

顶驱下套管装置智能监控系统设计

程晓君¹, 金贵全², 李庆延¹, 张祎琳¹, 赵文昊¹, 宋佳音^{1*}

1. 东北林业大学计算机与控制工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150000

2. 黑龙江北方双佳钻采机具有限责任公司, 黑龙江 牡丹江 157000

DOI:10.61369/ERA.2025070015

摘 要 : 为了保证我国油气资源开发过程中顶驱下套管装置的高效安全运行, 同时提高现场工作人员的安全性。针对顶驱下套管装置的传统监控方法在提高决策效率、提高人员安全方面的不足, 设计了一种顶驱下套管装置智能监控系统, 具有可视化的数据无线实时传输。模拟实验结果表明: 该系统能够有效实现对设备运行的扭矩、转速状态进行远程监控, 对推动油气开采行业智能化具有一定现实意义。

关 键 词 : 顶驱下套管; 扭矩测量; 智能监控; 无线通信

Design of Intelligent Monitoring System for Top Drive Down Casing Device

Cheng Xiaojun¹, Jin Guiquan², Li Qingyan¹, Zhang Yilin¹, Zhao Wenhao¹, Song Jiayin^{1*}

1. College of Computer and Control Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150000

2. Heilongjiang North Shuangjia Drilling and Production Machinery Co., LTD., Mudanjiang, Heilongjiang 157000

Abstract : In order to ensure efficient and safe operation of top drive casing device in the process of oil and gas resources exploitation in our country and improve the safety of staff in field. Aiming at the shortcomings of traditional monitoring methods in improving decision-making efficiency and improving personnel safety, an intelligent monitoring system for top drive casing device is designed with wireless real-time data transmission. The simulation results show that the system can effectively realize the remote monitoring of the torque and speed state of the equipment operation, which has certain practical significance for promoting the intelligence of the oil and gas exploitation industry.

Keywords : top drive casing; torque measurement; intelligent monitoring; wireless communication

引言

在国家“双碳”战略和国际局势不稳定的背景下, 提升油气开发效率、保障能源安全至关重要。顶驱下套管技术以其作业的高成功率和高效率等优点, 已经成为国内外石油钻井公司争相使用的热点^[1]。并且随着物联网与人工智能技术的兴起, 智能远程视频监控系统的研究越来越受到重视^[2]。因此, 针对顶驱下套管装置的智能监控系统的研发迫在眉睫。该系统的应用将提高钻井作业的自动化、智能化水平, 有效优化操作流程, 还将显著提升作业效率和安全性。

为了提高钻井作业的效率以及更好地依据数据进行决策, 国内外学术界对顶驱下套管装置监控系统的研究也在不断深入。2019年, 科威特的 Dalal Al-Subaiei 等^[3]设计了一款油田系统, 能够对石油开发生产中的工作流程进行智能生产监控, 并且根据油田的经验。设计了智能报警器, 通过警报和警告系统来预测问题。2021年, 中国石油大学的曹国亮^[4]通过计算机、通信和无线网络等技术, 构建了油田安全生产监控系统, 借助 ZigBee 和 WebRTC 技术实现油田和监控中心的数据采集和传递, 实现了远程监控的视频传输任务。可见, 以上现有研究在对于顶驱下套管装置运行数据可视化以及无线实时传输方面的研究并不充分。

本文提出了一种顶驱下套管装置智能监控系统, 能够实时采集和无线传输设备运行数据, 确保设备运行状态被及时监控和响应; 能够进行数据可视化, 直观展示设备运行信息, 提升监控效率和决策支持能力; 能够进行远程监控, 减少工作人员直接接触高风险大型设备的频率, 为解决高难度钻井作业中无线数据传输实时性不足、监控信息不直观以及人员安全风险高等问题提供了有效方案。

基金项目: 黑龙江省重点研发计划项目 (GA22A402); 大学生创新创业项目 (202410225029)

作者简介: 程晓君 (2003-), 女, 本科。

通信作者: 宋佳音 (1980-), 女, 博士, 副教授, 林业工程自动化及植物生命信息检测。

一、具体设计方案

(一) 技术路线

基于 STM32F103C8T6 主控模块的顶驱下套管装置智能监控系统,采用分布式监控架构,通过双层 PCB 布局与电磁兼容 (EMC) 优化策略,结合多级降压电源,构建高可靠性硬件平台。系统集成应变片式扭矩传感器与光电转速传感器网络,实现作业参数的实时精准采集,并通过 ESP8266 无线通信模块完成物理信号到数字量的转换及远程传输。下位机程序采用模块化分层设计,保障数据采集与无线传输的实时协同;上位机系统基于 MODBUS-TCP 协议开发多线程处理系统,依托 VOFA 协议实现人机交互界面中动态曲线与数字混合展示,构建全参数实时监控界面。系统搭建含机械负载模块的闭环测试平台,验证转速—扭矩动态特性并建立误差补偿模型,完成样机功能验证及无线远程监控测试,如图1所示。

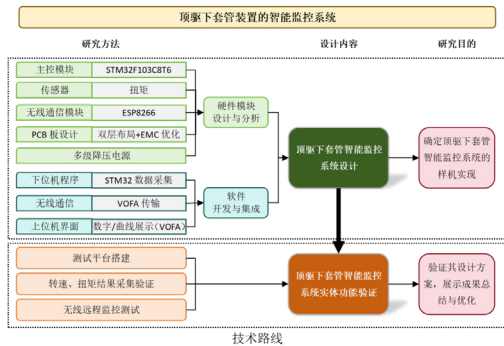


图1 技术路线图

(二) 控制系统的硬件设计

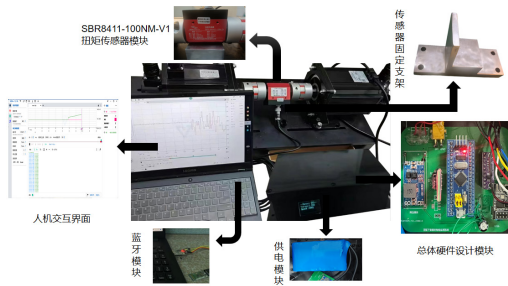


图2 系统设计架构示意图

由于现场实验耗费高昂人力、物力成本,筹备实施周期长,且环境复杂不可控,存在安全风险,因此,该系统在实验室进行模拟实验。

如图2所示,该系统以 STM32F103C8T6 单片机为核心,通过其丰富的外设接口实现与传感器模块、无线通信模块的无缝衔接。主控模块具备掉电保护功能,可在电源中断时自动启动备用电源,将 RAM 中的重要数据保存至 FLASH。传感器模块采用基于应变片变形原理的扭矩传感器,通过 INA226 芯片采集电压模拟量,结合光电传感器实现转速测量。采集到的扭矩和转速数据经主控模块处理后,通过 ESP8266 无线通信模组实时传输至上位机,实现远程监测与管理。电源模块采用 TPS5430DDAR 芯片将输入的 +24V 直流电压降压至 +5V,再通过 AMS1117 芯片转换

为 +3.3V,为各模块提供稳定优质的电源,确保系统稳定高效运行。传感器固定支架设计稳固,确保传感器与电机接触可靠,保证实验测量精度。

(三) 控制流程设计

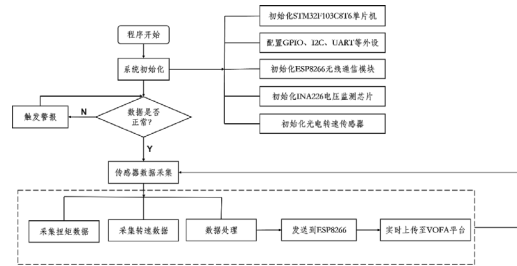


图3 控制流程图

如图3所示,系统控制流程设计以 STM32F103C8T6 单片机为核心,程序启动首先执行初始化操作,配置 GPIO、I2C、UART 等外设模块,并初始化扭矩传感器 INA226、光电转速传感器及 ESP8266 无线通信模块;初始化完成后,进入主循环,实时采集传感器数据(扭矩通过 INA226 电压监测,转速通过光电传感器脉冲计数),并对数据进行处理与存储;若数据异常(超出安全阈值),则触发本地报警(蜂鸣器、LED)并通过 ESP8266 发送远程报警;同时,主控模块通过 UART 与 VOFA 上位机实时通信,发送扭矩与转速数据以动态曲线图展示。此外,系统支持远程监控与历史数据访问,整个流程确保系统高效、稳定运行及人机交互的实时性与安全性。

(四) 人机交互界面设计

人机交互界面设计基于 VOFA+ 平台,结合前文的技术框架,注重实时性与安全性,采用动态波形图直观展示扭矩和转速的实时变化,绿色曲线清晰反映设备运行状态,右侧显示瞬时数值,底部记录原始数据流,便于进行数据分析。通过 ESP8266 模块与 VOFA 的无线传输,操作人员可通过移动端或上位机远程监控,无需靠近大型设备,降低安全风险,同时界面支持动态曲线展示与异常报警,保障及时响应,数据存储与导出功能则便于历史分析,整体设计提升了操作效率与人员安全,为钻井智能化管理提供支持。

二、实验与结果分析

(一) 转速变化实验

控制相同距离 1 m 下,不同电机转速,所测得实验数据真值,如表1所示。

为量化顶驱下套管装置监控系统中多变量间的关联特性,本文引入相关系数,用来衡量两个变量之间线性关系强度和方向,它的值范围在 -1 到 1 之间,表示两个变量之间的相关性程度,趋于 -1 和 1 表示强相关,而 0 则表明无线性关联。其计算公式如下,

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中， x_i 和 y_i 在此实验中分别是电机转速和数据传输时间两个变量的第 i 个数据点， $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$

分别是这两个变量的均值； n 是数据点的数量。

由实验测试数据计算可得数据传输时间与转速变化之间的相关系数 $r_1=0.098$ ，因此在误差允许范围内，认为转速的变化并不影响数据传输时间。

表 1 不同电机转速实验结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电机实际转速 (r/min)	200	225	250	275	300	325	350	375	400	420
传输显示转速 (r/min)	200	225	250	275	300	325	350	375	400	420
数据传输时间 (s)	0.672	0.671	0.675	0.671	0.669	0.667	0.670	0.671	0.667	0.673

(二) 距离变化实验

控制相同电机转速为 300 r/min 下，不同传输距离，所测得实验数据真值，如表 2 所示。

由实验测试数据计算可得数据传输时间与传输距离变化之间的相关系数 $r_2=0.019$ ，因此在误差允许范围内，且在 1~10 m 范围内，认为距离的变化并不影响数据传输时间。

表 2 不同传输距离实验结果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
距离 (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
传输显示转速 (r/min)	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
数据传输时间 (s)	0.669	0.675	0.667	0.668	0.666	0.667	0.668	0.671	0.667	0.673

三、结束语

本文设计的顶驱下套管装置智能监控系统以 STM32F103C8T6 为核心，集成 INA226 扭矩传感器、光电转速传感器和 ESP8266 模块，实现了扭矩与转速的实时采集、无线传输和远程监控，通过 VOFA+ 平台的动态波形图展示数据，支持异常报警与历史分析，为油气开采的智能化提供了支持；实验结果表明，通过相关系数分析，该系统数据传输时间与转速变化、传输距离变化均无显著相关性。这一结果验证了本文设计系统中的无线通信协议在动态钻井环境下具有较为稳定的传输性能，其时间开销不受设备转速波动或短距离移动的影响。虽然系统在模拟实验中选用的扭矩传感器 INA226 是小量程传感器，但测量原理具有通用性。系统功能局限于扭矩与转速，且未在真实钻井环境测试，未来可通过现场验证、扩展监测参数及优化通信技术进一步提升其实用性。

参考文献

[1] 徐新乐, 涂增文, 吴乐平, 等. 顶驱旋转下套管技术及在长宁 H8 平台的应用 [J]. 化工管理, 2020, (33): 197-198.

[2] 李子昌, 李智, 管四海. 自动装载与视频监控远程控制系统 [J]. 微型机与应用, 2017, 36(01): 1-3.

[3] Al-Subaie D, Al-Hamer M, Al-Zaidan A, et al. Smart production surveillance: Production monitoring and optimization using integrated digital oilfield [C]// SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference. SPE, 2019: SPE-198114-MS.

[4] 曹国亮. 油田安全生产监控系统的应用 [D]. 山东: 中国石油大学 (华东), 2021.