

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205418

基于卡尔曼滤波的电磁流量计信号处理^{*}

于洋 李杰 余松 孙超 常嘉乾 胡定贤
(西安科技大学机械工程学院 西安 710054)

摘要:针对电磁流量计在强干扰条件下测量精度不高的问题,提出了基于残差的卡尔曼滤波方法提高电磁流量计的精度。采用滑动平均滤波器对实验数据进行预处理,降低测量时电磁流量计测量时受到强干扰噪声的影响。分析电磁流量计在固井过程中的受干扰情况,提出基于残差的卡尔曼滤波的方法,实现过程噪声协方差 Q 随流量变化快速切换,提高卡尔曼滤波的响应速度。实验结果表明,经过上述算法处理后定流量下的不确定度降低了14.6%~22.6%,流量发生变化时的响应时间减少5~18 s,同时测量累积排量精度达到0.12%,满足固井工程施工要求。本文所设计的滤波算法有效降低噪声影响,使测量结果更加稳定可靠。

关键词:电磁流量计;石油固井;滑动平均滤波;卡尔曼滤波

中图分类号: TH85.2;TE56 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Kalman filter-based electromagnetic flowmeter signal processing

Yu Yang Li Jie Yu Song Sun Chao Chang Jiaqian Hu Dingxian
(School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Kalman filter method based on residuals is proposed to improve the accuracy of electromagnetic flowmeter for the problem of poor measurement accuracy under strong interference conditions. In this paper, a sliding average filter is used to pre-process the experimental data and reduce the impact of strong interference noise on the electromagnetic flowmeter measurement during measurement. Analysis of the electromagnetic flowmeter in the process of solidification by the interference, the proposed residual-based Kalman filtering method to achieve process noise covariance Q with the flow rate changes quickly switch, to improve the response speed of Kalman filtering. The experimental results show that the uncertainty at constant flow rate is reduced by 14.6% to 22.6% and the response time is reduced by 5 to 18 seconds when the flow rate changes after the above algorithm processing. At the same time, the accuracy of measuring cumulative displacement reaches 0.12%, meeting the construction requirements of solidification projects. The filtering algorithm designed in this paper effectively reduces the influence of noise and makes the measurement results more stable and reliable.

Keywords: electromagnetic flowmeter; petroleum cementing; sliding average filtering; Kalman filtering

0 引言

固井作为我国石油勘探及开发过程中的重要环节,其工程质量会影响后续的钻井作业效率、油井使用寿命和石油储层采收率。固井工程使用水泥浆在井下建立封隔,封闭易塌、易漏等复杂地层,保证钻井顺利进行。同时,封隔油气水层,建立油气流出通道^[1-2]。水泥浆顶替

液的流量作为固井过程中重要参数之一,准确的计量顶替液的流量能够保证固井的施工质量和提高施工水平^[3]。顶替液测量不准会导致水泥浆的密度和注替排量无法满足实际的施工要求。

固井工程中常用的测量顶替液的流量计有电磁流量计和涡轮流量计。在固井工程中涡轮流量计相比于电磁流量计精度更高,但使用过程中磨损非常严重。同时,随使用时间增长其精度下降明显,需要频繁更换或维修设

备。随着电磁流量计的精度和抗干扰能力提升,电磁流量计在固井工程中被广泛应用^[4]。电磁流量计与其他流量计相比具有很多优点,例如测量时无需接触管道内流体压力损失小,并且电极磨损小,使用时间寿命长;温度、密度、压力等因素的变化不影响导电液体流量的测量;能够提供高精度宽范围测量,并且维护方便^[5]。固井施工环境恶劣易受强干扰影响,会导致电磁流量计的测量出现误差。因此,提高电磁流量计的测量精度,在固井注水泥过程中具有重要的意义^[6]。

1 电磁流量计的相关概述

1.1 电磁流量计的组成

作为一种感应式仪表,电磁流量计主要用于导电液体体积流量的测量。电磁流量计能够准确测量电导率大于 $5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的导电液体的体积流量^[7]。电磁流量计主要由感应电极、励磁电路和转换器构成^[8]。电磁流量计结构如图1所示。

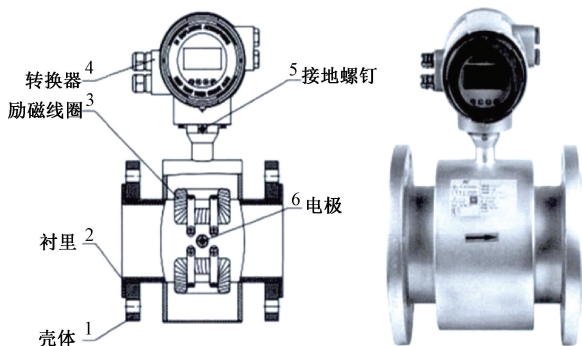


图1 电磁流量计结构示意图

Fig. 1 Electromagnetic flowmeter structure schematic

1.2 电磁流量计的基本原理

电磁流量计是在法拉第电磁感应定律的基础上研制的仪表。电磁流量计测量液体体积流量时,运行励磁电路激发线圈产生磁场。待测导电液体穿过磁场做切割磁感线运动时,垂直于液体流速方向和磁场磁感线上产生感应电动势,感应电极收集感应电动势并传输给转换器。转换器将收集到的感应电动势计算后以流量形式输出^[9]。其感应电动势 E 为:

$$E = kBdv + N(t) \quad (1)$$

式中: k 为系数; B 为磁感应强度; d 为电极间距; v 为流体平均流速; $N(t)$ 为干扰噪声,包含微分干扰、同相干扰、工频干扰、直流漂移、白噪声等。

由于电磁流量计在测量时主要依靠感应电极,对感应电极和转换器的抗干扰的要求很高。在使用电磁流量计过程中需要尽量避免或降低干扰的影响。为抑制或消

除正交干扰对电磁流量计的影响,在安装电磁流量计时,需保证励磁电路产生的交变磁力线与闭合回路的平面保持平行^[10]。测量时应屏蔽固井现场的静电干扰,可以有效地降低共模干扰对传感器的影响^[11]。同时,应该尽可能减少数据处理单元进行无线传输产生的频率对电磁流量计的影响。

2 信号处理

2.1 滑动平均滤波器

在滤波过程中加入具有低通特性的滑动平均滤波器,以此消除电磁流量计测量时复杂的工作环境和顶替液物质分布不均匀产生的强干扰噪声,同时平滑采样数据曲线。滑动平均滤波器根据强噪声的持续时间选择合适的开窗大小 N ,每个窗口的数据个数固定为 N ,窗口随着每一次新的采样向后移动,计算窗口内数据算术平均值,其结果就为新的滤波结果^[12-14]。滤波算法的数学模型描述如下:

$$\bar{X}_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_{k-i} \quad (2)$$

式中: $\bar{X}_k$ 为第 k 次采样滤波后的结果; N 为滤波滑动平均每队的数据个数; X_{k-i} 为未经滤波的第 $(n=i)$ 次采样值。

2.2 改进卡尔曼滤波

卡尔曼滤波理论作为一种最重要的估计理论被广泛应用于生产和生活各个领域。卡尔曼滤波理论源自最优化自回归^[15]。卡尔曼滤波的预测原则是计算数据的线性最小平均方差,并通过不断递推来进行预测。该算法的预测流程:使用 $k-1$ 时刻预测的最优结果与 k 时刻的测量值计算并更新 k 时刻状态预测的最优结果,并继续迭代获得下一时刻的预测值^[16-18]。

卡尔曼滤波算法的状态空间模型由状态方程和观测方程两部分构成,通过两个方程的不停迭代从而获得新的预测值^[19]。首先根据测量值计算最初的预测值,然后根据电磁流量计的测量值和卡尔曼增益来计算并更新预测值^[20]。状态方程和观测方程如下:

$$X_k = AX_{k-1} + W_k \quad (3)$$

$$Y_k = HX_k + V_k \quad (4)$$

式中: k 为测量时间, X_k 为状态模型在 k 时刻的状态量; Y_k 为状态模型在 k 时刻的观测值; A 为 $n \times n$ 状态转移矩阵; W_k 为过程噪声; V_k 为测量噪声。

在固井水泥浆顶替液灌注过程中,过程噪声 W_k 和测量噪声 V_k 为互不相关的高斯白噪声, $W_k \in (0, Q)$; $V_k \in (0, R)$, 且与初始状态 $X(0)$ 互不相关。 Q 为 $n \times n$ 过程噪声协方差矩阵; R 为 $m \times m$ 观测噪声协方差矩阵。经过推导得到卡尔曼滤波电磁流量计测量的动态预测模型卡尔

曼滤波的动态预测模型由时间更新(预测)和测量更新(修正)构成。

时间更新方程

1) 计算先验估计值

$$\hat{X}_k^- = A\hat{X}_{k-1}^- \quad (5)$$

2) 计算先验误差协方差值

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (6)$$

测量更新方程

1) 计算修正矩阵

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (7)$$

2) 更新观测值

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k(Y_k - H\hat{X}_k^-) \quad (8)$$

3) 更新误差协方差

$$P_k = (I - K_k H)P_k^- \quad (9)$$

式中: H 为 $m \times n$ 观测矩阵; P_k^- 为 $n \times n$ 先验误差协方差矩阵; P_k 为 $n \times n$ 后验误差协方差矩阵; I 为 $n \times n$ 阶单位矩阵; K_k 为 $n \times m$ 阶矩阵, 卡尔曼增益。

为实现固井电磁流量计恒流、变流的迅速切换引入卡尔曼滤波残差判据, 卡尔曼滤波残差公式如下:

$$e_r(k) = Y_k - H\hat{X}_k \quad (10)$$

式中: 残差 $e_r(k)$ 表示 k 时刻的观测值与预测值的差值。当流量变化时, 由于此时卡尔曼滤波增益较小, 状态估计

值 $\hat{X}_k$ 由上一时刻的估计值决定, 无法对观测值 Y_k 做出快速反应。因此在流量发生变化时, 滤波残差 $e_r(k)$ 的绝对值会增大, 从而实现快速识别流量发生变化。

滤波残差服从正态分布, 结合切比雪夫大数定理的推论, 可知:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_r^2(k) \xrightarrow{P} \sigma^2 \quad (11)$$

为防止出现由强噪声引起的误判对残差取均值, 计算残差均值 $\gamma(k)$:

$$\gamma(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=k-m+1}^k |e_r(k)| \quad (12)$$

式中: m 为残差均值个数, 根据流量信号波动程度调整。

设置残差阈值 $C\hat{\sigma}$, 其中, $C \geq 1$, $\hat{\sigma}$ 为 σ 的估计值。过程噪声协方差 Q 根据滤波残差 $|e_r(k)|$ 变化进行快速切换。规则如下:

$$Q = \begin{cases} Q_1 & \gamma(k) \geq C\hat{\sigma} \\ Q_2 & \gamma(k) < C\hat{\sigma} \end{cases} \quad (13)$$

滤波残差 $|e_r(k)|$ 大于残差阈值 $C\hat{\sigma}$, 判定顶替液流量发生变化, 将过程噪声协方差切换为 Q_1 。滤波残差 $|e_r(k)|$ 小于残差阈值 $C\hat{\sigma}$, 判定顶替液流量稳定, 将过程噪声协方差切换为 Q_2 。滤波流程如图 2 所示。

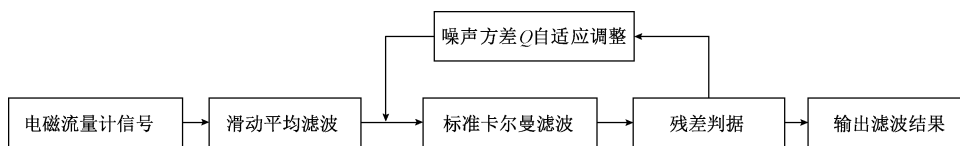


图2 滤波流程

Fig. 2 Filter flow chart

3 实验及结果分析

3.1 实验装置介绍

固井作业数据系统组成如图 3 所示。包括电磁流量计, 压力传感器, 数据处理单元和显示屏。电磁流量计包括流量传感器和转换器, 流量传感器收集感应电动势信号并传递给转换器。转换器对不同流量信号进行分析、对比和放大, 将该信号变为标准信号并输出给数据处理单元。数据处理单元处理并记录数据, 再通过无线传输给显示器显示最终的流量测量结果。

压力传感器测量在固井水泥浆顶替过程中管道内的压力变化。在水泥浆顶替过程中当上胶塞与已坐于浮箍上的下胶塞相遇时, 循环孔堵塞压力将快速上升, 说明顶替液已经顶替到位了。此时应该停止顶替液的灌注。

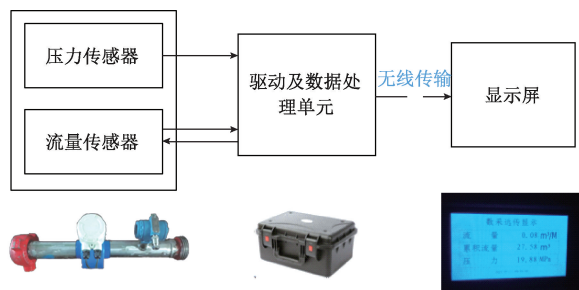


图3 固井作业数据系统

Fig. 3 Cementing operations data system

3.2 实验结果分析

课题组对实验井进行固井水泥浆顶替液测试实验。固井水泥泵车连接内径 50 mm 的钢管, 将水泥浆顶替液注入固井套管。电磁流量计和压力传感器安装在钢管上测量注入水泥浆顶替液的体积流量和管内压力。如图 4

所示实验现场电磁流量计连接图。



图 4 实验现场电磁流量计连接图
Fig. 4 Experimental site electromagnetic flowmeter connection diagram

在水泥浆顶替钻井液过程中,顶替界面可能会出现稳态、失稳和钻井液窜槽 3 种情况。水泥浆顶替过程中,顶替界面处于稳态可减小顶替界面在环空时的延伸长度。同时,减少钻井液与水泥浆混掺,避免钻井液滞留在井壁,提高水泥浆顶替效率。根据每口井的设计参数和现场井眼环空的情况确定合适的水泥浆顶替方案,确定合理的顶替排量,尽量使顶替界面处于稳态。根据实验井的设计参数计算其顶替液理论累积排量。如表 1 所示试验井各项参数,根据式 (14) 计算得到实验井顶替液理论累积排量。

$$V = \frac{\pi}{4}(D - 2t)^2 \times h \times (1 + \mu)$$

(14)

式中: D 为生产套管外径, t 为生产套管壁厚, h 为井深, μ 为管内液体压缩系数,工程上通常取 0.01 或者 0.02。

根据实验井的井型和场的井眼环空情况,保证顶替界面处于稳态,确定顶替方案并进行顶替实验。实验井采用提高排量后逐步减排的方案进行顶替作业。顶替过程中观察压力传感器,当实验井管内压力迅速升高,表明已经完成顶替。如图 5 所示实验井水泥浆顶替液实验数据图。

表 1 实验井各项参数

Table 1 Parameters of the experimental wells	
井号	实验井 1
井型	水平井
井深 H/m	5 440
阻位 h/m	5 420
生产套管外径 D/mm	114.3
生产套管壁厚 t/mm	7.37
理论累积排量/ m^3	42.62

由图 5 可知,电磁流量计进行顶替液测量时,由于在固井过程中管道存在抖动及顶替液成分分布不均匀等情况,测量时受到严重干扰,而且干扰噪声引起电磁流量计测量结果幅值出现大幅度变化。故选取实验数据中有效部分在 MATLAB 中进行离线处理。

将实验数据代入进行滤波实验,根据上述模型对各参数的说明,考虑曲线走势、模型收敛程度、与测量值的

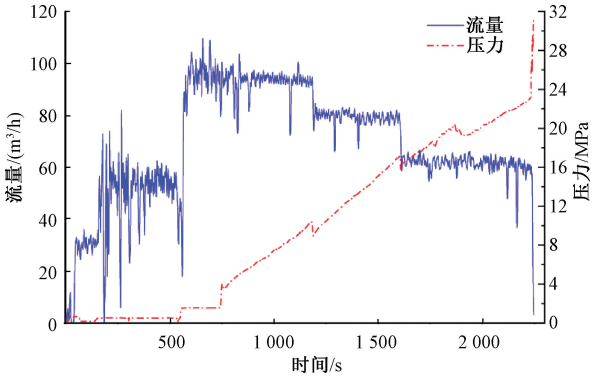


图 5 实验井水泥浆顶替液实验数据
Fig. 5 Experimental data graph of water mud topping fluid in experimental wells

吻合程度等多方面因素。经过多次调参后确定参数如下,滑动平均滤波开窗大小 $N=20, A=1, P=1, R=0.45, H=1$, 点数 $m=3, Q_1=0.65, Q_2=1.7\times 10^{-5}$, 滤波残差阈值 $C\hat{\sigma}=10.31$ 。计算滤波残差的概率密度,如图 6 所示滤波概率密度图,由图 6 可知滤波残差服从正态分布,测量时所受噪声属于高斯噪声。如图 7 所示滤波结果图。

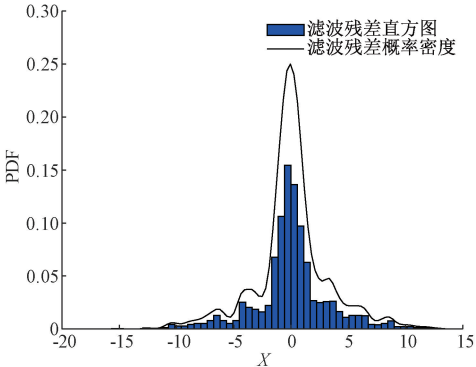


图 6 滤波残差概率密度图
Fig. 6 Probability density plot of filtered residuals

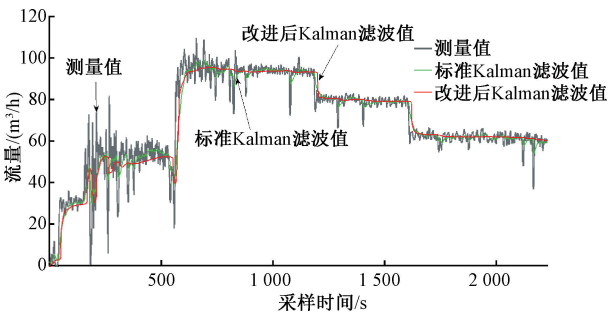


图 7 滤波结果图
Fig. 7 Filtering results graph

图 7 中,数据曲线分别表示流量计测量值、标准卡尔

曼滤波结果、改进卡尔曼滤波结果。为方便分析将3段恒定流量和流量上升段及下降段进行局部放大,如图8所示3段恒定流量滤波图,如图9所示流量上升段和下降段滤波图。量化评价在恒定流量下的滤波效果,计算并比较不同方法的定流量下的不确定度:

$$U = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \times 100\%$$

(15)

式中: U 为定流量下的不确定度, x 为采样值, $\bar{x}$ 为采样均值, n 为采样点数。

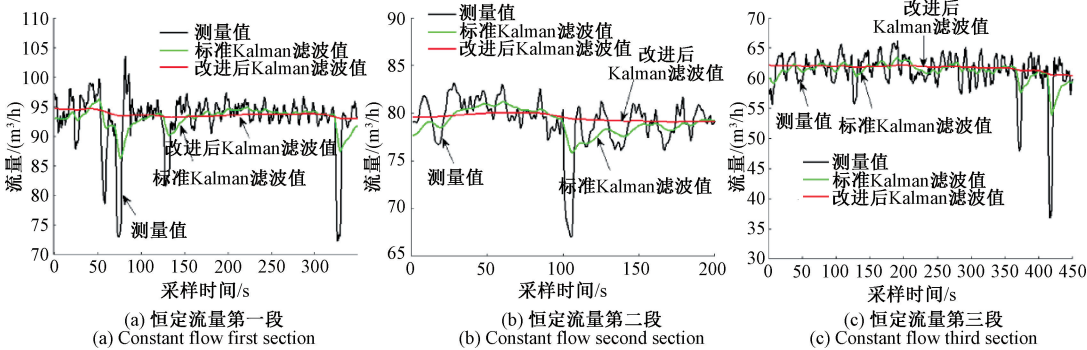


图8 恒定流量滤波图
Fig.8 Constant flow filter graph

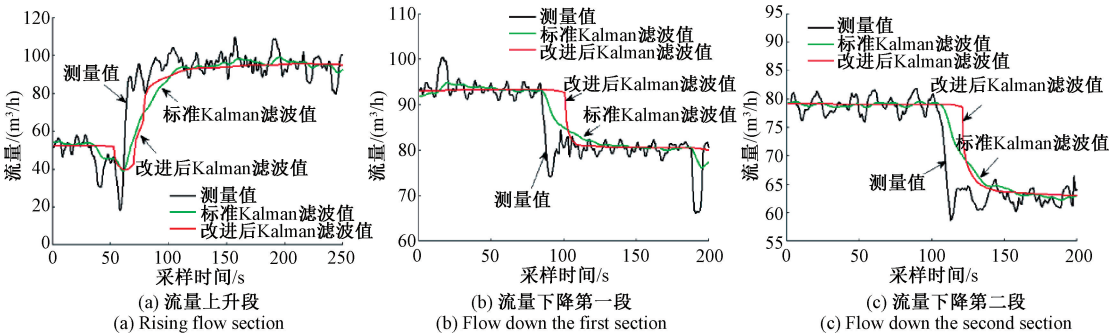


图9 流量上升段和下降段滤波图
Fig.9 Flow up and flow down filter plots

图9中(a)为流量上升段滤波图,(b)和(c)为流量下降段滤波图。通过放大处理直观地反映流量变化过程中滤波结果的响应速度。计算测量值与滤波结果的测量

累积排量精度,并汇总几段流量数据的恒定流量下的不确定度、流量上升段响应时间、流量下降段响应时间,如表2所示。

表2 实验井流量信号处理结果
Table 2 Experimental well flow signal processing results

方法		测量值	标准 Kalman 滤波	改进后 Kalman 滤波
定流量下的不确定度/%	第1段	24.9	9.5	2.3
	第2段	18.2	8.9	2.5
	第3段	16.7	7.0	2.1
上升段响应时间/s		38	45	20
下降段响应时间/s	第1段	17	47	12
	第2段	26	57	16
累积排量/m ³		42.85	42.71	42.67
测量精度/%		+0.58	+0.21	+0.12

4 结 论

本文针对课题组固井作业数据系统采集的顶替液流

量数据进行处理,先进行滑动平均滤波预处理,再使用加入残差判据的卡尔曼滤波完成滤波。使用滑动平均滤波器进行预处理,利用其低通滤波的特点,有效减少测量过程中受到的强噪声干扰,同时减少卡尔曼滤波对流量变

化误判的可能性。对卡尔曼滤波进行改进,加入残差判据,能够在顶替液流量发生变化时进行快速切换。研究发现,经过本文提出的滤波算法处理后相比于测量值,定流量下的不确定度降低了 14.6%~22.6%,流量发生变化时的响应时间减少了 5~18 s。经过改进卡尔曼滤波后累积排量精度达到 0.12%,满足固井工程施工要求。本文提出的滤波算法能有效地滤除顶替液测量中的噪声干扰,对提高固井效率和提升固井质量具有重要意义。

参考文献

- [1] 李建新,冯松林,李明忠,等. 影响固井注水泥顶替效率的主要问题及其研究进展[J]. 断块油气田,2016,23(3):393-396.
LI J X, FENG S L, LI M ZH, et al. Major issues affecting cementing topping efficiency and progress in their research[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(3):393-396.
- [2] 魏凯,褚冰川,包莉军,等. 基于相场法的偏心环空注水泥顶替过程数值模拟[J]. 钻采工艺,2020,43(3):123-126.
WEI K, ZHU B CH, BAO L J, et al. Numerical simulation of cementing displacement process in eccentric annulus based on phase field method[J]. Drilling & Production Technology, 2020,43(3):123-126.
- [3] 杨谋,唐大千,袁中涛,等. 固井注水泥浆顶替效率评估的新模型[J]. 天然气工业,2019,39(6):115-122.
YANG M, TANG D Q, YUAN ZH T, et al. A new model for assessing the topping efficiency of cementing injection muds[J]. Natural Gas Industry,2019,39(6):115-122.
- [4] 张玉辉,刘兴斌,胡金海,等. 用于油水两相流流量测量的分流式电磁流量计[J]. 测井技术,2013(1):21-23,27.
ZHANG Y H, LIU X B, HU J H, et al. Split flow electromagnetic meters for oil and water two-phase flow measurement[J]. Well Logging Technology,2013(1):21-23,27.
- [5] 赵保生,吴蓉,刘志森,等. 电磁流量计发展及趋势[J]. 自动化仪表,2017,38(5):67-71.
ZHAO B SH, WU R, LIU ZH S, et al. Electromagnetic flowmeter development and trends [J]. Process Automation Instrumentation, 2017,38(5):67-71.
- [6] 赵昕亮. 电磁流量计误差分析与研究[J]. 自动化应用,2018(11):59-60,63.
ZHAO X L. Electromagnetic flowmeter error analysis and research[J]. Automation Application, 2018(11):59-60,63.
- [7] 梁利平,葛玉石,徐科军,等. 低功耗缩进式电磁流量传感器磁路结构优化设计[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(12):26-33.
LIANG L P, GE Y SH, XU K J, et al. Optimised design of the magnetic circuit of a low-power indented electromagnetic flow sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12):26-33.
- [8] 姜玉林,丁文斌. 改进的电磁流量计感生电势计算方法[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(12):1883-1889.
JIANG Y L, DING W B. Improved calculation method for inductive potential of electromagnetic flow meters[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015,29(12):1883-1889.
- [9] 高明,李斌. 基于电磁流量计的浆液噪声研究[J]. 工业控制计算机,2017,30(11):152-153.
GAO M, LI B. Slurry noise study based on electromagnetic flowmeter [J]. Industrial Control Computer,2017,30(11):152-153.
- [10] 李飞,王保良,黄志尧. 对电磁流量计中干扰问题的讨论[J]. 仪器仪表学报,2005(S2):727-729.
LI F, WANG B L, HUANG ZH Y. Discussion of interference problems in electromagnetic flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005(S2):727-729.
- [11] 赵芳. 电磁流量计的精度提升及其抗干扰技术[J]. 农机使用与维修,2018(11):5-6.
ZHAO F. Accuracy improvement of electromagnetic flowmeter and its anti-interference technology [J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance,2018(11):5-6.
- [12] 张杰,周栋明. GPS 驯服中无偏滑动平均滤波算法的研究[J]. 电子学报,2013,41(2):412-416.
ZHANG J, ZHOU D M. Research on unbiased sliding average filtering algorithm in GPS taming [J]. Acta Electronica Sinica, 2013,41(2):412-416.
- [13] 张会来,张伟. 快速响应的频率自适应滑动平均滤波锁相方法[J]. 电力电子技术,2021,55(1):63-67.
ZHANG H L, ZHANG W. Fast response frequency adaptive sliding average filtering phase locking method[J]. Power Electronics, 2021,55(1):63-67.
- [14] 孙正宇,张禹. 一种基于正态分布的滑动平均滤波法[J]. 机械工程师,2020(8):52-53,56.
SUN ZH Y, ZHANG Y. A sliding average filtering method based on normal distribution [J]. Mechanical Engineer,2020(8):52-53,56.
- [15] 巫春玲,李永萍,谢美美,等. 迭代自适应容积卡尔曼滤波算法[J]. 电子测量技术,2019,42(17):65-70.

- WU CH L, LI Y P, XIE M M, et al. Iterative adaptive volumetric Kalman filter algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(17): 65-70.
- [16] 陶晓伟, 杨风暴, 刘哲, 等. 一种基于容积卡尔曼的标签多伯努利滤波方法[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(7): 1-6.
- TAO X W, YANG F B, LIU ZH, et al. A volumetric Kalman-based multi-Bernoulli filtering method for labels[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(7): 1-6.
- [17] POURASAD Y, VAHIDPOUR V, RASTEGARNIA A, et al. State estimation in linear dynamical systems by partial update Kalman filtering[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2022, 41(2): 1188-1200.
- [18] 李扬, 李京, 陈亮, 等. 复杂噪声条件下基于抗差容积卡尔曼滤波的发电机动态状态估计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3651-3660.
- LI Y, LI J, CHEN L, et al. Dynamic state estimation of generators based on anti-differential volume Kalman filtering under complex noise conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3651-3660.
- [19] 胡振涛, 胡玉梅, 刘先省. 量测提升卡尔曼滤波[J]. 电子学报, 2016, 44(5): 1149-1155.
- HU ZH T, HU Y M, LIU X SH. Kalman filter based on measurement lifting strategy [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(5): 1149-1155.

- [20] 杨峰, 郑丽涛, 王家琦, 等. 双层无迹卡尔曼滤波[J]. 自动化学报, 2019, 45(7): 1386-1391.
- YANG F, ZHENG L T, WANG J Q, et al. Double layer unscented Kalman filter [J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(7): 1386-1391.

作者简介



于洋, 1995 年于西安科技大学获得硕士学位, 现为西安科技大学教授, 主要研究方向为数字化设计与制造、电磁检测技术及仪器、模具设计与制造等。

Email: yuy@xust.edu.cn

Yu Yang received his M. Sc. degree from Xi'an University of Science and Technology in 1995 and is now a professor at Xi'an University of Science and Technology. His main research interests include digital design and manufacturing, electromagnetic detection technology and instrumentation, mold design and manufacturing, etc.



李杰(通信作者), 2020 年于西安科技大学获得学士学位, 现为西安科技大学研究生, 主要研究方向为钻井、固井设备及仪器。

E-mail: 1063139019@qq.com

Li Jie (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an University of Science and Technology in 2020, and is now a M. Sc. candidate at Xi'an University of Science and Technology. His main research interests include drilling and cementing equipment and instruments.