

油田现场传感器在线校准与维护关键技术研究

王雄¹, 戴刚¹, 胡绪山¹, 吴志刚¹, 王俊¹, 曹泽宇², 侯增方², 李伟伟², 刘云霞²

¹荆州市明德科技有限公司, 湖北 荆州

²山东省微远科技有限公司, 山东 东营

收稿日期: 2023年3月16日; 录用日期: 2023年5月1日; 发布日期: 2023年5月11日

摘要

针对国内大部分油田未开展计量数据准确性测试, 甚至仍旧停留在计量仪表拆卸送检的传统方式即实验室送检和现场测试存在的问题。应用数理统计、神经网络、数据降维、可视化分析等技术对传感器历史数据进行数据挖掘, 建立传感器失准失效诊断分析模型和失准定位模型, 构建基于数据分析的仪表诊断分析平台; 研发工业现场无线传感器数据非干扰接收解析技术, 解决在用传感器数据获取问题; 研发现场传感器在线校准技术和设备。提出的系统级数据分析、现场检定和在线校准三位一体的智能化综合解决方案, 有利于减少传感器维护的工作量和技术难度, 有利于保障工业信息化系统正常运行, 提高运行效率。

关键词

油田现场, 计量仪表, 传感器, 失准失效诊断分析模型, 失准定位模型, 在线校准, 维护, 智能化

Research on Key Technologies of Online Calibration and Maintenance of Oil Field Sensors

Xiong Wang¹, Gang Dai¹, Xushan Hu¹, Zhigang Wu¹, Jun Wang¹, Zeyu Cao², Zengfang Hou², Weiwei Li², Yunxia Liu²

¹Jingzhou Mingde Technology Co., Ltd., Jingzhou Hubei

²Shandong Weiyuan Technology Co., Ltd., Dongying Shandong

Received: Mar. 16th, 2023; accepted: May 1st, 2023; published: May 11th, 2023

Abstract

In view of the problems that the accuracy test of measurement data has not been carried out in

文章引用: 王雄, 戴刚, 胡绪山, 吴志刚, 王俊, 曹泽宇, 侯增方, 李伟伟, 刘云霞. 油田现场传感器在线校准与维护关键技术研究[J]. 传感器技术与应用, 2023, 11(3): 213-221. DOI: 10.12677/jsta.2023.113023

most domestic oil fields, and even still stays in the traditional way of measuring instrument disassembly and inspection, that is, laboratory inspection and field test. We apply data mining of mathematical statistics, neural network, data dimension reduction and visual analysis to sensor historical data, establish sensor failure diagnosis analysis model and inaccurate positioning model, build the instrument diagnosis and analysis platform based on data analysis; research and develop the on-site wireless sensor data to solve the problem of using sensor data acquisition, and develop field sensor line calibration technology and equipment. The proposed intelligent comprehensive solution of system-level data analysis, field verification and online calibration is conducive to reduce the workload and technical difficulty of sensor maintenance, to ensure the normal operation of industrial information system and improve the operation efficiency.

Keywords

Oilfield Field, Measuring Instrument, Sensor, Misalignment Failure Diagnosis Analysis Model, Misalignment Positioning Model, On-Line Calibration, Maintenance, Intelligentization

Copyright © 2023 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

智能传感器是工业现场信息化管理系统的“眼睛”和“耳朵”，也是系统的数据基础，保障工业生产系统的稳定运行[1]。传感器失准失效会导致工业现场信息化管理系统无法输出准确结果，对生产造成不利影响[2]。如某采油厂2017年对700台温度压力变送器进行周期校准，发现60多台失准，失准率在8.5%以上，部分数据不准确或无法上传，对油井生产和监控造成不利影响。

要确保工业信息化系统的正常运行，首先要保证工业现场智能传感的准确性，其次要做到在海量智能传感器中快速定位失准失效的传感器，并快速实施在线校准和维护[3]。这是迫切需要解决的新课题。工业现场传感器成千上万，面对巨量的检测、诊断和校准工作，依靠人工来保证传感器计量准确根本无法做到。必须研发智能化解决方案、技术和硬件装备。

国内关于智能传感器的校准与维护，余学锋等[3]针对智能传感器测量系统校准中线性化的问题，提出了递推多项式校准方法，分析了校准点选择和排列顺序对递推算法的影响，设计了人工设置模式和自适应选择模式；陆建平[4]论述安装在校验台上的传感器的校准流程及方法，为安全阀校验准确性提供有效保障。张青等[5]结合智能张拉系统在实际生产建设的应用，通过利用相关计量校准规范和相关国家技术标准，对其示值误差校准方法和测得值不确定度进行分析探讨以提高测得值可信度。陈猛等[6]针对电阻式传感器智能感知节点设计中阻值宽范围和高精度的测量需求，提出了一种增益自动调节型大范围高精度比例式电阻测量电路的测量误差校准方法。

由于国内油田信息化建设晚，测试方式有局限且落后，新理论研究和技术应用更是远远落后于国外发达国家。近几年国内油田信息化建设才大范围推广，大部分油田并未开展计量数据准确性测试，甚至仍旧停留在计量仪表拆卸送检的传统方式，即实验室送检和现场测试。实验室送检主要采用检定/校准技术[7]，优点是标准器准确度高、覆盖量程广；缺点是检定/校准数量有限，并且周期长、需备用表，同时安装、拆卸和调试费时费力。现场测试主要采用在线校准技术[8]，优点是简便、快速；缺点是测试数量有限、只能覆盖部分量程，并且无法进行全量程调参，同时部分计量器具安装、拆卸费时费力。

基于胜利油田“四化”建设中计量器具应用及在线校准维护管理情况[9], 笔者开展油田工业现场传感器在线校准与维护关键技术研究。目的在于: 应用大数据分析方法, 构建及训练油水井计量仪表诊断分析模型; 通过对历史数据分析或历史数据 + 关联数据分析, 结合工艺流程算法, 开发应用软件平台系统(工业现场传感器分析系统), 快速定位失准失效计量仪表; 开发现场检定设备和工具, 现场检定压力、温度、流量、单井油计量装置、载荷、位移等物理量传感器; 开发在线校准设备, 在线校准压力、温度、流量、单井油计量装置、载荷、位移等物理量传感器, 实现工业现场传感器的准确应用。提出系统级数据分析、现场检定和在线校准三位一体的智能化综合解决方案, 有利于减少传感器维护的工作量和技术难度, 有利于保障工业信息化系统正常运行, 提高运行效率。

2. 建立相关模型

2.1. 数据预处理模型

数据预处理(data preprocessing)是指在主要的处理以前对数据进行的一些处理。主要是清理异常值、纠正错误数据。数据的预处理包括数据抽取、数据清洗、数据变换和数据加载。该项目主要是进行数据清理。数据清理例程通过填写缺失的值、光滑噪声数据、识别或删除离群点并解决不一致性来“清理”数据, 主要是达到格式标准化、异常数据清除、错误纠正、重复数据的清除。

数据有缺失、噪声、不同步、不同维等影响后期分析的情况存在, 通过排序、聚集、分组、离散、抽样、提取、过滤、回归等数据挖掘和数据分析方法, 对源数据进行预处理(清洗)得到高支持度、高置信度的数据[10]。

针对不同数据类型及传感特点, 采用不同的方式对其数据进行特征化。建立的预处理模型应实现如下功能: ① 数据清理, 清除数据样本的部分离群噪声点、工况改变点及不完整数据点; ② 数据选择, 对各类型数据参与数据分析的时间和数据量做自定义; ③ 数据变换, 将样本数据变换成统一的格式。

2.2. 数据挖掘和失准(或故障)定位模型

基于高质量的数据, 建立各种传感器(计量器具)自身及相互间的数据关联趋势, 定位失准失效传感器(计量器具)。

针对特征化数据, 按照决策树理论、神经网络算法、贝叶斯算法、APRIORI 等建立失准计量器具定位模型。比如应用聚类方法将传感器的历史大数据离散化; 采用改进的 Apriori 算法, 获得各个传感器所测物理量之间的关联规则, 基于所建立的关联规则, 确定出相关传感器(计量器具)的故障模式[11]。

1) 对于部分与其它参数传感器关联性不大的传感器, 通过对其历史(1 个月或 2 个月)数据, 计算其特征值(可能包含均值、偏差、方差、偏差范围等等)或特征矩阵, 近期的值与它们进行比较, 得出传感器失准的可能程度, 从而找出失准传感器。

2) 对于部分与其它参数传感器关联性较大的传感器, 首先通过上述方法进行判断, 如有明确结论则直接得出结论; 若无法得出明确结论, 则通过历史(1 个月或 2 个月)数据, 计算关联参数的关联矩阵, 再用近期的值与它们进行比较, 得出传感器失准的可能程度, 从而找出失准传感器。这个关联矩阵仅受设备特性影响。

3) 传感器都是安装在工艺流程设备上, 它们之间有着质量守恒和能量守恒规律的制约, 有本身的物理规律制约, 这部分传感器有一张大的关联网络, 这个关联网络特征值除受工艺流程设备本身特性影响外, 还受到工作参数不同的影响, 需要结合多个方面, 分析得出传感器失准的可能程度, 从而找出失准传感器。

建立的定位模型功能: ① 主要依据载荷、位移、电功率和电流耦合关系, 以及自相关性定位失准(或

故障)载荷、位移传感器;② 主要依据压力和流量的耦合关系,以及自相关性定位失准(或故障)压力变送器和流量计;③ 主要依据自相关、和其他耦合关系,定位失准(或故障)温度变送器和压力变送器。

2.3. 数据降维和可视化模型

采用一种特别设计的人工神经网络,将传感器的历史数据(X)通过线性映射到平面;然后,再通过非线性映射到输出(Y ,故障模式:偏置型,增益型,失效型等),建立起故障识别的降维映射模型[12]。

应用降维映射模型,可在映射平面上(Z)生成故障模式的判别线;据此判别线,可直观看出故障类别。

n 维输入向量 X 首先通过线性映射到第 1 个隐含层(只有两个节点,构成映射平面 Z);然后 Z 通过第 2 隐含层的非线性映射到 m 维输出向量 Y 。信息传递如下:

$$Z = WX + P, Y = VH + Q$$

式中: W 和 V 为网络权向量; P 和 Q 为偏置向量。采用 Levenberg-Marquardt 算法训练上述网络,一旦网络的权向量得以确定,就能在映射平面上用二维变量 Z 绘出输出 Y 的故障模式等值线,并能同时绘出数据点。

建立的数据降维和可视化模型功能:① 将 8 维数据降为一一对应的二维数据,包括回压、套压、温度、载荷、位移、电功率、电流、电压等数据;② 将二维数据可视化,提供一段时间内计量仪表准确性分析图。

3. 设立计量仪表诊断分析平台

基于上述模型,设立了油水井计量仪表诊断分析平台。它是一套综合性软件系统,部署在服务器上,前端通过浏览器进行数据交互和展示。如图 1 所示。



Figure 1. Interface of diagnostic analysis platform for oil and water wells

图 1. 油水井计量仪表诊断分析平台界面

该平台可实现如下主要功能:① 数据输入,将信息化系统 SCADA 数据库数据导入平台系统;② 数据预处理,完成数据向量化和 ETL 处理,最后以标准化的数据进行学习;③ 深度学习,平台系统的核

心, 集成机器学习的核心算法, 经过大量数据训练, 获取知识, 建立模型; ④ 数据判别, 对学习结果识别, 进行传感器分类; ⑤ 数据展示, 以图表方式展示结果。如图 2 所示。

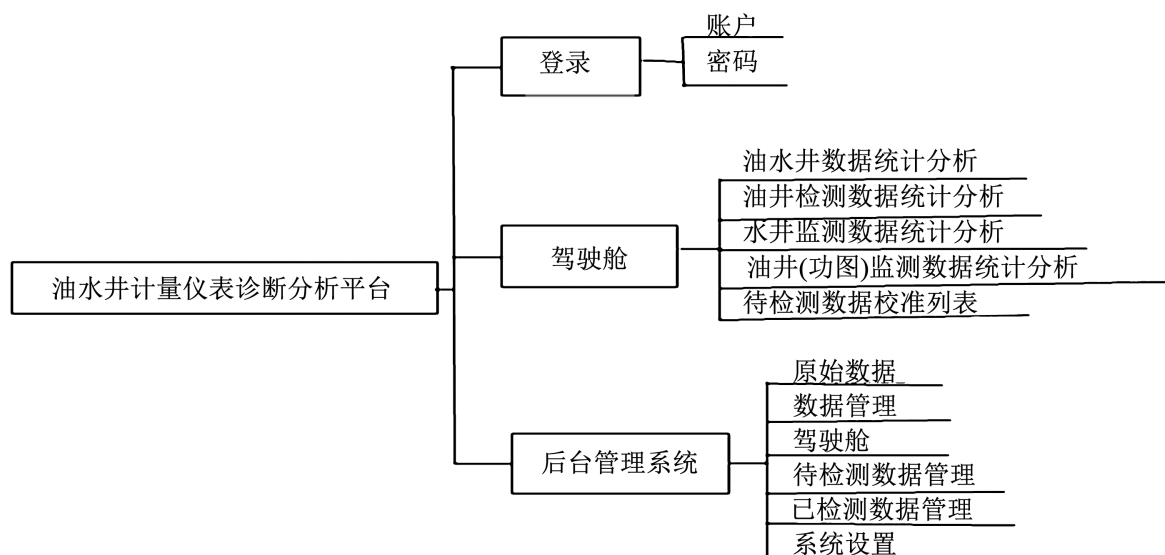


Figure 2. Functional structure diagram of diagnostic analysis platform for oil and water wells

图 2. 油水井计量仪表诊断分析平台功能结构图

该平台的主要特点是: ① 充分利用数据样本进行网络训练和模型拟合, 无需故障样本数据, 无需人工干预信号特征提取, 即能实现对异常数据进行实时监测和判别。② 利用深度自编码器实现数据特征提取, 最终通过损失函数得分来判定计量仪表的合格和待检测。③ 全数据参与模型构建, 在新数据加入后不断地学习, 结果更准确。

4. 研发现场数据监听系统

目前中石化采油生产现场使用的是基于 Zigbee 组网技术的智能传感器, 在 RTU 的控制下进行数据采集和传输。由于 Zigbee 无线通讯的特点, 造成故障诊断和系统维护工作比较复杂、困难。用户在检测故障时一般使用各设备厂家提供的手操器, 但有明显缺点: 一是不同厂家的手操器硬件、软件、通讯方式不一样, 无法通用; 二是手操器与现场传感器通讯时, 需要关闭 RTU 或改变传感器的某些通讯参数, 造成正常生产数据采集中断; 三是手操器无法检测与诊断某些特殊的通讯故障。

为解决上述问题, 应用工业现场无线传感器数据非干扰接收解析技术, 研发了一款现场数据监听系统, 不干扰传感器与 RTU 之间的正常工作, 只对它们的空中包信息进行监听; 并按照 Zigbee 协议及 SZ9-GRM 通讯协议规范进行解析[13], 就可同时对现场 RTU 和各传感器的通讯参数(如信道、网络 ID、源地址及目的地址、组号等)、通讯质量(如信号强度 RSSI、组网命令、ACK 包等)以及数据传输内容进行记录、分析、诊断。

现场数据监听系统主要包括数据旁听监测子系统和数据解析子系统。

4.1. 数据旁听监测子系统

基于采集传输链路的采集特点, 采用链路的旁听监测技术设立了数据旁听监测子系统, 实现无线链路的数据环路检测[14]。

该子系统不中断井场无线仪表与 RTU 之间的数据联系, 不干扰数据链路传输。如图 3 所示。

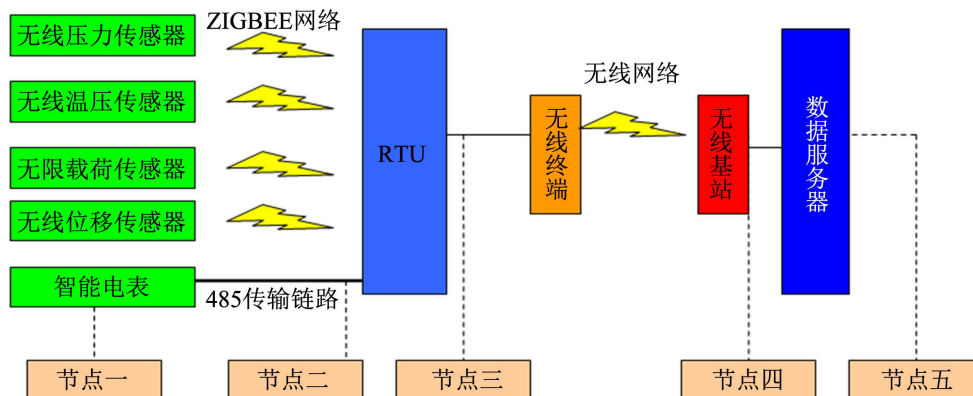


Figure 3. Structure of data auditing monitoring subsystem
图 3. 数据旁听监测子系统结构

4.2. 数据解析子系统

基于 IEEE 802.15.4 及四化标准通讯协议, 设立了数据解析子系统, 以实现现场无线智能仪表快速无损解析及识别, 提高系统维护效率[15]。

该子系统有 3 种解析模式供选用:

1) 综合解析模式。对现场所有 Zigbee 信号的最全面解析模式, 包括所有数据, 但操作却非常简便。用户启动解析后, 只需要选择或输入被测井号(用户可新增井号)及指定解析模式后, 系统即可自动进行包括 RTU、Zigbee 无线仪表、RTU 上传数据等的的数据解析。

2) 典型解析模式。当“油井工况”界面上出现了 RTU 和所有无线仪表的信息和油压、套压曲线、示功图曲线后, 解析即完成。

3) ZigBee 解析模式。一般用于无线设备(含 RTU 和仪表)无数据或有故障的油井, 用户可通过信道扫描查找正确的无线频道、可通过对 Zigbee 数据包的解析, 分析各设备的发射信号强度是否正常、发送数据包数量是否正常、设备的网络 ID 和仪表组号序号等参数是否设置错误、RTU 和仪表之间的应答信息是否正常、RTU 是否发出过功图采集命令等, 从而找出故障的原因。

5. 研制相关仪器设备

现场传感器在线校准技术设备主要包括压力在线校准仪、温度在线校准仪、载荷在线校准仪、智能电表在线校准仪、高压流量计在线校准装置和原油多参数计量系统。这些设备已开发完成并形成销售。下面主要介绍高压流量计、高压流量测控装置和高压流量计在线校准装置的研制。

5.1. 电磁流量计设计

电磁流量计作为一种无能量损耗的流量检测仪表, 已广泛应用于各行各业生产中。而目前市场上大多数电磁流量计的功能比较单一、精度和可靠性偏低、智能化水平不高, 不能满足油田注水环境下的计量需要。在分析国内外电磁流量计发展现状和趋势的基础上, 研制了基于 MSP430F449 的低功耗电磁流量计, 作为现场数据监听系统的核心计量设备。

5.1.1. 硬件开发

在电磁流量计的硬件开发中, 采用了低频三值矩形波励磁技术, 并设计出键盘控制、A/D 转换、液晶显示等接口电路。为增强系统开放性和通讯功能, 选用 RS-485 标准总线来实现仪表和外部系统的通信。同时, 硬件电路上完善了相关的抗干扰设计, 将零漂等影响降到最低, 保证仪器测出的瞬时流量值有足

够高的精度。

5.1.2. 软件开发

在电磁流量计的软件开发中,以 C 语言作为软件开发的工具,采用模块化程序设计方式,充分利用了 MSP430F449 单片机所具有的良好性能,设计出了励磁方式控制子程序、A/D 采样控制子程序、输入数据处理与流量计算子程序、键盘管理及 LCD 的液晶显示等模块化程序。不仅使程序结构清晰,而且也提高了系统的实时性、可靠性和精度。设计完成的电磁流量计系统具有励磁方式可灵活选择,工作稳定可靠,使用方便,数据显示清晰明了等特点。

针对低功耗的设计要求,在励磁方式、测量电路和单片机处理电路三方面尽行了相关设计。励磁方式上,采用低频三值矩形方波励磁,该波形可以通过单片机控制模拟开关的通过来实现;测量电路上,采用低功耗的集成芯片,以及对电源系统的合理分配等方式,降低电路功耗;单片机处理电路上,采用低功耗的微处理器 MSP430F449,并采用定时中断等软件设计方法来降低 MCU 的功耗。

5.1.3. 组成设计

电磁流量计主要由电磁流量传感器和转换器组成,转换器又包括流量转换单元和流量积算、控制单元。其中流量转换单元包括信号转换模块、A/D 采样模块、励磁电流发生模块;流量积算、控制单元包括 RS-485 通信接口、键盘控制模块、液晶显示模块和数据存储模块。

通过编程,单片机利用其外围电路,实现各个模块的功能,而各个模块的功能相互配合,能够保证电磁流量计工作稳定,并且长时间不断工作,显示被测流量管道的瞬时流量和累积流量。

5.2. 高压流量智能监控装置设计

高压流量智能监控装置由机、电两大部分构成。机械部分采用“双流磨轮”平面调节阀设计;电器控制采用智能控制脉宽调制输出 PID 流量闭环稳流或稳压控制设计。采用先进智能机电一体化技术精心研制而成,实现 24 小时自动稳流或稳压控制,可远程设定注水起动压力值:当干压小于起动压力时,自动快速关闭“调节阀”,防止压力反吐出砂;当干压恢复时,自动开阀恢复恒流或恒压控制。监控装置还监视干压值和油压值,当干压值低于油压值时,自动关闭“调节阀”;当干压值高于油压值,同时干压值大于注水起动压力值时,自动开启“调节阀”。

5.2.1. 双流磨轮平面调节阀设计

为克服传统调节阀存在的调节困难、阀门易损坏、使用寿命很短、不适应经常调节的缺点,调节阀采用双流磨轮技术智能控制设计。两块各带有 2 个圆孔的磨轮相对作旋转运动,通过改变介质流通的截面积,进行流量调节;从开到关只需旋转 90°就可实现,而且一对磨轮的工作密封平面始终紧贴在一起,操作起来轻松平稳,不会引起震动和发出噪音;每当阀门开闭一次,还能将残留在工作密封面上的污垢彻底清除一次,避免了杂物进入两工作密封面之间而损伤密封面;采用特种钢材,寿命是普通阀门的五倍以上;阀体开关由高效电动执行装置控制,保证系统指令得到迅速、可靠地执行。

5.2.2. 智能控制系统设计

设计的智能控制系统工作过程为:压力传感器信号,通过 MCU 的 A/D 采样通道输入单片机系统,电磁流量信号送单片机系统脉冲端,通过 LCD 显示测量值。其设计集 PID 控制技术、RS-485 标准总线于一体:① 研制了软硬件结合的智能复位技术,防止因死机造成的数据无法传输,提高了系统运行的可靠性。软件部分采用了不同于通用的 GPRS DTU 通讯技术,将 DTU 设置成 TCP 服务端(绑定 IP 地址),而数据中心设置成 TCP 客户端,其特点是 DTU 无需设“心跳包”数据中心便可随时访问 DTU 读取数据,提高了传输效率且节省通讯费用。② 按照油田行业规范和注水流量调节的特殊规律,结合注水管线的压

力、流量、阀门开度等多参数情况,总结出仿人工调节方式,编制人工模拟运行控制软件。③开发了远程终端维护软件,设计支持 TCP 方式和短信方式的访问,使用户可通过手机向该设备发送一定格式的短信来查询数据,还可通过电脑或短信远程改变 DTU 的设置或进行设备维护。

5.3. 高压流量计在线校准装置设计

设计的高压流量计在线校准装置由在线检定流量自控装置和便携式快测超声波流量计组成。

5.3.1. 在线检定流量自控装置

在线检定流量自控装置由流量自控阀、角式流量计、不锈钢测量直管段、焊接过渡直管段等部件组成。

在线检定流量自控装置设计具有以下主要特点:① 无障碍安装。结构尺寸按照标准配水间管道施工和焊接要求设计制作,安装时无需改变配水间现有结构,安装方便。② 测量管段不易腐蚀和结垢。因其采用不锈钢管和特殊加工工艺,有利于保证长期使用测量的准确性。③ 可在线除垢。当使用时间超过 3 年或怀疑管道内壁结垢影响测量的准确性时,可在管道泄压后,用本公司生产的专用配套管壁快速去垢工具清理。

5.3.2. 便携式快测超声波流量计

便携式快测超声波流量计采用“时差法”测量原理设计,利用超声波脉冲在通过液体顺逆两方向上传播速度之差,通过 1 次反射模式,求得圆管内液体的流量。仪器采用管道外壁非接触式测量,测量过程与管道内液体没有任何接触,流量测量不影响生产。

显示采用中文界面,所有参数测量前均已设定好,现场无需其他操作,装好探头即可显示瞬时和累计流量值,仪器设有自动和手动测量模式,供现场校准使用,测量参数大部分都自动录取,无需人工输入,使用极其方便。

便携式快测超声波流量计由快装超声波探头和便携式超声波流量计主机组成。

6. 结语

1) 建立了基于神经网络数据分析的油水井计量仪表失准分析模型,开发了基于神经网络分析的油水井计量仪表诊断分析平台。

2) 研制了基于 MSP430F449 的低功耗电磁流量计,它是该系统的核心计量设备。

3) 采用双流磨轮平面阀和 PID 控制技术,借助于 GPRS 网络平台,实现了高压注水流量的智能化控制和远程管理。

4) 在流量计管形壳体上设计了标定平面,改变了传统的标定方法,使流量计能够在线标定和维修,方便易行,节约成本。使超声波流量标定装置,更加精确可靠。

5) 采用防爆抗干扰和低功耗设计及电气隔离的直流电源供电方式,在变频和高压环境下系统仪器可以更安全稳定地工作,测量结果稳定、精确。

6) 应用油水井计量仪表诊断分析平台对胜利油田胜采、东辛和草东油水井计量数据进行了分析,找出了失准或故障传感器,大大减少了传感器校准的工作量。可见应用基于神经网络分析的油水井计量仪表失准分析模型是可行的,具有科学性;据此开发的油水井计量仪表诊断分析平台具有可用性。

参考文献

- [1] 木巴热克·安尼瓦尔. 无线传感器网络在油田数据传输系统中的运用分析[J]. 中国管理信息化, 2019, 22(10): 179-180.

-
- [2] 赵新奎, 胡北平, 文四名, 等. 双法兰差压变送器膜片失效分析及措施[J]. 化学工程与装备, 2020(10): 201-203.
- [3] 余学锋, 于杰, 张斌, 等. 智能传感器递推多项式校准方法设计与分析[J]. 测试技术学报, 2016, 30(6): 529-533.
- [4] 陆建平, 张小龙, 董晓冬, 等. 智能安全阀校验台上的压力传感器校准方法研究[J]. 传感器世界, 2019, 25(11): 18-21.
- [5] 张青, 王磊, 李广, 等. 智能张拉系统位移传感器示值误差校准方法及校准结果不确定度探讨[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(1): 108-110+114.
- [6] 陈猛, 郑一鸣, 陈非凡. 电阻式传感器智能感知节点误差校准方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2022(8): 94-99.
- [7] 赵建军, 李娜, 温占波, 等. 试论计量认证实验室送检样品的科学管理[C]//中华预防医学会(Chinese Preventive Medicine Association), 世界公共卫生联盟(World Federation of Public Health Associations), 全球华人公共卫生协会. 转型期的中国公共卫生: 机遇 挑战与对策——中华预防医学会第三届学术年会暨中华预防医学会科学技术奖颁奖大会、世界公共卫生联盟第一届西太区公共卫生大会、全球华人公共卫生协会第五届年会论文集. [出版者不详], 2009: 2.
- [8] 袁维仁. 在线校准技术的发展趋势[J]. 上海计量测试, 2002(3): 4-8.
- [9] 刘冲. 浅谈胜利油田四化建设与成果[J]. 石化技术, 2016, 23(9): 266+274.
- [10] 周泉锡. 常见数据预处理技术分析[J]. 通讯世界, 2019, 26(1): 17-18.
- [11] 齐微微, 汪蓉, 汪静. 电能计量器具故障辨别及处理[J]. 通讯世界, 2017(21): 269-270.
- [12] 乔铭宇, 陈旻杰, 张琳那. 基于低方差滤波算法的改进降维算法[J]. 现代计算机, 2021(20): 56-59.
- [13] 梁陇成, 李智. 基于 ZigBee 的无线实时多通道数据包监听器设计与研究[J]. 网络安全技术与应用, 2015(3): 170-171.
- [14] 余晓丽, 徐慧. 基于数据驱动的光纤通信链路状态监测[J]. 激光杂志, 2023, 44(2): 159-163.
- [15] 古炯宏. 基于 IEEE 802.15.4 协议的传输可靠性分析与数据恢复算法研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2020.