

文章编号: 1001-1986(2014)01-0068-04

两种薄层弹性参数多波联合反演的对比

成联正¹, 杨春², 叶树刚³, 王赞¹

(1. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 3. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 针对薄层及多波联合反演两大研究热点, 以薄层频率域反、透射系数为基础, 建立了两类薄煤层模型——强阻抗和低阻抗差异薄层, 并对其分别进行单纯P波、S波及PP波与PS波联合反演。利用反演结果及误差分析, 对比了单种波反演和联合反演的效果, 从模型反演数据证实了对于薄层而言, PP波和PS波联合反演比P波或者S波单纯反演具有更好的效果。

关键词: 薄层; 多波; P波; S波; 联合反演

中图分类号: P631 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2014.01.016

Analysis of two typical thin bed elastic parameter prediction using multi-wave joint inversion

CHENG Lianzheng¹, YANG Chun², YE Shugang³, WANG Yun¹

(1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;

3. Xi'an Research Institute Co., Ltd, China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China)

Abstract: Thin bed and multi-wave joint inversion are two major research focuses in fossil energy exploration. In the paper, two types of thin-bed coal models including strong impedance difference (model I) and weak impedance difference (model II) have been built. These researches were based on reflection and transmission coefficient of thin layer in frequency domain. Then elastic parameters of the models could be respectively predicted by using P-wave, S-wave inversion and PP&PS joint inversion. Model error analysis and inversion result were used to evaluate the effect of inversion methods, have theoretically confirmed that joint inversion of PP&PS is better for thin bed model than single inversion of P-wave or S-wave.

Key words: thin bed; multi-wave; P-wave; S-wave; joint inversion

在化石能源勘探开发中, 薄层的预测与反演是油气和煤炭、煤层气、页岩气等资源勘探开发的研究难点与热点。关于薄层的问题很早就引起人们的注意, 前人从理论上研究了薄(互)层的几何特性、物理特性与地震响应之间的对应关系, 从时间域及频率域获得薄层的反、透射系数^[1-6], 为薄层的反演提供了可能。

伴随着复杂油气藏描述与反演精度要求的提高, 多波多分量勘探在油气勘探领域占据着越来越重要的地位。由于多波叠前资料保留了多次覆盖得到了丰富的地下地质、岩性和油气信息, 而在众多的动力学参数中, 振幅信息又是最灵敏、最具体、最直观地反映地层弹性性质的参数。因此, 充分、有效地利用多波振幅信息是多波、多分量地震勘探

中的重要问题^[7-10]。Stewart^[11]首先将加权叠加的思想用于联合反演, 给出了单界面纵横波联合反演方法; Larsen等^[12]探讨了利用PP波和P-SV转换波加权叠加联合反演纵横波阻抗的方法及其实际应用效果; Margrave等^[13]将PP波、PS波加权叠加联合反演用于Blackfoot Field, 与PP波反演结果相比, P波及S波阻抗反演效果得到显著改善, 似泊松比反演结果也有较好的提高; CREWES小组在“Joint Simultaneous inversion of PP and PS seismic data”报告中将联合反演用于重油数据体反演也获得较P波更好的结果; 孙鹏远等^[14]从P-SV转换波反射系数幂级数近似公式出发给出了多个由不同参数组合表示的P-SV转换波反射系数近似式, 并探讨利用近似式进行AVO加权叠加参数反演的理论和方法, 直接反演剪切模量

收稿日期: 2013-01-20

基金项目: 国家科技重大专项课题(2011ZX05035-001; 2011ZX05035-002)

作者简介: 成联正(1986—), 男, 云南镇雄人, 硕士研究生, 从事地球物理联合反演方法研究。

$\Delta\mu/\mu$ 和 $\Delta\mu\rho/\mu\rho$ 型流体因子, 获得了较高的精度和稳定的反演结果, 符志国^[15]对常用的3种多波叠前联合反演的方法进行了对比分析, 归纳了其适用条件, 指出Fatti近似公式能稳定地获取阻抗信息; 王明春^[16]以各向异性介质理论为基础, 利用多波AVA资料进行了多方式反演, 通过比较单分量资料反演和多分量资料联合反演得到地层岩性参数, 发现由于利用P-P和P-SV多波资料联合反演, 增加了约束条件, 得到了更为可靠的横、纵波速度、地层密度和各向异性参数等重要的地层岩性参数; 李录明等^[17]用三维三分量资料及前期处理结果, 以各向异性(TI) 介质弹性波传播理论为基础, 研究了多波精确振幅特征方程, 采用纵横波联合叠前反演方法提高了反演的可靠性和精度。

基于以上研究热点, 本文利用反射系数谱薄层公式^[5-6]对薄层参数进行反演, 借鉴单界面及各向异性介质的情况, 探讨薄层的多波联合反演是否优于单纯波反演, 从模型反演误差来论证薄层联合反演的必要性。

1 薄层反演方法

薄层的反射系数谱公式^[5-6]十分复杂, 无法表达成纵波速度、横波速度和密度(或其变化率)等参数的显示形式。这里用基于非线性最小二乘法原理构造目标函数, 并用局部寻优法加以反演。

根据薄层反射系数谱公式, 对于三层介质薄层模型, 需要反演的是三层介质的纵波速度、横波速度、密度、入射 P 波频率和第二层的厚度, 即 V_{P1} 、 V_{S1} 、 ρ_1 、 V_{P2} 、 V_{S2} 、 ρ_2 、 V_{P3} 、 V_{S3} 、 ρ_3 、 w 和 H 共计 11 个参数。若 $R_0(\theta_i)$ 为已知的一定入射角 θ_i 时的纵波或横波反射系数($i=1,2,3,\dots,N$), N 为已知的入射角个数, $R'(\theta_i)$ 为迭代过程中根据一组新解 S' (需要反演 11 个参数) 得到的薄层的反射系数, 则目标函数为:

$$f(S') = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\frac{R'(\theta_i) - R_0(\theta_i)}{R_0(\theta_i)} \right]^2} \quad (1)$$

即迭代过程中根据一组新解计算的反射系数与观测值的误差百分比的均方根。

为了提高反演的精度和反演速度, 通常对于纵、横波速度和密度有个大概的约束范围。对野外实际数据进行反演时, 往往根据工区的先验信息缩小各个参数的约束范围。如果工区的先验信息比较少, 可以根据一些经验公式加以约束。由于这里针对的是模型反演, 故采用以下经验公式加以约束:

a. 对于富含水的碎屑岩, 其纵横波速度大致满

足 Castagna 等拟合的泥岩趋势线^[18]:

$$V_p \approx 1360 + 1.16V_s \quad (\text{单位: m/s}) \quad (2)$$

b. 密度和纵波速度一般满足 Gardner 的经验关系式^[19]:

$$\rho = 0.31 * V_p^{0.25} \quad (3)$$

2 反演模型及数据分析

按照中间层与第一、三层岩性参数差别大小, 根据煤的超声实验所获得的弹性参数^[20], 建立两类类似于煤层的薄层模型(厚度 3 m), 模型 I 具体参数如表 1。

表 1 岩性差别大的薄层模型-模型 I
Table 1 Thin bed model with large lithological difference

layer	$V_p/(m \cdot s^{-1})$	$V_s/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$
1	4 300	2 525	2.5
2	3 120	1 515	2.32
3	4 300	2 525	2.5

通过正演计算, 确定其反射系数, 并取一定范围入射角时的反射系数值作为反演时的观测点 $R_0(\theta_i)$ 。图 1 是入射波频率为 30 Hz 时薄层的反射系数正演结果。由于在实际地震勘探中测线长度有限, 对应的入射角一般不超过 50° , 故这里的反射系数也只显示到 50° (本模型临界角 46.5°)。

如图 1 所示, 分别取入射角为 $(0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ,$

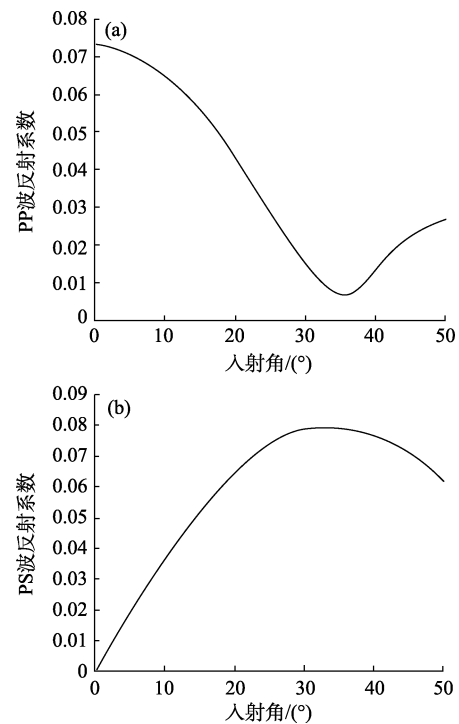


图 1 模型 I 的 PP 波(a)、PS 波(b)反射系数随入射角的变化
Fig.1 Variation of PP and PS wave reflection coefficient of model I with incidence angle

40°, 50°)时对应的 PP 波振幅(0.073, 0.065 1, 0.043 7, 0.015 8, 0.013 4, 0.027 2)或 PS 波振幅(0, 0.036 2, 0.064 4, 0.078 8, 0.077 3, 0.06 19)作为观察点的 6 个数据进行反演。反演时参数的选择范围和步长为: $2\ 300 < V_{S1} < 2\ 800$, $1\ 300 < V_{S2} < 1\ 500$, $2\ 300 < V_{S3} < 2\ 800$,

步长取 10。这样, 根据 PP 波或 PS 波的薄层反射系数公式就可以分别进行纵横波反演。反演结果及误差对比如表 2。

模型 II 参数如表 3 所示(临界角 72°)。同样, 取 50°以内的振幅值, 如图 2。

表 2 模型 I 的 PP 波、PS 波、PP 波和 PS 波反演结果及误差
Table 2 PP, PS, PP and PS inversion results and errors of model I

参数	模型参数	PP 波反演结果	PS 波反演结果	PP 波和 PS 波反演结果	PP 波反演误差/%	PS 波反演误差/%	PP 波和 PS 波反演误差/%
$V_{P1}/(m \cdot s^{-1})$	4 300	4 596.4	4 596.4	4 573.2	6.89	6.89	6.36
$V_{P2}/(m \cdot s^{-1})$	3 120	3 355.2	3 285.6	3 297.2	7.54	5.31	5.68
$V_{P3}/(m \cdot s^{-1})$	4 300	4 167.2	4 028	4 120.8	3.09	6.33	4.17
$V_{S1}/(m \cdot s^{-1})$	2 525	2 790	2 790	2 770	10.50	10.50	9.70
$V_{S2}/(m \cdot s^{-1})$	1 515	1 720	1 660	1 670	13.53	9.57	10.23
$V_{S3}/(m \cdot s^{-1})$	2 525	2 420	2 300	2 380	4.16	8.91	5.74
$\rho_1/(g \cdot cm^{-3})$	2.5	2.55	2.55	2.55	2.00	2.00	2.00
$\rho_2/(g \cdot cm^{-3})$	2.32	2.4	2.35	2.35	3.45	1.29	1.29
$\rho_3/(g \cdot cm^{-3})$	2.5	2.49	2.47	2.48	0.40	1.20	0.80
误差均值					5.72	5.78	5.11

表 3 岩性差别小的薄层模型
Table 3 Thin bed model with small lithological difference

layer	$V_P/(m \cdot s^{-1})$	$V_S/(m \cdot s^{-1})$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$
1	2 850	1 380	2.27
2	2 600	1 000	2.20
3	2 850	1 380	2.27

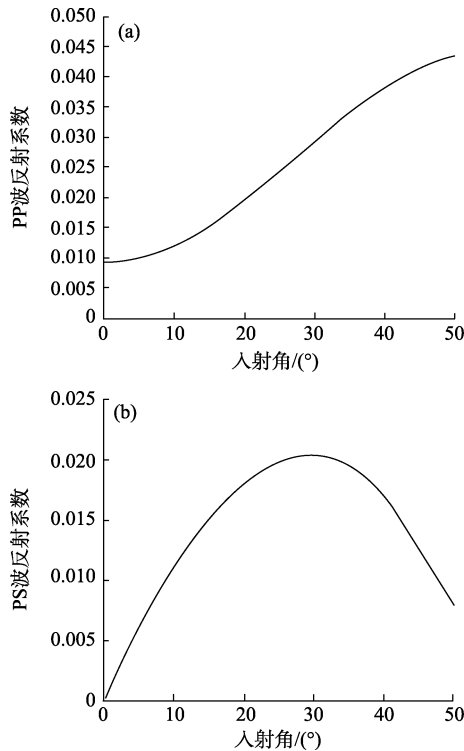


图 2 模型 II 的 PP 波(a)、PS 波(b)反射系数随入射角的变化
Fig. 2 Variation of PP and PS wave reflection coefficient of model II with the angel of incidence

类似地, 也取入射角度为(0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50°)时对应的 PP 波振幅(0.026 6, 0.022 7, 0.012 1, 0.003 4, 0.014 9, 0.020 8)或 PS 波振幅(0, 0.020 1, 0.036, 0.044 4, 0.044 1, 0.035 8)作为观察点的 6 个数据进行反演。反演时参数的选择范围和步长为: $1\ 000 < V_{S1} < 1\ 500$, $800 < V_{S2} < 1\ 300$, $1\ 000 < V_{S3} < 1\ 500$, 步长 10。反演结果及误差对比如表 4 所示。

从上面的反演结果及误差来看, 可以获得如下认识:

a. 在利用 PP 波单独对岩性参数差别大的模型进行反演时, 最大误差为 10.5%; 对岩性参数差别小的模型进行反演时, 最大误差为 20%, 从这个意义上讲, 反演结果前者好于后者。但反观 PS 波单独反演和 PP 和 PS 波联合反演效果, 两种岩性差异的模型之间的反演结果差异很小。因此, 对薄层的 AVO 反演而言, 岩性差异对反演结果影响不如对单界面那样影响大。

b. 对于绝大多数待反演参数而言, 单独用 PP 波反演和单独使用 PS 波进行反演得到的结果差异不大。这是由于 PP 波和 PS 反射系数正演公式中, 均涉及到全部参数(三层的纵、横波速度和密度), 即两个公式对参数的使用频率不存在明显偏重。

c. 利用 PP 波和 PS 波进行联合约束反演时, 效果好于单独利用 PP 波或 PS 进行反演的结果。这一点岩性差异小的模型反演中特别明显, 这也证实了薄层联合反演的必要性。

d. 由于使用局部寻优法即穷举法进行反演, 误

表 4 模型 II 的 PP 波、PS 波、PP 波和 PS 波反演结果及误差
Table 4 PP, PS, PP and PS inversion results and errors of model II

参数	模型参数	PP 波反演结果	PS 波反演结果	PP 波和 PS 波反演结果	PP 波反演误差/%	PS 波反演误差/%	PP 波和 PS 波反演误差/%
$V_{P1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2 850	3 065.2	2 775.2	3 088.4	7.55	2.63	8.36
$V_{P2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2 600	2 288	2 508.4	2 462	12.00	3.52	5.30
$V_{P3}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2 850	2 972.4	3 076.8	3 018.8	4.29	7.96	5.92
$V_{S1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1 380	1 470	1 220	1 490	6.52	11.59	7.97
$V_{S2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1 000	800	990	950	20.00	1.00	5.00
$V_{S3}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1 380	1 390	1 480	1 430	7.25	7.25	3.62
$\rho_1/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.27	2.31	2.25	2.31	1.76	0.88	1.76
$\rho_2/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.2	2.14	2.19	2.18	2.73	0.45	0.91
$\rho_3/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.27	2.29	2.31	2.3	0.88	1.76	1.32
误差均值					7.0	4.12	4.46

差曲线随着循环的进行呈现上下振荡形态,得到的反演结果即是在误差最小时所对应的那套用于迭代的参模型数。

3 结 语

根据薄层与围岩岩性差异大小,建立了两种典型模型,并应用薄层频率谱反透射系数公式及局部寻优法对薄层进行单波形及 PP 波和 PS 波联合反演,从反演误差分析可知:薄层的联合反演效果优于单波形反演;且对于绝大多数待反演的参数,单独用 PP 波反演和单独使用 PS 波进行反演得到的结果差异不大。

利用模型反演结果论证了薄层联合反演优于单波形反演,薄层的联合反演将成为以后薄层反演研究的重点。

由于利用局部寻优法进行反演,误差曲线随循环的进行呈上下震荡形态,则在以后的工作中,需要寻求更优的薄层反演方法,以得到更好的反演结果。

对于定义的煤层模型,使用的还是适用于砂泥岩的 Castagna 和 Gardner 公式,由于这 2 个经验公式对于煤层的拟合精度较差^[20],对模型参数反演误差的影响也是需要进一步实验讨论的。

参考文献

- [1] 戈革. 地震波动力学基础[M]. 北京:石油工业出版社,1980.
- [2] 汪恩华,贺振华,李庆忠. 基于薄层的反射系数谱理论与模型正演[J]. 成都理工学院学报,2001,28(1):70-74.
- [3] CHEN T S, LIU Y. Multi-component AVO response of thin beds based on reflectance spectrum theory[J]. Applied Geophysics, 2006, 3(1): 27-36.
- [4] LIU Yinbin, SCHMITT D R. Amplitude and AVO responses of a single thin bed[J]. Geophysics, 2003, 68(4): 1161-1168.
- [5] 王建华. 叠前弹性参数反演新方法[D]. 青岛:中国海洋大学,

2006.

- [6] 叶树刚. 含油气性和岩性变化引起的多波地震 AVO 响应特征[D]. 北京:中国地质大学,2010.
- [7] 钟峙,史运华,魏飞. 多波叠前参数反演过程及效果[J]. 内蒙古石油化工,2010(8):18-20.
- [8] 陈天胜,刘洋,魏修成. 纵波和转换波联合 AVO 反演方法研究[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(1):33-37.
- [9] 张春涛,王尚旭. PP 波和 PS 波联合反演研究进展[J]. 科技导报,2010,28(10):106-110.
- [10] 李录明,罗省贤. 多波 AVO 及岩性预测[J]. 石油地球物理勘探,1996,31(2):190-204.
- [11] STEWART R R. Joint P and P-SV inversion[R]. Calgary: CREWES Research Report, 1990.
- [12] LARSEN J A, MARGRAVE G F, LU H. AVO analysis by simultaneous P-P and P-S weighted stacking applied to 3C-3D seismic data[C]. Mtg: Expanded Abstracts of the 59th SEG Mtg, 1999: 721-723.
- [13] MARGRAVE G F, STEWART R R. Joint PP and PS seismic inversion[J]. The Leading Edge, 2001(9): 1048-1052.
- [14] 孙鹏远,孙建国,卢秀丽. P-SV 转换波 AVO 加权叠加反演[J]. 石油地球物理勘探,2004,39(3):271-274.
- [15] 符志国. 多波叠前联合反演方法[J]. 天然气工业,2007,27(增刊 1):471-474.
- [16] 王明春. TI 介质多波 AVO 联合反演岩性参数方法及应用[J]. 天然气工业,2007,27(4):49-52.
- [17] 李录明,罗省贤,王明春,等. 各向异性介质三维纵横波联合叠前反演方法及应用[J]. 石油地球物理勘探,2010,45(1):60-65.
- [18] CASTAGNA J P. Principles of AVO cross plotting[J]. The Leading Edge, 1997(16): 337-342.
- [19] GARDNER G H F, GARDNER L W, GREGORY A R. Formation velocity and density-The diagnostic basics for stratigraphic traps[J]. Geophysics, 1974, 39(6): 770-780.
- [20] 王赞,许小凯,张玉贵. 6 种不同变质程度煤的纵横波速度特征及其与密度的关系[J]. 地球物理学报,2012,55(11): 3754-3761.