

文章编号:1673-5005(2009)05-0041-05

基于叠前振幅随角度变化反演的储层流体识别方法

黄捍东¹, 张如伟², 李进波³, 肖江⁴

(1. 中国石油大学 CNPC 物探重点实验室, 北京 102249; 2. 广州海洋地质调查局, 广州 510760;
3. 中海石油研究中心, 北京 100027; 4. 东方地球物理公司研究院库尔勒分院, 新疆 乌鲁木齐 841001)

摘要:从理论模型入手, 首先研究流体参数变化对地震弹性参数及地震记录的影响, 然后用胜利油田某区块的实际资料进行叠前振幅随角度变化(AVA)弹性反演。在反演基础上, 以振幅随炮检距变化(AVO)分析为基础, 提取反映流体特征的不同属性, 在剖面与平面上指示出储层流体的特征。反演结果与实际钻井资料吻合率较高, 说明叠前反演与 AVO 属性分析结合是预测储层流体性质的一种有效方法。

关键词:叠前 AVA 反演; AVO 属性分析; 流体预测; 流体因子

中图分类号:P 631.443

文献标识码:A

Reservoir fluid prediction method based on prestack amplitude variation with angle inversion

HUANG Han-dong¹, ZHANG Ru-wei², LI Jin-bo³, XIAO Jiang⁴

(1. CNPC Geophysical Exploration Key Laboratory in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China;
3. CNOOC Research Center, Beijing 100027, China; 4. BGP GRI Korla Branch, Urumchi 841001, China)

Abstract: The influence of fluid parameters' variation on seismic elastic parameter and seismic record were researched on the basis of theoretical model. And then prestack amplitude variation with angle(AVA) elasticity inversion was carried out by using Shengli block's real data. Based on inversion and amplitude variation with offset(AVO) analysis, different attributes of fluid characteristic were extracted and reservoir fluid characteristics on profile and plane were predicted. The inversion results agree well with real well-drilling data, which shows that the combination of prestack inversion and AVO attribute analysis is an effective method of reservoir fluid prediction.

Key words: prestack amplitude variation with angle inversion; amplitude variation with offset attribute analysis; fluid prediction; fluid factor

AVO 技术作为地下岩石流体检测的重要地球物理手段, 为油气高效的勘探开发提供了一定科学依据。Ostrander^[1]首先提出利用反射系数随入射角变化识别“亮点”型含气砂岩, 标志着实用的 AVO 技术的出现, 激起人们对 AVO 现象的极大兴趣。Gassaway 等把 AVO 信息用于反演泊松比, 直接解释岩性和油气。Smith^[2]等提出用加权迭加方法估计流体因子和检测气层。为了充分挖掘 AVO 信息的潜力, 不少研究者用 AVO 属性(斜率和截距)交汇

图识别岩性和油气^[3], 并提出 AVO 烃类检测因子。叠前储层描述工作可以充分挖掘地震资料的潜力, 是对目前储层描述技术的一个扩展^[4]。Connolly 提出了弹性阻抗的反演方法^[5], 是声阻抗反演基础上的一次巨大飞跃, 吸引了国内外众多学者去深入研究, 叠前弹性参数反演的思路应运而生。但是, 常规叠前反演方法有着计算量大、方法不稳定等一系列问题, Whitcombe 与 Connolly 等地球物理学家提出用部分角度叠加来进行叠前反演的方法^[6], 这种方

收稿日期:2008-10-20

基金项目:国家“973”计划项目(2006CB202306);国家“863”计划项目(2006AA09A101-0103)

作者简介:黄捍东(1964-),男(汉族),四川隆昌人,副教授,博士,主要从事复杂储层物探方法研究。

法不仅保留了叠前地震剖面的振幅变化特征,也解决了方法不稳定等问题^[6-8]。笔者加入叠前地震信息,开展叠前三参数反演,将 AVO 属性体和地震反演相结合,提出一种新的储层流体识别方法。

1 叠前三参数反演方法

基于现有的部分叠加的方法^[4-8],并把不同角度范围对应的多个角度叠加地震数据联合运用,同时利用多个部分角度叠加地震数据体进行反演处理,把待反演的纵波速度、横波速度和密度参数,在反演处理过程中一次性运算完成,并且充分考虑到了这些属性参数之间的内在联系和相互制约关系。

假使求解如下的目标函数:

$$\|S - D\|^2 = \sum_{\theta=\theta_0}^{\theta_n} \sum_{i=0}^{n-1} (S(\theta)_i - D(\theta)_i)^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

式中, S 为模型响应, dB; D 为实际记录, dB; θ 为部分叠加角度。

为了解 3 个参数的扰动量 ΔV , 需要求解方程组

$$\sum_{\theta=\theta_0}^{\theta_n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\partial(S(\theta)_i - D(\theta)_i)^2}{\partial \Delta V_j} = 0. \quad (2)$$

用 Taylor 公式将 $S(\theta)_i^A$ 展开, 代入式(2)中, 并省略部分高阶小量, 于是有

$$\sum_{\theta=\theta_0}^{\theta_n} \sum_{i=0}^{n-1} dS(\theta)_i \frac{\partial S(\theta)_i}{\partial V_j} + \sum_{k=0}^{3n-1} \Delta V_k \times \left(\sum_{\theta=\theta_0}^{\theta_n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\partial S(\theta)_i}{\partial V_j} \frac{\partial S(\theta)_i}{\partial V_k} + \sum_{\theta=\theta_0}^{\theta_n} \sum_{i=0}^{n-1} dS(\theta)_i \frac{\partial^2 S(\theta)_i}{\partial V_j \partial V_k} \right) = 0. \quad (3)$$

将方程组记为

$$\Delta V \sum_{\theta=\theta_0}^{\theta_n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\partial S(\theta)_i}{\partial V_j} \frac{\partial S(\theta)_i}{\partial V_k} + \Delta V \sum_{\theta=\theta_0}^{\theta_n} \sum_{i=0}^{n-1} dS(\theta)_i \times \frac{\partial^2 S(\theta)_i}{\partial V_j \partial V_k} + \sum_{\theta=\theta_0}^{\theta_n} \sum_{i=0}^{n-1} dS(\theta)_i \frac{\partial S(\theta)_i}{\partial V_j} = 0. \quad (4)$$

由式(4)计算得到 ΔV , 再由

$$V_{k+1} = V_k + \Delta V_k \quad (5)$$

迭代得到最终的反演 3 个参数体。

在实际的叠前反演中, 常采用多个部分叠加的实际地震数据, 但是地下的弹性参数是唯一的, 因此采用最小平方的原理, 由多个地震数据同时反演出一组数据体, 则目标函数变化为

$$f = \|S_1 - D_1\| + \|S_2 - D_2\| + \|S_3 - D_3\| + \cdots \rightarrow \min. \quad (6)$$

在实际应用中, 应采用高信噪比的叠前部分叠

加地震资料, 低信噪比资料将严重影响反演的稳定性, 使得薄层反演和多参数反演预测的可靠性降低。

2 储层流体识别方法

2.1 AVO 分析的基本理论

AVO 技术是以弹性波理论为基础, 利用叠前 CDP 道集对地震反射振幅随炮检距(或入射角)的变化特征进行研究, 分析振幅随炮检距的变化规律, 其核心思想是针对不同地下岩性体的弹性参数, 反射振幅会随着炮检距(入射角)而变化, 为了更加清晰地描述这种变化规律, 国内外诸多学者均对难以求解的 Zoeppritz 方程进行了不同程度的近似与简化, 其中 Aki & Richards 近似公式^[9]和 Shuey^[10]公式最为常用。

Shuey 将 Zoeppritz 方程简化为只有 3 项计算式相加的形式, 分别在不同的角度入射时起主要作用, 但由于广角反射项只有在大角度的情况下才会起作用, 实际应用一般省略第 3 项, 即

$$R_{pp}(\theta) = P + G \sin^2 \theta. \quad (7)$$

其中

$$P = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta v_p}{v_p} \right), G = A_0 R_0 + \frac{\Delta \sigma}{(1 - \sigma)^2},$$

$$A_0 = \frac{1}{2R_0} \frac{\Delta v_p}{v_p} - \left(2 + \frac{1}{R_0} \frac{\Delta v_p}{v_p} \right) \frac{1 - 2\sigma}{1 - \sigma}.$$

式(7)中的第一项为小角度的入射项, 当入射角度趋于 0° 时, 其值近似为垂直入射的情况, 随着入射角的逐渐增大, 该项值会有逐渐减小的趋势; 第二项为适中入射角 ($0^\circ < \theta < 30^\circ$) 项, 该项在实际运用中主要表现为油气变化的特征项。

2.2 流体预测技术

为了更好地将叠前地震反演结果进行 AVO 分析, 更加清晰、明确地显示出振幅与储层流体间的关系, 可以经过一系列处理得到以下属性参数:

(1) 泊松比剖面。利用地震叠前反演求的弹性参数后, 可以依据公式

$$\sigma = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2v_p^2 - 2v_s^2} \quad (8)$$

得到泊松比剖面。从波速到泊松比, 人们对岩石性质的研究已经逐渐深入其本质。由于当地层中水被油气替代之后, 纵波速度都有减小, 且幅度不同, 导致泊松比的变化趋势不同, 因此利用泊松比识别油气更为有效。

(2) $P \times G$ 剖面。当砂岩中含气时, 通常表现为 P

和 G 的同时增大,这样 $P \times G$ 属性特征在含气时将会更加直观清晰地表现出来。目前流体预测技术研究中, $P \times G$ 属性常用来作为油气的指示因子。

(3) 流体因子。Smith 和 Gidlow 于 1987 年提出了流体因子^[2],并将它定义为从背景趋势线上偏移的一种量度,表达形式为

$$\Delta F = \frac{\Delta v_p}{v_p} - b \frac{v_s}{v_p} \frac{\Delta v_s}{v_s}$$

(10)

式中, b 为常数值,且由该地区的泥岩基线决定。由于储层中流体类型的变化将会引起纵波速度的变化,而横波速度与密度变化微小,这样流体因子也将随之变化,当砂岩中饱含水时, ΔF 一般接近于零,而当含有油气时,该值会明显增大。

3 流体特征正演

Boit-Gassmann 方程^[11-13] 直观地描述了当储层中流体类型与饱和度变化时 3 个弹性参数的变化规律,为了更加深刻地了解储层流体与弹性参数之间的关系,为后期储层流体识别提供科学依据,本文中先从 Boit-Gassmann 方程出发,通过数值模拟显示出地层中的孔隙被不同流体替代之后,纵波速度、横波速度和密度的变化特征,并在目的层充填不同流体的情况下,通过正演模拟 AVO 地震响应,分析流体 AVO 响应的影响。

假设地质模型为 3 个水平层状介质(表 1),对第二层进行流体替代,其孔隙度为 20%,利用计算结果对纵横波速度、密度的变化规律进行分析。

图 1 为当第二层被油与水替代之后,纵、横波速度与密度随着含油饱和度增加的变化趋势。从图中可以看出,纵波速度有一定的减小,但幅度不是很

大,横波速度与密度变化很小,这样势必导致泊松比的减小。当中间层被气与水替代之后,纵横波速度与密度随着含气饱和度的变化见图 2。当地层中一旦含气后,纵波速度有明显减小趋势,横波速度与密度只有微略的增大和减小,这样地层中含气的现象相对于其他流体,能够被较好地识别出来。

表 1 理论模型所用参数

Table 1 Parameters for theoretical model

层号	纵波速度 $v_p/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	横波速度 $v_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
1	2290	1265	2.102
2	2230	1156	2.089
3	2170	1048	2.075

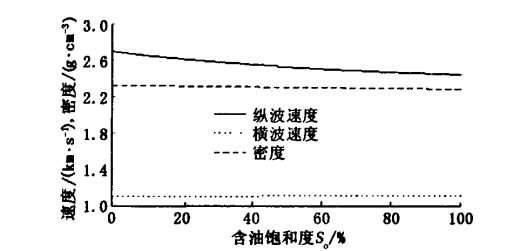


图 1 各参数随含油饱和度的变化
Fig.1 Parametric variation with oil saturation increasing

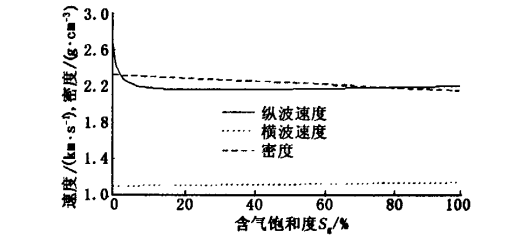


图 2 各参数随含气饱和度的变化
Fig.2 Parametric variation with gas saturation increasing

图 3 为地层中饱含油(左)和气(右)时,地层顶面和底面的地震响应特征。

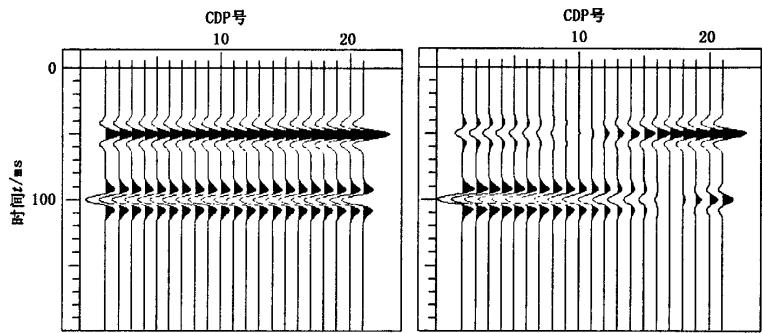


图 3 地层中饱含油(左)与饱含气(右)时的地震响应特征
Fig.3 Seismic response characteristics of full oil and gas in the stratum

可以看出:随着角度的增加,地层饱含油时顶面地震振幅有缓慢增加的趋势,但地震振幅相对于

地层中饱含气时要小(由地层含油后纵波速度变小引起的);地层饱含气时顶面与底面地震振幅都随着角度的增加而减小,当角度足够大时,会出现极性反转的现象,只是顶面与底面反转出现的角度不同而已。

4 实际应用

叠前 AVA 弹性多参数反演比 AVO 分析更具有优越性,地震 AVO 反映岩石界面的信息,而反演反映的是岩石层内的信息。单独的纵波阻抗不能反映储层,使用叠前三参数反演得到纵横波阻抗以及多种弹性参数,利用多种参数分析可以更好地区分储层。

通过叠前 AVA 反演,可以获取研究区目的层段的多种弹性参数体(纵波速度、横波速度、密度),同时能够得到泊松比、 $P \times G$ 和流体因子等属性体,这些不

同的属性从各个方面反映了地下岩石流体性质的变化特征。图 4 是过 K71-18 与 Kq6 的泊松比和 $P \times G$ 的连井剖面。泊松比经常用于储层中流体的识别,在砂岩中,依据孔隙流体性质的差异,泊松比一般从高到低排序依次是水砂岩、油砂岩和气砂岩,其中气砂岩的异常显示最为明显,在图中,深灰为高泊松比,黑色为低泊松比,由井资料可知,1.454 ~ 1.530 km 的砂岩基本全为水层,图中泊松比也反映基本都为较高值。 $P \times G$ 剖面使得地层含气的信息更为明显,在图中黑色显示的异常值说明了该层含气,水层则没有任何异常显示。图 5 为过 K71-18 与 Kq6 的流体因子的连井剖面。在流体因子的剖面上,地层中含水时,流体因子趋于零值,而地层中一旦含有油气后,则会出现或正或负的异常值,图中的浅灰色基本就是趋于零,储层一般为水层。

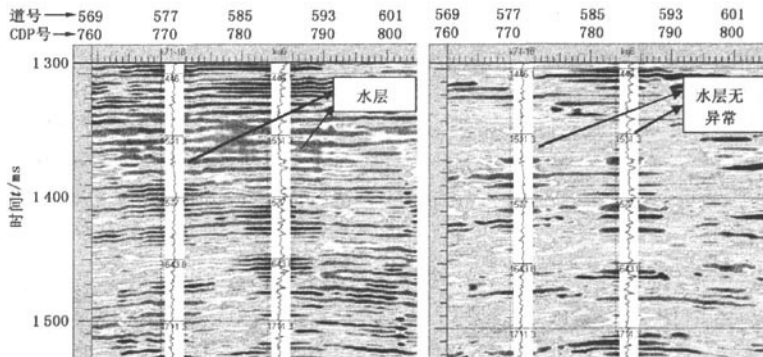


图 4 过 K71-18 与 Kq6 井的泊松比(左)和 $P \times G$ (右)的连井剖面

Fig. 4 Well tie sections of Poisson ratio and $P \times G$ pass K71-18 and Kq6 well

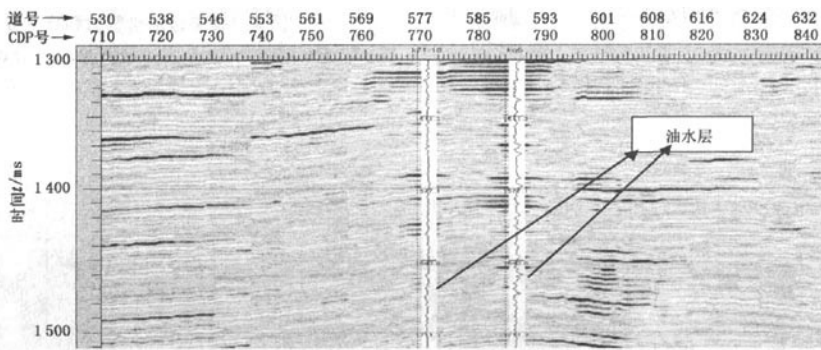


图 5 过 K71-18 与 Kq6 的流体因子的连井剖面

Fig. 5 Well tie sections of fluid factor pass K71-18 and Kq6 well

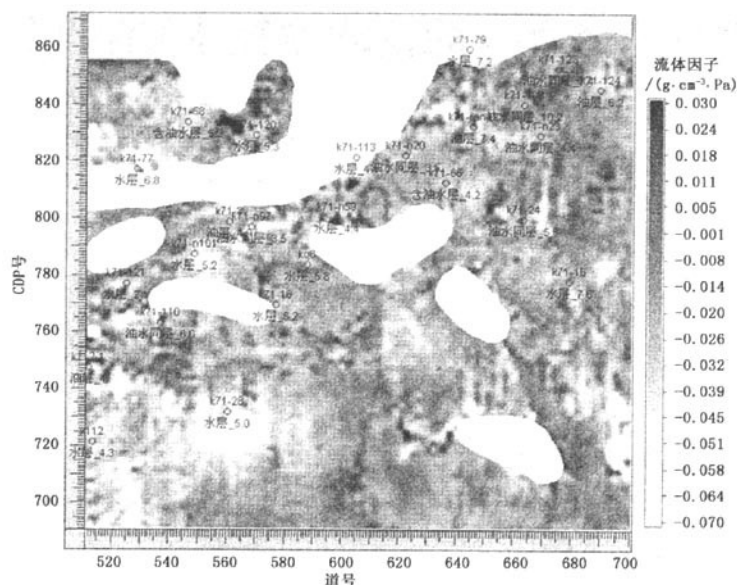
虽然一些属性对储层流体有一定的响应特征,但在实际资料的处理与预测过程中,由于叠前地震资料中含有一定的噪声成分,并且叠前反演算法存在着多解性强等问题,可能导致反演结果的不准确,从而

同样使得 AVO 分析不准确。

图 6 是在得到流体因子属性体的同时对馆 6-6 小层的平面分析图。从平面上可以看出,油层、气层及水层基本集中于深灰色到黑色区域内,而水层主要集

中于灰色与浅灰色区域内,通过与23口井的对比,吻合率可以达到83%,从而说明获取的几个属性基本上

可以识别储层中的流体,但有时由于地震资料的噪声存在,难免会个别地方判别不准确或者出现错误。



- method [D]. Canada: University of Calgary, 2001.
- [12] 陈建江, 印兴耀, 张广智. 基于贝叶斯理论的振幅随偏移距变化三参数同步反演[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(3): 33-38.
CHEN Jian-jiang, YIN Xing-yao, ZHANG Guang-zhi. Simultaneous three-term AVO inversion based on Bayesian theorem [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007, 31(3): 33-38.
- [13] WANG S W, BANCROFT J C, LAWTON D C. Converted-wave (P-SV) prestack migration and migration velocity analysis [C]. USA: Society of Exploration Geophysics, 1997: 1575-1578.
- [14] BANCROFT J C, GEIGER H D, MARGRAVE G F. The equivalent offset method of prestack time migration [J]. Geophysics, 1998, 63(6): 2042-2053.
- [15] WANG W, PHAM L D. Converted-wave prestack imaging and velocity analysis by pseudo-offset migration [C/OL]. European Association of Geoscientists and Engineers, 2001, L-12. [http://www.pgs.com/upload/31116/Download%20printer%20friendly%20version%20\(1496Kb\).pdf](http://www.pgs.com/upload/31116/Download%20printer%20friendly%20version%20(1496Kb).pdf).
- [16] 殷文. 叠前弹性波反演非线性优化方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 45-49.
YIN Wen. Non linear optimization method on prestack elastic-wave inversion [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(3): 45-49.
- [17] 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.
CHEN Tian-sheng, LIU Yang, WEI Xiu-cheng. Joint amplitude versus offset inversion of P-P and P-SV seismic data [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(1): 33-37.

(编辑 修荣荣)

(上接第40页)

- [13] ORTOLEVA P. Basin compartmentation: definitions and mechanisms [J]. AAPG memoir, 1994, 60: 39-52.
- [14] 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 11-20.
HAO Fang, ZOU Hua-yao, JIANG Jian-qun. Dynamics of petroleum accumulation and its advances [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 11-20.
- [15] 隋凤贵. 东营断陷盆地地层流体超压系统与油气运聚成藏[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(3): 17-23.
SUI Feng-gui. Effect of formation superpressure system on hydrocarbon migration and accumulation in Dongying fault basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(3): 17-23.
- [16] 王建伟, 宋书君, 王新征. 东营凹陷牛庄洼陷砂岩透镜体的成藏机理[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 39-59.
WANG Jian-wei, SONG Shu-jun, WANG Xin-zheng. Petroleum accumulation mechanism of lens-type sandstone in Niuzhuang subsag of Dongying sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(5): 39-59.
- [17] 查明, 陈发景, 张一伟. 压实流盆地流体势场与油气运聚关系——以东营凹陷为例[J]. 现代地质, 1996, 10(1): 106-110.
ZHA Ming, CHEN Fa-jing, ZHANG Yi-wei. Fluids potential field and hydrocarbons migration and accumulation in compactional flow basins—an example from Dongying depression [J]. Geoscience, 1996, 10(1): 106-110.

(编辑 徐会永)

(上接第45页)

- [8] 殷文. 叠前弹性波反演非线性优化方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(3): 45-49.
YIN Wen. Nonlinear optimization method on prestack elastic-wave inversion [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(3): 45-49.
- [9] AKI K, RICHARDS P G. Quantitative seismology: theory and methods [M]. 1 ed. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1980: 100-170.
- [10] SHUEY R T. A simplification of the Zoeppritz equations [J]. Geophysics, 1985, 50(4): 609-614.
- [11] GASSMANN F. Über die elastizität poröser medien: Vierteljahrsschr [J]. Der Naturforsch Gesellschaft Zurich, 1951, 96: 1-21.
- [12] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid I: low frequency range [J]. Acoust Soc Am, 1956a, 28: 169-178.
- [13] BIOT M A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid II: high frequency range [J]. Acoust Soc Am, 1956b, 28: 179-191.

(编辑 修荣荣)