

# 水平油水两相流测井仪器测量通道内流型识别

金宁德<sup>1</sup> 李爽<sup>1</sup> 张煜<sup>1</sup> 郑希科<sup>2</sup> 谢荣华<sup>2</sup> 刘兴斌<sup>2</sup>

(1. 天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072) (2. 大庆油田测试技术服务分公司, 大庆 163412)

**摘要** 水平井产出剖面测井中集流型仪器内油水两相流流型通常呈复杂多态性, 正确认识流型演化规律有助于井下流量测量精度提高. 在油水两相流流动环路中采集电导及电容传感器波动信号的基础上, 基于非线性时间序列递归图纹理分析方法, 对集流型仪器内油水两相流流型特征进行了表征. 研究发现: 在不同流量及含水率下, 递归图纹理特征与流型之间具有较好的对应关系, 可通过递归图纹理特征有效识别水平油水两相流流型.

**关键词** 水平油水两相流, 流型识别, 非线性分析, 递归图

## 引言

水平井开采技术被称为石油工业的第二次革命. 采用水平井开发方案, 可以更好地挖掘剩余油潜力、提高低渗透油田单井产量及降低生产成本. 在直井或近乎垂直的井中, 油水两相流流型相对比较简单, 主要为水包油或油包水分散流型, 但在水平及近水平油水两相流井中, 流动状态、流速及浓度剖面分布极为复杂, 流型包括重质相与轻质相分离的层状流、波状流、上下层状分散流及全空间分散流型. 更为严重的是, 流型转化边界对井斜角度较为敏感, 流型复杂变化对井下含水率传感器测量响应特性及含水率测井资料解释精度均有较大影响, 所以, 研究水平油水两相流测井仪器测量通道内不可视流型识别方法具有重要意义.

二十世纪 60 ~ 70 年代, 国外学者在小尺寸有机玻璃管内采用直接观察方法对水平油水两相流流型进行了流动实验研究<sup>[1-5]</sup>. 近年来, 流型研究中采用了电阻抗法及高速动态摄像技术, 在一定程度上避免了流型定义的主观性<sup>[6-8]</sup>, 同时对流型转化机理模型进行了研究<sup>[9-13]</sup>. 针对油气输运过程中的水平油水两相流流动特性问题, 近年来, 国内也开展了水平油水两相流流型转化规律研究, 提出了相应的流型转换图及相应准则<sup>[14-16]</sup>. 尽管水平井油水两相流研究取得了较大进展, 但对于井下水平井油水两相流流量测试问题, 却无法直接采用目

前已有的流型图直接识别流型, 原因是识别流型的两个关键油相或水相表观流速在实际测井中无法直接获得.

两相流是一个复杂非线性动力学系统, 由于两相流受到诸如流体湍动、相间界面相互作用及相间局部相对运动等许多复杂因素影响, 其流动行为呈现高度无规则性、随机性和结构不稳定性. 随着近年来非线性时间序列分析方法迅速发展, 从一维可测工程信号中认识水平油水两相流宏观动力学特性成为可能, 这对具复杂性、不确定性及很难用数学模型表示的两相流动力学特性分析具有较好的优势. 非线性时间序列的递归图分析方法对复杂动力学过程模式识别问题显示出了快速直观有效优势<sup>[17]</sup>. 本文在大庆油田水平油水两相流流动装置上测得电导及电容含水率传感器测量波动信号基础上, 采用递归图分析方法给出了一种识别水平油水两相流测井仪器测量通道内不可视水平油水两相流流型的新途径.

## 1 测井仪器在水平油水两相流流动环路中动态量实验

### 1.1 水平油水两相流测井仪器

水平油水两相流动态测量实验是在大庆油田多相流模拟装置上进行的. 水平井油水两相流测井仪器为集流型涡轮流量计、电导及电容含水率传感器组合. 图 1 分别为实验中采用的流体电导及电容

传感器结构示意图. 电导传感器由安装在绝缘管壁上的四个环形不锈钢电极构成. 四个电极等距排列, 外面的一对为供电电极, 中间的一对为测量电极, 待测流体由环形电极内部流过. 两供电电极之间施加以幅度恒定的交变电流. 两测量电极之间的电势差经放大、滤波后, 输出的电压信号表征了油水混合物的组分和水电导率变化. 流体电容含水率传感器结构主要是同轴电容器, 在环形空间测量流体. 同轴电容器由表面覆有薄绝缘介质膜(聚酰亚胺)的圆柱形金属内电极及同轴金属外电极构成. 图2为总流量( $Q_t$ )为  $10\text{ m}^3/\text{d}$  时不同含水率( $K_w$ )

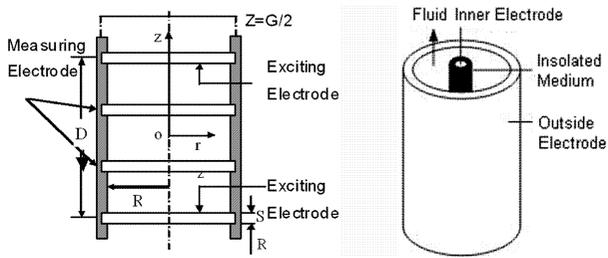


图1 用于水平油水两相流测量的电导及电容传感器示意图  
Fig.1 Conductance and capacitance sensors for the measurement

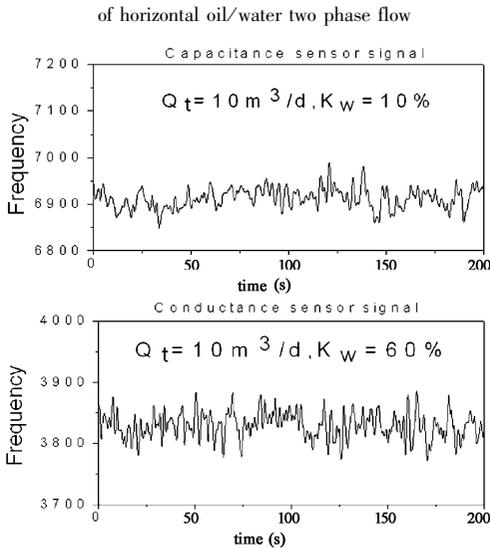


图2 总流量为  $10\text{ m}^3/\text{d}$  时电容及电导含水率计波动信号  
Fig.2 Capacitance and conductance water-cut meter signals at the flow rate of  $10\text{ m}^3/\text{d}$

电容及电导含水率计波动信号. 由于电导传感器适于在水为连续相的条件下工作, 所以, 电导测量数据仅在含水率大于  $40\%$  以上时供分析使用. 仪器总体结构如图3所示, 测量部分主要包括流量计(涡轮传感器)、含水率计(电导及电容传感器). 采用遥测技术实现多参数同时测量和传输. 测量时采用集流器迫使模拟井筒中油水两相流流体进入中

心直径为  $20\text{ mm}$  的仪器测量通道内. 采用扶正器以保证组合仪器在模拟井筒内居中.

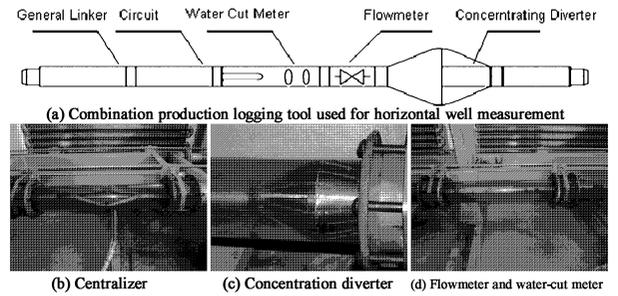


图3 模拟井筒中集流型水平井测井组合仪器示意图

Fig.3 Combination concentrating logging tool in horizontal simulation well

1.2 水平管中油水两相流流型

Trallero 等<sup>[18]</sup> 给出了目前比较公认的水平油水两相流流型分类(图4). 流型可分为:

(1) 分层流: 油水混合物流速较低, 较轻的油相在管道上部流动, 较重的水相在管道下部流动, 两相均为连续相. 这种流型又分为: 油水分层流动(ST)、油水分层且界面有混合层波动(ST&MI).

(2) 分散流: a). 水包油和水层(Do/w&w), 如果油水混合物中的水含量较高, 油滴在浮力的作用下, 聚集在管道上部, 分散在水相中流动, 水则在管道下部形成连续相; b). 水包油(Do/w), 油水混合物中水含量较高时, 水相为连续相, 且油滴均匀分散其中. 水包油乳化液是一种较稳定的分散流体; c). 油包水和油包水(Dw/o&o/w), 如果混合物中水含量很小, 超出承载油相的能力, 部分油滴散布在水相中, 出现两种乳化液同时存在的流型, 即油包水和油包油流型; d). 油包水(Dw/o), 如果油水混合物中油含量较高, 油相为连续相, 水相完全分散在油相中.

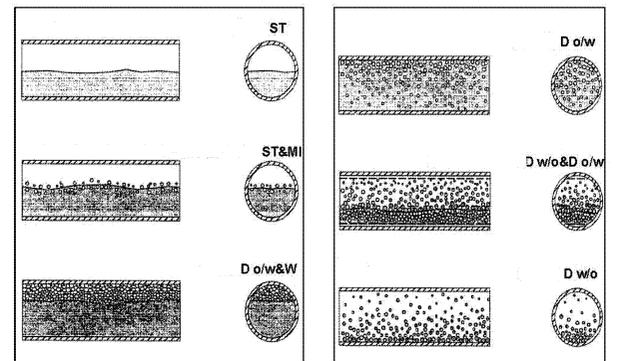


图4 Trallero 水平油水两相流流型分类示意图

Fig.4 flow pattern classification of horizontal oil/water two phase flow by Tralleo

## 2 测井仪器集流通道内水平油水两相流流型转化边界

分层流型模型主要以 Trallero 双流体模型和稳定性准则为基础<sup>[18]</sup>. 双流体模型是把油和水两相都看成是连续介质,即看成是两相双流体系统. 认为其流动是两种流体各自运动及其相互作用的综合;两种流体可以当作是相互渗透的连续介质,它们的运动规律遵守各自的控制微分方程组;两种流体之间存在着质量、动量和能量方面的相互作用.

分散流型模型主要以 Carlos 模型为主基础<sup>[19]</sup>. 对于油包水流型,如果降低流速或增加入口含水率,都会使得管底处的分散水相浓度增大,达到某一临界条件时管底就析出游离水相,流型就转化为油包水与游离水混合流型;另外,对于水包油流型,如果降低流速,油滴就会上浮,转化为水包油与游离水混合流型. 分散流型稳定性是一个十分复杂问题,分散流型的转化主要伴随着两种现象:液滴的径向移动与液滴的破裂和聚合,前者是液滴受力问题,后者是液滴的稳定性问题.

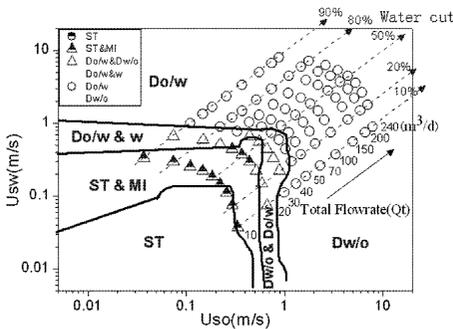


图5 水平油水两相流流型转化边界及实验流动数据在流型图中分布  
Fig.5 horizontal oil/water two phase flow pattern transitional boundary and experimental data distribution in the flow pattern map

图5为根据分层流及分散流模型计算得到的水平油水两相流流型转化边界及实验流动数据在流型图中分布. 流型数值模拟时流体物性参数和管道几何参数分别为:油和水密度分别为  $\rho_o = 0.800 \text{ g/cm}^3$  及  $\rho_w = 1.000 \text{ g/cm}^3$ ;油和水粘度分别为  $\eta_o = 3.62 \text{ cp}$  及  $\eta_w = 1.0 \text{ cp}$ ;表面张力  $\sigma = 0.03 \text{ N/m}^2$ ;仪器测量通道内径为  $20 \text{ mm}$ . 实验时先将油水总流量固定,从小到大调节含水率,从而得到不同的油水两相流流型. 含水率从  $0\%$  每次增加  $10\%$ ,直到  $100\%$ ,即从全油状态到全水状态. 总流量范围为  $10 \text{ m}^3/\text{d} \sim 240 \text{ m}^3/\text{d}$ . 油相介质选为柴油,水相

介质选为自来水. 模拟井筒直径为  $125 \text{ mm}$ . 图4中  $U_{so}$  为油相表观流速,  $U_{sw}$  为水相表观流速,它们可由实验时给出的分相流量及仪器测量通道管径折算求得. 可以看出:流量较低时(小于  $40 \text{ 方/天}$ ),主要以 ST、ST&MI、Dw/o&Do/w 流型为主;高流量时(大于  $40 \text{ 方/天}$ )主要以 Do/w 或 Dw/o 流型为主.

## 3 仪器测量通道内水平油水两相流流型非线性特征分析

### 3.1 非线性时间序列递归图分析方法

Eckmann 等<sup>[20]</sup>提出的递归图方法首先是直接观察  $n$  维相空间中轨线动力学行为随时间变化的规律,它反映了确定性动力学系统的基本特性. 递归图做法是计算  $N \times N$  矩阵,即:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon - \|X_i - X_j\|), i, j = 1, \dots, N \quad (1)$$

式中  $\varepsilon$  为阈值,  $\varepsilon = \alpha \cdot \text{std}(x_i)$ , 其中  $\text{std}(x_i)$  为原始时间序列的标准差,  $\alpha$  为阈值系数;  $\|X_i - X_j\|$  为欧氏范数;  $\Theta(x)$  为 Heaviside 函数.

对一维时间序列  $x_i$ , 根据 Takens 嵌入定理<sup>[21]</sup>, 采用时间延迟法重建相空间向量, 即:

$$X_i = \{x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}\} \quad (2)$$

由阈值  $\varepsilon$  可以定义一个以  $X_i$  为中心的球, 如果  $X_j$  落入该球内, 说明该状态是接近于  $X_i$  的, 即有  $R_{i,j} = 1$ , 在  $N \times N$  的坐标平面上相应的位置  $(i, j)$  处描点(递归点), 这样就可以得到一幅时间序列经过相空间重建后的递归图. 递归图的图形蕴含着相空间轨迹随时间的发展变化趋势和规律, 递归图表现出来的整体图形特征结构大体上可分为:均匀的、周期的、漂移及突变结构<sup>[22]</sup>. 在本文研究中, 取相空间嵌入参数  $m = 4, \tau = 3, \varepsilon = 0.25 \text{ std}(x_i)$ .

### 3.2 水平油水两相流流型递归图纹理特征分析

总流量为  $10 \text{ m}^3/\text{d}$  时, 根据图5所示的流型图判断, 该流量流动条件下实验点主要为层状流型(ST&MI), 相应处理得到的递归图呈现孤立散点纹理结构.

总流量为  $20 \text{ m}^3/\text{d}$  时, 根据图5所示的流型图判断, 大多实验流型点落入分散流型区域(Do/w&w 或 Dw/o&Do/w). 含水率为  $10\% \sim 50\%$  时, 由于双层分散流型(Dw/o&Do/w)中的水滴或油滴随机运动, 导致电容及电导曲线呈现随机波动形态, 处理得到的相应纹理为孤立分散点结构; 含水率为  $60\% \sim 70\%$

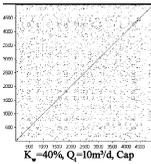
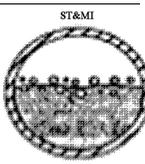
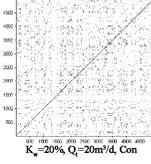
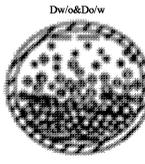
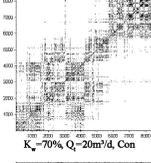
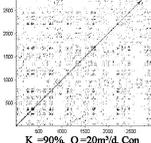
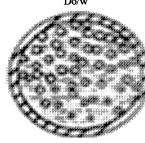
时,单层分散流型(Do/w&w)间歇不规则运动,处理得到的相应纹理为漂移或间歇结构;含水率为80%~90%时,流型接近水包油(Do/w),油泡的随机运动特征又使得递归图呈现孤立分散点结构。

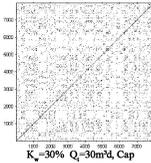
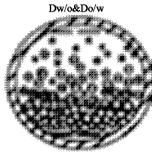
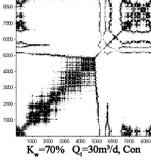
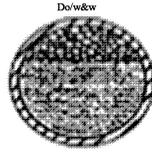
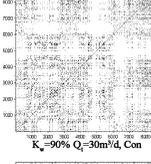
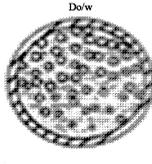
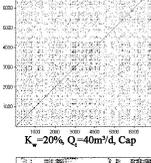
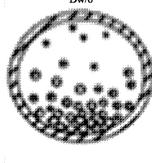
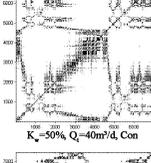
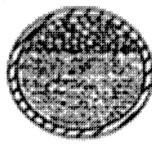
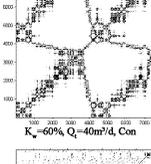
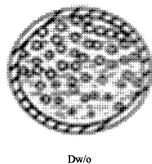
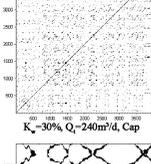
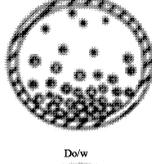
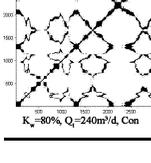
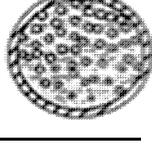
总流量为30m<sup>3</sup>/d时,根据图5所示的流型图判断,实验流型点类型划分比较复杂.含水率为10%时为Dw/o流型;含水率20%~40%为双层分散流型(Dw/o&Do/w);含水率50%~80%多趋向于单分散流型(Do/w&w);含水率为90%时已接近水包油流型(Do/w).处理得到的相应递归图纹理特征为:含水率为10%~50%时,由于油包水(Dw/o)及双层分散流型(Dw/o&Do/w)中的水滴或油滴随机运动,导致电容及电导曲线呈现随机波动形态,相应递归纹理结构为孤立分散结构;含水率为50%~80%时,单层分散流型(Do/w&w)间歇不规则运动,相应递归纹理结构为漂移或间歇结构;含水率为90%时,流型接近水包油(Do/w),油泡的随机运动特征又使得递归图呈现孤立分散点结构。

总流量40m<sup>3</sup>/d时,根据图5所示的流型图判断,含水率为10%~20%时为Dw/o流型;含水率为30%~50%时为单分散过渡流型区域(Do/w&w)流型;含水率为60%~90%时为水

表1 水平油水两相流型对应的递归纹理特征

Table 1 Recurrence texture features of horizontal oil/water two phase flow patterns

RP's Sample	RP's Characteristics	Flowrate (m <sup>3</sup> /d)	Watercut (%)	Flow Pattern
	Homogeneous	10	10 ~ 90	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	

	Homogeneous	20	10 ~ 50	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	
	Homogeneous	20	10 ~ 50	

包油分散流型(Do/w).相应处理得到递归图纹理结构为:Do/w流型时(含水率为10%~20%),由电容信号处理得到的递归图呈现为孤立散点纹理结构,表明了油包水的水滴随机运动特征;Do/w&w流型时(含水率为30%~50%),由电容信号处理得到的递归图呈现为间歇块状纹理结构,表明流型连续相不稳定变化情况;Do/w流型时(含水率为60%~90%),由电导信号处理得到的递归图呈现为沿主对角线不发育的线条纹理结构,表明水包油流型时油泡运动随机复杂变化的不确

定运动行为.

总流量 240m<sup>3</sup>/d 时,根据图 5 所示的流型图判断,低含水率时基本为 Dw/o 流型,高含水率时基本为 Do/w 流型.处理得到的相应递归图纹理结构为:油包水流型(Dw/o)基本为孤立散点结构,其线条纹理并不发育;对应的水包油流型(Do/w)基本上表现为未沿主对角线发育的线条纹理结构.以上两种流型均表明水滴或油泡的随机运动特点.

表 1 为总结得到的油水两相流流型对应的递归图纹理特征.实际测井进行流型识别时,首先根据涡轮流量计测量响应确定总流量值,然后,由含水率测井解释结果确定含水率值.在此基础上根据电导及电容含水率计测量波动信号,采用递归图分析技术提取递归纹理结构,并依据表 1 所总结的流型识别规则判别仪器测量通道内实际存在流型.

#### 4 结论

非线性时间序列递归图纹理特征结构蕴含着相空间轨迹随时间发展变化的趋势和规律,对于水平油水两相流电容及电导一维可测瞬态波动信号,随不同流动条件递归图一般表现为孤立随机散点、漂移间歇突变及沿主对角线未完全发育的递归纹理结构.本文在水平油水两相流流型转化边界数值模拟及动态实验基础上,根据电导传感器对高含水敏感及电容传感器对低含水敏感的测量特性,采用非线性时间序列的递归图分析方法,从递归图纹理特征提取了不同流量和含水率流动条件下的水平油水两相流流型特征,取得了集流型仪器测量通道内水平油水两相流流型识别较好效果.

识别集流型仪器测量通道内复杂多变水平油水两相流流型对流量及含水率传感器测量响应特性理解具有重要现实意义.此外,识别流型有助于流量及含水率测井解释建模及精度分析,也为含水率传感器对各种流型适用性做出合理判断提供科学依据.

#### 参 考 文 献

- Charles M E, Govier G W, Hodgson G W. The horizontal pipeline flow of equal density oil-water mixture. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1961, 39(2):27~36
- Hasson D, Mann U, Nir A. Annular flow of two immiscible liquids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1970, 48:514~520
- Guzhov A, Grishin A D, Medredev V F, Medredeva O P. Emulsion formation during the flow of two immiscible liquids. *Petroleum Industry*, 1973, 8(8):58~61 (in Russian)
- Malinowsky M S. An experimental study of oil-water and air-oil-water flowing mixtures in horizontal pipes, MS Thesis, America; The University of Tulsa, 1975
- Oglesby K D. An experimental study on the effect of oil viscosity, mixture velocity and water fraction on horizontal oil-water flow, MS Thesis, America; The University of Tulsa, 1979
- Trallero J L, Sarica C, Brill J P. A Study of oil-water flow patterns in horizontal pipes, SPE Annual Technical Conference & Exhibition, SPE36609, Denver, Colorado, 1996:6~9
- Nadler M, Mewes D. Flow induced emulsification in the flow of two immiscible liquids in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, 23(1):55~68
- Angeli P, Hewitt G F. Flow structure in horizontal oil-water flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26:1117~1140
- Brauner N, Maron D M. Flow pattern transitions in two-phase liquid-liquid flow in horizontal tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1992, 18(1):123~140
- Brauner N, Rovinsky J, Maron D M. Determination of the interface curvature in stratified two-phase systems by energy considerations. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(6):1167~1185
- Brauner N, Maron D M, Rovinsky J. A two-fluid model for stratified flows with curved interfaces. *International Journal of Multiphase Flow*, 1998, 24:975~1004
- Ng T S, Lawrence C J, Hewitt G F. Interface shaped for two-phase laminar stratified flow in a circular pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001, 27:1301~1311
- Ng T S, Lawrence C J, Hewitt G F. Laminar stratified pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 2002, 28:963~996
- 陈杰,于达,严大凡.油-水两相流流型转换研究.水动力学研究与进展,2003,18(3):355~364(Chen Jie, Yu Da, Yan Da fan. Study on pattern transition of oil-water pipe flow. *Journal of Hydrodynamics*, 2003, 18(3):355~364(in Chinese))
- 吴铁军,郭烈锦,刘文红等.水平管内油水两相流流型

- 及其转换规律研究. 工程热物理学报, 2002, 23(4): 491 ~ 494 (Wu Tiejun, Guo Liejin, Liu Wenhong, Zhang Ximin. An experimental study on flow patterns and their transitions for oil-water two phase flow in horizontal pipes. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2002, 23(4): 491 ~ 494 (in Chinese))
- 16 姚海元, 宫敬. 水平管内油水两相流流型转换特性. 化工学报, 2005, 56(9): 1649 ~ 1653 (Yao Haiyuan, Gong Jing. Oil-water flow patterns and transition characteristics in horizontal pipes. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2005, 56(9): 1649 ~ 1653 (in Chinese))
- 17 郭伯和, 金宁德, 胡亚范, 胡秧利. 油水两相流流型的混沌时间序列分析, 动力学与控制学报, 2004, 2(3): 48 ~ 53 (Guo Baihe, Jin Ningde, Hu Yafan, Hu Yangli. Chaotic time series analysis of oil-water two phase flow patterns. *Journal of Dynamics and Control*, 2004, 2(3): 48 ~ 53 (in Chinese))
- 18 Trallero J L. Oil-water flow patterns in horizontal pipes, PhD Dissertation, America: The University of Tulsa, 1995
- 19 Carlos F Torres-Monzon. Modeling of oil-water flow in horizontal and near horizontal pipes. PhD Dissertation, America: The University of Tulsa, 2006
- 20 Echmann J P, Kamphorst S O, Ruelle D. Recurrence plots of dynamical systems. *Europhysics letters*, 1987, 5: 973 ~ 977
- 21 Takens F. Detecting strange attractors in turbulence, Vol. 898, Lecture notes in mathematics. Springer, Berlin, 1981: 366 ~ 381
- 22 金宁德, 郑桂波, 陈万鹏. 气液两相流电导波动信号的混沌递归特性分析. 化工学报, 2007, 58(5): 1172 ~ 1179 (Jin Ningde, Zheng Guibo, Chen Wanpeng. Chaotic recurrence characteristics analysis of conductance fluctuating signal of gas/liquid two-phase flow. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2007, 58(5): 1172 ~ 1179 (in Chinese))

## FLOW PATTERN IDENTIFICATION IN MEASURING CHANNEL OF HORIZONTAL OIL-WATER TWO PHASE FLOW WELL LOGGING TOOL \*

Jin Ningde<sup>1</sup> Li Shuang<sup>1</sup> Zhang Yu<sup>1</sup> Zheng Xike<sup>2</sup> Xie Ronghua<sup>2</sup> Liu Xingbin<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072)

(2. Daqing Oilfield Logging & Testing Services Company, Hei Longjiang, Daqing 163412)

**Abstract** The flow patterns of oil-water two phase flow in concentrating type tool of production profile logging of horizontal well usually present complex polymorphism, and understanding the flow pattern transition is very useful for improving the precision of flow measurement underground. The oil-water two phase flow pattern in concentrating type tool was characterized by using the nonlinear time series recurrence plots based on impedance and capacitance signals acquired from the flow loop test. The research shows that in different flow rate and water cut, there is a corresponding relation between recurrence plot texture feature and flow pattern, which could be used in identifying the flow pattern of horizontal oil-water two phase flow.

**Key words** horizontal oil-water two phase flow, flow pattern identification, nonlinear analysis, recurrence plot