

# Experimental Study on Oil-water Two-phase Flow in Low Liquid Horizontal Wells

Minjun Qin<sup>1</sup>, Jiakai Dai<sup>2</sup>, Yang Pei<sup>1</sup>, Zhongtao Wang<sup>1</sup>, Hui Zhang<sup>1</sup>, Jinhai Zhang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Production Logging Center, China Petroleum Logging Co. Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Email: qinmj@cnpcc.com.cn

Received: Mar. 12<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2018; published: Oct. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

In horizontal wellbore (horizontal section), fluid had velocity distribution and medium distribution different from vertical well. Because of density difference, under the action of gravity separation, the stratified flow of gas, oil and water was the main characteristics from the top to bottom. Therefore, the conventional vertical well center flow production logging tool could not be used to measure the true flow pattern in the horizontal well. In order to solve the problem of production logging in horizontal wells and improve the precision of logging interpretation of fluid production profile in horizontal wells, a new array logging instrument MAPS from Sondex Company (multiple array production suite) is used, and a series of two-phase flow simulation tests in horizontal wells are carried out, which provide an advanced scheme for the detection and analysis of two-phase flow patterns in horizontal wells.

## Keywords

Horizontal Well, Two-phase Flow Simulation Test, New Array Logging Instrument MAPS

---

# 低流量水平井油水两相流模拟试验研究

秦民君<sup>1</sup>, 戴家才<sup>2</sup>, 裴 阳<sup>1</sup>, 王中涛<sup>1</sup>, 张 辉<sup>1</sup>, 张金海<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国石油集团测井有限公司生产测井中心, 陕西 西安

<sup>2</sup>西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都

作者简介: 秦民君(1968-), 男, 高级工程师, 长期从事油气田开发动态分析、生产测井资料采集解释、测井设备研发等方面工作。

Email: qinmj@cnpc.com.cn

收稿日期: 2018年3月12日; 录用日期: 2018年7月2日; 发布日期: 2018年10月15日

## 摘 要

在水平井的井筒(水平段)中, 流体具有与直井不同的速度分布和介质分布, 由于密度差异, 在重力分离作用下, 从上至下分别是以气、油、水的层状流流动为主要特征。因此, 常规垂直井中心流生产测井仪器无法准确测得水平井下真实流态。为了解决水平井的生产测井问题, 提高产液剖面测井解释精度, 利用Sondex公司的新型阵列测井仪器MAPS (multiple array production suite), 进行了一系列水平井两相流模拟试验, 为水平井两相流态的检测分析提供了先进的方案。

## 关键词

水平井, 两相流模拟试验, 新型阵列测井仪器MAPS

Copyright © 2018 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 水平井技术在新油田开发和老油田调整挖潜上成效显著, 可以降低勘探开发成本、大幅度提高油气单井产能和采收率, 以其投资回收率高、适用范围广泛的优点得到了全世界的青睐。

目前, 国内油田在水平井的测井解释中还是比较落后, 垂直井所固有的解释方法在水平井解释中仍占主导地位, 且大部分适用于高流量井。在该背景下, 通过两相流试验, 对阵列仪器在低流量下的状态进行标定, 分析流量对测井的影响, 为水平井测井及资料解释提供依据。

## 2. MAPS 组合仪器结构

MAPS 水平井阵列式测井仪器主要由阵列式电容持水率计(CAT)、阵列式电阻率持水率计(RAT)和阵列式涡轮流量计(SAT)等串组合而成(图 1)。



Figure 1. The composition of array tool string

图 1. 阵列式仪器串组成图

1) SAT 分别由 6 个微型涡轮组成，它们通过弓形弹簧片安置在管子内径中。该工具在油管中呈关闭状态，当其离开油管进入直径更大的套管中时会自动打开。弓形弹簧片可以保护涡轮在上测和下测时免受损伤。传感器整体附在弓形弹簧片上并和传感器元件连接，包括磁通角传感器与温度传感器。叶轮安装在两个枢纽之间，装有轴承，在每个叶轮中间装有磁体。磁通角传感器根据磁通角度输出响应的正弦波和余弦波。当磁极轮流经过传感器的一边时磁通角会发生变化，可以利用该现象来计算流体流动速度与流动方向。

2) CAT 由 12 个弓形弹簧片组成，当其进入套管时会向外张开。其工作原理与传统的电容持水率计类似，均利用了油气与水的相对介电常数性质差异来识别流体性质；创新之处在于环形测量的方式，采用同样的原理用 12 个局部位置的传感器测量电容。在油/水中刻度曲线就可以分析测量结果，从而明确每个探头附近液体的相态。

3) RAT 包含 12 个传感器，排列在仪器的边缘，使用弓形弹簧片部署在管子的内表面附近。通过将传感器放置在管子横截面的不同位置，从而监测井筒流体内部的变化[1]。

实际测井中，与常规 PLT 系列(自然伽马、磁定位、温度、压力、电容持水率、全井眼涡轮)组合，完成水平井测井。

### 3. 试验方案设计

该次试验全部是在 5.5 in 外径模拟管道中进行，所测数据点为 409 个。在试验进行的同时，不仅记录了原始数据还进行了拍照录像，具体试验方案设计为：

- 1) 流体相态：油水两相。
- 2) 井斜：水平井定义为  $0^\circ$ ，向上流为正角度  $90^\circ$ 。
- 3) 测速：0、13.33、15、16.67 m/min。
- 4) 流量：10~600  $\text{m}^3/\text{d}$ 。
- 5) 含水率：0%、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%、100%。

### 4. 流量试验结果分析

#### 4.1. 点测涡轮响应情况

根据试验数据绘制了在不同流体介质中全井眼涡轮流量(见图 2 中的“FLOW”)、阵列涡轮流量(见图 2 中的“SAT1、SAT2、……、SAT6”)与涡轮响应的关系图。从图 2 中可以看出：① 阵列涡轮的启动流量远大于全井眼涡轮，且在相同流量下，阵列涡轮的涡轮响应值低于全井眼涡轮；② 与低流量相比，高流量情况下阵列涡轮与全井眼涡轮响应的线性关系更好；③ 与水介质相比，油质情况下全井眼涡轮与阵列涡轮的启动流量更大。

#### 4.2. 低流量下涡轮响应与电缆测速的交会关系

低流量情况下，点测涡轮受启动排量影响不转，需要通过拉动电缆方式，使涡轮转动，该次试验采用 3 种速度上提电缆，在完全水平情况下模拟水平井产液剖面测井情况。具体试验中，100  $\text{m}^3/\text{d}$  以下点测涡轮

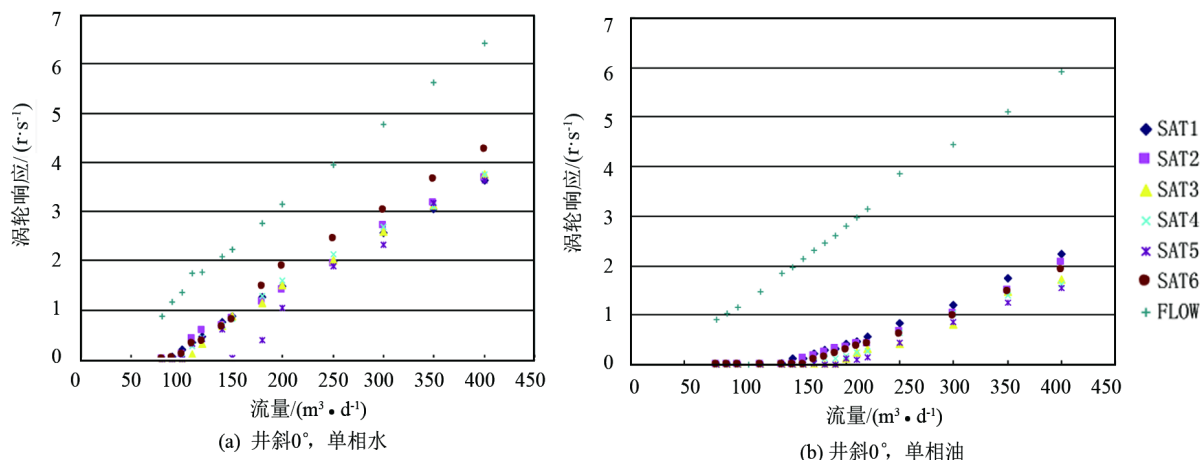


Figure 2. The relationship of turbine flow and turbine response  
图 2. 涡轮流量与涡轮响应关系

不转, 结合生产实际, 选取 50、30、20、10 m<sup>3</sup>/d 共 4 种流量, 20%、40%、60%、80% 共 4 种含水率进行试验。

数据处理方法为: 取出不同电缆速度(相对于仪器上提测量, 电缆速度取负值)对应的流量计测井值, 作交会图计算视流体速度及斜率, 然后计算启动速度校正值。

$$v_a = \frac{\sum v_1 \sum R_{ps}^2 - \sum R_{ps} (\sum R_{ps} \times v_1)}{n \sum R_{ps}^2 - (\sum R_{ps})^2}$$

$$K = \frac{n \sum R_{ps} \times v_1 - \sum v_1 \sum R_{ps}}{n \sum R_{ps}^2 - (\sum R_{ps})^2}$$

$$v_t = v'_a - v_a$$

式中:  $v'_a$  为井筒中实际流体速度, m/min;  $v_1$  为电缆速度, m/min;  $R_{ps}$  为涡轮转速, r/s;  $n$  为测井次数;  $v_t$  为启动速度, m/min;  $v_a$  为交会视流体速度, m/min;  $K$  为斜率, 1。

根据试验结果可以, 在低流量情况下, 全井眼涡轮流量响应稳定, 而阵列涡轮响应不稳定, 1、2 号小涡轮基本对称, 而 3~6 号小涡轮基本接近于 0 值, 只有在最高测速情况下才有一定响应。因此, 通过选取相对稳定段的全井眼涡轮流量进行交会, 结果见图 3~5。

综合分析试验涡轮交会结果, 可以得到以下结论: ① 水平状态下单一的全井眼涡轮或阵列涡轮解释结果都存在一定误差, 两者结合起来可提高解释精度; ② 低流量下阵列涡轮的响应差异较大, 说明同一截面上不同位置的流量不同, 而高流量情况下阵列涡轮响应差异较小。

从试验结果来看, 相对于全井眼涡轮, 阵列涡轮需要更大的启动流量。在极低流量(小于 10 m<sup>3</sup>/d)的水平井中, 全井眼涡轮流量计与阵列式涡轮流量计使用效果均不好, 流量计的响应误差较大; 在特低流量(10~30 m<sup>3</sup>/d)的水平井中, 全井眼涡轮流量计比阵列式涡轮流量计效果好, 当井中流量达不到阵列式涡轮流量计的启动流量时, 阵列式涡轮流量计的响应会失真; 在低流量(30~70 m<sup>3</sup>/d)水平井中, 阵列式涡轮流量计有可能效果较好, 但全井眼涡轮流量计比阵列式涡轮流量计效果更好。从涡轮流量计的适应范围来看, 阵列涡轮适应中、高流量油气井。根据目前长庆油田水平井的平均产液量, 后续测井中不再组合阵列式涡轮流量计下井。

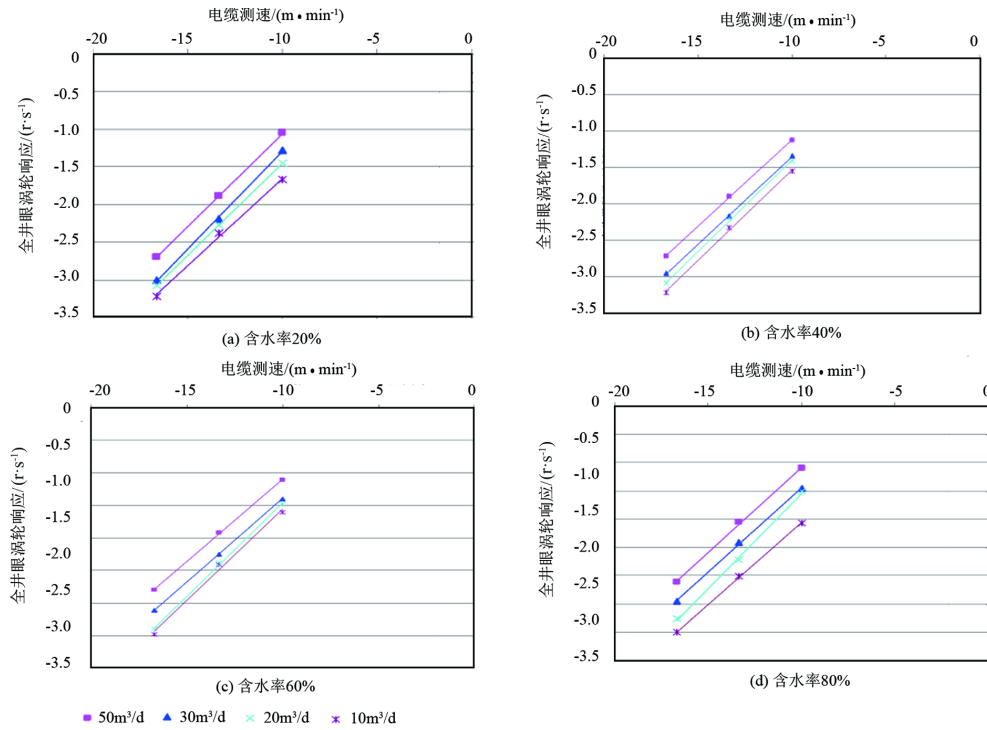


Figure 3. The turbo cross plot of different water cuts in low liquid rate  
 图 3. 低流量情况下不同含水率全井眼涡轮交会图

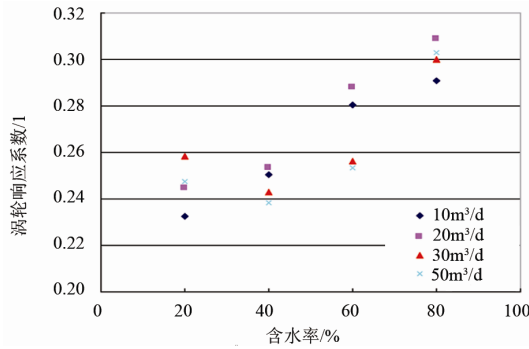


Figure 4. The turbine response coefficient of different water cuts in low liquid rate  
 图 4. 低流量情况下不同含水率涡轮响应系数

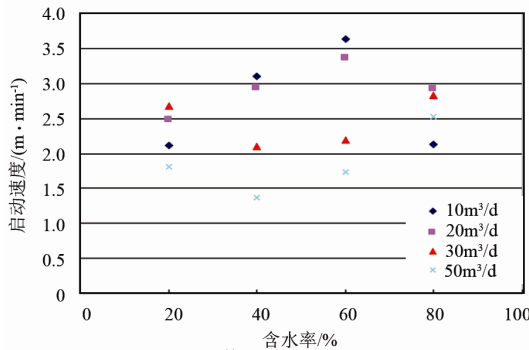


Figure 5. The starting velocity of different water cuts in low liquid rate  
 图 5. 低流量情况下不同含水率启动速度

从资料解释角度来看,低流量相对于高流量而言难度更大。首先是流量资料处理中,涡轮流量交会点的合理性判断与调整更难,可能大部分点会失真,且当仅有上测曲线而缺乏下测曲线时,启动速度的确定成为处理中的难点。因此,需通过试验数据,建立不同含水率状况下涡轮与流量的关系刻度图版,辅助测井资料解释,减少测井趟次。

## 5. 持水率试验结果分析

### 5.1. 不同持水率计响应值与含水率的关系

当阵列探头位置在水中,则该传感器理论响应应归一化值应为1;当阵列探头在油中,其响应值应为0;对阵列探头试验数据进行刻度标定,得到不同流量下CAT、RAT、中心电容持水率试验对比资料,绘制了不同流量下不同持水率计响应值与含水率关系图。

图6(a)结果显示:低含水率情况下,RAT含水率与持水率的关系曲线更接近关井情况下含水率与持水率的关系曲线;高含水率情况下,CAT含水率与持水率的关系曲线更接近关井情况下含水率与持水率的关系曲线;中等含水率情况下,CAT、RAT含水率与持水率的关系曲线均接近关井情况下含水率与持水率的关系曲线。

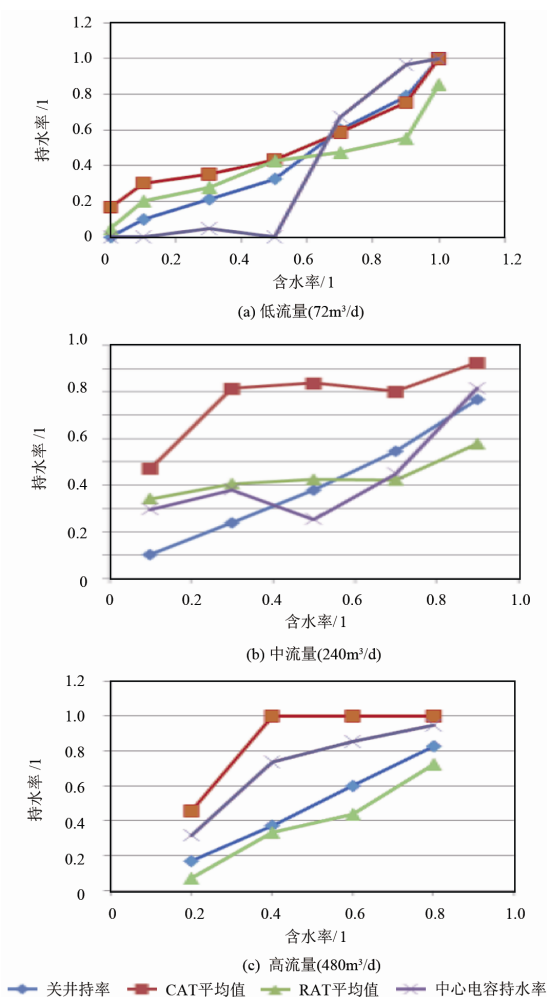


Figure 6. The relationship between response value and water cut of different water holdup meters  
图 6. 不同持水率计响应值与含水率关系图



图 6(b)结果显示:高、低含水率情况下,中心电容持水率计含水率与持水率的关系曲线更接近关井情况下含水率与持水率的关系曲线;中等含水率情况下,CAT 含水率与持水率的关系曲线均接近关井情况下含水率与持水率的关系曲线;与中心电容持水率、RAT 相比,CAT 含水率与持水率的关系曲线偏离关井情况下含水率与持水率的关系曲线较远。

图 6(c)结果显示:高、低含水率情况下,中心电容持水率计含水率与持水率的关系曲线更接近关井情况下含水率与持水率的关系曲线;中等含水率情况下,CAT 含水率与持水率的关系曲线均接近关井情况下含水率与持水率的关系曲线;与中心电容持水率、RAT 相比,CAT 含水率与持水率的关系曲线偏离关井情况下含水率与持水率的关系曲线较远。

从图 6 分析可知:① 几种不同流量情况下,中心电容持水率与实际值之间都存在较大误差,再次突出了阵列持水率计在水平井测井中的必要性和重要性;② 低流量情况下,由于流型稳定,因此 CAT 和 RAT 所测到的结果非常接近于实际值;中、高流量情况下,随着含水率的不断升高,流型也会越来越复杂,因此必须综合 CAT 和 RAT 进行解释。

低流量水平井筒中多相流的流型多为分层流,中心电容持水率计不能准确反映井筒中流体介质的分布状态,测井系列必须在中心持水率计的基础上增加阵列持水率计,考虑到不同流量、不同含水情况下 CAT 和 RAT 各有优缺点,必须 CAT 和 RAT 同时测量。

## 5.2. 低流量情况下 CAT 与含水率的关系

在低流量情况下,水平井筒内流体型态为层流,一般分为光滑层流、波状层流、滚波层流 3 种[2] [3] [4]。阵列持水率计的探头大部分处于单相油或单相水中,只有 2 只探头处于油水界面处,当井筒内流量增大时,油水界面产生波动,形成界面混杂波状分层流,此时位于全油和全水中的探头数目减少,当含水率逐步增加时,形成上层水包油、下层水。图 7(a)、图 7(b)为分别在  $10 \text{ m}^3/\text{d}$  (极低流量)、 $50 \text{ m}^3/\text{d}$  (低流量)情况下,CAT 每个探头(见图 7 中的“CAT1、CAT2、……、CAT12”)持水率与含水率的关系,对比可见,随着流量增大,处于油水刻度值之间的探头数目增加,同时分层界面更加紊乱,流型更加复杂。

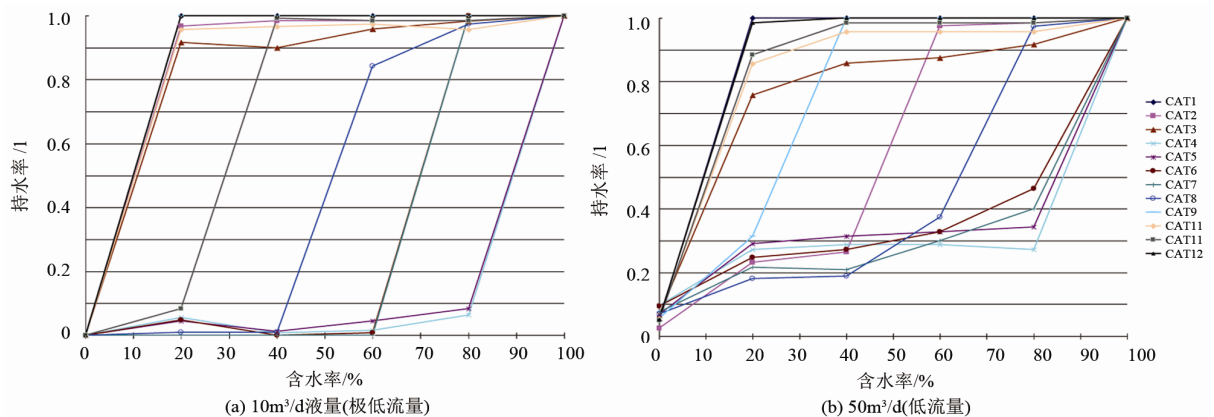


Figure 7. The relationship between water holdup and water content of CAT probes

图 7. CAT 各探头持水率与含水率关系图

## 6. 结论

- 1) 理论与试验研究表明,阵列持水率计比中心电容持水率计更能反映井筒中流体介质的变化与分布。
- 2) 与直井相比,水平井中涡轮流量计需要更大的启动流量;与全井眼涡轮流量计相比,阵列式涡轮流量计需要更大的启动流量。对于长庆油田低流量水平井而言,全井眼涡轮流量计比阵列式涡轮流量计

测量效果好。

3) 在水平井产液剖面解释中,低流量时涡轮交会点的合理性判断与调整较难,可能大部分点会失真,且当仅有上测曲线缺乏下测曲线时,启动速度的确定成为处理中的难点。通过模拟试验,拟合了不同流量、不同含水率情况下的仪器响应系数和仪器启动速度,对资料定量解释具有较大意义。

## 参考文献

- [1] 杨睿. MAPS 持率成像处理方法研究[D]: [硕士学位论文]. 荆州: 长江大学, 2016.
- [2] 杨梅, 吴锡令, 王志磊, 等. 水平井油水两相流型测量实验[J]. 测井技术, 2008, 32(5): 398-402.
- [3] 黄志尧. 层析成像技术在多相流检测中的应用[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1995.
- [4] 秦昊, 戴家才, 秦民君, 等. 低产水平井油水两相流阵列持水率计实验研究[J]. 测井技术, 2017, 41(6): 638-641.

[编辑] 龚丹

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2471-7185, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [jogt@hanspub.org](mailto:jogt@hanspub.org)