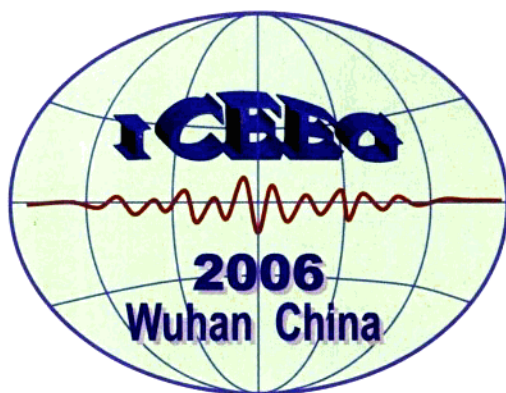


第二届环境与工程地球物理国际会议

The 2nd International Conference on
Environmental and Engineering Geophysics

论文集

Proceedings



中国●武汉
Wuhan, China

主办：中国地球物理学会

中国地质大学（武汉）

Sponsor: Chinese Geophysical Society

China University of Geosciences (Wuhan)

承办：中国地质大学（武汉）

Undertaker: China University of Geosciences (Wuhan)

2006年6月4日—9日

Jun. 4th– Jun. 9th, 2006

GEOPHYSICAL SOLUTIONS FOR ENVIRONMENT AND ENGINEERING

主席：王家映

Chair: Wang Jiaying

主编：徐义贤，夏江海，陈 超

Editors-in-Chief: Xu Yixian, Xia Jianghai, Chen Chao

编辑：罗银河，张三宗，李媛媛，王 静，周群峰

Editors: Luo Yinhe, Zhang Sanzong, Li Yuanyuan, Wang Jing, Zhou Qunfeng

目录

折射静校正反射波多次覆盖技术中的应用, 张学强, 严哲, 熊章强, 朱翔鹏	1
水上地震映像震源多次波的压制, 张学强, 朱翔鹏, 严哲, 师学明	4
基于 Curvelet 的多次波衰减技术, 张素芳, 徐义贤, 雷栋	7
石膏构件无损检测的试验研究, 师学明, 张云妹, 刘铁, 马振波, 王晓明, 顾汉明	11
高频瑞雷波频散曲线的 Occam 反演及其浅层工程应用, 宋先海, 顾汉明, 刘江平	15
沙漠区低降速带地震波衰减机制研究, 石战结, 田铜, 徐白山, 兰翔	19
隧道超前预报 (TSP) 在公路隧道勘察中的应用, 蔡成国, 曹哲明, 李八一	23
浅层高分辨冲击叠加地震采集系统及应用效果, 高霞, 张永旺, 魏文博	26
利用高分辨率地震反演研究隐蔽油气藏, 宁松华	30
弹性波 CT 检测混凝土防渗墙分辨率的研究, 薛云峰, 袁江华, 何继善	33
地震横波反射法在煤矿采空区的地质灾害评价效果, 靳辉, 徐白山, 石战结, 温守钦, 陈庆凯	37
孔底基岩质量和承载能力的高频地震探测方法研究及应用, 胡毅力, 罗克农, 景云萍, 许峻, 段永康, 许昭永	40
一种高分辨率 Radon 变换及地震波场分离, 李庆春, 陈见伟, 吴鹏, 张保卫	43
巴昆水电站发电洞开挖松动区岩体松动圈测试及分析, 周黎明, 肖国强, 尹健民, 王法刚	48
基于 Prony 变换的吸收衰减滤波技术研究及应用, 徐天吉, 甘其刚, 李显贵	51
相控震源对地震信号分辨率改善的定量研究, 姜弢, 林君, 王忠仁, 陈祖斌, 王俊秋, 张林行	55
高分辨地震数据处理技术在近海工程地震勘探中的应用, 孟庆生, 马志杰, 贾永刚, 郭秀军, 樊玉清, 张心彬	59
MT&SIP 圈定地热储层, XLT 城区应用实例, 何展翔, 杨轮凯, 刘平生, 赵会霞, 刘海樱	62
含水层电性模型的视电阻率正演计算, 张胜业, 罗延钟	65
基于 ANSYS 的地电观测数值模拟, 王书明, 杜学彬, 刘玉兰	68
可控音频电磁法在深埋隧道不良地质体勘察中的应用, 顾汉明, 胡祥云, 张可倪	72
五极电测深三维电阻率有限元数值模拟, 强建科	77
量子路径积分算法及其在大地电磁反演中的应用, 罗红明, 王家映, 师学明	81
地下地质异常的电磁波 CT 探测, 宋先海, 顾汉明, 刘江平, 朱培民, 张学强	85
直流电测深法在煤矿水害防治中的应用, 刘金涛, 顾汉明	88
地面核磁共振方法激发频率偏移问题研究, 王鹏, 李振宇, 程逸, 曲赞	92
可控源音频大地电磁法在铁路工程地质中的应用, 雷达, 赵国泽	95
基于机群的大地电磁 Occam 二维反演, 刘羽, 王家映, 孟永良, 熊彬	98
基于补偿电极的对称四极直流电阻率法物理模拟, 冷元宝, 翁晶波, 李长征, 黄松	103
检测双频激电仪性能的一种阻容网络, 付国红, 熊彬, 何继善	106
高密度电阻率法用于堤坝渗漏监测的数值模拟研究, 喻振华, 高才坤, 杜华坤, 汤井田	109

复杂地形四面体剖分电阻率测深三维有限元正演, 吕玉增, 阮百尧, 熊彬.....	112
高密度频率域相位激电法在堤坝除险探测中的试验效果, 雷达, 齐剑玲	116
水下瞬变电磁探测研究, 刘长胜, 林君, 周逢道, 王艳, 周国华, 李慧	119
矩形口径天线轴线上超宽带电磁波衰减特性研究, 林春, 王绪本, 邹倩颖, 景涛.....	123
单衬层填埋场渗漏检测 ELIM 法的正演解析, 管绍朋, 能昌信, 王殿涛	127
大地媒质中的超宽带电磁场分布及能量流动规律, 毛立峰, 王绪本	129
双排列 CP 电阻率法检测垂直铺塑帷幕施工质量效果分析, 郭秀军, 郭健, 潘友宏, 杨乃磊.....	133
宽频电磁探测器多频信号发射与接收技术研究, 荣亮亮, 林君, 朱凯光.....	136
三峡库区兴山县金乐滑坡高密度电法等综合勘查及稳定性评价, 胡新丽, 唐辉明, 李长冬.....	140
聚束直流电阻率法及其在黄河根石探测上的应用研究,	
冷元宝, 王锐, 李长征, 朱文仲, 乔惠忠, 王家映	144
地面核磁共振方法在地下水烃类污染探测中的应用研究, 鲁华章, 潘玉玲	148
两种双衬层填埋场渗漏检测方法的比较, 孙静, 能昌信, 管绍朋.....	152
瞬变电磁法 1-D 地电模型的 2-D 时-频反演, 闫述, 陈明生, 陈珺, 孙树凤, 马云柱	154
有理函数滤波在电磁测深曲线中的平滑去噪, 严家斌, 刘贵忠.....	156
强地震附近视电阻率各向异性变化的可能原因, 杜学彬, 马占虎, 叶青, 李宁, 陈军营, 谭大诚.....	159
高频大地电磁测深在隧道工程勘察中的应用, 曹哲明	164
半刚性基层裂缝的探地雷达电磁波模拟, 蔡迎春, 王复明, 刘俊.....	168
基于二维和三维探地雷达方法探测北冰洋夏季海冰厚度及其下表面形态特征分析,	
孙波, 张占海, 王帮兵, 王大立, 李娜	172
频散介质中地质雷达的数值模拟, 刘四新, 曾昭发	176
相控阵探地雷达数据傅氏有限差分偏移研究, 罗红明, 王家映, 朱培民, 肖柏勋.....	179
探地雷达技术检测中国长城墙体应用的研究, 刘国辉, 贾学民, 董茂干	183
探地雷达天线远场辐射特性研究, 周志军, 邓世坤	186
利用地质雷达方法探测水下抛石赋存形态的研究, 徐白山, 田钢, 丁凯, 新辉, 查恩来.....	190
探地雷达技术在隧道衬砌密实度检测中的应用, 刘本玉, 胡毅力, 陈永华	193
卡尔曼滤波在探地雷达杂波抑制中的应用, 陈洁, 罗元, 方广有, 李芳	197
探地雷达天线近场辐射的时域有限差分模拟, 覃建波, 邓世坤	200
宜万铁路齐岳山隧道地质超前预报的雷达探测技术试验研究,	
丁桂伶, 白明洲, 雷军, 张爱军, 谢晋水, 许兆义	204
地质雷达在探测地基处理中遇到的不良地质体的应用, 张建南, 吕继东, 吴新国.....	207
地质雷达在隧道地质灾害预报中的应用, 梅涛, 杨春和, 杨冬英, 殷黎明	210
探地雷达多次覆盖技术在堤防隐患探测中的应用, 王帮兵, 田钢, 丁凯, 郭井学, 张向培	212
基于 F-K 偏移及最小熵技术的探地雷达成像法, 修志杰, 陈洁, 方广有, 李芳	215
渝怀铁路圆梁山隧道基床质量检测中地质雷达探测技术应用研究, 刘浩杰, 白明洲, 段刚, 王爱军.....	219

城市活断层探测中的地球物理方法及效果分析, 易兵, 曾昭发, 薛建, 李恩泽	222
盘龙城商代堤坝遗址的物探考古发现, 王传雷, 曲赞, 沈博, 祁明松	225
综合物探方法在岩溶勘察中的应用研究, 杨向东, 刘天佑, 吴志斌	228
重磁对应分析方法的参数选择及应用, 吴燕冈, 窦喜英, 杨春成, 王思利	231
煤矿采空区或塌陷区放射性氡气异常特征, 刘菁华, 王祝文, 王晓丽	234
一种新的地球物理反演方法: 稳定的同伦路径跟踪算法, 张丽琴, 王家映, 严德天	238
综合物探方法在厦成高速公路岩溶地质调查中的应用, 熊章强, 黄俊, 张大洲, 张学强, 宁刚, 刘彦华	241
小波压缩算法在线性地球物理反演中的应用, 张世晖, 高金耀, 刘天佑	244
“介质效应”的认识过程及模型实验验证, 王传雷, 沈博, 祁明松, 曲赞	247
等效偶层法曲化平的小波压缩算法及其应用, 杨宇山, 刘天佑, 李媛媛	252
利用不同数据研究沙漠区表层结构, 成锁, 田钢, 张向培	255
磁测资料的综合处理及在大冶铁矿深部找矿中的应用, 李媛媛, 刘天佑, 杨宇山	259
综合物探技术在大坝裂缝检测中的研究及应用, 田宗勇, 姚姚, 高建华	262
断层重力异常的正规化反演, 彭放	265
重磁资料精细处理在珠江三角洲地区地震灾害防预中的应用, 吴小羊, 刘天佑, Courtney M. Segovis	268
特深地下管线的电磁场特征及探测试验, 张汉春	270
工程物探技术在海域工程勘察中的应用, 吕邦来	275
金沙遗址考古文化沉积层磁参数特征研究, 李军, 王绪本, 张擎, 朱章义, 许东郎, 苏永军	279
矿井巷道前方地质构造及异常综合探测与应用, 张平松, 吴健生, 刘盛东	281
堤坝白蚁主巢探测综合地球物理勘查方法, 利爽年, 王传雷	284
综合地质超前预报技术在隧道施工中的应用研究, 吴张中, 徐光黎, 吴立, 史宣陶	286
堤防溃口沉积物磁组构与粒度参数特征及相关性研究, 张玉芬, 李长安, 陈亮, 李一保	289
汉江 2005 洪水沉积的环境磁学特征, 李长安, 张玉芬, 陈亮, 袁胜元	293
在 GIS 基础上运用改进的 DRASTIC 模型评价地下水脆弱性: 以中国沧州为例, 龚香宜, 王焰新, 祁士华, 蒋方媛	296
江汉平原江陵剖面沉积物磁组构特征及气候环境意义, 张玉芬, 李长安, 董雪华, 周元涛	299
湖北簪洲湾溃口沉积物与正常河流沉积物粒度特征及环境意义, 李长安, 张玉芬, 陈亮, 韩晓飞	303
BP 神经网络在焉耆盆地水质评价中的应用, 曹英兰, 靳孟贵, 刘延锋	306
ADCP 在填海工程悬浮物扩散监测中的应用, 李文杰, 高平, 李军峰	309
基于近似嫡测度的径流时间序列动力学特征分析, 佟春生, 薛小杰, 赵雪花	312
鄱阳湖区洪水淹没范围模拟研究, 刘小生, 吴为波, 黄玉生	315
东洞庭湖水体元素的环境地球化学特征, 崔振昂, 乔胜英, 鲍征宇, 侯月明	317
地理信息和数学地质技术在土壤退化中的综合应用研究, 尹潘	320
基于 GIS 技术区域地表水面源污染负荷计算研究, 朱昱, 程胜高, 安琪	323
近水平岩层滑坡启动的临界水柱高度分析, 晏鄂川, 吕美君, 尹锡杰	326

钻孔后压浆技术在苏通长江大桥基础工程中的应用, 布克明, 殷坤龙, 龚维明 330

单桩竖向极限承载力的智能化预测, 刘明贵, 岳向红, 杨永波, 李祺, 张杰 335

桥址区场地地震动反应分析: 以济青高速 I 段为例, 孙兆来, 晏鄂川, 余子华, 李相依 339

地壳界面的起伏对三峡库区地壳垂直形变的影响, 王志勇, 汪汉胜, 袁旭东 342

三维可视化在滑坡稳定性计算中的应用, 王明华, 晏鄂川, 白云 346

河道疏浚淤泥改性固化技术与力学特征的研究, 周旻, 侯浩波, 李志威, 曹国金 349

基于云理论的滑坡监测分析, 曾旭平, 陈刚, 王树良, 程新文 352

破碎岩石水渗流特性的实验与数值研究, 刘卫群, 缪协兴 356

反映物态变化的砂土状态参数本构模型, 徐舜华, 徐光黎, 程瑶 360

粘土弹塑性平面应变固结问题研究, 程涛, 王靖涛, 晏克勤 364

实时监测技术在链子崖危岩体防治工程效果评价中的应用, 王洪德, 晏鄂川, 李相依, 薛星桥 368

InSAR 二维相位解缠算法研究, 岳瑞永, 徐义贤, 吴云超 372

论城市 GPS 连续导航服务系统的建设, 吴北平, 许志诚, 胡友健, 李征航 376

基于 3D GIS 的城市地球物理数据管理与服务系统, 侯卫生, 郑坤, 吴信才, 刘修国 378

张北地震区发震构造特征—时空图像分析, 赖晓玲, 李松林, 孙译 381

椒江口—台州湾悬浮泥沙分布特征遥感研究, 郭琳, 陈植华, 杨丽, 郭金柱 383

基于 GIS 地球物理数据处理和分析, 郑贵洲, Bert Veenendaal, 王仲伟, 李细光 386

三峡库区秭归公路高切坡测量 GPS 应用及切坡面积计算, 陈性义, 许杨涛, 吕利萍, 赖祖龙, 荣瑞霞 389

基于 A*算法的公路交通网络数据存储方法研究, 武雪玲, 杜清运, 任福 392

GPS 跨河水准高差拟合方法研究, 陈现春, 陈刚, 徐勇, 徐景田 396

一种基于地震解释数据的闭合三维地质模型的构建方法, 侯卫生, 吴信才, 刘修国, 陈国良 399

Saint John 河无缝垂直基准的建立, 赵建虎, 陈刚, John E. Hughes Clarke 402

微型控制网中单、双频 GPS 快速静态观测时段与精度关系研究,
陈性义, 蒋旭惠, 李丽, 沈照庆, 孙杰 405

GPS 高程信号和 Heave 信号融合方法研究, 张红梅, 赵建虎, 周丰年 407

GPS 实时潮位测量方法研究, 陈刚, 程新文, 赵建虎 410

盾构隧道贯通误差分析, 许志诚, 吴北平, 欧阳平 413

大地低频水平振动的锥摆系统响应研究, 程永进, 陈远金, 吴雄伟, 王希成, 王伟 416

EVS——环境与地球科学研究中的可视化系统, 孙立群, 陈刚, 郭琳, 罗美芳 419

CDMA 在随钻测量信号快速传输中的应用, 汪洋, 董浩斌, 曲赞 423

基于 MODIS 的多层结构火灾监测模型, 陈少辉, 曾致远, 刘江平, 张三宗, 张学强, 李福堂 426

基于独立分量分析的复值信号消噪方法, 郭诚, 李宏伟, 王国庆, 杨世永 429

21 世纪温室气体浓度增加情景下全球海洋变化主要特征, 周刚, 牟林, 陈学恩 433

全球气候变化对青藏高原冻土带气体水合物稳定性影响, 赵建忠, 康志勤, 赵阳升 436

基于基因表达式的测井岩性自动识别, 张冬梅, 胡光道, 石再明, 邵玉翔, 徐巍 438

折射静校正反射波多次覆盖技术中的应用

张学强, 严哲, 熊章强, 朱翔鹏

中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉, 430074

摘要: 用反射波法勘探时, 当低速层横向速度变化较大或低速层底界面为非水平界面时, 其下部界面或异常体的反射形态就会变形, 叠加效果不好, 给地震剖面解释带来很大困难。为了提高解释精度, 必须进行静校正。当用反射波法进行勘探时, 常常采用多次覆盖观测系统进行数据采集。在反射波多次覆盖观测系统中可以抽取折射波追逐相遇观测系统, 用该观测系统进行折射解释, 计算静校正量, 对反射波进行静校正。论文首先说明了利用多次覆盖观测系统建立折射波追逐相遇观测系统的方法, 其次, 介绍了用折射波计算静校正量的方法, 最后, 建立弯曲界面和倾斜界面两种三层数学模型, 采用 6 次覆盖观测系统进行试算。结果表明: 该方法效果很好, 能够消除低速层对深层反射界面的影响, 对实际应用有很好的指导意义。

关键词: 折射静校正, 追逐相遇观测系统, 多次覆盖技术, 地震剖面

0 前言

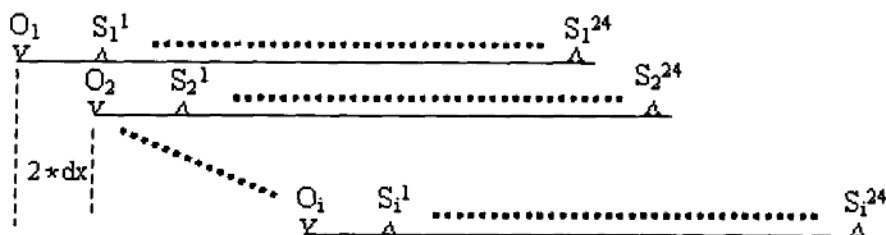
当用反射波法进行勘探时, 常常采用多次覆盖观测系统进行数据采集, 当地层的物理力学参数满足折射条件时, 大部分反射波地震记录中会出现同相轴连续、能量很强的折射波。当低速层横向速度变化较大或低速层底界面为非水平界面时, 其下部界面或异常体的反射形态就会变形, 叠加效果不好, 给地震剖面解释带来很大困难。为了提高解释精度, 必须进行反射波静校正。石油地震勘探中计算静校正量的方法较多, 本文提出了一种新的适应于浅层反射地震勘探的静校正方法, 即在反射波多次覆盖观测系统中抽取折射波追逐相遇观测系统计算静校正量的方法。

1 折射波追逐相遇观测系统的形成

1.1 反射波多次覆盖观测系统设计

为了能进行折射波的追逐相遇观测系统解释, 在设计反射波多次覆盖观测系统时, 必须满足以下几个条件: ①共炮点地震记录上要有直达波初至区; ②共炮点地震记录上一定要有折射波初至区; ③覆盖次数要达到 3 次或以上; ④偏移距最好选定为炮间距的整数倍。

就我们经常使用的 24 道浅层地震仪来设计一个 6 次覆盖观测系统, 如图 1 所示, 偏移距为 2 个道间距(2 个 dx)。该观测系统满足了条件③, 达到 6 次覆盖, 也满足了条件④, 偏移距与炮间距($24/2=12$ 个 dx)相等, 依据地层的速度参数和厚度参数, 选择适当的道间距(dx), 就能满足条件①和②。



说明: O_i 表示第 i 炮点, S_i^{24} 表示第 i 炮点第 24 道接收点, O_2 与 S_1^1 为同一点

图 1 反射波 6 次覆盖观测系统示意图

表 1.1 折射波追逐相遇观测系统的列表表示法

列号 行号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	O_1	S_1^1	S_1^3	S_1^5	S_1^7	S_1^9	S_1^{11}	S_1^{13}	S_1^{15}	S_1^{17}	S_1^{19}	S_1^{21}	S_1^{23}							
2		O_2	S_2^1	S_2^3	S_2^5	S_2^7	S_2^9	S_2^{11}	S_2^{13}	S_2^{15}	S_2^{17}	S_2^{19}	S_2^{21}	S_2^{23}						
3			O_3	S_3^1	S_3^3	S_3^5	S_3^7	S_3^9	S_3^{11}	S_3^{13}	S_3^{15}	S_3^{17}	S_3^{19}	S_3^{21}	S_3^{23}					
4				O_4	S_4^1	S_4^3	S_4^5	S_4^7	S_4^9	S_4^{11}	S_4^{13}	S_4^{15}	S_4^{17}	S_4^{19}	S_4^{21}	S_4^{23}				
5					O_5	S_5^1	S_5^3	S_5^5	S_5^7	S_5^9	S_5^{11}	S_5^{13}	S_5^{15}	S_5^{17}	S_5^{19}	S_5^{21}	S_5^{23}			
6						O_6	S_6^1	S_6^3	S_6^5	S_6^7	S_6^9	S_6^{11}	S_6^{13}	S_6^{15}	S_6^{17}	S_6^{19}	S_6^{21}	S_6^{23}		
7							O_7	S_7^1	S_7^3	S_7^5	S_7^7	S_7^9	S_7^{11}	S_7^{13}	S_7^{15}	S_7^{17}	S_7^{19}	S_7^{21}	S_7^{23}	
8								O_8	S_8^1	S_8^3	S_8^5	S_8^7	S_8^9	S_8^{11}	S_8^{13}	S_8^{15}	S_8^{17}	S_8^{19}	S_8^{21}	S_8^{23}
9									O_9	S_9^1	S_9^3	S_9^5	S_9^7	S_9^9	S_9^{11}	S_9^{13}	S_9^{15}	S_9^{17}	S_9^{19}	S_9^{21}
10										O_{10}	S_{10}^1	S_{10}^3	S_{10}^5	S_{10}^7	S_{10}^9	S_{10}^{11}	S_{10}^{13}	S_{10}^{15}	S_{10}^{17}	S_{10}^{19}
11											O_{11}	S_{11}^1	S_{11}^3	S_{11}^5	S_{11}^7	S_{11}^9	S_{11}^{11}	S_{11}^{13}	S_{11}^{15}	S_{11}^{17}
12												O_{12}	S_{12}^1	S_{12}^3	S_{12}^5	S_{12}^7	S_{12}^9	S_{12}^{11}	S_{12}^{13}	S_{12}^{15}
13													O_{13}	S_{13}^1	S_{13}^3	S_{13}^5	S_{13}^7	S_{13}^9	S_{13}^{11}	S_{13}^{13}
14														O_{14}	S_{14}^1	S_{14}^3	S_{14}^5	S_{14}^7	S_{14}^9	S_{14}^{11}
15															O_{15}	S_{15}^1	S_{15}^3	S_{15}^5	S_{15}^7	S_{15}^9
16																O_{16}	S_{16}^1	S_{16}^3	S_{16}^5	S_{16}^7

1.2 折射波追逐相遇观测系统的建立

根据图 1 所示的反射波 6 次覆盖观测系统, 用列表法表示折射波追逐相遇观测系统, 如表 1.1 所示。表 1.1 中, 行表示共炮点记录, 构成折射波法左支时距曲线。列表表示共接收点记录, 构成折射波法右支时距曲线, 因为射线路径是可逆的, 所以, 可以将共接收点看作炮点, 将共接收点记录中的各个炮点看作接收点。

根据上述原理, 表 1.1 中第 1 行和第 13 列、第 2 行和第 14 列、第 3 行和第 15 列等等, 就分别构成相遇观测系统。对于第 4 行和第 16 列构成的相遇观测系统来说, 第 1、2、3 行共炮点记录都可作为第 4 行共炮点记录的追逐炮记录, 第 17、18、19、20 列共接收点记录都可作为第 16 列共接收点记录的追逐炮记录。上述分析说明了可将相遇观测系统拓展为追逐相遇观测系统, 这样就可以用追逐炮确定交点和延长解释区间。从上述分析情况还可以看出, 相邻两个相遇观测系统的解释区间大部分是重叠的, 可将这种情况称为折射多次覆盖。

2 基于折射波法静校正量的计算

2.1 数学模型记录的建立

设计两个三层模型, 三层的纵波速度分别为 500m/s、1500m/s 和 3000m/s, 两个模型的第二界面均为水平界面, 其埋深均为 80 米。第一个模型的第一界面用直线函数确定, 其计算公式为: $z(x)=5+x\tan(3^\circ)$, 如图 2 所示。第二个模型的第二界面用正弦函数确定, 其计算公式为: $z(x)=15+10\sin(2\pi x/700+2^\circ)$, 如图 3 所示。观测系统按 6 次覆盖设计, 偏移距为 0, 检波间距为 4 米, 24 道接收。用射线追踪方法计算折射波旅行时和两个反射界面的旅行时, 没有考虑波前扩散、介质吸收及透射损失问题。地震子波选用主频为 80Hz 的雷克子波。每个模型计算了 40 炮地震记录, 记录的采样间隔为 0.5ms, 采样点数为 1024, 每炮记录上有直达波、第一界面折射波、第一界面反射波、第二界面反射波。两个模型第 20 炮记录如图 4、图 5 所示。

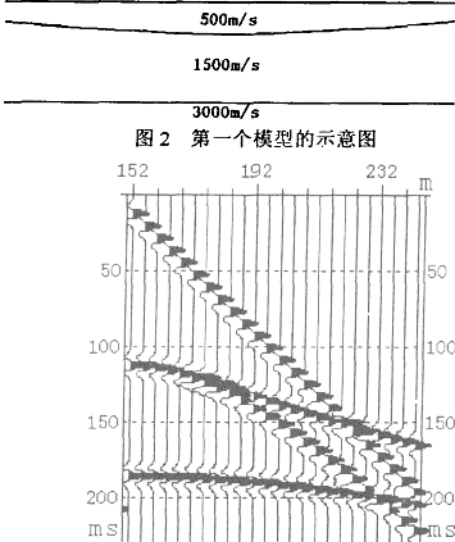


图 2 第一个模型的示意图

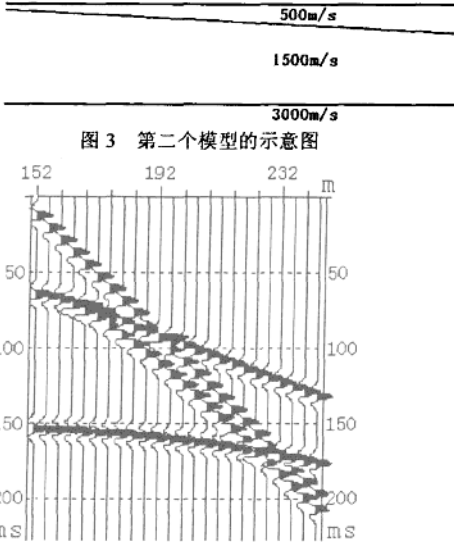


图 3 第二个模型的示意图

图 4 第一个模型的第 20 炮记录

图 5 第二个模型的第 20 炮记录

2.2 静校正量的计算

根据上述 6 次覆盖观测系统, 可以抽出追逐相遇观测系统。用 t_0 差数时距曲线法进行解释, 可以求出覆盖层速度、折射层埋深和折射层速度。用求出的多个离散点的覆盖层速度进行横向插值, 就可以求得所有炮点、接收点对应的覆盖层(低速层)速度。用求出的多个离散点的折射层埋深进行横向插值, 就可以求得所有炮点、接收点对应的折射层埋深。假设地面是水平的并且无高程校正, 则静校正量的计算公式为: $\Delta t(x)=h(x)/V_2-h(x)/V_e(x)$, 其中 $h(x)$ 为测线上 x 处对应的折射层埋深, V_2 为折射层速度、也称替换速度, $V_e(x)$ 为测线上 x 处对应的覆盖层(低速层)速度, 假设其在纵向无变化。折射解释是用作者自编的软件, 这里略去了计算过程、图表及数据。

2.3 静校正的实现及其效果

计算某炮的某道的静校正量, 假设该炮的坐标为 x_s , 该炮的某道坐标为 x_p , 则该道的静校正量为 $dt=t(x_s)+\Delta t(x_p)$ 。假设该道地震记录用 $g(t)$ 表示, 静校正后的记录用 $g'(t)$, 则 $g'(t)=g(t-dt)$ 。按上述计算方法, dt 的值是负值。单炮记录的静校正效果如图 6、图 7 所示, 图 6 是对图 4 的静校正结果, 图 7 是对图 5 的静校正结果。从不同模型的两张图上可看出, 第二界面的反射波形态和位置基本相同, 这说明计算静校正量是正确的。静校正的目的是用低速层下高速层的速度代替低速层的速度, 消除低速层的影响, 恢复第二个界面反射波的形态。在图中它们的差异是由于用垂直地表的射线替代实际射线计算静校正量引起的。

下面对两种模型静校正前后的处理结果进行一下讨论。图 8~图 11 这四张叠加剖面是由含有直达波、折射波、两层反射波的共炮点记录经过速度分析、动校正、水平叠加直接生成的, 未用其它处理和修饰技术。这样做的目的是保持折射静校正的真实性。从图 8、图 10 可以看出, 第二界面的反射波形态受第一反射界面的形态影响很大, 从叠加剖面上很难想象到第二反射界面是水平的。经过静校正后的叠加剖面图 9、图 11 中的第二界面反射波同相轴呈水平状, 与数学模型是一致的, 这说明静校正方法是正确的。

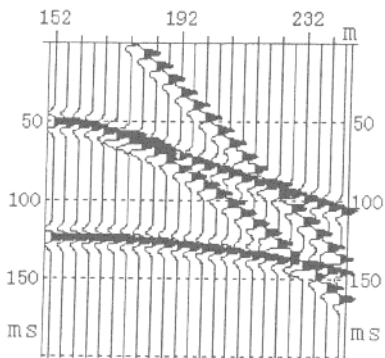


图 6 基于图 4 的静校正结果

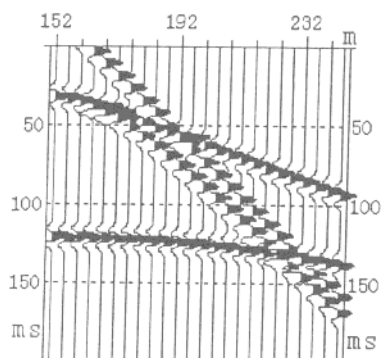


图 7 基于图 5 的静校正结果

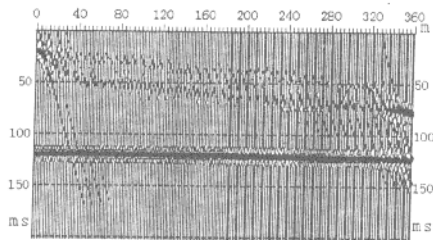


图 8 第一种模型静校正前的叠加剖面

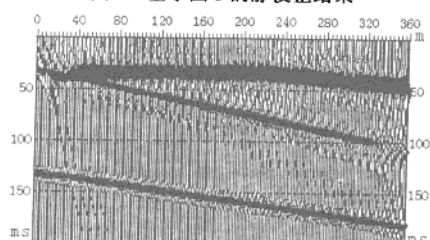


图 9 第一种模型静校正后的叠加剖面

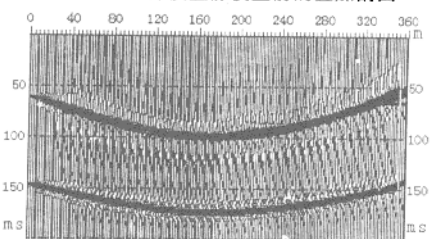


图 10 第二种模型静校正前的叠加剖面

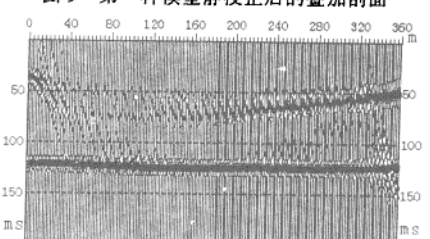


图 11 第二种模型静校正后的叠加剖面

3 结论与建议

通过对采用两种三层数学模型和 6 次覆盖观测系统生成的地震模拟记录的试算, 结果表明: ①从反射波多次覆盖观测系统中抽出折射波追逐相遇观测系统的方法是正确的; ②用常规折射解释方法解释的结果计算静校正量是可行的; ③当低速层厚度变化较大或速度横向变化较大时, 用反射波多次覆盖技术探测基岩面以下的构造或异常体, 采用折射波静校正技术能提高反射波勘探解释结果的精确度。

建议使用 24 道以上的地震仪进行数据采集, 这样更能发挥折射静校正的作用。如果基岩岩性单一, 其内部无岩性分界面, 建议用折射层速度作为静校正后的共炮点地震记录的动校正速度。本文所提出的折射静校正方法不适应折射波有穿透现象的情况。

参考文献

1. 包军强, 1998, 浅层多波的分离识别与提取, 物探与化探, 22(5) 336-342
2. 陈同俊, 2004, 浅层折射静校正方法, 物探化探计算技术, 26(1) 5-8
3. Hampson D, Russell B, 1984, First-break interpretation seismic refraction section, Geophy Prosp, 7(1), 158-182
4. Marsden D, 1993, Static corrections a review, The Leading Edge, 12(2) 115-120
5. Mike Cox, 1999, Static corrections for seismic reflection surveys, Society of Exploration Geophysicists
6. Taner M T, Wanger D E, Baysal E and Lu L, 1998, A unified method for 2-D and 3-D refraction statics, Geophysics, 63(1) 260-274
7. 王翠华, 2000, 折射静校正研究, 石油物探, 39(4) 107-113
8. 张学强, 1999, 地震剖面分类与浅层三种波的层位对比, 物探与化探, 23(1) 5-13

水上地震映像震源多次波的压制

张学强, 朱翔鹏, 严哲, 师学明

中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉, 430074

摘要: 水上勘探任务越来越多, 水下分层和查找构造主要采用地震反射波法, 多道接收方法在水上施工起来比较困难, 主要是因为炮点和检波器难成一条直线, 并且排列和测线也难以重合, 所以, 一般采用一道接收的地震映像法。该方法的震源一般采用震源船或震源棒, 前者能量大, 但很笨重, 需要起重设备, 后者能量相对较弱, 但轻盈方便, 同时也能满足一定深度的勘探要求, 所以在实际工作中常采用震源棒作震源。但水上锤击震源棒顶底多次反射使水上地震资料的品质大大降低, 进而影响到地质推断解释的可靠性。以前多采用低通滤波处理这类资料, 降低了地震资料的分辨率。作者采用预测反褶积方法压制多次波, 通过数字模拟方法验证了其有效性, 并对计算公式作了改进, 改进后的算法能彻底消除模型记录的多次波。用改进后的算法对实际采集的多次波干扰特别严重的资料进行处理, 该资料的分辨率和信噪比均得到提高, 获得了很好的效果。

关键词: 地震映像, 震源多次波, 预测反褶积, 震源棒, 分辨率

随着工程建设的迅速发展, 水上工程地震勘探越来越受到重视。对水下分层或查找构造, 一般采用地震映像法。该方法的震源一般采用震源船或震源棒, 前者能量大, 但很笨重, 需要起重设备, 后者能量相对较弱, 但轻盈方便, 同时也能满足一定深度的勘探要求, 所以在实际工作中常采用震源棒作震源。但水上锤击震源棒顶底多次反射使水上地震资料的品质降低, 进而影响到地质推断解释的可靠性。以前多采用低通滤波处理这类资料, 降低了地震资料的分辨率。因此, 选择合适的多次波压制方法具有重要的实际意义。预测反褶积方法由于原理简单、压制效果明显等特点被广泛用于多次波处理。由于预测反褶积方法假定多次波具有周期性, 而一次反射波没有周期性, 因此预测反褶积方法能够在不损失资料分辨率的基础上有效压制多次波。为了进一步提高预测反褶积压制多次波的能力, 本文对预测反褶积方法进行了改进。利用数字模拟结果验证其正确性, 并通过实例数据处理检验其应用效果。

1 水上地震映像法

1.1 工作原理

它是一种反射波勘探方法, 它采用固定偏移距、一道或多道接收。如图1所示, 船上有一套GPS仪器(包括一台控制测量的电脑), 震源棒被牢固地绑在救生圈上并放在船边的水中, 船工按电脑上显示的测线开船, 基本保证船沿着测线行驶, 工作人员用小铁锤敲击震源棒顶端, 每采集十炮(或更多或更少)记一个测量点, 如此连续做完一条测线。该方法经济、快速。

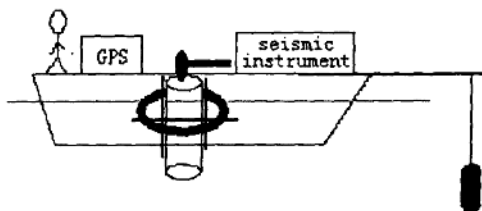


图1 水上地震映像法施工示意图

1.2 震源多次波的形成

当用小铁锤敲击震源棒的上端时, 波就沿着棒体向下传播。当波传到棒底面时, 一部分能量透射在水里传播, 另一部分被反射沿着棒体向上传播。当波传到棒顶面时, 几乎全部被反射, 再沿着棒体向下传播, 这就是震源的二次波。如此反复多次, 能量也在不断的衰减, 这就是震源多次波形成过程。

2 震源多次波的压制

2.1 预测反褶积原理简介

由于震源棒顶、底界面的反射系数是固定的, 多次波传播的路径也是固定的, 所以这种多次波是可以很容易被预测的。设待求的预测滤波因子为 $c(t)$, $g(t)$ 为一道地震记录, $r_{gg}(t)$ 为 $g(t)$ 的自相关函数, α 为预测步长, 在地震记录上取 $m+1$ 个点计算, 则计算公式为:

$$\sum_{\tau=0}^m c(\tau) r_{gg}(\tau-s) = r_{gg}(s+\alpha) \quad s=0, 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

用(1)式求解 $c(t)$, 则预测误差滤波因子可表示为:

$$c^*(t) = (1, 0, 0, \dots, \alpha-1 \text{ 个 } 0, -c(0), -c(1), \dots, -c(m))$$

用该因子与地震记录做褶积运算可压制多次波。

2.2 数学模型试算

设地震子波为 $b(t) = Ae^{-\beta t} \sin(2\pi ft)$, 则 n 次多次波的地震记录为

$$g(t) = \sum_{j=0}^n b(t-j\alpha) r^j \quad (2)$$

其中 α 为预测步长, r 大于0并且小于1。按公式(2)计算的地震记录如图2所示, 按公式(1)计算的多次波压制效果如图3所示。

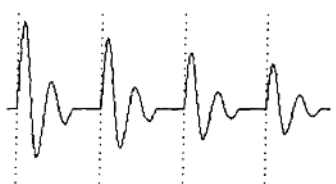


图2 多次波地震记录

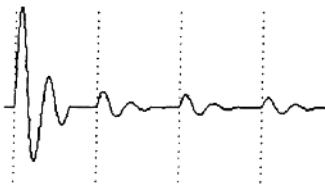


图3 改进前对多次波的压制

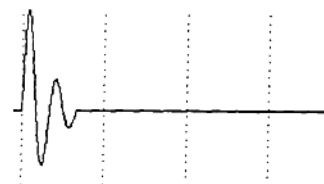


图4 改进后对多次波的压制

从图3可以看出, 按(1)式计算对多次波有一定的压制效果, 但不能消除多次波。现将(1)式换一种写法, 表示为褶积运算:

$$c(t) * r_{gg}(t) = r_{gg}(t + \alpha) \tag{3}$$

下面对该公式做一下改进, 设

$$R_{gg}(t) = \text{sgn}(r_{gg}(t)) \sqrt{\text{abs}(r_{gg}(t) r_{gg}(t + \alpha))}$$

其中 sgn 表示取符号, $\sqrt{}$ 表示开平方, abs 表示取绝对值。现将(3)式改进为

$$c(t) * r_{gg}(t) = R_{gg}(t) \tag{4}$$

按公式(4)计算的多次波压制效果如图4所示, 多次波已经被消除。

2.3 实际地震记录的处理

如图5所示, 这是某长江水域223道地震映像记录, 是采用波形加变面积显示的。其纵坐标为深度, 是按1500米/秒的平均速度进行转换的。因为横坐标是按GPS定位计算的, 不均匀, 所以图上未标横坐标。该地震映像记录是依照图1所示方式采集的。勘探任务是探测水底以下沉船、水雷等异常体。从地震映像剖面图上看, 多次波同相轴呈水平、连续状, 能量强, 固定周期出现, 其干扰十分严重, 异常体显示很不明显。

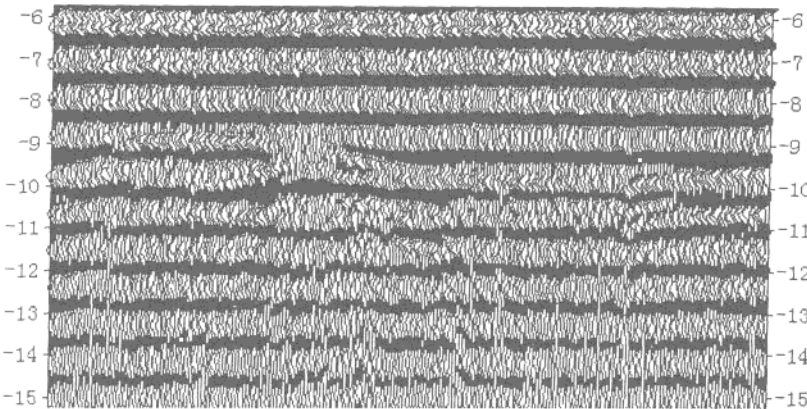


图5 原始地震映像剖面

对于这种固定周期的多次波, 选择某一标准道上下相邻两个周期的多次波作为 $g(t)$, 计算预测滤波因子 $c(t)$ 和预测误差滤波因子 $c''(t)$, 用 $c''(t)$ 对所有地震记录道做褶积运算, 得到如图6所示的地震剖面。该图上多次波基本上被消除了, 水底界面和异常体十分明显。如果按上述方法对每道都选择 $g(t)$, 计算对应的 $c(t)$ 和 $c''(t)$, 做褶积运算, 则效果应该更好一些。

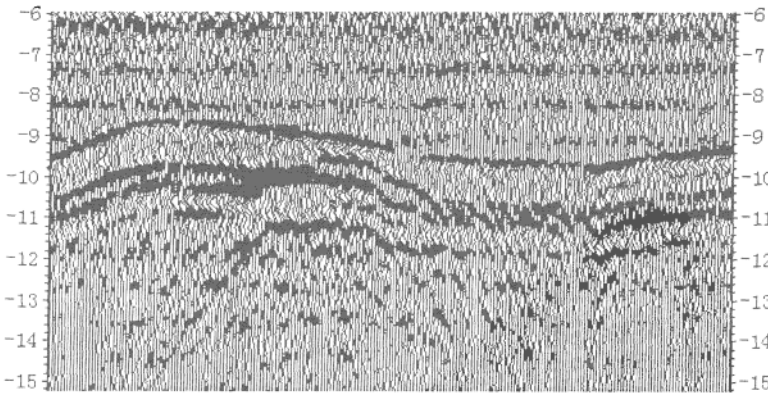


图6 做预测反褶积后的剖面

对于这套数据,当时是采用一维滤波方式处理的,滤波参数是频率186Hz~728Hz、镶边衰减60dB。其实这个频带范围内的信号很弱,如图7所示,这也是没有办法的办法,其滤波效果如图8所示。该图基本上消除了多次波,但同时也降低了分辨率。

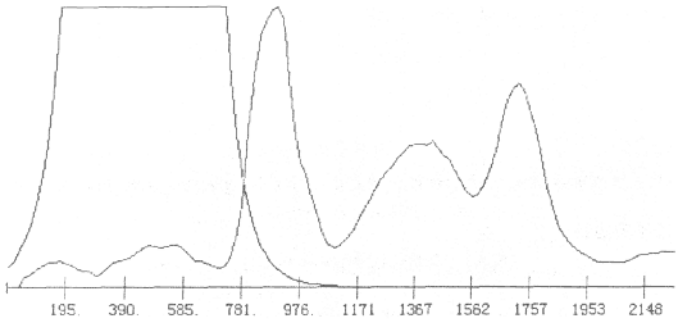


图7 原始地震映像记录中的第38道的振幅谱

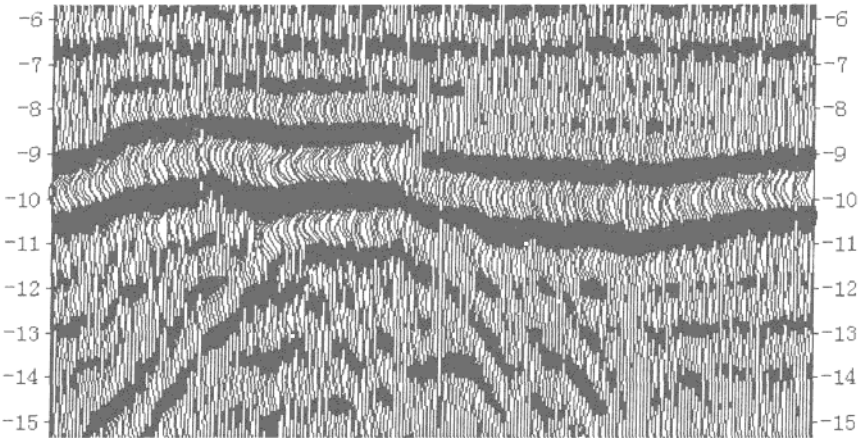


图8 对原始地震映像记录的一维数字滤波

3 结论

用改进后的预测反褶积方法压制水上地震映像震源多次波效果很好,而一维数字滤波方法当频带选择合适的话,能基本消除多次波,但降低了分辨率。

由于使用震源棒轻便,施工起来方便、效率高,还可以降低勘探费用,所以,建议在勘探深度不大的情况下采用震源棒作激震源,进行水上勘探工作。

参考文献

1. Berkhout a J, 1982, Seismic migration: Imaging of a coustic Energy by Wavefield Extrapolation, Elsiver Science Publ Co Inc
2. Foster D J and Mosher C C, 1992, Suppression of multiple reflection using the Random transform, Geophysics, 22(1):49-55
3. TANER M T, 1980, Long period sea-floor multiples and their suppression, Geophys Prosp, 28(1):30-48
4. 刘伊克 HongChuan Sun 常旭,2004,基于波射线偏移压制多次波,地球物理学报,47卷(4期):697-701
5. Moley L, 1983, Predictive decounvelution in shot-receiver space, Geophysics, 48(5):515-531 Riley D C, 1976. Mltpile reflections, Geopysics, 41(4): 592-620
6. 谭绍泉 徐淑合 朱卫强 李振春 穆志平,2004,基于波动理论消除多次波,石油大学学报(自然科学版),28卷(5期):30-33
7. Verschuur D J, 1991, Surface-related multiple elimination:an inversion approach, University of Technology
8. 杨春梅 梁春生,2004,多次波衰减技术的应用研究,地球物理勘探,天然气工业:50-51
9. 张金强 牟永光,2002,多次波压制的自适应方法,石油地球物理勘探,37卷(3期):209-215

基于 Curvelet 的多次波衰减技术

张素芳, 徐义贤, 雷栋

中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉, 430074

摘要: Curvelet 是近期发展起来的各向异性小波, 其基函数能对具有边缘是分段光滑曲线特征的图像进行最稀疏表达。考虑到 Curvelet 能对地震反射记录进行最优分解, 将该变换用于基于波动方程的自由表面多次波压制的减去处理过程。具体方法是对地震记录数据进行 Curvelet 变换, 以预测多次波的 Curvelet 域的系数为阈值, 采用类似去噪的手段来减去多次波。数值实验表明, 该方法能满足减去多次波过程的能量最小准则。本文首次在已有的方法基础上作了改进, 即把数据都变换到 Radon 域处理, 结果表明在 Radon 域进行 Curvelet 方法减去多次波的效果更好。

关键词: Curvelet 变换, 多次波, 衰减, 稀疏表达

1 引言

地震勘探中多次波的存在, 使得地震资料的信噪比降低, 干扰人们对有效波的识别, 从而导致速度分析、叠前及叠后偏移的极大困难^[1], 严重影响地震成像的真实性和可靠性, 并将导致目的反射波的振幅、频率和相位发生畸变, 严重影响地震解释工作。

多次波压制仍是地震勘探数据处理中受到广泛关注的问题, 目前的主要解决方法是基于波动方程的预测减去法, 即通过波动方程模拟实际波场或反演地震数据来预测多次波, 然后把它从原始地震数据中减去。在减去过程中, Verschuur^[2-4]等利用基于最小二乘法能量最小准则的自适应减去法消除了与自由界面有关的多次波, Guitton^[5]利用了基于模型的滤波减去法和 L_1 -范数减去法^[6], Herrmann^[11-13]利用 curvelet 的最优系数表达^[7-10]特性进行了多次波减去过程研究。

本文对基于波动方程的预测减去法的第二步——衰减过程进行了研究, 将近期迅速发展的多尺度变换系统中的 Curvelet 变换用于多次波压制的衰减过程, 该变换具有最优稀疏约束条件, 能使信号(此处指一次波)在一组基函数上的投影能量尽可能小。该方法用通过自由表面多次波预测方法(surface-related multiple prediction, SRMP)预测的多次波作为阈值进行衰减, 并满足能量最小准则。进一步的研究还表明, 对 Radon 域处理进行同样的处理效果更好, 并能更好地保留一次波的能量。

2 Curvelet 变换及其应用

Emmanuel 等 1999 年提出的 Curvelet 变换是 C^2 上的稀疏表示, 在奇异处具有 $O(\log^3 m \cdot m^2)$ 的衰减特性。在每个尺度和角度上, 选择用作 Curvelet 变换的空间栅格有本质的不同, 所得 Curvelet 系数与尺度、方向和空间位置参数有关。基于 Curvelet 算法的理论可以得出 Curvelet 变换具有属性: ①紧框架。同正交基一样, 可以把一个任意的函数 $f(x_1, x_2) \in L^2(R^2)$ 扩展为一列 Curvelets, 故有重构公式 $f = \sum_{j,\ell,k} \langle f, \varphi_{j,\ell,k} \rangle \varphi_{j,\ell,k}$, 且满足 Parseval 关系。②抛物线关系

尺度。Curvelet 基函数 φ_j 的频率位置暗含了如下空间结构: 有效长度和宽度满足各向异性尺度关系, 即宽度=长度²。③

摆动性。基函数 $\varphi_j(x)$ 在 x_1 方向是摆动的, 在 x_2 方向是低通的。在尺度 2^j 上, Curvelet 是针状的。

2.1 快速离散 Curvelet 变换

在 1999 年提出的算法基础上, 第二代 Curvelet 变换抛弃了原始的子带分解、平滑分割、重正规化、Ridgelet 分析的计算过程, 实现方法之一是采用频率域 Wrapping 技术。

已知 $[t_1, t_2]$ ($0 \leq t_1, t_2 < n$) 的数字 Curvelet 变换的系数是

$$c^D(j, \ell, k) = \sum_{0 \leq t_1, t_2 < n} f[t_1, t_2] \overline{\varphi_{j,\ell,k}[t_1, t_2]}, \quad (1)$$

其中 $\varphi_{j,\ell,k}$ 是数字 Curvelet 波形。

数字化圆环

在连续时间 Curvelet 变换的定义中, 窗口 U_j 光滑地提取二阶环 $\{2^j \leq \omega \leq 2^{j+1}\}$ 和角度 $\{-\pi \cdot 2^{-j/2} \leq \theta \leq \pi \cdot 2^{-j/2}\}$ 内的频率。在离散情况下, 笛卡儿环等价于共中心的正方形(而非圆)。对簇 $(W_j)_{j \geq 0}$, $W_j(\omega) = W(2^j \omega)$ 的笛卡儿分析转换为对以下形式的窗口的分析 $\tilde{W}_j(\omega) = \sqrt{\Phi_{j+1}^2(\omega) - \Phi_j^2(\omega)}$, $j \geq 0$; 其中 Φ 由一维低通窗口的乘积定义如下

$\Phi_j(\omega_1, \omega_2) = \phi(2^{-j} \omega_1) \phi(2^{-j} \omega_2)$, 函数 ϕ 满足 $0 \leq \phi \leq 1$, 可能在 $[-1/2, 1/2]$ 上 $\phi = 1$, $[-2, 2]$ 上为 0。

可验证

$$\Phi_0^2(\omega) + \sum_{j \geq 0} \tilde{W}_j^2(\omega) = 1. \quad (2)$$

令 $V_j(\omega) = I(2^{j/2} \omega_2 / \omega_1)$, 用 $\tilde{W}_j$ 和 V_j 定义笛卡儿窗口 $\tilde{U}_j(\omega) = \tilde{W}_j(\omega) V_j(\omega)$ 。

可见 $\tilde{U}_j$ 在楔形 $\{(\omega_1, \omega_2): 2^j \leq \omega_1 \leq 2^{j+1}, 2^{-j/2} \leq \omega_2 / \omega_1 \leq 2^{j/2}\}$ 附近分离频率。图 1^[10]是数字化分割块, 阴影区是一个楔形, 可以把 $\tilde{U}_j$ 看作楔形上的基函数。

“频率 Wrapping”算法的快速离散 Curvelet 变换可表达为

$$c^D(j, \ell, k) = \frac{1}{n^2} \sum_{n_1=-n/2}^{n/2-1} \sum_{n_2=-n/2}^{n/2-1} e^{i2\pi(k_1 n_1 / L_{1,j} + k_2 n_2 / L_{2,j})} \tilde{U}_{j,\ell}[n_1, n_2] \hat{f}[n_1, n_2] \quad (3)$$

式(3)中 $j \geq 0, \ell = 0, 1, 2, \dots, 2^j - 1$, $L_{1,j}$ 约为 2^j , $L_{2,j}$ 约为 $2^{j/2}$ 。

具体算法过程为：①作 2DFFT 获得频率域的值 $\hat{f}[n_1, n_2]$, $-n/2 \leq n_1, n_2 \leq n/2$; ②在每个尺度/角度对 (j, ℓ) , 得到乘积 $\tilde{U}_{j,\ell}[n_1, n_2] \hat{f}[n_1, n_2]$; ③“wrap” (如图 2^[10]中把左上角的平行四边形填充到原点处的矩形内, 以便于进行傅立叶变换) 乘积结果, 得到 $\tilde{f}_{j,\ell}[n_1, n_2] = W(\tilde{U}_{j,\ell} \hat{f})[n_1, n_2]$, 其中 $0 \leq n_1 < L_{1,j}, 0 \leq n_2 < L_{2,j}$; ④对以上结果作 2DFFT, 得到离散 Curvelet 系数 $c^D(j, \ell, k)$ 。

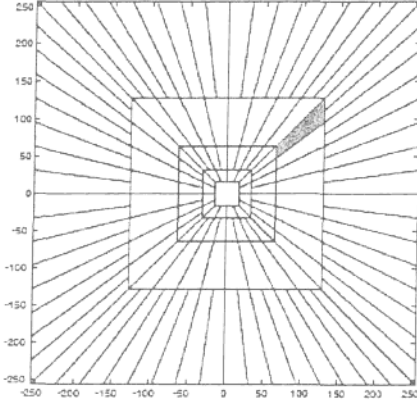


图 1 Curvelet 数字化块, 阴影区是一个楔形

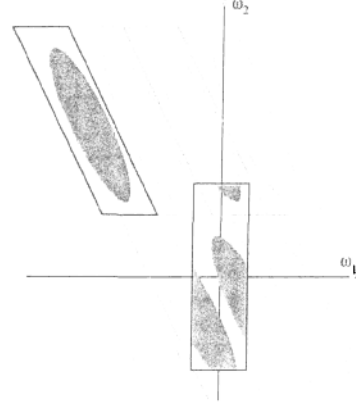


图 2 重新填充椭圆示意图

2.2 多次波衰减方法

Verschuur (1997 年) 提出的 SRME 方法可以消除与自由界面有关的一切多次波, 该方法是针对叠前频率空间域资料, 以声波波动方程场理论为基础, 导出反演算子。该方法有如下优点: ①卓越的保幅功能; ②完全与速度无关; ③不需要地下介质模型的先验估计, 即无需知道地下介质的构造、反射系数等参数。本文以该方法获得的预测多次波为基础, 重点介绍多次波的减去方法。

2.1.1 SRMP 预测

自由界面多次波预测的数学原理可用如下公式表示为

$$M^{n+1}(z_0) = P^n(z_0)P(z_0) \quad (4)$$

式中, $P^0(z_0) = P(z_0)$, $M^{n+1}(z_0)$ 是经过多次迭代预测出的多次波; $P(z_0)$ 是含多次波的原始波场, $P^n(z_0)$ 是多次波的预测算子 (减去上一次预测出的多次波得到的波场)。

以上是用 Verschuur 的 SRME 方法对频率空间域^[2]的数据进行处理来预测多次波的。多炮记录容易形成数据体, 但本文处理的是单炮地震数据, 不一定需要变换成数据体后在频率空间域处理。因此, 可以直接对单炮地震数据在时间空间域做褶积来预测多次波, 即式 (4) 可用时间空间域的褶积处理 $m^{n+1}(z_0) = p^n(z_0) \otimes p(z_0)$ 来代替。

2.1.2 基于 Curvelet 的衰减

减去过程可以看成是线性反演问题 $d = Km + n$, 即从含相干噪声 n 的数据 d 中求取 m 。考虑地震数据的不稳定性, 使用约束条件

$$\hat{m} : \min_m \frac{1}{2} \|C_n^{-1/2}(d - m)\|_2^2 + \mu J(m) \quad (5)$$

其中 d 表示地震记录数据, m 是一次波, J 是 m 的范数, 协方差算子 $C_n = E\{nn^T\}$ 。

在 Curvelet 分析中, C_n 有局部的、稀疏的近对角化的基函数分解。约束条件转换为求对角非线性阈值算子^[11] $\hat{m} = B^{-1} \Theta_{\Gamma}(\tilde{d})$, 其中 $\Gamma = \lambda |Bn|$, n 是预测的多次波, λ 表示控制参数 (取 3 时, 置信区间为 95%)。因此, 多次波减去过程就是以 Γ 为阈值在 Curvelet 域进行去噪处理的过程。

由以上分析可知多次波衰减的基本原理表述如下: 假设 C_p 是原始波场的 Curvelet 系数, T_M 是 SRMP 预测出的多次波的 Curvelet 系数, 取

$$\bar{C}_p = \begin{cases} C_p, & |C_p| \geq T_M \\ 0, & |C_p| < T_M \end{cases} \quad (6)$$

阈值化后, 把 $\bar{C}_p$ 经过 Curvelet 反变换即得到多次波被压制后的波场。

另外, 由于可以构造 Radon 算子的 Curvelet 基的双正交分解, 文献[13]从理论上证明了 Curvelet 能很好地重构噪声的 Radon 域数据。实验中尝试了先把地震记录作 Radon 变换再进行以上处理过程。

3 数值实验结果

图 3 表示一个水平模型的合成地震记录用 Curvelet 变换衰减的结果, 图 3 左图是一个炮集的合成地震记录, 上面一条记录为一次波, 第 2 条记录为多次波。图 3 中图是用 Curvelet 衰减后得到的一次波, 一次波的能量被完全保留, 没有因多次波的压制而受损; 多次波没有被完全压制, 还有部分能量残留, 说明压制不太成功。

以下对改进的方法作实验分析, 数值实验中先对数据进行 Radon 变换, 用 Curvelet 阈值法减去 Radon 域的多次波,

再把被衰减的数据作反 Radon 变换即为多次波衰减结果。该方法也满足使数据具有最优稀疏表达的条件,如图 3 右图所示的实验结果表明经改进后的基于 Curvelet 变换的多次波衰减效果更加明显。

在复杂地质条件的地震记录中,由于一次波和多次波的动较正时差差异小,一般滤波方法不能有效消除多次波(如 Radon 变换不能有效分离一次波和多次波的能量),这种情况下,基于 Curvelet 变换的衰减方法可以预期能更好地完全消除多次波并保留一次波的能量。

图 4 是对一实际共炮点记录的多次波压制的结果。偏移距为 10m,道间距为 2m,采样间隔为 0.2ms。

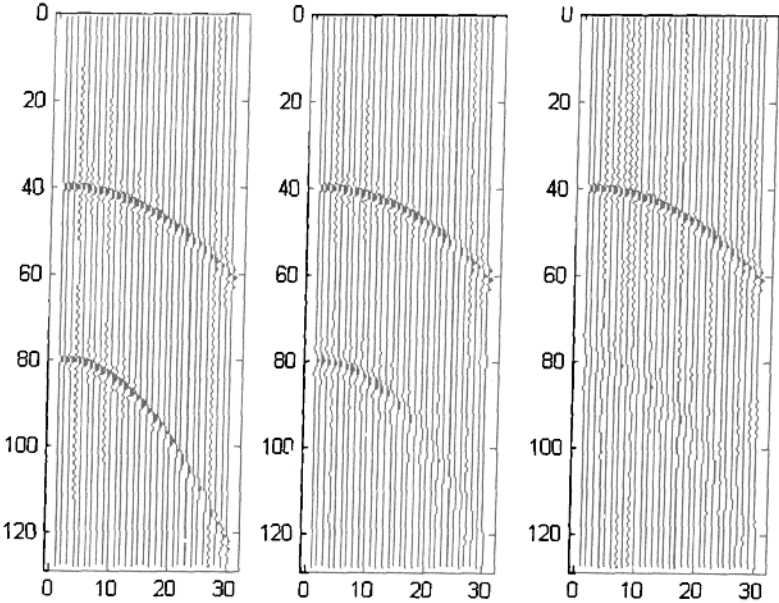


图 3 衰减结果: (左)单炮合成地震记录, (中)Curvelet 衰减结果, (右)改进的 Curvelet 衰减结果

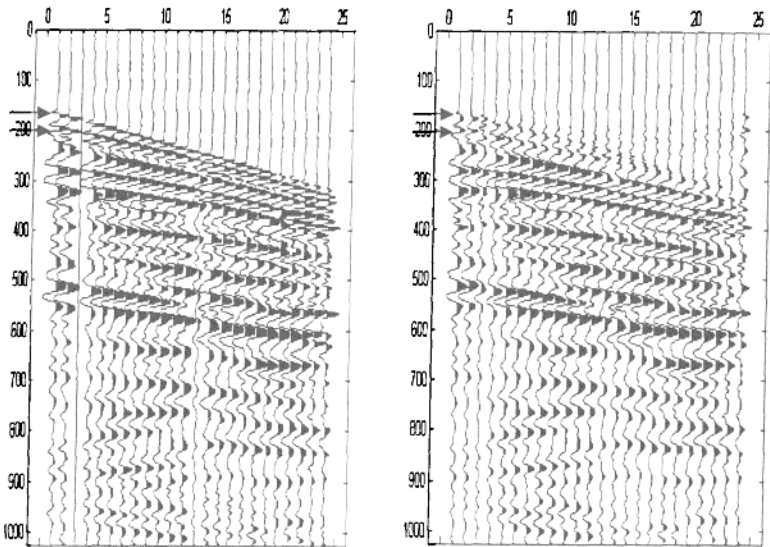


图 4 实际共炮点记录的多次波压制: (左) 实际地震记录, (右) 多次波被压制的结果

4 结论

多尺度、多分辨率思想已经广泛应用于信息科学、信号处理领域。Curvelet 变换及相关多尺度方法是处理大数据集、压缩、去噪及识别关键的瞬时特征的有力工具;也能提高科学计算的速度,如求偏微分方程的数值解。基于 Curvelet 变换的多次波衰减技术是新的多尺度方法在地震记录处理中的首次尝试,还需要不断的研究改进以适于实际资料的处理。同时, Curvelet 变换在地震逆散射、偏移、成像、速度分析等方面的研究也是极具潜力的一种方法。

参考文献

- [1] 黄新武, 孙春岩, 牛滨华等. 基于数据一致性预测与压制自由表面多次波——理论与试处理[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 173-180.
- [2] D. J. Verschuur, A. J. Berkhout, and C. P. A. Wapenaar. Adaptive surface-related multiple elimination[J]. *GEOPHYSICS*, 1992, 57(9): 1166-1177.
- [3] A. J. Berkhout and D. J. Verschuur. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part I: Theoretical considerations[J]. *GEOPHYSICS*, 1997, 62(5): 1586-1595.
- [4] D. J. Verschuur and A. J. Berkhout. Estimation of multiple scattering by iterative inversion, Part II: Practical aspects and examples[J]. *GEOPHYSICS*, 1997, 62(5): 1596-1611.
- [5] Antoine Guitton. Multiple attenuation in complex geology with a pattern-based approach[J]. *GEOPHYSICS*, 2005, 70(4): 97-107.
- [6] A. Guitton and D. J. Verschuur. Adaptive subtraction of multiples using the L_1 -norm[J]. *Geophysical Prospecting*, 2004, 52: 27-38.
- [7] Emmanuel J.Candes and David L.Donoho. New Tight Frames of Curvelets and Optimal Representations of Objects with C^2 Singularities. 2002. URL <http://www.acm.caltech.edu/~emmanuel/publications.html>.
- [8] Emmanuel J.Candes and David L.Donoho. Curvelets-A Surprisingly Effective Nonadaptive Representation For Objects with Edges. 2000. URL <http://www.acm.caltech.edu/~emmanuel/publications.html>.
- [9] Emmanuel J.Candes and David L.Donoho. Recovering Edges in Ill-Posed Inverse Problems: Optimality of Curvelet Frames. 2000. URL <http://www.acm.caltech.edu/~emmanuel/publications.html>.
- [10] Emmanuel Candes, Laurent Demanet, David Donoho and Lexing Ying. Fast Discrete Curvelet Transforms. 2005. URL <http://www.acm.caltech.edu/~emmanuel/publications.html>.
- [11] Felix J. Herrmann and Eric Verschuur. Curvelet-domain multiple elimination with sparseness constraints. *SEG Intel Exposition and 74th Annual Meeting*, 2004.
- [12] Felix J.Herrmann. Curvelet imaging and processing: an overview. *CSEG National Convention*, 2004.
- [13] Emmanuel J.Candes and David L.Donoho. Curvelets and Reconstruction of Images from Noisy Radon Data. URL <http://www.acm.caltech.edu/~emmanuel/publications.html>.

石膏构件无损检测的试验研究

师学明¹, 张云姝¹, 刘铁², 马振波¹, 王小明¹, 顾汉明¹

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院应用地球物理学, 武汉, 430074

2. 铁道部第四勘察设计院, 武汉, 430063

摘要: 声波层析成像是由在物体外部观测声波走时, 然后用计算机来重建物体内部的速度分布进而推断出物体内部结构的一种高新技术。层析成像效果的好坏与观测系统、介质内部结构、射线追踪和反演成像的算法等许多因素有关, 数值化模型的仿真分析有可能与实际情况有一定的差异, 为此, 开展室内实验, 研究层析成像技术的正确性和有效性, 对无损检测的实践有重要的理论与指导意义。本文制作了含已知缺陷的石膏构件, 采用声波透射观测系统, 对缺陷前和缺陷后的石膏构件, 开展了超声波层析成像的无损检测实验研究。实验采用了 X 方向、Y 方向两组透射观测系统, 根据不同观测系统的声波初至时间, 采用基于 Moser 方法的曲射线追踪方法和高斯—牛顿反演法进行了层析成像, 结果是: 无论是 X 方向透射观测系统, 还是 Y 方向观测系统, 完整石膏构件的速度分布基本在 2500 米/秒左右, 而含缺陷的石膏构件的速度分布则有明显的低速区块, 异常区块与缺陷位置基本一致, 但是缺陷形状与实际有较大差别。X 方向的观测系统, 低速异常区块有呈 X 方向拉长和畸变的特征, 而 Y 方向的观测系统, 低速异常区块有呈 Y 方向拉长和畸变的特征。联合 X、Y 方向综合观测系统的数据进行反演成像, 所得的低速异常区与已知缺陷的形状基本一致。实验结果表明, 采用 X 和 Y 方向联合透射观测系统的层析成像, 能比较精细地刻画构件内缺陷的形态, 单方向的透射层析成像结果, 虽然能给出缺陷的大致位置, 但是对缺陷的形态畸变较大。这为一些建筑构件例如房梁、钢梁等的无损高精度检测, 具有一定的参考意义。

关键词: 无损检测, 超声波层析成像技术, 曲射线追踪, 高斯—牛顿法, 石膏

1 引言

声波层析成像(Computer tomography, 简称 CT)是由在物体外部观测声波走时, 然后用计算机来重建物体内部的速度分布进而推断出物体内部结构的一种高新技术。由于层析成像技术具有信息量丰富、准确、直观的独特优势, 因此在结构病害的无损检测领域发挥着越来越重要的作用。

CT 技术在工程地质中主要用于解决地质构造、地层结构、工程地质力学等地质问题。随着超声脉冲技术的进展, 超声无损检测技术得到长足的发展。声波层析成像在混凝土桩和建筑构件等结构无损检测方面, 已经有一些比较好的应用。在很多工程检测尤其是在混凝土等建筑构件的无损探测中, 声波层析成像可以克服其它方法勘探精度不够高的缺陷, 提供较精细的物性分布。

层析成像效果的好坏与射线追踪和反演成像的算法有直接的关系。同时, 由于实际结构构件材料性质的复杂性, 数值化仿真分析与实际情况仍有差异, 造成对算法和层析成像应用效果的评价不够准确。因此, 开展一些室内实验研究来验证层析成像技术的正确性和有效性就非常必要。王振宇等(2005)年对混凝土构件进行了层析成像的试验研究, 但对石膏构件的试验研究未见报道。本文制作了含已知缺陷的石膏构件, 并对缺陷前和缺陷后的构件, 进行了实物测试数据和层析成像, 并对成像结果进行了分析。

2 层析成像的基本原理

层析成像的理论基础是 Radon 变换:

$$t_i = \int_{p_i} f(x, y) dl^p \quad (1)$$

从物体内部图像重建的角度看, 一张物体切片的图像是两个空间变量 (x, y) 的函数, 称为图像函数 $f(x, y)$, 用不同方向的入射波“照射”物体, 观测到的波场信息至少是入射波方向 θ 和观测点位置 P 两个变量的函数, 称为投影函数, 记为 $u(P, \theta)$ 。Radon (1917)证明, 已知所有入射角 θ 的投影函数 $u(p, \theta)$ 可以恢复唯一的图像函数 $f(x, y)$ 。层析成像是 Radon 变换的反问题。

层析成像的正演采用射线追踪法。直射射线追踪所得到的正演旅行时只在介质近似均匀的情况下成立, 研究表明当速度差异小于 15% 时, 直射射线才能给出比较好的近似效果, 但工程实际中往往会遇到异常体速度差异非常大的情况例如断层、岩溶与围岩的速度差往往高达 50%, 这时, 必须考虑采用弯曲射线成像的方法。目前常规应用的曲射线追踪方法主要有三种, 第一种方法是基于 Snell 定律的打靶法和差分方程法; 第二种是基于费马 (Fermat) 原理的最短走时方法; 第三种是基于惠更斯菲涅耳 (Huygens-Fresnel) 原理的子震源传播的波阵面法。近年来, 基于图论的 Moser 曲射线追踪方法由于精度高, 速度较快, 对复杂介质的追踪效果比较好, 因而得到了越来越多的应用与研究。本文采用 Moser 曲射线追踪法。Moser 曲射线追踪法, 其追踪精度依赖于内插节点的数目、模型的参数值等因素。数值试验结果表明, 内插节点数在 5-8 之间, 内存开销中等, 追踪效果也比较好。

层析成像的反演采用高斯—牛顿反演法, 反演方程为:

$$(J^T J + \lambda C^T C) \cdot \delta \gamma = J^T (t^{obs} - t^{pred}) - \lambda (\gamma - \gamma^{prior}) \quad (2)$$

式中: J 为雅可比偏导数矩阵, t^{obs} 表示观测的声波初至时间向量, t^{pred} 表示模型预测值, γ 为成像区域每个单元波的慢度(速度的倒数), γ^{prior} 为先验模型参数, 上标 T 为矩阵的转置。 λ 为正则化系数, C 为模型约束矩阵, 一般采用二维 Laplace 算子。

解上述反演方程, 就可以得到介质慢度的修改量, 得到新的模型参数。重复上述步骤, 直到拟合函数达到给定的阈值。