

文章编号: 1673-5005 (2009) 01-0064-04

# 合理分割岩心微观结构图像的新方法

赵秀才<sup>1</sup>, 姚 军<sup>1</sup>, 房克荣<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2 大庆油田有限责任公司 第七采油厂, 黑龙江 大庆 163517)

**摘要:**以判别分析法分割图像的基本原理为基础,提出一种以岩心试验孔隙度为重要约束条件的图像分割新方法。对比分析结果表明:判别分析法理论上能够对图像进行最佳分割,但实际分割结果与真实情况存在偏差;因岩心非均质性及岩心内部可能存在孤立孔隙等原因,导致完全以岩心试验孔隙度为准则的图像分割法无法取得理想的分割效果;新方法充分考虑了孔隙度在CT图像分割处理中的总体控制作用,同时兼顾判别分析法基于实际图像的具体特征对图像分割所起的局部调整作用,能够对岩心灰度图像作出更加合理的二值分割。

**关键词:**岩心微观结构; 图像分割; 孔隙度; 判别分析法; CT图像

**中图分类号:** TE 311      **文献标识码:** A

## A new reasonable segmentation method for microstructure image of reservoir rock

ZHAO Xiu-cai<sup>1</sup>, YAO Jun<sup>1</sup>, FANG Ke-rong<sup>2</sup>

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China;

2. 7th Oil Production Plant, Daqing Oilfield Corporation Limited, Daqing 163517, China)

**Abstract** Based on the image-segmentation principle of the discriminace method, a new method was proposed, in which the rock's experimental porosity from the lab was taken as an important constraint. The results show that although the discriminace method can make the best image segmentation theoretically, its practical result deviates from the real case. Due to the rock's heterogeneity and those possibly existing isolated pores, the binary image segmented by matching the experimental porosity only is not good either. As it incorporates both the principle contribution of the porosity and the good adjustment made by the discriminace method according to the actual features of the CT image, the newly developed method can generate more reasonable results in segmenting gray images.

**Key words** microstructure of reservoir rock; image segmentation; porosity; discriminace method; CT image

储层岩石的微观结构是影响油气储集及渗流性质的重要因素,因此对岩石微观结构特征进行分析将为油气微观渗流机理研究奠定重要的基础。受试验条件的限制,以往所得到的岩石结构特征参数(如粒度组成、比面等)大多反映岩石的宏观性质而无法描述其微观结构特征。随着CT成像技术的迅速发展,包含岩心微观结构特征的重要信息已经可以通过岩心CT图像反映出来,CT图像成为分析岩心微观结构的重要资料<sup>[1]</sup>。然而,CT图像中的岩石骨架和孔隙空间因成像噪声的存在及仪器精度的制

约而无法清晰分辨,因此可通过图像二值化算法对CT灰度图像进行分割,以确定骨架和孔隙之间合理的边界位置。已有许多灰度图像的二值分割算法,但无论是全局阈值分割方法<sup>[2-7]</sup>还是局部阈值分割方法<sup>[8-9]</sup>,都是完全针对图像的灰度特征进行处理而没有将图像本身所反映的重要信息考虑进去,这导致分割结果尽管在理论上最优但与实际仍有很大差距。岩心孔隙度很容易测得,且它给出了岩心孔隙空间所占的份额,笔者将孔隙度这一重要因素结合到图像分割过程中,给出一种能够合理分割岩心微

收稿日期: 2008 - 05 - 25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90610015)

作者简介: 赵秀才 (1982 - ), 男 (汉族), 山东沂水人, 博士研究生, 主要从事储层岩石微观结构建模及微观渗流理论研究。

观结构图像的新方法。

### 1 判别分析法分割灰度图像基本原理

岩心 (仅考虑干岩心,其内部不含流体)由致密的岩石骨架和孔隙空间两部分组成。理论上,岩心 CT 图像中两部分应具有截然不同的灰度。然而,由于受到成像设备精度等多种因素的制约,在 CT 图像中,尽管可以通过肉眼大致分辨出孔隙的位置,但孔隙与岩石骨架的灰度差异并不十分明显。此外,孔隙与岩石骨架的边缘十分模糊,这给图像分割带来很大难度。在此情况下,分割结果的准确性对阈值的选取更加敏感。

由于 CT 成像设备采用稳定的 X 射线源对岩心进行成像,不存在亮度不均匀或出现阴影等问题,因此无须选用局部阈值分割方法。在全局阈值分割方法中,判别分析法<sup>[10]</sup>因其原理简单、程序设计方便且能够获得较好的分割效果而被广泛应用。判别分析法确定分割阈值的思路如下:将待分割图像中所有像素点的灰度值所构成的总体视为一个集合,假定把该集合用阈值分成两组,则当两组平均值的方差(组间方差)和各组的方差(组内方差)之比达到最大时,其所对应的分割阈值即为合理值。显然,岩心内部的孔隙空间和岩石骨架可以各成一组,每一组内部的差异很小而两组间的性质差异很大,当采用合理的阈值将两组分割开后,两组间的性质差异与组内差异之比将达到极大值。可见,岩心 CT 图像本身的特点与判别分析法对图像的分割思路十分吻合,故此,本文中选取判别分析法作为图像分割的基本方法。

设图像的最大、最小灰度值分别为  $I_{max}$  和  $I_{min}$ , 灰度值为  $i$  的像素数为  $p(i)$ , 灰度阈值为  $k$ , 它将像素点分为组 1 (孔隙空间) 和组 2 (岩石骨架)。分别统计并计算两组的像素数  $N_1(k)$  和  $N_2(k)$ 、平均灰度值  $\mu_1(k)$  和  $\mu_2(k)$ 、方差  $\sigma_1^2(k)$  和  $\sigma_2^2(k)$  及全部像素的平均灰度值  $\mu_T$ , 则组内方差  $\sigma_w^2(k)$  及组间方差  $\sigma_B^2(k)$  分别为

$$\sigma_w^2 = N_1 \sigma_1^2 + N_2 \sigma_2^2,$$

$$\sigma_B^2 = N_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 + N_2 (\mu_2 - \mu_T)^2.$$

其中

$$\mu_1(k) = \frac{\sum_{i=I_{min}}^k ip(i)}{N_1(k)}, \quad \mu_2(k) = \frac{\sum_{i=k+1}^{I_{max}} ip(i)}{N_2(k)},$$

$$\mu_T(k) = \frac{\sum_{i=I_{min}}^k ip(i)}{N_1(k) + N_2(k)},$$

$$\sigma_1^2(k) = \frac{\sum_{i=I_{min}}^k [i - \mu_1(k)]^2 p(i)}{N_1(k)},$$

$$\sigma_2^2(k) = \frac{\sum_{i=k+1}^{I_{max}} [i - \mu_2(k)]^2 p(i)}{N_2(k)}.$$

选择最佳灰度值  $k^*$ , 使其满足

$$f(k^*) = \max \left\{ f(k) = \frac{\sigma_B^2(k)}{\sigma_w^2(k)} \right\}.$$

### 2 考虑孔隙度的图像分割新方法

判别分析法能够对由图像所有像素点的灰度值组成的集合进行合理分割,但分割得到的黑白图像与真实情形往往存在偏差,即黑白图像中孔隙所占的比例与岩心孔隙度差异较大。显然,若直接以这类黑白图像为基础开展岩心微观结构特征分析会得到错误结论,因此需要进一步改善岩心 CT 图像的分割效果。

岩心孔隙度是开展各类油层物理试验时必须测定的基本物理量,在现有的试验条件下,借助气体膨胀法、液体饱和法等都可以方便准确地测量得到。由于孔隙度给出了岩心中孔隙空间所占的份额,因此把孔隙度作为约束条件结合到岩心 CT 图像分割过程中会提高图像的分割质量。需要说明的是,在岩心孔隙度已知的情况下,采用迭代算法选取适当的灰度阈值对 CT 图像加以分割,所得黑白图像的孔隙度与试验孔隙度最吻合时,CT 图像的分割效果未必最佳,因为: 实验室测量孔隙度时一般选用整块岩心 (通常是直径为 2.5 cm 的标准岩心),但开展 CT 试验时为保证较高的分辨率通常采用小尺寸岩心 (通常为直径不大于 5 mm 的岩心柱),由于任何岩心都不同程度存在非均质性,故 CT 图像的真实孔隙度未必与试验孔隙度一致; 实验室所测定的岩心孔隙度为有效孔隙度,即连通孔隙在岩心中所占的体积比,而岩心中的孤立孔隙 (如果存在) 经 CT 成像后同样可以显示在 CT 图像中,故 CT 图像孔隙度与试验孔隙度存在偏差。

根据判别分析法的图像分割原理,借助该方法能够对孔隙空间和岩石骨架的合理分割做出适当调整。把判别分析法和以孔隙度为标准的分割方法 (以下称孔隙度法) 结合起来将有效提高 CT 图像分

割的准确性。

假设岩心试验孔隙度为  $\phi$ , 以灰度阈值  $k$  对图像分割后得黑白图像的孔隙度为  $\phi(k)$ , 记孔隙度偏差为  $g_0(k)$ , 令

$$g_0(k) = - \left| \phi(k) - \phi \right| = - \left| N_1(k) / (N_1(k) + N_2(k)) - \phi \right|.$$

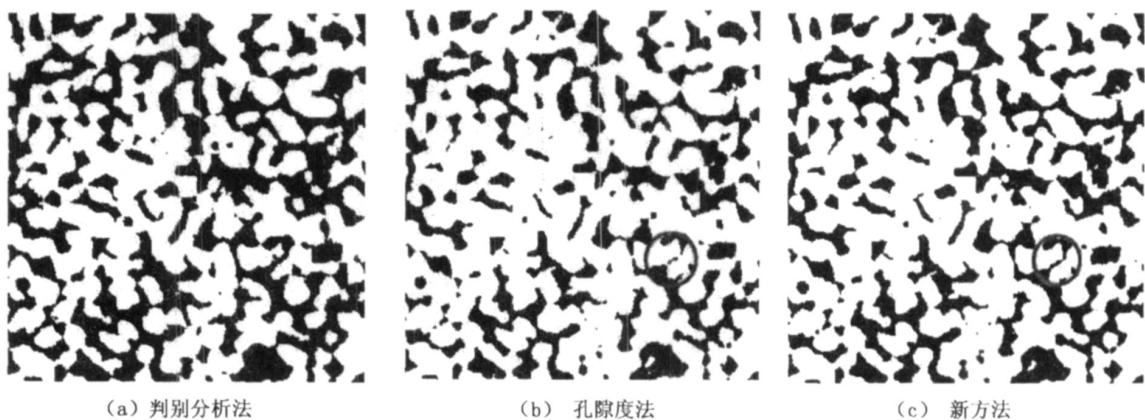
显然,  $g_0(k)$  取最大值时所对应的  $k$  值即为孔隙度法所选的最佳阈值。若将孔隙空间和岩石骨架总体的差异考虑进来以修正上述原因导致的分割误差, 即孔隙度法与判别分析法相结合, 则仅须定义函数  $F_0(k)$ ,

$$F_0(k) = f(k) + g_0(k). \tag{1}$$

理论上,  $F_0(k)$  取最大值时所对应的  $k$  值即最佳阈值。然而测试结果表明, 以  $F_0(k)$  为目标函数确定的阈值与判别分析法确定的阈值几乎一致, 而与孔隙度法确定的阈值相差很大。分析发现, 式 (1) 中  $g_0(k)$  的值较  $f(k)$  小, 几乎相差一个数量级, 因此  $g_0(k)$  在  $F_0(k)$  中所占比例过小导致孔隙度的约束作用无法体现。为充分发挥孔隙度法和判别分析法在图像分割处理中的优势, 采用调整两者权重的方法以取得更加合理的分割效果。

设函数  $f(k)$  的最大、最小值分别为  $f_{\max}$  和  $f_{\min}$ ,  $g_0(k)$  的最大值为  $g_{0\max}$ , 将函数  $g_0(k)$  曲线向上平移  $(f_{\max} - g_{0\max})$  得  $g_1(k)$ , 用  $g_1(k)$  取代式 (1) 中  $g_0(k)$  后, 孔隙度法与判别分析法将具有相同权重。对于均质程度较好的岩心, 岩心孔隙度应在图像分割中起主导作用, 故须突出  $g_1(k)$  的控制作用, 为此对  $g_1(k)$  作拉伸处理, 即

$$g(k) = g_{1\max} - \left| k - k^* \right| \frac{f_{\max} - f_{\min}}{g_{1\max} - g_{1\min}}.$$



(a) 判别分析法

(b) 孔隙度法

(c) 新方法

图 2 岩心黑白图

Fig 2 Rock core's binary image

式中,  $g_{1\max}$  和  $g_{1\min}$  分别为函数  $g_1(k)$  的最大、最小值;  $k^*$  为  $g_1(k)$  取最大值时所对应的灰度值。

最终用于确定灰度阈值的目标函数变为

$$F(k) = f(k) + g(k).$$

函数  $F(k)$  最大值所对应的灰度值  $k^*$  即为分割图像的合理阈值。

### 3 算例分析

图 1 为胜利油田某区块岩心 CT 图像 (深色表征孔隙, 浅色代表岩石骨架), 300 × 300 像素, 像素实际大小为 5 μm × 5 μm。该岩心试验孔隙度为 0.3, 粒度分析表明, 成岩颗粒分选较好, 岩心均质性较好。采用 3 种方法对该 CT 图像进行分割, 所得黑白图像如图 2 (其中黑色代表孔隙、白色代表岩石骨架) 所示。用以确定灰度阈值的目标函数  $f(k)$ ,  $g(k)$ ,  $F(k)$  曲线如图 3 所示, 各方法确定的阈值及分割得到的图像孔隙度见表 1。

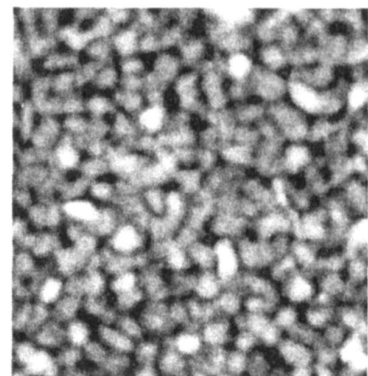


图 1 岩心 CT 灰度图

Fig 1 Rock core's CT image

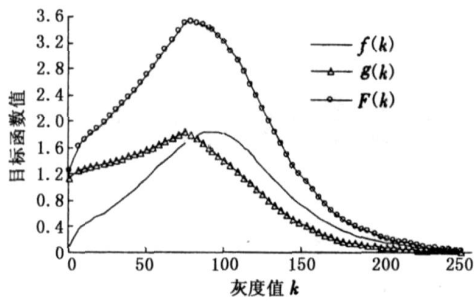


图 3 不同方法目标函数曲线

Fig 3 Objective function curves of different image segmentation methods

表 1 图像分割结果

Table 1 Results of image segmentation

参数	判别分析法	孔隙度法	新方法
灰度阈值	93	75	79
图像孔隙度	0.415	0.3	0.323

从图 2 可明显看出:孔隙度法与新方法的分割效果相似,而判别分析法的分割效果则与两者差异较大,且图 2(a) 中孔隙较图 2(b), (c) 中的孔隙明显偏大。由表 1 数据知,判别分析法分割所得图像孔隙度 (0.415) 明显偏离岩心试验孔隙度 (0.3), 已知该岩心均质性较好,故图像孔隙度应在以试验孔隙度为中心的区间内变动而不应与之有显著差异。可见,尽管判别分析法在理论上可以借助图像中两类总体的灰度差异而取得最佳的分割效果,但实际的分割效果并不理想。由图 3 可见,判别分析法的目标函数  $f(k)$  在其最佳灰度值 93 为中心的灰度区间内变化平缓,说明在该区间内目标函数值对灰度值的变化并不敏感,因此在判别分析法分割效果较差的情况下,完全可以在该灰度区间内适当调整灰度阈值来提高图像分割质量,保证目标函数仍有较高的取值。

孔隙度法的图像分割基本原理决定了其分割所得结果图像的孔隙度与试验孔隙度的一致性。然而,由于岩心并非完全均质及存在孤立孔隙等问题,图像的真实孔隙度与岩心试验孔隙度并非完全吻合,即完全以岩心试验孔隙度为分割准则未必取得最佳效果。对比图 1 与图 2(b) 不难发现,孔隙度法对图像中孔隙规模的划分比例略小,导致本应连通的孔隙被割裂开 (见图 2(b) 圆圈所标记的部分),故孔隙度法的图像分割质量仍需加以改善。分析孔隙度法经调整处理后的目标函数  $g(k)$  (图 3), 函数曲线在最大值处存在拐点,在拐点左右两侧函数值随灰度值变化显著,即灰度值的选取将显著影响目标函

数值,这说明新方法能够充分考虑孔隙度对图像分割所起的主导作用。

由表 1 看出,新方法确定的孔隙度介于孔隙度法和判别分析法的分割结果之间,同时又十分接近试验孔隙度值,说明新方法充分考虑了孔隙度在 CT 图像分割处理中的总体控制作用,同时兼顾了判别分析法基于实际图像的具体特征对图像分割所起的局部调整作用。对比图 1, 2 可以看出,图像的分割质量得到改善,孔隙规模及连通性更加合理 (见图 2(c) 中圆圈部分)。

### 4 结 论

(1) 判别分析法能够依据 CT 图像中岩石骨架和孔隙空间两类总体的灰度差异作出理论上的最佳分割,但实际分割结果与真实情况存在偏差。

(2) 岩心非均质性及岩心内部可能存在孤立孔隙等使 CT 图像的真实孔隙度与岩心试验孔隙度无法吻合,这导致完全以岩心试验孔隙度为准则的图像分割方法无法获得理想的分割效果。

(3) 本文中提出的新方法充分考虑了孔隙度在 CT 图像分割处理中的总体控制作用,同时兼顾了判别分析法基于实际图像的具体特征对图像分割所起的局部调整作用,能够对岩心灰度图像作出更加合理的二值分割。

### 参考文献:

[1] SPANNE P, THOVERT J F, JACQUIN C J, et al Synchrotron computed microtomography of porous media: topology and transports [J]. Physical Review Letters, 1994, 73 (14): 2001-2004.

[2] 严曲,赵跃龙. 一种基于迭代阈值法的身份证图像二值化算法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13 (6): 595-597.

YAN Qu, ZHAO Yue-long Study of binarization method of identification card scanned image [J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13 (6): 595-597.

[3] 严学强,叶秀清,刘济林,等. 基于量化图像直方图的最大熵阈值处理算法 [J]. 模式识别与人工智能, 1998, 11 (3): 352-358.

YAN Xue-qiang, YE Xiu-qing, LIU Ji-lin, et al A maximum entropy processing method based on the histogram figure from quantitative images [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 1998, 11 (3): 352-358.

(下转第 72 页)

了钉子结构和泡状结构。

(2)气相与液相雷诺数对界面的迁移、演化过程的影响规律相同,只是在管中流动产生的界面形状有差异,液相雷诺数的增加使得界面波动更加剧烈。

#### 参考文献:

- [1] 李明川,崔桂香. 变质量气液分层流动数值模拟 [J]. 石油钻采工艺, 2001, 23 (1): 47-50.  
LI Ming-chuan, CUI Gui-xiang Numerical simulation of gas-liquid two phase stratified flow with variable mass [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2001, 23 (1): 47-50.
- [2] 李明川,崔桂香. 有气相注入的管内气液分层流数值模拟 [J]. 工程力学, 2002, 19 (3): 78-81.  
LI Ming-chuan, CUI Gui-xiang Numerical simulations of gas-liquid stratified flow in a horizontal pipe with gas injection through wall [J]. Engineering Mechanics, 2002, 19 (3): 78-81.
- [3] 贺成才. 圆管分层流的数值模拟 [J]. 油气储运, 2002, 21 (6): 18-19.  
HE Cheng-cai Mathematical model on stratified laminar flow in pipe [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2002, 21 (6): 18-19.
- [4] 任德鹏,夏新林,谈和平. 圆管层流入口段数值模拟的差分格式与出口边界条件研究 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24 (4): 673-675.  
REN De-peng, XIA Xin-lin, TAN He-ping An investigation on difference scheme and outlet boundary condition for numerical simulation of laminar developing flow in a circular tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24 (4): 673-675.
- [5] 曹学文,梁法春,黄庆宣,等. 水平管气液分层流压力梯度和含气率计算方法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2003, 37 (5): 444-446.  
CAO Xue-wen, LIANG Fa-chun, HUANG Qing-xuan, et al Study on the calculation of pressure gradient and void fraction in horizontal gas liquid two phase stratified flow [J]. Journal of Xi an Jiaotong University, 2003, 37 (5): 444-446.
- [6] 李会雄,杨冬,陈昕宽,等. Level Set方法及其在两相流数值模拟研究中的应用 [J]. 工程热物理学报, 2001, 22 (2): 233-236.  
LI Hui-xiong, YANG Dong, CHEN Ting-kuan, et al A formulation for the Level Set method and its applications in gas-liquid two-phase flow simulations [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22 (2): 233-236.
- [7] 傅德薰,马延文. 计算流体力学 [M]. 北京:高等教育出版社, 2002: 233-236.
- [8] 袁德奎,陶建华. 用 Level Set方法求解具有自由面的流动问题 [J]. 力学学报, 2000, 32 (3): 264-271.  
YUAN De-kui, TAO Jian-hua Simulation of the flow with free surface by Level Set method [J]. Acta Mechanica Sinica, 2000, 32 (3): 264-271.
- [9] 张连明,康永尚,朱九成. 裂缝介质石油运移实验图像的处理与信息提取 [J]. 石油大学学报:自然科学版, 2000, 24 (4): 115-122.  
CHEN Lian-ming, KANG Yong-shang, ZHU Jiu-cheng Image processing and information extraction from oil migration images collected from the experiments in fractured media model [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000, 24 (4): 115-122.
- [10] 田村秀行. 计算机图像处理技术 [M]. 郝荣威,译. 北京:北京师范大学出版社, 1988: 45-133.

(编辑 李志芬)

(编辑 李志芬)