

文章编号: 1000-1441(2002)03-0274-05

用 VSP 数据中下行 P-SV 转换横波求取横波速度

徐仲达¹, 郝晓红¹, 徐翔之², 施荣富²

(1. 同济大学, 上海 200092; 2. 东海公司, 上海 200030)

摘要:探讨了用零偏移距三分量 VSP 数据中的下行 P-SV 转换横波, 求取厚度相当于 VSP 采集点距的地层横波速度。从井下检波器方位校正得到横向垂直分量, 对其二维谱中各类波的能量和特点进行分析, 通过二维滤波得到信噪比较高的下行转换横波, 选取振幅较强的同相轴提取波至时间, 获取了横波速度及泊松比。结果表明, 即使是零偏移距 VSP 数据, 只要其上有明显可见的转换横波, 也能以采集点距的量级计算横波层速度。

关键词: 零偏移距; 垂直地震剖面; 方位校正; 下行转换横波; 横波层速度; 泊松比

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

Estimation of velocities of shear-waves using downward converted P-SV waves in VSP data

Xu Zhongda¹, Hao Xiaohong¹, Xu Xiangzhi², Shi Rongfu²

(Dept. of Marine Geology & Geophysics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Donghai Oil Company, Shanghai 200030, China)

Abstract: This paper discusses how to estimate velocities of shear waves traveled in strata using downward converted P-SV waves in VSP data. The thickness of the strata approximately equals to the distance between two adjacent receivers. After adjustment of azimuths for borehole receivers, the TV components of shear waves were determined. The energy and characteristics of different kinds of waves in the 2-D spectra of the resulting components were inferred. Downward converted P-SV waves of high S/N ratio are determined through 2-D filtering. By picking up the travel times for events of strong amplitudes, we computed velocities of shear waves and poisons' ratio. The results indicate that even if the VSP data is zero offset, it is still possible to estimate velocities of shear waves in strata with thickness approximately equaling to the distance between two adjacent receivers as long as the converted P-SV waves is observable.

Key words: zero-offset; VSP; adjustment of azimuth; downward converted P-SV wave; interval velocity of shear wave; poisson's ratio

岩性地震学和储层研究除了需要纵波层速度 (v_p) 外, 还需要横波层速度 (v_s)。如果能同时求得 v_p 和 v_s , 则可以得到地层的泊松比。全波测井能得到较薄地层的纵波速度、横波速度、泊松比及其它弹性参数。但由于全波测井尚未普遍实施, 且它是用 10^3 Hz 量级的高频地震波测量的, 与地震勘探采用的 10^1 Hz 量级频率有相当大的差异, 因此, 用垂直地震剖面 (简称 VSP) 求取地层纵波速度和横波速度, 从而换算出地层的泊松比是有意义的。

当上部地层中存在强反射界面, 在非法向入射时, 常会产生透射 P-SV 转换波; 入射角愈大, 强反射界面以下的透射 P-SV 转换波能量愈大。前人

已用非零偏移距的 VSP 数据中的 P-SV 转换波来计算横波速度^[1]。这里我们探讨用零偏移距 VSP 数据 (实际井源距为 40 m) 的下行转换波计算横波速度的可能性。

对零偏移距 VSP 数据来说, 由于井源距很小, 下行转换横波的能量较弱, 在 VSP 记录上表现为断续出现的弱波, 不可能直接拾取这些弱波同相轴的时间来求取转换横波的速度。

前人用转换波初至时首先求取横波平均速度曲线, 然后再据横波平均速度曲线求取横波层速

收稿日期: 2001-08-02; **改回日期:** 2002-01-28。

作者简介: 徐仲达, 男, 1941 年生, 教授, 长期从事地震勘探的教学和科研工作, 发表论文 20 余篇及“地震波理论”一书。

度,因而,求取横波速度的地层厚度一般在 100 m 以上。这里,我们在求取厚度相当于 VSP 采集点距(20m)的地层纵波速度的同时,试图求取采集点距厚度的地层横波速度,从而得到 20 m 厚地层的泊松比。这样,当 20 m 厚的深度范围内仅存在一种岩性(如泥岩或砂岩)时,就可以得到单一岩性的地层纵波速度、横波速度和泊松比,为 AVO 正演模拟等提供物性参数。

1 VSP 资料处理与结果分析

要提取相当于 VSP 采集点距厚度的地层横波速度,必须对三分量 VSP 采集的数据进行精细处理^[2]。图 1 是我们采用的从 VSP 数据中 P-SV 下行转换横波求取横波速度的处理流程。野外三分量原始数据经过编辑、自动道排除、同深度叠加、震源信号反褶积和振幅恢复后,得到了分量为 X, Y, Z

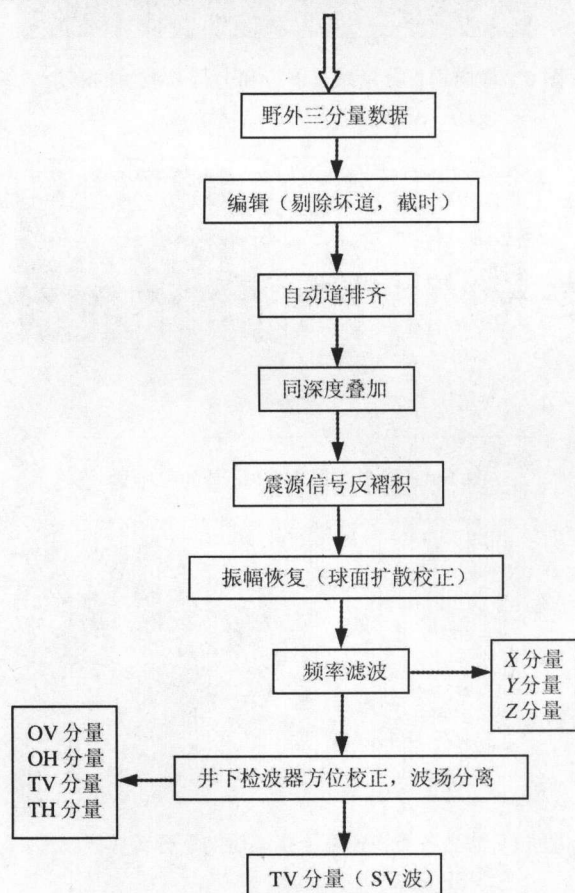


图 1 三分量 VSP 资料处理流程

3 张道集记录(图 2, 图 3, 图 4)。由图 2 及图 3 可见,在 X 和 Y 分量记录中,存在断续的视速度比下行直达纵波视速度低的同相轴,它们就是下行转换横波在检波器 X 和 Y 方向上的分量。井下检波器在自深而浅的不同深度处观测时会发生旋转,各深

度处三分量检波器中的 X 轴指向是不一致的,故 X 分量记录和 Y 分量记录都不是单纯的下行转换横波(P-SV 波),因而必须作井下三分量检波器的方位校正。校正后得到 4 个分量为径向垂直分量(OV)、径向水平分量(OH)、横向水平分量(TV)和横向垂直分量(TH)。其中 TV 分量即为转换横波(图 5)。对比图 5 和图 2、图 3 后可见,在横向

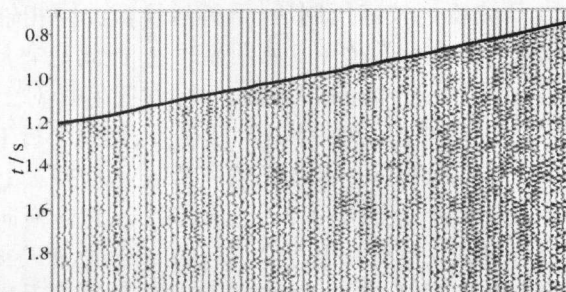


图 2 经编辑、自动道排齐、等深度叠加、信号反褶积、振幅恢复和频域滤波后的 X 分量 VSP 记录

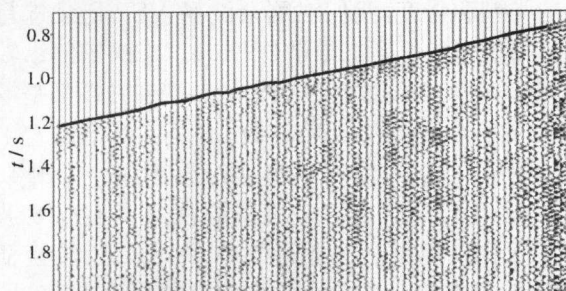


图 3 经编辑、自动道排齐、等深度叠加、信号反褶积、振幅恢复和频域滤波后的 Y 分量 VSP 记录

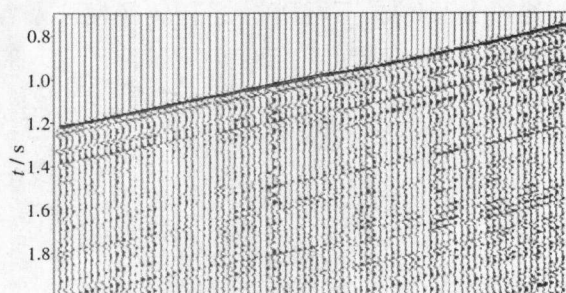


图 4 经编辑、自动道排齐、等深度叠加、信号反褶积、振幅恢复和频域滤波后的 Z 分量 VSP 记录

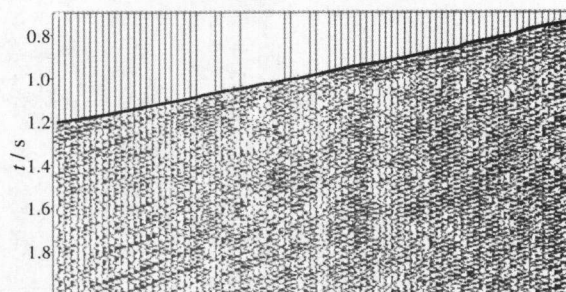


图 5 经检波器方位校正后的横向垂直分量 VSP 记录

的垂直分量 VSP 记录上视速度较低的转换横波信噪比更高。但由于我们采用的是零偏移距 VSP 数据,井源距仅 40m,故图 5 中仍存在很强的纵波成分和其它干扰波。我们针对 TV 分量中的下行 P 波进行排齐、中值滤波和反排齐,得到横向垂直分量中的下行 P 波 VSP 记录(图 6)。图 7 是横波垂直分量减去下行 P 波后的 VSP 记录。在图 7 中,下行 P 波得到较好压制后,下行转换横波同相轴的信噪比和连续性比图 5 有明显改进,但此记录上仍可看到上行 P 波的同相轴。为此,我们针对上行 P 波进行排齐、中值滤波和反排齐,得到上行 P 波 VSP 记录(图 8)。从图 7 的 VSP 记录中减去上行 P 波得到剩余波场 VSP 记录(图 9),它是横向垂直分量减去下行和上行 P 波后的 VSP 记录。虽然剩余波场 VSP 记录中的转换横波能量得到明显加强,下行转换横波同相轴时间的误差仍很大,不能据此计算横波层速度。为分析剩余波场中各种波的类型和强度,我们对剩余波场 VSP 记录进行二维傅氏变换得到二维谱(图 10)。二维谱的纵轴为频率,横轴为波数。波数轴的左端和右端都是零波数,中间的是奈魁斯特波数,因而二维谱的左半部为下行波能量,右半部为上行波能量。由图 10 可见,二维谱中仍存在较强的高视速度上行 P 波和下行 P 波能量。在上行波中,存在上行转换横波能量,这与图 9 的剩余波场中存在上行转换波同相轴是一致的。在下行波中,还存在低视速度干扰波。在上述波场分析的基础上,我们采用二维滤波,滤掉上行 P 波、下行 P 波、上行转换横波及各

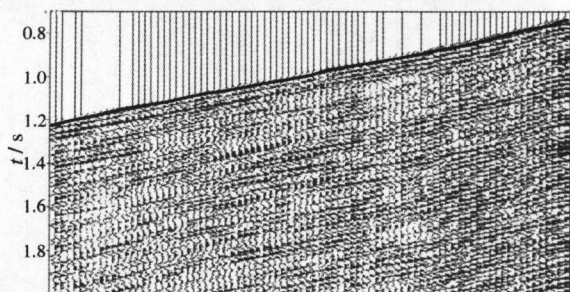


图 6 横向垂直分量中的下行 P 波 VSP 记录

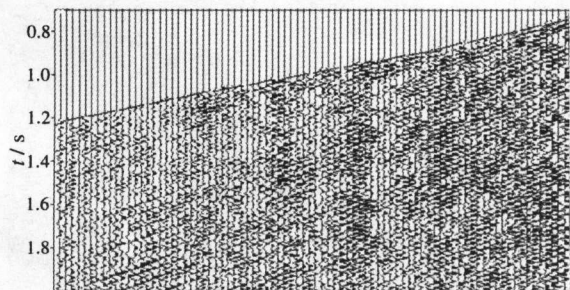


图 7 横向垂直分量减去下行 P 波后的 VSP 记录

种干扰波后,得到较好的下行转换横波 VSP 记录(图 11)。

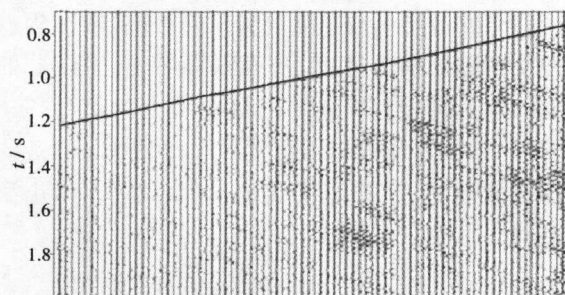


图 8 横向垂直分量中的上行 P 波 VSP 记录

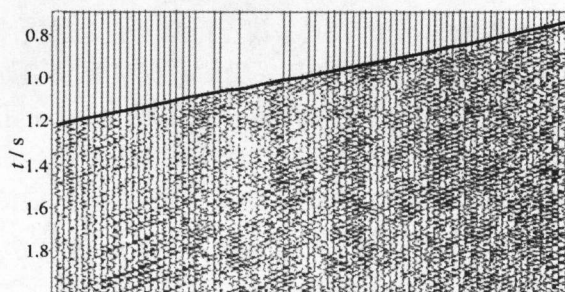


图 9 横向垂直分量减去下行和上行 P 波后的剩余波场 VSP 记录

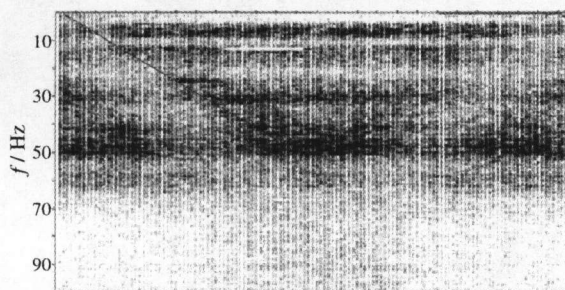


图 10 剩余波场 VSP 记录的二维谱

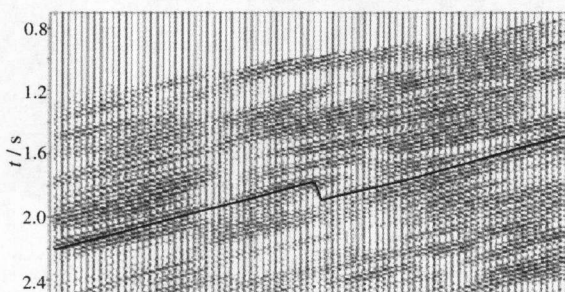


图 11 滤去各类视速度干扰波后的下行转换横波 VSP 记录

2 转换波层速度与泊松比

由图 11 可见,下行转换横波同相轴振幅是变化的,找不到一个自浅至深都是连续强波的同相轴。应当指出,由于二维滤波的局限性,不可能完

全滤掉除下行转换波以外的所有干扰波。因此,弱的下行转换横波同相轴拾取时间的精度不足以计算采集点距厚度的地层横波速度。考虑到一次下行转换横波和多次下行转换横波在同一深度范围内传播的速度是相同的,它们的同相轴具有平行性,可以分段从一次或多次下行转换横波同相轴选取强波,它们的波至时受残留的干扰波影响要小得多。我们根据此原则,在图 11 中自浅至深在 1.6~2.2s 范围选取两段强同相轴读取波至时间,然后计算采集点距厚度的地层横波速度(图 12 中的曲线 2)。图 12 中的曲线 1 是地层纵波速度。然后,根据地层的纵波速度和横波速度换算泊松比随

深度变化的曲线(图 13)。

为验证所计算的采集点距厚度的地层横波速度及泊松比的可信程度,表 1 列出了某探井各道的深度和岩性描述。由图 12、图 13 和表 1 可见,纵波速度与岩性有较密切的关系,大体可分为 3 段:第 1 段(1 660~2 250 m)以砂岩和泥岩为主,纵波速度为 3 000~3 500 m/s;第 2 段(2 250~2 850 m)以砂岩为主,且含有多个气层,纵波速度普遍高达 3 600 m/s;第 3 段(2 850~3 260 m)以泥岩为主,速度较低,在 3 400 m/s 左右。在 3 段内,纵波速度都有随深度增加而略有增大的趋势。横波速度的变化趋势与纵波速度不同,除第 2 段中有 2 个含气层

表 1 某井的深度及岩性描述

道号	深度/m	岩性描述	道号	深度/m	岩性描述
1	3 280	3 280~3 090 m,泥岩。	42	2 460	2 443~2 400 m,砂岩与泥岩互层。
2	3 260		43	2 440	
3	3 240		44	2 420	
4	3 220		45	2 400	
5	3 200		46	2 380	
6	3 180		47	2 360	
7	3 160		48	2 340	
8	3 140		49	2 320	
9	3 120		50	2 300	
10	3 100	3 090~3 070 m,沙泥岩为主,夹泥岩与砂岩。	51	2 280	2 250~2 205 m,砂质泥岩、砂岩与泥岩互层
11	3 080		52	2 260	
12	3 060		53	2 240	
13	3 040		54	2 220	
14	3 020		55	2 200	
15	3 000		56	2 180	
16	2 980		57	2 160	
17	2 960		58	2 140	
18	2 940		59	2 120	
19	2 920	2 865~2 795 m,砂质泥岩为主,夹泥岩与砂岩	60	2 100	2 100~1 950 m,泥岩,其中,2 025~2 036 m 为砂质泥岩。
20	2 900		61	2 080	
21	2 880		62	2 060	
22	2 860		63	2 040	
23	2 840		64	2 020	
24	2 820		65	2 000	
25	2 800		66	1 980	
26	2 780		67	1 960	
27	2 760		68	1 940	
28	2 740	2 795~2 755 m,气砂为主,与泥岩互层。	69	1 920	1 890~1 750 m,泥岩为主夹砂质泥岩。
29	2 720		70	1 900	
30	2 700		71	1 880	
31	2 680		72	1 860	
32	2 660		73	1 840	
33	2 640		74	1 820	
34	2 620		75	1 800	
35	2 600		76	1 780	
36	2 580	2 574~2 497 m,泥岩与砂质泥岩为主,夹砂岩。	77	1 760	1 750~1 660 m,砂岩为主夹泥岩和砂质泥岩。
37	2 560		78	1 740	
38	2 540		79	1 720	
39	2 520		80	1 700	
40	2 500		81	1 680	
41	2 480		82	1 660	

段具有较高的横波速度(达到 2 300 m/s)外,第 1 段的横波速度较低,在 1 700 m/s 左右,第 2 段和第 3 段的横波速度较高,为 1 800 m/s 左右。

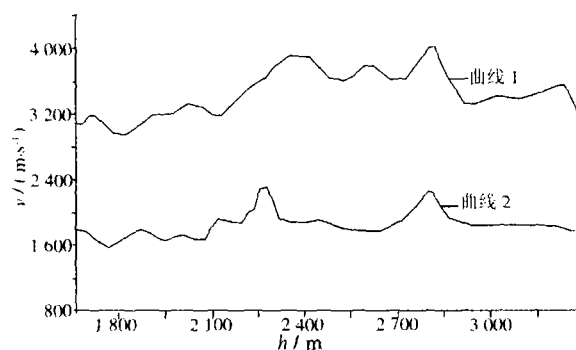


图 12 纵波层速度(曲线 1)与转换横波层速度(曲线 2)

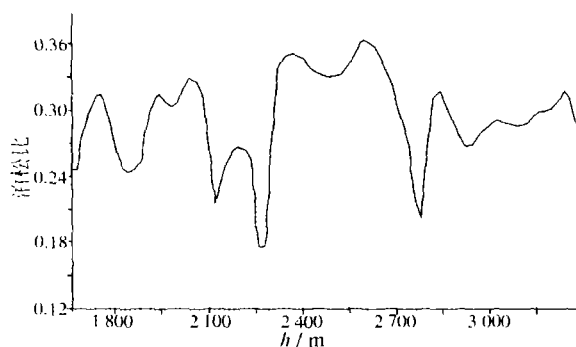


图 13 泊松比曲线

对泊松比曲线而言,第 1 段中,1 800~1 900 m 的泥岩泊松比较低,在 0.27 左右;1 900~2 100 m 的泥岩泊松比在 0.30 左右;2 100~2 150 m 的低泊松比(0.21)是由于风化壳的纵波速度降低而导致的。第 2 段中,2 250~2 300 m 的低泊松比(0.18 左右)和 2 750 m 左右的低泊松比(0.2)是含气砂岩所致;其余砂岩夹泥岩泊松比较高,在 0.33~0.36 之间,其横波速度较低,在 1 900 m/s 左右,其中含气砂岩太薄。第 3 段的岩性以泥岩为主,其泊松比随深度的增加而增大,在 0.28~0.33 之间。

值得指出的是,在已知的厚度较大的主要含气层横波速度增大,泊松比降低,表明所计算的相当于 VSP 采集点距厚度的地层横波速度基本上是可

3 结论

通过一个实际零偏移距三分量 VSP 数据处理表明,在对零偏移距三分量 VSP 数据进行波场分析的基础上,提取下行 P-SV 转换波的波至时间是可行的,据此可求取横波速度和泊松比,其前提是在零偏移距 VSP 的 X 和 Y 分量 VSP 记录上存在较明显的 P-SV 转换波。这提供了利用现有大量零偏移距 VSP 数据提取横波速度信息的新途径,从而更好地为 AVO 技术等储层研究提供更多的物性参数。

计算相当于采集点距这样的小厚度地层(20 m 左右)的层速度,对波至时拾取精度要求很高。即使有产生较纯的 P-SV 转换横波的强反射界面,转换横波的能量通常比纵波仍弱得多,因此,必须同时利用不同波型的质点运动特性和运动学特征,才能得到较可信的横波速度和泊松比。

VSP 采集点距较小(在 20 m 左右),相邻两深度点间的透射波传播时差一般在 5~10 ms。当前 VSP 采集时的采样率为 1 ms,将产生 10%~20% 的相对误差,建议提高采样率至 0.5 ms。

在井下检波器方位校正时,有时很难根据下行 P 波在 X 及 Y 分量 VSP 记录的初至时段中波的极化分析,精确地确定 VSP 采集过程中井下三分量检波器的方位。这样严重影响从 X, Y, Z 三分量数据向 OV, OH, TV, TH 四分量的转换精度,所得到的 TV 分量并不是较纯 P-SV 转换波,导致横波速度计算精度降低。建议在 VSP 采集时采用陀螺仪记录井下三分量检波器的实际方位,这对零偏移距 VSP 数据更为重要。

参 考 文 献

- 1 吕功训. 利用 VSP 资料中 P-SV 转换波求取横波速度参数[J]. 地球物理技术汇编, 1991, 15: 150~164
- 2 朱光明. 垂直地震剖面方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988, 143 页
- 3 Ahmed H. Application of mode-converted shear waves to rock-property estimation from vertical seismic profiling data[J]. Geophysics, 1989, 54(4): 478~487