

基于 LabVIEW 的天然水合物电—声联合探测 实验装置测控软件开发

朱 泰¹, 邢兰昌¹, 祁 雨¹, 刘昌岭^{2,3}, 孟庆国^{2,3}, 刘乐乐^{2,3}

(1. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580;

2. 青岛海洋地质研究所自然资源部天然气水合物重点实验室, 山东 青岛 266071;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 天然气水合物模拟实验装置普遍具有测试参数众多、测试过程复杂等特点, 必须开发测控软件以满足实验装置对自动化操作的高要求; 在分析软件功能需求的基础上, 运用软件工程中的模块化、功能化的设计思想, 以 LabVIEW 为平台开发了一套电—声联合探测实验装置的测控软件; 该软件包括启动和登录模块、参数设置模块、信号发生模块、多路切换模块、数据采集及处理模块、数据显示及保存模块、错误处理和帮助信息模块; 实验测试表明: 所开发的测控软件扩展性和可维护性强, 人机交互界面简洁直观, 自动化程度高, 避免了人力耗费过大和人工参与过多对测试结果不良影响, 提高了测试结果的准确性和可靠性以及模拟实验测试的工作效率。

关键词: 测控软件; LabVIEW; 天然气水合物; 电—声联合探测; 自动化; 模块化

Development of Measurement and Control Software for Gas Hydrate Electrical—acoustic Joint Detection Apparatus with LabVIEW

Zhu Tai¹, Xing Lanchang¹, Qi Yu¹, Liu Changling^{2,3}, Meng Qingguo^{2,3}, Liu Lele^{2,3}

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Ministerial Key Laboratory of Gas Hydrate, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao

266071, China; 3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory

for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: A gas hydrate experimental apparatus generally has the characteristics of numerous test parameters and complex test process. It is necessary to develop measurement and control software to meet the high requirements of automatic operation of the experimental apparatus. Based on the analysis of the functional requirements of the software, a set of measurement and control software for the electrical—acoustic joint detection apparatus was developed with LabVIEW, using the ideas of modular and functional design in software engineering. The software includes start—up and login module, parameter setting module, signal generation module, multi—channel switching module, data acquisition and processing module, data display and storage module, error handling and help information module. Experiments show that the developed measurement and control software is characterized by strong expansibility and maintainability, simple and intuitive human—computer interface, high automation. The adverse effects of excessive manpower cost and manual participation on test results are avoided. The accuracy and reliability of the test results and the efficiency of the simulation tests are improved.

Keywords: measurement and control software; LabVIEW; gas hydrate; electrical—acoustic joint detection; automation; modularization

0 引言

天然气水合物是气体分子与水在低温、高压条件下形成的类冰状的非化学计量的笼形结晶水合物^[1]。自然界中

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2019-01-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51306212); 山东省重点研发计划项目(2017GGX40109); 中国地质调查项目(DD20160216); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(16CX05021A)。

作者简介: 朱 泰(1992-), 男, 山东单县人, 硕士生, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

邢兰昌(1983-), 男, 山东德州人, 硕士生导师, 副教授, 主要从事检测技术与自动装置、计算机测控系统、天然气水合物与多相流相关检测理论与方法方向的研究。

的水合物大多赋存于海底沉积物中, 形成的天然气水合物以甲烷水合物为主, 作为一种储量巨大的、洁净的新型替代能源, 天然气水合物的勘探与开发受到了世界各国的普遍关注^[2]。由于天然气水合物所处的地质条件有差异, 其分布和形成机制也不相同, 开发天然气水合物之前首先要对储层中水合物的分布特征和储层的物性特征进行准确评估, 其中含水合物饱和度是储层评价的重要目标参数。由于含水合物沉积层比普通围岩层具有更高的纵波速度和电阻率, 且地层中水合物的含量与纵波速度和电阻率密切相关, 声波测井和电阻率测井成为定量评价水合物储层的有效手段。为了满足开展天然气水合物模拟实验、测试沉积物电学和声学特性参数以及建立特性参数与含水合物饱和度之间定量关系的需求, 前期开发了一套电—声响应特

性联合探测实验装置^[3], 该实验装置具有测试参数众多、测试过程复杂等特点, 因此急需开发一套测控软件以满足实验装置对自动化操作的高要求。

虚拟仪器技术提供了一种灵活、高效的测试系统实现方案, 使原本松散组合且不兼容的测量系统发展成为紧密融合的虚拟测量系统, 其主要思想是利用计算机来管理仪器、组织仪器系统, 将传统仪器中部分硬件电路用软件来实现^[4]。基于对天然气水合物电-声联合探测实验装置的需求分析以及虚拟仪器技术优点的认识, 本文在现有实验装置硬件的基础上, 运用软件工程中的模块化、功能化的设计思想, 以 LabVIEW 为平台开发了一套电-声响应特性联合探测实验装置的测控软件。该软件包括

实现测控软件的启动和用户登录功能的“启动和登录模块”、实现测试参数设置功能的“参数设置模块”、实现对电声复合传感器进行有效激励的“信号发生模块”、实现电声复合传感器与激励模块以及传感器与数据采集模块之间分时连通功能的“多路切换模块”、实现数据采集和预处理功能的“数据采集及处理模块”、实现数据的数值和曲线显示及数据保存的“数据显示及保存模块”、协助用户实际操作与排查故障的“错误处理和帮助信息模块”。所开发的测控软件扩展性和可维护性强, 人机交互界面简洁直观, 自动化程度高, 避免了人力耗费过大和人工参与过多对测试结果的不良影响, 保证了测试结果的准确性和可靠性, 提高了模拟实验测试的工作效率。

1 实验装置硬件与软件需求分析

1.1 实验装置硬件组成

天然气水合物电-声响应特性联合探测实验装置包括两个功能单元, 即环境模拟单元和参数测试单元。环境模拟单元主要包括低温恒温箱、反应釜、增容气罐和高压气瓶; 参数测试单元主要包括电声复合传感器、温度压力传感器、信号切换模块、信号调理模块、信号发生模块和数据采集模块。电-声联合探测实验装置硬件结构组成示于图 1 所示。

电声复合传感器主要由电极、超声晶片、外壳、引线和接头构成^[3]。反应釜为不锈钢圆柱形筒体, 反应釜共安装 16 个电声复合传感器, 分为上下两层等间隔布置于反应釜侧面(如图 1 所示)。温度传感器为双感温 PT100, 将 9 支温度传感器自反应釜底部插入釜内, 每支温度传感器有 2 个温度敏感元件, 采用 3 支压力传感器分别测量沉积物的轴向压力、孔隙压力和增容气罐内气体压力。

信号切换模块采用低压切换开关(PXI-632)和高压切换开关(PXI-331)分别实现电学和声学信号的切换, 完成电声复合传感器与激励模块、传感器与数据采集模块之间的分时连通。信号调理模块包括电流/电压转换电路、

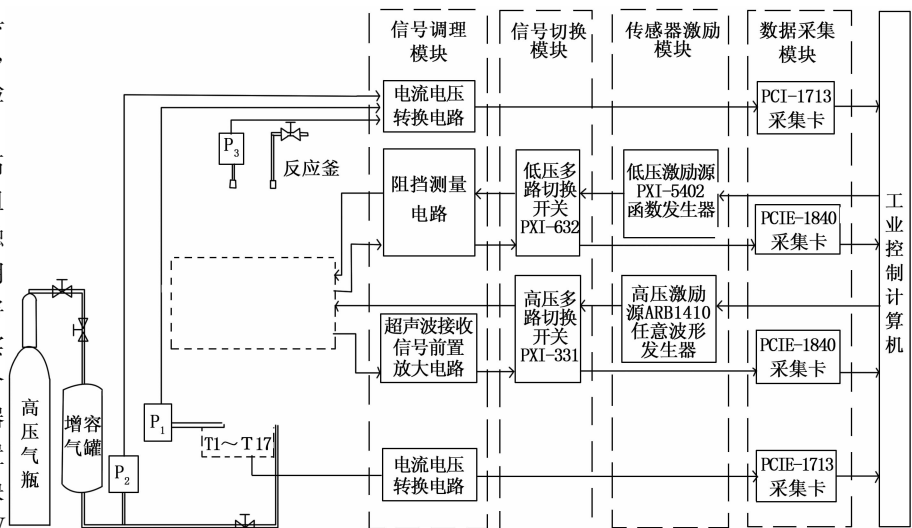


图 1 电-声联合探测实验装置硬件结构组成图

超声波接收信号的前置放大电路、测试被测介质阻抗参数的阻抗测量电路。信号发生模块包括低压激励源和高压激励源, 低压激励源(采用函数发生器板卡 PXI-5402)为电学测试提供低压扫频信号, 高压激励源(采用任意波形发生器 ARB1410)为声学测试提供高压脉冲信号。数据采集模块采用高速同步数据采集卡 PCI-E-1840 和低速异步数据采集卡 PCI-1713, 分别与多路切换开关连接用以实现对电学、声学、温度和压力数据的采集。

1.2 测控软件功能需求分析

1) 启动与登录: 为了启动测试软件和保护系统开发者以及使用者的权限和数据安全, 测控软件应具有软件启动和用户登录功能。

2) 参数设置: 该软件能够完成对电学激励信号参数、声学激励信号参数、采样参数和工作周期、保存路径等参数进行设置。

3) 激励信号产生: 为了产生激励电声复合传感器的信号, 需要对函数发生器板卡 PXI-5402 和任意波形发生器 ARB1410 进行配置以实现激励源输出信号的调节。

4) 多路切换: 为了避免电学和声学传感器同时工作而可能引起的相互干扰以及节约激励信号源和高速数据采集卡资源, 利用多路切换开关辅助实现阵列式传感器的分时轮流工作模式。测控软件需要按照所设计的风时轮流工作模式对多路切换开关进行控制以实现电声复合传感器与激励模块、传感器与数据采集模块之间的分时连通。

5) 数据采集与分析处理: 数据采集部分需要采集 2 路电学测试信号和 1 路声学信号、17 路温度信号和 3 路压力信号。对于电学测试信号, 由于测试过程中采用不同频率的激励信号对电学传感器进行激励, 软件则需要根据激励信号的实际频率对采样频率、采样点数和采样等待时间等参数进行自动实时调整。对于声学测试信号, 激励信号的频率固定不变, 软件只需设置固定的或者手动可调的采样频率和采样点数、采样等待时间等参数。为了降低噪声的干扰、提高测试的准确性, 需要对采集到的电学信号、声

学信号、温度和压力信号进行滤波处理，在此基础上进一步对滤波后的信号进行分析处理，获得能够反映被测介质状态的特征参数，如阻抗模值和相角、超声波信号的主频和幅值等。

6) 数据显示与保存：为了能直观的观察反应釜中沉积物被测介质的状态参数，需要对预处理获得的电学阻抗模值，超声传播时间、超声波信号幅值、温度和压力值进行实时数值和波形显示。针对大量的测试数据，为了便于后期的数据管理和分析，需要首先对数据进行分类继而分别保存于各类文件夹中。需要保存的数据包括原始采集数据和预处理后的数据。

7) 错误处理与帮助：为了便于用户掌握软件操作方法、自行排查使用过程中的问题，测控软件应包括错误处理模块和帮助模块。

2 测控软件设计

依据上述功能需求对测控软件的功能进行模块化分解，设计了启动和登录模块、参数设置模块、多路切换模块、数据采集与处理模块、数据显示与保存模块、错误处理模块和帮助信息模块。图 2 所示为测控软件运行时的工作流程图，以下进行具体解释：

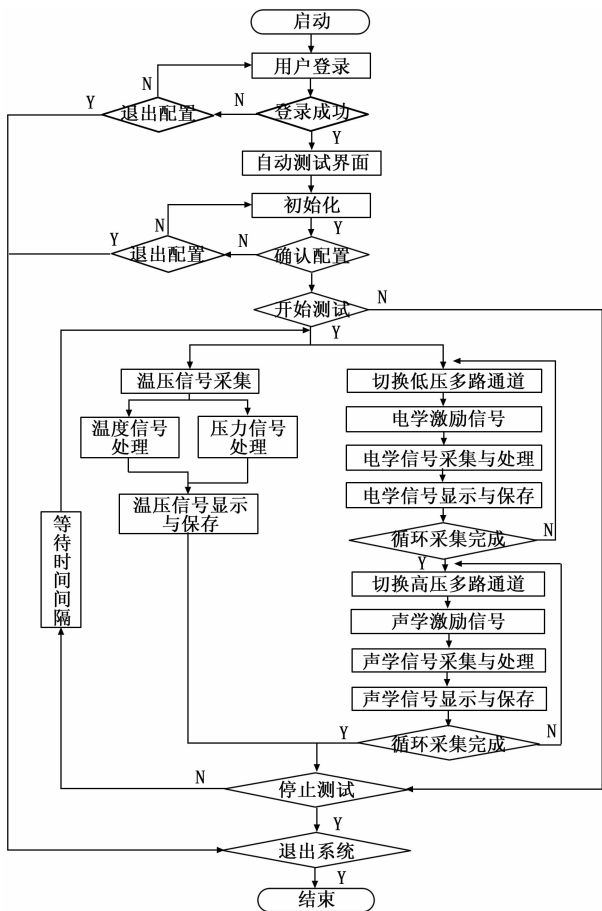


图 2 测控软件工作流程图

1) 软件启动后，进入用户登录界面，登录成功后则进入自动测试用户界面，在此界面实施参数初始化操作以初

步完成对系统参数的设置，从而完成“开始测试”前的准备工作；

2) 通过程序控制高低压多路切换开关，依照电声复合传感器阵列的工作模式依次实现所需通道的导通，然后控制信号发生模块产生激励信号，同时控制数据采集与模块对各路信号进行采集并进行实时处理；

3) 数据显示与保存模块对上述处理结果进行实时波形和数值显示，并同时保存操作；

4) 在用户发出停止测试指令之前，软件不断重复上述自动测试过程，实验完成后用户发出指令则退出测控软件。

3 测控软件开发

3.1 启动与登录模块

启动与用户登录模块的程序如图 3 所示。在启动模块中，加载软件显示加载进度并将文件加载结果显示在启动界面，加载成功后启动界面自动关闭。

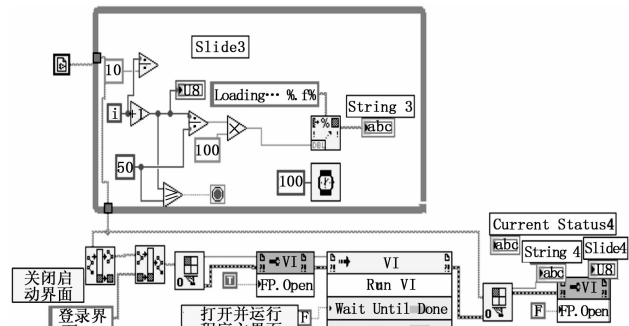


图 3 启动与用户登录模块部分程序框图

软件调用登录界面子 vi 进入用户登录模界面，其主要功能为识别合法用户。程序首先从读取的数据库信息中获得索引的一维数组（该数组存储了有效用户名信息），然后调用搜索一维数组函数对用户名进行搜索和判断，在判断用户名有效之后则进行密码匹配。

3.2 参数设置模块

参数设置模块主要包括电学测试参数、声学测试参数、采样参数和工作周期等的设置。根据参数类型的不同，参数设置分别采用数值输入控件和字符串输入控件。对于包含多个不同数值类型的输入，如控制电学激励信号所需设置的频率扫描范围、扫频方式、扫描点数等，则采用簇数组将不同类型的输入进行整合。

软件通过参数初始化功能对所需配置的参数进行默认值设置。在 while 循环中定义一个事件结构，即事件驱动方式^[5]，当“参数初始化”驱动事件发生时，则执行对各参数的默认值设置。

3.3 多路切换模块

电声复合传感器阵列的工作模式如图 4 所示。S1~S8 代表 8 个电声复合传感器，S1-E 和 S1-U 分别表示复合传感器 S1 的电学传感器和声学传感器部分。参照图 7 所示的传感器工作模式，图中传感器之间的连线表示两个传感器构成一对工作的传感器。

1) 以电极 S1-E 为发射端，分别以电极 S5-E、S6-E

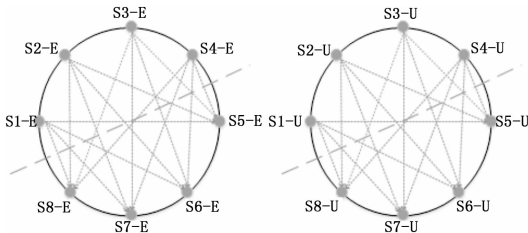


图 4 电声复合传感器阵列的工作模式

E、S7-E、S8-E 为接收端, 通过控制低压切换开关, 按顺序测量上述 4 个电极对之间, 在 1Hz~10MHz 频率范围内 22 个频率点的阻抗谱;

2) 以 S1-U 为超声波发射探头, 分别以 S5-U、S6-U、S7-U、S8-U 为超声波接收探头组成超声波探头对, 通过高压切换开关, 依次完成发射接收并采集超声波信号;

3) 依次把 S2-E、S2-U、S3-E、S3-U、S4-E、S4-U 作为发射端, S5-E、S6-E、S7-E、S8-E/S5-U、S6-U、S7-U、S8-U 作为接收端, 重复 (1)、(2), 完成上层传感器测试;

4) 针对下层电声复合传感器阵列, 重复上述 1)~3) 步骤, 完成对下层电声传感器的测试。

对每个被测试点均采用上述 4 个步骤, 间隔 40 min 重复以上步骤。

在多路切换模块中, 程序首先调用 Open Specified card. vi 设置总线和扩展插槽, 然后调用 Op Bit. vi 确定输出子单元和比特数, 依据工作模式的需要闭合相应的开关, 最后在测试完成后调用 Close Specified Card. vi 断开对应的开关。多路开关切换模块部分程序如图 5 所示。

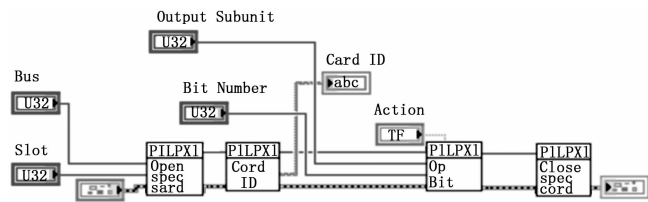


图 5 多路切换模块部分程序框图

3.4 激励信号产生模块

激励信号产生模块包含高压声学激励信号产生部分和低压电学激励信号产生部分。

声学激励信号产生部分的程序采用顺序结构 (如图 6 所示)。首先调用 AM control. vi 对激励信号类型 (正弦波、方波、三角波、锯齿波)、频率、每次发出信号周期数等参数进行设置, 然后调用 Signal control. vi 对激励信号的幅值、延迟时间、滤波器频率、偏移量等参数进行设置, 最后调用 Trigger control. vi 和 High voltage. vi 完成对激励信号的模式、重复频率、触发输出模式等参数的设置, 进而实现高压声学激励信号的产生。

电学激励信号产生部分的程序与声学部分类似, 同样采用顺序结构。首先调用 Initialize. vi 对函数发生器进行初始化, 然后依次调用 Configure Channel. vi、Configure Output Mode. vi、Configure Standard Waveform. vi、Con-

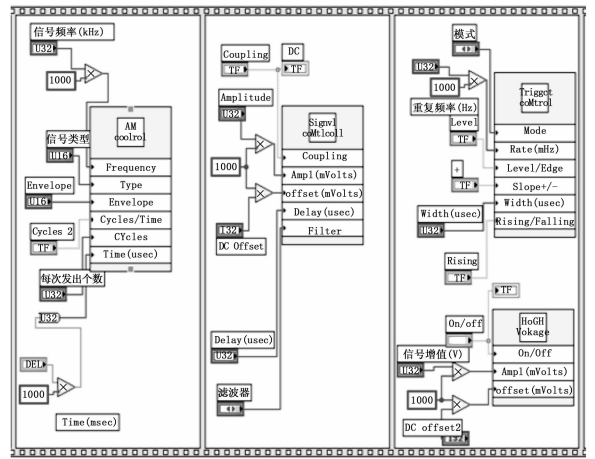


图 6 声学激励信号产生模块程序框图

figure Channel. vi 完成信号源名称、信号通道、输出模式、信号频率、幅值、偏移量、初始相位等参数设置, 此后利用 Initial Generation. vi 和 Abort Generation. vi 来启动激励信号产生和终止信号产生, 最后调用 Close. vi 关闭函数发生器来清除已设定的参数并释放所有的内存资源。扫频方式分为线性扫描和对数扫描, 也可以根据需要通过用户输入扫描的频率点, 程序采用 For 循环依次调用包含所设定频率值的数组, 完成对激励信号频率的设定。

3.5 数据采集与处理模块

数据采集部分利用板卡驱动程序中 DAQNavi Polymorphic. vi 函数库来实现对数据采集卡 PCIE-1840 和 PCI-1713 的配置, 分别用于采集声学、电学、温度和压力信号。程序首先调用 DAQNavi Create Channel. vi 创建虚拟通道, 指定 I/O 通道类型、通道数量和设备号来执行数据采集任务, 然后调用 DAQNavi Timing. vi 实现对采样点和采样频率的设置, 之后调用 DAQNavi Read. vi 从缓存中读取数据, 并通过添加 While 循环实现数据的连续读取, 在循环读取数据结束后, 调用 DAQNavi Clear Task. vi 停止数据采集任务并进行清除缓存和所占用内存等操作, 释放数据采集所占用的资源^[6]。

声学信号采集采用外部触发方式, 即 ARB-1410 发出高压脉冲的同时产生一个同步信号至 PCIE-1840 触发端口, 继而触发 PCIE-1840 对声学信号进行采集, 实现声学激励信号产生和声学信号采集的时间同步。电学信号采集采用软件触发方式, 即电学信号激励时同时采集两路阻抗测量信号, 采集完成后终止电学激励信号的产生。电学信号采集程序根据激励信号频率的不同自动调整采样频率、采样长度和采样等待时间等参数, 此类参数设置的程序框图如图 7 所示。

对于声学测试信号, 首先通过局部置零的方式消除超声波激励脉冲信号产生时对接收端干扰导致的虚假幅值波动, 然后再利用带通滤波器滤除 45 kHz 附近之外的其他频率的干扰信号。对滤波后的信号进行傅里叶变换以获取主频信息, 利用波峰检测方法获得信号峰值。温度和压力测试单元采集 20 路电压信号, 对每次采样得到的各路信号求

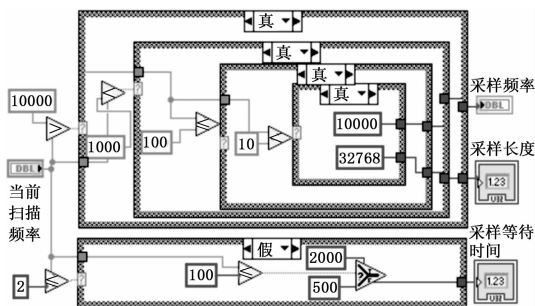


图 7 电学信号采集部分程序框图

平均值，经过标度变换后将平均压力和温度值送入数据显示与保存模块。

对于电学测试信号，根据阻抗测量原理由式 (1) 来计算被测介质的阻抗模值， V_1 和 V_2 分别为采集到的两路正弦电压信号的幅值^[7]。

$$|Z| = \frac{V_1 R_3}{V_2} \quad (1)$$

电学测试数据预处理部分的程序框图如图 11 所示。首先利用具有线性相位的 FIR 滤波器对同步采集的 V_1 和 V_2 进行数字滤波^[8]，然后利用 FFT 谱分析法对 V_1 和 V_2 进行频谱分析分别得到两个信号的相位^[9-10]，被测介质阻抗的相角由式 (2) 计算。

$$\varphi_z = \varphi_{v1} - \varphi_{v2} \quad (2)$$

式中， φ_{v1} 为信号 V_1 的相位， φ_{v2} 为信号 V_2 的相位。

3.6 数据显示与保存模块

数据显示模块采用数值显示控件、图形显示控件（波形图、波形图表、Express XY 图）等实现显示功能，依据测控软件对声学、电学以及温度和压力特征参数实时显示功能的要求，选择基本的数值显示控件来显示，对于波形显示，选用波形图表控件来完成数据的实时显示。

首先利用 File Path. vi 设定保存路径，然后打开创建文件输入文件名，通过 Dynamic Data Conversion. vi 把数组转换为字符串，调用 Array To Spreadsheet String. vi 将数组转化成电子表格字符串，再调用 Write To Text File. vi 将字符串写入指定文件中，最后调用 Close File. vi 实现数据的保存。在设置保存路径、文件名、保存格式之后，软件运行时即可自动将原始数据、处理后数据和测量结果保存到分类后的指定文件夹中。

3.7 错误处理模块

错误处理模块既能为用户提示操作错误，也能监测软件的基本故障。一旦发生错误或故障，错误代码则传递到前面板错误提示框中，以便用户及时分析和查看错误或故障产生的原因。错误处理模块部分框图如图 8 所示。当“error in”不包含错误时，将执行条件框“无错误”内的代码（图 8a），如果“error in”包含错误时，将执行条件框“错误”内的代码（图 8b），错误代码将被传递到“error out”，将各个错误状态通过队列传输到错误模块内，继而将提示信息显示在前面板错误提示框中^[11]。

3.8 帮助信息模块

帮助信息模块包括两部分：软件功能介绍和软件使用

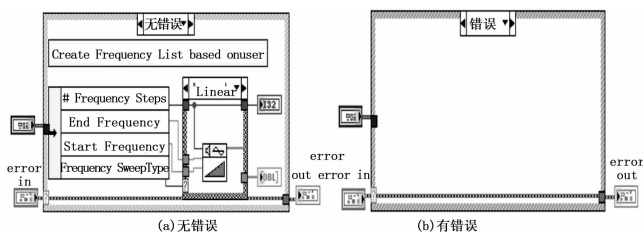


图 8 错误处理模块部分程序框图

手册。程序首先调用 Build Path. vi 创建路径，然后调用 Path To Array of Strings. vi 将路径进行字符串数组转换，再调用 Concatenate Strings. vi 连接字符串数组，最后调用 System Exec. vi 执行命令行应用程序实现对 PDF 说明文件的调用和显示^[12]。

3.9 图形用户界面

图形用户界面是用户和测控软件交互的接口，通过接收用户的操作指令调用各个功能模块，控制实验装置的运行状态，最终完成相应的测试任务、显示和保存测试结果。

启动界面是用户交互界面中的第一个界面^[13]，本着简洁、明了的原则，其内容包含软件的版本号、软件开发单位等信息。用户登录界面包含用户名和密码输入框、用户登录、用户管理、修改密码和退出系统。

用户登录成功后则进入自动测试用户界面，如图 9 所示。自动测试用户界面包含三个部分：电学参数设置及显示、声学参数设置及显示、温度压力参数设置及显示。在前面板上显示传感器的实际排布方式，利用指示灯的形式模拟电声复合传感器的工作模式，以指示灯的明暗来表示传感器是否处于工作状态。界面最右侧一栏设有初始化、开始测试、开始保存、停止测试和退出系统等五个功能按钮，分别进行参数初始化、测试开始，数据开始保存、测试停止、退出系统功能等操作。

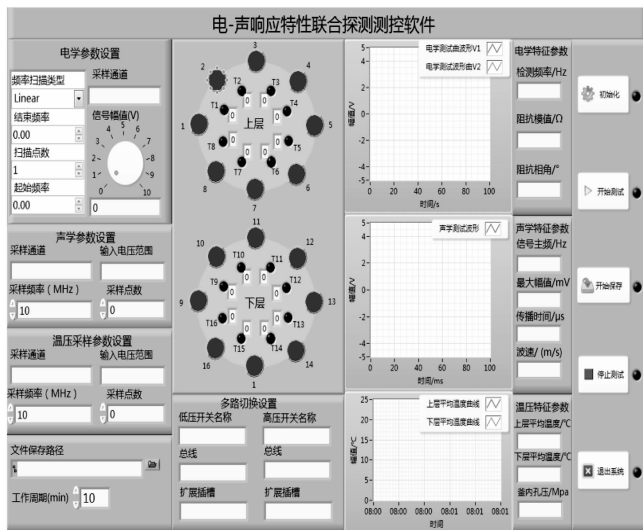


图 9 电-声响应特性联合探测测控软件界面

4 软件测试与应用

为测试该软件的性能，在实验室环境下测试了含水合物多孔介质生成过程中的电声联合响应特性。实验中采用

的甲烷气体的纯度为 99.99%, 孔隙水浓度为 3.5wt%, 沉积物是粒径为 0.18~0.25 mm、孔隙度为 38.4% 的天然海沙。

用户成功登录软件后, 首先利用初始化功能对测试参数进行默认设置。电学激励信号幅值为 1 V, 扫描方式为手动输入频率扫描, 数据采集范围为 ± 5 V; 声学激励信号为正弦波, 信号幅值为 150 V, 信号频率为 45 kHz, 数据采集范围为 ± 10 V, 采样频率为 5 MHz, 采样点数为 4 096; 温度压力数据采集间隔时间为 15 s, 工作周期为 40 min。

图 10 所示为实验过程中含水合物饱和度和超声波接收信号的波动幅度平均值的变化曲线。在 $t < 20$ h 阶段, 水合物具有较高的生成速率, 此后水合物生成速率有所降低; 超声波信号波动幅度值受到有效压力和含水合物饱和度的共同影响。图 11 所示为实验过程中含水合物饱和度和 100 kHz 阻抗模值平均值的变化曲线。水合物生成初期水合物生成初期, 含水合物饱和度较低, 水合物生成产生的排盐效应, 导致孔隙水浓度增加, 则阻抗模值逐渐降低; 随着水合物生成量的增加, 水合物逐渐堵塞多孔介质的孔隙致使阻抗模值随之升高。

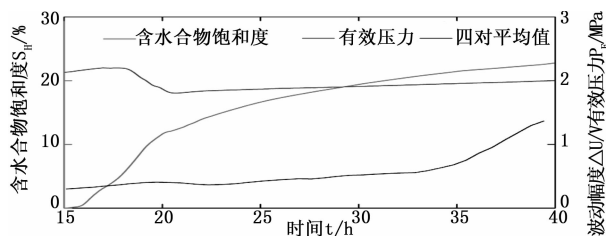


图 10 超声接收信号的波动幅度平均值、有效压力和含水饱和度随时间变化的曲线

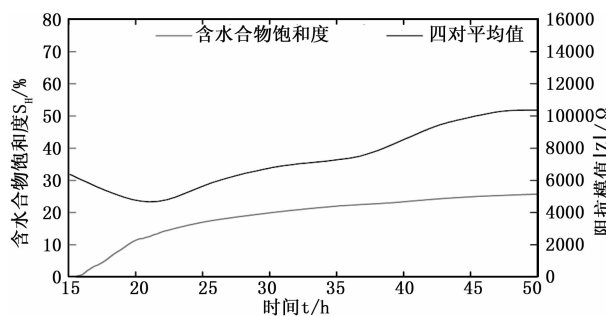


图 11 下层各传感器 100 kHz 阻抗模值平均值和含水合物饱和度随时间变化曲线

软件测试与应用结果表明了所开发的软件各模块功能运行良好, 其可靠性、稳定性、实时性均满足设计的需求。测控软件根据开发者所设计的阵列式传感器工作模式控制多路切换开关的闭合与断开, 实现电声复合传感器与激励模块、传感器与数据采集模块之间的分时连通, 最终实现激励信号的产生、多路开关的切换以及数据的采集等任务。采集到的各路信号首先经过数据预处理, 然后在测控软件前面板上进行数值或者波形图显示, 软件同时将原始数据以及处理后的数据实时保存于硬盘。通过对实验结果进行分析可知, 实验过程中温度、压力、超声波接收信号的波

动幅度值、阻抗模值等特征参数的变化均能够合理地反映甲烷水合物在多孔介质中的生成过程。

5 结束语

开发天然气水合物模拟实验系统是开展室内水合物实验研究的前提工作。水合物模拟实验系统普遍具有测试参数众多、测试过程复杂等特点, 因此需要开发功能完善的测控软件以满足实验系统对自动化操作的高要求。在分析软件功能需求的基础上, 运用软件工程中的模块化、功能化的设计思想, 以 LabVIEW 为平台开发了一套电-声联合探测实验装置的测控软件, 避免了人力耗费过大和人工参与过多对测试结果不良影响, 提高了测试结果的准确性和可靠性以及模拟实验测试的工作效率。满足了天然气水合物生成分解过程中的测试要求, 为研究含水合物多孔介质的电声联合特性提供了技术手段。

虚拟仪器技术提供了一种灵活、高效的测试系统实现方案, 基于 LabVIEW 所开发的测控软件具有自动化程度高、界面友好、扩展性强的特点, 符合模块化、功能化、通用化的软件工程设计思想, 开发周期短且便于维护。所开发的天然气水合物电-声联合探测实验装置测控软件可为其它多参数联合测试装置的软件开发提供有益的借鉴。

参考文献:

- [1] 刘昌岭, 孟庆国. 天然气水合物实验测试技术 [M]. 科学出版社, 2016.
- [2] 杨胜雄, 梁金强, 刘昌岭, 等. 海域天然气水合物资源勘查工程进展 [J]. 中国地质调查, 2017, 4 (2): 1-8.
- [3] 邢兰昌, 祁雨, 朱泰, 等. 含甲烷水合物沉积物电-声响应特性联合探测: 装置开发与实验研究 [J]. 新能源进展, 2018 (2): 119-129.
- [4] 李凤婷, 李冶, 孟兆海, 等. 基于虚拟仪器的阻抗参数测量系统的研究 [J]. 实验室研究与探索, 2017, 36 (4): 141-145.
- [5] 王翼星, 朱建新, 和卫星, 等. 基于 LabVIEW 和 DSP 的司机控制器测试系统 [J]. 测控技术, 2017, 36 (10): 117-121.
- [6] 纳杰斯, 丁明惠. 基于 LabVIEW 的通用且可定制的数据采集处理软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (11): 158-161.
- [7] 祁雨, 邢兰昌, 刘昌岭, 等. 基于虚拟仪器技术的阻抗分析仪设计与开发 [J]. 电子测量技术, 2017, 40 (6): 19-24.
- [8] 张秀芳, 徐东明. 一种滤除电力线噪声的数字滤波器的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (6): 199-201.
- [9] 王晴晴. FFT 和小波变换混合的谐波检测研究 [D]. 安徽理工大学, 2016.
- [10] 苗立交, 杨新华. 基于 LabVIEW 的相位差测量技术的研究与实现 [J]. 电子测量技术, 2010, 06: 79-81.
- [11] 崔新伟, 王德志, 王紫婷. 基于 USB 总线的虚拟数字存储示波器的设计 [J]. 实验室研究与探索, 2008, 27 (10): 64-66.
- [12] 刘景峰. 基于 LabVIEW 的数据采集与多功能分析系统设计 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [13] 周顺斌, 刘莹. 基于 LabVIEW 软件的菜单形式用户界面的设计 [J]. 工业控制计算机, 2008, 21 (3): 25-26.