

注水井油套压一体式 Wi-Fi 仪表的设计与实现

单旭光,陈争胜,朱星星,张探探,王延峰

(延长油田股份有限公司志丹采油厂,陕西 延安 717500)

摘要:注水井油套压采集是油田开发过程中的一项重要工作,结合冬季冻堵导致采集不准确和设备易损等问题,在仪表软硬件设计及安装结构方面进行创新,硬件采用 ESP32-WROOM-32UE 高性能微处理器芯片作为主控芯片,配备 2.0 寸 LCD 显示屏,搭载 FreeRTOS 实时操作系统,采用多线程开发,通过两路 IIC 接口,并行采集油管和套管两组温压数据,实现油管和套管两组温压数据的一体化采集。原始数据经过清洗、预警等边缘计算算法处理后,由 Wi-Fi 通过 MQTT 协议发到服务器,存储至时序数据库,实现数据的远程采集。安装方案通过将传感器植入至注水管线以达到消除易冻堵段的目的,实现防冻功能。

关键词:油套压;MQTT;防冻;ESP32;边缘计算;智能仪表

中图分类号:TE937

文章编号:1000-0682(2025)01-0083-05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.01.015

Design and implementation of integrated Wi-Fi instrument for oil jacket pressure in water injection well

SHAN Xuguang, CHEN Zhengsheng, ZHU Xingxing, ZHANG Tantan, WANG Yanfeng

(Zhidan oil production plant, Yanchang Oilfield Co., LTD., Shaanxi Yan'an 717500, China)

Abstract: The acquisition of oil and casing pressure in water injection wells is a critical task in oil-field development. Given issues such as inaccurate data acquisition and equipment vulnerability caused by winter freezing and blocking, innovations have been introduced in the design of instrumentation software and hardware as well as installation structures. The hardware employs the ESP32-WROOM-32UE high-performance microprocessor chip as the main controller, complemented by a 2.0-inch LCD display. Running on the FreeRTOS real-time operating system and utilizing multi-thread development, it collects temperature and pressure data from both the oil pipe and casing simultaneously through two IIC interfaces, enabling integrated acquisition of these two sets of data. The raw data, after being processed by edge computing algorithms including cleaning and early warning, is transmitted to the server via Wi-Fi using the MQTT protocol and stored in a time-series database, facilitating remote data acquisition. The installation scheme involves embedding sensors into the water injection pipeline to eliminate the vulnerability to freezing and blocking, thereby achieving anti-freezing functionality.

Keywords: oil and casing pressure; MQTT; anti-freezing; ESP32; edge computing; smart meter

0 引言

当今时代,信息技术飞速发展,各种数字技术如

人工智能、物联网、云计算、大数据等不断涌现,为企业提供了更多的数字化解决方案^[1]。加之国家政策的引导和支持,数字经济和实体经济的深度融合,石油企业数字化转型迎来最佳契机。MQTT 协议由于其轻量级和高效的特性,广泛应用于物联网(IoT)领域,包括智能家居、工业自动化、远程监控

收稿日期:2024-05-15

第一作者:单旭光(1984—),男,工学硕士,高级工程师,目前从事油田物联网自主研发工作。E-mail:shanxuguang@163.com

等。是油田生产信息采集更为理想的一套解决方案^[2]。

注水井油套压是油田开发生产过程中一项重要的参数,传统的远程采集方案是通过 SCADA 工业控制系统实现,其传输过程依赖于复杂的通信协议,适合在网络条件良好的情况下运行,但油田现场错综复杂,网络不稳定的情况时常发生。并且其采用多层控制模式,其中包括现场层级、数据采集与传输层级、监控与控制层级、管理层级和网络安全层级等多个层级^[3]。多个层级代表着传输同一条数据需要途径多个设备,效率缓慢且成本较高。

该文项目根据油套压现场采集诸多有待改进的方向进行创新研发,一是油压采集点和套压采集点距离近,可以同时进行采集,从而提高采集效率。二是传统油套压采集依赖 SCADA 工控模式,效率缓慢且成本偏高。三是处于采集末梢的传感器大多不具备边缘计算的能力,无法实现数据清洗、降噪处理以及实时报警等功能。四是在注水井上安装的压力表在冬季低温环境下易冻堵而损坏,急需重新设计一款防冻压力表。

1 硬件设计

1.1 主控芯片选型

目前,微电子行业主流的嵌入式芯片有诸多分类,按照性能可大致分为三类,一是低端单片机:主要用于数据计算量较小、实现简单控制的场合,如共享单车锁、宿舍楼下刷卡开铁门等。常用的单片机有 51、STC8H1K08 等。二是 ARM 架构单片机,用于有一定数据处理需求的场合,如人脸识别等。例如,STM32 和国产 GD32 芯片。三是高集成嵌入式芯片,它将处理器、存储器、接口和其他必要的硬件组件集成在一起,以实现更紧凑、更高效的系统设计。这种芯片在嵌入式系统中扮演着核心角色,能够提供强大的计算和控制能力,同时降低系统的复杂性和功耗,如 ESP32 芯片^[4]。

该项目采用 ESP32-WROOM-32UE 作为主控模组,集成 ESP8266WIFI 模块,具备完善的 MQTT 协议库,主频最高可达 240 MHz。采用先进的电源管理技术,具备低功耗的性能。搭载 FreeRTOS 实时操作系统,使得算力进一步提高。ESP32-WROOM-32UE 主控芯片电路如图 1。

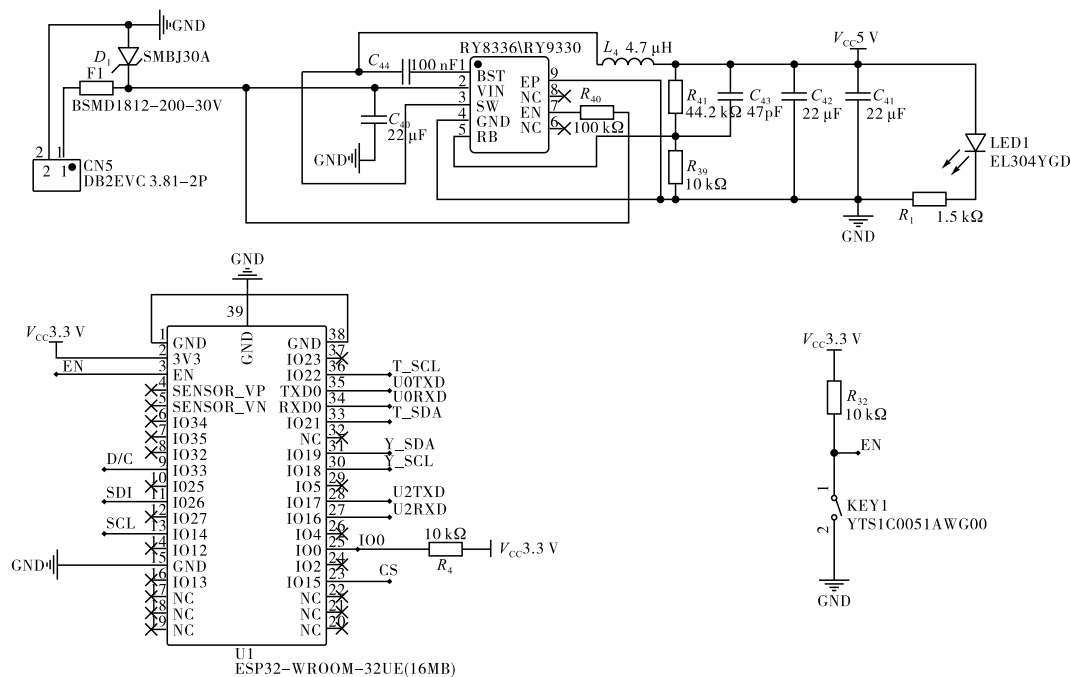


图 1 主控芯片电路原理图

1.2 传感器选型

SMP3011 是一款金属膜隔离冲油式压力传感器,采用 IIC 协议传输^[5]。内置温度补偿器。可以同时采集温度和压力两个数据。根据实际需求,量程选择 0 ~ 25 MPa 范围,而模拟量输出,则需要添

加 AD 模块,为简化硬件设计电路并兼顾温度采集,故最终确定 SMP3011 型号的传感器。

IIC 协议,也被称为 I²C 协议,是一种双向串行通信总线协议,用于连接微控制器及其外围设备。它只需要两根线即可在连接的设备之间传送信息,

主/从设备方式工作,并且具有极低的电流消耗和抗高噪声干扰的特点。IIC 总线的这些特性使得它在物联网和嵌入式系统等领域中得到了广泛的应用。IIC 总线通常用于连接微控制器和各种外设,如传感器、存储器等。

1.3 显示模块设计

仪表显示模块采用 SPI 接口的 2.0 寸 LCD 显示屏,其接口主要由四根线组成:CS 片选信号线、SCL 串行时钟线、MISO 主设备发送从设备接收,MOSI 主设备接收从设备发送^[6]。采用 LCD 显示屏使得设备不但具备显示功能,而且当现场网络断电或在网络状况不佳的情况下,可以快速将油压、套压、油温和套温数据实时显示在屏幕中,减轻了网络和断电给系统带来的影响。

1.4 电源电路

供电电路中采用 4 ~ 30 V 的宽电压输入,通过降压电路,使输出电压保持在 3.3 V,确保各类设备的正常运行,LED 作为电源指示灯,正常供电时灯亮,否则灯熄灭。宽电压输入设计具有广泛的适用性、节能环保、高稳定性、强设计兼容性和良好的扩展性等优点。

2 软件设计

2.1 MQTT 协议

MQTT 是物联网最重要的协议之一,它基于订阅/发布模式,是一种消息队列遥测传输协议^[7],其最大的特点就是可以用极小的带宽提供实时可靠的数据。而订阅和发布的操作对象被称为主题,主题可以看成一个个“组”,用户可以把信息发布到某个“组”内,同时如果订阅该组的消息,那么可以收到该“组”的所有消息。当网络情况不佳时,传统的 HTTP 协议需要重新建立连接,但是 MQTT 协议开销小、同时采用心跳机制,无需每次请求建立新的连接,MQTT 这种模式使得它在弱网络环境、低带宽的情况下表现出不错的性能。

2.2 软件流程图

设备启动后,借助 LVGL 框架对 SPI 接口进行

初始化,屏幕实时显示采集的油套压数据,然后用 NVS 库读取非易失性存储器,读取失败会初始化存储器并尝试重新读取,读取成功后对系统所需参数进行配置,如 MQTT 的用户名、密码、Wi-Fi 帐号密码等。完成配置后进入采集进程,该进程会通过 IIC 协议实时采集 SMP3011 压力传感器,数据经过降噪处理后分别存储在静态区。串口进程会实时读取静态区数据输出到串口中。然后打开 Wi-Fi,并同步监测连接状态,如断开则尝试重连。类同与 Wi-Fi 的链接过程进行 MQTT 服务器的连接。最后打开 MQTT 发布和订阅进程,MQTT 发布进程会不断将静态区的数据发送给 MQTT 中间件,而订阅进程则用来远程调整参数和 OTA 升级。软件流程见图 2 所示。

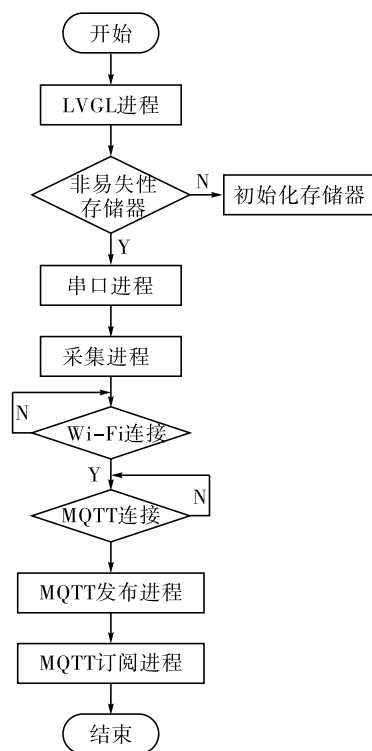


图 2 软件流程图

2.3 参数配置

设备可以通过串口、MQTT 主题两种途径进行参数配置。

表 1 配置指令表

类型	指令	备注
基础包	{ "return" : 1 }	串口返回配置信息
	{ "update" : 1, "update_up" : "xxx" }	xxx 为 OTA 固件 URL
	{ "set" : 1 }	配置包,以下所有指令均需要包含本包
扩展包	{ "wifi_id" : "xxx" }	设置 Wi-Fi SSID
	{ "wifi_pd" : "xxx" }	设置 Wi-Fi PASSWORD

续表 1

类型	指令	备注
扩展包	{ "mqtt_url": "xxx" }	设置 mqtt 服务器的地址
	{ "client_id": "xxx" }	设置连接 mqtt 客户端 ID
	{ "user_id": "xxx" }	设置连接 mqtt 客户端用户名
	{ "user_pd": "xxx" }	设置连接 mqtt 客户端密码
	{ "topic": "xxx" }	设置发布主题
	{ "sub_ack_topic": "xxx" }	设置重启后发布配置的主题
	{ "op_offset": "xxx" }	设置油压校准值
	{ "cp_offset": "xxx" }	设置管压校准值
	{ "ot_offset": "xxx" }	设置油温校准值
	{ "ct_offset": "xxx" }	设置管温校准值

2.4 数据采集

SMP3011 采用 IIC 作为传输协议,其写指令和读指令的时间间隔需要大于测量的间隔才能保证数据读取正常。读格式如图 3 所示。其中:Start 代表 SDA 下降沿,同时 SCL 保持高电平,代表 IIC 通信开始;ACK 是应答信号,从机需要应答每个收到的字节;0XF0 分解为前七位的 0X78 和后一位的 0x00,代表从机地址为 0X78,0x00 代表主机写操作;SDA 从低状态转换到高状态,而且 SCL 保持高。结束 IIC 通信;Stop 代表 SDA 上升沿,同时 SCL 保持高电平,代表 IIC 通信结束^[8]。

Start	0XF0	ACK	0XAC	ACK	Stop
-------	------	-----	------	-----	------

图 3 SMP3011 读格式

应答格式如图 4 所示。其中:0XF1 分解为前七位的 0X78 和后一位的 0x01,代表从机地址为 0X78,0x01 代表主机读操作;Status 代表状态位,详见状态位;BD[23:0]代表压力值;TD[15:0]代表温度值;NACK 表示无需应答。

ACK	BD[7:0]	ACK	TD[15:8]	ACK	TD[7:0]	NACK	Stop
Start	0XF1	ACK	Status	ACK	BD[23:16]	ACK	BD[15:8]

图 4 SMP3011 应答格式

2.5 OTA 升级过程

OTA 远程升级过程如图 5 所示。设备的 flash 分区分为六个部分,Factory 分区存储出厂时的默认固件^[9]。当设备首次收到升级指令时,会将升级固件下载到 OTA_0 分区,在烧录完成后更新 OTA_Data 分区的内容并重启,系统重启时获取 OTA_Data 分区并进行计算,从 OTA_Data 分区的固件启动。当第二次收到升级指令时,会将升级固件下载到

OTA_1 分区并在下载完成后更新 OTA_Data 分区内容并重启。同理,之后的每次的升级都会在 OTA_0 和 OTA_1 两个分区之间交互下载,而不修改出厂的 Factory 分区^[10]。

出厂设置	第一次升级	第二次升级	第三次升级
NVS	NVS	NVS	NVS
OTA Data	OTA Data	OTA Data	OTA Data
PHY Init	PHY Init	PHY Init	PHY Init
factory	factory	factory	factory
OTA_0	OTA_0	OTA_0	OTA_0
OTA 1	OTA 1	OTA 1	OTA 1

图 5 OTA 远程升级

3 边缘计算

随着技术的发展,设备具备边缘计算的能力将逐步成为仪表发展的重要方向,传统仪表依靠网络将信息上传至服务器,由服务器进行清洗、报警及紧急处理,服务器负荷较大,且对网络稳定性要求极高^[11]。未来,随着控制芯片性能的不不断提升,边缘计算和边缘控制将大幅降低仪表对服务器和网络的依赖,使仪表更加智能。该文次研发的仪表植入了数据清洗功能,对采集的突变值进行过滤,确保数据的准确;对持续出现的异常值进行报警处理,并显示于屏幕,同时远传回服务器。

4 防冻堵结构设计

目前,油田注水井压力表的安装方式在冬季低温环境下,死水区极易出现因冻堵导致的仪表损坏问题。该文次设计改进方案,如图 5 所示,将传感器植入主管线内部,所测水环境保持流动状态,消除了死水区,解决了仪表冬季冻堵问题。

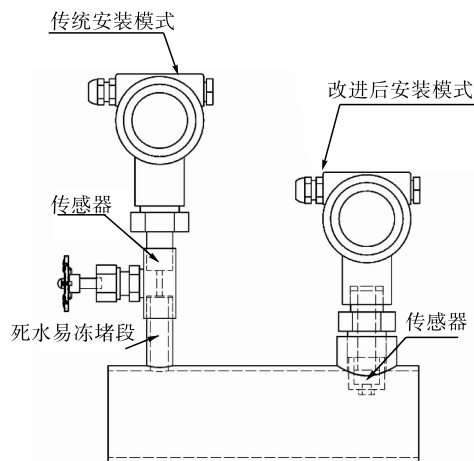


图 5 仪表安装示意图

5 结论

该次研发的注水井油套压一体式 Wi-Fi 仪表基本实现设计功能,现场安装 21 套,数据传输稳定,野外环境下平稳度过 2023 年整个冬季,运行良好。防冻设计,为冬季油套压采集提供了坚实的保障;其适用的 MQTT 模式,较传统 SCADA 工控模式缩减了层级,降低了设备使用数量,为油田数据采集及仪表设计提供了借鉴意义;边缘计算的加入,使得设备初步探及“智能仪表”的大门。随着各项技术的逐渐成熟,仪表会变得越来越智能化,通过深度学习和人工智能的应用,智能仪表会具备强大的数据分析

和数据预测功能,为数据研究者提供更大的便利。

参考文献:

- [1] 王志坤. 基于物联网的石油管道压力仪表数据自动采集方法[J]. 石油和化工设备, 2024(02): 119 - 121 + 138.
 - [2] 于洋. 石油化工自动化仪表控制技术设计应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023(22): 181 - 183.
 - [3] 赵晓娟, 祁超. 自动化控制在石油化工仪表中的运用[J]. 化工设计通讯, 2022(10): 82 - 84.
 - [4] 柴修通. 自动化控制在石油化工仪表中的运用[J]. 化工设计通讯, 2022(07): 4 - 6 + 24.
 - [5] 曹石婧. 石油化工仪表自动化控制系统的相关讨论[J]. 中国设备工程, 2022(14): 129 - 131.
 - [6] 刘俊伟. 石油化工自控仪表安装调试与质量控制[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022(11): 19 - 21.
 - [7] 纪红霞, 张永辉. 石油化工仪表控制系统的应用分析[J]. 仪器仪表用户, 2017(04): 63 - 65.
 - [8] 孙天择. 石油化工电气仪表安全供电系统探讨[J]. 硅谷, 2014(17): 164 + 168.
 - [9] 许文军. 石油化工仪表中的自动化控制技术研究[J]. 科技创新导报, 2019(26): 65 + 68.
 - [10] 胡晓若, 樊知轩, 彭世富, 等. 基于物联网的流量仪表智能标定系统设计[J]. 自动化仪表, 2024, 45(02): 51 - 54.
 - [11] 张钰哲, 张伟东, 高伟, 等. 基于边缘计算的智能油田物联网油井监控系统[J]. 物联网技术, 2023, 13(10): 133 - 137.
-
- (上接第 35 页)
- [9] 董政. 面向工业互联网的 OPC UA 架构研究与设计[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
 - [10] 尹作重, 刘继红, 王佃鹏, 等. 基于微服务的多机器人资源智能云服务平台架构[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(07): 2102 - 2111.
 - [11] 付鹏, 陈慧林, 梁凝. 基于 OPC UA 的工业设备数据互联统一管理平台[J]. 电动工具, 2023(05): 25 - 30.
 - [12] 郑倩倩. 基于 Kettle 的工业数据集成与应用[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
 - [13] 王剑, 王好臣, 李学伟, 等. 基于 OPC UA 的数字孪生车间信息物理融合系统[J]. 现代制造工程, 2023(04): 43 - 50.
 - [14] 何军红, 张迪, 张力, 等. 基于 TCP/IP 协议的异构网络的数据采集[J]. 工业仪表与自动化装置, 2019(03): 77 - 80 + 110.
 - [15] 李锋, 张坤, 原丽娜. 基于 OPC UA 的纺织智能染整车间信息模型研究与实现[J]. 纺织学报, 2020, 41(02): 149 - 154.
 - [16] 包甘盛, 罗晓飞. 浅析数据 ETL 自动化部署方法及实现[J]. 广播电视网络, 2022, 29(04): 70 - 72.