



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 105003249 B

(45) 授权公告日 2020.09.25

(21) 申请号 201510478091.4

CN 102137981 A, 2011.07.27

(22) 申请日 2015.08.06

RU 2334201 C1, 2008.09.20

(65) 同一申请的已公布的文献号

US 2012053838 A1, 2012.03.01

申请公布号 CN 105003249 A

CN 103776499 A, 2014.05.07

(43) 申请公布日 2015.10.28

CN 101189409 A, 2008.05.28

(73) 专利权人 北京航空航天大学

CN 103485758 A, 2014.01.01

地址 100191 北京市海淀区学院路37号

CN 103670390 A, 2014.03.26

CN 1591042 A, 2005.03.09

(72) 发明人 曹章 陈健军 许国伟 王友岭

多相流过程参数检测技术综述. 谭超等.《自动化学报》.2013,第39卷(第11期),

徐立军

周海力等. Image Reconstruction for

(51) Int. Cl.

Invasive ERT in Vertical Oil Well

E21B 49/00 (2006.01)

Logging.《Chinese Journal of Chemical

E21B 47/00 (2012.01)

Engineering》.2012,第20卷(第2期),

(56) 对比文件

审查员 蒋滔

CN 101410728 A, 2009.04.15

CN 1800578 A, 2006.07.12

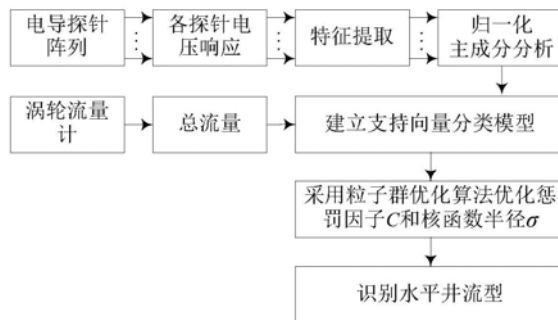
权利要求书2页 说明书7页 附图1页

(54) 发明名称

一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法

(57) 摘要

一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法,属于多相流检测领域。首先,分别测量总流量和电导探针阵列每个探针的电压响应信号;其次,通过统计分析和小波分析两种技术从每个探针电压响应信号提取特征量;再次,对所提取的特征量进行Z-score归一化,再采用主成分分析(PCA)技术提取主成分,成为PCA特征量;然后,进行基于支持向量分类(SVC)的特征级信息融合,即利用SVC方法建立从总流量和探针阵列电压响应信号的PCA特征量到油水两相流流型的分类模型;最后,采用粒子群优化算法优化SVC模型参数。本发明解决了中心采样器件无法识别水平井流型的难题,大幅降低了输入变量的维数,总流量的加入大幅提高了水平井流型识别率。



1. 一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法,其特征在于,包含以下步骤:

步骤一,在水平井中油水两相流不同总流量和含水率组合下,通过电机(24)打开集流伞(25),通过涡轮流量计(26)测量油水两相流总流量;

步骤二,在水平井中油水两相流不同总流量和含水率组合下,通过电机(24)打开电导探针阵列(22)的支撑臂(222),通过电导测量电路(23)测量电导探针阵列(22)各个探针的电压响应信号,测量方法如下,将幅值为 U_i 的双极性正弦波激励信号(31)施加在阻值为 R_f 的取样电阻(32)上,开关(34)依次选通电导探针阵列每个探针,取样电阻 R_f 与选通的电导探针的针芯(353)的尖端所处位置油水两相流(36)的对地电阻 R_x 构成分压电路,在激励信号波峰时刻测得电导探针的电压响应信号(33)的幅值为 U_o ,则有

$$U_o = \frac{R_x}{R_x + R_f} U_i \quad (1)$$

该探针电压响应信号以时间序列形式记录,由存储及遥测通信电路(27)存储测得数据,并编译成曼码,通过电缆接口(28)连接测井电缆上传至地面;

步骤三,在统计分析中,分别从每个探针电压响应信号提取4个特征量,即均值、标准差、偏度系数、峰度系数;在小波分析中,分别将每个探针响应时间序列进行两层小波包分解,提取8个特征量,即第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的能量比例及其信息熵;通过小波分析提取特征量的方法如下:重构第二层小波分解得到的四个次频带小波系数,得到相应次频带的重构序列 $S_{2,j}$, $j=0,1,2,3$;在第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的能量为

$$E_{2,j} = \sum_{k=1}^{N_1} (S_{2,j}(k))^2 \quad (2)$$

式中, $S_{2,j}(k)$ 表示重构序列 $S_{2,j}$ 的第 k 个元素, N_1 表示 $S_{2,j}$ 的长度;第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的能量比例由下式计算得到

$$F_{2,j} = \frac{E_{2,j}}{\sum_{j=0}^3 E_{2,j}} \quad (3)$$

在第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的信息熵定义为

$$H_{2,j} = -\sum_{k=1}^{N_2} \varepsilon_{2,j}(k) \ln \varepsilon_{2,j}(k) \quad (4)$$

式中,

$$\varepsilon_{2,j}(k) = \frac{S_{F(2,j)}(k)}{\sum_{k=1}^{N_2} S_{F(2,j)}(k)} \quad (5)$$

式中, $S_{F(2,j)}(k)$ 表示 $S_{2,j}$ 傅里叶变换序列的第 k 个元素, N_2 表示 $S_{F(2,j)}$ 的长度;

步骤四,分别对电导探针阵列每个探针电压响应信号的特征量进行Z-score归一化,再采用主成分分析(PCA)技术对所有探针的归一化特征量的集合提取主成分,降低特征量之间的数据冗余,所得到的主成分称之为电导探针阵列电压响应信号的PCA特征量;Z-score归一化方法定义为

$$X_{j,i}^{norm} = \frac{X_{j,i} - \mu_{j,i}}{\sigma_{j,i}} \quad (6)$$

上式中, $X_{j,i}$ 表示在油水两相流不同总流量和含水率组合下第j支探针的第i个特征量组成的向量, X_i^{norm} 表示归一化后的特征量向量, $j=1, 2, \dots, N$, N 表示探针的数目, $i=1, 2, \dots, 12$; $\mu_{j,i}$ 和 $\sigma_{j,i}$ 分别表示 $X_{j,i}$ 的均值和标准差; PCA技术是分析多个变量间相关性的一种多元统计方法, 通过正交变换将多个可能相关的变量变换成少数几个线性不相关的综合指标, 称之为主成分, 在所有正交变换线性组合中选取方差贡献率最高的综合指标作为第一主成分, 后续的主成分都将是剩余线性组合中方差贡献率最高的综合指标, 且与前面的主成分正交;

步骤五, 对电导探针阵列电压响应信号进行基于支持向量分类 (SVC) 的特征级信息融合, 即利用SVC方法建立从总流量和电导探针阵列电压响应信号的PCA特征量到水平井油水两相流流型的识别模型, 称之为SVC模型, 训练集的一个样本被记作

$$(x_i, y_i), x_i \in \mathbb{R}^{n+1}, y_i \in [1, 5] \quad (7)$$

式中, x_i 表示SVC模型的 $n+1$ 维输入向量, 其中 n 维输入向量为电导探针阵列的PCA特征量, $n \leq 12 \times N$, N 表示探针的数目, 另1维输入向量为涡轮流量计测得的总流量; y_i 表示SVC模型的1维输出向量, 为125mm内径水平井油水两相流流型, 取1代表光滑的分层流, 取2代表界面有混合物的分层流, 取3代表连续分散油滴层和连续水层的三层流, 取4代表油单相, 取5代表水单相, $i=1, 2, \dots, 1, 1$ 表示训练集的长度, 测试集的数据格式和训练集一致; 利用训练集样本对SVC模型进行训练, 采用高斯径向基函数, 利用测试集样本测试SVC模型的水平井流型识别率;

步骤六, 采用粒子群优化 (PSO) 算法来优化SVC模型的惩罚因子 C 和高斯径向基函数核半径 σ , 以提高SVC的识别率和泛化能力, 所述优化的步骤如下: (a) 设定惩罚因子 C 、高斯径向基函数核半径 σ 的搜索范围, 设定粒子数、粒子的长度、粒子的范围、粒子的最大速度、学习因子、迭代终止条件, 迭代终止条件包括最大迭代次数和SVC模型交叉验证下的流型识别率要求, 随机初始化粒子群体的位置和速度; (b) 计算每个粒子的适应度 $R_{cv}(C, \sigma)$, 即SVC模型交叉验证下的水平井流型识别率; (c) 在每一次迭代中, 粒子通过跟踪个体适应度极值和全局适应度极值来更新自己的速度和位置, 其中个体适应度极值指粒子本身到目前为止搜索到的适应度最优值, 全局适应度极值指整个粒子群到目前为止找到的适应度最优值; (d) 如果达到迭代终止条件中的任何一条即可终止迭代, 否则返回步骤 (b)。

一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法

【技术领域】

[0001] 本发明属于多相流检测领域,尤其涉及一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法。

【背景技术】

[0002] 水平井技术是上世纪20年代发展起来的油田开发新技术,由于其具有生产压差小、泄油面积大等优点,相比于垂直井,可大幅提高单井产油量以及油藏的采收率,因此得到了石油开采领域的普遍重视。与垂直井相比,我国的水平井技术还很落后,因此亟需开展水平井动态监测技术的研究。

[0003] 流型是多相流参数检测的重要参数,表征了流体在流动过程中各相介质的分布情况。在两相流研究中,两相流体的流动特性和传热传质特性受流型影响,因而流动参数的测量亦受流型影响。因此,如果能识别井内的流型,可选择更合适的测井方案,获得更佳的测井效果。125mm内径水平井基于CCD的高速摄像法获得的流型划分图,将流型分为光滑的分层流、界面有混合物的分层流和连续油层和连续分散油滴层和连续水层三层流(参考文献:蒋昌华.水平井油水两相流流型分析与可视化显示[D].北京:北京航空航天大学,2013)。同时为了在实验中覆盖实验条件含水率的全量程,油单相和水单相被一并识别。

[0004] 目前,多相流的流型识别被广泛地研究。流型识别方法有目测法和高速摄像法、探针法、射线衰减法、电学层析成像法、幅值域处理方法、时频域分析方法、信息融合方法、非线性分析方法等。国家知识产权局公布和授权了多项关于流型识别的发明专利。公布的一项发明专利“基于ICA和SVM的气液两相流型识别方法”(申请号201410624191)利用差压变送器结合独立成分分析(ICA)和支持向量机(SVM)识别气液两相流。授权的一项发明专利“一种基于希尔伯特边际谱的两相流流型识别方法”(申请号201110044591)利用静电传感器检测气固两相流的流动噪声信号,再利用希尔伯特边际谱分析和神经网络方法识别气固两相流流型。而上述发明的方法并不能应用于生产测井中油水两相流的流型识别。

[0005] 电导探针法不仅对油水两相流的流动参数变化响应迅速,而且成本低,安全、可靠、可实施性强,因而得到了广泛的应用。然而,在大斜度井和水平井中,多相流体由于重力作用而分离,导致介质分布不均,使得中心采样器件,譬如位于中心的单探针,只能获取局部流体的信息,无法测量多相流参数。为解决这一难题,上世纪90年代开始,Schlumberger、Sondex和Computalog等国际著名油田服务公司陆续研发了基于多探针结构的测井仪器,并在大流量、大管径的油井中进行了试验和应用。Flores利用电导探针阵列分别对垂直和倾斜油水两相流进行了流型识别(参考文献Flores J.G.Oil-Water Flow in Vertical and Inclined Wells[D].Tulsa:The University of Tulsa,1997)。国家知识产权局授权了三项有关电导探针阵列传感器及其优化方法的发明专利“一种多环电极阵列成像传感器”(专利号ZL201010110504.0)、“一种环形持水率测井传感器阵列的结构优化方法”(专利号ZL201010543247.X)和“一种基于遗传算法的多环电极阵列传感器结构优化方法”(专利号ZL201210544383.X)。然而,电导探针法还远不成熟,探针响应信号的处理和使用还需要深

入研究。将软测量方法与传统多相流传感器相结合可以极大地丰富多相流测量数据的使用,从而提高测量精度。一般地,软测量方法包含如下步骤:数据挖掘,特征提取,数据融合和参数估计等。因此,极有必要研究基于电导探针阵列的水平井流型识别方法。

[0006] 水平井中油水两相流分布依赖于总流量和含水率,而总流量可在集流后由涡轮流量计获得。如果总流量作为一个参数来帮助描述油水两相流分布,那么流型的识别率将能提高。根据所处理的信息层次,多传感器融合系统可分为三个层次:数据级信息融合、特征级信息融合和决策级融合。而在水平井中油水两相流介质分布不均,单探针无法识别流型,需要研究不同位置的电导探针电压响应信号来识别流型。因而,本发明采用基于支持向量分类的特征级信息融合。

[0007] 本发明提出一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法,属于多相流检测领域。首先,分别测量总流量和电导探针阵列每个探针的电压响应信号;其次,通过统计分析和小波分析两种技术从每个探针电压响应信号提取特征量;再次,对所提取的特征量进行Z-score归一化,再采用主成分分析(PCA)技术提取主成分,成为PCA特征量;然后,进行基于支持向量分类(SVC)的特征级信息融合,即利用SVC方法建立从总流量和探针阵列电压响应信号的PCA特征量到油水两相流流型的分类模型;最后,采用粒子群优化算法优化SVC模型参数。本发明解决了中心采样器件无法识别水平井流型的难题,大幅降低了输入变量的维数,总流量的加入大幅提高了水平井流型识别率。

【发明内容】

[0008] 本发明的目的是提供一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法,以满足生产测井对高鲁棒性、高可靠性和高流型识别率的要求。

[0009] 为实现上述目的,本发明提供的一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法,采用如下技术方案:

[0010] 一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法,其特征在于,包含以下步骤:

[0011] 步骤一,在水平井中油水两相流不同总流量和含水率组合下,通过电机(24)打开集流伞(25),通过涡轮流量计(26)测量油水两相流总流量;

[0012] 步骤二,在水平井中油水两相流不同总流量和含水率组合下,通过电机(24)打开电导探针阵列(22)的支撑臂(222),通过电导测量电路(23)测量电导探针阵列(22)各个探针(221)的电压响应信号,测量方法如下,将幅值为 U_i 的双极性正弦波激励信号(31)施加在阻值为 R_f 的取样电阻(32)上,开关(34)依次选通电导探针阵列每个探针(35),取样电阻 R_f 与选通的电导探针的针芯(353)的尖端所处位置油水两相流(36)的对地电阻 R_x 构成分压电路,在激励信号波峰时刻测得电导探针的电压响应信号(33)的幅值为 U_o ,则有

$$[0013] \quad U_o = \frac{R_x}{R_x + R_f} U_i \quad (1)$$

[0014] 该探针电压响应信号以时间序列形式记录,由存储及遥测通信电路(27)存储测得数据,并编译成曼码,通过电缆接口(28)连接测井电缆上传至地面;

[0015] 步骤三,在统计分析中,分别从每个探针电压响应信号提取4个特征量,即均值、标准差、偏度系数、峰度系数;在小波分析中,分别将每个探针响应时间序列进行两层小波包

分解,提取8个特征量,即第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的能量比例及其信息熵;通过小波分析提取特征量的方法如下:重构第二层小波分解得到的四个次频带小波系数,得到相应次频带的重构序列 $S_{2,j}$, $j=0,1,2,3$;在第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的能量为

$$[0016] \quad E_{2,j} = \sum_{k=1}^{N_1} (S_{2,j}(k))^2 \quad (2)$$

[0017] 式中, $S_{2,j}(k)$ 表示重构序列 $S_{2,j}$ 的第 k 个元素, N_1 表示 $S_{2,j}$ 的长度;第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的能量比例由下式计算得到

$$[0018] \quad F_{2,j} = \frac{E_{2,j}}{\sum_{j=0}^3 E_{2,j}} \quad (3)$$

[0019] 在第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的信息熵定义为

$$[0020] \quad H_{2,j} = -\sum_{k=1}^{N_2} \varepsilon_{2,j}(k) \ln \varepsilon_{2,j}(k) \quad (4)$$

[0021] 式中,

$$[0022] \quad \varepsilon_{2,j}(k) = \frac{S_{F(2,j)}(k)}{\sum_{k=1}^{N_2} S_{F(2,j)}(k)} \quad (5)$$

[0023] 式中, $S_{F(2,j)}(k)$ 表示 $S_{2,j}$ 傅里叶变换序列的第 k 个元素, N_2 表示 $S_{F(2,j)}$ 的长度。

[0024] 步骤四,分别对电导探针阵列每个探针电压响应信号的特征量进行Z-score归一化,再采用主成分分析(PCA)技术对所有探针的归一化特征量的集合提取主成分,降低特征量之间的数据冗余,所得到的主成分称之为电导探针阵列电压响应信号的PCA特征量;Z-score归一化方法定义为

$$[0025] \quad X_{j,i}^{norm} = \frac{X_{j,i} - \mu_{j,i}}{\sigma_{j,i}} \quad (6)$$

[0026] 上式中, $X_{j,i}$ 表示在油水两相流不同总流量和含水率组合下第 j 支探针的第 i 个特征量组成的向量, X_i^{norm} 表示归一化后的特征量向量, $j=1,2,\dots,N$, N 表示探针的数目, $i=1,2,\dots,12$; $\mu_{j,i}$ 和 $\sigma_{j,i}$ 分别表示 $X_{j,i}$ 的均值和标准差;PCA技术是分析多个变量间相关性的一种多元统计方法,通过正交变换将多个可能相关的变量变换成少数几个线性不相关的综合指标,称之为主成分,在所有正交变换线性组合中选取方差贡献率最高的综合指标作为第一主成分,后续每个主成分都将是剩余线性组合中方差贡献率最高的综合指标,且与前面的主成分正交;

[0027] 步骤五,对电导探针阵列电压响应信号进行基于支持向量分类(SVC)的特征级信息融合,即利用SVC方法建立从总流量和电导探针阵列电压响应信号的PCA特征量到水平井油水两相流流型的识别模型,称之为SVC模型,训练集的一个样本被记作

$$[0028] \quad (x_i, y_i), x_i \in R^{n+1}, y_i \in [1, 5] \quad (7)$$

式中, x_i 表示SVC模型的 $n+1$ 维输入向量,其中 n 维输入向量为电导探针阵列的PCA特征量, $n \leq 12 \times N$, N 表示探针的数目,另1维输入向量为涡轮流量计测得的总流量; y_i 表示SVC模型的1维输出向量,为125mm内径水平井油水两相流流型,取1代表光滑的分层流,取2代表界面有混合物的分层

流,取3代表连续分散油滴层和连续水层的三层流,取4代表油单相,取5代表水单相, $i=1, 2, \dots, 1, 1$ 表示训练集的长度,测试集的数据格式和训练集一致;利用训练集样本对SVC模型进行训练,采用高斯径向基函数,利用测试集样本测试SVC模型的水平井流型识别率;

[0029] 步骤六,采用粒子群优化(PSO)算法来优化SVC模型的惩罚因子C和高斯径向基函数核半径 σ ,以提高SVC的识别率和泛化能力,所述优化的步骤如下:(a)设定惩罚因子C、核函数参数 σ 的搜索范围,设定粒子数、粒子的长度、粒子的范围、粒子的最大速度、学习因子、迭代终止条件,迭代终止条件包括最大迭代次数和SVC模型交叉验证下的流型识别率要求,随机初始化粒子群体的位置和速度;(b)计算每个粒子的适应度 $R_{cv}(C, \sigma)$,即SVC模型交叉验证下的水平井流型识别率;(c)在每一次迭代中,粒子通过跟踪个体适应度极值和全局适应度极值来更新自己的速度和位置,其中个体适应度极值指粒子本身到目前为止搜索到的适应度最优值,全局适应度极值指整个粒子群到目前为止找到的适应度最优值;(d)如果达到迭代终止条件中的任何一条即可终止迭代,否则返回步骤(b)。

[0030] 本发明解决了中心采样器件无法识别水平井流型的难题,大幅降低了输入变量的维数,总流量的加入大幅提高了水平井流型识别率。

[0031] 【说明书附图】

[0032] 图1是基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法流程图;

[0033] 图2是侵入式可收缩双环电导探针阵列及涡轮流量计组合式测井仪示意图,图中扶正器(21),电导探针阵列(22),电导探针(221),支撑臂(222),电导测量电路(23),电机(24),集流伞(25),涡轮流量计(26),存储及遥测通信电路(27),电缆接口(28);

[0034] 图3是电导测量电路测量电导探针阵列各个探针电压响应信号的示意图,图中双极性正弦波激励信号(31),阻值为 R_f 的取样电阻(32),电导探针电压响应信号(33),开关(34),电导探针(35),金属外壳(351),绝缘层(352),针芯(353),水平井油水两相流(36)。

【具体实施方案】

[0035] 参考图1、2和3,结合实例,对本发明的具体实施方案做进一步描述。

[0036] 为了验证如图1所示的所发明的一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法,利用如图2所示的侵入式可收缩双环电导探针阵列及涡轮流量计组合式测井仪在大庆石油测井试井检测实验中心大型水平井多相流实验装置进行了油水两相流实验。水平模拟井内径125mm,长度16m。双环电导探针阵列测井仪由扶正器(21)、电导探针阵列(22)、电导测量电路(23)、电机(24)、集流伞(25)、涡轮流量计(26)、存储及遥测通信电路(27)和电缆接口(28)组成。扶正器(21)可保证测井仪器在井筒中处于中心位置。双环电导探针阵列24支电导探针(221)等角度分布在与测井仪中轴同心的两个圆周上,呈辐射状,且同一支撑臂(222)上的两支电导探针互相平行。每支电导探针由金属外壳(351)、绝缘层(352)、针芯(353)组成,金属外壳(351)直径3mm,外壳接地,针芯(353)裸露的尖端长度为3mm,绝缘层(352)将针芯(353)与金属外壳(351)分开,如图3所示。每支电导探针可通过电导测量电路(23)来检测直径大于3mm的油泡或水泡且不受连续相的影响,如图3所示。电机(24)可打开和收缩探针阵列(22)和集流伞(25)。集流伞(25)张开时可将油水两相流集流以便于测量涡轮流量计(26)测量总流量。存储及遥测通信电路(27)可存储测得数据,并编译成曼码,通过电缆接口(28)连接测井电缆上传至地面。

[0037] 实验用油为柴油,密度 $0.825\text{g}/\text{cm}^3$ 、粘度 $3\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、表面张力 $28.62\times 10^{-3}\text{N}/\text{m}$ 。用水为自来水,密度 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 、粘度 $0.890\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、表面张力 $71.25\times 10^{-3}\text{N}/\text{m}$ 。在实验中,设定油水两相流总流量 $10\sim 200\text{m}^3/\text{天}$ (调节间隔 $10\text{m}^3/\text{天}$),含水率 $0\sim 100\%$ (调节间隔 10%)。对于总流量和含水率的各种组合,双环电导探针阵列测井仪24支探针将分别记录电导探针的电压响应信号,获得一份测量样本。由于总流量和含水率共有220种组合,因此每支探针分别获得220份响应信号样本。各探针响应信号采样率均为 0.1kHz ,每份样本长度为1300。在建模中,220份探针响应电压样本被随机划分为训练集和测试集,两者分别占总样本的80%和20%。重复随机划分过程50次,得到50种训练集和测试集的组合。这些组合被用来在统计意义上评价本发明提出的方法。

[0038] 一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法,其特征在于,包含以下步骤:

[0039] 步骤一,在水平井中油水两相流不同总流量和含水率组合下,通过电机(24)打开集流伞(25),通过涡轮流量计(26)测量油水两相流总流量;

[0040] 步骤二,在水平井中油水两相流不同总流量和含水率组合下,通过电机(24)打开电导探针阵列(22)的支撑臂(222),通过电导测量电路(23)测量电导探针阵列(22)各个探针(221)的电压响应信号,测量方法如下,将幅值为 U_i 的双极性正弦波激励信号(31)施加在阻值为 R_f 的取样电阻(32)上,开关(34)依次选通电导探针阵列每个探针(35),取样电阻 R_f 与选通的电导探针的针芯(353)的尖端所处位置油水两相流(36)的对地电阻 R_x 构成分压电路,在激励信号波峰时刻测得电导探针的电压响应信号(33)的幅值为 U_o ,则有

$$[0041] \quad U_o = \frac{R_x}{R_x + R_f} U_i \quad (1)$$

[0042] 该探针电压响应信号以时间序列形式记录,由存储及遥测通信电路(27)存储测得数据,并编译成曼码,通过电缆接口(28)连接测井电缆上传至地面;

[0043] 步骤三,在统计分析中,分别从每个探针电压响应信号提取4个特征量,即均值、标准差、偏度系数、峰度系数;在小波分析中,分别将每个探针响应时间序列进行两层小波包分解,提取8个特征量,即第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的能量比例及其信息熵;通过小波分析提取特征量的方法如下:重构第二层小波分解得到的四个次频带小波系数,得到相应次频带的重构序列 $S_{2,j}$, $j=0,1,2,3$;在第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的能量为

$$[0044] \quad E_{2,j} = \sum_{k=1}^{N_1} (S_{2,j}(k))^2 \quad (2)$$

[0045] 式中, $S_{2,j}(k)$ 表示重构序列 $S_{2,j}$ 的第 k 个元素, N_1 表示 $S_{2,j}$ 的长度;第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的能量比例由下式计算得到

$$[0046] \quad F_{2,j} = \frac{E_{2,j}}{\sum_{j=0}^3 E_{2,j}} \quad (3)$$

[0047] 在第二层小波分解得到的四个次频带小波系数的信息熵定义为

$$[0048] \quad H_{2,j} = -\sum_{k=1}^{N_2} \varepsilon_{2,j}(k) \ln \varepsilon_{2,j}(k) \quad (4)$$

[0049] 式中,

$$[0050] \quad \varepsilon_{2,j}(k) = \frac{S_{F(2,j)}(k)}{\sum_{k=1}^{N_2} S_{F(2,j)}(k)} \quad (5)$$

[0051] 式中, $S_{F(2,j)}(k)$ 表示 $S_{2,j}$ 傅里叶变换序列的第 k 个元素, N_2 表示 $S_{F(2,j)}$ 的长度。

[0052] 步骤四, 分别对电导探针阵列每个探针电压响应信号的特征量进行 Z-score 归一化, 再采用主成分分析 (PCA) 技术对所有探针的归一化特征量的集合提取主成分, 降低特征量之间的数据冗余, 所得到的主成分称之为电导探针阵列电压响应信号的 PCA 特征量; Z-score 归一化方法定义为

$$[0053] \quad X_{j,i}^{norm} = \frac{X_{j,i} - \mu_{j,i}}{\sigma_{j,i}} \quad (6)$$

[0054] 上式中, $X_{j,i}$ 表示在油水两相流不同总流量和含水率组合下第 j 支探针的第 i 个特征量组成的向量, X_i^{norm} 表示归一化后的特征量向量, $j=1, 2, \dots, N$, N 表示探针的数目, $i=1, 2, \dots, 12$; $\mu_{j,i}$ 和 $\sigma_{j,i}$ 分别表示 $X_{j,i}$ 的均值和标准差; PCA 技术是分析多个变量间相关性的一种多元统计方法, 通过正交变换将多个可能相关的变量变换成少数几个线性不相关的综合指标, 称之为主成分, 在所有正交变换线性组合中选取方差贡献率最高的综合指标作为第一主成分, 后续的主成分都将是剩余线性组合中方差贡献率最高的综合指标, 且与前面的主成分正交;

[0055] 步骤五, 对电导探针阵列电压响应信号进行基于支持向量分类 (SVC) 的特征级信息融合, 即利用 SVC 方法建立从总流量和电导探针阵列电压响应信号的 PCA 特征量到水平井油水两相流流型的识别模型, 称之为 SVC 模型, 训练集的一个样本被记作

$$[0056] \quad (x_i, y_i), x_i \in R^{n+1}, y_i \in [1, 5] \quad (7)$$

[0057] 式中, x_i 表示 SVC 模型的 $n+1$ 维输入向量, 其中 n 维输入向量为电导探针阵列的 PCA 特征量, $n \leq 12 \times N$, N 表示探针的数目, 另 1 维输入向量为涡轮流量计测得的总流量; y_i 表示 SVC 模型的 1 维输出向量, 为 125mm 内径水平井油水两相流流型, 取 1 代表光滑的分层流, 取 2 代表界面有混合物的分层流, 取 3 代表连续分散油滴层和连续水层的三层流, 取 4 代表油单相, 取 5 代表水单相, $i=1, 2, \dots, 1, 1$ 表示训练集的长度, 测试集的数据格式和训练集一致; 利用训练集样本对 SVC 模型进行训练, 采用高斯径向基函数, 利用测试集样本测试 SVC 模型的水平井流型识别率;

[0058] 步骤六, 采用粒子群优化 (PSO) 算法优化 SVC 模型的惩罚因子 C 和高斯径向基函数核半径 σ , 以提高 SVC 的识别率和泛化能力, 所述优化的步骤如下: (a) 设定惩罚因子 C 、核函数参数 σ 的搜索范围, 设定粒子数、粒子的长度、粒子的范围、粒子的最大速度、学习因子、迭代终止条件, 迭代终止条件包括最大迭代次数和 SVC 模型交叉验证下的流型识别率要求, 随机初始化粒子群体的位置和速度; (b) 计算每个粒子的适应度 $R_{cv}(C, \sigma)$, 即 SVC 模型交叉验证下的水平井流型识别率; (c) 在每一次迭代中, 粒子通过跟踪个体适应度极值和全局适应度极值来更新自己的速度和位置, 其中个体适应度极值指粒子本身到目前为止搜索到的适应度最优值, 全局适应度极值指整个粒子群到目前为止找到的适应度最优值; (d) 如果达到迭代终止条件中的任何一条即可终止迭代, 否则返回步骤 (b)。

[0059] 在水平井中, 多相流体由于重力作用而分离, 导致介质分布不均, 使得中心采样器

件只能获取局部流体的信息,无法测量多相流参数,而本发明的一种基于总流量与电导探针阵列信号的水平井流型识别方法解决了这一难题。电导探针阵列24支探针电压响应信号的特征量高达288个。如果SVC模型以电导探针阵列电压响应信号的PCA特征量作为输入,当主成分累计方差贡献率为65.34%,即PCA特征量数目为10时,测试集的认识率达到最高,为82.27%±5.86%。如果SVC模型以总流量和PCA特征量作为输入,当主成分累计方差贡献率为36.51%,即PCA特征量数目为5时,测试集的认识率达到最高,且大幅提高至94.86%±3.27%(均值±标准差)。

[0060] 因此,本发明解决了中心采样器件无法识别水平井流型的难题,大幅降低了输入变量的维数,总流量的加入大幅提高了水平井流型识别率。

[0061] 以上所述仅为本发明具体实施方法的基本方案,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的人员在本发明公开的技术范围内,可想到的变化或替换,都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。所有落入权利要求的等同的含义和范围内的变化都将包括在权利要求的范围之内。

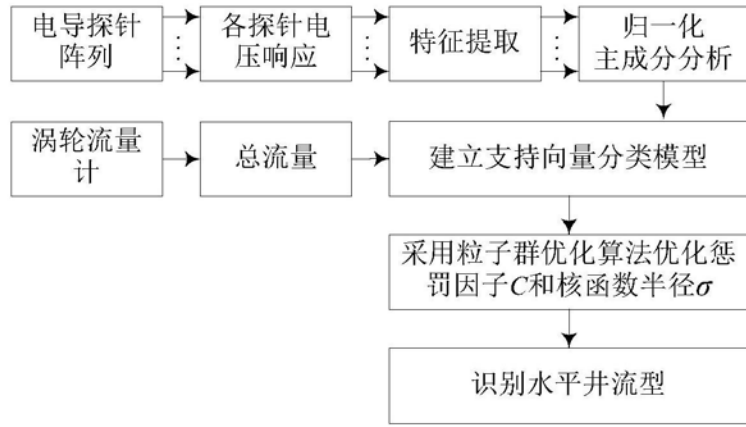


图1

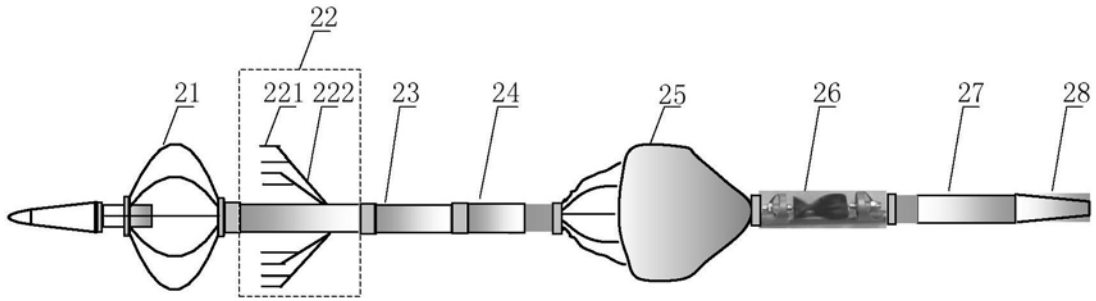


图2

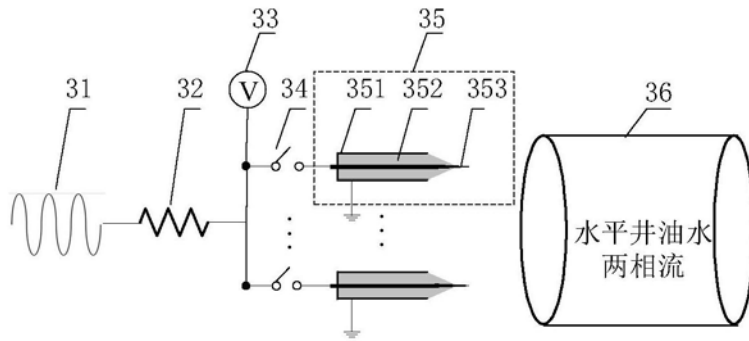


图3