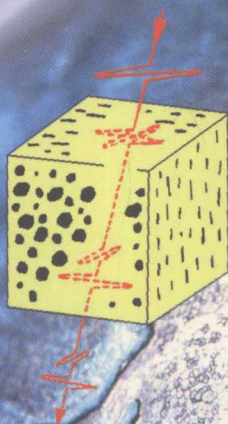


多分量地震资料的 各向异性处理 与解释方法

张中杰 著

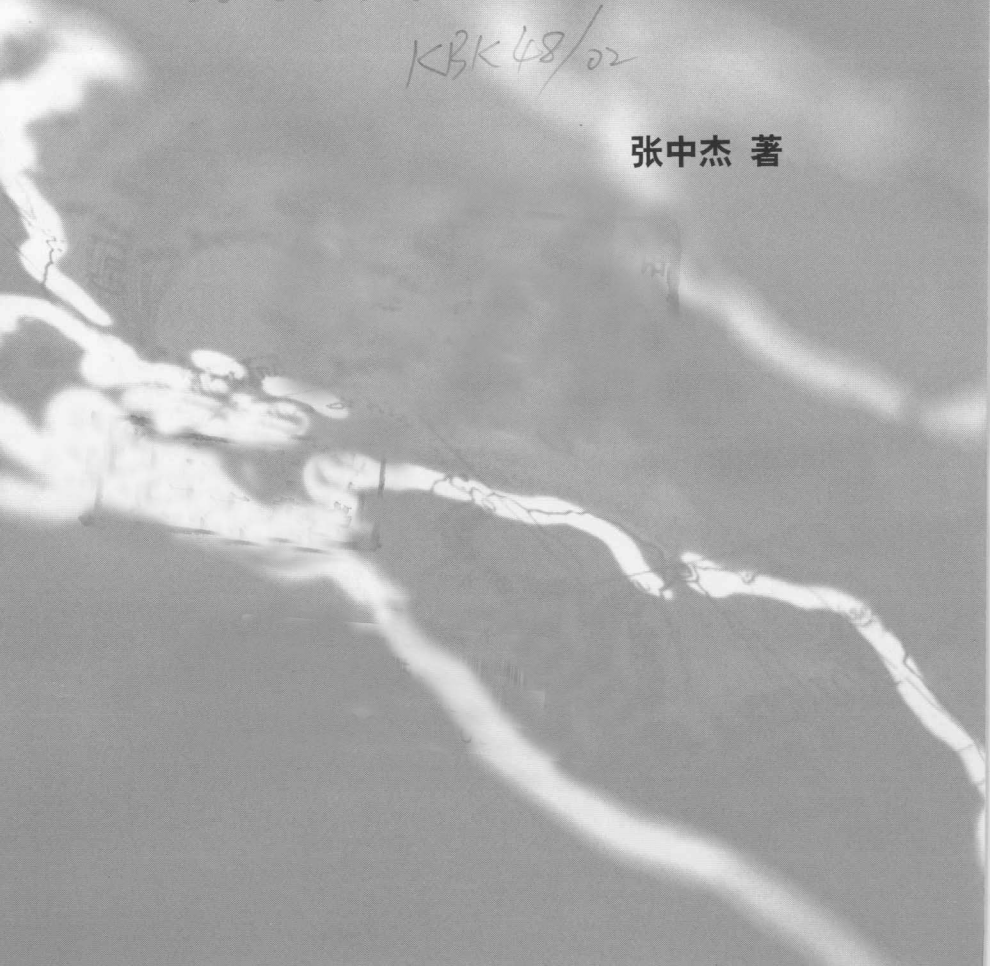
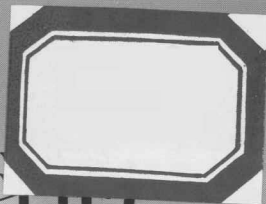


黑龙江教育出版社

多分量地震资料的 各向异性处理 与解释方法

KBK 48/02

张中杰 著



图书在版编目(CIP)数据

多分量地震资料的各向异性/张中杰著, —哈尔滨:
黑龙江教育出版社, 2001.5

ISBN 7-5316-3812-6

I. 多... II. 张... III. ①地震观测—解释②地震
观测—处理 IV. P315.63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 032213 号

多分量地震资料的各向异性

处理与解释方法

DUOFENLIANG DIZHEN ZILIAO DE GEXIANGYIXING

CHULI YU JIESHIFANGFA

张中杰 著

责任编辑:梁 昌

封面设计:傅 旭

责任校对:徐 岩

黑龙江教育出版社出版(哈尔滨市南岗区花园街 158 号)
哈尔滨市工大节能印刷厂印刷·黑龙江教育出版社发行
开本 850×1168 毫米 1/32·印张 10.75·字数 260 千
2002 年 1 月第 1 版·2002 年 1 月第 1 次印刷
印数:1—500

ISBN 7-5316-3812-6/P·6 定价:22.00 元

序

21 世纪将是科学技术日新月异、迅猛发展的新时代。科学技术将成为经济发展最为重要的资源和不竭的动力,并成为经济与社会发展的第一推动力。地球物理学,特别是地震学和勘探地震学的发展必须与“时代的浪潮”合拍。

地震波场理论与方法的深入研究对于地球科学事业的发展具有特别重要的价值。这是由于:地震波场是地球介质与结构的物理——力学性质和深层动力过程信息的重要载体;地震波对地球内部的研究能探测到最大的深度,并具有高于其他地球物理方法所能达到的分辨率和精度。因此,地震场效应的定量化研究对深入认识地球内部圈层结构及其相互作用,物质运移与深层过程,地震活动与机制,探索地震“孕育”、发生和发展的深部介质和构造环境,探查地下沉积建造组构与资源和基底稳定性等均起着极为重要的作用。

第二次世界大战以后,科学技术与经济均突飞猛进,对资源的需求量与日俱增,特别是石油、天然气和煤炭这类不可再生能源的需求迫切。地球在给人类“恩赐”的同时,也给人类带来了种种灾难。例如 1976 年 7 月 28 日在我国唐山发生的 7.8 级强烈地震,在仅仅几秒钟的时间里,竟有 99% 的房屋倒塌,24 余万人丧生,16 余万人受伤。

为了深入认识地球本体,为人类可持续发展提供必要的资源,减轻和预防地震或火山等地质灾害,探索地球内部物质运移和圈层耦合,半个多世纪以来地球物理学家们付出了大量的艰辛,进行了不懈的实践与探求,取得了卓有成效的重要成果。然而,人们对这广阔的大自然的认识仍是极为有限的:强烈地震的预报还是一

大难题;石油的可开采量也仅及总资源量的三分之一;对地球内部,特别是物质与能量的交换及其深层动力过程尚知之甚微。为此,从本世纪开始,为了迎接摆在我们面前的难题的挑战,我们必须奋发努力,进行高分辨率和宽频带的地震探测,在强干扰背景下提取微弱的可靠信息,以资更精确、更逼近于实际地描述地球各圈层的介质结构、属性和状态。其中最为重要的一条途径便是有效地利用所获得的大量信息,即多波(P、SV 和 SH 波及其转换波)信息与多分量信息(即不仅要利用垂直分量的信息,而且还要利用径向与切向分量的信息)。为此,一个新的方向——多波多分量地震资料的采集、处理与解释研究便自然地提上了日程。

由于多波多分量地震探测所包含的信息量远大于常规地震资料,充分利用在地下介质中传播的各类波种所携带的信息,并在综合研究的基点上,可以更深刻地揭示地球内部介质与结构的几何学与动力学属性。显然,多波多分量地震学的研究无论是对地球内部精细结构、物质运移及其深层过程的探索,还是对介质结构的非均匀性、非线性和各向异性的分辨率以及对资料和灾害的预测等方面都奠定了重要的基础。

《多分量地震资料的各向异性处理与解释方法》一书取材新颖,资料丰富,并以深入浅出的方式系统地阐述了在地震学与地震勘探中这一比较复杂的多波多分量方法、概念、原理、应用和潜在前景。为此,该书对该领域的研究人员、技术人员和教学人员全面了解、研究、应用和发展多波多分量地震探测这一新方向乃是一本重要的参考书,并必会促进复杂介质中地震波动理论与方法深入研究和广泛的应用。

中国科学院院士

滕吉文

2001年9月

目 录

概 述	(1)
第一章 多分量地震资料的噪声剔除	(14)
第一节 信号的滑动窗处理	(15)
第二节 一致性矩阵及其性质	(16)
第三节 三分量地震资料中各类噪声的剔除	(18)
第四节 理论三分量地震资料去噪处理结果与分析	(27)
第二章 多分量地震资料的各向异性特征分析	(36)
第一节 多分量地震资料的 S 波分裂参数辨识	(36)
第二节 S 波分裂的频带相关性	(44)
第三节 SKS 波与 SCS 波分裂参数的求取	(53)
第四节 VSP 多分量地震资料的各向异性特征分析	(59)
第三章 多分量地震资料的数值模拟解释	(93)
第一节 各向异性介质中的波动射线法	(94)
第二节 程函方程解仿真法	(103)
第三节 多波多分量地震资料数值仿真的有限差分法	(108)
第四节 有限单元法	(140)
第五节 伪谱法	(153)
第四章 多分量地震资料的各向异性速度分析	(159)

第一节	水平层状介质中各向异性速度分析	(160)
第二节	倾斜反射界面上各向异性速度分析	(173)
第三节	方位各向异性介质中各向异性速度分析	(189)
第四节	正交各向异性介质中各向异性速度分析	(199)
第五节	深度域 TI 介质各向异性速度多参数分析	(212)
第五章	多分量地震资料的叠前偏移	(219)
第一节	非均匀横向各向同性介质中相移加插值法 深度偏移	(219)
第二节	多分量地震资料的克希霍夫偏移方法	(225)
第三节	各向异性介质中弹性波多分量逆时深度偏移	(241)
附录 A	克希霍夫积分	(249)
附录 B	散射积分	(251)
附录 C	常规的下行延拓方程	(253)
附录 D	P 波和 S 波分离	(255)
附录 E	各向同性声波介质的共炮点权函数	(256)
第六章	多分量地震资料的各向异性反演成像	(258)
第一节	VSP 反射波旅行时各向异性层速度反演	(258)
第二节	区域到达时岩石圈各向异性成像	(270)
第三节	各向异性弹性介质中多参数反演	(288)
附录 A	各向异性的射线理论与传输方程	(316)
附录 B	传输方程的解	(321)
附录 C	广义反演——贝斯定理的分析	(323)
附录 D	球面上的体积模式	(325)
附录 E	符号汇编	(330)
主要参考文献		(333)

概 述

一、多波多分量地震学研究的意义

地震学是一门研究地球内部物质弹性与非弹性属性的科学。地震学被认为是一门实验科学,其中数据采集具有不可或缺的地位,地震数据的处理与解释也是现今地震学研究中的主体研究内容,是认识地球本体、监测与预报地质灾害以及探查与开发油气资源的一项最为重要的地球物理方法。

为了更全面地理解地球内部的结构构造、地球动力学内含地质、灾害孕育发生规律,提高油气勘探的成功率以及开发中的采收率,地震学家与勘探地震学家付出了大量的心血,并取得了卓有成效的理论与实际成果,但至今距以上要求尚有相当大的差距。其原因主要在于以下几个方面:

1. 人们对真实地球内部介质的属性了解有限,无法精确描述地球内部介质与构造的真正物理属性。

2. 天然与人工源激发的地震波频带宽度均有限,而且地球内部介质对高频能量的吸收与频散效应尚不能满意地得到恢复与补偿。

3. 噪声干扰严重。一些本质上为有效波的信息不能够得到充分应用,被人为地认为是干扰波,这更加降低了地震资料的分辨能力。

4. 地震探测最致命的缺陷之一在于地震信息量的严重不足,对地球内部特别是深层的覆盖率很低,地球内部物性参量的求解

严重病态。

5. 在现有条件下,地震波激发频带的明显扩宽尚不太实际。

为此,在承认上述事实的前提下,摆在人们面前的问题是如何在长波长的条件下(不太宽的频带震源信号激发与接收),更精确地描述地球内部介质的属性。这自然要求更好地利用所接收的信息,不仅需要利用 P 波信息,还需要利用 SV、SH 波及其相互转换的信息,不仅要利用垂直分量记录,还要利用径向与切向分量记录。也就是说,多波多分量地震资料的采集、处理与解释是地震学界更精确描述地球内部介质属性的必由之路。

现有研究表明:多波多分量地震探测资料至少包含有三倍以上常规地震资料的信息。这些信息的综合利用与约束对于解决数据不全问题、提高人们对地球内部物质属性的描述能力与分辨水平无疑具有非常重要的理论意义与实际价值。

因为地震各向异性与多波多分量地震探测的实施不仅可以更有力地约束各向同性有关参数的成像,如纵横波速度、 Q 值,更可贵的是可用它来提取岩性、裂缝分布的地球物理参数以及应力场信息,如纵横波速度与品质因子、渗透率、各向异性参数等,而这些参数是利用单分量记录或各向同性模型所无法有效获取的。

在长波长条件下,如何认识地球内部介质的属性的问题是地球内部探测的一个重要问题,现有理论研究、物理实验、岩性测试以及实际资料的观测与分析均表明,地球内部介质大致存在以下几种属性:

1. 不均一性;
2. 非弹性;
3. 各向异性;
4. 非线性;
5. 随机性。

这些性质是地球内部物质的本征属性。比如泥岩的各向异性达 20% 以上,页岩的各向异性则更高达 40% 以上,而砂岩的各向异性在 10% 左右。

这些属性的研究对于地球本体与地球动力学研究灾害监测以及资源勘探与开发意义不言自喻,但科学研究及其成果的实用化具有其阶段性与必要性。迄今为止,人们对非均匀性和非弹性的研究已取得了一定的成果,但尚需进一步地工作。各向异性的研究正成为当今地震学与勘探地震学中的热点与难题,因为现有资料表明各向异性是广泛存在的,并且对岩性、裂缝、裂隙、薄互层以及应力场等均为重要的“标记”,故具有深入研究和实际应用的必要性和可行性。因此,多波多分量地震勘探与各向异性研究已成为地球科学界与有关产业部门非常关切并身体力行的一项重要研究领域。在近几年的 AGU、IUGG、SEG、IASPEI 与欧洲地球物理学会等年会上,有关地震各向异性与多波多分量研究与应用的论文所占份量越来越大,Science, Nature, Geophysics, Geophysical Prospecting, Geophysical Journal Int., JGR 等国际 SCI 与 EI 收录的学术刊物上有关多波多分量与地震各向异性方面的论文比例越来越大。参加每两年一届的地震各向异性国际学术讨论会上的国家越来越多,其报告的研究成果涉及到地球科学研究与应用的各个方面。这些均从另外一个角度表现出人们对地震各向异性以及多波多分量理论研究与应用的浓厚兴趣。

总之,多波多分量波动理论实际地震资料的采集和应用,是地震学和勘探地震学最新进展的主要体现。有人认为多波多分量地震勘探是石油地震勘探最后一块前沿阵地;复杂介质与不规则结构、构造地质条件下的地震波理论研究的深入为多波多分量地震勘探提供了主要的理论储备;开展多波多分量地震波探测不可回避地球内部不均一性地震各向异性的影响,不可忽视地震各向异

性在勘探与开发中的应用价值。正如人体内的纤维组织呈现出弹性各向异性一样,在现有地震探测条件下,地球内部的薄层、裂缝尚不足以分辨,而在地应力作用下,裂缝、裂隙会出现优势定向排列的特征,在地震波传播时,薄互层与裂缝、裂隙带内地震波速会出现各向异性特征,产生地震横波分裂现象。利用横波分裂现象便可以结合地质与其它地球物理研究结果来探测薄互层或裂缝优势方向及分布范围与密度,并可以提供地球内部应力场信息。因此,开展多波多分量地震资料处理与解释技术研究,并予以集成对于复杂地质条件下的地球本体和地球动力学研究、地质灾害监测以及资源特别是油气勘探与开发具有现实意义和实用价值。

二、多波多分量地震勘探中各向异性效应的几种体现形式

(一)薄互层效应

由于地层内传播的地震波频带范围的限制,可分辨的地层绝大部分是小厚度的薄互层束组合。此时,地震波传播的水平向速度与垂直向速度具有明显的各向异性。

(二)裂缝定向排列效应

同上述原因,而且在应力场作用下裂缝、裂隙具有其优势定向排列,在该类介质中传播的地震波具有明显的方向异性,而且裂隙内所含的油、气、水对速度和衰减各向异性具有重要的差异性。

(三)裂缝与薄互层组合效应

地球内部的介质经常是经历过多期运动的结果。此时,既可能存在薄互层组合的特性,还可能出现优势排列的裂缝效应的叠合,地震波在此类介质中传播时同样会显示出地震各向异性效应。

(四)应力场作用的结果

在地球内部应力场作用下,地球内部物质会显现出明显的方

向性,地震波速度具有其本质的各向异性效应。

(五)晶体矿物的定向排列

绝大部分矿物晶体存在不同类型、强度很大的速度各向异性。在地球的内部,由于应力场的作用,晶体矿物定向排列,从而引起强烈的地震各向异性效应。

总之,地球内部各圈层各向异性成因与表现形式可以从表0.1中略见一斑。

三、需要解决的几个实际问题

在地球深部结构系统研究方面,地球各向异性与多波多分量研究涉及到以下几个方面的问题:

1. 海洋岩石圈与大陆岩石圈各向异性结构及动力学序列分析;
2. 上地幔各向异性结构、板块构造与运动过程;
3. 核幔边界及圈层耦合关系;
4. 地幔对流与各向异性检测与检验;
5. 地质灾害孕育过程与各向异性关系;
6. 工程稳定性各向异性数据。

在资源探测方面,主要涉及以下问题:

(一)勘探目的扩大

对于横向同性的介质,在固有的各向异性和由成层所引起的各向异性之间的差别与其它比例已有一定的关系。这种差别在勘探中是有意义的,因为从地震波场来看,以数米为单元的地层可以认为是薄层,但是此种所谓薄层可能没有岩性上的意义,相反地,来自微观的成层或晶体排列的固有各向异性具有岩性意义。

(二)测线闭合问题

现有地震探测资料显示,相互正交的两条测线上正交点处的地震记录无法达到闭合,这给地震资料的处理与解释带来困惑。从介质内各向异性效应的存在性出发,不闭合现象是正常的。不闭合效应是研究地球内部各向异性效应的一种可用的有效资料。

表 0.1 地球内部圈层地震各向异性研究现状主导效应

地球内部圈层		深度范围 (km)	地震观测的 波场特征	地震各向 异性成因	效 应
大陆地壳	沉积岩盆地 地壳结晶地壳	0~5	P_H, P_V 波速度差异, S 波分裂	成层沉积岩层,垂 直裂隙和断层,岩 石叶理,糜棱岩各 向异性	油气资源盆地, 造山带与裂谷, 地震“孕育”与 活动
		0~15	S 波分裂, L_g 波和断 层反射		
	下地壳	15~30 (最厚达 70)	P 波、S 波分裂和速 度方位特征水平反 射层	可能模型:层纹状 (页状)构造,水平 剪切,充满流体的 裂隙	构造分区特征, 地震“孕育”与 活动
海洋地壳		5~11	钻孔资料,海底观 测,S 波分裂,P 波速 度方位变化	成层沉积岩层 垂直裂隙和继裂 深部热物质上涌	资源,海底扩 张,转换断层, 俯冲、消减和板 块分区
岩石圈下部	大陆	0~150	P_n 波速度方位变 化,长剖面 P 波残 差,SKS 和 SCS 波分 裂	橄榄石和直辉岩 晶格方向,构造压 力结构中已固定 的或重新定位	Moho 界带属性, 板内构造与运 移,块体边界动力 学效应,异常 下地壳和壳一 幔混合物
	海洋	10~100	P_n 波速度方位变 化,长剖面 P 波残 差,SKS 和 SCS 波分 裂,勒波夫和瑞利波 波场效应不一致	橄榄石和直辉岩 已固定的取向	Moho 界带属性, 板内构造与运 移,特别是俯冲 角度和叠加效 应
软流圈	大陆	150~400	勒波夫和瑞利波波 场效应不一致,瑞利 波速度的方位变化	当今橄榄石的取 向与流动	物质分异上涌 与构造运动,拖 曳板块运移和 火山活动
	海洋	60~400			

续表 0.1

地球内部圈层	深度范围(km)	地震观测的波场特征	地震各向异性成因	效 应
上地幔过渡区	300 ~ 700	高温高压实验 未见清晰判据	由于矿物取向(橄榄岩 β 相石与榴子石相)导致板片中的各向异性或相关	深层间断面与不均匀性和各向异性及上下介质耦合
下地幔	700 ~ 2 600	高温高压试验,地震波场观测资料不详	高密度铁镁硅酸盐矿物,钙铁钛和方镁铁矿	地幔热柱与冷柱的运移区及地幔对流环
D''区	2 600 ~ 2 900	绕射 S 波分裂	地幔对流和热动力边界层效应? 富铁合金混合物, 结晶合金和硅酸盐反应及物理与化学反应	地幔对流, 地幔热柱圈层耦合与变异
外核	2 900 ~ 5 154	S 波消失, P 波反射速度不详	外核磁流体西向运移或流体不均匀运动以及与 D'' 层的耦合	流体不均匀旋转运动? 核心对流模式
内核	5 154 ~ 6 371	地核模型分裂, PKP 和 PKIKP 波残差和转换 S 波特征	六方紧密堆积(hcp)的铁(ϵ 相)导致的轴对称各向异性	内核波速差异旋转与地球物理场效应和全球变化

(三) 中长排列动校问题

在有地球内部资料处理中的动校速度分析中主要是全部对短排列, 而由于油气勘探的需要, 中长排列观测越来越重要。此时, 人们发现中长排列动校时, 不能很好拟合。实际观测走时曲线大大偏离于所期望的走时曲线, 而这通过各向同性是无法解释的。从各向异性角度, 这些偏差信息还是提取地球内部各向异性的最重要的资源。

(四) 多波多分量噪声剔除问题

地震资料中噪声是抑制地震探测分辨率提高的重要因素。常

规单分量与双分量探测中主要是利用道间信息进行噪声剔除。采用三分量观测,不仅可以利用三分量地震数据的道间信息,还可以利用道内三分量数据的有关信息剔除三分量上不同的即各向异性噪声。

(五)裂缝排列方位与裂隙分布问题

裂缝、裂隙的优势方位的确定对于开发井的选址及其钻井注水方案,均具有重要意义。裂缝、裂隙密度与范围的确定对于储藏的评价同样具有实际价值。尽管目前可以利用井中测量、古地磁以及震源机制解等方面手段开展裂缝优选方位研究,但它们粗糙而定性。因为裂缝优选方位在纵横向均可变,而且原有方法对裂缝、裂隙的范围及其几何与物理参数的描述无任何准则可言。从多波多分量地震资料与各向异性基础出发,可望对这些信息提供有力支持。

(六)应力场问题

尽管现有探测技术可用速度或震源机制解等方法来研究特定地质区的应力场状态,但由于速度的场确定时所存在的问题以及应力场空间上的差异性,尚不能定量地描述应力场的方向及其空间上的变化。

(七)时深转换问题

时间剖面仅仅是地球内部物质、结构与构造属性的间接反映,深度剖面所展示的才是直观的地球内部图像,时深转换对于从时间剖面上恢复地球内部的图像具有重要意义,转换精度是其中的关键问题。由于现有勘探频带范围条件的限制,人们用层速度来进行时深转换,而不是垂向速度,这将造成时深转换的误差达到5%~10%。如果能求解出垂向速度,自然可以提高深度地质图像的可靠性。

四、各向异性介质中地震波传播的几个基本特征

(一)偏振特征

在各向异性介质中传播的地震 P 波与 S 波并不绝对平行或垂直于地震波的传播方向,但它们之间是相对垂直的。这些特征可用来分辨地震记录上的地震波类型。

(二)波速方位异性

各向异性介质中地震波速度随传播方向而异,而且两类 S 波的传播速度不同。这些特征可用来提取地球内部 P 波速度与各向异性信息,以解释测线不闭合以及中长排列速度分析中存在明显的偏差等现象。

(三)横波分裂特征

在各向异性介质中,任何类型的 S 波传播穿过薄互层或裂隙介质时,S 波将会分裂为偏振正交速度不同的两类 S 波,即分裂为快横波与慢横波,这些信息可以用来进行裂缝、裂隙方位与范围、应力场方向等研究。

(四)振幅衰减的方位异性

在各向异性介质中,地震波在不同传播方向上的振幅具有明显的方位异性,而且似 P 波,分裂横波的衰减特性不同,并对裂缝、裂隙的存在性及其所含物质内容(油、气、水)具有特殊的指示性。

五、需要进一步解决的几个问题

为了充分利用多波多分量地震资料中所携带的信息,尽管国内外多波多分量地震波理论与实际资料处理技术已具备实际应用能力,但笔者认为,仍然需要以“三高”为基础继续深入开展以下几项内容的研究。

(一)多波多分量地震资料中噪声的剔除

利用多波多分量地震资料中地震波运动学与动力学特征,对多波多分量地震资料中的噪声进行剔除,以提高地震资料的信噪比,为提高后续的处理解释的准确性提供支撑。常规处理中,仅仅能利用道间的有关特性去噪。多波多分量地震资料去噪将不仅仅可以利用道间信息,还可以利用道内三分量间相关信息进行噪声剔除。国际上尚无此类成果报道,我们考虑了三分量地震资料上相同的即各向同性噪声、径向与切向分量相同的各向异性噪声以及三分量不同的即各向异性噪声剔除问题。这些噪声的剔除对于提高地震资料的信噪比与纵横向分辨能力具有实际意义。经过中科院地球物理所的有关研究,具备解决该问题的良好基础,可望在近期取得有实效的三分量去噪系列新技术。

(二)多波多分量地震波速度分析

众所周知,地震波速度是地震波研究地球内部构造与岩性的关键参数,基于地震资料建立勘探与开发区的速度模型是地震资料处理与解释之中必不可少的,其精度还将决定其后续处理与解释的可靠性,多波多分量地震资料的采集对于地震波速度模型的建立具有很强的约束能力。目前存在的大多为基于声波或各向同性介质模型中声波、P波与转换PS波的地震波速度分析技术。由于地震内部存在各向异性效应,基于多波多分量地震资料的地震波速度分析技术研究各向同性介质中P波、PS转换波以及含各向异性效应具有其理论与实际意义,国际上现投入极大的精力以研究含各向异性效应的速度分析技术,并取得了可喜的进展,但还有待开发出实用的地震波速度分析技术。为此,从各向同性及各向异性介质中地震波运动学与动力学特征的分析出发,研究各向同性、各向异性介质中P波与S波的速度分析技术,是一条可行的捷径。中科院地球物理研究所提出了多波多分量地震资料的多参数