

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织  
国际局

(43) 国际公布日  
2017年3月30日 (30.03.2017)



(10) 国际公布号  
WO 2017/050142 A1

- (51) 国际专利分类号:  
G01V 11/00 (2006.01) G01N 33/00 (2006.01)  
G01V 13/00 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2016/098689
- (22) 国际申请日: 2016年9月12日 (12.09.2016)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:  
201510613624.5 2015年9月23日 (23.09.2015) CN  
201510613731.8 2015年9月23日 (23.09.2015) CN
- (71) 申请人: 中国石油大学(华东) (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM(EAST CHINA)) [CN/CN]; 中国山东省青岛市黄岛区长江西路66号, Shandong 266000 (CN)。 青岛海洋地质研究所 (QINGDAO INSTITUTE OF MARINE GEOLOGY) [CN/CN]; 中国山东省青岛市福州南路62号, Shandong 266000 (CN)。
- (72) 发明人: 邢兰昌 (XING, Lanchang); 中国山东省青岛市黄岛区长江西路66号, Shandong 266000 (CN)。 刘昌岭 (LIU, Changling); 中国山东省青岛市福州南路62号, Shandong 266000 (CN)。 陈强 (CHEN,

Qiang); 中国山东省青岛市福州南路62号, Shandong 266000 (CN)。 耿艳峰 (GENG, Yanfeng); 中国山东省青岛市黄岛区长江西路66号, Shandong 266000 (CN)。 华陈权 (HUA, Chenquan); 中国山东省青岛市黄岛区长江西路66号, Shandong 266000 (CN)。 祁雨 (QI, Yu); 中国山东省青岛市黄岛区长江西路66号, Shandong 266000 (CN)。

(74) 代理人: 青岛联信知识产权代理事务所 (QINGDAO LAWSOCI INTELLECTUAL PROPERTY LAW OFFICE); 中国山东省青岛市崂山区苗岭路52号巨峰创业大厦四层401, Shandong 266000 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

[见续页]

(54) Title: SIMULATION EXPERIMENT TEST SYSTEM AND TEST METHOD FOR GAS HYDRATES IN POROUS MEDIUM

(54) 发明名称: 一种多孔介质中气水合物模拟实验测试系统及测试方法

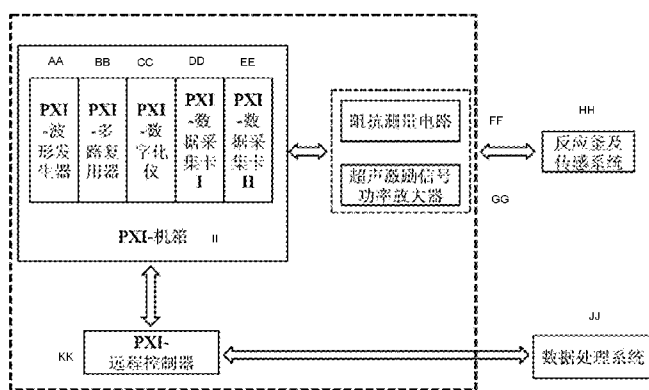


图 1

- AA PXI-waveform generator
- BB PXI-multiplexer
- CC PXI-digitalizer
- DD PXI-data collection card I
- EE PXI-data collection card II
- FF Impedance measurement circuit
- GG Ultrasonic excitation signal power amplifier
- HH Reaction kettle and sensing system
- II PXI-chassis
- JJ Data processing system
- KK PXI-remote controller

(57) Abstract: A simulation experiment test system and test method for gas hydrates in a porous medium. The test system mainly comprises a reaction kettle, a sensing system, a hardware interface device and a data processing system. The reaction kettle is used for holding a tested medium; the sensing system is mounted in the reaction kettle; and the sensing system accesses the data processing system via the hardware interface device. The test method mainly comprises the step of experiment and measurement data acquisition and the step of measurement signal analysis processing. By building an electrical model I and an acoustic model II, and by means of a gas hydrate saturation model III obtained by combining both, the simulation of a natural gas hydrate generation and decomposition process in a deposit sediment under a laboratory environment and the implementation of joint testing of acoustic and electrical parameters are realized, thereby finally building an accurate natural gas hydrate saturation calculation model.

(57) 摘要: 一种多孔介质中气水合物模拟实验测试系统及测试方法, 测试系统主要包括反应釜、传感系统、硬件接口设备和数据处理系统, 反应釜用以盛装被测介质, 传感系统安装在反应釜内, 传感系统通过硬件接口设备接入数据处理系统; 测试方法主要包括实验与测量数据获取的步骤以及测量信号分析处理的步骤, 通过建立电学模型

I 和声学模型 II, 以及二者融合得到的气水合物饱和度模型 III, 实现实验室环境下沉积物中天然气水合物生成分解过程的模拟、声学与电学参数联合测试的实施, 可最终建立准确的天然气水合物饱和度计算模型。

WO 2017/050142 A1



(84) **指定国** (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ,

CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

**本国际公布:**

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

## 一种多孔介质中气水合物模拟实验测试系统及测试方法

### 技术领域

本发明属于油气勘探技术领域，具体涉及一种多孔介质中气水合物模拟实验测试系统及测试方法。

### 背景技术

为了对天然气水合物（以下可简称为气水合物）进行开采，需要对天然气水合物储层进行定量评价；利用地球物理测井技术可以对储层物理性质进行探测，通过测井解释技术可进一步为天然气水合物储层的定量评价提供必要的信息。目前对气水合物饱和度的评价主要基于传统的电阻率测井响应和声波测井响应开展解释工作。与油气储层相比天然气水合物储层具有其特殊性，因此在对测井响应进行解释之前需要构建适用于天然气水合物储层的测井解释模型。构建测井解释模型不仅需要建立理论模型，而且需要收集大量的测井数据资料以及岩石物理实验数据对理论模型进行验证和参数优化。因此，大量地开展针对天然气水合物的岩石物理模拟实验，获取高质量的声学与电学实验测试数据，对于构建天然气水合物储层的声波与电法测井解释模型具有不可替代的重要意义，进而为声波与电法测井技术应用于天然气水合物储层精细评价提供模型基础。除此之外，在针对天然气水合物开展岩石物理模拟实验过程中，深入研究新的声学和电学测试系统和方法也为开发新的测井技术提供理论基础，同时也为探索天然气水合物生成/分解过程的动力学规律以及多孔介质内各相物质的空间分布状态变化规律提供有效的探测技术手段。

现有的天然气水合物模拟实验测试系统及测试方法中，所涉及到的声学和电学测试技术绝大多数采取各自独立实施的方式。如公开号为 CN103323352A 的专利公布了“天然气水合物沉积物动三轴力学-声学-电学同步测试的实验装置及方法”，其测试系统和方法有以下缺陷：利用了传统的电阻率测试技术，即仅获取了被测介质的电阻信息而忽视了容抗信息；仅使用一对电极作为传感器，测试的空间范围较窄，无法提供反映被测介质各向异性的信息；没有考虑电学传感器与声学传感器在测试空间的复合，导致声学传感器和电学传感器的测试对象（空间测试范围）不完全一致，从而导致两类传感器所获取的信息无法统一，无法对两类传感器的测量数据进行联合（融合）处理。

同时，在对气水合物饱和度进行计算的方法中，现有的基于含气水合物多孔介质电学性质计算气水合物饱和度方法主要利用电阻率数据并结合阿尔奇经验公式对气水合物饱和度进

行估算，在此类方法中仅利用了含气水合物多孔介质的部分电学性质(即电阻特性)来描述多孔介质中气水合物饱和度的变化规律。现有方法对介质电学性质的刻画不足是导致气水合物饱和度计算误差的重要原因之一，另外阿尔奇经验公式本身的局限性，如对含油气等流体的多孔介质所提出的众多假设条件是否适用于气水合物的实际情况，也是导致误差产生的原因。

## 发明内容

本发明提供一种多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，并同时提供了一种多孔介质中气水合物模拟实验测试方法，可实现实验室环境下沉积物中天然气水合物生成分解过程的模拟、声学与电学参数联合测试的实施。

本发明的技术方案为：

一种多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，主要包括反应釜、传感系统、硬件接口设备和数据处理系统，反应釜用以盛装被测介质，传感系统安装在反应釜内，传感系统通过硬件接口设备接入数据处理系统；

传感系统主要由声学传感器、电学传感器、温度传感器和压力传感器组成；

硬件接口设备包括：

(1) 波形发生器，用以产生传感系统所需的激励信号，作为传感系统的输入；

(2) 声电信号数据采集模块、阻抗测量电路和超声激励信号功率放大器，其中，超声激励信号经超声激励信号功率放大器放大后作为声学传感器的输入，声学传感器的输出由声电信号数据采集模块采集，声电信号数据采集模块经阻抗测量电路采集电学传感器的信号输出；

(3) 温度采集模块和压力采集模块，二者分别采集温度传感器和压力传感器的信号；

(4) 多路切换模块 I，用以切换波形发生器与传感系统的连通；

(5) 多路切换模块 II，用以切换各采集模块和相应传感系统的连通；

数据处理系统接收并处理各数据采集模块发送的数据。

优选地，所述硬件接口设备中，波形发生器能产生电学传感器所需的激励信号，波形发生器能产生声学传感器所需的超声激励信号；所述波形发生器为同一波形发生器或不同波形发生器。

优选地，所述硬件接口设备中，声电信号数据采集模块是声信号数据采集模块和电信号数据采集模块的合称，既可以分别为声信号数据采集模块和电信号数据采集模块，也可以为一体化的声电信号数据采集模块。

优选地，所述硬件接口设备中，多路切换模块 I 主要用以切换波形发生器与两种传感器之间的连通，所述两种传感器为声学传感器和电学传感器；即多路切换模块 I 主要用以切换波形发生器与声学传感器连通或波形发生器与电学传感器连通。

优选地，所述硬件接口设备中，多路切换模块 II 主要用以切换声电信号数据采集模块与两种传感器之间的连通，所述两种传感器为声学传感器和电学传感器的连通；即多路切换模块 II 主要用以切换声电信号数据采集模块与声学传感器连通或声电信号数据采集模块与电学传感器连通。

优选地，所述数据处理系统经远程控制器接收并处理各数据采集模块发送的数据。

优选地，所述反应釜为同轴双筒结构，内筒同轴置于外筒内，外筒上端设置顶盖用于密封，反应釜底部安装滤网；同一径向平面上反应釜内筒和外筒经内、外筒同一直径上对应设置若干个孔，孔内对应安装声学传感器和电学传感器；反应釜底部设置若干孔，孔内安装温度传感器；反应釜顶盖开两个孔，分别安装气体导管 II 和引出传感器的连接导线，气体导管 II 上安装阀门和压力传感器 II；反应釜底部开两个孔，分别连接气体导管 I 和液体导管。

优选地，同一直径上的内筒和外筒上设置用以发射和接收的声学传感器或用以发射和接收的电学传感器。

具体地，内筒和外筒上位于同一径向平面且位于同一直径延长线上的部位设置用以发射和接收的声学传感器或用以发射和接收的电学传感器。

或者，所述声学传感器和电学传感器为一体化的声电传感器，同一直径上的内筒和外筒上设置用以发射和接收的声电传感器。

具体地，所述声学传感器和电学传感器为一体化的声电传感器，内筒和外筒上位于同一径向平面且位于同一直径延长线上的部位设置用以发射和接收的声电传感器。

优选地，所述一体化声电传感器的声学传感器采用圆柱形，电学传感器采用环形，声学传感器的一端置于电学传感器的环内。

或者，所述一体化声电传感器的声学传感器采用圆柱形，电学传感器采用矩形，矩形中心具有圆孔，声学传感器的一端置于电学传感器的圆孔内。

或者，所述一体化声电传感器的声学传感器采用圆柱形，电学传感器采用矩形，矩形上沿反应釜轴向设置若干个圆孔，声学传感器的一端置于电学传感器的圆孔内；即各声学传感器的一端分别置于电学传感器的若干圆孔内。

一种多孔介质中气水合物模拟实验测试方法，主要包括两部分：(1) 实验与测量数据获

取的步骤以及(2)测量信号分析处理的步骤,其中,

(1)实验与测量数据获取的步骤包括:

1)将多孔介质填入反应釜内;

2)向反应釜注入水和甲烷气体,使甲烷气体充分溶解于水中;

3)将反应釜置于恒温箱中,设定恒温箱温度为某一较低温度,以便气水合物生成,开启测控软件与硬件接口设备,进行数据采集和显示;

4)以一定温度间隔逐步升高恒温箱温度以便气水合物进行分解,在每一次温度设定之后,等待反应釜内温度和压力稳定后,开启数据采集和保存,待所有的数据保存完成后,停止数据采集和保存;

步骤3)和步骤4)所述的数据采集过程为:使用电学传感器对,通过接口电路对被测介质进行阻抗测量;使用声学传感器对,对被测介质进行声学特性参数测量;使用温度传感器和压力传感器,采集反应釜内温度和压力;

(2)测量信号分析处理的步骤包括:

5)根据温度和压力值按照如下公式计算反应釜中气水合物的量;

$$S_H = \frac{\left( \frac{P_1}{Z_1 T_1} - \frac{P_2}{Z_2 T_2} \right) \times \frac{V_G}{R} \times M_H}{\rho_H \times V_V}$$

式中:  $S_H$  为多孔介质中气水合物的饱和度;  $M_H$  为气水合物摩尔质量, g/mol;  $\rho_H$  为气水合物的密度, g/mL;  $V_V$  为多孔介质空隙的体积, L;  $V_G$  为反应釜气相体积, L;  $T$  为系统温度, K;  $P_1$  为系统的初始压力, MPa;  $P_2$  为气水合物生成/分解过程中的系统压力, MPa;  $R$  为气体常数, 8.314J/(mol·K),  $Z_1$  和  $Z_2$  分别为初始状态和生成/分解过程中各状态的气体压缩因子;

6)建立电学传感器测量信号与气水合物饱和度之间定量关系的模型 I;

7)建立声学传感器测量信号与气水合物饱和度之间定量关系的模型 II;

8)建立电学传感器测量信号和声学传感器测量信号数据融合后与气水合物饱和度之间定量关系的模型 III: 将步骤 7)得到的声学模型(模型 II)与步骤 6)得到的电学模型(模型 I)的气水合物饱和度输出作为数据融合算法的输入,将计算所得到的气水合物饱和度作为输出,得到基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型(模型 III);

9) 电学传感器测量信号和声学传感器测量信号数据融合后与气水合物饱和度之间定量关系的模型的使用:

使用电学传感器对, 通过接口电路对被测介质进行阻抗测量, 根据步骤 6) 所得模型 I 反推得到气水合物饱和度值 I;

使用声学传感器对, 对被测介质进行脉冲信号测量, 根据步骤 7) 所得的模型 II 反推得到气水合物饱和度值 II;

上述的各气水合物饱和度值 (I、II) 经过融合算法得出的值, 根据步骤 8) 所得的模型 III 反推得到最终的气水合物饱和度值 III。

优选地, 所述步骤 3) 中, 某一较低温度选取 0-5°C; 所述步骤 4) 中, 一定温度间隔选择 0.5-2.5°C 的温度间隔。

显而易见地, 所述步骤 5) 中, 所述反应釜中气水合物的量, 由公式判断可知, 是指反应釜中多孔介质内的气水合物的饱和度。

优选地, 所述步骤 6) 的电学传感器测量信号与气水合物饱和度之间定量关系的模型 I 的建立步骤为:

通过电学传感器获得每一个状态下、一定频率范围内一系列频率点处的阻抗值, 选取阻抗幅值随饱和度变化显著的频率点, 即特征频率点, 对测量到的阻抗值进行预处理;

根据复电阻率的定义结合反应釜的结构尺寸计算特征频率点处的复电阻率;

分别计算阻抗的频散度和复电阻率的频散度;

利用以上得到的频散度参数分别与计算得到的气水合物饱和度进行多项式拟合, 从而分别获得基于特征频率点阻抗频散度和基于特征频率点复电阻率频散度的气水合物饱和度模型;

将所有特征频率点的阻抗值和根据阻抗值计算得到的复电阻率值作为多维非线性映射的输入, 计算所得到的气水合物饱和度作为多维非线性映射的输出, 通过相应的学习算法最终获得气水合物饱和度的电学特性融合模型;

上述得到的 3 种模型即为模型 I。

具体地, 所述每一个状态是指步骤 4) 中每次等待反应釜内温度和压力稳定后得到的一个稳定的状态, 所述一定频率范围选择 0.01Hz-100MHz, 所述一系列频率点是指根据实际需要所述一定频率范围内选取的点。

优选地, 所述模型 I 的建立步骤中, 通过电学传感器得到的阻抗值需要进行预处理, 所述预处理包括滤波和特征频率点选取。

优选地，所述步骤 7) 的声学传感器测量信号与气水合物饱和度之间定量关系的模型 II 的建立步骤为：

对获取到的声波波形进行预处理，包括滤波、声波速度计算、声波幅值获取、声波频率获取；

分别获取不同的气水合物饱和度条件下声波的特性参数；

利用声波特性参数分别与计算得到的气水合物饱和度进行多项式拟合，分别获得基于声波速度、基于声波幅度和基于声波频率的气水合物饱和度模型；

利用以上三类声波特性参数作为多维非线性映射的输入，计算所得到的气水合物饱和度作为多维非线性映射的输出，通过相应的学习算法最终获得气水合物饱和度的声学特性融合模型；

上述得到的 4 种模型，即为模型 II。

优选地，步骤 3) 和步骤 4) 的数据采集过程中，每次测量时通过多路切换模块切换一对传感器工作。

优选地，步骤 3) 和步骤 4) 的数据采集过程中，对于声学传感器，通过编码激励技术对声学传感器进行激励。

优选地，上述通过编码激励技术得到的超声激励信号为：单频载波脉冲信号、调频脉冲信号、编码脉冲信号、脉冲串信号或相位编码连续波信号。

优选地，步骤 3) 和步骤 4) 的数据采集过程中，对于声学传感器，超声激励信号采用连续波信号或单脉冲信号对声学传感器进行激励。

优选地，步骤 3) 和步骤 4) 的数据采集过程中，对于电学传感器，激励信号采用具有一定幅值、频率、直流偏置的正弦波的电压信号，对每一个测试点均进行一定频率范围的扫频激励；其中，幅值为 0.01V-5V，频率为 0.01Hz-100MHz。

具体地，激励信号采用幅值为 0.01V-5V、频率为 0.01Hz-100MHz、直流偏置为-5—+5V 的正弦波的电压信号，对每一个测试点均进行频率范围为 0.01Hz-100MHz 的扫频激励。

优选地，超声激励信号经过功率放大后进入声学传感器。

本申请与现有技术相比的有益效果为：

(1) 在测试系统中，通过设计新型的反应釜并对传感器进行阵列式排布，实现多传感器的不同复合方式，使得传感器覆盖面更广、其可靠性和鲁棒性更强，从而针对同一被测对象或状态可以获取多类相关且具有一致性的信息，所获得的信息量更大、置信度更高。



(2) 测试系统采用虚拟仪器的架构，以计算机为核心、配以软件化和模块化的仪器。模块化的仪器系统采用标准的数据总线技术(如 PXI 总线)，系统支持灵活的配置，系统的集成度和可靠性强；开发的图形化测控软件能够按照需求灵活配置硬件设备，对硬件设备(仪器、板卡等)进行控制并实现高速高精度的数据采集和处理，友好的人机交互界面支持参数的灵活设定、数据和波形的预处理、实时显示和保存等功能。

(3) 在测试方法中，通过对传感器测量数据进行不同层次的融合、采用不同的融合系统结构和融合算法，从而可以构建不同的数据融合模型，以此为基础可以更加深入地挖掘蕴含在声学与电学传感器测量数据中的信息，为建立气水合物饱和度计算模型和探索气水合物生成/分解过程的动力学规律以及多孔介质中各相物质的空间分布状态变化规律提供更多的有用信息。

(4) 本申请的测试方法借鉴了现代信息领域的多传感器复合与数据融合的思想，主要针对天然气水合物的特点而提出。

(5) 本测试方法基于含天然气水合物多孔介质的电性参数频散特性参数(如复电阻率频散度)来获取天然气水合物饱和度信息。与现有的基于介质电学性质计算气水合物饱和度的方法相比，本申请电性参数频散特性参数(如复电阻率频散度)不仅同时包含介质的电阻率和介电常数信息，而且能够刻画两者随测试频率变化而变化的特性，因此可以更全面、深刻地描述含天然气水合物介质的电学性质，为提高天然气水合物饱和度计算的准确度提供了更加丰富的信息。

(6) 在测试方法中，通过灵活的编码激励技术对声学传感器进行激励，相对于目前普遍采用的单脉冲单次激励方式具有抑制噪声能力强、所需信号幅值低、激励信号频率和波形可灵活调整等优点，接收端声学传感器接收的信号信噪比更高、蕴含的信息更加丰富，从而为后续的数据分析处理提供更多高质量的信息。

(7) 利用此系统和对应的测试方法可以高效地开展天然气水合物相关的物理模拟实验，获取蕴含丰富信息的声学和电学测试参数数据，建立准确的天然气水合物饱和度计算模型，从而为探索天然气水合物生成/分解过程的动力学规律以及多孔介质内各相物质的空间分布状态变化规律提供有效的探测技术手段，同时也为开发新的测井技术(包括测井仪器和相应的数据解释模型与方法)提供理论基础。

## 附图说明

图 1 为实施例 1 中多孔介质中气水合物模拟实验测试系统结构示意图；

图 2 为反应釜结构示意图；

图 3 为声学测试接口设备信号传递流程图；

图 4 为电学测试接口设备信号传递流程图；

图 5 为电学测试接口电路连接图；

图 6 为电学测试信号处理与饱和度模型建立流程图；

图 7 为声学测试信号处理与饱和度模型建立流程图；

图 8 为声学与电学测试信号联合处理与饱和度模型建立流程图；

图 9 为声电特性融合模型的应用；

图 10 测控软件功能示意图；

图 11 为实际采集阻抗谱数据的测试点；

图 12 为各测试点的气水合物饱和度、反应釜内气体摩尔数、压力和温度的变化图；

图 13 为独立的声学传感器和电学传感器安装位置截面示意图；

图 14 为实施例 2 中一体化声电传感器安装位置截面示意图；

图 15 为实施例 2 中一体化声电传感器结构示意图；

图 16 为实施例 3 中一体化声电传感器结构示意图；

图 17 为实施例 4 中一体化声电传感器结构示意图及单发多收工作模式示意图。

图中：1.外筒；2.内筒；3.顶盖；4.滤网；5.声学传感器；6.电学传感器；7.温度传感器；8.压力传感器 I；9.气体导管 I；10.液体导管；11.流量控制阀；12.压力传感器 III；13.截止阀；14.三通；15.过滤阀；16.压力传感器 II；17.气体导管 II。

## 具体实施方式

### 1. 本申请的测试系统

多孔介质中气水合物模拟实验测试系统主要用于对含天然气水合物多孔介质体系进行声学参数、电学参数以及温度和压力的实时测量，该系统主要包括四部分：反应釜、传感系统（声学传感器、电学传感器、温度传感器和压力传感器）、硬件接口设备、软件系统（测控软件和监控计算机）。硬件接口设备与软件系统采用虚拟仪器的架构，即以计算机为核心、配以软件化和模块化的仪器。

#### (1) 反应釜

反应釜为天然气水合物的生成和分解提供场所，同时为传感器的安装提供支撑。本申请所提供的反应釜采用同轴双圆筒型结构。

反应釜可分为五部分：外筒、可拆卸内筒、可拆卸顶盖、可拆卸滤网和其他用于密封和连接等的附件。作为一种实施方式，外筒还包括筒底和可拆卸的衬里，外筒的底部（筒底）可以无衬里。

反应釜的外筒采用耐腐蚀和耐高压的金属材料，可采用不锈钢或者高强度铝合金；外筒的衬里采用绝缘材料，如聚四氟乙烯；内筒可采用金属材料，如不锈钢或者高强度铝合金，或者采用绝缘材料，如聚四氟乙烯等。

内筒为可拆卸结构，外筒底部与顶盖加工有对内筒和外筒的相对位置进行定位的凹槽；顶盖和外筒底部均开有若干个孔，作为反应气体和液体，如甲烷气体、蒸馏水、盐水等，进入和排出的通道、信号线的引出通道，或者用于安装声学、电学、温度、压力等传感器。

滤网对进入反应釜气体和液体起到均匀分配的作用，以使得进入反应釜的气体 and 液体在整个反应空间分布均匀。

## （2）传感系统及其布置

传感系统主要包括声学传感器、电学传感器、温度传感器和压力传感器。

声学传感器可采用超声换能器，分别用于发射和接收超声波信号。根据所测量声学参数以及参数测量方法的不同，声学传感器的类型、结构以及阵列式排布方式不同。

电学传感器可采用金属片制作的点电极或矩形电极或环形电极，电极材料可选用导电性良好的铜或者铂或者钛合金，电学传感器的结构以及阵列式排布方式取决于所测量的电学参数以及所采用的测试方法。

温度传感器可采用热电阻、热电偶以及半导体热敏电阻，用于测量反应釜内各个位置处的温度。为了保证温度测量的准确性，应尽可能地减小传感器的体积、减小热惯性、提高响应速度，可采用铠装热电阻或热电偶。

传感器的布置方案可采用以下方式：

为说明方向位置，本申请以反应釜体为参照对象，沿着图 2 所示反应釜体的上下方向为轴向，与轴向垂直的方向为径向，径向所在的平面为径向平面；该参照位置仅用于说明相对的空间结构，并不用于本申请保护范围的限制。

在反应釜外筒和内筒的侧面安装声学传感器和电学传感器，轴向上设置 1 层传感器。所述传感器位于同一径向平面，亦可称为横截面或水平面；传感器的排布方式为，内筒和外筒上相对的两个传感器为同种类型，如同为电学传感器的电极或者同为声学传感器的超声换能器，称为传感器对，本申请中提到的传感器对也多指这种情况；作为一种实施方式，传感器

对在圆周方向均匀排列（任两个相邻传感器对之间的圆心角相同），两个相邻传感器对之间的夹角（圆心角）可设置为 45 度，如图 13 所示。

每一个传感器对最佳设置位置为两个同种类型的传感器分别设置在位于同一径向平面且同一直径延长线的内筒和外筒上。

显然地，任一传感器安装在外筒的内侧或内筒的外侧，以确保其能测量位于多孔介质中的气水合物的参数。

所述超声换能器可以分别是发射型、接收型也可以是收发两用型；所述超声换能器工作方式可以单发单收、也可以单发多收；可以为内筒传感器发射、外筒传感器接收，也可以外筒传感器发射、内筒传感器接收。

温度传感器，如热电阻，从筒底插入，温度传感器的感温部分和上述声学传感器、电学传感器位于同一径向平面，并且位于相邻两个传感器对各自所在的直径之间，且不影响电学传感器对和声学传感器对之间的信号传输，介于此，温度传感器并不能位于形成传感器对的两个电学传感器或者两个声学传感器之间。

作为一种实施方式，反应釜轴向方向上可安排 1 层或者多层声学传感器对和电学传感器对，根据实际反应釜的尺寸以及测量要求确定；

每一个径向平面上的声学 and 电学传感器对可分别为 1 对或者多对，如 2 对、4 对、8 对、16 对等，根据实际反应釜的尺寸以及测量要求确定。

声学传感器与电学传感器可以分别为独立的传感器，也可以为一体化传感器；

当声学传感器和电学传感器分别为独立的传感器时，在同一径向平面上，声学传感器对和电学传感器对可安排在不同的角度上；作为一种实施方式，声学传感器对和电学传感器对在圆周上交叉排列。

当声学传感器与电学传感器为一体化传感器时，正对的两个一体化传感器组成一体化传感器对，在同一径向平面上，所述一体化传感器对安排在同一角度上的内筒和外筒上；即一体化传感器对在内筒和外筒的设置点位于同一径向平面，且位于同一直径的延长线上。

当声学传感器与电学传感器为一体化传感器（可称为声电传感器）时，作为一种实施方式，声学传感器为圆柱形，电学传感器为环形，环形的中空部分设置圆柱形声学传感器，如图 15 所示；作为另一种实施方式，声学传感器采用圆柱形，电学传感器采用矩形，矩形的中心开出面积与声学传感器横截面面积相同的孔；当电学传感器采用矩形时，沿轴向为长边，沿长边方向可以安装一个或者多个声学传感器，可以实现单发单收或者单发多收的工作模式；

如图 16 所示, 1 个电学传感器和 1 个声学传感器组成一体化传感器; 如图 17 所示, 1 个电学传感器与 3 个声学传感器组成一体化传感器。

作为一种实施方式, 内筒可以直接取出而不使用, 反应釜内气水合物的生成分解空间为圆柱形空间(使用内筒时, 反应釜内气水合物的生成分解空间为环形), 此时外筒上相对的传感器组成相应的传感器对, 即组成声学传感器对或电学传感器对, 外筒的声学传感器可采用收发两用型。

传感器的数量、内筒是否使用、传感器的成对方式取决于所需测量的参数以及参数测量方法的原理; 传感器越多则获取的信息越多, 对信息与信号处理的要求越高; 传感器越多, 则需要高压反应釜壁上开孔越多, 开孔多则降低了反应釜壁强度、增加了密封的难度; 因此, 在综合考虑以上因素的基础上对内筒是否使用、传感器数量以及成对方式等进行确定。

### (3) 硬件接口设备

硬件接口设备主要用于产生传感器所需的激励信号和采集传感器的输出信号, 硬件接口设备的选择需充分考虑传感器的类型与数量、激励信号的形式、强度(幅值或功率)、设备的稳定性与可扩展性, 并根据需要自行开发必要的接口电路模块(驱动电路模块)。

所述传感器主要指声学传感器和电学传感器, 因为二者需要激励信号, 如声学传感器激励信号可为超声激励信号。

硬件接口设备主要分为两部分: 声学测试接口设备和电学测试接口设备。

如图 3 所示, 声学测试接口设备主要包括: 信号发生模块、功率放大模块、高速数据采集模块和多路切换模块; 其中功率放大模块依据激励信号实际强度和声学传感器所需的信号强度是否匹配来选择是否使用。具体地, 所述信号发生模块可选择波形发生器, 所述功率放大模块可选择超声激励信号功率放大器, 所述高速数据采集模块为声信号数据采集模块, 所述多路切换模块包括多路切换模块 I 和多路切换模块 II。

如图 4 所示, 电学测试接口设备主要包括: 信号发生模块、接口电路模块、高速数据采集模块和多路切换模块。具体地, 所述信号发生模块可选择波形发生器, 所述接口电路模块可选择阻抗测量电路, 所述高速数据采集模块为电信号数据采集模块, 所述多路切换模块包括多路切换模块 I 和多路切换模块 II。

对于声学测试接口设备和电学测试接口设备, 二者的信号发生模块均用于产生激励信号, 激励信号用于驱动声学传感器或电学传感器, 主要的信号波形为不同频率的正弦波、方波、脉冲信号以及各种灵活定制的编码激励信号等。二者的信号发生模块可以采用同一波形发生

器也可以采用不同的波形发生器；具体选择时根据所采用波形发生器的输出信号的波形、幅值、频率和功率等参数决定。

对于声学测试接口设备和电学测试接口设备，二者的高速数据采集模块统称为声电信号数据采集模块，可以分别为独立的声信号数据采集模块和电信号数据采集模块，也可以为一体化的声电信号数据采集模块；具体选择时根据数据采集模块的输入端口的数量决定，电信号的采集需要至少 2 个输入端口，声信号采集需要至少 1 个端口。

对于声学测试接口设备和电学测试接口设备，二者的多路切换模块可采用相同的多路切换模块，也可采用不同的多路切换模块；具体选择时根据多路切换模块的通道数、能够承载的最大电压、能够承载的最大电流、带宽等参数决定；电信号对带宽要求较高，至少 100MHz，声信号要求能承载的电压至少 500V，能承载的电流至少 0.5A；通道数是两者共同的要求，与传感器对的数量一致，即至少相等，但通常大于传感器对的数量，以保证扩展性或者损坏了 1 个通道后及时调整。

多路切换模块能够保证每次测量时只有一对传感器工作，即处于工作状态的只能是声学传感器对，或者只能是电学传感器对；如此设置可以有效地消除传感器对之间的干扰。此外，多路切换模块的使用使得信号发生模块和高速数据采集模块可以在多传感器对之间复用，大大降低了硬件成本。

硬件接口设备还包括温度采集模块和压力采集模块，二者分别采集温度传感器和压力传感器的信号。

#### (4) 软件系统（测控软件和监控计算机）

所述软件系统即前文中所述的数据处理系统，用于接收并处理各数据采集模块发送的数据，所述各数据采集模块主要指声电信号数据采集模块、温度采集模块和压力采集模块。所述软件系统（数据处理系统）主要包括测控软件和监控计算机；其中，

所述测控软件主要用于完成以下功能：控制产生各种激励信号、控制硬件接口设备、获取采集数据、对数据进行预处理、显示和保存，如图 10 所示。测控软件可以基于图形化编程软件平台 LabVIEW 进行开发，也可以应用 VC 或 VB 或者与 Matlab 进行混合编程实现。

测控软件对硬件接口设备的控制主要为对多路切换模块、高速数据采集模块和信号发生模块的控制，通过对多路切换模块进行控制可实现对传感器阵列的依次激励与数据采集。对高速数据采集模块的控制主要包括通道选择、采集频率、程控放大器增益(放大倍数)、缓存等的配置。

数据在显示和保存之前均进行一定的处理，如数字滤波、参数计算等；数据显示主要包括：激励信号（时域和频域波形及数值）、声波测量信号（时域和频域波形及数值）、声波幅值衰减、声波传播速度、阻抗值（幅值、相角、实部、虚部）、阻抗图（Nyquist 图、波特图等）；数据保存为文本文件或者二进制文件，以供后期对数据进行更加深入的分析。进一步数据分析的算法将在测试方法部分具体说明，算法的具体实现由功能强大的科学计算软件 Matlab 来实现，也可采用 C 或 C++ 语言编程实现。

所述监控计算机可采用工控机、普通台式机（个人 PC）、笔记本电脑（便携式计算机）或者嵌入式计算机等。

## 2. 本申请的测试方法

针对以上所述的系统，提出了一种多孔介质中气水合物模拟实验测试方法，为声电联合测试方法，其中包括两部分，即实验与测量数据获取的步骤、测量信号分析处理的步骤。所述测试方法主要针对环状空间内的含气水合物多孔介质，但此测试方法同样适用于内筒取出时的情况。

### （1）实验与测量数据获取的步骤：

1) 打开反应釜顶盖，将多孔介质，如石英砂、天然海沙等，填入反应釜内筒和外筒之间的环形空间内，所填入多孔介质的高度超过声学传感器和电学传感器，并保证多孔介质与密封后的顶盖之间预留出一定的储气空间。

2) 从反应釜底部缓慢注入生成气水合物所需的水直到多孔介质水饱和，然后将顶盖盖住反应釜，固定并密封。从反应釜底部缓慢注入甲烷气体，直至到达所设定的压力，如 7-20MPa，优选 10MPa。将反应釜静置至少 24 小时，使甲烷气体充分溶解于水中，并观察是否出现泄漏。

3) 气水合物生成过程：将反应釜置于恒温箱中，开启测控软件与硬件接口设备，进行数据采集和显示，设定恒温箱温度为某一较低温度，如 0-5℃，优选 1℃，开始降温的同时进行数据保存。通过观察温度和压力曲线，判断气水合物生成过程是否已经结束，若结束则停止数据保存（注意：并不停止数据采集与显示）。

4) 气水合物分解过程：以一定温度，如 0.5-2.5℃，优选 0.5℃，为间隔逐步升高恒温箱设定温度，在每一次温度设定之后，等待反应釜内温度和压力稳定后，此时得到的状态点是一个较为稳定的状态点，开启数据保存，待所有的数据保存完成后，停止数据保存，将恒温箱设定温度升高所述温度间隔，等待反应釜内温度和压力稳定后，开启数据保存，待所有的数据保存完成后，停止数据保存。重复以上过程直至气水合物完全分解为止。

需要说明的是，气水合物分解过程主要在 0-10℃ 范围内进行，在超过 10℃ 以后，反应釜内剩余气水合物的量已经很少，因此后续分解的量也很小；但是在实际的操作过程中，一般分解过程温度范围设置为 0℃ 至常温（25℃）；其中，在 0-10℃ 的分解过程中，气水合物分解量较多，含气水合物多孔介质的性质变化较快，因此需要采集的状态点（即上述在每一次温度设定之后，等待反应釜内温度和压力稳定后的状态点）相对密集，选 0.5-2.5℃ 范围内的某个温度，优选 0.5℃，作为温度间隔进行测试和数据采集；在 10℃ 至常温的分解过程中，气水合物分解量较少，含气水合物多孔介质的性质变化较慢因此可选择更大的温度间隔进行测试和数据采集，如 3-7℃，优选 4℃。

实验过程中获取测量数据仅需要对测控软件的面板上的相应按钮进行操作即可，如点击“开始采集”、“开始保存”等，按钮的具体功能由测控软件来实现。

以下针对声学传感器与电学传感器测量数据获取的物理过程进行说明：

对于电学传感器，内筒和外筒的两个电极组成电极对，激励信号可以采用用户设定的具有一定幅值、频率、直流偏置的正弦波（电压信号），典型的幅值为 0.01V-5V，频率为 0.01Hz-100MHz；作为一种实施方式，在上述基础上选择直流偏置为 -5+5V。针对每一个稳定后的状态点进行测试时（以下称被测试的状态点为测试点）均在所述频率范围进行扫频激励，通过接口电路对被测介质进行阻抗测量，软件控制下的数据采集模块对测量信号进行高速高精度采样，从而获得两电极之间被测介质在不同测试频率下的阻抗。如果不采用内筒，外筒上相对的两个电极形成电极对，可采用与上述相同的数据获取方法。

对于声学传感器，内筒和外筒的两个超声换能器组成传感器对，可以采用外筒超声换能器发射、内筒超声换能器接收，也可以内筒超声换能器发射、外筒超声换能器接收。超声激励信号可以采用连续波信号，如正弦波连续信号、也可以采用单脉冲信号，还可采用经过特殊编码的信号，如单频载波脉冲信号、调频脉冲信号、编码脉冲信号、脉冲串信号、相位编码连续波信号等。单脉冲信号具有持续时间短、发射频率高、分辨率高等优点，但是在其峰值已经接近最大允许值的情况下，信号的平均功率仍较低；经过特殊编码的信号，如编码脉冲信号，具有同时保证高平均功率和高发射频率的优点，从而既能够提高信噪比同时也不降低分辨率。需要注意的是，激励信号可以经过功率放大器进行一定的功率放大后再传送到超声发射换能器，但是如果超声换能器内嵌功率放大模块，则外置的功率放大器可省去。对每一个测试点，即被测介质的每一个稳定状态，均进行一定次数，如 1-100 次的超声测试，如发射换能器以一定的间隔，如间隔从 1ms 到 1s 的范围内选取，发射几次编码脉冲信号，接收



换能器接收相应的超声波信号，软件控制下的数据采集模块对发射换能器和接收换能器的输出信号均进行高速高精度采样，从而获得成对的发射波形与接收波形；超声测试的次数和信号发送的时间间隔，均以实际需要测量数据的多少和准确度进行调整，并非为某一特定数据。

需要进一步说明：上述声学传感器与电学传感器的激励信号的波形、幅值、频率等参数均可以通过测控软件进行灵活调整。即，针对于每一个测试点，可以先后采用具有不同波形、幅值、频率的激励信号，以获取更多的测量信息，为后续的信号处理提供大量的基础数据和丰富的信息。

## (2) 测量信号分析处理的步骤

作为一个实施例，测量信号分析处理包括两部分：在线实时预处理与离线处理。在线的处理主要由前述的测控软件实现，离线数据处理的算法可以通过科学计算软件 Matlab 来实现。

5) 气水合物生成/分解过程由温度压力的变化曲线来判定，并根据温度和压力值计算反应体系中气水合物的量，即气水合物的饱和度。气水合物的饱和度由下式进行计算：

$$S_H = \frac{\left( \frac{P_1}{Z_1 T_1} - \frac{P_2}{Z_2 T_2} \right) \times \frac{V_G}{R} \times M_H}{\rho_H \times V_V}$$

式中： $S_H$  为多孔介质中气水合物的饱和度； $M_H$  为气水合物摩尔质量，122.02g/mol； $\rho_H$  为气水合物的密度，0.91g/mL； $V_V$  为多孔介质空隙的体积，L； $V_G$  为反应釜气相体积，L； $T$  为系统温度，K； $P_1$  为系统的初始压力，MPa； $P_2$  为气水合物生成/分解过程中的系统压力，MPa； $R$  为气体常数，8.314J/(mol·K)， $Z_1$  和  $Z_2$  分别为初始状态和生成/分解过程中各状态的气体压缩因子。

由上述计算公式得到的气水合物饱和度以下称为计算得到的气水合物饱和度。显而易见的，式中， $P_1$ 、 $T_1$  和  $Z_1$  所处的测试状态是相同的， $P_2$ 、 $T_2$  和  $Z_2$  所处的测试状态是相同的； $P_1$ 、 $T_1$  和  $Z_1$  为初始状态的参数， $P_2$ 、 $T_2$  和  $Z_2$  为气水合物生成/分解过程中的参数；其中，所述的初始状态指步骤 2) 中“向反应釜注入水和甲烷气体，使甲烷气体充分溶解于水中”时的状态。

## 6) 电学传感器测量信号处理与气水合物饱和度模型（模型 I）建立：

在建模前，先引入与阻抗相关的概念，以便后续使用；阻抗是用来描述在具有电阻、电感和电容的电路里，对电路中的电流所起的阻碍作用，在本申请中，把含气水合物多孔介质

作为“电路”；阻抗值是对所述阻抗进行衡量的值，是一个复数，实部称为电阻，虚部称为电抗；阻抗幅值是对阻抗值取模而得到的数值。

通过电学传感器获得了每一个状态下，上述频率范围内的一系列频率点处的阻抗值。所述的频率点的频率值从小到大变化可以是线性的，也可以是对数的，根据实际测试范围的大小确定，如果频率范围较小，可以选择线性变化，如果频率范围较大，即范围的最大值至少是最小值的 1000 倍，可以选择对数变化。如选择线性变化时，频率点的频率值之间的间隔可以从 1Hz-1kHz 中选取，如选择对数变化时，频率点的频率值可以为 10 的整数指数幂，如频率值为  $10^0\text{Hz}$ 、 $10^1\text{Hz}$ 、 $10^2\text{Hz}$  等。

第一步，对测量到的阻抗值进行预处理，具体可包括滤波、特征频率点选取。其中，滤波可以通过 Matlab 设计数字滤波器，如 Butterworth 滤波器；特征频率点的选取原则为：选取阻抗幅值随气水合物饱和度变化显著的频率点。

第二步，根据复电阻率的定义（与普通电阻率计算方法类似）结合反应釜的结构尺寸计算特征频率点处的复电阻率。

第三步，分别计算阻抗的频散度和复电阻率的频散度，频散度可以采用以下四种形式的参数（称为频散度参数）： $(\text{高频率点处阻抗(或复电阻率)值}-\text{低频率点处阻抗(或复电阻率)值})/\text{高频率点处阻抗(或复电阻率)值}$ 、 $(\text{高频率点处阻抗(或复电阻率)值}-\text{低频率点处阻抗(或复电阻率)值})/\text{低频率点处阻抗(或复电阻率)值}$ 、 $\text{高频率点处阻抗(或复电阻率)值}/\text{低频率点处阻抗(或复电阻率)值}$ 、 $\text{低频率点处阻抗(或复电阻率)值}/\text{高频率点处阻抗(或复电阻率)值}$ 。

第四步，利用以上得到的频散度参数分别与计算得到的气水合物饱和度进行多项式拟合（单输入单输出），从而分别获得基于特征频率点阻抗频散度的气水合物饱和度模型和基于特征频率点复电阻率频散度的气水合物饱和度模型；第三步中仅利用了 2 个相对高低的频率点的阻抗数据，预处理过程中实际选定了一系列的特征频率点，利用预处理过程选定的所有特征频率点的阻抗值和根据阻抗值计算得到的复电阻率值作为多维非线性映射（多输入）的输入，计算所得到的气水合物饱和度作为多维非线性映射的输出（单输出），通过相应的学习算法最终获得气水合物饱和度的电学特性融合模型，所述学习算法可采用机器学习算法。需要注意的是，阻抗值和复电阻率值不是直接作为非线性映射的输入，而是需要通过一个“特征提取”环节获得一个特征向量，“特征提取”环节可以采用主成分分析法来实现，所获得的特征向量作为非线性映射的输入，此非线性映射可采用人工神经网络、支持向量机等机器学习模型，根据机器学习模型的不同，选用相应的学习算法，如针对神经网络的 BP 学习算法等。

通过以上步骤，即可实现对电学测量数据（信号）的分析和处理，以此来获得气水合物饱和度与电学参数之间的定量关系，进而分析气水合物生成/分解的动力学过程，同时可以构建出三个气水合物饱和度计算模型，即基于特征频率点阻抗频散度的气水合物饱和度模型（图 6 中的阻抗频散-饱和度模型）、基于特征频率点复电阻率频散度的气水合物饱和度模型（图 6 中的复电阻率频散-饱和度模型），以及电学特性融合模型（如图 6 所示），这三个模型叫做电学模型，即模型 I；所述模型进而在后续的实验过程中利用电学测试数据即可计算出气水合物的饱和度，为电法测井解释模型的建立提供基础。

#### 7) 声学传感器测量信号处理与气水合物饱和度模型（模型 II）建立：

通过声学传感器获得了每一个状态下、一系列编码激励信号条件下超声换能器发射的声波波形和接收到的声波波形数据。

第一步，对获取到的声波波形进行预处理，具体包括滤波、声波速度计算、声波幅值获取、声波频率获取。可以通过 Matlab 设计数字滤波器，如 Butterworth 滤波器；声波速度计算包括纵波速度、横波速度计算，通过辨识出波形中的纵波和横波的首波波至时间，结合反应釜的尺寸进行计算；声波幅值以波形中相应纵波和横波的最大幅值为准；声波频率指声波的主频，通过一定的信号处理方法来获得，如利用快速傅里叶变换后得到的频谱、利用短时傅里叶变换、Gabor 变换或小波变换等得到的时频谱，其最大频谱幅值对应的频率点即为主频。

第二步，根据第一步的计算结果分别获取不同状态下（不同的气水合物饱和度条件下）声波的特性参数，具体为：(不同饱和度下声波速度-气水合物饱和度为零时的声波速度)/气水合物饱和度为零时的声波速度、(不同饱和度下声波幅值-气水合物饱和度为零时的声波幅值)/气水合物饱和度为零时的声波幅值、(不同饱和度下声波主频-气水合物饱和度为零时的声波主频)/气水合物饱和度为零时的声波主频。

第三步，利用以上得到的声波特性参数分别与计算得到的气水合物饱和度进行多项式拟合（单输入单输出），从而分别获得基于声波速度的气水合物饱和度模型、基于声波幅度的气水合物饱和度模型和基于声波频率的气水合物饱和度模型；利用以上三类声波特性参数作为多维非线性映射（多输入）的输入，计算所得到的气水合物饱和度作为多维非线性映射的输出（单输出），通过相应的学习算法最终获得气水合物饱和度的声学特性融合模型，所述学习算法可采用机器学习算法。需要注意的是，三类声波特性参数不是直接作为非线性映射的输入，而是首先通过一个“特征提取”环节获得一个特征向量，“特征提取”环节可以采用主成

分分析法来实现，所获得的特征向量作为非线性映射的输入，此非线性映射可采用人工神经网络、支持向量机等机器学习模型，根据机器学习模型的不同，选用相应的学习算法，如针对神经网络的BP学习算法等。

通过以上步骤，即可实现对声学测量数据的分析和处理，以此来探索气水合物饱和度与声学参数之间定量关系，进而分析气水合物生成/分解的动力学过程，同时可以构建出四个气水合物饱和度计算模型，即基于声波速度的气水合物饱和度模型(图7中的声速-饱和度模型)、基于声波幅度的气水合物饱和度模型(图7中的声幅-饱和度模型)、基于声波频率的气水合物饱和度模型(图7中的声频率-饱和度模型)，以及声学特性融合模型(如图7所示)，这四个模型叫做声学模型，即模型II；所述模型进而在后续的实验过程中利用声学测试数据即可计算出气水合物的饱和度，为声波测井解释模型的建立提供基础。

#### 8) 基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型(模型III)建立与应用:

基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型，即声电特性融合模型，的建立以上述分别针对声学和电学测量信号建立的气水合物饱和度模型，以下称作声学子模型(模型II)与电学子模型(模型I)，为基础，利用数据融合算法将以上各模型的输出进行联合(融合)处理，获取模型最终的气水合物饱和度输出值。

当建立基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型时，将声学子模型与电学子模型的气水合物饱和度输出作为数据融合算法的输入(多输入)，将计算所得到的气水合物饱和度作为输出(单输出)，融合算法可采用随机类算法，如加权平均、卡尔曼滤波、多贝叶斯估计、D-S证据推理、Bayes统计等，也可采用人工智能类算法，如模糊逻辑、神经网络、粗集理论、专家系统等。利用计算所得到的气水合物饱和度对数据融合算法进行训练和参数校正，即可获得基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型，即模型III(如图8所示)。

当应用基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型时，把电学传感器和声学传感器的测量信号按照上述的方法进行分析处理以后，最终可由声电特性融合模型输出气水合物饱和度的值。具体地，使用电学传感器对，通过接口电路模块对被测介质进行阻抗测量，根据步骤6)所得模型I反推得到气水合物饱和度值I；使用声学传感器对，以脉冲信号为激励信号对被测介质进行测量，根据步骤7)所得的模型II反推得到气水合物饱和度值II；上述的各气水合物饱和度值(I、II)经过融合算法得出的值，根据步骤8)所得的模型III反推得到最终的气水合物饱和度值III。

以下结合附图和实施例对本申请进行更加详实的阐述。本申请中，附图和实施例仅仅是

对实施方式进行了描述，并非对本申请的范围进行限定，在不脱离本申请设计精神的前提下，本领域普通技术人员对本申请的技术方案作出的各种变形和改进，均应落入本申请权利要求书确定的保护范围内。在实施例中，各设备或模块如果涉及到型号等事宜，均应理解为用于解释本实施例但不仅限于使用该设备或模块，只要是能实现与上述设备或模块同样功能的其他设备或模块均是采用的。

#### 实施例 1:

如图 1 和图 2 所示，本发明的多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，主要包括反应釜、传感系统、硬件接口设备和数据处理系统，反应釜用以盛装被测介质，传感系统安装在反应釜内，传感系统通过硬件接口设备接入数据处理系统；

传感系统主要由声学传感器 5、电学传感器 6、温度传感器 7 和压力传感器（8、12、16）组成，

硬件接口设备包括：

波形发生器，用以产生传感系统所需的激励信号，作为传感系统的输入；本实施例使用 PXI-波形发生器；

声电信号数据采集模块、阻抗测量电路和超声激励信号功率放大器，本实施例中声电信号数据采集模块采用 PXI-数字化仪；其中，来自 PXI-波形发生器的超声激励信号经超声激励信号功率放大器放大后作为发射端声学传感器的输入，接收端声学传感器的输出由声电信号数据采集模块采集，声电信号数据采集模块经阻抗测量电路采集电学传感器的信号输出，所述阻抗测量电路为如图 4 中所示的接口电路模块和图 5 中所示的虚线框内的部分；

温度采集模块和压力采集模块分别采集温度传感器和压力传感器的信号；本实施例中，温度采集模块采用 PXI-数据采集卡 I，压力采集模块采用 PXI-数据采集卡 II；

多路切换模块 I 用以切换波形发生器与传感系统的连通，本实施例中采用 PXI-多路复用器；

多路切换模块 II 用以切换各采集模块和相应传感系统的连通；本实施例中多路切换模块 I 和多路切换模块 II 共用同一 PXI-多路复用器；

数据处理系统接收并处理各数据采集模块发送的数据，本实施例中采用监控计算机与测控软件实现该功能。

反应釜包括为可拆卸结构的外筒 1、内筒 2、顶盖 3 和滤网 4，还包括其他用于密封和连接等的附件。外筒 1 包括筒壁和可拆卸的衬里，其底部无衬里。

反应釜的外筒 1 采用高强度铝合金制作，外筒 1 的衬里采用聚四氟乙烯材料；内筒 2 采用聚四氟乙烯材料。反应釜耐压设计为 20MPa。

内筒 2 为可拆卸结构，外筒 1 底部与顶盖 3 加工有对内筒 2 和外筒 1 的相对位置进行定位的凹槽（图中未示出）；顶盖 3 和外筒 1 底部均开有一定数量的孔，作为反应气体和液体进入和排出的通道、信号线的引出通道，或者用于安装声学、电学、温度、压力等传感器。

反应釜结构如图 2 所示，反应釜为同轴双筒结构，内筒 2 同轴置于外筒 1 内，外筒 1 上端设置顶盖 3 用于密封，反应釜内底部安装滤网 4，同一径向平面上反应釜内筒 2 和外筒 1 上经内筒和外筒同一直径延长线上对应设置若干个孔，孔内对应安装声学传感器 5 和电学传感器 6，反应釜底部设置若干个孔，孔内安装温度传感器 7，反应釜顶盖 3 开两个孔，分别安装气体导管 II 17 和引出传感器的连接导线，气体导管 II 17 上安装流量控制阀 11 和压力传感器 II 16，气体导管 II 17 用以排出气体。

反应釜底部开 10 个孔，其中 8 个用于安装温度传感器，本实施例选择铠装热电阻，Pt100，1 个用于安装气体导管 I 9，1 个用于安装液体导管 10，气体导管 I 9 和液体导管 10 上均分别安装流量控制阀 11、压力传感器 I 8 或压力传感器 III 12。反应釜底部安装一层 500 目陶瓷或不锈钢材料滤网 4。

如图 13，反应釜安装一层声学传感器 5 和电学传感器 6，反应釜内筒 2 和外筒 1 的侧面各开 8 个孔，分别用于安装传感器，同一径向平面且同一直径延长线上的内筒 2 和外筒 1 上设置用以发射和接收的成对的声学传感器 5 或用以发射和接收的成对的电学传感器 6。

滤网 4 对进入反应釜气体和液体起到均匀分配的作用，以使得进入反应釜的气体 and 液体在整个反应空间分布均匀。

温度传感器的感温部分与声电传感器阵列位于同一径向平面（图 2 中未示出温度传感器的感温部分）。

硬件接口设备与其他部件的连接关系如图 1。在本实施例中，硬件接口设备主要采用基于 PXI 总线的模块化仪器。硬件接口设备主要由 PXI-机箱、PXI-远程控制器、PXI-波形发生器、PXI-多路复用器（多路切换模块、多路转换开关）、PXI-数字化仪、PXI-数据采集卡 I、PXI-数据采集卡 II 和接口电路及电源等附件组成。

上述 PXI 模块化仪器（板卡）均插入 PXI-机箱卡槽内，可大大缩小硬件设备的体积，同时又保持了系统的高性能。PXI-远程控制器与远程监控计算机相连接，可最大在 7m 远处实现对机箱内各个模块的控制。本实施例中数据处理系统经 PXI-远程控制器接收并处理各数据

采集模块发送的数据，还控制 PXI-机箱内所有模块化仪器正常工作。监控计算机选用性能优良、稳定性高的工控机。

PXI 模块化仪器中，PXI-波形发生器可以为任意波形发生器，具有 16 位分辨率，1GS/s 的最大采样率，带有 1G-8G 的板载内存，最大振幅为 20V（输出范围-10V-10V），用来产生声学传感器和电学传感器的激励信号，其中，PXI-波形发生器可以根据实际需要编程实现定制的编码激励信号。

PXI-数字化仪可以作为声电信号数据采集模块，具有 500MS/s 的实时采样率，4 路同步采样的 16 位分辨率通道，带有去噪和抗混叠滤波器的 500MHz 带宽，该数字化仪实现对被测介质的阻抗测量信号以及超声信号进行高速高精度 A/D 转换和采样。

多路切换模块可以使用 PXI-多路复用器，该多路复用器可供 32 路转换，可通过测控软件进行灵活配置。

温度采集模块可选用 PXI-数据采集卡 I，该采集卡专用于 Pt100 热电阻温度测量，有 30 路采集通道，在高速模式下提供最高每通道 200S/s 的采样率，在高分辨率模式下提供最高每通道 2S/s 的采样率和 0.06℃ 的典型测量精度。

PXI-数据采集卡 II 为高压模拟输入模块（即前述的压力采集模块），为高电压测量提供集成化数据采集和信号调理，用来实现对压力的测量。

图 5 所示为波形信号发生器与电学传感器（电极）之间的接口电路，激励信号同时施加于标准电阻和被测对象（两电极之间的多孔介质），接口电路对激励信号进行调理以后，进而由 PXI-数字化仪对调理后的信号进行高速同步数据采集。

#### 实施例 2

与实施例 1 不同的是，本实施例中，声学传感器和电学传感器采用一体化声电传感器，如图 14 所示，声学传感器和电学传感器为一体化的声电传感器，同一直径延长线上的内筒和外筒上设置用以发射和接收的声电传感器。

一体化声电传感器的声学传感器采用圆柱形，电学传感器采用环形，声学传感器的一端置于电学传感器的环内，如图 15。

#### 实施例 3

与实施例 1 和 2 不同的是，本实施例中，声学传感器和电学传感器采用一体化声电传感器，如图 16，一体化声电传感器的声学传感器采用圆柱形，电学传感器采用矩形，矩形中心具有圆孔，声学传感器的一端置于电学传感器的圆孔内。

#### 实施例 4

与实施例 1-3 不同的是,本实施例中,声学传感器和电学传感器采用一体化声电传感器,一体化声电传感器的声学传感器采用圆柱形,电学传感器采用矩形,矩形上沿反应釜轴向设置若干个圆孔,声学传感器的一端置于电学传感器的圆孔内,如图 17 所示。

#### 实施例 5

测试方法的实施,其实验操作过程为:

打开反应釜顶盖 3,将天然海沙填入反应釜内筒 2 和外筒 1 之间的环形空间内,海沙的高度超过声电传感器阵列所在径向平面 5cm,海沙表面与顶盖 3 之间预留出高度为 5cm 的储气空间。

液体导管 10 上安装三通 14,三通一端通过流量控制阀 11 和截止阀 13 通入液体,另一端接压力传感器 III12,打开底部液体导管 10 的截止阀 13,通过流量控制阀 11 从反应釜底部的液体导管 10 缓慢注入质量分数为 3.5% 的盐水直到海沙水饱和,然后用顶盖 3 盖住反应釜,固定并密封,关闭截止阀 13。气体导管 I 9 经三通 14 和过滤阀 15 接入反应釜底部开孔,三通 14 的一端通过流量控制阀 11、截止阀 13 接高压气瓶,另一端接压力传感器 I 8;从反应釜底部的气体导管 I 9 缓慢注入甲烷气体,通过流量控制阀 11 直至到达所设定的压力 10MPa。将反应釜静置 24 小时,使甲烷气体充分溶解于水中,并观察是否出现泄漏。

将反应釜置于恒温箱中,开启测控软件与硬件接口设备,进行数据采集和显示,设定恒温箱温度为 1℃,开始降温的同时进行数据保存。通过观察温度和压力曲线,判断气水合物生成过程是否已经结束,若结束则停止数据保存(注意:并不停止数据采集与显示)。

以 0.5℃ 为间隔逐步升高恒温箱设定温度,在每一次温度设定之后,等待反应釜内温度和压力稳定后,开启数据保存,待所有的数据保存完成后,停止数据保存,将恒温箱设定温度升高 0.5℃,等待反应釜内温度和压力稳定后,开启数据保存,待所有的数据保存完成后,停止数据保存。重复以上过程直至气水合物完全分解为止。图 11 所示为升温时气水合物分解过程中温度压力曲线,其中的数据点为实际采集阻抗的测试点。

需要说明两点:

对于电学传感器,内筒和外筒的两个电极组成电极对,激励信号采用用户设定的具有一定幅值、频率、直流偏置的正弦波(电压信号),在此实施例中,幅值为 5V,频率范围为 100Hz-10MHz,直流偏置为 0V,对每个测试点实施 10 个周期的正弦波激励,在以上测试频率范围内以 100Hz 为间隔进行扫频测试,即将 100Hz、200Hz、300Hz 等等直到 10MHz 作为



测试频率点。

对于声学传感器，内筒和外筒的两个超声换能器组成单发单收的传感器对，在此实施例中，采用外筒超声换能器发射、内筒超声换能器接收，超声激励信号采用线性调频信号，调频信号的中心频率与发射换能器的中心频率一致，均为 500kHz，调频信号带宽 200kHz，时宽 0.2ms。对每一个测试点均进行 10 次的超声测试，相邻两次测试时间间隔 0.1s。

离线数据处理过程为：

离线数据处理的算法通过科学计算软件 Matlab 来实现。

气水合物生成/分解过程由温度压力的变化曲线来判定，并根据温度和压力值计算反应体系中气水合物的量。气水合物的饱和度由下式进行计算：

$$S_H = \frac{\left( \frac{P_1}{Z_1 T_1} - \frac{P_2}{Z_2 T_2} \right) \times \frac{V_G}{R} \times M_H}{\rho_H \times V_V}$$

式中： $S_H$  为多孔介质中气水合物的饱和度； $M_H$  为气水合物摩尔质量，122.02g/mol； $\rho_H$  为气水合物的密度，0.91g/mL； $V_V$  为多孔介质空隙的体积，L； $V_G$  为反应釜气相体积，L； $T$  为系统温度，K； $P_1$  为系统的初始压力，MPa； $P_2$  为气水合物生成/分解过程中的系统压力，MPa； $R$  为气体常数，8.314J/(mol·K)， $Z_1$  和  $Z_2$  分别为初始状态和生成/分解过程中各状态的气体压缩因子。

图 12 所示为升温时气水合物分解过程中各测试点的气水合物饱和度、反应釜内气体摩尔数、实测压力和温度的变化情况。

如图 6，电学传感器测量信号处理与气水合物饱和度模型建立

第一步，对测量到的阻抗值进行预处理，具体包括滤波、特征频率选取。滤波通过 Matlab 设计数字滤波器；特征频率点的选取原则为：选取阻抗幅值随饱和度变化显著的频率点，本实施例选取 200Hz、2kHz、20kHz、200kHz、2MHz。

第二步，根据复电阻率的定义结合反应釜的结构尺寸计算所选定频率点处的复电阻率。计算时被测介质为以电极面积为横截面积、电极间距离为高的圆柱体空间内的介质部分。

第三步，分别计算阻抗和复电阻率的频散度，频散度可以采用以下四种形式的参数：(高频点处阻抗(或复电阻率)值-低频点处阻抗(或复电阻率)值)/高频点处阻抗(或复电阻率)值、(高频点处阻抗(或复电阻率)值-低频点处阻抗(或复电阻率)值)/低频点处阻抗(或复

电阻率)值、高频率点处阻抗(或复电阻率)值/低频率点处阻抗(或复电阻率)值、低频率点处阻抗(或复电阻率)值/高频率点处阻抗(或复电阻率)值。

第四步,利用以上得到的频散度参数分别与计算得到的气水合物饱和度进行多项式拟合(单输入单输出),从而分别获得基于特征频率点阻抗频散度的气水合物饱和度模型和基于特征频率点复电阻率频散度的气水合物饱和度模型;利用预处理过程选定的所有特征频率点的阻抗值和根据阻抗值计算得到的复电阻率值作为多维非线性映射的输入,本实施例中采用三层BP神经网络,计算所得到的气水合物饱和度作为三层BP神经网络的目标输出,利用经典的BP算法进行学习,最终获得气水合物饱和度的电学特性融合模型。特征提取环节采用主成分分析法来实现。

如图7,声学传感器测量信号处理与气水合物饱和度模型建立

第一步,对测量到的声波波形进行预处理,具体包括滤波、声波速度计算、声波幅值获取、声波频率获取。通过Matlab设计数字滤波器;声波速度计算包括纵波速度、横波速度计算,通过辨识出波形中的纵波和横波的首波波至时间,结合反应釜的尺寸进行计算;声波幅值以波形中相应纵波和横波的最大幅值为准;声波频率指声波的主频,通过一定的信号处理方法来获得,如利用快速傅里叶变换后得到的频谱,其最大频谱幅值对应的频率点即为主频。

第二步,根据第一步的计算结果分别获取不同状态下声波的特性参数,具体为:(不同饱和度下声波速度-气水合物饱和度为零时的声波速度)/气水合物饱和度为零时的声波速度、(不同饱和度下声波幅值-气水合物饱和度为零时的声波幅值)/气水合物饱和度为零时的声波幅值、(不同饱和度下声波主频-气水合物饱和度为零时的声波主频)/气水合物饱和度为零时的声波主频。

第三步,利用以上得到的声波特性参数分别与计算得到的气水合物饱和度进行多项式拟合(单输入单输出),从而分别获得基于声波速度的气水合物饱和度模型、基于声波幅度的气水合物饱和度模型和基于声波频率的饱和度模型;利用以上三类声波特性参数作为多维非线性映射的输入,本实施例中采用三层BP神经网络,计算所得到的气水合物饱和度作为三层BP神经网络的目标输出,利用经典的BP算法进行学习,最终获得气水合物饱和度的声学特性融合模型,特征提取环节采用主成分分析法来实现。

如图8,基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型建立与应用

基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型,即声电特性融合模型或模型III,的建立以以上分别针对声学 and 电学测量信号建立的气水合物饱和度模型,以下称作声学子模型

与电学子模型，为基础，利用数据融合算法将以上各模型的输出进行联合处理，获取模型最终的气水合物饱和度输出值。

当建立基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型时，将声学子模型与电学子模型的气水合物饱和度输出作为数据融合算法的输入，将计算所得到的气水合物饱和度作为输出，融合算法采用 D-S 证据推理。利用计算所得到的气水合物饱和度对数据融合算法进行训练和参数校正，即可获得基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型，即模型 III。

如图 9，当应用基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型时，把电学传感器和声学传感器的测量信号按照上述的方法进行分析处理以后，最终可由声电特性融合模型输出气水合物饱和度的值。

## 权利要求书

1.一种多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，主要包括反应釜、传感系统、硬件接口设备和数据处理系统，反应釜用以盛装被测介质，传感系统安装在反应釜内，传感系统通过硬件接口设备接入数据处理系统；其特征在于：

传感系统主要由声学传感器、电学传感器、温度传感器和压力传感器组成，

硬件接口设备包括：

(1) 波形发生器，用以产生传感系统所需的激励信号，作为传感系统的输入；

(2) 声电信号数据采集模块、阻抗测量电路和超声激励信号功率放大器，其中，超声激励信号经超声激励信号功率放大器放大后作为声学传感器的输入，声学传感器的输出由声电信号数据采集模块采集，声电信号数据采集模块经阻抗测量电路采集电学传感器的信号输出；

(3) 温度采集模块和压力采集模块，二者分别采集温度传感器和压力传感器的信号；

(4) 多路切换模块 I，用以切换波形发生器与传感系统的连通；

(5) 多路切换模块 II，用以切换各采集模块和相应传感系统的连通；

数据处理系统接收并处理各数据采集模块发送的数据。

2.根据权利要求 1 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，其特征在于：所述反应釜为同轴双筒结构，内筒同轴置于外筒内，外筒上端设置顶盖用于密封，反应釜底部安装滤网，同一径向平面上反应釜内筒和外筒经内、外筒同一直径上对应设置若干个孔，孔内对应安装声学传感器和电学传感器，反应釜底部设置若干孔，孔内安装温度传感器，反应釜顶盖开两个孔，分别安装气体导管 II 和引出传感器的连接导线，气体导管 II 上安装阀门和压力传感器 II，反应釜底部开两个孔，分别连接气体导管 I 和液体导管。

3.根据权利要求 2 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，其特征在于：同一直径上的内筒和外筒上设置用以发射和接收的成对的声学传感器或成对电学传感器。

4.根据权利要求 2 或 3 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，其特征在于：声学传感器和电学传感器为一体化的声电传感器，同一直径上的内筒和外筒上设置用以发射和接收的声电传感器。

5.根据权利要求 1 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，其特征在于：数据处理系统经远程控制器接收并处理各数据采集模块发送的数据。

6.根据权利要求 4 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，其特征在于：一体化声电传感器的声学传感器采用圆柱形，电学传感器采用环形，声学传感器的一端置于电学传

传感器的环内。

7.根据权利要求 4 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，其特征在于：一体化声电传感器的声学传感器采用圆柱形，电学传感器采用矩形，矩形中心具有圆孔，声学传感器的一端置于电学传感器的圆孔内。

8.根据权利要求 7 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试系统，其特征在于：矩形上沿反应釜轴向设置若干个圆孔，声学传感器的一端置于电学传感器的圆孔内。

9.一种多孔介质中气水合物模拟实验测试方法，其特征在于：主要包括两部分：（1）实验与测量数据获取的步骤以及（2）测量信号分析处理的步骤；其中，

（1）实验与测量数据获取的步骤包括：

1) 将多孔介质填入反应釜内；

2) 向反应釜注入水和甲烷气体，使甲烷气体充分溶解于水中；

3) 将反应釜置于恒温箱中，设定恒温箱温度为某一较低温度，以便气水合物生成，开启测控软件与硬件接口设备，进行数据采集和显示；

4) 以一定温度间隔逐步升高恒温箱温度以便气水合物进行分解，在每一次温度设定之后，等待反应釜内温度和压力稳定后，开启数据采集和保存，待所有的数据保存完成后，停止数据采集和保存；

步骤 3) 和步骤 4) 所述的数据采集过程为：使用电学传感器对，通过接口电路对被测介质进行阻抗测量；使用声学传感器对，对被测介质进行声学特性参数测量；使用温度传感器和压力传感器，采集反应釜内温度和压力；

（2）测量信号分析处理的步骤包括：

5) 根据温度和压力值按照如下公式计算反应釜中气水合物的量：

$$S_{\text{H}} = \frac{\left( \frac{P_1}{Z_1 T_1} - \frac{P_2}{Z_2 T_2} \right) \times \frac{V_{\text{G}}}{R} \times M_{\text{H}}}{\rho_{\text{H}} \times V_{\text{V}}}$$

6) 建立电学传感器测量信号与气水合物饱和度之间定量关系的模型 I；

7) 建立声学传感器测量信号与气水合物饱和度之间定量关系的模型 II；

8) 建立电学传感器测量信号和声学传感器测量信号数据融合后与气水合物饱和度之间定量关系的模型 III；将步骤 7) 得到的模型 II 与步骤 6) 得到的模型 I 的气水合物饱和度输出作

为数据融合算法的输入，将计算所得到的气水合物饱和度作为输出，得到基于声电测量信号数据融合的气水合物饱和度模型，即模型III；

9) 电学传感器测量信号和声学传感器测量信号数据融合后与气水合物饱和度之间定量关系的模型的使用：使用电学传感器对，通过接口电路对被测介质进行阻抗测量，根据步骤6) 所得模型 I 反推得到气水合物饱和度值 I；使用声学传感器对，对被测介质进行脉冲信号测量；根据步骤 7) 所得的模型 II 反推得到气水合物饱和度值 II；上述的各气水合物饱和度值经过融合算法得出的值，根据步骤 8) 所得的模型 III 反推得到最终的气水合物饱和度值 III。

10. 根据权利要求 9 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试方法，其特征在于：获得步骤 6) 所述模型 I 的具体步骤为：

通过电学传感器获得每一个状态下、一定频率范围内一系列频率点处的阻抗值，选取阻抗幅值随饱和度变化显著的频率点，对测量到的阻抗值进行预处理；

根据复电阻率的定义结合反应釜的结构尺寸计算所选定频率点处的复电阻率；

分别计算阻抗的频散度和复电阻率的频散度；

利用以上得到的频散度参数分别与计算得到的气水合物饱和度进行多项式拟合，从而分别获得基于特征频率点阻抗频散度和基于特征频率点复电阻率频散度的气水合物饱和度模型；

将所有特征频率点的阻抗值和根据阻抗值计算得到的复电阻率值作为多维非线性映射的输入，计算所得到的气水合物饱和度作为多维非线性映射的输出，通过相应的学习算法最终获得气水合物饱和度的电学特性融合模型。

11. 根据权利要求 9 或 10 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试方法，其特征在于：获得步骤 7) 所述模型的具体步骤为：

对获取到的声波波形进行预处理，包括滤波、声波速度计算、声波幅值获取、声波频率获取；

分别获取不同的气水合物饱和度条件下声波的特性参数；

利用声波特性参数分别与计算得到的气水合物饱和度进行多项式拟合，分别获得基于声波速度、基于声波幅度和基于声波频率的气水合物饱和度模型；

利用以上三类声波特性参数作为多维非线性映射的输入，计算所得到的气水合物饱和度作为多维非线性映射的输出，通过相应的学习算法最终获得气水合物饱和度的声学特性融合模型。

12. 根据权利要求 9 所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试方法，其特征在于：步骤 3)

和步骤4)的数据采集过程中,每次测量时通过多路切换模块切换一对传感器工作。

13.根据权利要求9-12中任一项所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试方法,其特征在于:步骤3)和步骤4)的数据采集过程中,对于声学传感器,通过编码激励技术对声学传感器进行激励。

14.根据权利要求13所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试方法,其特征在于:通过编码激励技术得到的超声激励信号为:单频载波脉冲信号、调频脉冲信号、编码脉冲信号、脉冲串信号或相位编码连续波信号。

15.根据权利要求9-12中任一项所述的多孔介质中气水合物模拟实验测试方法,其特征在于:步骤3)和步骤4)的数据采集过程中,对于电学传感器,激励信号采用具有一定幅值、频率、直流偏置的正弦波的电压信号,对每一个测试点均进行一定频率范围的扫频激励;所述幅值为0.01V-5V,频率为0.01Hz-100MHz。

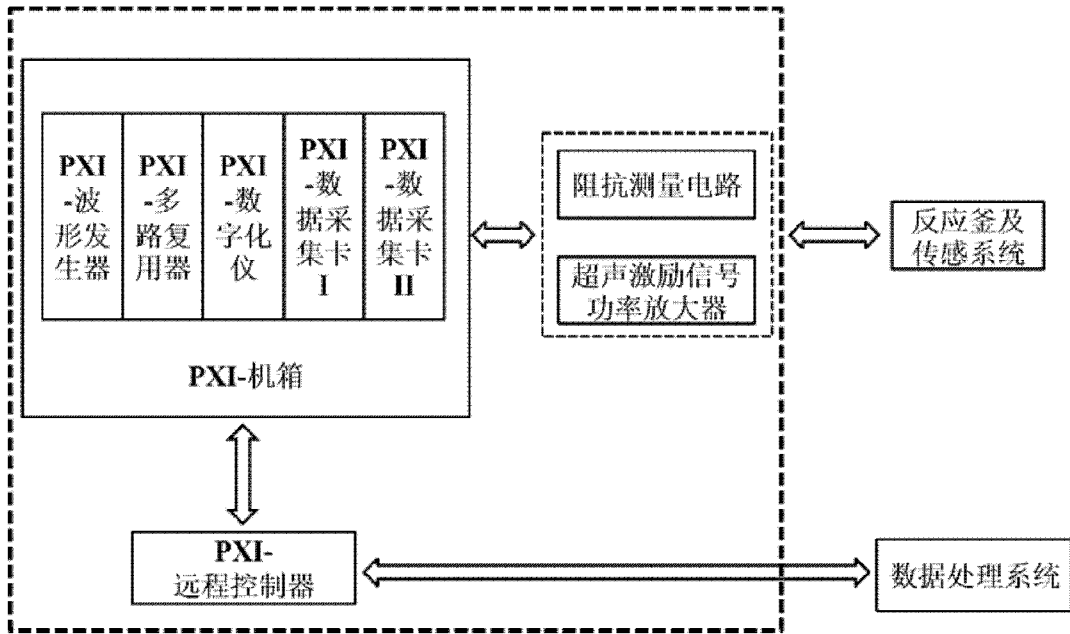


图 1

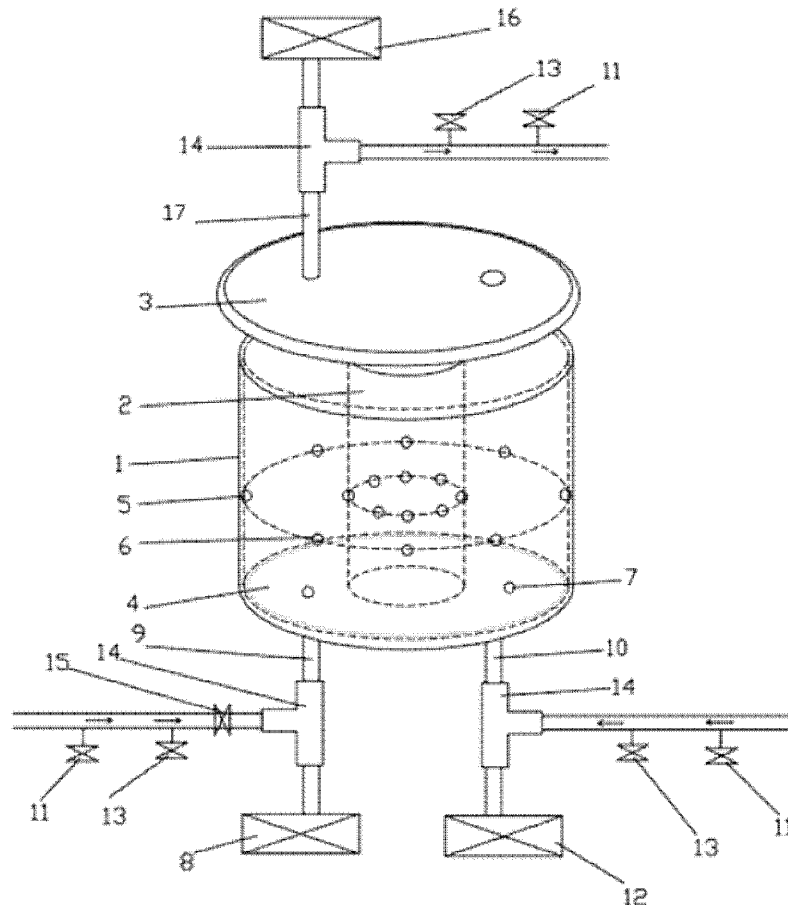


图 2



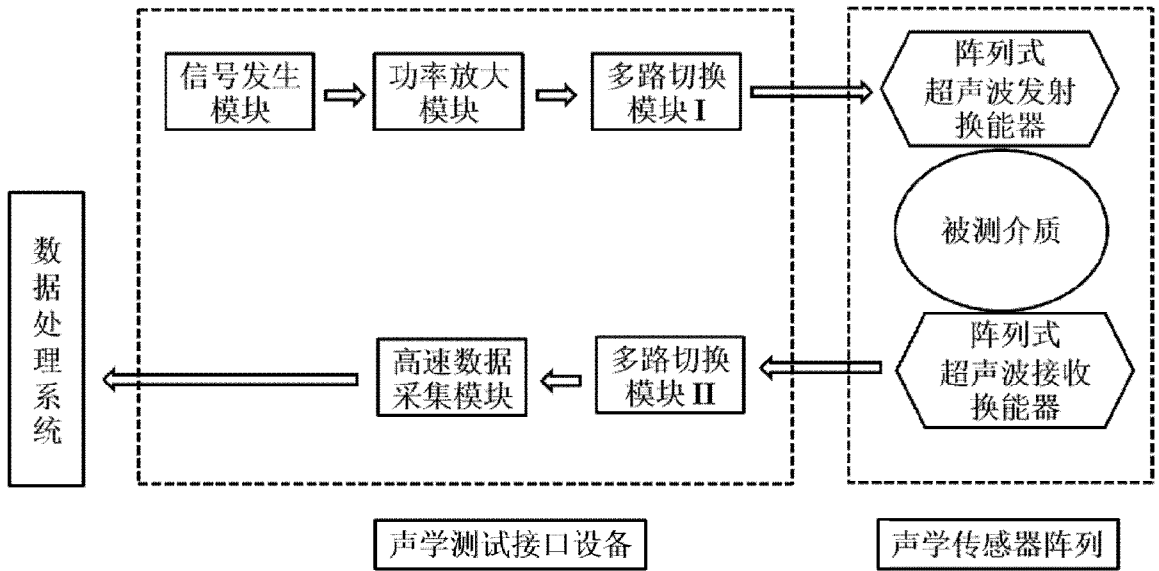


图 3

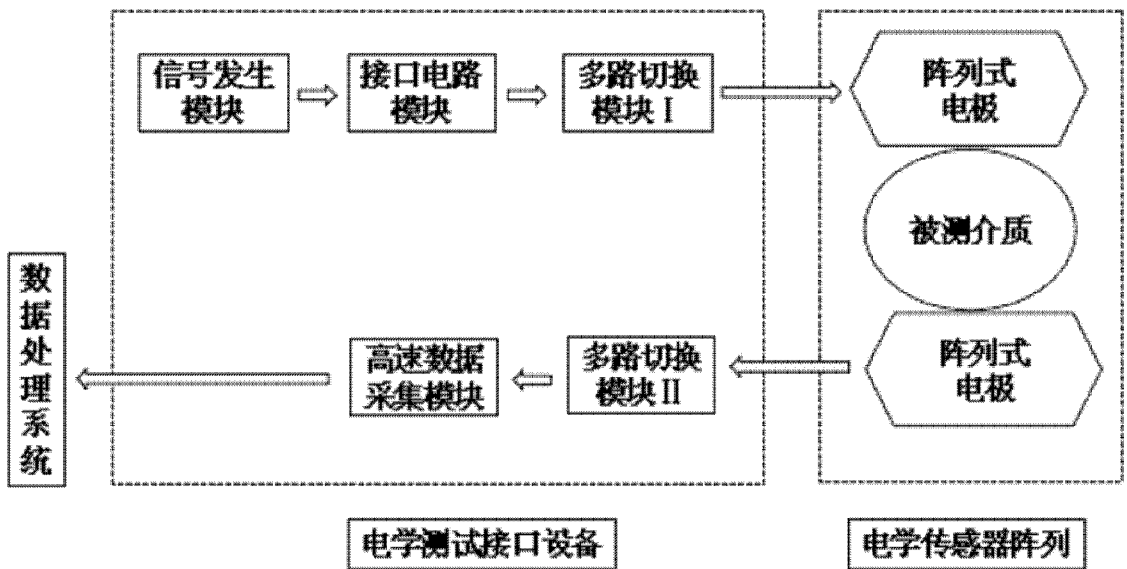


图 4

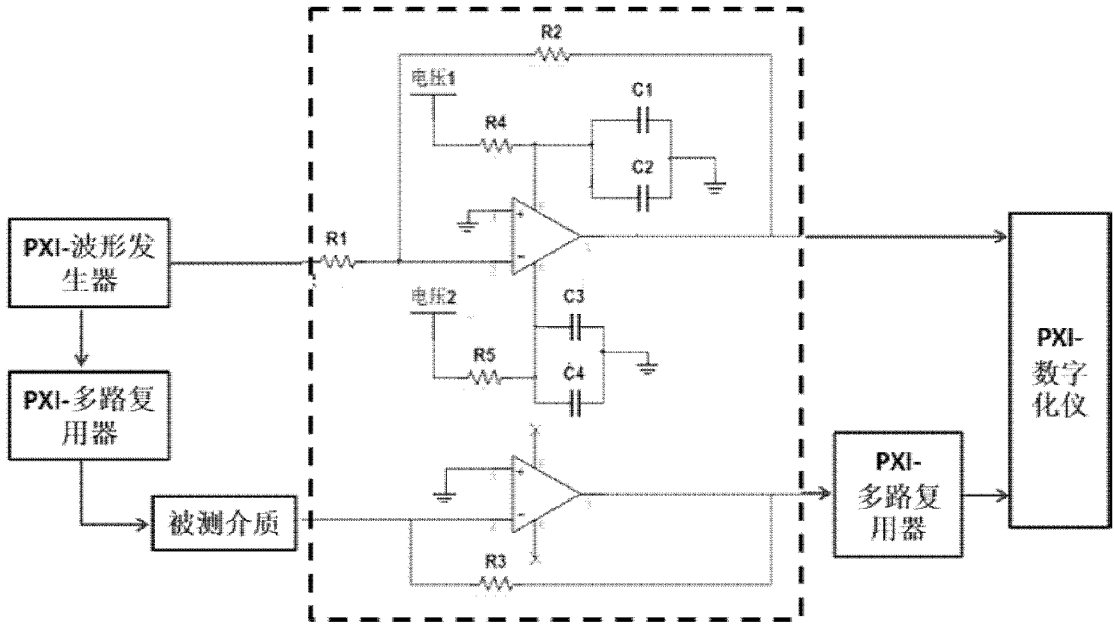


图 5

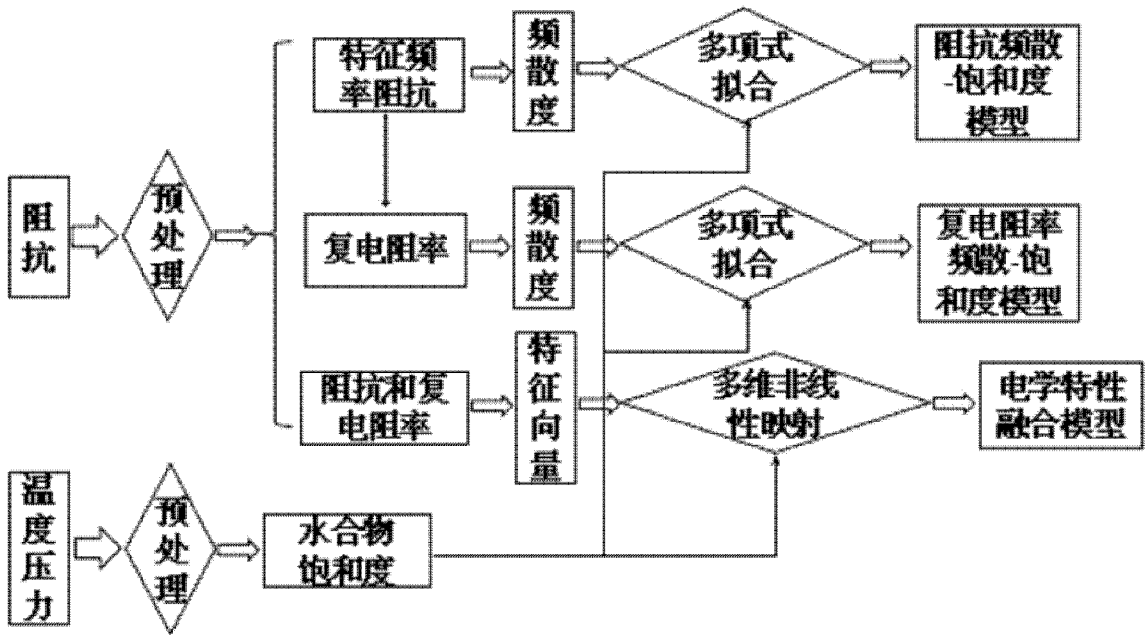


图 6

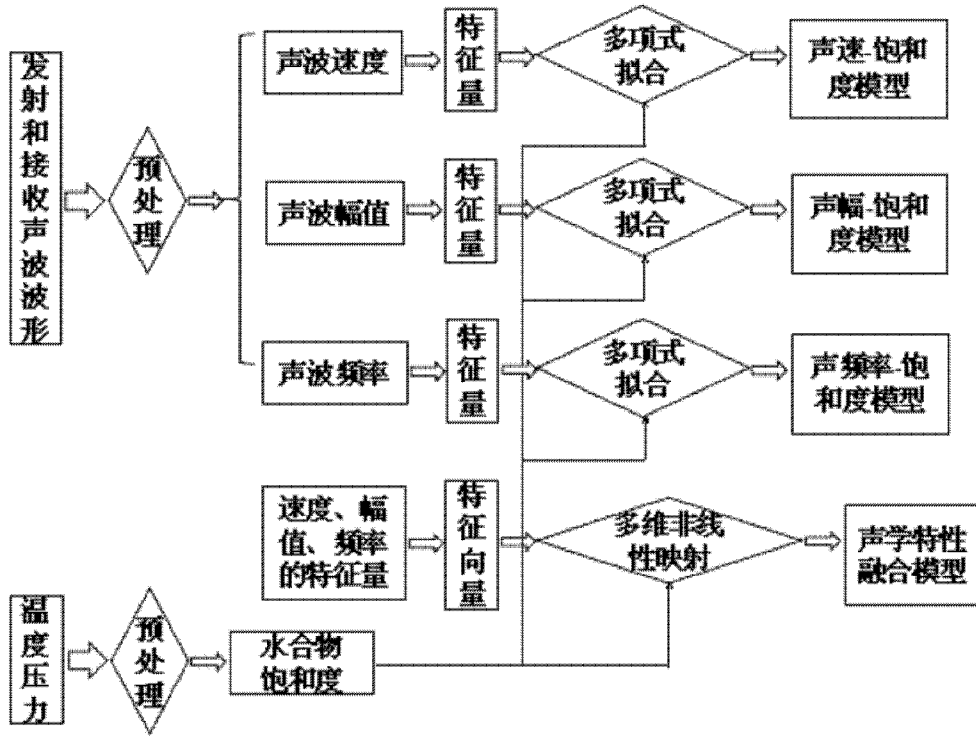


图 7

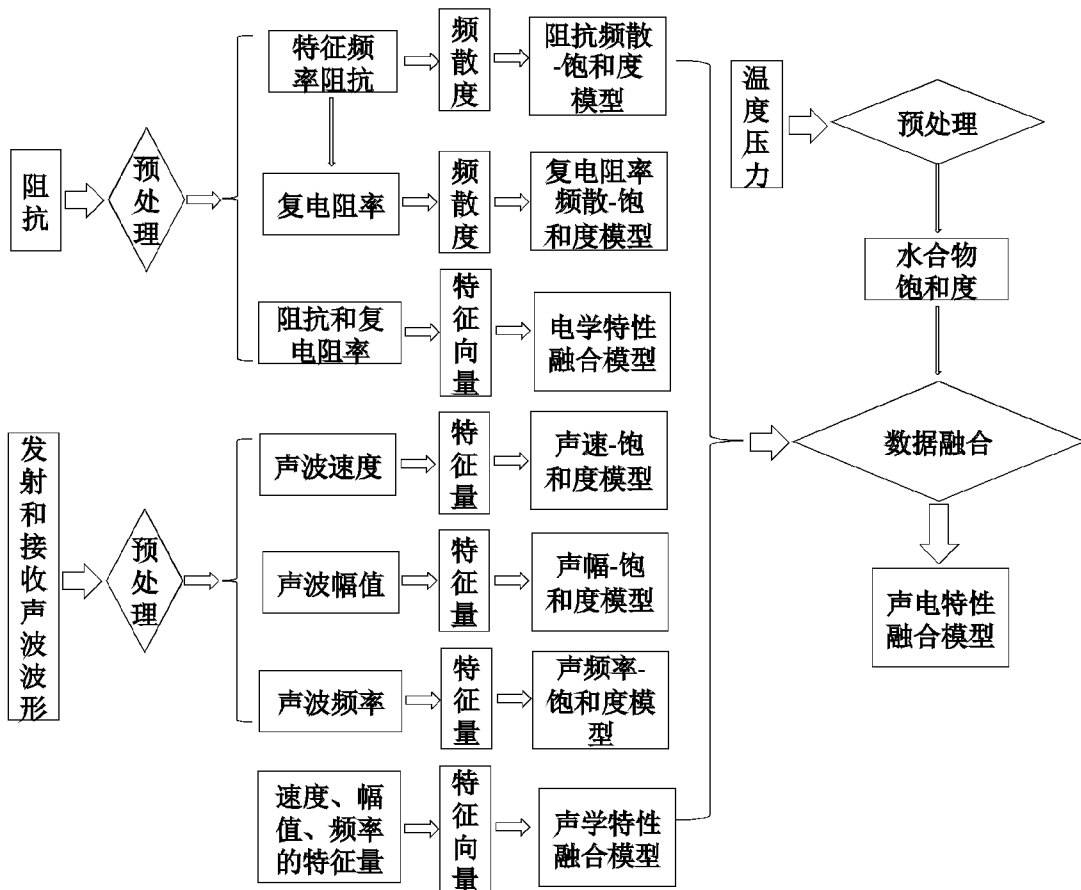


图 8

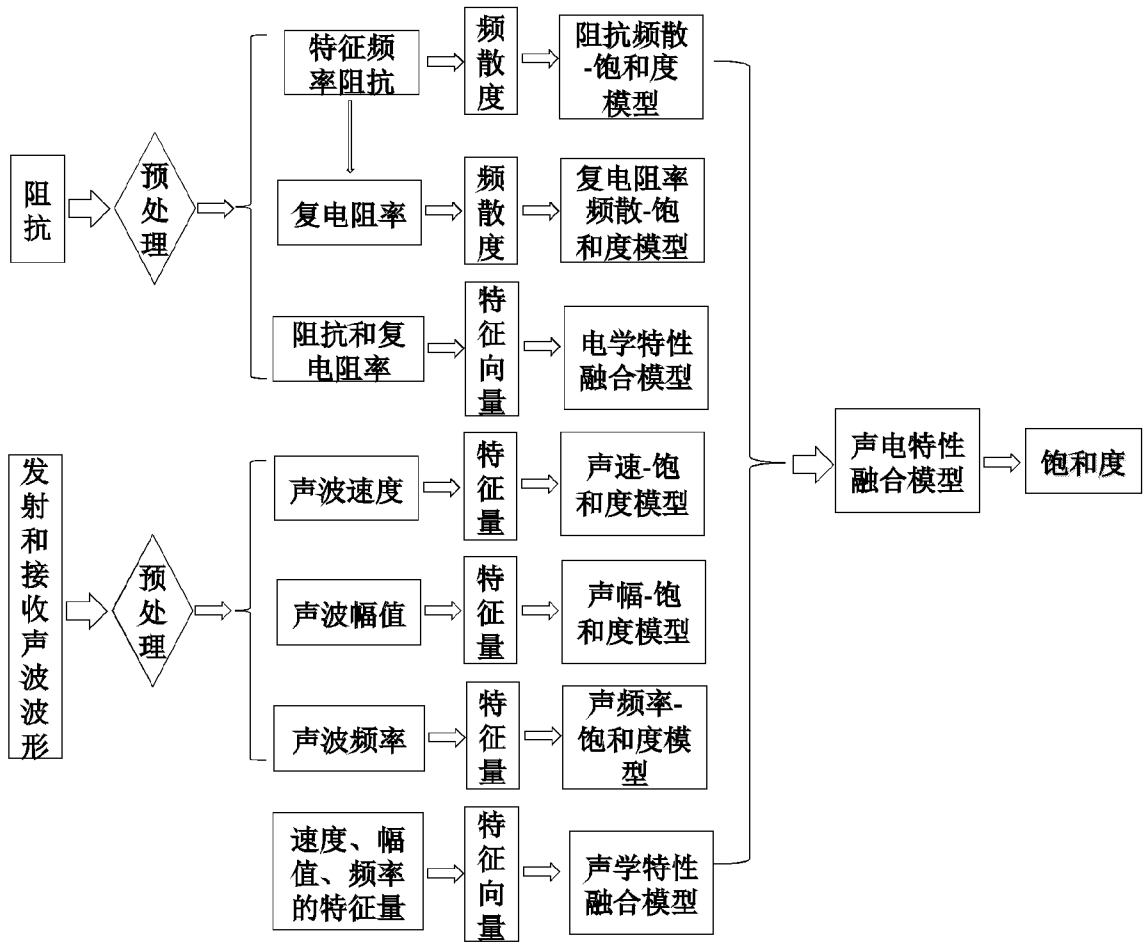


图 9

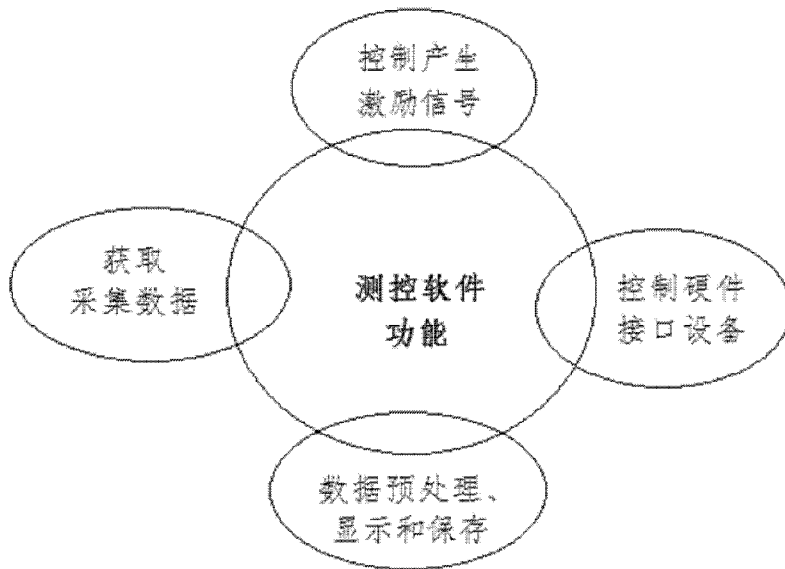


图 10

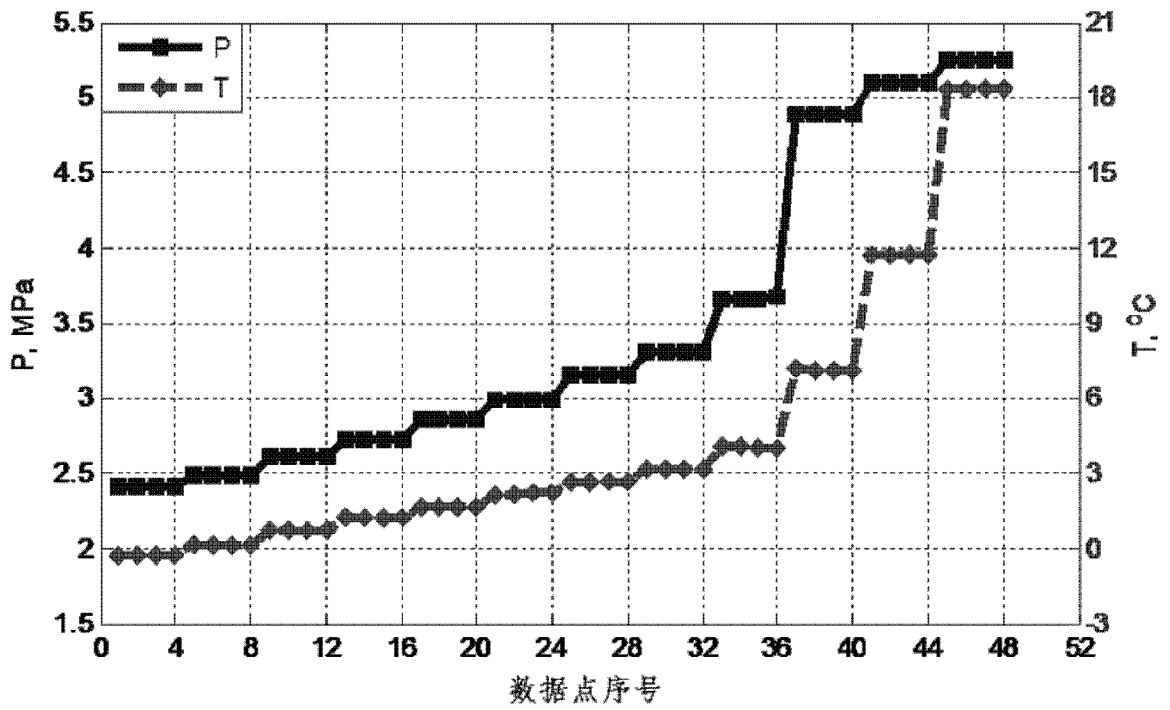


图 11

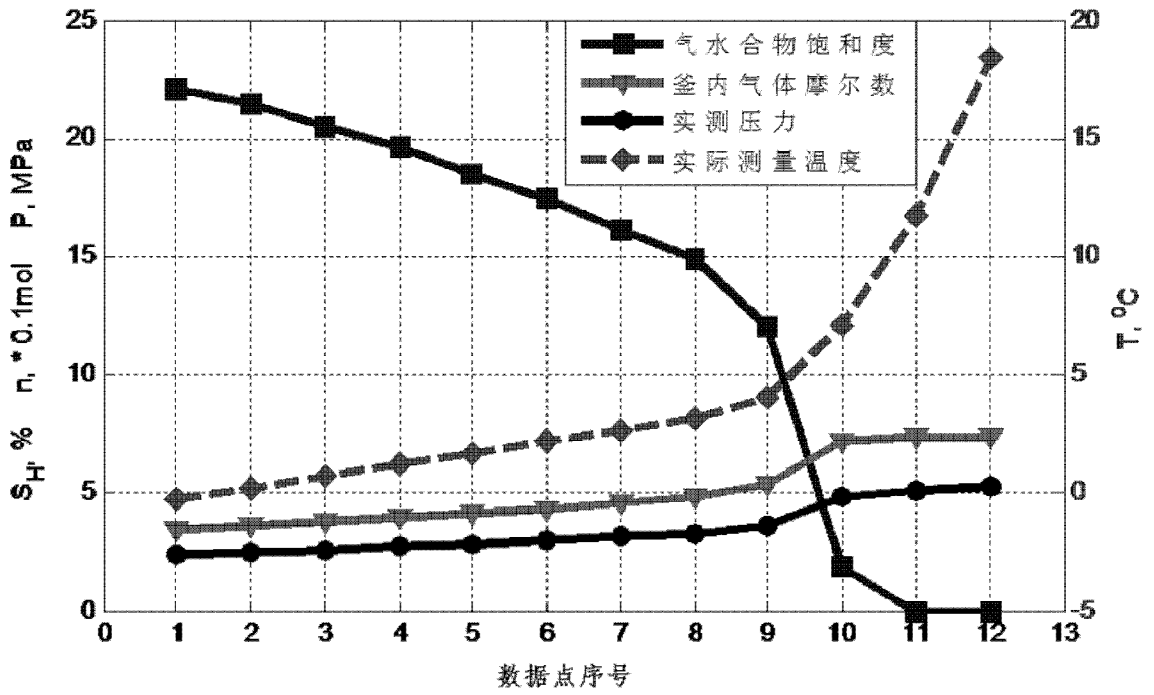


图 12

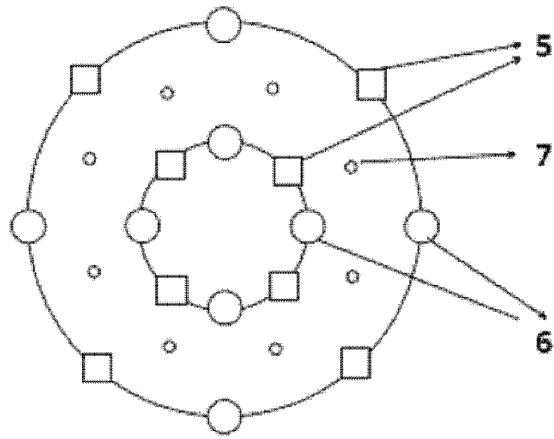


图 13

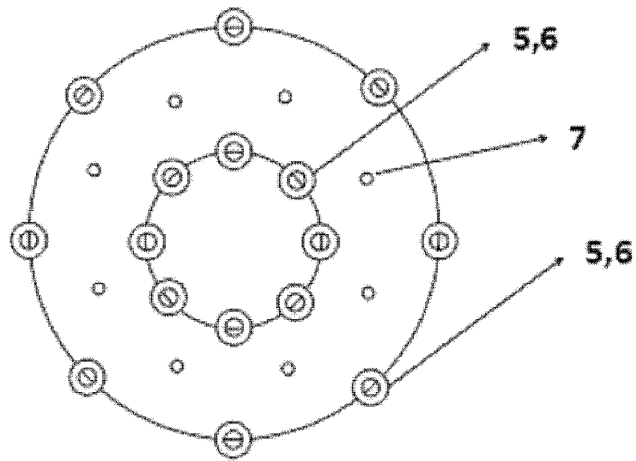


图 14

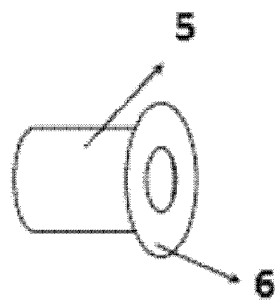


图 15

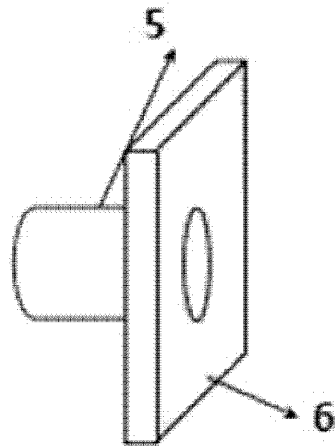


图 16

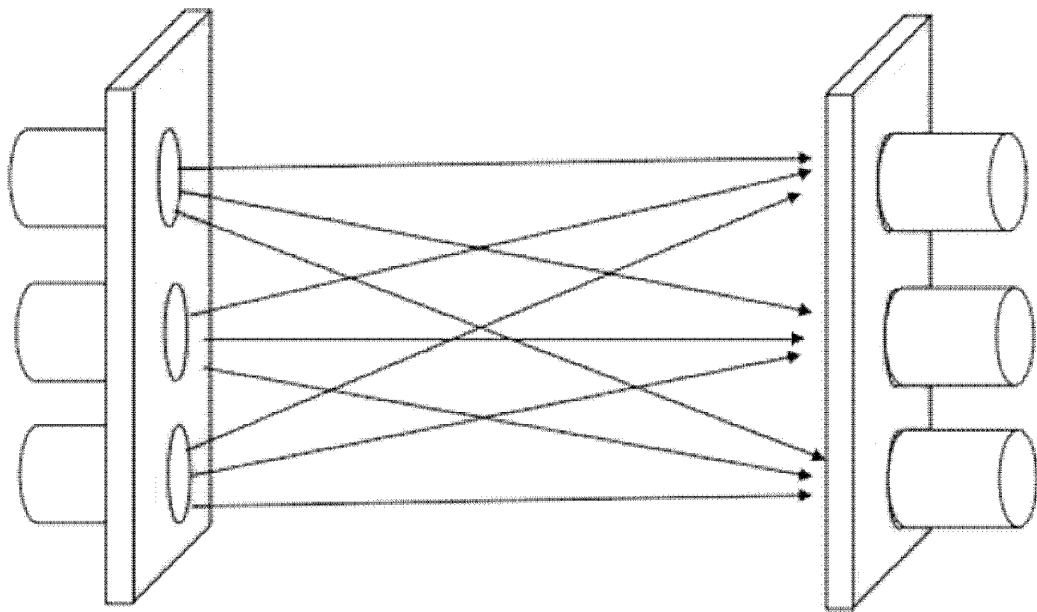


图 17

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/CN2016/098689

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01V 11/00 (2006.01) i; G01V 13/00 (2006.01) i; G01N (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01V 11/-; G01V 13/-; G01N 33/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI, EPODOC, CNKI, CNPAT: natural, gas, hydrate, simulate, emulator, test, sonic, electric+, resistance, electrode, sensor, detect, excite, input, switch, reactor, container, logging, experiment, test, porous, medium, media, saturation, formation, dissociation, decomposition, impedance, acoustic, data, fusion

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 105334547 A (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM et al.) 17 February 2016 (17.02.2016) claims 1-10	1-8
PX	CN 205015491 U (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM et al.) 03 February 2016 (03.02.2016) claims 1-10	1-8
PX	CN 105334516 A (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM et al.) 17 February 2016 (17.02.2016) claims 1-10	9-15
A	CN 103323352 A (CHINA NATIONAL PETROLEUM CORP.) 25 September 2013 (25.09.2013) description, paragraphs [0004]-[0090], and figure 1	1-15
A	JP 2003082372 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD.) 19 March 2003 (19.03.2003) the whole document	1-15
A	CN 103424182 A (QINGDAO INSTITUTE MARINE GEOLOGY) 04 December 2013 (04.12.2013) the whole document	1-15

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>“&amp;” document member of the same patent family</p>
---	---

Date of the actual completion of the international search  
10 October 2016

Date of mailing of the international search report  
26 October 2016

Name and mailing address of the ISA  
State Intellectual Property Office of the P. R. China  
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao  
Haidian District, Beijing 100088, China  
Facsimile No. (86-10) 62019451

Authorized officer  
DENG, Xiaobei  
Telephone No. (86-10) 62413264



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/CN2016/098689

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 101376854 A (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM) 04 March 2009 (04.03.2009) the whole document	1-15
A	CN 1614409 A (QINGDAO INSTITUTE MARINE GEOLOGY) 11 May 2005 (11.05.2005) the whole document	1-15

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
Information on patent family members

International application No.  
PCT/CN2016/098689

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 105334547 A	17 February 2016	None	
CN 205015491 U	03 February 2016	None	
CN 105334516 A	17 February 2016	None	
CN 103323352 A	25 September 2013	CN 103323352 B	08 April 2015
JP 2003082372 A	19 March 2003	None	
CN 103424182 A	04 December 2013	CN 103424182 B	28 October 2015
CN 101376854 A	04 March 2009	CN 101376854 B	05 June 2013
CN 1614409 A	11 May 2005	CN 1317557 C	23 May 2007

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2016/098689

<p>A. 主题的分类</p> <p>G01V 11/00(2006.01)i; G01V 13/00(2006.01)i; G01N 33/00(2006.01)i</p> <p>按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类</p>																							
<p>B. 检索领域</p> <p>检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)</p> <p>G01V11/-; G01V13/-; G01N33/-</p> <p>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献</p> <p>在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))</p> <p>WPI;EPODOC;CNKI;CNPAT;天然气, 水合物, 模拟, 测试, 实验, 试验, 声学, 声波, 电学, 电阻率, 电极, 传感器, 激励, 激发, 输入, 切换, 转换, 反应釜, 容器, 测井, 多孔, 介质, 饱和度, 生成, 分解, 阻抗, 数据融合, natural, gas, hydrate, simulate, emulator, test, sonic, electric+, resistance, electrode, sensor, detect, excite, input, switch, reactor, container, logging, experiment, test, porous, medium, media, saturation, formation, dissociation, decomposition, impedance, acoustic, data, fusion</p>																							
<p>C. 相关文件</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>类型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 105334547 A (中国石油大学华东 等) 2016年 2月 17日 (2016 - 02 - 17) 权利要求1-10</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 205015491 U (中国石油大学华东等) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 权利要求1-10</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>PX</td> <td>CN 105334546 A (中国石油大学华东等) 2016年 2月 17日 (2016 - 02 - 17) 权利要求1-10</td> <td>9-15</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103323352 A (中国石油天然气股份有限公司) 2013年 9月 25日 (2013 - 09 - 25) 说明书第【0004】-【0090】段, 图1</td> <td>1-15</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2003082372 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD.) 2003年 3月 19日 (2003 - 03 - 19) 全文</td> <td>1-15</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103424182 A (青岛海洋地质研究所) 2013年 12月 4日 (2013 - 12 - 04) 全文</td> <td>1-15</td> </tr> </tbody> </table>			类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 105334547 A (中国石油大学华东 等) 2016年 2月 17日 (2016 - 02 - 17) 权利要求1-10	1-8	PX	CN 205015491 U (中国石油大学华东等) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 权利要求1-10	1-8	PX	CN 105334546 A (中国石油大学华东等) 2016年 2月 17日 (2016 - 02 - 17) 权利要求1-10	9-15	A	CN 103323352 A (中国石油天然气股份有限公司) 2013年 9月 25日 (2013 - 09 - 25) 说明书第【0004】-【0090】段, 图1	1-15	A	JP 2003082372 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD.) 2003年 3月 19日 (2003 - 03 - 19) 全文	1-15	A	CN 103424182 A (青岛海洋地质研究所) 2013年 12月 4日 (2013 - 12 - 04) 全文	1-15
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
PX	CN 105334547 A (中国石油大学华东 等) 2016年 2月 17日 (2016 - 02 - 17) 权利要求1-10	1-8																					
PX	CN 205015491 U (中国石油大学华东等) 2016年 2月 3日 (2016 - 02 - 03) 权利要求1-10	1-8																					
PX	CN 105334546 A (中国石油大学华东等) 2016年 2月 17日 (2016 - 02 - 17) 权利要求1-10	9-15																					
A	CN 103323352 A (中国石油天然气股份有限公司) 2013年 9月 25日 (2013 - 09 - 25) 说明书第【0004】-【0090】段, 图1	1-15																					
A	JP 2003082372 A (MITSUBISHI HEAVY IND LTD.) 2003年 3月 19日 (2003 - 03 - 19) 全文	1-15																					
A	CN 103424182 A (青岛海洋地质研究所) 2013年 12月 4日 (2013 - 12 - 04) 全文	1-15																					
<p><input checked="" type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</p> <p>* 引用文件的具体类型:                      “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件                      “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利                      “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)                      “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件                      “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件                      “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件                      “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性                      “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性                      “&amp;” 同族专利的文件</p>																							
<p>国际检索实际完成的日期</p> <p>2016年 10月 10日</p>	<p>国际检索报告邮寄日期</p> <p>2016年 10月 26日</p>																						
<p>ISA/CN的名称和邮寄地址</p> <p>中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088</p> <p>传真号 (86-10)62019451</p>	<p>受权官员</p> <p>邓晓蓓</p> <p>电话号码 (86-10)62413264</p>																						

C. 相关文件		
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 101376854 A (中国石油大学北京) 2009年 3月 4日 (2009 - 03 - 04) 全文	1-15
A	CN 1614409 A (青岛海洋地质研究所) 2005年 5月 11日 (2005 - 05 - 11) 全文	1-15

国际检索报告  
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2016/098689

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	105334547	A	2016年 2月 17日	无			
CN	205015491	U	2016年 2月 3日	无			
CN	105334546	A	2016年 2月 17日	无			
CN	103323352	A	2013年 9月 25日	CN	103323352	B	2015年 4月 8日
JP	2003082372	A	2003年 3月 19日	无			
CN	103424182	A	2013年 12月 4日	CN	103424182	B	2015年 10月 28日
CN	101376854	A	2009年 3月 4日	CN	101376854	B	2013年 6月 5日
CN	1614409	A	2005年 5月 11日	CN	1317557	C	2007年 5月 23日

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2009年7月)