i, j)$  处