

# 电磁流动成像测井识别气-水层流的信号处理方法

刘再斌, 吴锡令

中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

**摘要** 针对大斜度或水平气井中最常见的气-水分层流动, 研究利用电磁流动成像测井判别分层流和波状流的方法。首先, 分析水平或微倾圆形管道内较常见的气-水两相流型在管道截面上的特征, 建立流体分布模型; 其次, 模拟流体分布模型的电磁流动成像测井响应, 分析仿真数据特点; 再次, 提取仿真数据中与流体分布相关的特征参数, 该参数不仅用于判定流体分布模型, 而且用于计算分层流模型中的水层高度, 从而求取持水率; 最后, 研究水平气-水两相流型在流动截面上流体分布模型的变化规律, 实现气-水层流判别。仿真数据研究结果表明, 用这种方法可以实现气-水层流判别和持水率求取, 避免了图像重建的过程, 计算简单速度较快。

**关键词** 电磁流动成像测井; 气-水层流; 流体分布模型; 层流判别; 持水率

**中图分类号** P631.3

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.05.003

## Gas-Water Stratified Flow Identification Based on Electromagnetic Image Logging

LIU Zaibin, WU Xiling

State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

**Abstract** Aiming at the most familiar gas-water stratified flow in the highly deviated or the horizontal gas wells, based on the electromagnetic image logging technology, the identification method for stratified smooth flow and stratified wavy flow is researched. Firstly, the similar characteristics in the flow section of all the gas-water flow patterns in the horizontal or inclined pipe are extracted. According to the abstraction of the characters, four material distribution models are built up. Secondly, the electromagnetic image logging measurement in response to all the four material distribution models are simulated by the finite element method and the peculiarity related with the flow patterns of each response is analyzed. Thirdly, the character related to the models is computed as a parameter from the measurements. By using the parameter, the stratified model is separated from other models and water holdup rate is computed. Finally, a pattern recognition method is used to identify the transformation rules of the material distribution models in the flow section; the gas-water stratified flow is distinguished. With this method, the gas-water stratified flow patterns can be identified and the water holdup rate can be computed, and the method is quicker and more accurate than analyzing reconstructed images.

**Keywords** electromagnetic image logging; gas-water stratified flow; material distribution model; stratified flow identification; water holdup rate

### 0 引言

在水平或大斜度气井中, 气和水通常呈分层流动状态, 主要流型为层状流和波状流, 同时还可能存在变形泡状流、

段塞流和环状流等其他流型。流型种类多样且变化复杂, 对流量、持率等多相流特征参数的准确测量产生很大影响, 特别是在过渡区产生很大误差, 所以流型的判别是研究油气井

收稿日期: 2010-10-15; 修回日期: 2011-01-14

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05020)

作者简介: 刘再斌, 博士研究生, 研究方向为地球物理信息处理与解释, 电子信箱: ixianghang@sina.com; 吴锡令(通信作者), 教授, 研究方向为生产测井方法、仪器研发及测井资料处理解释, 电子信箱: wuxiling@sina.com

生产状况、进行产能预测和油藏描述的基础<sup>[1]</sup>。传统的流型判别方法大致有流型图和流型转换准则、目测法和高速摄影法、射线衰减法、接触式探针法等<sup>[2]</sup>。流型图和转换准则只能用于定性判断流型;目测法需要管道透明或有透明窗口,只适用于低流速场合且受观察者主观因素影响较大;高速摄影法易受到相界面反射和折射的影响,降低了判别的准确性;射线衰减法需要用到放射性源,安全性较差;接触式探针法测量范围有限,且由于探头直接接触流体,必然对流型产生一定影响。

基于过程层析成像的电磁流动成像测井采用阵列电极,通过对流动截面进行扫描测量,利用天然气与水的电特性差异辨识流体的流型。本文是在前期多相流动电磁成像测井研究的基础上进行的。多相流动成像测井研究经历了两个主要阶段。第一阶段主要进行了方法研究:1999年,吴锡令等<sup>[3]</sup>首先提出了多相管流电磁成像测井方法;2000年,吴锡令等<sup>[4]</sup>对多相流动电磁波成像测井进行了基础研究;2003年,赵亮等<sup>[5]</sup>研究了测量敏感场的计算问题。第二阶段主要进行测量仿真和静态实验:2007年,赵彦伟等<sup>[6]</sup>对敏感场进行了仿真研究,

王晓星等<sup>[7]</sup>进行了电磁流动成像测井提取流动参量方法的研究;2008年,王晓星等<sup>[8]</sup>进行了两相流电磁成像测量正问题研究,吴锡令等<sup>[9]</sup>研究了电磁阵列传感器优化;2009年,文献[10]进行了气-水层流的实验。本文在对测量方法深入研究的基础上,利用有限元方法对测量响应进行仿真,并利用简易探头进行了气-水层流实验,研究不通过重建图像而是直接提取模拟测量数据中与流型相关的特征参数,判别气-水层流和求取持水率的方法。

### 1 气-水流体分布模型

为了研究水平井内的气-水两相流型和转换边界问题,路菁等<sup>[11]</sup>进行了气-水两相水平流动测井的流型实验研究,实验过程中观察到的稳定状态下的流型为分层流、波状流和变形泡状流,如图1所示。

除了实验中观察到的流型,Barnea<sup>[12]</sup>等对水平管道内气-水两相流型研究的结果表明,还可能存在的流型有段塞流、分散泡状流和环状流,如图2所示。

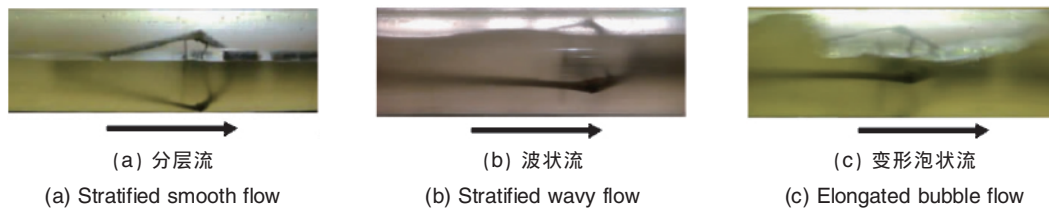


图1 水平气-水两相流动实验流型

Fig. 1 Gas-water flow patterns observed in horizontal logging experiments

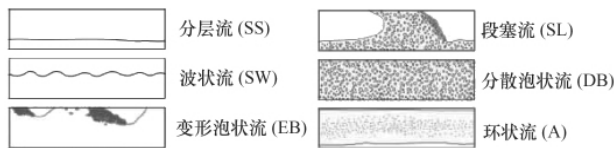


图2 水平圆管内气-水两相流型

Fig. 2 Gas-water flow patterns in a horizontal pipe

气-水两相各种流型具有不同的特征,但是流动截面上流体的分布状态只有气-水分层分布、气-水环状分布、单相水分布、单相气分布和气-水均匀分布5种情况。将分布状况进行简化建立全气模型、全水模型、分层流模型和环状流模

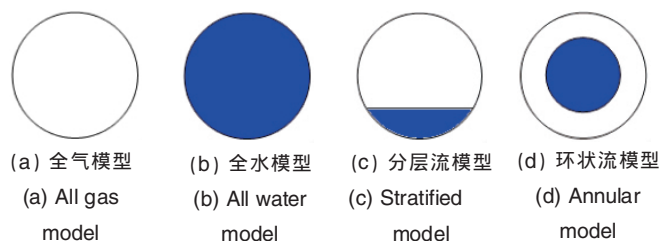


图3 气-水两相流体分布模型

Fig. 3 Gas-water material distribution models

型4种流体分布模型,如图3所示,图中白色部分表示气相,蓝色部分表示水相。通过建立流体分布模型把流型转化为流体分布模型,把复杂的流型识别问题转换为简单的流体分布模型识别问题。

### 2 模型测井响应特征

电磁流动成像测井方法的基本设计是:16个等间距排列电极组成测量电极环,为减小导电钢质套管对测量信号的影响,电极阵列安装绝缘衬套上,测量时依次选择1~16号电极作为主发射电极,供给电压恒定、频率一定的激励信号,主发射电极左右两侧电极分别馈以相同信号,以起到聚焦作用,然后依次切换其余电极作为测量电极,测量电极左右两侧电极需接地。重复上述过程,直到所有的独立测量电压都被检测。一个测量周期可得到的测量数据个数为 $16 \times (16 - 5) = 176$ 。传感器电极阵列结构剖面及测量模式如图4所示<sup>[9]</sup>。

利用电磁流动成像测井进行流型判别<sup>[7]</sup>的一般方法是基于成像的流型识别,即流型可视化。依据所获取的相分布图像提取出流型特征信息从而识别出各种流型。由于多相流系统极强的非线性和复杂性,以及电磁成像测量系统传感器的软场效应导致成像算法复杂,因此基于重建图像处理的流型

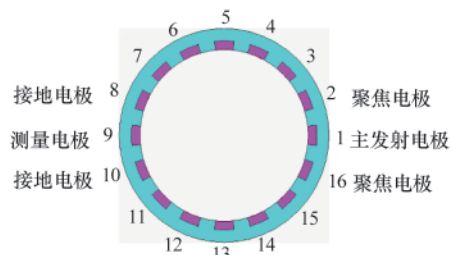


图 4 电磁流动成像测量传感器结构剖面及测量模式  
Fig. 4 Structural profile of sensor for electromagnetic image logging and measure pattern

识别普遍计算量较大,实时性和识别精度还不甚理想,难以实现在线应用。

吴锡令等<sup>[10]</sup>进行了气-水分层流动电磁成像测量仿真与实验研究,证明了计算机仿真能够精确模拟电磁成像测量响应,正演模拟结果可以代替实体物理模型进行研究,本研究所采用的响应数据都是正演模拟计算数据。数值模拟与实验模拟结果如图 5 所示。

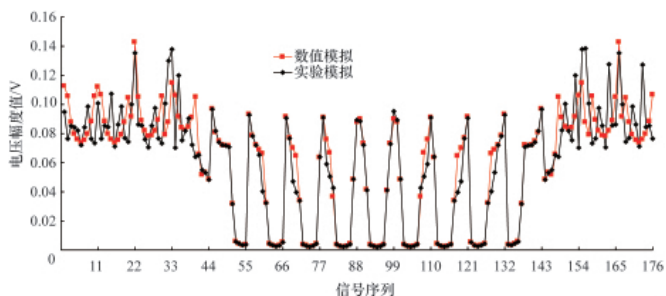


图 5 气-水分层流模型数值模拟与实验模拟结果对比  
Fig. 5 Comparison of the experimental values with the simulation data in the stratified model

利用有限元方法对全气模型、全水模型、分层流模型和环状流模型 4 种流体分布模型进行正演模拟,首先建立传感器模型和流体分布模型,然后输入电极、套管、绝缘体和流体

的电性参数包括相对介电常数和电导率,采用 3MHz 频率按照发射—聚焦—接地测量模式进行正演模拟<sup>[8]</sup>,获得模拟信号。通过对比分析发现,不同模型的模拟信号特征十分明显:全水模型、全气模型和环状流模型 16 个主发射电极的响应信号曲线形状相同,信号幅度与持水率相关,而分层流模型 16 个主发射电极的响应信号曲线形状不同,如图 6 所示。

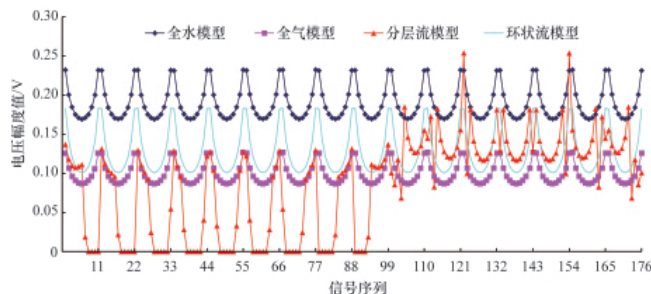


图 6 气-水流体分布模型电磁流动成像测井模拟信号曲线  
Fig. 6 Analog measurement signal curves for gas-water material distribution model

### 3 分层流模型判别和持水率计算

#### 3.1 分层流模型判别

电磁流动成像测井一个周期可获得 176 个测量数据,首先对每个主发射电极进行激励时的 11 个测量值求平均,共得到 16 个平均值;然后求这 16 个平均值之间的最大差值  $d$ ,如表 1 所示。正演模拟结果表明,分层流模型的  $d$  值在 0.0498~0.2953V 之间,全水模型、全气模型和环状流模型的  $d$  值均在 0.0001~0.0003V 之间。因此,可通过  $d$  值判定流体分布模型。

#### 3.2 分层流模型持水率计算

由表 1 可以看出,分层流模型的  $d$  值与  $h$  具有某种对应关系。根据实验数据点进行拟合,结果表明,用二次多项式进行拟合时,数据点符合效果最好,拟合公式为

$$h=454.36d^2+149.67d+2.2375 \quad (1)$$

表 1 分层流模型与其他流体分布模型  $d$  值对比  
Table 1 The  $d$  values of all models simulated

模型名称	模型特征	$d/V$	模型名称	模型特征	$d/V$
分层流模型 1	$h=8.7620\text{mm}$	0.0498	分层流模型 10	$h=88.7640\text{mm}$	0.2953
分层流模型 2	$h=15.2360\text{mm}$	0.0707	全水模型	单一水相介质	0.0003
分层流模型 3	$h=23.1088\text{mm}$	0.0994	全气模型	单一气相介质	0.0001
分层流模型 4	$h=32.0996\text{mm}$	0.1290	环状流模型 1	$r_w=6.5\text{mm}$	0.0001
分层流模型 5	$h=41.8548\text{mm}$	0.1756	环状流模型 2	$r_w=13.0\text{mm}$	0.0001
分层流模型 6	$h=52.0000\text{mm}$	0.2072	环状流模型 3	$r_w=19.5\text{mm}$	0.0001
分层流模型 7	$h=62.1452\text{mm}$	0.2405	环状流模型 4	$r_w=26.0\text{mm}$	0.0001
分层流模型 8	$h=71.9004\text{mm}$	0.2634	环状流模型 5	$r_w=32.5\text{mm}$	0.0001
分层流模型 9	$h=80.8912\text{mm}$	0.2833	环状流模型 6	$r_w=39.0\text{mm}$	0.0001

注: $h$  为气-水分层流模型水层的高度, $r_w$  为气-水环状流模型水泡的半径。

Notes:  $h$  represents the height of the water phase, and  $r_w$  represents the radius of the water phase.

对于气-水分层流模型,对模拟信号进行处理就可以得出  $h$ ,亦即气-水层界面的位置,进而直接求取持水率。

设测量区域的半径为  $R$ , mm。分为水层高度小于区域半径(图 7(a))和水层高度大于区域半径(图 7(b))两种情况,此时测量区域内持水率就是地层水所在的弓形面积与整个圆域面积的比值,如图 7 所示。

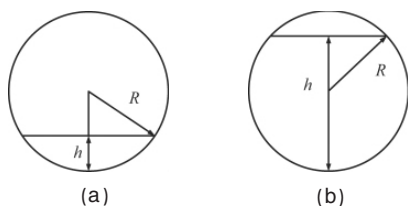


图 7 分层流模型持水率求取方法示意图

Fig. 7 Water holdup rate calculation for a stratified model

当  $h < R$  时,持水率计算公式为

$$Y_w = \frac{\arccos \frac{R-h}{R}}{\pi} + \frac{(R-h)\sqrt{R^2-(R-h)^2}}{\pi R^2} \quad (2)$$

当  $h > R$  时,持水率计算公式为

$$Y_w = 1 - \frac{\arccos \frac{h-R}{R}}{\pi} + \frac{(h-R)\sqrt{R^2-(h-R)^2}}{\pi R^2} \quad (3)$$

#### 4 气-水层流识别

如第 1 节所述,在圆形管道空间范围内分布的两相流型可以转换为流动截面上随时间变化的流体分布模型,比如变形泡状流是全水模型和分层流模型的组合,而段塞流是全气模型、分层模型和全水模型的组合等。利用电磁流动成像测井能够实现单一流体分布模型的准确识别,可以实现对流动截面连续测量,于是将一段时间内流经该截面的所有分布模型组合起来,实现对流型的判别。其中气-水分层流流体分布模型最为简单,识别最为容易,一定时间内  $d$  值都处于分层流模型范围内且变化范围较小,就可以判别该段时间内流型是分层流;一定时间内  $d$  值均处于分层流模型范围内且变化范围较大,就可以判别该段时间内流型是波状流。目前的模拟研究还只是基于静态分布模型,要实现流型识别必须进行流动模拟研究,即流动截面上流体分布模型连续变化,这将是下一步研究工作的重点。

#### 5 结论

(1) 对电磁流动成像测井数据进行处理分类,可以区别分层流模型与其他流体模型。对于分层流模型可以直接确定气-水层界面位置,计算持水率。

(2) 相对于复杂耗时精确度不高的分析重建图像方法,模式识别方法算法简单,识别速度快,精度高。

#### 参考文献 (References)

[1] 李海青, 乔贺堂. 多相流检测技术进展 [M]. 北京: 石油工业出版社,

1996: 33-42.

Li Haiqing, Qiao Hetang. Multiphaseflow detection technology progress [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996: 33-42.

[2] 梁法春, 曹学文, 冠杰, 等. 多相流型检测与识别技术 [J]. 油气储运, 2001, 20(11): 1-4.

Liang Fachun, Cao Xuewen, Guan Jie, et al. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20(11): 1-4.

[3] 吴锡令, 景永奇. 多相管流电磁成像测井方法研究 [J]. 地球物理学报, 1999, 42(4): 557-562.

Wu Xiling, Jing Yongqi. Chinese Journal Geophysics, 1999, 42 (4): 557-562.

[4] 吴锡令, 赵亮. 多相流动电磁波成像测井基础研究 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(2): 79-82.

Wu Xiling, Zhao Liang. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(2): 79-82.

[5] 赵亮, 吴锡令. 多相流动电磁波成像测井测量敏感场计算 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(6): 870-874.

Zhao Liang, Wu Xiling. Chinese Journal Geophysics, 2003, 46 (6): 870-874.

[6] Zhao Y W, Wu X L, Wang X X. Simulation of sensitivity field for electromagnetic tomography in multiphase flow well logging [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(3): 811-816.

[7] 王晓星, 吴锡令. 电磁流动成像测井提取流动参量方法研究 [J]. 科学技术与工程, 2007, 7(14): 3526-3528.

Wang Xiaoxing, Wu Xiling. Science Technology and Engineering, 2007, 7(14): 3526-3528.

[8] 王晓星, 吴锡令. 两相流电磁成像测量正问题研究 [J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(3): 88-91.

Wang Xiaoxing, Wu Xiling. Journal of Xi'an Shiyu University: Natural Science Edition, 2008, 23(3): 88-91.

[9] 吴锡令, 王晓星, 赵彦伟, 等. 油井流动成像电磁测量方法研究 [J]. 中国科学 D 辑, 2008, 38(S1): 161-165.

Wu Xiling, Wang Xiaoxing, Zhao Yanwei, et al. Science in China, Series D, 2008, 38(S1): 161-165.

[10] Wu X L, Wang X X. Gas-water stratified flow patterns from electromagnetic tomography[J]. Petroleum Science, 2009, 6(3): 254-258.

[11] 路菁, 吴锡令, 黄志浩, 等. 气水两相水平流动测井的流型实验研究 [J]. 科技导报, 2010, 28(3): 59-62.

Lu Jing, Wu Xiling, Huang Zhihao, et al. Review Science & Technology, 2010, 28(3): 59-62.

[12] Barnea D. A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1987, 13(1): 1-12.

(责任编辑 刘志远)

#### 《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。