Instrumentation and Equipments 仪器与设备, 2024, 12(2), 134-144
Published Online June 2024 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/iae
https://doi.org/10.12677/iae.2024.122020

Hans汉斯

基于STM32的模拟随钻溢流监测系统设计

尹雁璐

长江大学电子信息与电气工程学院，湖北 荆州

收稿日期：2024年3月1日；录用日期：2024年4月4日；发布日期：2024年6月19日

摘　要

针对在石油探索与采集过程中井底的溢流会导致严重的井喷井漏事件，本文在文氏电桥的基础上设计了一种基于STM32的随钻早期溢流监测系统。该系统通过信号发生电路激励电极片阵列采集信号，然后使用STM32对采集信号进行AD转换，最终传入PC端进行图形化显示，实现了信号的采集、分析、显示。实验测试结果表明，该系统在模拟环境下能够快速、准确地检测出溢流的发生，稳定性高，时效性好。

关键词

文氏电桥，早期溢流监测，STM32，电极片阵列

Design of an Overflow Monitoring System for Analog Follow-Drill Based on STM32

Yanlu Yin

School of Electronic Information and Electrical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: Mar. 1st, 2024; accepted: Apr. 4th, 2024; published: Jun. 19th, 2024

Abstract

To address the potential for blowout well leakage events caused by overflow during oil exploration and gathering, this paper designed an STM32-based early overflow monitoring system with drilling based on the Wien bridge oscillator circuit. The system stimulates the electrode sheet array through the signal generating circuit to collect signals, which are then converted by AD using the STM32. Finally, the signals are transmitted to the PC for graphical display, which realizes the collection, analysis, and display of the signals. The experimental test results indicate that the system can rapidly and accurately detect overflow occurrences in the analog environment. The system exhibits high stability and good timeliness.

文章引用: 尹雁璐. 基于 STM32 的模拟随钻溢流监测系统设计[J]. 仪器与设备, 2024, 12(2): 134-144.
DOI: 10.12677/iae.2024.122020

Keywords

Wien Bridge Oscillator Circuit, Early Overflow Monitoring, STM32, Electrode Sheet Array

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着全球已探明非常规油气资源储量的不断增加[1]与石油天然气行业技术的高速发展[2] [3]，油气探测领域中钻井与井控的难度越来越大[4]，溢流更是成为钻探过程中的常见现象。

溢流是指在钻井探测的过程中，钻井液(泥浆)和地层流体(如天然气、油或水)从井口非计划性的溢出现象。这种情况通常发生在地下压力大于钻井液柱压力时，导致地层流体进入井内并向上流动至地面。溢流是井控问题的早期迹象之一，如果不及时处理，可能发展成更严重的喷发(井喷)事件，对钻井平台和钻井工作人员造成重大威胁。

溢流监测的方法经过多年的开发研究，一般将钻井液池体积的数据作为溢流监测的理论依据，目前常用的方法是微流量溢流监测[5] [6] [7]，即在正常钻井时，观测泥浆池液面的微小变化，当井下发生液侵或气侵等异常情况时，泥浆池的高精度测量计测量的体积会有溢流显示，并以此为依据拉响溢流警报。除此之外，其他的溢流监测方法还有井口压力检测、钻井液密度检测、声波检测、井内压力和温度检测、泥浆循环系统观察等。但这些溢流监测的方法都是在井口处监测，相较于随钻溢流监测有实时性不足的缺点，而本文提出的方法是在井下钻头附近，实时性大幅提高。

2. 总体方案设计

溢流发生的最直接原因是地层孔隙压力大于钻井液静液柱压力，主要原因[8]有：

1) 钻头钻入异常高压地层，地层压力使地层流体侵入井筒。
2) 钻井液柱因地层流体侵入密度不足使地层流体速度加快。
3) 停泵时环空压耗消失，地层流体侵入井筒。
4) 起钻时钻头被泥浆包裹，抽汲作用导致溢流。
5) 邻井注水开发，导致地层流体侵入本井。
6) 起钻时未按规定补充钻井液，导致井筒液面下降或钻井液密度不足，地层流体侵入井筒。

对溢流的监测应从早期征兆着手，溢流的发生可以看到一些预兆或参数的变化，尽管预兆和参数的变化不一定确定有溢流发生，但可以确定有潜在的溢流存在。其征兆和参数变化[8]有：

1) 出口流量增加。
2) 钻井液池钻井液液面升高。
3) 钻井液性能变化。
4) 硫化氢浓度、烃类或氯根含量增高。
5) 起钻时井内流体外溢。
6) 停泵后钻井液外溢。

根据以上的分析，溢流监测的参数有钻压、转盘转速、泵速、泵压、钻井液参数、硫化氢浓度等，在这些参数中，选用与钻井液相关的参数变化来检测溢流，钻井液相关参数有总池体积、分离器液面、

井口导管液面、环空液面、密度、温度、流量、流速等，当地层流体侵入井筒时，会引起井内环空压力、温度和钻井液组分、性能的变化，从而导致钻井液的密度、温度和电导率的变化，可以利用这些参数进行随钻溢流监测。在此，选择钻井液的电导率作为参数采集对象进行系统设计。

电阻率是一种物理量，用于描述物质阻挡电流通过的能力。其单位是欧姆·米。电阻率的大小取决于物质的类型和状态，以及温度等因素。具体来说，液体的导电性主要取决于其离子浓度。例如，纯水的电阻率很高，而含有离子的水(如盐水)的电阻率则较低。因此，不同类型和浓度的液体侵入，会导致电阻率发生不同程度的变化。

在井内，已有液体的存在会影响电阻率的基线值。当新的液体侵入时，由于新液体的电阻率可能与已有液体的电阻率不同，因此，会导致井内的电阻率发生变化。这种变化可以被电阻率监测技术检测到，从而实现对液体侵入的监测。

由于钻铤内的钻井液未与井内环境接触，其电导率数据可作为参考，钻铤外壁上设计多组传感器采集井内钻井液数据，并与钻铤内钻井液数据进行差异比较，研究电阻率变化趋势进行溢流监测。

随钻溢流监测系统由 STM32F103C8T6 单片机主控模块、信号发生模块、电极片阵列、信号处理模块和 PC 机组成。

本设计通过信号发生电路产生 100 Hz 的双极性方波信号，双极性方波信号通过 STMF103C8T6 主控芯片控制 CD4052 通道选择芯片进入电极片阵列，信号放大电路接收电极片阵列返回的信号，对信号进行处理，将处理后的信号传入 STM32F103C8T6 单片机的 ADC 进行模数转换，最后将数据通过串口传入 PC 端进行图形化显示，从而直观地得到钻铤附近内外电压差，进而对随钻溢流实现监测，本设计的整体设计如图 1 所示。

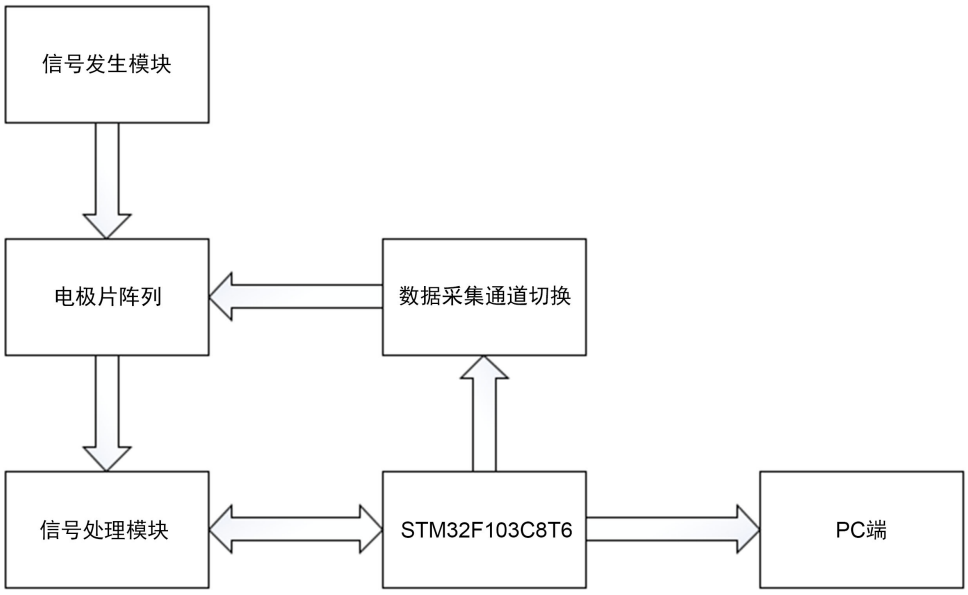

Figure 1. Overall block diagram
图 1. 整体框图

3. 系统硬件设计与实现

3.1. STM32F103C8T6 主控模块

主控模块选择 STM32F103C8T6 单片机作为主控芯片，它是一款由意法半导体生产的 32 位 ARM

Cortex-M3 内核的微控制器，具有主频可达 72 MHz、丰富的外设资源、低功耗、较大的存储空间、灵活的系统时钟、价格实惠、易于开发等优点。主控模块原理图如图 2 所示。

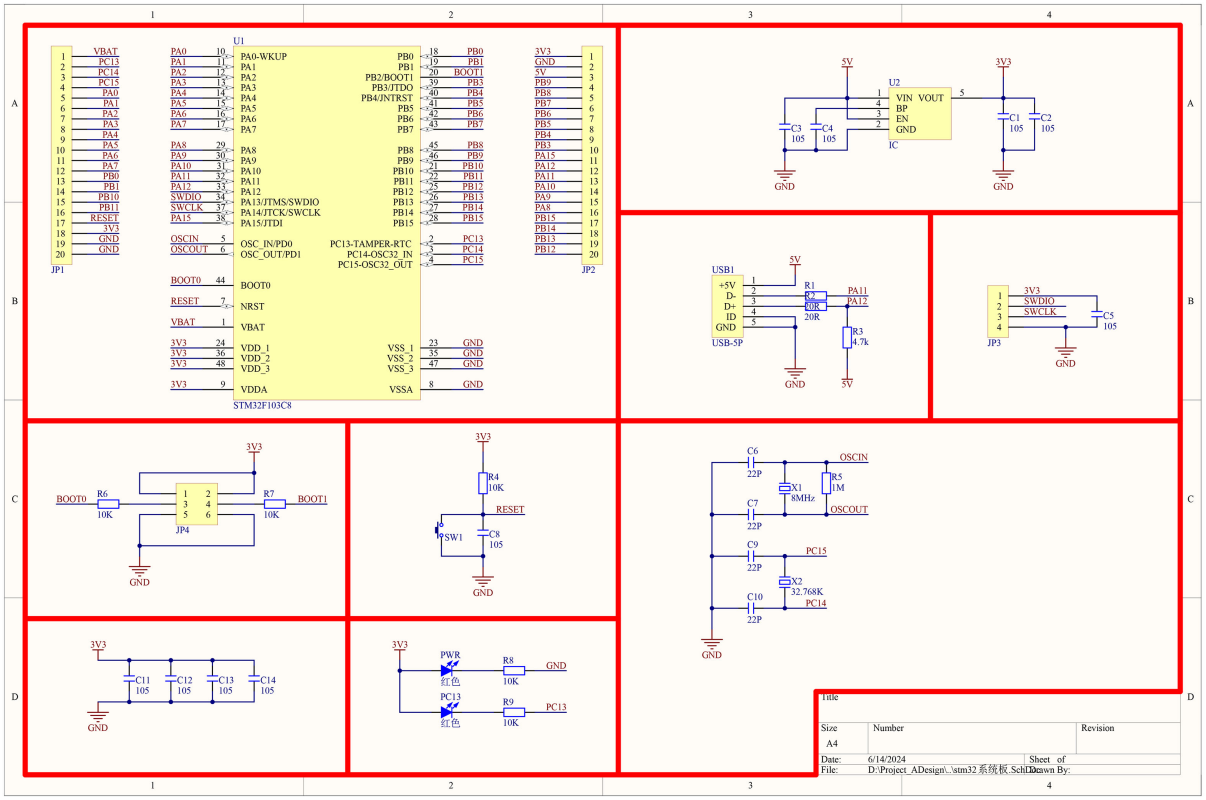

Figure 2. STM32F103C8T6 master module circuit diagram
图 2. STM32F103C8T6 主控模块电路图

3.2. 信号发生模块

文氏电桥振荡电路具有振荡稳定、波形良好、频率调节方便、选频特性、无需电感元件、高输入阻抗和高压摆率、负载能力强、稳幅功能等优点。因此，信号发生模块以文氏电路为基础改进，使之成为方波信号发生器。当电路通电后，RC 串并联网络开始对输入信号进行滤波，放大器的增益使得正反馈信号增强，当振荡频率近似谐振频率时，RC 串并联网络的相位移动近似为零，满足相位平衡条件，电路开始振荡，而负反馈网络确保振荡幅度不会无限增大，从而维持稳定的振荡。原理图如图 3 所示。

3.3. 电极片阵列

对于井下这种恶劣环境，为了使传感器能稳定工作，选用电极片阵列作为传感器，电极片阵列具有灵活性高、可扩展性、低功耗、易于制造、环境适应性强等优点。在医疗设备、环境监测、能源存储、通信技术等领域被广泛应用，电极片阵列为钻铤内壁 1 组、外壁 4 组，本设计电极片阵列如图 4 所示。

3.4. 信号处理模块

信号处理模块使用差分放大器，对输出的内壁和外壁两路信号分别连接到同向和反向输入端，输入端通过两个电阻连接到运放，输出端通过反馈电阻连接到反向输入端形成反馈电路。差分放大器具有输入阻抗高、输出阻抗低、增益大等优点。原理图如图 5 所示。

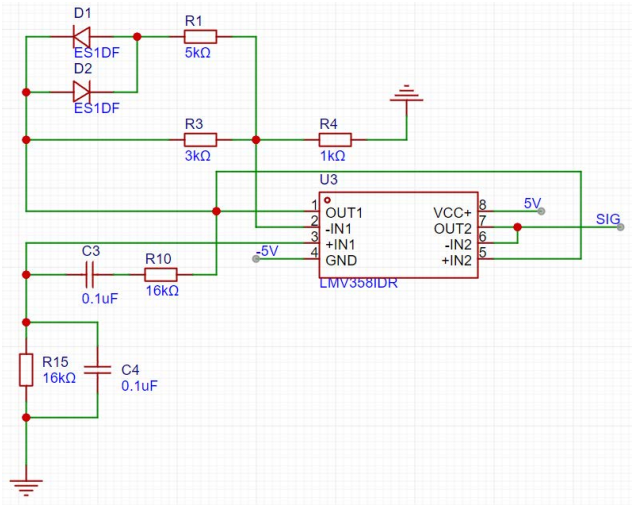

Figure 3. Signal generation circuit
图 3. 信号发生电路

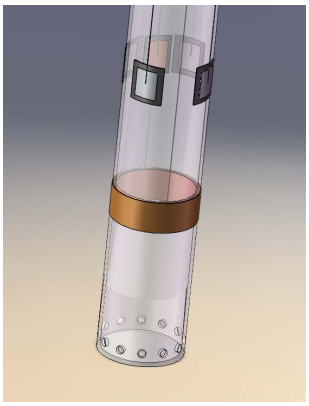

Figure 4. Electrode sheet array
图 4. 电极片阵列

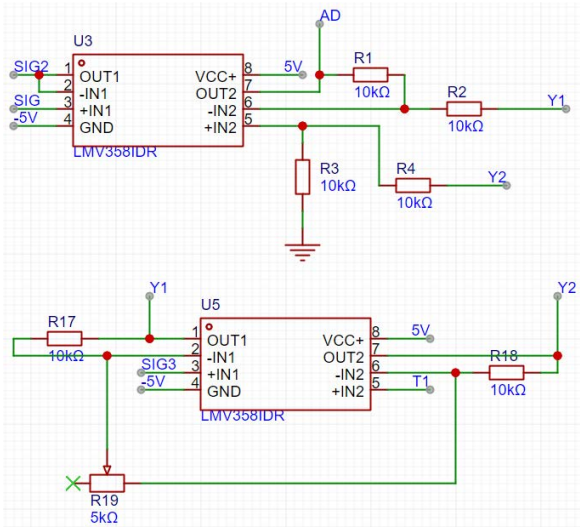

Figure 5. Signal processing circuit
图 5. 信号处理电路

3.5. PC 显示

通过信号处理模块后的信号直接送入 STM32F103C8T6 主控模块的 ADC 进行 AD 转化，并将转化后的数据通过串口送入 PC 端显示。PC 端通过串口绘图软件对 STM32F103C8T6 的串口送出的数据进行绘图，直观地体现出溢流状态，对溢流情况进行实时监测。软件界面如图 6 所示。

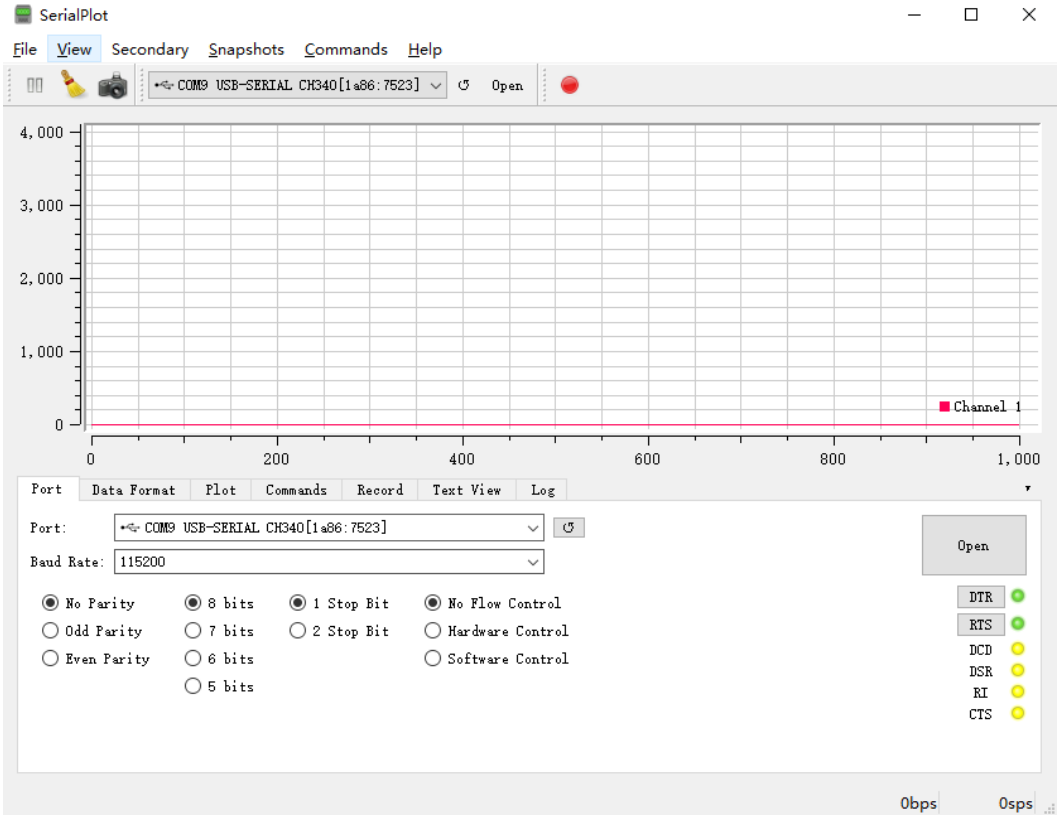

Figure 6. Software interface
图 6. 软件界面

4. 系统软件设计

随钻溢流监测系统软件设计主要包括定时器、监测通道切换、ADC、串口传输。其中，定时器设定采集一组数据的间隔时间，监测通道切换设定监测外壁电极片阵列的组别，ADC 将信号处理模块传入 STM32F103C8T6 的模拟信号转化为数字信号，串口传输将 AD 转化的数字信号传入 PC 端。

4.1. 编程环境

编程环境使用 Keil MDK-ARM 与 STM32CubeMX 结合的方式开发。Keil 是一个用于 ARM 微控制器的集成开发环境，拥有完整的工具链，便于开发、调试和优化嵌入式应用程序。STM32CubeMX 是 STMicroelectronics (意法半导体)提供的一个图形化配置工具，拥有直观的图形用户界面，可通过需求点击选取配置 STM32F103C8T6 的硬件特性，例如 GPIO 口、ADC、串口、中断、时钟系统等，选择完成后 STM32CubeMX 可以自动生成初始化代码和配置文件，大大减少了手动编写配置代码的工作量，减少了手动配置时可能引入的错误，不会花费大量时间在调试硬件配置上，显著减少了项目的准备时间，提高了开发效率，并且更易于后期的维护与升级。

4.2. 数据的采集与处理

电极片阵列的数据在经过数据处理模块后传入 STM32F103C8T6 的 ADC 进行模数转化。

ADC 数据采集模块设计：

STM32F103C8T6 包括 3 个独立的模拟数字转换器(ADC)模块，每个模块都可以独立工作，且每个 ADC 模块提供 12 位的分辨率，可以将 0~3.3 V 的模拟电压信号转化为 4096 (2^{12})个不同的数字级别。在 STM32CubeMX 中配置好定时器，采样频率为 2 KHz，配置 ADC 选用 PA1、PA2、PA3、PA4 这 4 个通道接收信号处理电路处理的信号，采样时间为 1.5 个时钟周期。采集流程图如图 7 所示。

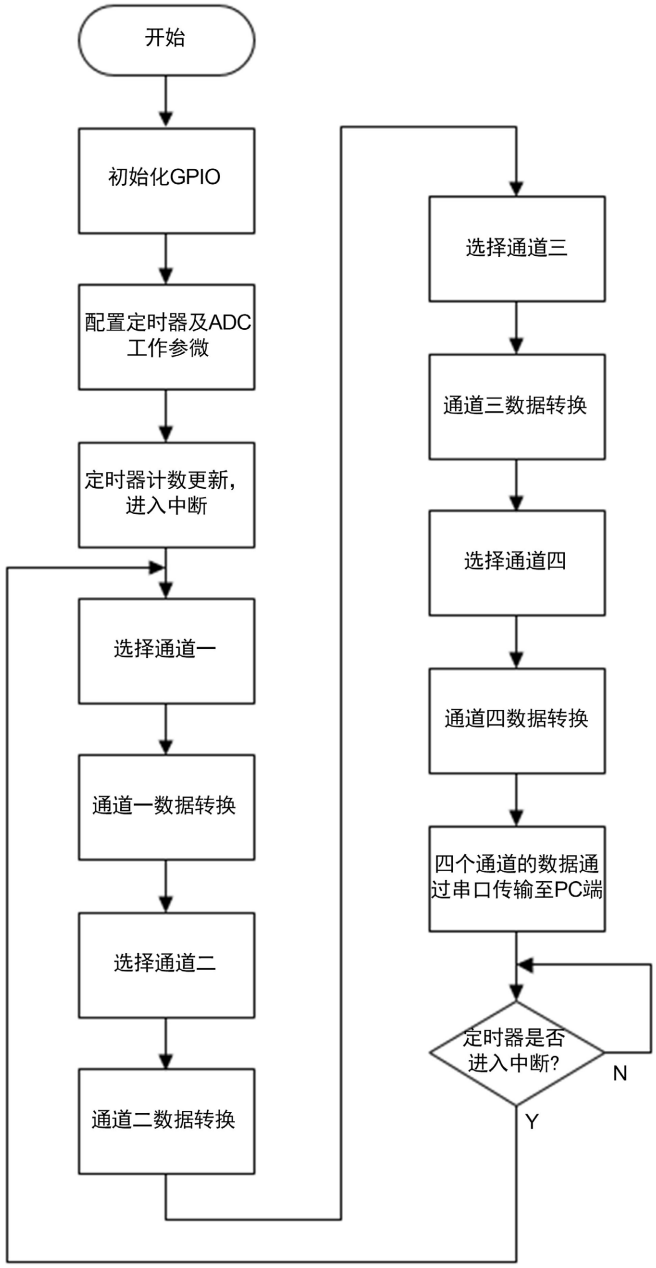

Figure 7. ADC data acquisition module flowchart
图 7. ADC 数据采集模块流程图

4.3. 程序设计

基于 STM32 单片机的随钻溢流监测系统设计，需要进行软件设计部分的实现。以下是该设计的软件设计部分的主要内容。

首先需要对整个系统进行初始化，其中包括 STM32 单片机的时钟初始化、引脚外设的配置等，同时，信号发生模块开始振荡，产生的方波信号通过通道选择芯片传入电极片阵列，返回的采集信号通过信号处理电路处理完后传入 STM32 单片机进行模数转换，单片机采集完一组四个数据后，最终通过串口传入 PC 端，使用软件将电压差值图形化显示。该随钻溢流监测系统的程序流程图如图 8 所示。

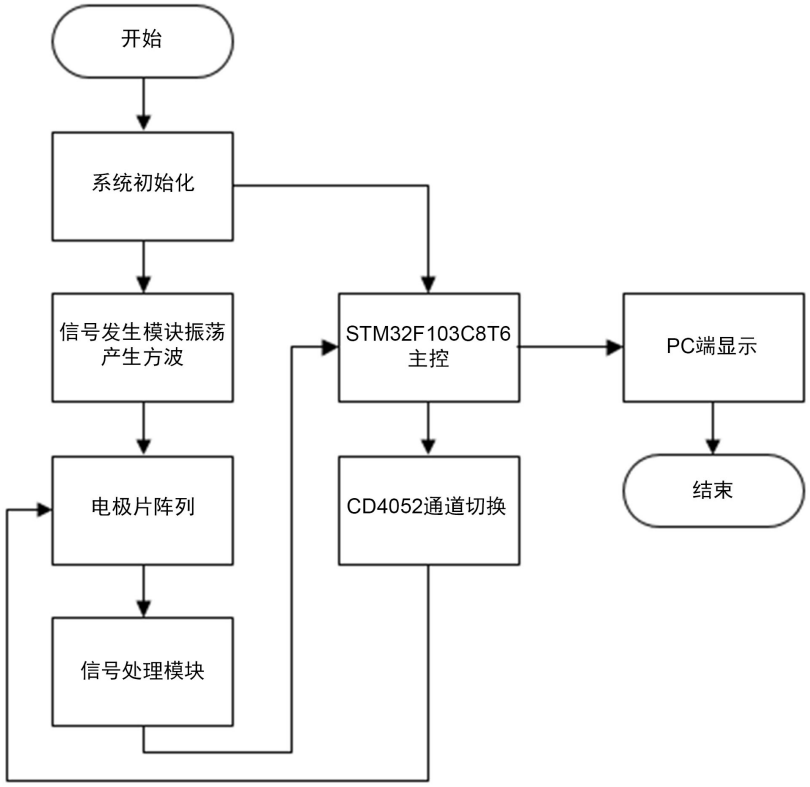

Figure 8. Program flowchart
图 8. 程序流程图

5. 系统测试与分析

首先在自来水中观察系统初始状态，由于模拟钻铤的亚克力圆柱管直径较短，导致实际工况为外壁的电极片是垂直方向贴附在钻铤的外壁上，内壁的电极片是水平方向面对面贴附在钻铤的内壁上，因此内壁电极片与外壁电极片的实际形态不同，两者在水体中均体现出电容的特性，由于电极片组的形态不一致，导致其特性也出现差异，如图 9 所示。

对信号进行半波整流后得到未出现液体溢流时的系统监测图像，如图 10 所示。

此时，模拟液体侵入时的情况，调制溶质为 20 g 食盐，溶剂为 380 g 自来水的盐水，以 10 g/s 的速度通过管道匀速侵入井筒底部，得到出现液体溢流时的系统监测图像，如图 11 所示。

通过 STM32F103C8T6 主控系统串口传输的实验采集数据汇总分析，如表 1 所示。

将数据所有实验数据综合为趋势图，如图 12 所示。

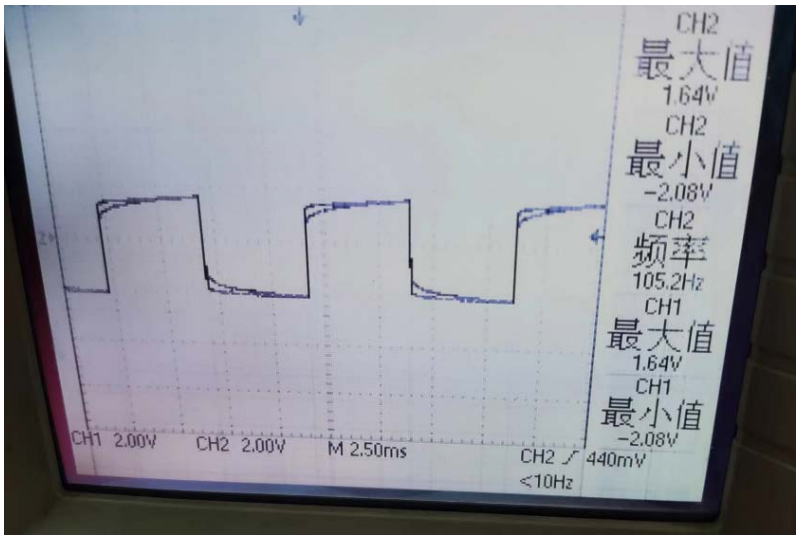

Figure 9. Difference in characteristics between inner and outer electrode sheet sets
图 9. 内外壁电极片组特性差异

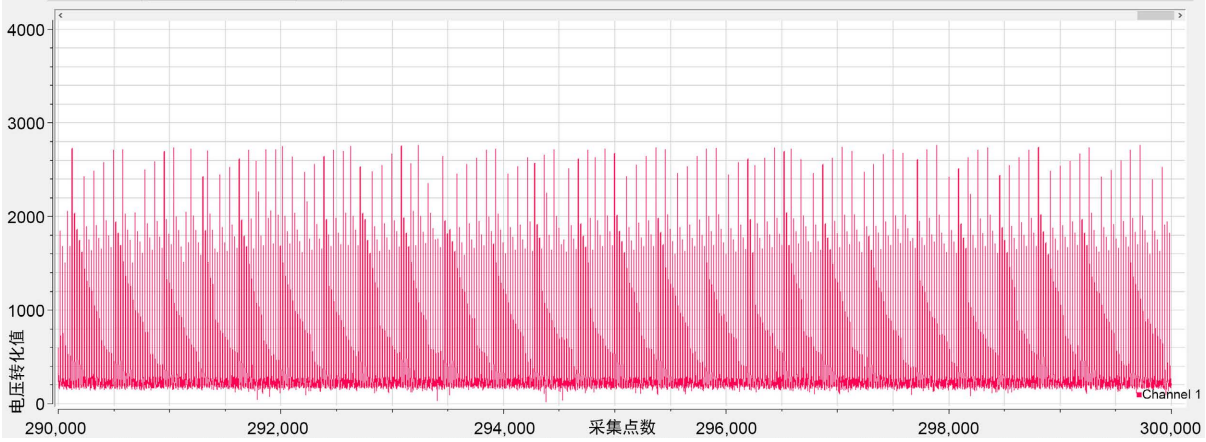

Figure 10. System monitoring image without overflow
图 10. 未出现溢流的系统监测图像

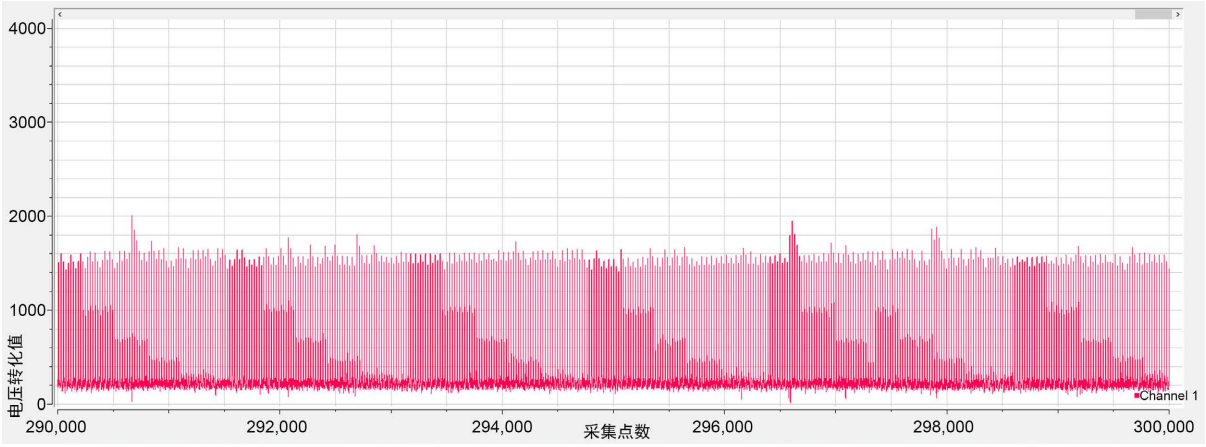

Figure 11. System monitoring image with overflow
图 11. 出现溢流的系统监测图像

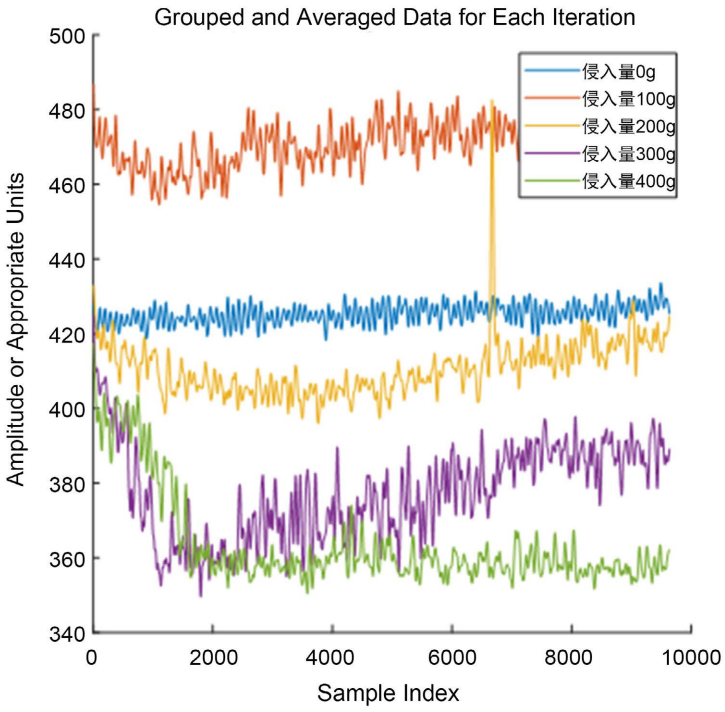

Figure 12. Trend chart of stress difference between inner and outer walls under intrusion conditions
图 12. 侵入条件下内外壁电压差趋势图

Table 1. Raw experimental data
表 1. 原始实验数据

侵入量	采样点	内外壁差最大值	稿内外壁差最小值	稿内外壁差均值	持续测量时间
0 g	300,000	533.2272727	351.4545455	428.5114768	136.36 秒
100 g	300,000	590.6818182	397.5	474.1560881	136.36 秒
200 g	300,000	954.4545455	337.7272727	412.514771	136.36 秒
300 g	300,000	724.7727273	309.8636364	379.9812351	136.36 秒
400 g	300,000	522.1818182	264.0454545	366.9454215	136.36 秒

通过测试结果的分析和总结，我们可以得出以下结论：

随着液体的不断侵入，外壁的电极片组的电阻率降低，分压减少，此时外壁电极片组与内壁电极片组的电压差值峰值减小，随着时间的推移，在侵入完成之前，电压差峰值还将不断减小。随着溢流液体的侵入，外壁液体测量的电阻率变小，内壁液体测量的电阻率不变，因此通过算法平滑后的电阻率差值曲线明显反映出这个过程，即有段下降过程。随着溶液的少量溶解，内壁溶液的电阻率发生少量变化，所以电阻率差值曲线呈现出先降后少量回升的过程。通过累计不同的侵入量，可以明显看出侵入量越多，内外壁电阻率差值越大。在注有 19 kg 自来水的模拟井筒中模拟侵入 400 g 盐水，从 PC 端的图形化显示界面可清晰监测到溢流发生的全过程，随钻溢流监测系统初步完成。

6. 结语

本文研究与实验设计了基于 STM32F103C8T6 单片机的随钻溢流监测系统，通过信号发生电路输出

激励信号，输入电极片阵列采集数据，经过电极片阵列输出的采集信号传入信号处理电路，完成处理传入单片机进行 AD 转换，最后通过串口传入 PC 端进行图形化显示。

在实际测试中发现，电极片组的形状对信号影响较大，由于本次实验初期选择的模拟井筒直径较小，内壁的电极片组是在同一水平线上对称贴附，后期考虑更换直径更大的亚克力圆柱通管模拟钻铤，使得内壁的电极片组与外壁的电极片组贴附形态大致一致，让电极片组的特性相近。

目前，随钻溢流监测系统设计取得了阶段性成果，后期仍需改进，目前的实验条件是在实验室环境下使用自来水模拟钻井液，后期需要加入钻井液循环系统并使用钻井液在高温高压模拟真实环境的情况进行实验。随钻溢流监测系统可大幅提升溢流工况监测的实时性，有效保障了钻井作业人员的生命安全。

参考文献

[1] 刘洪林, 王红岩. 非常规油气资源发展现状及关键问题[J]. 天然气工业, 2009, 29(9): 113-116.

[2] 黄兵, 石晓兵, 李枝林, 等. 控压钻井技术研究与应用新进展[J]. 钻采工艺, 2010, 33(5): 1-4.

[3] 黄昌武. 2012 年国际石油十大科技进展[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(2): 225.

[4] 陈平, 马天寿. 深水钻井溢流早期监测技术研究现状[J]. 石油学报, 2014, 35(3): 602-612.

[5] 毕博. 深水钻井溢流早期监测技术研究现状[J]. 化工管理, 2016(30): 76.

[6] 周强, 张志东, 李淼, 等. 早期溢流监测方法[J]. 油气田地面工程, 2012, 31(3): 72-73.

[7] 陈庭根, 管志川, 主编. 钻井工程理论与技术[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.

[8] 张振峰, 梅大成, 陈彩华. 基于 SOPC 的井喷预测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(6): 1073-1076.