

# 基于 MQTT 的多协议注水井物联网采集终端的设计与实现

高星星<sup>1</sup>, 任 浪<sup>1</sup>, 王海东<sup>2</sup>, 龚红毫<sup>1</sup>, 孙宇杰<sup>1</sup>

(1. 延长油田股份有限公司志丹采油厂, 陕西 延安 717500;

2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:**针对油田传统工控模式的层级多、设备多、传输效率低以及当前注水物联网采集终端存在的协议不统一、解析繁琐等问题,设计了一种基于 MQTT 的兼容多种协议的注水井物联网采集终端,实现了生产数据的高效采集及运维管理的综合提升。采集终端包括硬件和嵌入式软件 2 部分,其中硬件部分主要包括数据采集、通信联网、存储、供电及调试模块等;软件部分在嵌入式实时操作系统(RT-Thread)的基础上进行开发,通过数据采集、流量修改、数据传输和参数配置等线程来实现多协议数据自动采集和远程调配功能。此外,该终端还运用边缘计算来实现注水井的智能预警功能,并通过 OTA 技术来实现采集终端系统的远程升级。

**关键词:**MQTT; 采集终端; 线程; 边缘计算; 远程升级

中图分类号:TP391

文章编号:1000-0682(2025)02-0026-06

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.02.005

## Design and implementation of multi-protocol water injection well Internet of Things acquisition terminal based on MQTT

GAO Xingxing<sup>1</sup>, REN Lang<sup>1</sup>, WANG Haidong<sup>2</sup>, GONG Honghao<sup>1</sup>, SUN Yujie<sup>1</sup>

(1. Zhidan Oil Production Plant, Yanchang Oilfield Co., LTD., Shaanxi Yan'an 717500, China;

2. Shanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., LTD., Shaanxi Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In view of the problems of multiple levels, multiple equipment and low transmission efficiency in the traditional oilfield industrial control mode, as well as the protocol inconsistencies and cumbersome analysis in the current water injection Internet of Things acquisition terminal, this study designed an MQTT-based Internet of Things acquisition terminal compatible with multiple protocols for water injection Wells, which realized the efficient collection of production data and the comprehensive improvement of operation and maintenance management. The acquisition terminal includes two parts: hardware and embedded software. The hardware part mainly includes data acquisition, communication networking, storage, power supply and debugging module. The software part is developed on the basis of embedded real-time operating system (RT-Thread), and realizes multi-protocol data automatic collection and remote deployment through data collection, traffic modification, data transmission and parameter configuration threads. In addition, the terminal also uses edge computing to realize the intelligent early warning function of the injection well, and realizes the remote upgrade of the acquisition terminal system through OTA technology.

**Keywords:** MQTT; acquisition terminal; threads; edge computing; remote upgrade

## 0 引言

收稿日期:2024-07-19

第一作者:高星星(1983—),男,陕西延安人,工程师,主要从事油田数字化建设工作。E-mail:42108169@qq.com

当前,数字化浪潮正在席卷全球,传统行业正在加速数字化转型,石油行业也不例外。而油气生产

领域作为石油行业的核心环节,进行数字化转型尤为关键。物联网采集终端作为油田数字化系统中的入口,承担着各类生产数据采集、传输以及远程控制的任务,更是发挥着极其重要的作用。

当前,国内大部分油田在数字化建设方面仍都采用传统工控模式,即通过现场专业网络将油水井的各类数据实时传送至 RTU,再通过站点 SCADA 系统进行汇聚后存储在场站数据库中,厂区中心机房需要定期从场站数据库中同步数据,实现对多个场站的数据汇聚。但随着数十年的运行,该模式逐渐显现出各类问题,如设备层级多、维护点多;厂区中心无法得到实时数据,无法对场站进行实时管控;数据传输环节多、传输效率低,主机主动轮询模式导致效率低等;加之,当前注水物联网采集终端存在协议解析繁琐、容纳注水井数量有限,仪表厂家使用协议众多、不统一等问题;致使后期运维难度大、成本高,制约了企业数字化转型步伐。针对以上问题,设

计研发一套基于 MQTT 的兼容多协议的注水井物联网采集终端,实现传输效率高、层级减少、实时管控的目标,从而有效降低建设及运维成本。同时,也为国内油田行业物联网技术的创新应用做出有益探索和重要实践。

## 1 系统设计

基于 MQTT 的油田注水井物联网采集终端关联智能注水仪及数字压力表,实现注水井数据自动采集,远程调配等功能。采集终端系统结构如图 1 所示。采集终端安装在配水间内,通过 RS485 通信总线轮询采集注水井的各项数据,处理后以 MQTT 协议加密上传至 EMQ 服务器。EMQ 服务器将数据存储至时序数据库中,供应用平台调用。应用平台通过 MQTT 协议下达指令至 EMQ 服务器,服务器转发指令给物联网终端执行注水井调配操作。

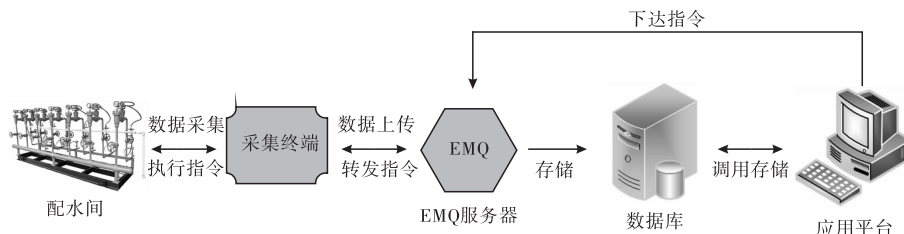


图 1 采集终端系统结构图

## 2 硬件设计

### 2.1 硬件设计架构

硬件设计架构如图 2 所示,终端的主控芯片处理器 MCU 采用 Cortex - M7 架构主流芯片,高性能、低功耗、集成度强;外围搭建 RS485 通信模块、W5500 以太网模块、E103 - W10 Wi - Fi 模块、W25Q64 和 AT24C02 存储模块、供电模块、程序下载等模块。联网设计采用 Wi - Fi 或以太网接口连接 EMQX 服务器,订阅主题,经 MCU 处理后,发布 MQTT 消息。采集从机数据采用 RS485 通信接口,通过 Modbus 协议关联 MCU 及下位机现场仪表设备,读写数据。上位机通过 USB 接口下载、调试主程序。挂载外部 FLASH( AT24C02 及 W25Q64) 设置存储系统参数。Bootloader 及 OTA 支持 MCU 远程升级。

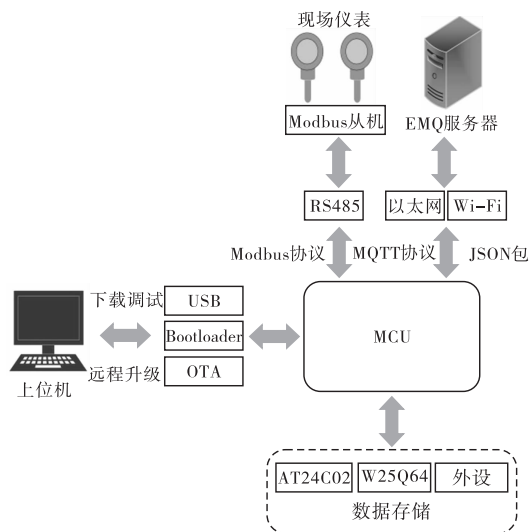


图 2 硬件设计架构图

### 2.2 硬件电路设计

#### 2.2.1 主控芯片

主控芯片为 STM32H743VIT6 芯片,采用 32 位 ARM® Cortex® - M7 内核,运行频率高达 480 MHz, Cortex® - M7 内核具有浮点运算单元(FPU),支持 Arm®双精度(符合 IEEE 754)和单精度数据处理

指令和数据类型,同时还提供高达 2 MB 的片上闪存和高达 1 MB 的 RAMZ (包括 192 KB 的 TCM RAM、高达 864 KB 的用户 SRAM 和 4 KB 的备份 SRAM),以及连接到 APB 总线、AHB 总线、 $2 \times 32$  位多 AHB 总线矩阵和支持内部和外部存储器访问的多层 AXI 互连的多种增强型 I/O 和外设。

### 2.2.2 RS485 通信模块的设计

基于 RS485 的通信模块,连接主芯片的串口 3,通过 485\_RE 引脚控制数据的收发,与 Modbus 从机通信,读写数据(如图 3 所示)。

### 2.2.3 联网模块的设计

联网模块的设计上因考虑到井场都有无线网络覆盖,加之安装简单、灵活性好等优势,在终端加装

E103-W10 Wi-Fi 模块。其中,W5500 模块电路通过 SP2\_SCS 片选挂载在主芯片的 SP2 总线上,Wi-Fi 模块连接主芯片的串口 4 端,通过 Wi-Fi\_EN 引脚控制收发数据(如图 3 所示)。2 个模块主要功能为提供连接互联网作用,确保数据上传至服务器。

### 2.2.4 存储模块的设计

存储模块以 W25Q64 模块和 AT24C02 模块为主。其中 W25Q64 模块拥有 8 MB 存储空间,通过 W25\_CS 引脚挂载至主芯片的 SPI1 总线上,AT24C02 模块提供 2048 位的电可擦和可编程只读存储器(EEPROM),组织为 256,8 位字,连接主芯片的 IIC 端。2 个模块用于存放设备联网数据及采集过程中各类参数的保存与设定(如图 3 所示)。

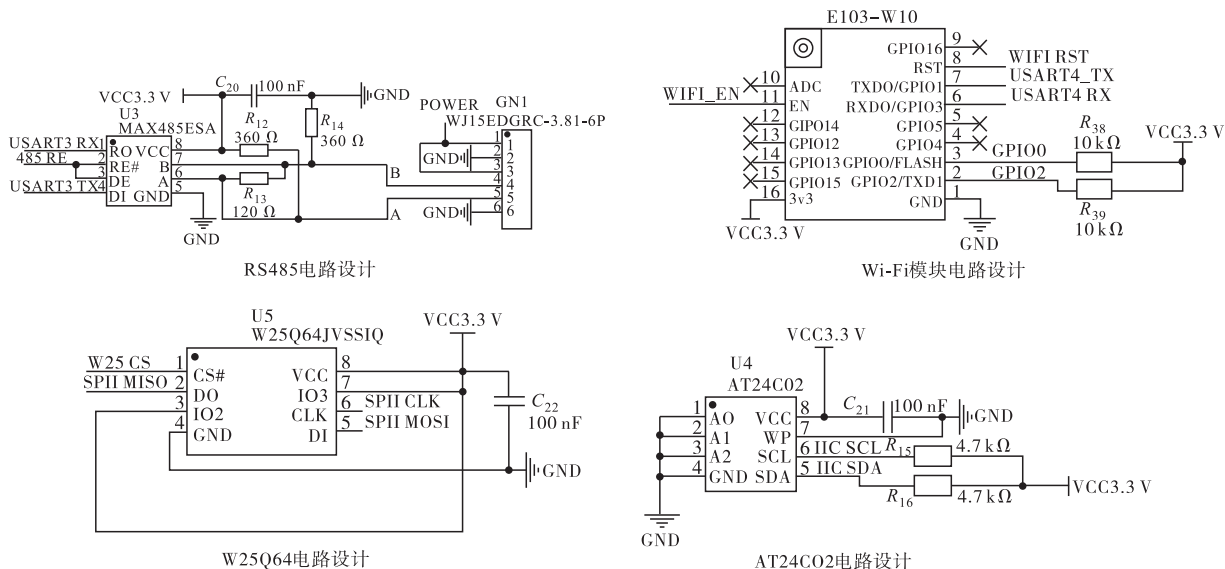


图 3 通信、联网、存储电路设计图

### 2.2.5 供电及调试模块的设计

供电模块电路为主芯片提供稳定的 3.3 V 供电,程序下载模块连接主芯片的串口 1,用于串口调试,连接 CH340 模块,用于上位机下载主程序至芯片。

## 3 终端软件设计

RT-Thread 是一款实时多线程操作系统,代码完全开源,具备高度模块化及较好的可裁剪性,支持用户自定义设置系统配置项目,同时还具有丰富的中间层和上层软件包。RT-Thread 主要采用 C 语言编写,浅显易懂,方便移植,具有极小内核、稳定可靠、简单易用、高度可伸缩、组件丰富等特点。

软件设计是基于国产嵌入式实时操作系统(RT-Thread)进行开发,流程图如图 4 所示。系统先进行串口、联网、存储、参数、看门狗的初始化,进行联网,DCHP 自动获取网络服务。获取 ip 地址成功后,

配置 MQTT 参数,连接 MQTT 服务器,配置上传数据主题、下发指令主题、断线重连、心跳包等参数。MQTT 服务器连接成功后,初始化 MQTT 服务、Modbus 监听、注水井数据采集、注水井数据发送主线程。根据线程优先级运行线程,首先运行优先级相对高的线程,调用线程处理函数,运行结束后按优先级顺序运行低优先级线程。

### 3.1 软件驱动设置

程序基于 STM32H743VIT6 内核架构及硬件电路,利用嵌入式实时多线程操作系统开发,移植 UART, SPI, I<sup>2</sup>C, WDT, RTC, FLASH, FreeModbus, KAWAII-MQTT, 数据采集, Modbus 轮询, Modbus 监听, MQTT 发送数据及配置参数等驱动并初始化。基于 E103-W10 芯片,添加 AT 组件、AT-DVICE 软件包,关联 UART2 外设接口,配置引脚,启动自动联网,设备可通过内外网连接服务器。基于 RS485

硬件电路,添加 FreeModbus 软件包,配置 CS 引脚,启动 ModbusRTU 主机模式,设备可读写注水井数据。添加 MQTT 驱动,配置服务器地址、用户名、主题等参数,连接 EMQX 服务器及主题。

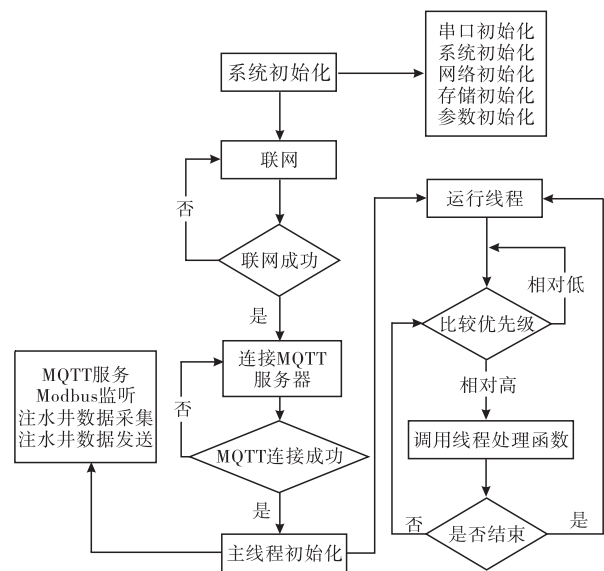


图 4 注水井物联网终端软件运行流程图

3.2 多厂家协议通用采集的实现

3.2.1 仪表厂家通信协议现状

注水井数据采集控制设备主要包括智能注水仪表、数字压力表,经现场及设备厂家调研,稳流阀组间主流厂家有西安国仪、西安恒力、浙江精华、上海一诺等,技术一直停留在传统工业控制领域,通信采用的是 RS485A/B 接口,通信协议为 Modbus – RTU 协议,个别采用自定义协议(见表 1)。

表 1 主流厂家通信协议表

厂家	通信协议	通信参数	数据格式
西安国仪	Modbus – RTU	9600,8,1,N	HEX
西安恒力	Modbus – RTU	9600,8,1,N	BCD
浙江精华	Modbus – RTU	9600,8,1,E	BCD
上海一诺	自定义	600,8,2,N	BCD

通信可读取的数据为:瞬时流量、累计流量、设定流量、压力,可写入的数据为:设定流量,各厂家数据地址不同(见表 2)。

表 2 主流厂家通信协议数据地址表

厂家	瞬时流量地址	累计流量地址	设定流量地址	压力地址
西安国仪	40002	40003 ~ 40004	40005	40001
西安恒力	40003	40004 ~ 40005	40006	40007
浙江精华	40003	40004 ~ 40005	40006	40007
上海一诺	2 ~ 3	6 ~ 10	4 ~ 5	11 ~ 14

3.2.2 数据读写格式

以西安恒力注水仪表为例,数据通信由主机发起,主机首先发送 RTU 消息帧,消息帧发送至少要以 3.5 个字符时间的停顿间隔开始。传输的第 1 个字节是设备地址。可以使用的传输字符是十六进制

的 0 ~ 9 和 A ~ F。整个消息帧必须作为一连续的流传输。以读取仪表瞬时流量、累计流量及设定流量为例。

查看瞬时流量,累积流量,设定流量,需发送:

设备地址	功能代码	地址 1	地址 0	数据 1	数据 0	CRC
01h	03h	00h	01h	00h	06h	9408h

从机回应:

设备地址	功能代码	长度	控制状态	工作模式
01h	03h	0Ch	0000h	0000h
瞬时流量 (BCD 码)	累积流量高位 (BCD 码)	累积流量低位(BCD 码)	设定流量 (BCD 码)	CRC
0123h	1234h	5678h	0300	63a9h

3.3 主要线程的设计

3.3.1 注水井多协议数据采集线程及流量设定线程

程序初始化后,运行注水井多协议数据采集线程,判断配水间的类型,对微型配水间及稳流阀组间

判断处理。如果是稳流阀组间,判断注水仪及压力表对应厂家协议,进行 Modbus 从机轮询采集数据;若是微型阀组间,则对应 Modbus 协议采集数据。Modbus 轮询线程不断采集注水流量计及压力表从机数据,采集间隔 50 ms,Modbus 监听线程校验注



水仪表返回数据格式,将正确数据存储(如图 5 所示)。

当接收到服务器下发设置对应注水流量计设定流量时,根据协议校验数据格式,给对应从机发送写数据命令,修改设定流量。

### 3.3.2 注水井数据传输线程

数据传输线程,根据设定的注水井数量和上传数据周期,将各注水井对应瞬时流量、累计流量、设定流量、出口压力、分水器压力打包成 JSON 数据包(见表 3),TLS 加密发布消息至 EMQX 服务器对应主题,等待上传数据周期后循环唤醒数据传输线程。

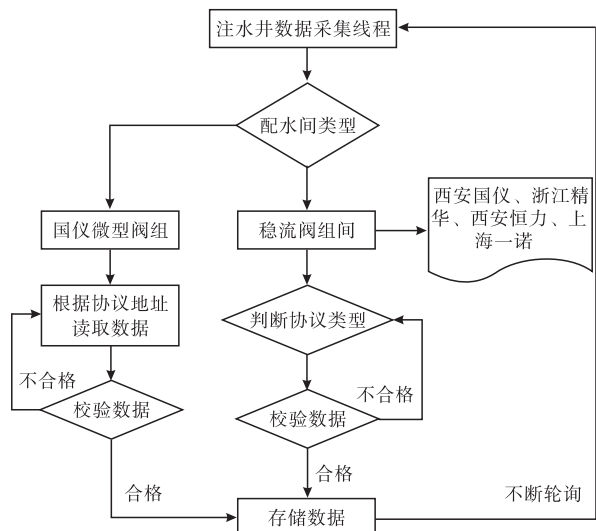


图 5 注水井多协议数据采集线程流程图

表 3 注水井物联网终端软件数据上传包结构表

名称	JSON 名称	数据类型	JSON 包示例
配水间 ID	clientid	String	{
注水井号	ybadress	Int	"clientid": distrib_room001,
瞬时流量	instant_flow	Float	"ybadress": 6,
累计流量	cumulat_flow	Float	"instant_flow": 0.31,
设定流量	setting_flow	Float	"cumulat_flow": 6446.8,
注水井压力	waterwell_pres	Float	"setting_flow": 0.63,
配水间压力	distrib_room_pres	Float	"waterwell_pres": 5.37,
			"distrib_room_pres": 9.94

### 3.3.3 注水井参数配置线程

参数配置程序分网络及串口配置 2 种形式,注水井物联网终端通过订阅 MQTT 配置参数主题,等待服务器或客户端下发对应主题的消息包;通过配置串口命令线程,不断监听串口数据,等待消息。一旦收到串口或者 MQTT 配置参数主题的对应消息,程序进入中断,串口监听函数或者主题回调函数根据 JSON 消息包数据名称及类型解析数据,配置配水间类型,注水井数,注水仪表、压力表厂家类型,采

集周期,设定流量等参数。待参数配置完成后,恢复主程序(如图 6 所示)。

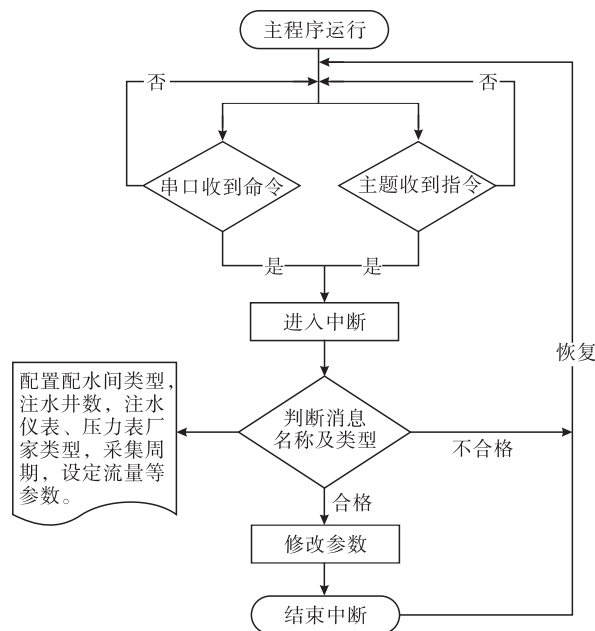


图 6 注水井参数配置线程流程图

### 3.4 基于边缘计算的注水井智能预警

边缘计算是一种将数据处理和分析功能放置在接近数据源的边缘设备上的计算模式。在油田注水井监测中,该物联网终端可实时采集各类注水仪表数据,并通过边缘计算进行实时分析和处理,降低数据传输延迟,提高系统响应速度。根据实时采集的数据,基于 RT-Thread 操作系统设计智能预警算法模型,通过监测注水井压力变化的历史数据,设置压力波动阈值 $[p_{\max}, p_{\min}]$ ,判断当前注水井的管压 $p_{\text{当}} < p_{\min}$ ,则诊断为注水汇管管线穿孔,则直接上报服务器进行预警;若当前管压 $p_{\text{当}}$ 接近 0 时,则诊断为注水泵停泵,则立即关闭注水精注仪,防止管线内水倒流。

### 3.5 软件远程升级

OTA 固件更新远程升级功能已在嵌入式设备中被广泛应用,可在不需要任何物理连接的情况下实现对设备端固件进行软件更新与升级。在该终端中先将需要升级的软件包上传至服务器中,再采用无线网络方式将升级数据包下载到 Flash,然后通过 bootloader 对 OTA 固件进行校验、解密并将下载得到的数据包搬运到 MCU 的 APP 区域进行覆盖,完成终端软件的升级更新功能。

## 4 试验效果

自 2023 年 6 月开始,注水井物联网终端已陆续

安装 14 套,随着终端程序的修复完善,现场试验已稳定运行至今,数据采集无误。为方便跟踪运行状态,将每口注水井数据上报间隔设置为 10 s。2 套采用光纤接入方式,12 套采用 Wi-Fi 网络接入,未出现掉线情况,平稳运行。

## 5 结论

基于 MQTT 协议的注水井物联网采集终端在硬件上以 STM32H743VIT6 为主控芯片,集成了 RS485 通信、联网、存储以及供电和程序下载模块。在移植 RT-Thread 实时嵌入式操作系统的基础上进行软件开发,按实现功能进行分步设计,实现了数据采集、远程控制及参数配置等功能。同时,OTA 固件更新功能可对物联网设备进行远程软件升级,无需进行现场升级。通过近 1 年的现场试验,该终端具有以下特点:

(1) 根据 Modbus 标准协议,针对不同厂家型号注水仪表、压力表通信协议,进行程序设计开发,实现多厂家协议通用采集;

(2) 联网模式自由,可通过局域网、Wi-Fi 和 4G 等多种模式接入内网;

(3) 采用主动上报代替轮询问答模式,降低服务器负担,提高采集效率;

(4) 可通过 OTA 实现网络远程下发配置与固件升级。

综上所述,该终端因具有兼容各类协议、联网模式自由、远程升级、轻量化、低功耗及低成本的优势,解决了油田工控模式下采集传输层的层级多、设备多、传输效率低以及厂区无法对现场进行实时管控等问题,下一步在保障该终端稳定运行的同时,将持续升级物联网终端,扩充协议,加入屏幕以实现数据就地显示;根据注水井的累计注水量和瞬时流量等数据,加入一种基于边缘算法的注水井智能欠注补

调技术,最终形成一套稳定性好、成本低且更加智能的注水物联网终端系统。

### 参考文献:

- [1] 周利娜,周建平,许燕,等. 基于 STM32F103C8T6 和 ZigBee 的油井压力监控系统研究[J]. 物联网技术, 2014(06):38-41.
- [2] 孙国宝,周继伟. 物联网技术在智能油气田井场数字化建设中的应用[J]. 信息系统工程, 2021, 10:16-18.
- [3] 罗玉海,王椿曦,熊正烨. 基于鸿蒙系统和 OTA 技术的农业大棚测控系统[J]. 现代农业装备, 2023, 06:52-55.
- [4] 吴征,喻支乾. 基于 Modbus 通信协议变频器速度给定系统的改造及设计[J]. 山东化工, 2020, 49(11):157-161.
- [5] 朱铝芬,吕国芳. 新拌混凝土测试系统的 Modbus-RTU 多从站设计[J]. 电子设计工程, 2014(13):96-99.
- [6] 方舟. 油田数字化建设中物联网技术的应用[J]. 化工设计通信, 2021, 47(06):11-12.
- [7] 姚晓英,熊星源,秦梦文,等. 基于 STM32 平台的校园智能电子学生笔记本的设计与实现[J]. 物联网技术, 2023(12):131-134.
- [8] 马后权,施华君. 实时操作系统 RT-Thread Smart 在 STM32MP1 上的移植[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21(8):14-18.
- [9] 叶康林,肖逸军,郑骏伟,等. 基于边缘计算的物网技术在智能油气田中的应用研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(02):35-36+38.
- [10] 刘翌新,谢婧婷,李小松. 基于 MQTT 协议的营运车辆安全预警提示装置[J]. 物联网技术, 2024(4):146-149.
- [11] 杨怡,韦炳宇,张志明. 基于 RT-Thread 的多智能体节点小车设计[J]. 制造业自动化, 2024(3):204-207.

# 欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎刊登广告!

国内邮发代号:52-49 国际发行代号:BM529 定价:18.00 元/期 108.00 元/年  
地址:西安市高新区沣惠南路 8 号 邮编:710075 电话:029-81871277  
网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com> 电子邮箱: [gyybbjb@126.com](mailto:gyybbjb@126.com)