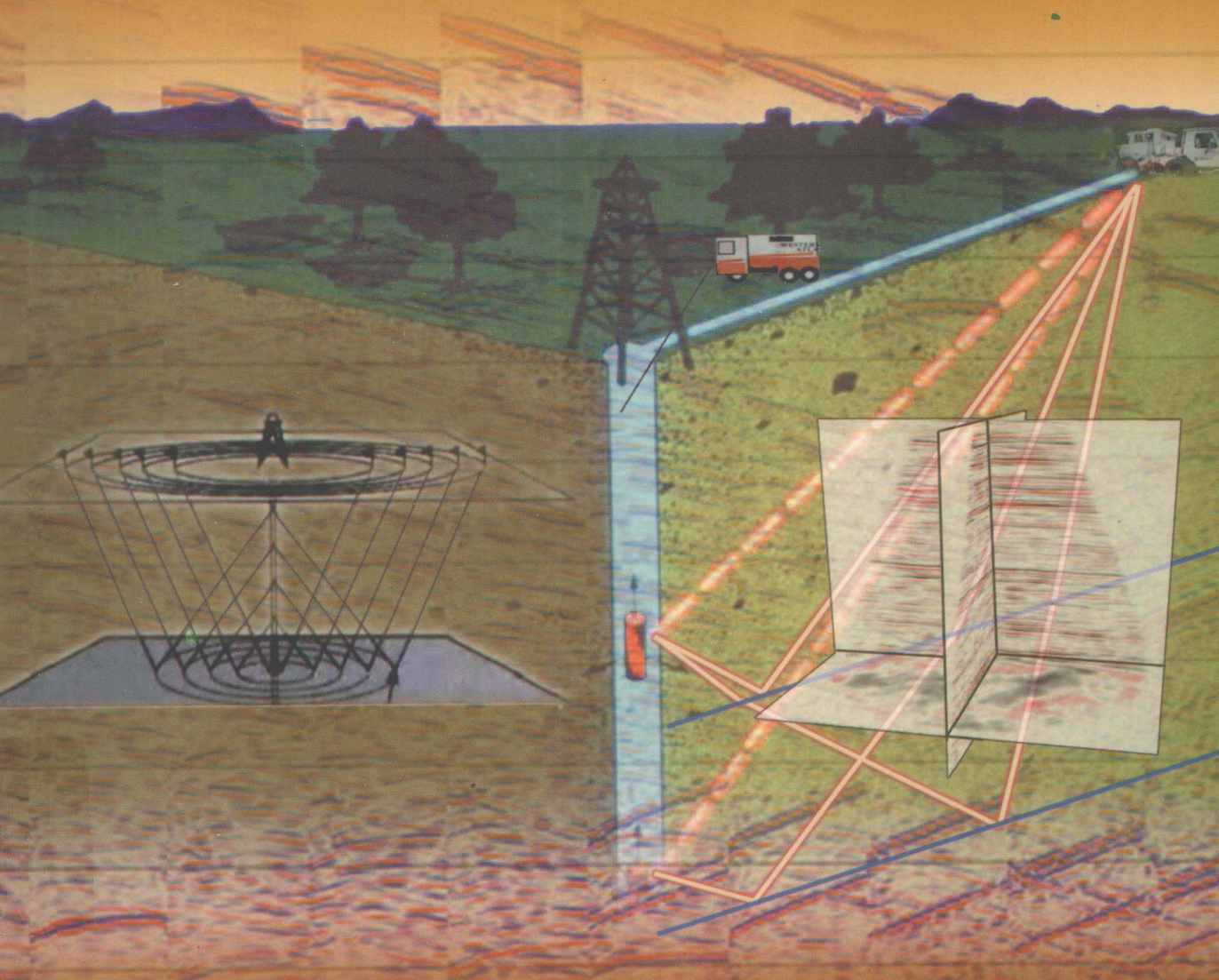


三维三分量 VSP方法原理及应用

孙赞东 等编著



石油工业出版社

三维三分量 VSP 方法原理及应用

孙赞东 等编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面介绍了三维三分量 VSP 方法, 包括 VSP 野外采集、资料处理、速度分析、偏移成像等内容。所给出的 VSP 应用实例, 内容丰富、图文并茂。

本书可供地质与地球物理方法研究人员、地震资料解释人员, 以及地震资料采集设计人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

三维三分量 VSP 方法原理及应用/孙赞东等编著.

北京: 石油工业出版社, 2011. 12

ISBN 978-7-5021-8702-6

I. 三…

II. 孙…

III. 垂直地震剖面法

IV. P631. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 194363 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 19 插页: 4

字数: 500 千字

定价: 98.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

序

垂直地震剖面 (VSP) 技术从一维 (零检距 VSP) 到二维 (偏移距 VSP) 实现了从井旁时深核实到井旁成像的目标。三维 VSP 的出现实现了井旁三维成像的目标。

三维三分量 VSP 具有所有早期 VSP 的优点, 还是井旁弹性波测量最有效、最高精度的地震工具。弹性波对流体和岩性识别具有独特的功能, 它是开发地震最有效、最可利用的工具。尤其在油田开发过程中, 通过 VSP 成像结合地面三维地震资料和岩性资料, 能进行精细的地震属性分析, 可以进一步核实关键层位, 搞清岩层之间的接触关系, 建立起精确的地质模型, 进行地层的非均质性研究, 为开发方案的调整提供技术支持。此外, 在复杂构造或复杂介质地区, 三维三分量 VSP 技术能有效地描述井旁的地质结构岩性。随着油气勘探开发的不断深入, 三维三分量 VSP 的需求越来越多。但是, 三维三分量 VSP 技术的研究和发展证明三维三分量 VSP 技术的应用关键在成像效果, 其决定因素在四大环节: 波场分离、速度建模、叠加成像和偏移成像。

孙赞东教授从 20 世纪 90 年代初开始研究 VSP 技术, 在井旁精细成像、地层裂缝预测、储层预测等方面做了大量研究工作。近年来, 作者带领团队对 VSP 基础理论及实际应用展开了一系列攻关研究: 从标量波场分离到矢量波场分离, 从旅行时反演速度建场到波场延拓速度建场, 从简单速度叠加成像到复杂介质射线追踪成像, 从克希霍夫叠前偏移成像到逆时偏移成像, 均做了大量成功尝试, 形成了一系列国际一流水平的技术方法。

本书不但详细地介绍了 VSP 技术的理论基础, 同时也给出了很多 VSP 的实例研究, 内容丰富, 图文并茂。这是一本系统阐述三维三分量 VSP 技术的书籍, 它的出版应该对石油勘探相关领域的科学工作者具有参考价值, 将会促进石油勘探开发科学的发展。

王守志

中国科学院院士
中国石油学会理事长
2011 年 8 月于北京

前 言

本书是由中国石油天然气集团公司科技管理部支持编写的《能源可持续发展研究》系列丛书之一，其编写历时近两年的时间。本书 80% 以上的内容都是笔者在 VSP 技术领域多年的研究成果，同时融入了收录在 SEG、EAGE、SPE、AAPG 等多个能源领域数据库近年来发表的近千篇代表世界 VSP 技术前沿的成果。

三维三分量 VSP 技术从产生至今一直都备受世界地质、地球物理学界专家关注。这项技术的出现克服了常规 VSP 技术中覆盖区域有一定角度的限制，对井周地层进行全方位观测。与地表三维地震类似，三维三分量 VSP 方法可以获得详细反映井周围空间的各种切片、剖面和数据体；此外，可以对井周围小构造进行高精度准确成像，研究井筒附近的地层各向异性特征，可填补地面地震成像的空白。目前，三维三分量技术已经成为油田勘探开发重要的技术手段，但目前在国内外没有系统的介绍三维三分量 VSP 技术的书籍，而业界又迫切需要一本能反映现今 VSP 技术发展现状和前景的书籍，本书就是在这种情况下酝酿而成。

垂直地震剖面（Vertical Seismic Profiling，即 VSP）方法由苏联科学界在 1959 年首先提出，现在该技术已经在石油勘探开发领域广泛应用。1971 年，加尔彼林在莫斯科出版了系统介绍 VSP 技术的第一本专著《垂直地震剖面》。西方地球物理界于 1977 年起开展了 VSP 方法的研究与服务，1980 年第 50 届 SEG 年会开始将 VSP 列为会议专题。在 20 世纪 80 年代，R. R. Stewart 和 N. Toksoz 共同出版了反映三分量 VSP 技术的著作《Vertical Seismic Profiling》。我国石油工业界 1980 年开始引进、应用 VSP 技术，朱光明教授在 1986 年编写了《垂直地震剖面方法》，较为全面地介绍了其原理和应用。VSP 技术由零偏移距逐步发展为三维三分量，1986 年 AGIP 完成第一次三维 VSP 采集。目前，VSP 采集效率和质量随着多级多分量检波器的出现取得了重大突破。处理技术是三维 VSP 的瓶颈，主要存在三大难点：波场分离、速度建模和偏移成像。波场分离是基础，速度建模是关键，偏移成像是目标。

全书共分 11 章。第 1 章 VSP 技术概况，简单介绍 VSP 的野外采集、波场特征、资料处理。第 2 章 VSP 采集架构与信号，主要介绍仪器设备（包括激发震源、检波器和地面记录系统）的结构与工作原理，分析接收信号的形态与频谱特征。第 3 章三维 VSP 观测系统设计，分析采集参数（主要是：最大井源距、

炮线距、炮点距、检波器沉放深度和级间距)对观测面积和覆盖次数的影响,根据地质目标设计和优化观测系统,以低成本获取最佳品质的地震资料。第4章 VSP 正演模拟,重点介绍交错网格有限差分法正演孔洞介质和各向异性介质的 VSP 响应。第5章零偏 VSP 资料处理及应用,讨论零偏移距 VSP 的处理流程与叠加成像。第6章非零偏 VSP 资料预处理,主要探讨静校正、真振幅恢复和三分量定向。第7章波场分离,分析比较多种标量波场分离方法,然后重点给出矢量波场分离方法,波场分离是处理的基础。第8章 VSP 速度分析,分别用逐层递推速度反演和旅行时反演两种方法求取检波器所处地层的速度,然后首次给出了求取井下地层速度的方法,分别是 VSP 时距曲线速度分析和波场延拓速度分析。第9章叠加成像,介绍 VSP-CDP 叠加成像。第10章 VSP 偏移成像,讨论 Kirchhoff 偏移、Q 补偿偏移、逆时偏移在 VSP 成像中的应用。第11章 VSP 方法应用,介绍 VSP 在岩性识别、流体探测、AVO 分析、裂缝预测、时移地震和井地联合方面的应用。除第11章的部分内容以外,其余内容均是地质地球物理综合研究中心在过去5年取得的成果。

本书是在中国石油大学地质地球物理综合研究中心孙赞东教授多年酝酿积累的基础上,历时两年编写而成的。中国石油学会理事长贾承造院士对 VSP 的研究工作长期给予了大力支持。中国石油勘探与生产分公司杜金虎副总经理特别关心和注重 VSP 在勘探与生产中的作用,积极推动本书编写并亲自承担本书的审阅定稿工作。中国石油天然气集团公司科技管理部方朝亮副主任对 VSP 研究及本书的编写也给予了大力支持。在此一并表示衷心的感谢。孙赞东教授的12名博士、硕士研究生参与了该书的研究和编写工作,他们分别是:白海军、马志霞、孙文博、谢春辉、张大伟、白英哲、李强、赵俊省、王丹、肖曦、王月英和邬世英。

由于笔者水平所限,书中不足之处,敬请专家、读者批评指正。

目 录

1 VSP 技术概况	(1)
1.1 VSP 采集技术	(3)
1.2 VSP 资料主要波场	(7)
1.3 VSP 资料处理	(9)
1.4 其他的井中观测方式	(11)
参考文献	(14)
2 VSP 采集架构与信号	(15)
2.1 激发震源	(15)
2.2 井下仪器	(29)
2.3 数据记录和传输系统	(32)
参考文献	(34)
3 三维 VSP 观测系统设计	(35)
3.1 常规地面地震观测系统参数	(35)
3.2 常规 VSP 观测系统参数	(38)
3.3 直井三维 VSP 观测系统参数优化	(41)
3.4 斜井 VSP 观测系统参数优化	(55)
参考文献	(59)
4 VSP 正演模拟	(60)
4.1 弹性波动方程	(60)
4.2 波动方程有限差分法	(61)
4.3 孔洞介质 VSP 模拟	(70)
4.4 各向异性介质 VSP 模拟	(72)
参考文献	(79)
5 零偏 VSP 资料处理及应用	(80)
5.1 零偏 VSP 资料处理	(80)
5.2 零偏 VSP 资料应用	(89)
参考文献	(94)
6 非零偏 VSP 资料预处理	(95)
6.1 处理流程	(95)
6.2 观测系统定义和资料分析	(95)
6.3 静校正	(99)
6.4 初至拾取	(102)
6.5 真振幅恢复	(103)
6.6 三分量定向	(110)
参考文献	(122)

7 波场分离	(123)
7.1 标量波场分离方法	(123)
7.2 矢量波场分离方法	(147)
参考文献	(169)
8 VSP 速度分析	(171)
8.1 逐层递推速度反演	(171)
8.2 旅行时反演	(177)
8.3 基于时距曲线速度分析	(185)
8.4 基于波场延拓速度分析	(189)
8.5 速度建模及成像	(195)
参考文献	(199)
9 叠加成像	(200)
9.1 VSP-CDP 转换	(200)
9.2 快速叠加成像	(203)
9.3 基于射线追踪的叠加成像	(208)
9.4 VSP 叠加成像的改进	(216)
参考文献	(220)
10 VSP 偏移成像	(222)
10.1 VSP 偏移的特点	(222)
10.2 Kirchhoff 积分法偏移技术	(224)
10.3 VSP 逆时偏移成像	(236)
10.4 VSP 逆时偏移抽取角道集	(237)
参考文献	(245)
11 VSP 方法应用	(247)
11.1 成像	(247)
11.2 岩性和流体	(250)
11.3 裂缝探测	(257)
11.4 各向异性分析及参数提取	(266)
11.5 VSP-AVO 分析	(273)
11.6 时移 VSP	(281)
11.7 井地联合	(288)
参考文献	(293)

1 VSP 技术概况

垂直地震剖面 (Vertical Seismic Profiling, 即 VSP) 是一种地震观测方法。这种观测系统一般是在地表附近激发地震波, 在沿井孔不同深度布置检波器接收, 它之所以被称为垂直地震剖面, 是相对于地面地震观测系统检波器在地面沿测线布置被称为水平 (或地面) 地震剖面而言。VSP 技术的出现比较晚, 国内外普遍推广使用是在 20 世纪 80 年代以后。随着生产和实践的不断深入, 出现过不同观测类型的 VSP 技术, 比如零偏 VSP、偏移距 VSP、逆 VSP、随钻 VSP 和三维三分量 VSP 等。三维 VSP 技术备受世界地质、地球物理学界专家关注, 这项技术的出现是为了克服常规 VSP 技术中覆盖区域有一定角度的限制。在三维 VSP 方法中要进行全方位观测。与地表三维地震类似, 三维 VSP 方法可以获得详细反映井周围空间的各种切片、剖面和数据体; 此外, 可以对井周围小构造进行成像, 研究井筒附近的地层各向异性特征, 可填补地面地震成像的空白。

VSP 是在地面激发地震信号, 在井中不同深度上用检波器接收并记录下地震信号的技术。进行 VSP 观测, 要有以下基本条件: (1) 震源; (2) 井孔; (3) 井下检波器; (4) 记录仪器系统。如图 1.1 所示, 在水平地震剖面勘探中, 震源和检波器都布置在地面上; 而在 VSP 中, 检波器是布置在与震源垂直的方向上, 这两种观测技术的差异可以通过图 1.1 来说明。图 1.1 中, 布置在地下深处的检波器对上行和下行地震波都有记录, 而在地面的检波器只能记录到上行的地震反射波。图 1.2 是模拟的一张 VSP 记录剖面, 从该图中可以看到直达波, 上行波、下行波在地震记录中的显示。与水平地震剖面相比, VSP 法具有以下特点: (1) 接收点分布在介质内部。VSP 法的测井检波器被安置在井中, 故 VSP 的接收点是分布在被测介质内部的, 因此, 它可用接收点的垂直方向分布形式来研究地质剖面的垂向变化, 而水平地震观测则是以接收点在地表的水平方向分布形式来观测和研究地下地质剖面的垂向变化的, 所以, 前者能更明显、更直接地反映波的运动学和动力学特征。(2) 可记录研

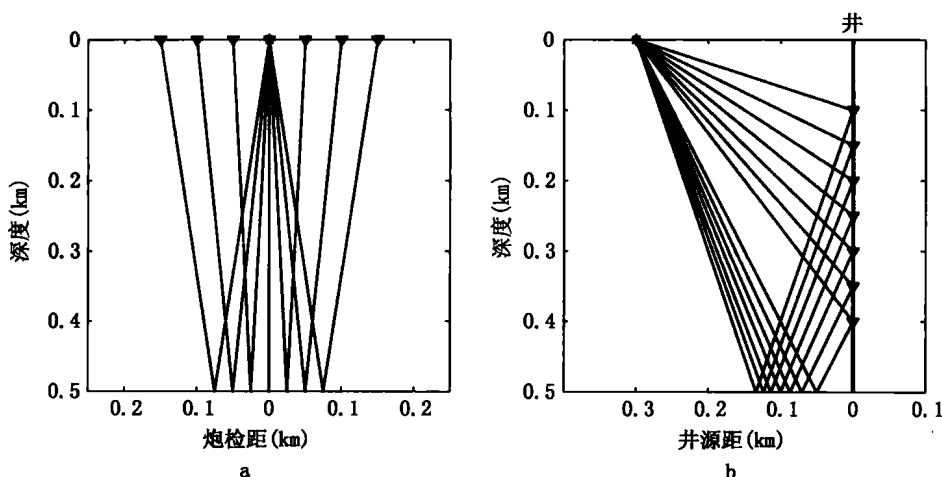


图 1.1 常规地面观测 (a) 和 VSP 观测 (b) 的比较

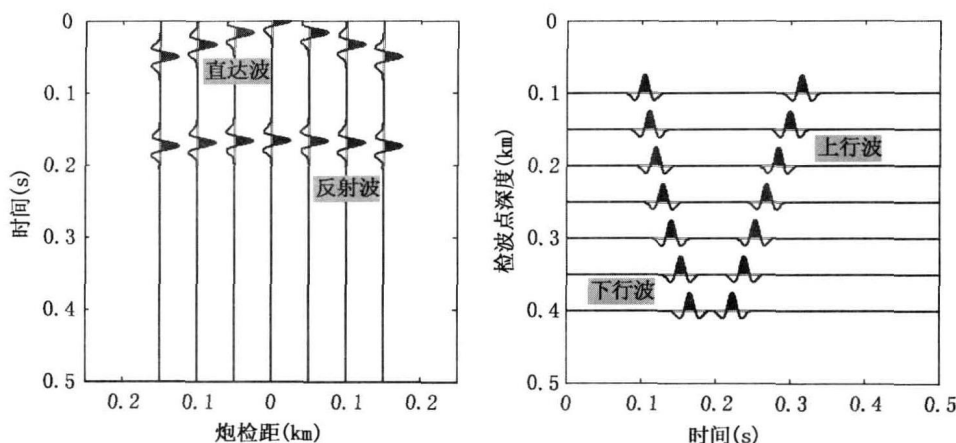


图 1.2 VSP 中几种主要地震波记录剖面图

究对象的“单一”地震波。由于 VSP 的测井检波器置于井中，故可将其放置在被测地层界面之上、附近或中间，因此检波器可直接记录由震源产生而传播到所研究对象的“单一”地震波。而常规勘探由于检波器置于地表，故只能间接接收由震源产生而又返回地表的双程地震波。(3) 干扰因素少。VSP 在井中观测可以避免或减少地面以上的自然干扰；而水平地震测量则所受干扰因素较多。所以，前者易于波的记录和识别。(4) 可记录上行波和下行波。VSP 在井中观测，既可记录到来自观测点下方的上行波（如反射波），又可以记录到来自观测点上方的下行波（如直达波），而水平地震测量只能记录到上行波，无法记录到下行波，因此在垂直地震剖面上，波的信息丰富。VSP 由于具有这些特点，所以得到日益广泛的应用。目前，VSP 除了用于改善地面记录剖面的解释外，还可用于测定平均速度、反褶积因子、反射系数、衰减系数等物理参数，并可以识别多次波、改善信噪比、提高地震分辨率，从而用于提取岩性信息和研究井孔周围细微的地质结构。由此可见，随着 VSP 技术进一步发展，垂直地震剖面法的探测能力和地质效果必将进一步得到发展和提高（涂齐催，2006）。

与地面地震相比，VSP 资料的信噪比高，分辨率高，波的运动学和动力学特征明显。VSP 技术提供了地下地层结构同地面测量参数之间最直接的对应关系，相对于地面地震法有一些明显的优点：

(1) 地面地震法进行时深关系转换时，并不能取得准确的速度，因此地面地震的时深关系有待校正。而 VSP 法中，检波器的深度以及直达波的时间可以确定，因此能够取得准确的时深关系。

(2) 可以直接观测到子波，而在地面地震中子波是未知的，VSP 中可以利用已知的子波进行反褶积运算，其效果优于常规的地面地震反褶积。

(3) 当地震波经过近地表时高频成分衰减严重，VSP 中地震波只经过近地表一次，而地面地震则经过近地表两次，因此 VSP 采集的地震波分辨率更高。

(4) 横波不经过近地表，因此 VSP 中的横波的分辨率比地面地震高。

(5) 在有些大角度构造成像时，地面地震观测不到地震波，而 VSP 法则可以采集到。

(6) 由于 VSP 反射波旅行路径较水平地震勘探反射波的旅行路径短，故其具有能量强的特点，便于清楚地观测地质体的细微变化。

(7) 因为 VSP 接收点接近目的层, 所以 VSP 一次反射波较地面地震反射波有更高的分辨率。

(8) 下行直达波能较准确地测量地震波振幅的衰减, 以研究地震波在地下介质中传播的规律。

(9) 地面地震法基本上是通过观测波场在水平方向(地表)的分布来研究地质剖面的垂向变化, VSP 是通过观测波场在垂直方向的分布来研究地质剖面的垂向变化, 因此, 波的运动学和动力学特征更明显、更直接、更灵敏。

(10) VSP 能可靠地识别地震反射层的地质层位, 改善地面地震资料的解释效果。

(11) VSP 可以利用 VSP 资料研究岩性和储层物性。

在地震采集中, VSP 覆盖面积小, 不能进行大范围的勘探, 这是 VSP 相对于地面地震的不足之处。但是, VSP 相对地面地震有众多优点, 是一种很有前途的地震观测技术。

1.1 VSP 采集技术

VSP 技术的起源最早可追溯到 20 世纪初期, Fessenden (1917) 的专利提出了将震源或检波器放在井中进行勘探的设想, 20 世纪 30 年代末, Dix (1939) 提出利用井中检波器测量时—深曲线和时间—速度关系, 随后发展成为地震测井技术。到 20 世纪 50 年代, 以加尔彼林为代表的苏联科学家研制了 VSP 观测的专门仪器设备, 试验了成套的野外工作方法, 获得理想效果。目前, VSP 已经发展成为一套完整的、独立的、新的地震勘探方法, 在油气田的勘探开发中起着重要的作用(张栋, 2005)。

VSP 采集技术的发展, 关键在于硬件设备配置和施工方法的不断求新和完善。选择合适的仪器、震源等设备组合, 可使采集工作变得更加轻松、高效; 不断进行施工方法的研究和创新, 可提高 VSP 测井的质量和速度, 取得切实可靠的原始资料, 为地震解释生产服务(赵军锋, 2003)。

1.1.1 VSP 硬件配置

VSP 采集工作需要的硬件设备包括震源、井下仪器、记录仪器、电缆绞车及辅助设备。

用于 VSP 采集的地面记录仪器, 与常规地震仪器没有什么区别, 也就是说, 目前用于野外地震勘探的所有数字地震仪均可用于 VSP 采集。VSP 测井用的电缆绞车与电测井所用的相同, 为双层铠装 7 芯电缆, 在使用中只作为地震信号的通道, 较重要的是深度拉力计数器和各种电缆头及转换头的配置。做测量用的定位测量仪和打井用的钻机等为 VSP 采集的辅助设备。VSP 采集需要测量仪器, 用于确定所测大井口及激发点的具体方位, 以及激发点到大井口的距离, 海上采集炮点随海浪不停移动, 就更需要测出每个点的具体方位, 以便于更准确地处理, 一个小型的定位仪就能满足要求。根据近几年来全国各地市场的需求和地理条件的不同, 一两台小型的可方便组装的钻机就可满足要求。

1.1.1.1 震源

激发因素的选择, 无论在水平地震勘探还是在垂直地震剖面中都起着重要的作用。VSP 震源的激发方式比较多, 几乎所有水平地震勘探的震源都可用作 VSP 的震源, 如: 海洋的 VSP 采集, 普遍应用空气枪与水枪震源; 陆地上 VSP 采集, 在炸药震源方面应用了炸药、导爆索; 在机械震源方面应用了重锤、纵、横波可控震源和电火花震源。

为了防止能量衰减, 且不使下行波掩盖上行波, 炸药量不宜过大; 为了避免地面干扰与

过多的吸收现象，最好在低速带以下激发；为适应勘探隐蔽地质体的细节，要求震源激发脉冲的频谱宽；为利用全波地震信号，最好采用纵、横波联合震源；为了保持能量的等效性与波形的一致性，需要可重复的震源。

1.1.1.2 井下仪器

井下检波器是 VSP 测量的关键设备，它需要能够承受井下的高温高压（150℃ 以上温度，几百帕压力）；具有良好的密封性，不漏水；能够牢固地推靠在井壁上，和井壁很好地耦合。井下检波器和地面检波器一样，需要接收信号的感应器和传输信号的电缆，它还有一个关键的设备，井下推靠器。通过井下推靠装置，检波器才能和井壁很好地耦合。耦合装置分不可收缩和可收缩两种。在早期，VSP 采集是采用单级单分量检波器，随着 VSP 技术的发展，发展为单级三分量检波器，现在已经发展为多级多分量检波器（张栋，2005）。

在第 2 章中，将对进行 VSP 采集时的硬件设备以及每种震源产生的信号等问题进行详细的讨论。

1.1.2 VSP 观测系统

VSP 的观测系统要根据实际研究目的、研究任务、研究区块的地质结构和所要解决的问题来决定。早期的 VSP 观测由于受到采集和接收等仪器因素的影响，一般是在井中布置一级或几级检波器接收，通过重复激发，提升检波器进行多次观测来获得多道的垂直地震剖面。随着软件和硬件技术的发展，目前已发展为多级检波器同时接收，在我国一般为 20 级，另外还有 40 级、70 级、80 级，大庆已采用了 160 级接收。VSP 观测系统的分类方案较多，根据激发点的布置情况分为正 VSP 和逆 VSP；按照井源距的不同可将 VSP 观测系统分为零偏移距、固定非零偏移距、Walkaway VSP、三维 VSP；特殊 VSP 观测方法有斜井、浅井、连井 VSP 观测系统等（马志霞，2010）。

在第 3 章中将介绍 VSP 观测系统的常规参数设置、直井和斜井的三维 VSP 观测系统的参数设置。下面简要介绍各种常见的观测系统。

1.1.2.1 零偏移距

零偏移距 VSP 观测系统，是将地面激发点布置在观测井口上的观测方式，但实际上布置的激发点与井口有一定的偏移距，该偏移距相对于勘探目的层深度较小，一般在 150m 以内，可以将其看做是一维的 VSP 观测（见图 1.3）。这是一种最简单的观测系统，解释也较容易。

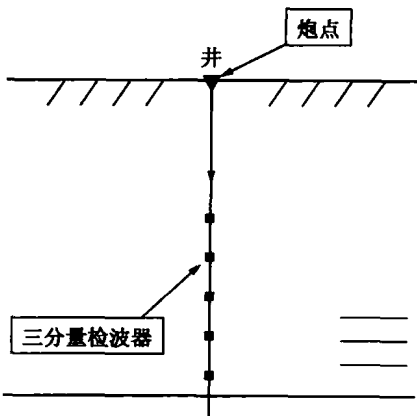


图 1.3 零偏移距 VSP 几何关系示意图

1.1.2.2 固定非零偏移距

固定非零偏移距观测系统相对零偏移距观测系统设计的偏移距较大，一般可根据目的层埋深确定偏移距大小。由于地面激发点的布置情况不同又分为非零偏移距 VSP（见图 1.4）和常数偏移距 VSP 观测（见图 1.5）。非零偏移距是在地面布置一个距离井口一定偏移距的激发点；常数偏移距是激发点在不同的方位逐次围绕井移动，每次保持激发点到井口的偏移距固定不变，这种观测系统的目的般是为了对三维倾角和走向作特殊分析。总体来说固定非零偏移距由于其偏移距的加大使得其勘探范围增大，同时解释和处理也变得比较复杂。

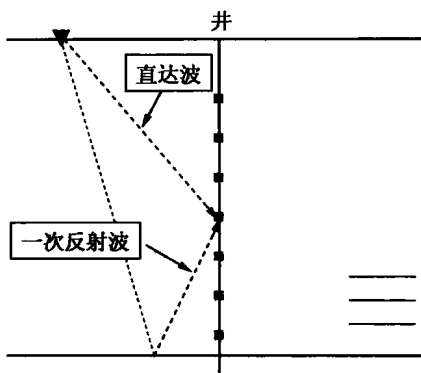


图 1.4 非零偏移距 VSP 几何关系示意图

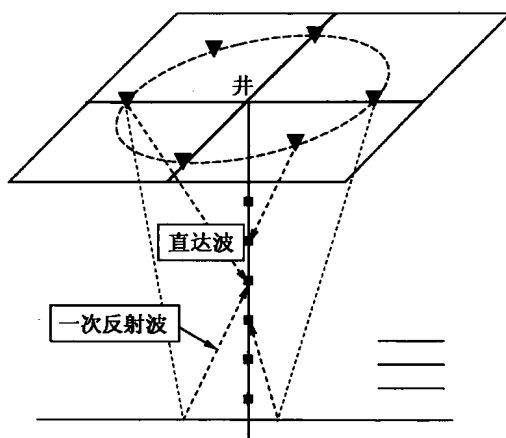


图 1.5 环状 VSP 几何关系示意图

1.1.2.3 Walkaway VSP

Walkaway VSP 又称为变偏移距 VSP 或二维 VSP，这种观测系统是沿过井的测线布置一系列的激发点，逐点激发，井中一定间隔的多级检波器同时接收的观测方式（见图 1.6）。这种观测方式可以实现共深度点叠加，提高地震剖面的分辨率。利用 Walkaway VSP 数据提供了不同入射角的波场信息，可以进行 VSP AVO 分析，反演得到地下岩石的物性参数。VSP 数据进行 AVO 分析的优势是其高分辨率和更好的振幅信息，在第 11 章中对 VSP AVO 反演的具体方法和实施步骤进行了详细的讨论。

1.1.2.4 三维 VSP

三维 VSP 是在 Walkaway VSP 平面观测的基础上发展的立体观测，3D 观测是将一条测线布置扩展为一个平面内的多条测线布置（见图 1.7），其观测的范围更广，更利于地震成像。利用井中地震资料进行井旁构造成像及岩性分析是一种十分有效的勘探技术，分析 3D VSP 技术的生产与实践可以看到，3D VSP 与地表 3D 地震勘探及其他地质、地球物理方法相结合可以解决油田用户感兴趣的一系列问题。一般来说，用户提出的需借助 3D VSP 方法解决的地质、地球物理问题如下：（1）用纵波与横波研究速度规律和各种界面的反射特征；（2）记录的纵、横波及转换波与测井资料的详细对比与标定；（3）对 CDP 时间剖面的信号

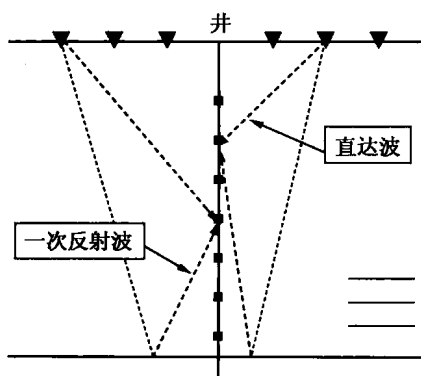


图 1.6 Walkaway VSP 观测系统

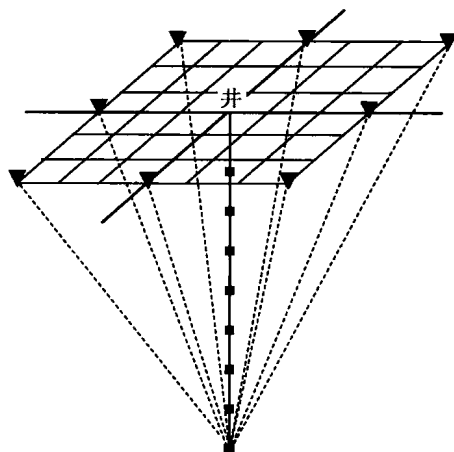


图 1.7 三维 VSP 观测系统

形状进行评价和对比；(4) 详细研究井附近空间并对井底以下剖面进行预测；(5) 与裂缝方向和流体分布非均质性有关的各向异性研究。总之，这些问题的解决是为了提高研究区井周围空间地震成像的精度，得到目的层纵、横向变化及波场动力学变化特征，研究储层的非均质性。目前，利用 3D VSP 技术可以较好解决上述问题。

三维 VSP 资料的高分辨率处理可以拓宽三维 VSP 技术的应用领域，尤其是在油气田的勘探后期和开采阶段。随着石油工业对油藏描述技术的要求不断提高，三维 VSP 技术迅速发展。三维 VSP 技术为解决储层精细构造、储层描述和储层预测等提供了更大的潜力。采集技术是影响三维 VSP 技术发展的主要瓶颈，而它的发展则受到井下仪器设备的制约。井下地震信号接收系统的研制一直伴随和影响 VSP 技术的发展。本书第 2 章中详细介绍了 VSP 的采集系统。三维 VSP 数据处理有三大关键：反射波波场分离、速度建模和偏移成像。书中第 7、8、10 章分别就这三个核心问题进行研究，提出了矢量波场分离、三维速度场建模，以及 VSP 抽道集逆时偏移方法，并在实际的三维 VSP 处理中取得了应用效果。

1.1.2.5 斜井 VSP 观测系统

上面设计的几种观测方式都是在垂直井中观测，除此之外也可以在倾斜井中观测。倾斜井的观测系统也存在零偏移距、非零偏移距、2D 和 3D 观测。VSP 采集中使用的三分量检波器在井下是不能定向的，检波器定向的结果为波场分离提供输入数据，定向的准确与否决定波场分离的效果。而斜井中的检波器定向问题更为复杂，针对当前直井和斜井 VSP 三分量检波器定向问题，本书第 4 章采用极性平面法和相对角度法联合实现直井和斜井的三分量检波器自动定向。

1.1.2.6 逆 VSP

一般情况我们所说的 VSP 观测是指正 VSP，即激发点布置在地面附近，井中布置检波器接收；而逆 VSP (Reverse VSP, RVSP) 是指激发点布置的井中，在地面布置检波器接收。由于逆 VSP 的三分量检波器布置在地表，可以比较廉价地布置地表检波器的网格。随钻 VSP 作为 RVSP 的一种，具有实时性，可以对地层进行预测。

随钻 VSP 技术与常规 VSP 技术不同，它利用钻头振动噪声作为震源，在地面用普通检波器进行测量，不仅具有地面地震和井中地震的一些优点，而且具有不干扰钻井工作、不占用钻井时间、无检波器下井风险、在深度方向可以连续测量、勘探效率高（尤其对三维观测

和多炮检、多方位观测）等特点，最重要的是它能实时预测井筒周围、钻头前方地层的构造细节，并达到减少钻探风险的目的。

钻头信号既可直接从钻头位置通过地层传播到地面（直达波），也可在钻头前方地层界面上反射后再传播到地面（反射波），还可沿钻柱向上传播到钻柱顶部不同位置（先导信号）。如果在钻柱顶部（如水龙头位置）和井场附近的地面安置传感器（检波器）接收钻头信号，钻柱顶部的传感器（先导传感器）可接收到先导信号，井场附近的地面检波器可接收到直达波和反射波信号，如图 1.8 所示（苏义脑，2010）。

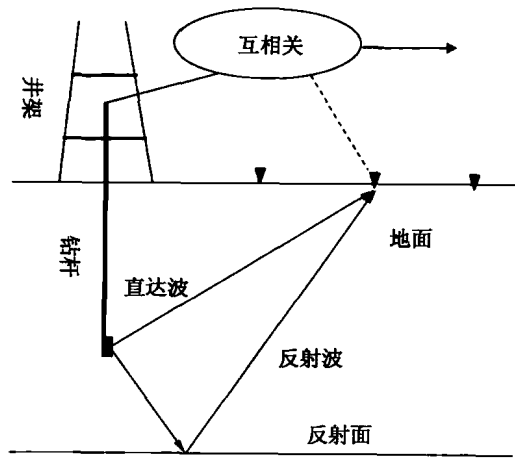


图 1.8 随钻地震测量示意图

1.2 VSP 资料主要波场

VSP 资料主要的波场包括下行波、上行波。其中下行波包括直达波，多次波，上行波包括一次反射波和多次波。另外，由于 VSP 不同于地面地震的观测方式，也有它自己的一些噪声，例如电缆波、套管波、井筒波、井下仪器耦合不良的噪声和其他噪声等。下面分别介绍上行波、下行波以及井筒波。

1.2.1 下行波

凡是接收来自观测点以上各种路径的波（无论是初至或多次波）统称下行波。

根据定义可知下行波包括直达波、多次波。

直达波是由震源点出发向接收点直接传播的波，即依次到达井内各观测点的初至波。其波的旅行时间随观测点深度增加而增大，形成的初至同相轴具有正的视速度，如图 1.9 所示。

多次波有上行多次波和下行多次波。凡是来自检波器以上的多次波都是下行多次波，其旅行时随观测点深度增加而增大，其同相轴具有正的视速度，如图 1.9 所示。

1.2.2 上行波

凡是接收来自观测点以下各种路径的波（无论是一次或多次波）统称上行波。

根据定义可知上行波包括一次反射波、上行多次波。

一次反射波是由震源点出发向下传播，在波阻抗界面处向上反射，然后传播到观测点的波。一次反射波旅行时间随观测深度增加而减小，且只有当观测点位于界面之上时才能记录到它，其同相轴具有负的视速度，如图 1.9 所示。

凡是来自检波器以下的多次波都是上行多次波，其旅行时随观测点深度增加而减小，其同相轴具有负的视速度，如图 1.9 所示。图 1.10 是实际地震资料中的记录剖面，可以看到直达波、上行波、下行波的具体显示。

1.2.3 井筒波

井筒波是 VSP 观测中最常见的一种相干噪声，多次激发时，自身会重复出现，不能像压制随机干扰那样，通过叠加消除。它是沿井柱流体传播的波，也可看成是井柱流体和其他周围地层的柱形分界面附近传播的界面波，即井筒波传播只限于井筒流体柱和围绕井的一个很薄的柱形壳层内。加尔彼林称这种波为流体波，White 等称这种波为管波。管波在套管中传播，在其传播过程中能量几乎不衰减，因此能量很强。井筒波的波场特征可见图 1.11 中方框选中的波场。

井筒波有其物理特性和准确的数学描述。当井筒波在传播过程中遇到物性间断点时，在该点上速度与能量的突变会产生一个二次震源，沿井筒柱传播的一部分能量在此处向四周空间辐射出去，形成绕射波场。当物性间断点位于接收井的井筒或井筒附近时，地震波对井筒施加一个应力，造成井筒的形变，挤压井中的液体，产生沿井筒传播的井筒波。根据追踪井

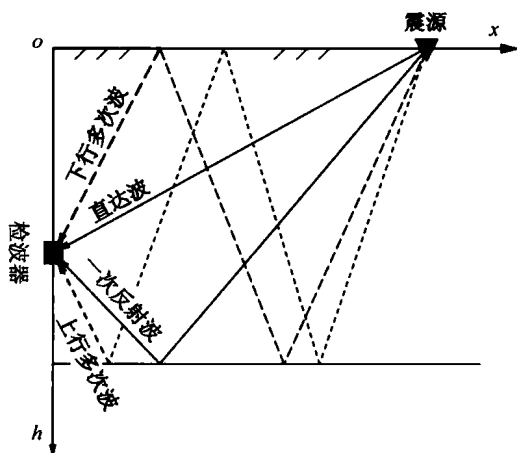


图 1.9 VSP 几种主要地震波示意图

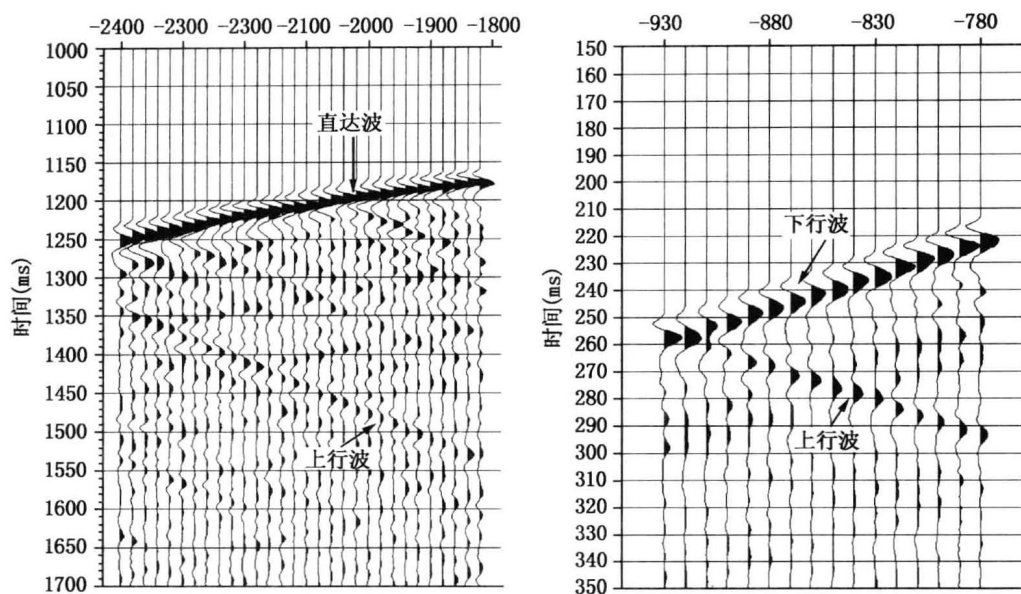


图 1.10 VSP 实际资料的记录剖面

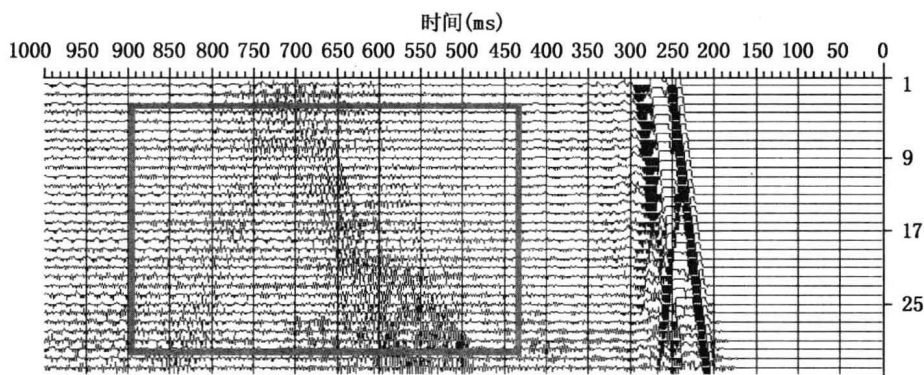


图 1.11 井筒波的剖面

筒波形成的深度和时间可以追踪井筒波的来源，将井筒波分类（详见朱光明所著《垂直地震剖面方法》一书）。

对于井筒波，其频率范围分布较广，与有效信号频率相似，不能通过数字滤波进行压制。在野外生产中压制井筒波，就是消灭形成井筒波的条件。但是，形成井筒波的条件有些是无法避免的。通过增加震源井源距，在井口和震源之间设置障碍物，在安全和实际许可的范围内降低钻井液柱顶面的高度，以及震源组台等方式均可以有效衰减管波，使野外记录到的管波尽可能弱。

有了以上各种波，就可对波场进行分析。但是 VSP 数据中的上行纵波、下行纵波、上行横波和下行横波相互重叠在一起，如果直接对 VSP 的原始波场进行成像，由于干扰波的影响，VSP 剖面成像的质量会很差。VSP 波场分离与其他资料的波场分离相比有其自身的特点。在本书第 5 章中研究了专门针对 VSP 的波场分离方法进行了研究。当对波场分离了

之后,可以通过分离后的波场进行各种处理。在第8章中讨论了用直达波和反射波计算地层速度的几种方法,计算出地下的三维速度场。

1.3 VSP 资料处理

VSP 资料处理技术和地面地震资料处理技术的原理大多数是相同的,但是 VSP 资料处理大多有它自身的特点,下面是三维三分量 VSP 资料处理的基本流程(图 1.12)。

1.3.1 三分量旋转

三分量 VSP 的观测是在地面激发,在井中布置三分量检波器接收。VSP 采集中使用的三分量检波器在井下是不能定向的,检波器在井中不同深度随机地推靠于不同方位,并且无法从仪器上知道记录时检波器的方向。三分量检波器定向问题是利用三分量资料识别不同偏振特性波的主要手段,也是三分量 VSP 资料处理的中心课题。三分量 VSP 资料处理作为一项系统工程,处理中一些关键技术还不完善,其中检波器定向是一项关键的、重要的处理技术,定向的结果为波场分离提供输入数据,定向的准确与否决定波场分离的效果。针对当前直井和斜井 VSP 采集的情况,第6章讨论了三分量直井检波器定向的改进方法,并推导出了斜井定向公式,采用极性平面法和相对角度法联合实现直井和斜井的三分量检波器自动定向。通过模型和实际 VSP 数据处理效果验证了方法的有效性。

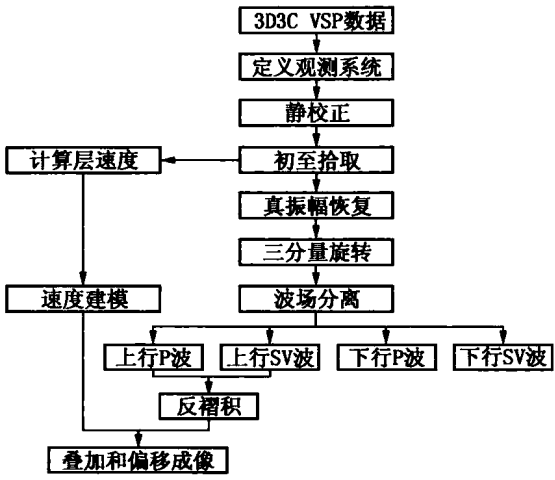


图 1.12 VSP 处理流程图

1.3.2 波场分离

VSP 资料波场丰富,有上、下行的 P 波和 P-SV 转换波和其他干扰波,而且共炮点记录的道数有限(一般等于井中检波器的接收级数),共接收点记录上波场特征接近,难以分离。做好波场分离是三维 VSP 数据处理关键的第一步,也是基础。

VSP 波场分离方法分为标量波场分离方法和矢量波场分离方法,标量波场分离方法大多是利用视速度差异或偏振信息的差异进行波场的分离。矢量波场分离方法分为三类:第一类是将前面两种或多种标量波场分离方法结合起来,最终达到分离三分量 VSP 波场的目的,这里称之为结合滤波法;第二类是基于局部参数反演的矢量波场分离方法,该方法在频率域同时考虑了波场的速度和偏振信息,并且能一次性分离出四种波,应用效果明显;第三类是各向异性矢量波场分离方法,该方法充分考虑了井下介质各向异性对波场传播方向、速度以及偏振方向的影响,是一种更为精确的波场分离方法。

第7章首先深入研究了三分量 VSP 地震资料的特点,采取标量波场分离方法、局部参数反演的矢量波场分离方法及各向异性矢量波场分离方法对 VSP 地震资料进行处理,取得了较好的效果。

1.3.3 速度建模

速度建模处理直接关系到偏移成像的好坏。从已有的资料(如零偏 VSP 和声波测井等)