

文章编号: 1673-9620(2007)03-0022-03

基于 Radon 变换的孔隙介质参数反演^{*}

班书昊, 李晓艳

(江苏工业学院 机械工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 针对层状介质, 结合了费马原理、Radon 变换, 提出了基于等效孔隙介质模型的 CT 技术物性参数成像法, 并使用遗传算法对速度、孔隙度、岩石密度以及波阻抗进行了反演。理论分析与实例计算结果表明: 该方法简化了波在双相孔隙介质中的传播方程, 具有一定的实用价值, 能够有效解决含油区的勘探问题。

关键词: 反演; 层状介质; CT 技术; 等效孔隙介质模型

中图分类号: TE 132.1

文献标识码: A

Parameters' Inversion of Porous Media basis of Radon Transform

BAN Shu-hao, LI Xiao-yan

(Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: A new CT method of physical parameters for stratiform media including Fermat principal and Radon transform, based on the equivalent model of porous media, is studied, and inversion of physical properties such as velocity, porosity, density and wave impedance is made availing of algorithm. From theoretical analysis and result of inversion, it could be drawn that the method is of practical value and may lead to effective prospecting for oil, simplifying wave propagation equations in dual phase porous media.

Key words: inversion; stratiform media; seismic CT; equivalent model of porous media

地下介质的复杂性以及介质孔隙中所含流体的耦合性, 致使精确地求解地层物性参数不太可能。可喜的是, 随着流体力学与地球物理学的发展, 越来越多的学者针对特定地段的地下介质提出了多种物理模型, 并给出了相应的弹性波的波传播方程或传播解^[1~7]; 同时由于美国科学家 Cormack、Dines 和 Lytle 对 CT 技术的研究, 产生了基于 Radon 变换的地震 CT 技术, 并成为勘探地下介质的一种较好的方法, 近些年来得到了广泛的应用^[8~10]。然而, 直到目前为止还没有良好的通用方法来准确地反演地下介质的物性参数, 其原因无疑在于地下介质中含有的流体(石油、水或气)造

成了介质模型的各向异性, 和地震 CT 成像的反演多解性。考虑到波动方程求解的复杂性与反演的多解性, 本文从射线传播理论入手, 对双相孔隙地层进行了数值模拟。

1 CT 技术

1.1 Radon 变换

Radon 变换又称为倾斜叠加, 它沿着特定路径对介质的某个特性进行线积分, 积分路径一般为直线。如沿直线 RS 对振幅 $g(r, \phi)$ 进行积分:

$$g(r, \phi) \leftrightarrow G(l, \theta) = \int_R^S g(r, \phi) ds \quad (1)$$

* 收稿日期: 2006-10-07

作者简介: 班书昊(1978-), 男, 山东临沐人, 讲师。

设直线 RS 的方程为:

$$x\cos\theta+y\sin\theta=l \tag{2}$$

也可以将积分 $G(l,\theta)$ 写成:

$$G(l,\theta)=\iint g(x,y)\delta(x\cos\theta+y\sin\theta-l)dx dy \tag{3}$$

Radon 变换使映射 $g(x,y)$ 从 $x-y$ 域变换到 $l-\theta$ 域的一个柱,柱坐标系的取值范围是 $0\leq\theta\leq 2\pi, 0\leq l<+\infty$.

假设 T 是射线旅行时, ds 为射线弧微分, $S(l\cos\theta+ssin\theta,l\sin\theta-scos\theta)$ 为介质的层慢度, $\sum L_i$ 为射线路径.那么,可由式 (4) 计算射线旅行时.显然, T 为一个泛函, 为保证 T 最小 (Fermat 原理), 则要求 $\delta T=0$.

$$T=\int_{\sum L_i} S(l\cos\theta+ssin\theta,l\sin\theta-scos\theta)ds \tag{4}$$

1.2 CT 成像原理

如果从物体内部图像重构的角度看,一张物体切片的图像 $f(x,y)$ 就是一个空间位置 (x,y) 的函数.如果把介质 M 分成 m 个块,并假定有几条射线穿过介质 M .每一个块对应一个 $f(x,y)$,在 R_i 处的记录值是一个投影值,它等于 $d_j^i s_j$ 的乘积和 (爱因斯坦求和约定),其中 d_j^i 是第 i 条射线在第 j 个块内的长度 (若射线 i 不穿过 j 块内的介质,则 d_j^i 为 0).假定 s 是慢度,那么旅行时 t^i 的计算公式如下:

$$t^i=\sum_{j=1}^m d_j^i s_j \tag{5}$$

其中, $i=1,2,\cdots,n$.

式 (5) 写成矩阵的形式为 $T=DS$.在给定 T (在 D 已知) 的情况下,可以求出 S .

2 双相孔隙介质理论

针对多孔隙材料,需要用统计平均的观点把连续性假设与现代物质构造理论统一起来,在宏观上对多孔隙介质均匀化.本文采用的等效孔隙介质模型^[11],利用时间等效原理来获得孔隙度与介质速度的关系式 (时间平均方程)^[12].

$$\frac{1}{V}=\frac{C\phi}{V_f}+\frac{1-C\phi}{V_s} \tag{6}$$

式中 V 是波在岩石中的实际速度; V_f 是波在孔隙流体中的速度; V_s 是岩石基质的速度; C 是压差调节系数,通常取 1; ϕ 是岩石的孔隙度.

式 (6) 给出了等效密度的计算公式:

$$\rho_e=\phi\rho_f+(1-\phi)\rho_s \tag{7}$$

由式 (6) 与式 (7) 可以得到等效波阻抗的近似计算公式^[13,14] (8):

$$R_e=R_s(1+\lambda_1\lambda_2)-\frac{\phi+(1-\phi)\lambda_1\lambda_2}{\phi+(1-\phi)\lambda_1} \tag{8}$$

其中, ϕ 为孔隙度; ρ_f, ρ_s, ρ_e 分别为孔隙流体密度、岩石骨架密度、等效密度; R_e, R_s 分别为孔隙介质的等效波阻抗、岩石骨架的波阻抗; λ_1, λ_2 为无量纲参数,分别表示流体固体的速度比、流体固体的密度比.

3 数值实验

模型 I : 4 层地层模型 (如图 1): 其深度和宽度皆 100 m, 速度网格剖分为 25×25 , 射线单元网格为 $2.5\text{ m}\times 2.5\text{ m}$.左右侧的井内各有 5 个炮点.图中的每一层都给出了相应的孔隙度,且认为自上而下分别含有饱和的气、水、油和

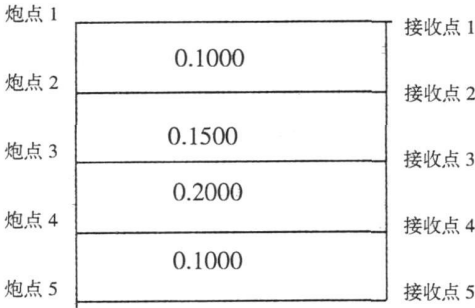


图 1 4 层地层结构

Fig. 1 The four-layer structure

反演采用小生境遗传算法.表 1 为孔隙度的反演结果,解 1 为满意解 (对于非线性反演,存在多解).由反演结果可以看出,借助 CT 成像,可以很精确地反演出目标地层的孔隙度.计算出的孔隙度能够很好地分辨出孔隙度的地层分布情况,精确度很好,孔隙度的反演误差主要来自流体对孔隙度的敏感程度和正演旅行时拾取的精度.

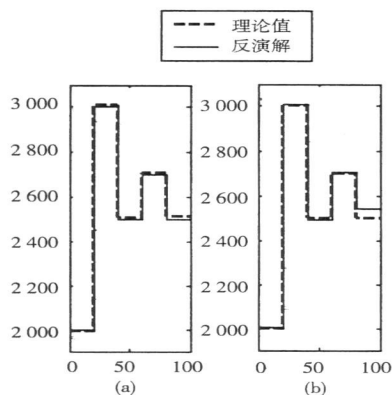
表 1 孔隙度的反演结果

Table 1 Inversion value of Porosity

		地层 1	地层 2	地层 3	地层 4
	ϕ	0.100 0	0.150 0	0.200 0	0.1000
解 1	ϕ_1	0.100 1	0.151 0	0.200 2	0.100 1
	$\phi_1/\%$	0.10	0.66	0.11	0.10
解 2	ϕ_2	0.100 5	0.151 0	0.202 0	0.100 5
	$\phi_2/\%$	0.50	0.66	1.00	0.50

模型 II : 模型为 5 层,自上而下分别含有饱和的气、水、油、水、气;每层厚度均为 20 m.左侧的井内 (沿 Z 轴方向) 有 6 个炮点,右侧的井内 (沿 Z 轴方向) 有 6 个接收点.图 2 为速度模

型的理论值与反演解的对比。

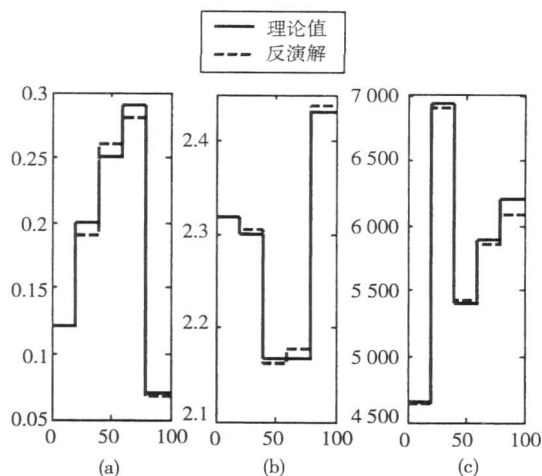


(a)、(b) 分别表示反演最优解、次优解与理论值的对比。横坐标表示地层深度, 单位 m, 纵坐标表示地层速度, 单位 m/s

图 2 地层速度的理论值与反演解

Fig 2 Theoretical and inversion values of layer velocity

由图 2、图 3 知: 整个地层结构中, 速度最大相对误差发生在大孔隙含水地层; 孔隙度最大相对误差发生在小孔隙含气地层; 密度最大相对误差发生在大孔隙度、含水地层; 波阻抗最大相对误差发生在大孔隙度含水地层。其中, 孔隙度反演误差较大, 是由于孔隙度的变化对地震波旅行时不甚敏感造成的。但是, 对于一块油气开发工区而言, 开采前后其孔隙度的变化很小。



(a)、(b)、(c) 分别表示反演得到的孔隙度、密度、波阻抗的最优解与理论值的对比。横坐标表示地层深度, 单位为 m, 纵坐标分别表示地下介质的孔隙度、密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、波阻抗 ($10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

图 3 理论值与最优解对比图

Fig 3 Contrast between theoretical and optimal solutions

对于含水层, 速度的反演结果较孔隙度和波阻

抗更加稳定和准确; 在含气层中, 波阻抗和孔隙度的反演误差较大; 而相对于含水层和含气层, 含油层的多参数反演结果都比较好, 这说明本文提出的反演物性参数的方法更加适用于油藏勘探。

4 结 论

本文针对多孔隙层状介质波传播问题, 结合了等效介质模型与 CT 技术, 应用遗传算法对地层的物性参数 (速度、岩石密度、波阻抗和孔隙度) 进行了反演, 得到了最优解与次优解, 最优解与模型相比, 效果非常好, 可以在工程应用中。

本文提出了一种更加适用于油气勘探开发的算法, 并进行了数值模拟, 结果表明速度对含气层的孔隙度变化不甚敏感。

参考文献:

- [1] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid, part I: low-frequency range [J]. J Acoust Soc Am, 1956a, 28 (2): 168-178.
- [2] PONA T J. Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies [J]. Appl Phys Lett, 1980, 36: 259-261.
- [3] 刘洋, 牟永光, 李承楚. 双相各向异性介质中弹性波的传播特征 (摘要) [A]. 中国地球物理学会年刊 [C]. 西安: 西安地图出版社, 1998. 59.
- [4] 陈勉, 陈至达. 多重孔隙介质的有效应力定律 [A]. 应用数学和力学 [C]. 重庆: 重庆出版社, 1999.
- [5] 杨松岩, 俞茂宏. 多相孔隙介质的本构描述 [J]. 力学学报, 2000, 32 (1): 11-24.
- [6] 朱建伟, 何樵登, 李云辉. 含油水各向异性孔隙介质中地震波传播方程 [J]. 长春科技大学学报, 2001, 31 (2): 193-196.
- [7] 魏培君, 章梓茂, 韩华. 流体饱和孔隙介质参数反演的模拟退火算法 [J]. 工程力学, 2002, 19 (3): 128-131.
- [8] Chapman C H. Generalized Radon Radon transforms and slant stacks [J]. Geophys. J R Astr Soc, 1981, 66.
- [9] 井西利, 杨长春, 李幼铭. 建立速度模型的层析成像方法研究 [J]. 石油物探, 2002, 41 (1): 72-75.
- [10] 裴正林, 牟永光, 狄帮让, 等. 复杂介质小波多尺度井间地震层析成像方法研究 [J]. 地球物理学报, 2003, 46 (1): 113-117.
- [11] 白矛. 孔隙裂隙弹性理论及应用导论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1999. 6-8.
- [12] 陆基孟. 地震勘探原理 [M]. 东营: 石油大学出版社, 1996. 192-194.
- [13] 班书昊, 杨慧珠. 小生境遗传算法在地震 CT 中的应用研究 [J]. 地球物理学进展, 2004, 19 (1): 143-147.
- [14] 班书昊, 杨慧珠. 小生境遗传算法在孔隙介质反演中的应用研究 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32 (2): 78-81.