



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114993391 B

(45) 授权公告日 2024. 09. 24

(21) 申请号 202210622497.5

(22) 申请日 2022.06.01

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 114993391 A

(43) 申请公布日 2022.09.02

(73) 专利权人 西南石油大学  
地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

(72) 发明人 陈猛 董国敏 刘东明 齐宝权  
罗宁 刘恒 陈强 秦昊 杨国锋  
况晏

(74) 专利代理机构 北京慕达星云知识产权代理  
事务所(特殊普通合伙)  
11465

专利代理师 符继超

(51) Int. Cl.

G01F 1/28 (2006.01)

G01F 15/00 (2006.01)

E21B 47/00 (2012.01)

(56) 对比文件

CN 102337880 A, 2012.02.01

CN 102564497 A, 2012.07.11

审查员 高超然

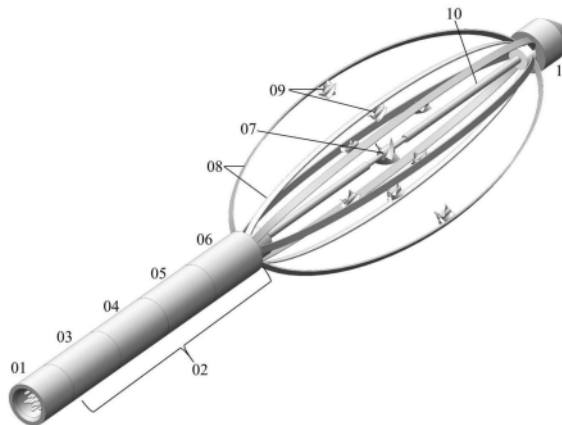
权利要求书5页 说明书12页 附图4页

(54) 发明名称

一种水平井阵列涡轮流量计及测量方法

(57) 摘要

本发明公开了一种水平井阵列涡轮流量计及测量方法,该水平井阵列涡轮流量计包括:电缆头、中轴主体、电压调节系统、数据传输系统、信号转换系统、控制系统、1个可伸缩中心涡轮转子、8个双层布局阵列臂、完全相同的8个阵列涡轮转子、可伸缩中心轴和锥形头。针对水平井特殊井身结构及流体介质分布不均导致的速度剖面复杂的难题,采用双层阵列式涡轮分布加中心涡轮转子的布局结构,原理可靠、操作方便,适用于监测不同结构水平井油气水单相、两相及多相流体流动条件流体速度剖面信息,进而准确反映水平井筒流体速度分布特征。该测量方法,建立基于高斯径向基函数插值求取映射位置局点涡轮转速后定量计算视流体速度,能准确计算得到井筒流体流量。



1. 一种水平井阵列涡轮流量计,其特征在于,包括:电缆头、中轴主体、电压调节系统、数据传输系统、信号转换系统、控制系统、1个可伸缩中心涡轮转子、8个双层布局阵列臂、完全相同的8个阵列涡轮转子、可伸缩中心轴和锥形头;

其中,所述中轴主体的上端连接所述电缆头,该电缆头用于与测井电缆连接;所述中轴主体内部从上至下方向依次设置:所述电压调节系统、数据传输系统、信号转换系统和控制系统依次连接;所述控制系统用于控制可伸缩中心轴的伸缩和阵列臂的伸展与收缩;所述信号转换系统实现将涡轮转子转动频率信号转换为电流信号传输;所述数据传输系统实现信号数据的稳定输出;所述电压调节系统实现将地面电压调节为流量计所需电压强度;

所述中轴主体的下端靠近边缘处连接所述8个双层布局阵列臂的一端,所述中轴主体的中心连接所述可伸缩中心轴的一端;所述可伸缩中心轴的中间位置安装1个可伸缩中心涡轮转子;

在所述8个双层布局阵列臂的中间位置分别对应安装所述8个阵列涡轮转子;

所述8个双层布局阵列臂的另一端及所述可伸缩中心轴的另一端均固定连接于所述锥形头。

2. 根据权利要求1所述的一种水平井阵列涡轮流量计,其特征在于,所述中轴主体为预设外径的圆柱形钢质材料制成的同轴结构。

3. 根据权利要求1所述的一种水平井阵列涡轮流量计,其特征在于,所述8个双层布局阵列臂由内外两层构成,每层由呈环形均匀布置的4根弹簧臂构成;且在8个双层布局阵列中,每相邻两根阵列臂与所述可伸缩中心轴构成的夹角均为 $45^{\circ}$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种水平井阵列涡轮流量计,其特征在于,所述可伸缩中心涡轮转子的叶片直径与所述阵列涡轮转子的叶片直径比例为3:1。

5. 根据权利要求1所述的一种水平井阵列涡轮流量计,其特征在于,所述可伸缩中心涡轮转子上下分别连接一根环绕所述可伸缩中心轴的柔性弹簧。

6. 一种水平井阵列涡轮流量计的测量方法,其特征在于,使用如权利要求1-5任一项所述的水平井阵列涡轮流量计作为测量仪器进行测量,该测量方法包括:

1) 调试及仪器下井:

检测仪器是否正常工作,若正常,保证仪器的8个双层布局阵列臂处于完全收拢状态采用油管传输方式进行下井,下井过程中保持地面系统向仪器供电;

2) 定位及监测:

结合所测目的井井身结构和射孔段信息确定监测目的层段,当仪器下井至距最上部射孔段顶部200m左右时,停止下井,此时打开控制系统,保证弹簧臂和转子处于完全张开状态,定义仪器下测时速度为正;

以速度 $V_{11}$ 进行下测同时监测记录仪器输出信号,此时可伸缩中心涡轮转子输出信号为 $RPS_{01}$ ,8个阵列转子输出信号分别为 $RPS_{11}$ 、 $RPS_{21}$ 、 $RPS_{31}$ 、 $RPS_{41}$ 、 $RPS_{51}$ 、 $RPS_{61}$ 、 $RPS_{71}$ 、 $RPS_{81}$ ,待仪器下测至最下部射孔段以下位置、或至井底无法进一步下井时,停止下测,此时以相同速度 $-V_{11}$ 上测至目的层段顶部位置,此时中心转子输出信号为 $RPS_{02}$ ,8个阵列转子输出信号分别为 $RPS_{12}$ 、 $RPS_{22}$ 、 $RPS_{32}$ 、 $RPS_{42}$ 、 $RPS_{52}$ 、 $RPS_{62}$ 、 $RPS_{72}$ 、 $RPS_{82}$ ,至上提至目的层段顶部位置时一次测试作业完成;

3) 多次重复测量:

增加仪器下井速度至 $V_{12}$ ,此时 $V_{12}=V_{11}+\Delta V$ ,重复步骤2)进行下测至最下部射孔段以下位置、或至井底无法进一步下井时,停止下测;再以相同速度 $-V_{12}$ 上测至目的层段顶部位置,记录全部上提和下放过程可伸缩中心涡轮转子和阵列涡轮转子输出信号;增加仪器下井速度至 $V_{13}=V_{11}+2\Delta V$ 、 $V_{14}=V_{11}+3\Delta V$ ,重复上述步骤,直至完成全部作业,此时共记录得到8组仪器速度和对应的转子响应信号;

4) 完成测试及仪器起井:

操作地面控制系统收拢阵列臂,停止供电,上提仪器至地面,完成测试。

7. 根据权利要求6所述的一种水平井阵列涡轮流量计的测量方法,其特征在于,利用记录得到8组仪器速度和对应的转子响应信号,计算水平井井下流体总流量过程如下:

步骤1:基于水平井阵列涡轮流量计的结构,环状阵列涡轮转子探头张开度可进行自由调节,因此外层4个环状阵列探头距离井筒中心距离表示为,

$$r_c = k_c \cdot R \quad (1)$$

内层4个环状阵列探头距离井筒中心距离表示为,

$$r_m = k_m \cdot R \quad (2)$$

式中, $k_c$ 表示外层4个阵列探头张开度;

$k_m$ 表示内层4个阵列探头张开度;

$r_c$ 表示外层4个阵列探头编号1、2、3、4距离井筒截面圆心点位置;

$r_m$ 表示内层4个阵列探头编号5、6、7、8距离井筒截面圆心点位置;

$R$ 表示外层4个环状阵列探头完全张开时据中心距离,等于井筒截面半径;

步骤2:当8次测量过程中1号阵列转子探头均处于水平井筒顶部位置或某一次测量过程中1、2、3、4号探头任一探头旋转井筒截面顶部时至时,1号探头相对于井筒截面最高位置发生顺时针旋转的角度为 $\theta_j = 0.5 \cdot n\pi$ , $n=0,1,2,3\cdots$ ,此时8个阵列转子探头相对于仪器不旋转时各位置点均有转子探头存在,测量过程中心转子一直处于井筒截面中心位置,则各探头位置处流体视速度 $V'_{ai}$ 直接采用上测和下测涡轮转速对照电缆速度的方法交会求取,表示为,

$$b_i = \frac{\left[ \sum RPS_{ij} \sum V_{ij}^2 - \sum V_{ij} \sum (V_{ij} \cdot RPS_{ij}) \right]}{\left( N \sum V_{ij}^2 - \sum V_{ij} \sum V_{ij} \right)} \quad (3)$$

$$K_i = \frac{\left[ N \sum (V_{ij} \cdot RPS_{ij}) - \sum RPS_{ij} \sum V_{ij} \right]}{\left( N \sum V_{ij}^2 - \sum V_{ij} \sum V_{ij} \right)} \quad (4)$$

$$V'_{ai} = -b_i / K_i \quad (5)$$

式中, $V'_{ai}$ 为计算得到的第*i*个转子处的视流体速度; $RPS_{ij}$ 为第*i*个转子第*j*趟测量时的响应值,交会计算过程同一位置要根据实际探头取值计算; $V_{ij}$ 为第*j*趟测量时的仪器速度;*i*为转子序号= $0,1,2\cdots 8$ ; *j*为测量序号= $1,2\cdots 8$ ; *N*为有效测点个数,8次测量均有效时即等于8; $K_i$ 为第*i*个转子拟合得到的转子常数,以转子自身性质相关; $b_i$ 为第*i*个转子拟合时在转子转速轴上的截距;

当转子响应存在正转和反转特征时,此时将正转转子和反转转子响应分别采用公式(3)和公式(4)进行拟合计算,正转过程中RPS响应值为正,反转过程中RPS响应值为负,则正

转过程求取的各转子视流体速度为,

$$V'_{ai正} = -b_{i正}/K_{i正} \quad (6)$$

反转过程求取的各转子视流体速度为,

$$V'_{ai反} = -b_{i反}/K_{i反} \quad (7)$$

此时各转子的视流体速度表示为,

$$V_{ai} = |V'_{ai正}| + \left( \frac{\left| |V'_{ai正}| - |V'_{ai反}| \right|}{2} \right) \quad (8)$$

当转子全部正转或全部反转时,

$$V_{ai} = |V'_{ai}| + |V_{ai零}| \quad (9)$$

式中,  $V'_{ai正}$  为计算得到的第  $i$  个转子正转时的视流体速度;  $V'_{ai反}$  为计算得到的第  $i$  个转子反转时的视流体速度;  $b_{i正}$  为第  $i$  个转子正转时拟合得到的转子转速轴上的截距;  $b_{i反}$  为第  $i$  个转子反转时拟合得到的转子转速轴上的截距;  $K_{i正}$  为第  $i$  个转子正转时拟合得到的转子常数;  $K_{i反}$  为第  $i$  个转子反转时拟合得到的转子常数;  $V_{ai零}$  为仪器在零流量层段计算得到的第  $i$  个转子视流体速度; 基于阵列涡轮流量计涡轮转子分布结构将井筒截面被切分为 9 个区域, 从内到外分别为 0 号转子分布区, 5、6、7、8 号转子分布区和 1、2、3、4 号转子分布区, 各分部区域外边界距离井筒截面中心的距离分别为  $R \cdot r_T / (r_T + 2r_i)$ 、 $R \cdot (r_T + r_i) / (r_T + 2r_i)$ 、 $R \cdot r_T / (r_T + 2r_i)$ ; 则各转子探头控制区域对应面积表示为,

$$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 0.25 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r_T + r_i}{r_T + 2r_i} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$A_5 = A_6 = A_7 = A_8 = 0.25 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left[ \left( \frac{r_T + r_i}{r_T + 2r_i} \right)^2 - \left( \frac{r_T}{r_T + 2r_i} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$A_0 = 0.25 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left( \frac{r_T}{r_T + 2r_i} \right)^2 \quad (12)$$

则水平井筒内流体速度表示为,

$$V_a = \sum_{i=0}^9 \left( \frac{A_i}{A} \cdot V_{ai} \right) \quad (13)$$

式中,  $A_0 \sim A_8$  为井筒截面切分后 9 个区域所代表的的面积;  $A$  为井筒整体截面积;  $V_a$  为水平井筒流体速度;  $R$  为水平井筒截面半径;  $r_i$  为 1 ~ 8 号阵列转子叶片半径;  $r_T$  为 0 号转子叶片半径;

步骤 3: 结合水平井筒内流体介质分布和速度剖面分布特征, 假定每一次测井过程中 1 号探头相对于井筒截面最高位置发生顺时针旋转的角度为  $\theta_j$ , 以 0 号探头位置为坐标原点, 可求取水平井筒内双层环状阵列转子探头的空间坐标如下,

探头 0: (0, 0)

探头1:  $(k_c \cdot R \cdot \sin\theta_j, k_c \cdot R \cdot \cos\theta_j)$

探头2:  $(k_c \cdot R \cdot \sin(\theta_j+0.5\pi), k_c \cdot R \cdot \cos(\theta_j+0.5\pi))$

探头3:  $(k_c \cdot R \cdot \sin(\theta_j+\pi), k_c \cdot R \cdot \cos(\theta_j+\pi))$

探头4:  $(k_c \cdot R \cdot \sin(\theta_j+1.5\pi), k_c \cdot R \cdot \cos(\theta_j+1.5\pi))$

探头5:  $\left(0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i+r_T}{2r_i+r_T} \cdot \sin(\theta_j+0.25\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i+r_T}{2r_i+r_T} \cdot \cos(\theta_j+0.25\pi)\right)$

探头6:  $\left(0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i+r_T}{2r_i+r_T} \cdot \sin(\theta_j+0.75\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i+r_T}{2r_i+r_T} \cdot \cos(\theta_j+0.75\pi)\right)$

探头7:  $\left(0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i+r_T}{2r_i+r_T} \cdot \sin(\theta_j+1.25\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i+r_T}{2r_i+r_T} \cdot \cos(\theta_j+1.25\pi)\right)$

探头8:  $\left(0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i+r_T}{2r_i+r_T} \cdot \sin(\theta_j+1.75\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i+r_T}{2r_i+r_T} \cdot \cos(\theta_j+1.75\pi)\right)$

式中,  $\theta_j$  为1号探头相对于井筒截面最高位置发生顺时针旋转的角度; 由于每次测井过程中仪器发生任意旋转, 针对每一次测量数据9个转子响应采用高斯径向基函数法进行插值处理, 利用高斯函数来求取每个待估点各探头所占的权重, 引入水平方向和垂直方向的递减控制系数, 从而根据已知探头的坐标与相应值较为准确的求取待估点的值, 对应的高斯权重的求法如式,

$$D_{ik} = \exp \left[ - \left( \frac{x - X_i}{m} \right)^2 - \left( \frac{y - Y_i}{n} \right)^2 \right] \quad (14)$$

式中,  $(X_i, Y_i)$  为探头*i*所在坐标值;  $(x, y)$  为待估点位置坐标值;  $m, n$  即为井筒截面水平和垂直方向上的递减控制系数, 根据所求权重, 即可依据各个探头的实测值求得各待求位置点的响应值;

则井筒横截面各点的测井预测响应值通过高斯径向基函数法插值矩阵得出, 计算对应位置的响应值满足:

$$RPS_k = \sum_{i=0}^8 D_{ik} \cdot C_i \cdot RPS_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, 8 \quad i \neq k \quad (15)$$

式中,  $RPS_k$  为待插位置的响应值;  $RPS_i$  为第*i*个探头的测井响应值;  $D_{ik}$  为第*i*个探头位置到第*k*个点距离的权系数;  $C_i$  为确保相容性而增加的待定系数;

结合阵列转子叶片半径和井筒截面半径的关系, 将井筒截面按  $m \times m$  个网格进行划分, 每一个网格能完整包含阵列叶片, 则  $m$  满足,

$$m = \left[ \frac{R}{r_i} \right] + 1 \quad (16)$$

式中,  $[ ]$  为取整运算;

插值运算得到探头最顶部位置以及剩余探头映射位置, 即仪器未发生旋转时对应位置

处的转子响应值,结合公式(3)至公式(5)得到对应局点位置处的视流体速度 $RPS_{xy}'$ ,进一步结合公式(8)和(9)得到各位置的局点流体速度 $V_{axy}'$ ,则水平井筒内流体速度表示为,

$$V_a = \sum_{i=0}^{m \times m} \left( \frac{A_{xy}}{A} \cdot V_{axy} \right) = \sum_{i=0}^{m \times m} \left( \frac{1}{\pi m^2} \cdot V_{axy} \right) \quad (17)$$

式中, $A_{xy}$ 为按 $m$ 行 $m$ 列切分网格后各网格区域面积; $V_{axy}$ 为对应网格区域的视流体速度;则井筒多相流体总流量表示为,

$$Q = V_a \cdot PC = 0.25 \times 24 \times 60 \times \pi R^2 V_a \quad (18)$$

式中, $PC$ 为水平井筒管子常数; $Q$ 为水平井筒多相流总流量。

## 一种水平井阵列涡轮流量计及测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及水平井阵列涡轮流量计技术领域,特别涉及一种水平井阵列涡轮流量计及测量方法。

### 背景技术

[0002] 水平井作为一种新兴高效的油田开发技术越来越多的用于非常规油气藏开发,不同于常规垂直井井身结构,水平井井身起伏变化,水平井段呈现上倾、下倾和水平等多种组合形式,复杂的井身结构使得开发过程水平井筒内油气水多相流体介质分布与常规直井相比差异明显,多呈现气上-油中-水下分层或不规则扰动流特征,流体介质分布及速度剖面极不规则,致使水平井多相流体速度监测继续采用常规直井产出剖面测井方法中的全井眼流量计和连续流量计误差极大。

[0003] 目前,水平井多相流体速度监测均采用阵列式流量探头布局结构,以Schlumberger公司的流动扫描成像仪FSI和Sondex公司的MAPS阵列流量计具有代表性。其中,Schlumberger公司的FSI采用5个大小相同轴向垂直居中分布的微型涡轮转子实现速度监测,其对于多相流体介质层状流动特征具有较好的应用效果;而Sondex公司的SAT采用环状均匀分布的6个大小相同的涡轮转子来实现流体速度测量,对于环状流体介质分布具有较好的应用效果。测量过程采用不同测量速度多次上测和下测,再结合涡轮转速和测量速度交会方法,得到对应的水平井筒各探头位置处的视流体速度,最终,采用权重法计算得到水平井多相流体视速度。

[0004] 但实际水平井测井过程中,仪器上提和下放过程同一深度点阵列探头空间相对位置会因为仪器的旋转而发生变化,因此在实际资料处理过程中针对同一探头监测信息的多测次交会方法计算视流体速度会存在极大误差,进而影响水平井筒多相流体流量的计算精度;而实际单一环状分布和轴向垂直居中分布方式亦会因为仪器的旋转造成监测数据不准确的局限。

[0005] 为了克服水平井多相流体速度监测过程多因素影响及资料处理受仪器旋转影响大的局限,有必要设计一种新的水平井阵列流量监测仪器,并建立对应监测资料准确计算视流体速度的方法,实现水平井多相流体流量的准确定量计算,进而为复杂油气藏水平井开发各产层生产动态定量评价和下一阶段开发方案的优化调整提供准确可靠的技术支撑参数。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的在于提供一种水平井阵列涡轮流量计及测量方法,该流量计可用于非常规油气藏水平井开发井筒油气水多相流体流速的准确监测,可解决现有技术中探头单一环状分布和轴向垂直居中分布方式造成仪器的旋转进而造成监测数据不准确的问题。

[0007] 为实现上述目的,本发明采取的技术方案为:

[0008] 第一方面,本发明提供一种包括:电缆头、中轴主体、电压调节系统、数据传输系

统、信号转换系统、控制系统、1个可伸缩中心涡轮转子、8个双层布局阵列臂、完全相同的8个阵列涡轮转子、可伸缩中心轴和锥形头；

[0009] 其中,所述中轴主体的上端连接所述电缆头,该电缆头用于与测井电缆连接;所述中轴主体内部从上至下方向依次设置:所述电压调节系统、数据传输系统、信号转换系统和控制系统依次连接;所述控制系统用于控制可伸缩中心轴的伸缩和阵列臂的伸展与收缩;所述信号转换系统实现将涡轮转子转动频率信号转换为电流信号传输;所述数据传输系统实现信号数据的稳定输出;所述电压调节系统实现将地面电压调节为流量计所需电压强度;

[0010] 所述中轴主体的下端靠近边缘处连接所述8个双层布局阵列臂的一端,所述中轴主体的中心连接所述可伸缩中心轴的一端;所述可伸缩中心轴的中间位置安装1个可伸缩中心涡轮转子;

[0011] 在所述8个双层布局阵列臂的中间位置分别对应安装所述8个阵列涡轮转子;

[0012] 所述8个双层布局阵列臂的另一端及所述可伸缩中心轴的另一端均固定连接于所述锥形头。

[0013] 进一步地,所述中轴主体为预设外径的圆柱形钢质材料制成的同轴结构。

[0014] 进一步地,所述8个双层布局阵列臂由内外两层构成,每层由呈环形均匀布置的4根弹簧臂构成;且在8个双层布局阵列中,每相邻两根阵列臂与所述可伸缩中心轴构成的夹角均为 $45^{\circ}$ 。

[0015] 进一步地,所述可伸缩中心涡轮转子的叶片直径与所述阵列涡轮转子的叶片直径比例为3:1。

[0016] 进一步地,所述可伸缩中心涡轮转子上下分别连接一根环绕所述可伸缩中心轴的柔性弹簧。

[0017] 第二方面,本发明实施例还提供一种水平井阵列涡轮流量计的测量方法,使用如上述任一项实施例所述的水平井阵列涡轮流量计作为测量仪器进行测量,该测量方法包括:

[0018] 1) 调试及仪器下井:

[0019] 检测仪器是否正常工作,若正常,保证仪器的8个双层布局阵列臂处于完全收拢状态采用油管传输方式进行下井,下井过程中保持地面系统向仪器供电;

[0020] 2) 定位及监测:

[0021] 结合所测目的井井身结构和射孔段信息确定监测目的层段,当仪器下井至距最上部射孔段顶部200m左右时,停止下井,此时打开控制系统,保证弹簧臂和转子处于完全张开状态,定义仪器下测时速度为正;

[0022] 以速度 $V_{11}$ 进行下测同时监测记录仪器输出信号,此时可伸缩中心涡轮转子输出信号为 $RPS_{01}$ ,8个阵列转子输出信号分别为 $RPS_{11}$ 、 $RPS_{21}$ 、 $RPS_{31}$ 、 $RPS_{41}$ 、 $RPS_{51}$ 、 $RPS_{61}$ 、 $RPS_{71}$ 、 $RPS_{81}$ ,待仪器下测至最下部射孔段以下位置、或至井底无法进一步下井时,停止下测,此时以相同速度 $-V_{11}$ 上测至目的层段顶部位置,此时中心转子输出信号为 $RPS_{02}$ ,8个阵列转子输出信号分别为 $RPS_{12}$ 、 $RPS_{22}$ 、 $RPS_{32}$ 、 $RPS_{42}$ 、 $RPS_{52}$ 、 $RPS_{62}$ 、 $RPS_{72}$ 、 $RPS_{82}$ ,至上提至目的层段顶部位置时一次测试作业完成;

[0023] 3) 多次重复测量:



[0024] 增加仪器下井速度至 $V_{12}$ ,此时 $V_{12}=V_{11}+\Delta V$ ,重复步骤2)进行下测至最下部射孔段以下位置、或至井底无法进一步下井时,停止下测;再以相同速度 $-V_{12}$ 上测至目的层段顶部位置,记录全部上提和下放过程可伸缩中心涡轮转子和阵列涡轮转子输出信号;增加仪器下井速度至 $V_{13}=V_{11}+2\Delta V$ 、 $V_{14}=V_{11}+3\Delta V$ ,重复上述步骤,直至完成全部作业,此时共记录得到8组仪器速度和对应的转子响应信号;

[0025] 4)完成测试及仪器起井:

[0026] 操作地面控制系统收拢阵列臂,停止供电,上提仪器至地面,完成测试。

[0027] 进一步地,在步骤3)中,利用记录得到8组仪器速度和对应的转子响应信号,计算水平井井下流体总流量过程如下:

[0028] 步骤1:基于水平井阵列涡轮流量计的结构,环状阵列涡轮转子探头张开度可进行自由调节,因此外层4个环状阵列探头距离井筒中心距离表示为,

$$[0029] \quad r_c = k_c \cdot R \quad (1)$$

[0030] 内层4个环状阵列探头距离井筒中心距离表示为,

$$[0031] \quad r_m = k_m \cdot R \quad (2)$$

[0032] 式中, $k_c$ 表示外层4个阵列探头张开度;

[0033]  $k_m$ 表示中间4个阵列探头张开度;

[0034]  $r_c$ 表示外层4个阵列探头编号1、2、3、4距离井筒截面圆心点位置;

[0035]  $r_m$ 表示内层4个阵列探头编号5、6、7、8距离井筒截面圆心点位置;

[0036]  $R$ 表示外层4个环状阵列探头完全张开时据中心距离,等于井筒截面半径;

[0037] 步骤2:当8次测量过程中1号阵列转子探头均处于水平井筒顶部位置或某一次测量过程中1、2、3、4号探头任一探头旋转井筒截面顶部时至时,1号探头相对于井筒截面最高位置发生顺时针旋转的角度为 $\theta_j = 0.5 \cdot n\pi$ , $n=0,1,2,3\cdots$ ,此时8个阵列转子探头相对于仪器不旋转时各位置点均有转子探头存在,测量过程中心转子一直处于井筒截面中心位置,则各探头位置处流体视速度 $V'_{ai}$ 直接采用上测和下测涡轮转速对照电缆速度的方法交会求取,表示为,

$$[0038] \quad b_i = \frac{\left[ \sum RPS_{ij} \sum V_{ij}^2 - \sum V_{ij} \sum (V_{ij} \cdot RPS_{ij}) \right]}{\left( N \sum V_{ij}^2 - \sum V_{ij} \sum V_{ij} \right)} \quad (3)$$

$$[0039] \quad K_i = \frac{\left[ N \sum (V_{ij} \cdot RPS_{ij}) - \sum RPS_{ij} \sum V_{ij} \right]}{\left( N \sum V_{ij}^2 - \sum V_{ij} \sum V_{ij} \right)} \quad (4)$$

$$[0040] \quad V'_{ai} = -b_i / K_i \quad (5)$$

[0041] 式中, $V'_{ai}$ 为计算得到的第i个转子处的视流体速度; $RPS_{ij}$ 为第i个转子第j趟测量时的响应值,交会计算过程同一位置要根据实际探头取值计算; $V_{ij}$ 为第j趟测量时的仪器速度; $i$ 为转子序号 $=0,1,2\cdots\cdots 8$ ; $j$ 为测量序号 $j=1,2\cdots\cdots 8$ ; $N$ 为有效测点个数,8次测量均有效时即等于8; $K_i$ 为第i个转子拟合得到的转子常数,以转子自身性质相关; $b_i$ 为第i个转子拟合时在转子转速轴上的截距;

[0042] 当转子响应存在正转和反转特征时,此时将正转转子和反转转子响应分别采用公式(3)和公式(4)进行拟合计算,正转过程中RPS响应值为正,反转过程中RPS响应值为负,则正转过程求取各转子视流体速度为,

[0043]  $V'_{ai正} = -b_{i正}/K_{i正}$  (6)

[0044] 反转过程求取的各转子视流体速度为,

[0045]  $V'_{ai反} = -b_{i反}/K_{i反}$  (7)

[0046] 此时各转子的视流体速度表示为,

[0047] 
$$V_{ai} = |V'_{ai正}| + \left( \frac{\left| |V'_{ai正}| - |V'_{ai反}| \right|}{2} \right)$$
 (8)

[0048] 当转子全部正转或全部反转时,

[0049]  $V_{ai} = |V'_{ai}| + |V_{ai零}|$  (9)

[0050] 式中,  $V'_{ai正}$  为计算得到的第  $i$  个转子正转时的视流体速度;  $V'_{ai反}$  为计算得到的第  $i$  个转子反转时的视流体速度;  $b_{i正}$  为第  $i$  个转子正转时拟合得到的转子转速轴上的截距;  $b_{i反}$  为第  $i$  个转子反转时拟合得到的转子转速轴上的截距;  $K_{i正}$  为第  $i$  个转子正转时拟合得到的转子常数;  $K_{i反}$  为第  $i$  个转子反转时拟合得到的转子常数;  $V_{ai零}$  为仪器在零流量层段计算得到的第  $i$  个转子视流体速度; 基于阵列涡轮流量计涡轮转子分布结构将井筒截面被切分为 9 个区域, 从内到外分别为 0 号转子分布区, 5、6、7、8 号转子分布区和 1、2、3、4 号转子分布区, 各分部区域外边界距离井筒截面中心的距离分别为  $R \cdot r_T / (r_T + 2r_t)$ 、 $R \cdot (r_T + r_t) / (r_T + 2r_t)$ 、 $R \cdot r_T / (r_T + 2r_t)$ ; 则各转子探头控制区域对应面积表示为,

$$A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 0.25 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r_T + r_t}{r_T + 2r_t} \right)^2 \right] \quad (10)$$

[0051] 
$$A_5 = A_6 = A_7 = A_8 = 0.25 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left[ \left( \frac{r_T + r_t}{r_T + 2r_t} \right)^2 - \left( \frac{r_T}{r_T + 2r_t} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$A_0 = 0.25 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left( \frac{r_T}{r_T + 2r_t} \right)^2 \quad (12)$$

[0052] 则水平井筒内流体速度表示为,

[0053] 
$$V_a = \sum_{i=0}^9 \left( \frac{A_i}{A} \cdot V_{ai} \right)$$
 (13)

[0054] 式中,  $A_0 \sim A_8$  为井筒截面切分后 9 个区域所代表的的面积;  $A$  为井筒整体截面积;  $V_a$  为水平井筒流体速度;  $R$  为水平井筒截面半径;  $r_t$  为 1 ~ 8 号阵列转子叶片半径;  $r_T$  为 0 号转子叶片半径;

[0055] 步骤 3: 结合水平井筒内流体介质分布和速度剖面分布特征, 假定每一次测井过程中 1 号探头相对于井筒截面最高位置发生顺时针旋转的角度为  $\theta_j$ , 以 0 号探头位置为坐标原点, 可求取水平井筒内双层环状阵列转子探头的空间坐标如下,

[0056] 探头 0: (0, 0)

[0057] 探头 1: ( $k_c \cdot R \cdot \sin\theta_j$ ,  $k_c \cdot R \cdot \cos\theta_j$ )

[0058] 探头2:  $(k_c \cdot R \cdot \sin(\theta_j + 0.5\pi), k_c \cdot R \cdot \cos(\theta_j + 0.5\pi))$

[0059] 探头3:  $(k_c \cdot R \cdot \sin(\theta_j + \pi), k_c \cdot R \cdot \cos(\theta_j + \pi))$

[0060] 探头4:  $(k_c \cdot R \cdot \sin(\theta_j + 1.5\pi), k_c \cdot R \cdot \cos(\theta_j + 1.5\pi))$

[0061] 探头5:  $\left( 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \sin(\theta_j + 0.25\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \cos(\theta_j + 0.25\pi) \right)$

探头6:  $\left( 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \sin(\theta_j + 0.75\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \cos(\theta_j + 0.75\pi) \right)$

探头7:  $\left( 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \sin(\theta_j + 1.25\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \cos(\theta_j + 1.25\pi) \right)$

探头8:  $\left( 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \sin(\theta_j + 1.75\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \cos(\theta_j + 1.75\pi) \right)$

[0062] 式中,  $\theta_j$  为1号探头相对于井筒截面最高位置发生顺时针旋转的角度; 由于每次测井过程中仪器发生任意旋转, 针对每一次测量数据9个转子响应采用高斯径向基函数法进行插值处理, 利用高斯函数来求取每个待估点各探头所占的权重, 引入水平方向和垂直方向的递减控制系数, 从而根据已知探头的坐标与相应值较为准确的求取待估点的值, 对应的高斯权重的求法如式,

$$[0063] \quad D_{ik} = \exp \left[ - \left( \frac{x - X_i}{m} \right)^2 - \left( \frac{y - Y_i}{n} \right)^2 \right] \quad (14)$$

[0064] 式中,  $(X_i, Y_i)$  为探头*i*所在坐标值;  $(x, y)$  为待估点位置坐标值;  $m, n$  即为井筒截面水平和垂直方向上的递减控制系数, 根据所求权重, 即可依据各个探头的实测值求得各待求位置点的响应值;

[0065] 则井筒横截面各点的测井预测响应值通过高斯径向基函数法插值矩阵得出, 计算对应位置的响应值满足:

$$[0066] \quad RPS_k = \sum_{i=0}^8 D_{ik} \cdot C_i \cdot RPS_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, 8 \quad i \neq k \quad (15)$$

[0067] 式中,  $RPS_k$  为待插位置的响应值;  $RPS_i$  为第*i*个探头的测井响应值;  $D_{ik}$  为第*i*个探头位置到第*k*个点距离的权系数;  $C_i$  为确保相容性而增加的待定系数;

[0068] 结合阵列转子叶片半径和井筒截面半径的关系, 将井筒截面按  $m \times m$  个网格进行划分, 每一个网格能完整包含阵列叶片, 则  $m$  满足,

$$[0069] \quad m = \left\lceil \frac{R}{r_i} \right\rceil + 1 \quad (16)$$

[0070] 式中,  $\lceil \cdot \rceil$  为取整运算;

[0071] 插值运算得到探头最顶部位置以及剩余探头映射位置, 即仪器未发生旋转时对应位置处的转子响应值, 结合公式 (3) 至公式 (5) 得到对应局点位置处的视流体速度  $RPS_{xy}'$ , 进

一步结合公式(8)和(9)得到各位置的局点流体速度 $V_{axy}$ ，则水平井筒内流体速度表示为，

$$[0072] \quad V_a = \sum_{i=0}^{m \times m} \left( \frac{A_{xy}}{A} \cdot V_{axy} \right) = \sum_{i=0}^{m \times m} \left( \frac{1}{\pi m^2} \cdot V_{axy} \right) \quad (17)$$

[0073] 式中, $A_{xy}$ 为按 $m$ 行 $m$ 列切分网格后各网格区域面积; $V_{axy}$ 为对应网格区域的视流体速度;

[0074] 则井筒多相流体总流量表示为，

$$[0075] \quad Q = V_a \cdot PC = 0.25 \times 24 \times 60 \times \pi R^2 V_a \quad (18)$$

[0076] 式中,PC为水平井筒管子常数; $Q$ 为水平井筒多相流总流量。

[0077] 与现有技术相比,本发明具有如下有益效果:

[0078] (1)本发明的水平井阵列涡轮流量计,采用中心转子与周围内外两层交错环状阵列转子组合结构,能够尽可能实现水平井筒截面全覆盖,有效克服了流体介质分布不均带来的影响,监测的得到的流体速度信息更为全面,精度更高;

[0079] (2)本发明采用中心转子与周围阵列转子叶片尺寸差异化设计,能够有效克服现有水平井阵列流量监测技术弱化中心流量的局限,尽可能真实反映水平井筒速度剖面信息;

[0080] (3)本发明针对转子流量计测量过程正转和反转分情况进行启动速度校正,有效提升转子视流体速度计算精度;

[0081] (4)本发明针对阵列涡轮流量计上下井过程发生任意旋转时的监测资料,首先采用高斯径向基插值法得到全部网格区域阵列转子响应值,再针对网格区域计算得到局点位置视流体速度,有效克服现有水平井阵列流量计资料处理过程直接采用交会法计算视流体速度由于仪器旋转带来的影响,计算得到的井筒视流体速度精度更高。

[0082] 总体来说,本发明实现了非常规油气藏水平井筒油、气、水多相流体流动过程井筒流体速度剖面的全覆盖测量,并基于监测资料准确计算得到了井筒多相流体总流量,为非常规油气藏开发水平井生产各产层动态评价奠定基础。

## 附图说明

[0083] 图1为本发明实施例提供的水平井阵列涡轮流量计结构示意图。

[0084] 图2为本发明流量计测井过程中阵列涡轮转子完全张开时井筒分布截面示意图。

[0085] 图3为本发明流量计测井过程中阵列涡轮转子完全张开仪器旋转时井筒分布截面示意图。

[0086] 图4为本发明流量计测井过程中阵列涡轮转子完全张开仪器旋转后井筒分布截面网格化切分示意图。

## 具体实施方式

[0087] 为使本发明实现的技术手段、创作特征、达成目的与功效易于明白了解,下面结合具体实施方式,进一步阐述本发明。

[0088] 在本发明的描述中,需要说明的是,术语“上”、“下”、“内”、“外”“前端”、“后端”、“两端”、“一端”、“另一端”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅

是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。此外,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0089] 在本发明的描述中,需要说明的是,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“设置有”、“连接”等,应做广义理解,例如“连接”,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以具体情况理解上述术语在本发明中的具体含义。

[0090] 参照图1所示,本发明提供一种水平井阵列涡轮流量计,主要由电缆头01、中轴主体02、电压调节系统03、数据传输系统04、信号转换系统05、控制系统06、1个可伸缩中心涡轮转子07、8个双层布局阵列臂08、编号为1~8的完全相同的8个高灵敏度微型涡轮转子09、可伸缩中心轴10和锥形头11组成。

[0091] 其中,由中轴主体02为比如外径43mm的圆柱形钢质材料制成同轴结构,能够有效适应井下高温高压环境;所述电压调节系统03、数据传输系统04、信号转换系统05、控制系统06置于中轴主体02的钢壳腔内并列排列,且依次连接。外径的尺寸与水平井的内径正相关,且小于水平井的内径尺寸。

[0092] 中轴主体02的上部与电缆头01相连接,可实现与测井电缆的直接连接,实现与地面供电系统和信号采集系统的连接,即:实现地面供电和牵引。

[0093] 电压调节系统03实现电压强度转换并为所有的涡轮转子上电;控制系统06实现阵列臂的伸展、收拢及转子叶片张开和闭合控制,以及控制可伸缩中心轴的伸缩;信号转换系统05实现将涡轮转子的转动脉冲信号转换为电流信号输出至地面采集系统。数据传输系统实现信号数据的稳定输出。

[0094] 中轴主体02下部中间连接一个相对较细的可伸缩中心轴10,直径可为5mm的刚性材质,可自由伸缩。如图2所示,外部交错2层排列的8个双层布局阵列臂08与上部中轴主体02相连接,双层布局阵列臂08为钢质弹簧臂,每一层弹簧臂间环状夹角为固定 $0.5\pi$ ,弹簧臂完全张开同时发挥扶正作用;每相邻两个阵列臂与中心轴构成的夹角为 $45^\circ$ ;8个交错阵列臂上的中间位置安装完全相同的8个高灵敏度微型涡轮转子09,其中编号1~4为外层的涡轮转子,编号5~8为内层的涡轮转子,实现井筒截面位置阵列速度监测。中心转子轴上安装一个高灵敏度的可伸缩中心涡轮转子07,编号为0的则为中心转子,中心转子叶片半径大于外部8个阵列转子的直径,比如涡轮转子07叶片直径与微型阵列涡轮转子09直径比例为3:1。中心转子上部和下部各安装连接一根环绕中心轴的弹簧,随着阵列臂的伸展和收拢实现中心转子推靠张开和闭合,起到辅助中心涡轮转子伸缩和推靠固定的作用。可伸缩中心轴10和双层布局阵列臂08下部连接锥形头11,起到固定阵列臂和中心轴的作用。

[0095] 当开始井下测井,控制阵列臂张开,如图3所示,此时8微型涡轮转子叶片张开,中心转子在弹簧作用下推靠至与8个微型转子至同一横截面张开;当仪器下井过程或测井施工完成后,控制阵列臂收拢,此时8个微型涡轮叶片收缩,中心转子亦随着阵列臂的收拢而自动收缩,仪器整体呈现一规则圆柱状结构,实现仪器的安全起井和下井。中心转子轴下部连接一个锥形固定装置,实现中心涡轮轴和8个阵列臂的安全固定。

[0096] 该仪器针对水平井特殊井身结构及流体介质分布不均导致的速度剖面复杂的难

题,采用双层阵列式涡轮分布+中心涡轮转子的布局结构,仪器原理可靠、操作方便,适用于监测不同结构水平井油气水单相、两相及多相流体流动条件流体速度剖面信息,进而准确反映水平井筒流体速度分布特征。

[0097] 基于同一发明构思,本发明实施例还提供一种水平井阵列涡轮流量计的测量方法,使用上述的水平井阵列涡轮流量计作为测量仪器进行测量,该测量方法包括:

[0098] 1) 调试及仪器下井。地面连接仪器系统,通电检查系统工作是否正常,操作控制系统检查阵列臂是否正常张开和收拢,若正常,保证仪器阵列臂处于完全收拢状态采用油管传输方式进行下井,下井过程中保持地面系统向仪器供电。

[0099] 2) 定位及监测。结合目标井井身结构和射孔段信息确定监测目的层段深度,当仪器下井至距最上部射孔段顶部200m左右时,停止下井,此时打开控制阀,保证弹簧臂和转子处于完全张开状态,以速度 $V_{11}$ (定义仪器下测时速度为正)进行下测同时监测记录仪器输出信号,此时中心转子输出信号为 $RPS_{01}$ ,8个阵列转子输出信号分别为 $RPS_{11}$ 、 $RPS_{21}$ 、 $RPS_{31}$ 、 $RPS_{41}$ 、 $RPS_{51}$ 、 $RPS_{61}$ 、 $RPS_{71}$ 、 $RPS_{81}$ ,待仪器下测至最下部射孔段以下位置、或至井底无法进一步下井时,停止下测,此时以相同速度 $-V_{11}$ 上测至目的层段顶部位置,此时中心转子输出信号为 $RPS_{02}$ ,8个阵列转子输出信号分别为 $RPS_{12}$ 、 $RPS_{22}$ 、 $RPS_{32}$ 、 $RPS_{42}$ 、 $RPS_{52}$ 、 $RPS_{62}$ 、 $RPS_{72}$ 、 $RPS_{82}$ ,至上提至目的层段顶部位置时一次测试作业完成。

[0100] 3) 多次重复测量。增加仪器下井速度至 $V_{12}$ ,此时 $V_{12}=V_{11}+\Delta V$ ,重复步骤2)进行下测至最下部射孔段以下位置、或至井底无法进一步下井时,停止下测;再以相同速度 $-V_{12}$ 上测至目的层段顶部位置,记录全部上提和下放过程中中心转子和阵列转子输出信号;增加仪器下井速度至 $V_{13}=V_{11}+2\Delta V$ 、 $V_{14}=$

[0101]  $V_{11}+3\Delta V$ ,重复上述步骤,直至完成全部作业,此时共记录得到8组仪器速度和对应的转子响应信号。

[0102] 4) 完成测试及仪器起井。操作地面控制系统收拢仪器臂,停止供电,上提仪器至地面,完成测试。

[0103] 进一步地,在上述步骤3)中,利用上述水平井阵列涡轮流量计监测资料计算水平井井下流体总流量方法如下,包括步骤1-4,参照图2-4所示:

[0104] 步骤1:基于水平井阵列涡轮流量计结构,环状阵列涡轮转子探头张开度可进行自由调节,因此外部4个环状阵列探头距离井筒中心距离表示为,

$$[0105] \quad r_c = k_c \cdot R \quad (1)$$

[0106] 内层4个环状阵列探头距离井筒中心距离表示为,

$$[0107] \quad r_m = k_m \cdot R \quad (2)$$

[0108] 式中, $k_c$ —外层4个阵列探头张开度,小数;

[0109]  $k_m$ —内层4个阵列探头张开度,小数;

[0110]  $r_c$ —外层4个阵列探头编号1、2、3、4距离井筒截面圆心点位置,米(m);

[0111]  $r_m$ —内层4个阵列探头编号5、6、7、8距离井筒截面圆心点位置,米(m);

[0112]  $R$ —外层4个环状阵列探头完全张开时据中心距离,等于井筒截面半径,米(m)。

[0113] 步骤2:当8次测量过程中1号涡轮转子探头均处于水平井筒顶部位置或某一次测量过程中1、2、3、4号探头任一探头旋转井筒截面顶部时至时,1号探头相对于井筒截面最高位置发生顺时针旋转的角度为 $\theta_j = 0.5 \cdot n\pi$  ( $n=0, 1, 2, 3 \dots$ ),此时8个阵列转子探头相对于

仪器不旋转时各位置点均有转子探头存在,测量过程中心转子一直处于井筒截面中心位置,则各探头位置处流体视速度 $V'_{ai}$ 直接采用上测和下测涡轮转速vs.电缆速度的方法交会求取,表示为,

$$[0114] \quad b_i = \frac{\left[ \sum RPS_{ij} \sum V_{lj}^2 - \sum V_{lj} \sum (V_{lj} \cdot RPS_{ij}) \right]}{\left( N \sum V_{lj}^2 - \sum V_{lj} \sum V_{lj} \right)} \quad (3)$$

$$[0115] \quad K_i = \frac{\left[ N \sum (V_{lj} \cdot RPS_{ij}) - \sum RPS_{ij} \sum V_{lj} \right]}{\left( N \sum V_{lj}^2 - \sum V_{lj} \sum V_{lj} \right)} \quad (4)$$

$$[0116] \quad V'_{ai} = -b_i / K_i \quad (5)$$

[0117] 式中, $V'_{ai}$ 为计算得到的第i个转子处的视流体速度,米/分钟(m/min); $RPS_{ij}$ 为第i个转子第j趟测量时的响应值,交会计算过程同一位置要根据实际探头取值计算,转/秒(rad/s); $V_{lj}$ 为第j趟测量时的仪器速度,米/分钟(m/min);i为转子序号=0、1、2……8;j为测量序号j=1、2……8;N为有效测点个数,8次测量均有效时即等于8; $K_i$ 为第i个转子拟合得到的转子常数,以转子自身性质相关; $b_i$ 为第i个转子拟合时在转子转速轴上的截距。

[0118] 当转子响应存在正转和反转特征时,此时将正转转子和反转转子响应分别采用公式(3)和公式(4)进行拟合计算,正转过程中RPS响应值为正,反转过程中RPS响应值为负,则正转过程求取各转子视流体速度为,

$$[0119] \quad V'_{ai正} = -b_{i正} / K_{i正} \quad (6)$$

[0120] 反转过程求取各转子视流体速度为,

$$[0121] \quad V'_{ai反} = -b_{i反} / K_{i反} \quad (7)$$

[0122] 此时各转子的视流体速度表示为,

$$[0123] \quad V_{ai} = |V'_{ai正}| + \left( \frac{\left| |V'_{ai正}| - |V'_{ai反}| \right|}{2} \right) \quad (8)$$

[0124] 当转子全部正转或全部反转时,

$$[0125] \quad V_{ai} = |V'_{ai}| + |V_{ai零}| \quad (9)$$

[0126] 式中, $V'_{ai正}$ 为计算得到的第i个转子正转时的视流体速度,米/分钟(m/min); $V'_{ai反}$ 为计算得到的第i个转子反转时的视流体速度,米/分钟(m/min); $b_{i正}$ 为第i个转子正转时拟合得到的转子转速轴上的截距; $b_{i反}$ 为第i个转子反转时拟合得到的转子转速轴上的截距; $K_{i正}$ 为第i个转子正转时拟合得到的转子常数; $K_{i反}$ 为第i个转子反转时拟合得到的转子常数; $V_{ai零}$ 为仪器在零流量层段计算得到的第i个转子视流体速度,米/分钟(m/min)。基于阵列涡轮流量计涡轮转子分布结构将井筒截面被切分为9个区域,如图4所示,从内到外分别为0号转子分布区,5、6、7、8号转子分布区和1、2、3、4号转子分布区,各分部区域外边界距离井筒截面中心的距离分别为 $R \cdot r_T / (r_T + 2r_t)$ 、 $R \cdot (r_T + r_t) / (r_T + 2r_t)$ 、 $R \cdot r_t / (r_T + 2r_t)$ 。则各转子探头控制区域对应面积表示为,

$$[0127] \quad A_1 = A_2 = A_3 = A_4 = 0.25 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{r_T + r_t}{r_T + 2r_t} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$A_5 = A_6 = A_7 = A_8 = 0.25 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left[ \left( \frac{r_T + r_i}{r_T + 2r_i} \right)^2 - \left( \frac{r_T}{r_T + 2r_i} \right)^2 \right] \quad (11)$$

[0128]

$$A_0 = 0.25 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left( \frac{r_T}{r_T + 2r_i} \right)^2 \quad (12)$$

[0129] 则水平井筒内流体速度表示为,

$$V_a = \sum_{i=0}^9 \left( \frac{A_i}{A} \cdot V_{ai} \right) \quad (13)$$

[0130]

[0131] 式中,  $A_0 \sim A_8$  为井筒截面切分后9个区域所代表的的面积, 平方米 ( $m^2$ );  $A$  为井筒整体截面积;  $V_a$  为水平井筒流体速度, 米/分钟 ( $m/min$ );  $R$  为水平井筒截面半径, 米 ( $m$ );  $r_i$  为1~8号阵列转子叶片半径, 米 ( $m$ );  $r_T$  为0号转子叶片半径, 米 ( $m$ )。

[0132] 步骤3: 当每次测井过程中阵列涡轮流量计发生任意旋转时, 此类情况在实际测井施工占据绝大多数, 除中心0号转子外, 其余转子每次测量对应的空间位置发生变化, 此时若直接采用公式(3)和公式(4)的方法交会求取阵列转子局点位置视流体速度, 则得到的阵列转子位置视流体速度误差极大。此时, 结合水平井筒内流体介质分布和速度剖面分布特征, 假定每一次测井过程中1号探头相对于井筒截面最高位置发生顺时针旋转的角度为  $\theta_j$ , 以0号探头位置为坐标原点, 可求取水平井筒内双层环状阵列转子探头的空间坐标如下,

[0133] 探头0: (0, 0)

[0134] 探头1: ( $k_c \cdot R \cdot \sin\theta_j, k_c \cdot R \cdot \cos\theta_j$ )

[0135] 探头2: ( $k_c \cdot R \cdot \sin(\theta_j + 0.5\pi), k_c \cdot R \cdot \cos(\theta_j + 0.5\pi)$ )

[0136] 探头3: ( $k_c \cdot R \cdot \sin(\theta_j + \pi), k_c \cdot R \cdot \cos(\theta_j + \pi)$ )

[0137] 探头4: ( $k_c \cdot R \cdot \sin(\theta_j + 1.5\pi), k_c \cdot R \cdot \cos(\theta_j + 1.5\pi)$ )

[0138] 探头5:  $\left( 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \sin(\theta_j + 0.25\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \cos(\theta_j + 0.25\pi) \right)$

探头6:  $\left( 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \sin(\theta_j + 0.75\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \cos(\theta_j + 0.75\pi) \right)$

探头7:  $\left( 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \sin(\theta_j + 1.25\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \cos(\theta_j + 1.25\pi) \right)$

探头8:  $\left( 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \sin(\theta_j + 1.75\pi), 0.5 \cdot k_c \cdot R \cdot \frac{r_i + r_T}{2r_i + r_T} \cdot \cos(\theta_j + 1.75\pi) \right)$

[0139] 式中,  $\theta_j$  为1号探头相对于井筒截面最高位置发生顺时针旋转的角度, 弧度 ( $rad$ )。

[0140] 由于每次测井过程中仪器发生任意旋转, 针对每一次测量数据9个转子响应采用高斯径向基函数法进行插值处理, 利用高斯函数来求取每个待估点各探头所占的权重, 引入水平方向和垂直方向的递减控制系数, 从而根据已知探头的坐标与相应值较为准确的求取待估点的值, 对应的高斯权重的求法如式,



$$[0141] \quad D_{ik} = \exp \left[ - \left( \frac{x - X_i}{m} \right)^2 - \left( \frac{y - Y_i}{n} \right)^2 \right] \quad (14)$$

[0142] 式中,  $(X_i, Y_i)$  为探头*i*所在坐标值;  $(x, y)$  为待估点位置坐标值;  $m, n$  即为井筒截面水平和垂直方向上的递减控制系数,  $m$  越大水平方向衰减越慢,  $n$  越大垂直方向衰减越慢,  $m, n$  与井筒半径有关, 一般来说  $m$  值为直径的  $1/2$ ,  $n$  值为直径的  $1/6$ , 根据所求权重, 即可依据各个探头的实测值求得各待求位置点的响应值。

[0143] 则井筒横截面各点的测井预测响应值通过高斯径向基函数法插值矩阵得出, 计算对应位置的响应值满足:

$$[0144] \quad RPS_k = \sum_{i=0}^8 D_{ik} \cdot C_i \cdot RPS_i \quad i = 0, 1, 2, \dots, 8 \quad i \neq k \quad (15)$$

[0145] 式中,  $RPS_k$  为待插位置的响应值;  $RPS_i$  为第*i*个探头的测井响应值;  $D_{ik}$  为第*i*个探头位置到第*k*个点距离的权系数;  $C_i$  为确保相容性而增加的待定系数, 不受网格系统的限制, 不同探测值对应的系数不同。

[0146] 结合阵列转子叶片半径和井筒截面半径的关系, 将井筒截面按  $m \times m$  个网格进行划分, 每一个网格能完整包含阵列叶片, 则  $m$  满足,

$$[0147] \quad m = \left\lceil \frac{R}{r_t} \right\rceil + 1 \quad (16)$$

[0148] 式中,  $\lceil \cdot \rceil$  为取整运算。

[0149] 插值运算得到探头最顶部位置以及剩余探头映射位置, 即仪器未发生旋转时对应位置处的转子响应值, 结合公式 (3) 至公式 (5) 得到对应局点位置处的视流体速度  $RPS_{xy}'$ , 进一步结合公式 (8) 和 (9) 得到各位置的局点流体速度  $V_{axy}'$ , 则水平井筒内流体速度表示为,

$$[0150] \quad V_a = \sum_{i=0}^{m \times m} \left( \frac{A_{xy}}{A} \cdot V_{axy}' \right) = \sum_{i=0}^{m \times m} \left( \frac{1}{\pi m^2} \cdot V_{axy}' \right) \quad (17)$$

[0151] 式中,  $A_{xy}$  为按  $m$  行  $m$  列切分网格后各网格区域面积,  $m^2$ ;  $V_{axy}'$  为对应网格区域的视流体速度,  $m/\text{min}$ 。

[0152] 则井筒多相流体总流量表示为,

$$[0153] \quad Q = V_a \cdot PC = 0.25 \times 24 \times 60 \times \pi R^2 V_a \quad (18)$$

[0154] 式中,  $PC$  为水平井筒管子常数;  $Q$  为水平井筒多相流总流量, 方/天 ( $m^3/d$ )。

[0155] 本发明实施例提供的水平井阵列涡轮流量计的测量方法, 可实现对非常规油气藏开发过程水平井生产动态高效监测及准确定量评价。其中, 所使用的阵列涡轮流量计由中轴主体、电压调节系统、数据传输系统、信号转换系统、控制系统、中心涡轮转子、8个双层布局阵列臂、双层分布8个高灵敏度微型涡轮转子和扶正器组成。仪器充分考虑了水平井筒流体介质分布、速度剖面分布、测井过程中仪器旋转、探头贡献差异和流体性质影响, 建立的基于高斯径向基函数插值求取映射位置局点涡轮转速后定量计算视流体速度的方法, 能准确计算得到井筒流体流量, 为非常规油气藏开发水平井生产各产层动态准确定量评价和下阶段开发方案优化调整提供技术支撑。

[0156] 显然,本领域的技术人员可以对本发明进行各种改动和变型而不脱离本发明的精神和范围。这样,倘若本发明的这些修改和变型属于本发明权利要求及其等同技术的范围之内,则本发明也意图包含这些改动和变型在内。

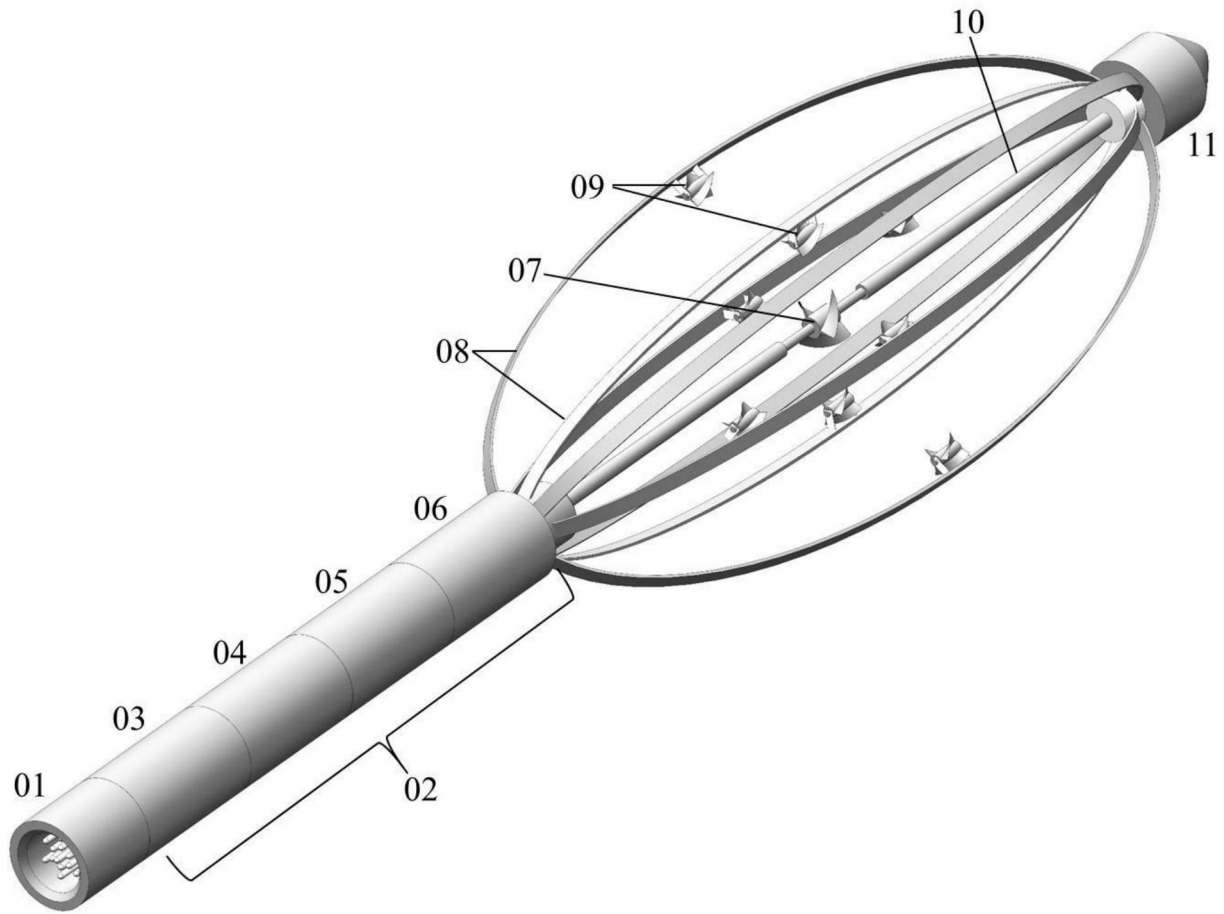


图1

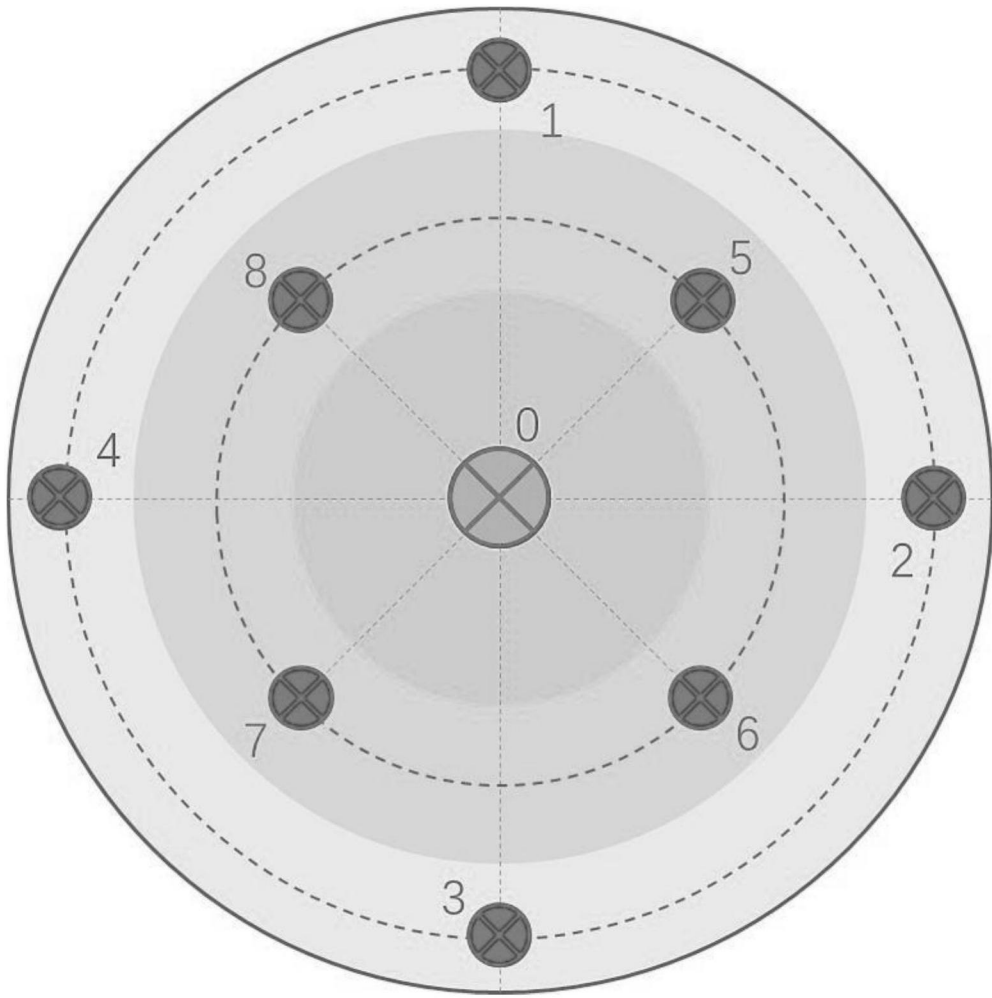


图2

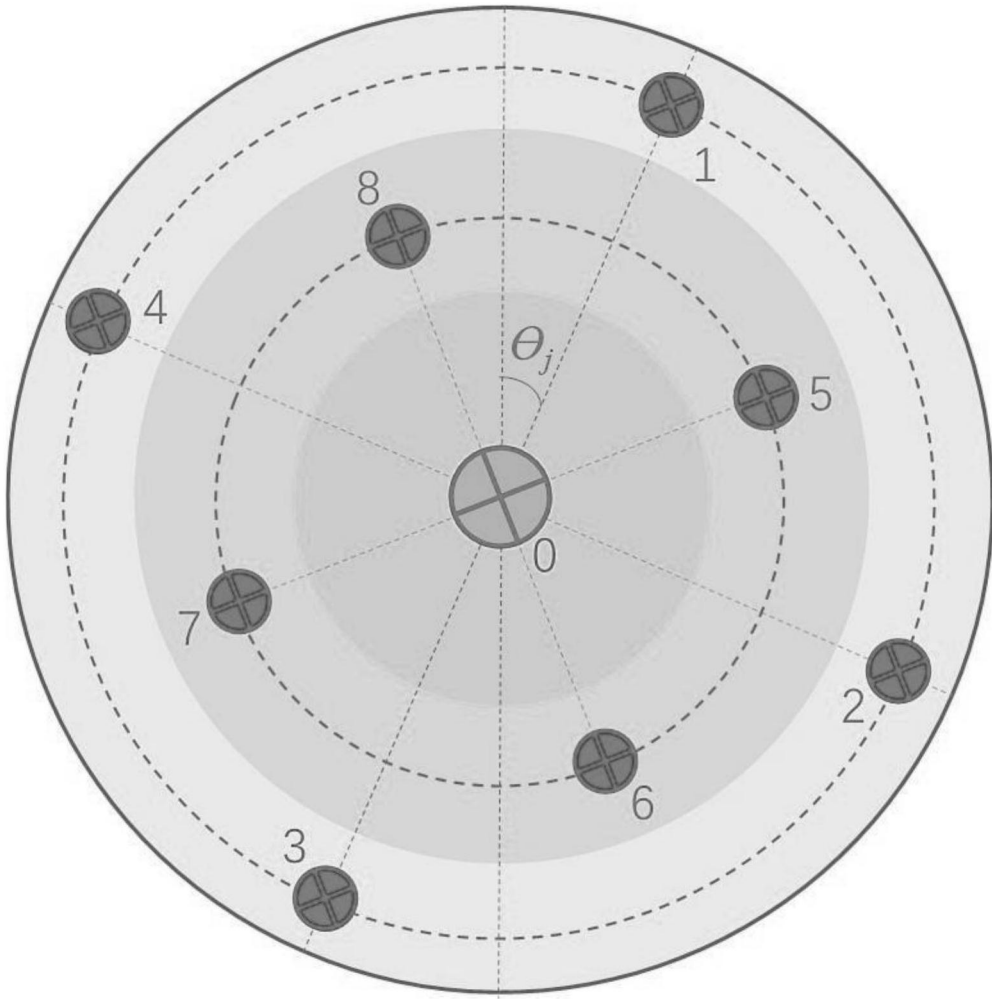


图3

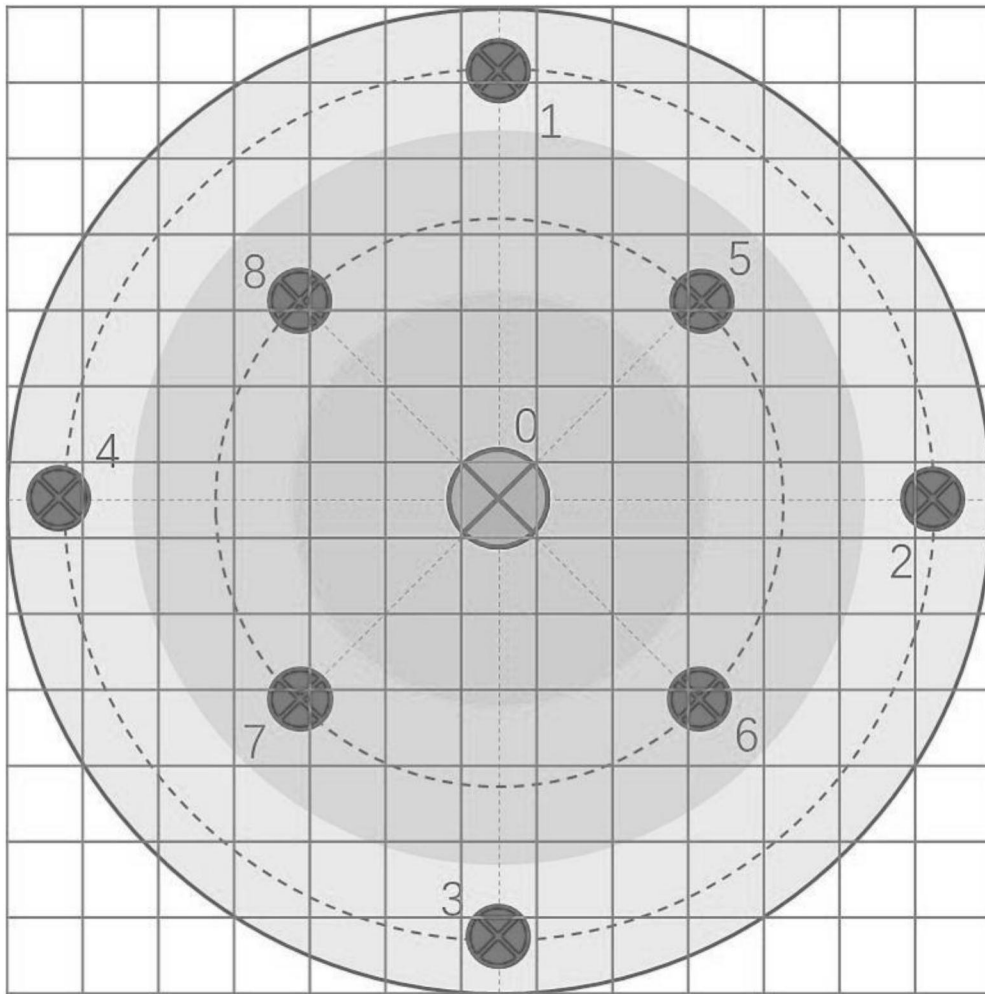


图4