

国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助项目 (U1261202) 资助
国家自然科学基金委员会优秀国家重点实验室研究专项项目 (51323004) 资助
国家自然科学基金面上项目 (51374203) 资助
江苏高校优势学科建设工程项目资助

采煤掘进工作面

超前极化偏移成像技术

王 勃 刘盛东 王 一 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助项目(U1261202)资助
国家自然科学基金委员会优秀国家重点实验室研究专项项目(51323004)资助
国家自然科学基金面上项目(51374203)资助
江苏高校优势学科建设工程项目资助

采煤掘进工作面超前极化 偏移成像技术

王 勃 刘盛东 王 一 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

采煤掘进工作面安全受到前方断层破碎带、陷落柱、采空区、冲刷带等多灾害源控制,对其进行超前预报已成为当前研究热点,故开展全空间条件下反射波法精细超前探测研究十分必要。本书首次提出了偏振系数因子、主极化方向因子、相干因子的概念。联合三个因子,构建调制函数融合到叠前偏移中,结合相干叠加及绕射偏移原理,提出了一种全空间条件下集波场分离、偏移成像于一体的极化偏移。数值模拟、物理模拟试验表明,极化偏移解决了在巷道有限空间下由于偏移孔径小而导致的对称成像病态问题,且可在线性观测系统下实现异常界面的准确定量评价;在山西、河南、江苏典型矿区现场探测对比试验结果表明,极化偏移技术能够为巷道超前预报提供必要的技术参数。

图书在版编目(CIP)数据

采煤掘进工作面超前极化偏移成像技术/王勃,刘盛东,
王一著. —徐州:中国矿业大学出版社,2014.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2483 - 5

I. ①采… II. ①王… ②刘… ③王… III. ①煤矿开
采—巷道掘进—叠前偏移—成像测井—研究 IV. ①TD263.2
②P631.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第214950号

书 名 采煤掘进工作面超前极化偏移成像技术
著 者 王 勃 刘盛东 王 一
责任编辑 陈 慧
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 10 字数 180 千字
版次印次 2014年10月第1版 2014年10月第1次印刷
定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

采煤掘进工作面安全受到前方断层破碎带、陷落柱、采空区、冲刷带及煤厚突变区等多灾害源控制,然而现有矿井地球物理勘探精度难于满足掘进施工的实际地质需求,为保障复杂地质条件下巷道安全、高效生产,开展全空间条件下反射波法精细超前探测研究显得十分必要。本着为矿山安全生产竭尽全力的思想,科研组多年来一直致力于精细超前探测技术研究。通过在山西、河南、江苏等地各大煤矿的实际探测与研究发现,由于矿井巷道空间范围对测线布置的限制,使用传统的叠前绕射偏移、Kirchhoff 积分偏移及逆时偏移处理都会出现对称假象的问题,造成物探解释结果出现偏差。

科研组提出了极化偏移思路,结合二维、三维空间成像特点设计了极化偏移算法,基于 Visual C++ .net 平台开发了 PsFilter1.0 数据处理系统,运用数值模拟、水槽及岩体物理模型及现场试验手段,围绕极化偏移成像技术进行了系统研究。通过对研究成果的总结,努力为矿井地震波超前精细探测提供一定的技术手段与技术支撑。本书对极化偏移成像方法及其有效性有详细说明及论证,但目前由于巷道地震反射波法受限于施工空间,所能激发接收的地震数据较少,反射波成像点有限,实际速度建模及偏移成像效果仍然受到一定限制,偏移成像的精度仍有待进一步完善与提高。书中大部分内容是在作者近年来的研究成果报告和学术论文的基础上编写的。这些成果的获得,无疑与兄弟单位的合作是分不开的,在这里要特别感谢安徽理工大学张平松教授及郭立全老师的悉心指导和帮助,感谢阳泉煤业(集团)有限责任公司、大屯煤电(集团)有限责任公司、义马煤业集团股份有限公司、淮北矿业(集团)有限责任公司等单位在现场试验方面给予的大力支持和指导,在此一并表示衷心的感谢!同时对书中所引用文献的作者致以崇高的敬意!

本书出版得到了国家自然科学基金委员会与神华集团有限责任公司联合资助项目(U1261202)、国家自然科学基金委员会优秀国家重点实验室研究专项项目(51323004)、国家自然科学基金面上项目(51374203)及江苏高校优势

学科建设工程项目资助。此外,论文编写过程中得到了路拓、黄兰英、章俊、李斌、余森林及张夏阳等研究生帮助。

限于水平,书中在观点和方法上可能会存在片面性,恳请各位专家和读者不吝赐教。

著 者

2014年3月

目 录

1 绪论	1
1.1 矿井地震全空间极化偏移成像技术研究背景	1
1.2 矿井地震全空间极化偏移成像技术研究意义	2
1.3 矿井地震全空间极化偏移成像技术发展及现状	3
1.4 矿井地震全空间极化偏移成像技术研究内容	15
1.5 矿井地震全空间极化偏移成像技术研究路线	16
2 极化偏移及关键技术	18
2.1 极化偏移	18
2.2 射线追踪技术	21
2.3 偏振计算	26
2.4 相干计算、速度分析	29
2.5 偏移成像	32
2.6 极化偏移成像程序设计与实现	34
3 模拟波场极化偏移成像分析	41
3.1 交错网格有限差分计算	41
3.2 弹性波场模拟及极化特征分析	44
3.3 多波多分量极化成像	66
3.4 极化成像效果对比	78
3.5 极化成像影响因素分析	82
4 极化偏移成像物理模拟与分析	88
4.1 相似准则及测试系统	88

4.2	水槽模型实验	90
4.3	岩体模型实验	102
5	极化偏移成像方法的矿井探测与分析	118
5.1	激发接收装置研制	118
5.2	断层破碎带实例	123
5.3	陷落柱实例	127
5.4	采空区实例	130
5.5	冲刷带、煤厚突变区实例	133
	参考文献	138
	索引	154

1 绪 论

1.1 矿井地震全空间极化偏移成像技术研究背景

2011年我国煤炭产量持续增长,达到了35亿t,煤矿事故1201起、死亡1973人,其中较大事故115起,重特大事故24起,百万吨死亡率为0.564^[1]。纵观近几年的煤矿安全生产状况,总体上有所好转,但百万吨死亡率和死亡人数均远高于世界其他产煤国家。近年来美国作为主要产煤国,煤矿年死亡人数控制在40人以下,百万吨死亡率保持在0.003左右;英国百万吨死亡率保持在0.14左右^[2]。因此我国煤矿安全生产形势仍然十分严峻^[3]。

在频发的煤矿安全事故中,据不完全统计,85%以上发生在巷道掘进生产过程中^[4]。巷道掘进是矿井生产的重要环节,也是矿井预防“五大”灾害的前沿阵地。煤炭开采的巷道、采区布置离不开巷道掘进,煤矿的瓦斯爆炸事故也大多发生在掘进巷道,如2009年11月21日2时30分,黑龙江龙煤控股集团鹤岗分公司新兴煤矿三水平探煤巷煤与瓦斯突出导致发生特别重大瓦斯爆炸事故,造成108人死亡^[5]。2006年,国家安全生产监督管理局、国家煤矿安全监察局、国家发展和改革委员会等部门联合发文《关于加强煤矿安全生产工作规范煤炭资源整合的若干意见》(安监总煤矿〔2006〕48号),旨在通过国有煤矿企业和地方、民营企业对尚有开采价值的小煤矿进行资源优化整合,淘汰产能少及安全水平低的小煤矿^[6]。这些被整合的地方小煤矿(小窑)大多数没有正规的采掘工程图纸^[7]。在被大型煤矿企业整合后,其原有的井田范围或采掘空间只是大型矿井所设计采区的一小部分。由于这一小部分的采掘情况无法如实地在采掘工程图纸上反映出来,给大型生产矿井带来严重的安全隐患。资源整合后的大型生产矿井极有可能误入小窑的采空区,造成透水、有害气体突出等危害煤矿安全的事故。如2007年3月10日20时44分,辽宁抚顺矿业集团公司老虎台煤矿发生特大采空区透水事故,造成22人死亡、7人

下落不明^[8]；2010年3月28日14时30分，华晋焦煤公司王家岭煤矿20101回风巷掘进工作面附近小煤窑老空区突水导致发生特别重大透水事故，造成38人死亡^[9]。

为降低掘进工作面事故发生的概率和经济损失，国家煤矿安全监察局提出“预测预报、有掘必探、先探后掘、先治后采”十六字方针^[10]，因此开展超前预测预报研究十分必要，特别是在全国煤矿资源整合之后。

1.2 矿井地震全空间极化偏移成像技术研究意义

巷道掘进是煤矿生产的重要环节，是矿井生产开路先锋，因此巷道掘进前对地质情况的了解，对于矿井生产有着十分重要的作用。根据生产中出现的与需要，煤矿巷道超前预报的任务与类型是多种多样的，如在迎头前方探测断层破碎带、陷落柱、采空区、冲刷带、含水层、瓦斯富集区等。在巷道生产过程中，若遭遇事先未预测到的隐伏地质异常体，会严重影响巷道的设计布置与采掘工作的顺利开展，导致的废巷及误工会给煤矿安全高效生产造成巨大的经济损失；若遇到含水老空区、含水陷落柱、含水构造，可能导致严重的突水事故，会出现重大的人员事故及财产损失；若揭露瓦斯富集区，瓦斯爆炸事故同样会造成重大破坏。因此，及时准确地探明采掘前方的隐伏地质异常，特别是地质构造，对合理采掘布置、保障安全高效生产有着十分重要的意义^[11-14]。

而在目前，在矿井生产过程中对掘进头前方的地质异常的预测预报仍然以钻探为主，由于钻探效率低，钻探为一孔之见，探测范围有限，且钻探操作不当可能导致安全事故，故仅利用钻探进行超前预报已经不能满足现代化矿井安全掘进的需要。因此，急需寻求一种高效、快捷、精确的超前预报方法，根据预报方法的探测成果适当布设针对性强的超前探测钻孔，通过探测与钻孔施工相结合，做到心中有数，有的放矢，既节约掘进成本、提高掘进工效，又保障安全生产。

目前在巷道中采用的超前地球物理探测方法较多，大致分为三大类：① 矿井地震类，包括矿井地震勘探、槽波地震勘探、瑞雷面波技术、震波层析技术、声波及微震技术；② 矿井电磁法类，包括矿井直流电法、矿井瞬变电磁法、地质雷达；③ 其他类，包括红外探测技术、放射性探测技术、电磁辐射法等。通过对相关文献资料对比分析表明，矿井地震波法是目前应用最多、效果最理想的一种地球物理勘探技术^[15-22]。但是，目前受到现场施工空间及数据处理方法的限制，采用矿井地震超前探测地质异常体并进行精细超前预报，需

要完成大量的工作。

基于上述的分析与考虑,本文围绕巷道前方精细探测开展相应基础研究工作,提高对掘进前方隐伏地质灾害预报的准确率,努力为巷道安全掘进提供技术支持。其具体的研究意义可从以下两个方面概括。

(1) 从安全生产角度来看:目前在我国巷道工程施工过程中,由于对前方地质条件认识不清,受地质构造及其异常影响所带来的危害在不断增加,重大的人员伤亡事故屡屡发生,特别是小构造的存在给煤矿巷道的安全生产带来严重影响,由于构造引起的异常问题是多数煤矿在巷道掘进过程中都面临和需解决的问题,因此准确探测、判断掘进工作面前方地质异常特征具有极其重要的实践意义。随着煤矿开采深度不断加大,地面勘探资料数量及质量严重不能满足生产需要,地质条件复杂程度加剧导致矿井安全生产极其被动,故积极有效地开展地质构造超前预报技术研究十分紧迫^[23]。

(2) 从社会经济发展角度来看:在往后很长的一段时期内煤炭仍将是我国最主要能源,约占我国能源需求总量的 75% 以上,国家对煤炭资源开发利用的投入将持续加大,井巷工程相应会不断增多。每年煤矿掘进巷道,由于对前方地质条件的不可预见性增强,所造成的掘进头遭遇各种事故频发,带来了大量的经济损失,严重影响了此类工程的高效生产。应该说,除制定、采取合理的管理办法外,提高对超前探测方法技术的快捷性、准确性、适用性研究是解决该问题的关键所在。因此,加强此项研究,将为我国社会、经济建设带来更大的收益,应用前景广阔。

1.3 矿井地震全空间极化偏移成像技术发展及现状

地震超前探测技术,是一种全空间条件下在掌子面或迎头后方布置观测系统超前预报前方隐伏地质灾害的地球物理技术。按技术推出的先后顺序,地震超前探测技术包括:20 世纪 50 年代日本 OYO 公司研发的 HSP(Horizontal Seismic Profiling)水平声波剖面法^[24-25],曾昭璜^[26]提出的地震负视速度法(也称隧道垂直地震剖面法,TVSP),20 世纪 90 年代中期瑞士 Amberg 测量技术公司开发的 TSP(Tunnel Seismic Prediction)隧道地震超前预报系统^[27],钟世航等^[28-30]开发的陆地声呐法(“陆上极小偏移距高频及宽频弹性波反射连续剖面法”简称),20 世纪 90 年代后期美国 NSA 工程公司研发的 TRT(True Reflection Tomography)真反射层析成像技术^[31-32],德国 GFZ 公司(1999)研发的 ISIS(Integrated Seismic Imaging System)综合地震成像系

统^[33],赵永贵等^[34-35]提出的 TST(Tunnel Seismic Tomography)隧道地震 CT 成像技术,北京水电物探研究所^[36-37]提出的 TGP(Tunnel Geology Prediction)隧道地震波预报系统,张晓培、杜立志等^[38-40]提出的 TSD(Tunnel Seismic Detecting System)隧道地震波法超前探测系统,叶英^[41-44]提出的 USP(Underground Seismic Prediction)隧道、地下工程施工超前地质预报系统。这一系列国内外技术都属隧道空间地震类超前预报方法,分别代表了不同研究阶段的技术成果及特点,并在工程中得到应用^[45-56]。

但是,研究矿井巷道地震超前探测的技术甚少,李庆春、沈鸿雁等^[57]提出了 RTSP(Reflected-Wave Tunnel Seismic Prediction)反射波法隧道井巷地震超前预报技术,刘盛东、张平松、郭立全等^[11-13]提出了 MSP(Mine Seismic Prediction)矿井震波超前探测技术,煤炭科学研究总院重庆研究院^[58-60]基于地震勘探提出了矿井多波多分量超前探测技术。

矿井巷道地震探测主要包括两部分内容:数据采集、数据处理。其中数据采集是获得现场第一手资料的关键部分,特别是井下超前探测受到巷道空间影响,如何利用比隧道狭窄很多的有限空间布置观测系统获取有效数据是合理预报的前提;而在数据处理过程中,特别是多波地震勘探,纵横波分离、偏移成像方法是地质异常体准确探测的基础^[61-68]。因此,下面主要围绕数据采集、纵横波波场分离和偏移技术三个方面进行国内外现状阐述。

1.3.1 巷道激发、接收系统现状

受矿井巷道条件所限,超前探测数据采集的全空间环境与地面地震勘探半空间有着很大的区别,因此在巷道条件下有效获取地震反射波信号,采用合理的数据观测系统是需考虑的问题,而设计、布置观测系统时激发方式、传感器的分量、类型的选择是关键。

目前,在巷道中常用的激发方式是锤击震源及炸药震源两种方式,这两种方式各有利弊。如锤击震源法简单、方便、易操作,但能量有限,探测距离小于 80 m,且面波干扰严重^[69];炸药震源探测法探测距离远,脉冲特性优良,但现场程序烦琐,且具有一定的安全隐患,特别在煤与瓦斯突出巷道施工更应注意。

在巷道超前探测中,最简单、快捷的数据接收方式是单分量接收,通常直接把单分量速度或加速度传感器垂直安装在巷道迎头、左右帮上或钻孔内。在进行多分量探测时现场一般采用三分量组合装置形式,即在 X、Y、Z 三个方向将检波器通过夹子固定在巷道帮左、右锚杆上,或直接将三分量检波器

(如图 1-1 所示)布置在 1.5~2.0 m 的钻孔内,三分量传感器获得的地震信息会更加丰富,并通过后续波场分离技术进行处理。

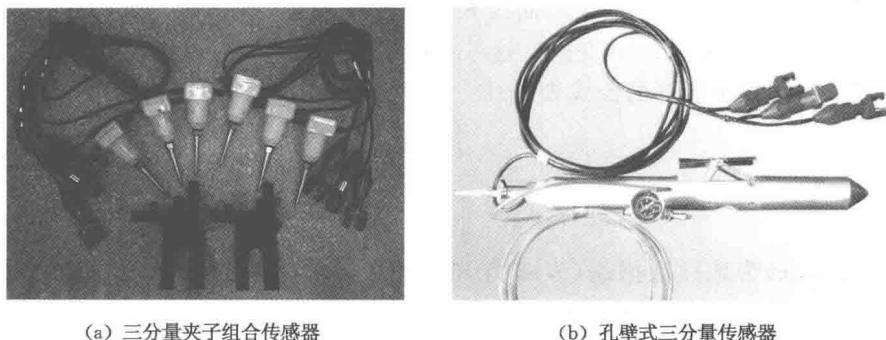


图 1-1 三分量传感器实物图

目前,多分量超前地震探测时通常以三分量装置形式采集为主,而六分量传感器在地震超前探测技术中暂未见相关文献资料,但叶英^[41-42]在 USP 隧道、地下工程施工超前地质预报系统中提出利用 64 分量空间排列组成的角度偏移装置。在其他领域,Kerrf^[70]最早提出了基于 stewan 平台具有弹性铰链的六分量力传感器;日本京都大学 Tsuneo Yoshikawa^[71]研发了一种三维十字结构的六分量力传感器;如李培玉等^[72]从基础理论上探讨了六分量力传感器数学模型,并研发了六分量力传感器及校准系统。

1.3.2 波场分离技术现状

多波地震勘探中,一个分量上的记录通常既含有面波、横波、纵波、声波及其他干扰波等,在矿井煤层中还可能存在槽波,不同类型的波混杂在一起不利于信号后续处理,所以进行探测资料的波场分离是十分必要的,而在进行多波多分量勘探中波场分离主要是进行纵、横波分离。目前纵横波分离的方法可以根据地震波的动力学特征及运动学特征分为两大类^[73-75]。根据地震波的运动学特征进行分离的方法包括 Radon 变换、中值滤波法两种;而基于地震波的动力学特征进行纵横波分离的方法主要包括频率波数 $F-K$ 域滤波、极化滤波、奇异值分解、基于散度和旋度滤波等。

1.3.2.1 运动学类

(1) 拉冬变换

按照拉冬变换(Radon Transform),积分路径可分为线性 Radon 变换和

非线性 Radon 变换两种^[76-85]。当被积函数积分路径是线性时,常称为线性 Radon 变换;当被积函数积分路径是非线性时,通常称为广义 Radon 变换或非线性 Radon 变换,如 HRT 双曲线 Radon 变换、PRT 抛物线 Radon 变换,就属于广义或非线性 Radon 变换。这三种类型的 Radon 变换其实质上是可以统一的,可用如下统一的公式表达^[86-95]:

$$\varphi(\tau, p) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t, x) dx \quad (1-1)$$

$$\varphi(t, x) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(\tau, p) dp \quad (1-2)$$

式中, $\varphi(t, x)$ 为地震数据; $\varphi(\tau, p)$ 为 Radon 变换域数据; x 是空间变量,如偏移距; t 是地震数据的双程旅行时; p 为 Radon 变换曲线曲率的坡度; τ 是截距时间。如果定义积分变量中: $t = \tau + px$, 则为线性 Radon 变换; $t = \tau + px^2$, 相应就是抛物线 Radon 变换; $t = \sqrt{\tau^2 + px^2}$, 便是双曲线 Radon 变换。在隧道、巷道进行纵横波分离过程中,主要利用线性 Radon 变换,因为前方界面反射波组主要表现为线性负速度特征,故可在 $\tau-p$ 域根据纵横波波速不同即 p 存在差异(纵波的 p 数值小,横波 p 数值大),以及波速不同导致的旅行时不同即 τ 存在差异进行纵横波分离。

(2) 中值滤波

中值滤波是一种非线性信号处理技术。该方法基于排序统计理论,它把数字序列或图像中一点的数值,用该点的一个邻域中各点数值的中值进行替代。设现有一组数 (x_1, x_2, \dots, x_n) , 对于这 n 个数,按其数值大小排序,取重排序后的中间数值作为输出值:

$$y = \text{median}\{x_1, x_2, \dots, x_n\} = \begin{cases} x_{(n+1)/2}, n \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{2}(x_{n/2} + x_{n/2+1}), n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1-3)$$

中值滤波技术在 VSP 上、下行波分离应用广泛^[96-99],但在纵横波分离中应用较少,而改进的径向中值滤波法在纵横波分离中可取得较好效果。径向中值滤波法进行纵横波分离是基于纵横波视速度差异,沿低视速度线性同相轴方向运用中值滤波法分离出横波,也可沿高视速度线性同相轴方向运用中值滤波法分离出纵波。同时,还可利用“减去法”衰减横、纵波,从而增强纵、横波信号,得到期望的波场记录。

1.3.2.2 动力学类

(1) 频率-波数域滤波

纵、横波频率域差异主要是纵波频率相对横波高,在巷道纵波频率范围一

一般为 250~600 Hz,横波频率范围一般为 100~300 Hz。对多数已固结的岩石来说纵波速度约为横波速度的 $\sqrt{3}$ 倍。

F - K 域纵横波分离是依据纵波与横波在频率-波数域(F - K 域)中频率、视速度域的差异进行分离^[100-104]。基于二维傅里叶变换将地震信号从 t - x 域变换至 F - K 域,根据所要保留的频率、视速度数值范围在 F - K 域中设定滤波参数,最后经过二维傅里叶反变换至 t - x 域,即可提取指定的信号。正、反变换公式如下:

$$G(f, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t, x) e^{-i2\pi(f\tau + kx)} dt dx \quad (1-4)$$

$$\varphi(t, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(f, k) e^{-i2\pi(f\tau + kx)} df dk \quad (1-5)$$

式中, $\varphi(t, x)$ 为 t - x 域二维地震信号,如共检波点或共炮点信号; $G(f, k)$ 为频率-波数 F - K 域变换结果; k 为视波数。在 F - K 域中,视速度、频率和视波数三者之间有如下关系:

$$V = \frac{f}{k} \quad (1-6)$$

当空间采样合适,地震波记录在 t - x 域中不同频率、视速度的纵横波同相轴信号在 F - K 域中因 f 、 k 的不同而实现分离。

(2) 极化滤波

在多波地震勘探中,极化滤波是提高信噪比及分离纵横波的一种实用处理技术,通过利用地震波的极化特性差异实现纵、横波分离。地震波在传播过程中具有波的传播方向和质点的偏振方向两类方向特征,当质点从初相为零开始运动,纵横波传播时都表现为线性偏振特性,其中:纵波偏振方向和波的传播方向一致,横波偏振方向与波的传播方向垂直。当质点从一定初始位移开始振动时,纵横波传播时均表现为椭圆偏振特性。通常,可利用椭球的形状、偏振平面信息描述椭圆偏振特性,故可以根据纵波、横波偏振参数的差异进行纵横波分离^[105-110]。

极化滤波方法有 Cone 极化滤波法、Tender 极化滤波法、Tendine 极化滤波法和 Poline 极化滤波法等^[111-115]。其中 Cone 极化滤波法和 Tender 极化滤波法是根据瞬时质点运动的偏振参数进行滤波处理的; Tendine 极化滤波法和 Poline 极化滤波法是在一定时窗内利用协方差矩阵计算偏振参数,以纵横波偏振参数差异为依据进行分离的。

目前,采用较多的极化滤波方法为 Poline 极化滤波法。Poline 极化滤波原理基于三维条件下同一类型波至引起的质点振动的空间轨迹近似为一个椭

球体。基于地震波极化定义,质点运动的主极化方向可通过椭球体的长轴方向表示。椭球体的空间运动轨迹实际是空间离散数据点的集合,因此可利用三分量离散数据点振幅值组成的协方差矩阵,求出协方差矩阵的特征值及其对应的特征向量,得出偏振参数。最后在定义的 XYZ 坐标系内,根据“纵波的主偏振平面靠近铅垂方向(XZ 平面),横波的主偏振平面靠近水平方向(XY 平面)”的原则^[116-123],利用偏振参数与 XYZ 坐标系中定义纵横波参数关系实现纵横波分离。

(3) 奇异值分解

奇异值分解是利用奇异值或者特征值作为正交基在信号空间正交分解的特征加强相干能量,减弱干扰信号^[124-125]。设地震记录道数为 m ,采样点数为 n ,则 $m \times n$ 阶矩阵 \mathbf{X} 的奇异值分解(SVD)可化为 $m \times m$ 阶正交阵 \mathbf{U} , $m \times n$ 阶对角阵 $\mathbf{\Sigma}$, $n \times n$ 阶正交阵 \mathbf{V} 的乘积:

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T \quad (1-7)$$

\mathbf{U} 由 $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ 的特征值向量构成, \mathbf{V} 由 $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$ 的特征值向量构成;其中, $\mathbf{\Sigma}$ 由奇异值构成,且奇异值由大到小排列在矩阵的主对角线上;其矩阵 \mathbf{X} 经奇异值分解后,其总能量可以用奇异值平方和来表示。大奇异值对应的本征图像主要代表有效信号,小奇异值对应的本征图像主要代表干扰信号。

在纵横波分离过程中,可通过线性变换(如线性动校正),将视速度不同的纵、横波信号进行预处理,使之纵波信号相干性强,然后利用 SVD 进行压制横波增强纵波,通过反线性动校正完成分离;反之,可提取横波分离纵波。

同时,奇异值分解也用于极化滤波法,通过 SVD 产生极化属性来进行纵横波分离;它与 Poline 极化滤波法协方差矩阵的不同之处在于三维数值矩阵的 SVD 不仅可进行协方差矩阵的特征分析^[126-127],还可以计算单个数据沿特征向量所确定的方向的旋转程度,据此可建立滤波器实现纵横波分离。

(4) 基于散度和旋度滤波

为了从弹性波场的水平、垂直分量中分离出纯纵波及横波,还可利用纵、横波所具有的散度场和旋度场信息^[128-129]。

通常情况,纵波可以利用弹性波场位移的散度来表示:

$$\varphi = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1-8)$$

横波可以用弹性波场位移的旋度来表示:

$$\psi = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1-9)$$

其中, u 、 w 分别为弹性波场的水平、垂直位移。

通常在逆时偏移过程中, 基于纵波为无旋场、横波为无散场的思路可进行纵、横波分离。

1.3.2.3 评述

由于各向同性介质中激发震源通常包含有纵波、横波成分, 在各向异性介质中地震波传播时有分裂与转换作用, 因此地震记录通常包括纵、横波及其他多种干扰波叠加的多波信号。多波地震记录相对于纯纵波信号, 能提供更多的地震属性信息, 但在成像过程中, 若纵横波不能有效分离, 会严重降低偏移成像精度。

运动学特征类的纵横波分离方法基于纵、横波在时域上相对清晰的同相轴, 但实际地震信号, 特别是井下记录, 多种类型波交织在一起, 包括顶底板、后方等正视速度特征信息、面波及其他干扰信号, 因此迎头前方的明显负视速度纵、横波同相轴记录极少, 故单纯地采用 Radon 变换、中值滤波等方法分离纵横波难度较大。

频率波数域滤波结合了运动学视速度特征及动力学频率特征进行纵横波分离, 一方面存在纵、横波同相轴不能有效分离的困惑, 另一方面由于面波、横波频率均较低, 因此在分离过程中会因频率相近而无法有效地分离, 若通过高通滤波获取纵波信号, 会迫使部分有效横波信号损失。

由于极化滤波不是频率域的带通滤波, 有效波的频带宽度不受任何影响, 且极化滤波利用数学统计方法从纵、横波的极化差异出发进行分离, 故目前常用的纵横波分离方法为极化滤波法, 但是在进行三维数值协方差矩阵求解特征值、特征向量及设置滤波函数过程中通常人为设置了 XYZ 坐标系及 P、SH、SV 方向对应关系, 没有考虑各检波点处实时质点的偏振主极化方向与地震波传播方向的对应关系, 使得在滤波过程中通常存在纵横波分离不太完全的现象。

因此, 通过实时求取不同时刻各检波点处质点的偏振主极化方向与地震波行进方向, 从纵、横波质点振动方向与波传播方向差异特征出发, 设置纵横波分离滤波器, 是有效提取纵波或横波的一个方法。

1.3.3 偏移成像技术现状

偏移成像技术是地震数据处理的关键, 同时也是技术难点之一, 有效的偏移成像是实现高精度、高分辨率探测的重要技术保障^[130-133]。偏移方法在石油地震勘探中比较成熟, 可分为两类: 第一类是射线偏移, 以惠更斯原理为基

础;第二类是波动方程偏移,包括 Kirchhoff 积分偏移、频率-波数域偏移、有限差分偏移、逆时偏移等^[134-140]。从文献资料分析,在全空间隧道、巷道中关于超前偏移成像研究相对较少,但也可总结为射线偏移和波动方程偏移两类。

1.3.3.1 射线偏移

(1) 绕射扫描叠加偏移技术

绕射叠加偏移技术^[141-147]是以惠更斯原理为基础的一种叠前偏移技术,下面以多炮激发单道接收说明该技术成像基本思路:对于某一炮点 S_1 ,根据检波点 R_1 及假定反射点 P_i (空间的某一离散网格点)的空间坐标,并结合射线路径对应的速度值 v_i ,便可计算炮点 S_1 经过反射点 P_i 以及反射点 P_i 为新震源点到检波点 R_1 的射线路径长度及射线旅行时 $t_{i,1}$,根据时间 $t_{i,1}$ 在检波点 R_1 地震记录道上寻找对应的振幅值 $A_{i,1}$ (也可插值选取前后相邻采样点振幅值,如 5 个采样点)。当离散网格点 P_i 按照 $S_1-P_i-R_1$ 路径赋予振幅值后,便可进行下一炮点计算,即计算地震波从炮点 S_2 经过反射点 P_i 然后到检波点 R_1 的旅行时 $t_{i,2}$,按照时间 $t_{i,2}$ 在检波点 R_1 地震道上选取对应的振幅值 $A_{i,2}$,然后依次计算其他炮点所对应的振幅值 $A_{i,n}$ 。若 1 个检波点共接收 n 炮激发信号,则可从 n 道地震记录中选取 n 个不同的振幅值 $A_{i,1}, A_{i,2}, \dots, A_{i,n}$,然后针对不同振幅求和。如果反射点 P_i 为非成像点,则采用叠加运算后,对不符合 n 个共反射点条件的振幅值进行叠加,则振幅数值相干性差,对应结果可能会出现正负相位振幅叠加运算而接近于零或出现较小的数值;反之,若反射点 P_i 为真正成像点,则满足以 P_i 点为共反射点条件的地震信号有 n 道,且均具有相同的振幅值,故相干性好的振幅值叠加后会出现较大的正或负数值;计算完一个检波点多炮信号后,多检波点也需进行相应叠加运算。在成像显示过程中,通过设置振幅能量阈值,便可将真正成像点凸显出来,从而实现能量异常界面准确成像。

(2) 干涉叠加散射成像

地下不均匀地质体可看成由散射点组成,每个接收点都能获取到来自散射点的能量信息,接收点记录的地震信号是所有散射点产生的逆散射信号的叠加场^[148-153]。图 1-2(a)所示为单点散射模型散射波传播路径旅行时示意图,地震波从震源传播到散射点被散射后,传回所有的接收点,每个接收道均能接收到散射点能量。

如图 1-2(b)等效偏移距定义示意图所示,若假设将炮点、接收点重合置于地面的 E 点,则地震波由等效炮点 E -散射点-等效接收点 E 的旅行时间与实际观测时地震波从炮点 S -散射点-接收点 R 的旅行时间等同,此时 $t =$