

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209195

基于卡尔曼滤波的质量流量计误差修正算法*

刘宁庄 戴伟

(西安科技大学电气与控制工程学院 西安 710062)

摘要: 针对热式质量流量计测量过程中模数转换器(ADC)对传感器采集的电信号转化过程中,由于器件本身的系统误差和输入信号、外部电路引起的噪声误差导致的转化的数字量偏离理论值且不断波动的问题。提出了一种基于改进卡尔曼(Kalman)算法的软件滤波方法,在消除误差的同时提高 Kalman 算法收敛速度,并通过概率统计的方法对数据误差建立概率分布模型,为 Kalman 参数的选择提供理论依据。最后在 FPGA 上实现该算法并进行试验验证,相较于滤波前的数据,平均误差由 1.81%降低至 0.82%,数据波动控制在 2 LSB 范围内。结果表明该方法能有效消除误差,提高测量系统的稳定性。

关键词: 热式质量流量计;模数转换器;卡尔曼滤波;FPGA

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Error correction algorithm of mass flowmeter based on Kalman filter

Liu Ningzhuang Dai Wei

(School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710062, China)

Abstract: In the measurement process of thermal mass flowmeter, due to the systematic error of analog-to-digital converter (ADC) itself, and the influence of input signal and external circuit noise, the digital quantity signal transformed by ADC will deviate from the theoretical value and constantly fluctuate. Therefore, we propose a software filtering method based on the improved Kalman algorithm, which can improve the convergence speed of Kalman algorithm while eliminating the error. In addition, the probability distribution model of data error is established by probability statistics method, which provides theoretical basis for Kalman parameter selection. Finally, the algorithm is implemented on FPGA and verified by experiments. Compared with the data before filtering, the average error is reduced from 1.81% to 0.82%, and the data fluctuation is less than 2 LSB. The results show that the method can effectively eliminate errors and improve the stability of the measurement system.

Keywords: thermal mass flowmeter; analog-to-digital converter; Kalman filtering; FPGA

0 引言

热式质量流量计在工业生产和社会生活中应用十分广泛,用于气体的质量流量测量^[1]。热式质量流量计一般先由传感器将流量信号转化为电信号,放大后通过模数转换器(ADC)采集电信号并通过 MCU 读取流量参数。热式气体质量流量传感器的基本原理是通过恒流源对构成惠斯通桥的两绕阻进行加热,测量因气体流动引起的温度场变化来反映质量流量^[2],如图 1 所示为传感器结构图。ADC 作为模拟量与数字量转化的重要通道^[3],是流量计中不可或缺的器件。ADC 常被视为只受输入电信号影响的理想器件,然而在实际的质量流量计应用过程中会发现由于 ADC

自身的器件失配、量化误差和输入信号噪声及硬件电路噪声干扰的存在使得转化后的流量编码值偏离理论值且存在波动。这将使得后续的数字量处理出现较大误差,以至于影响整个测量系统的精度。因此对 A/D 转化过程中存在的误差进行修正至关重要。通过软件滤波进行修正补偿有着便捷、灵活的优势,是一个有效的方法。文献[4]提出一种延时滤波和判决滤波相结合的算法,滤除输入信号中的干扰和毛刺,提高 FPGA 采集数据中的可靠性。文献[5]采用基于均值滤波的改进算法,对采集的数据进行排序,去除极值后取均值作为有效值。该方法能一定程度上消除噪声干扰带来的误差,但并未考虑其他因素带来的误差。

收稿日期:2022-03-07

* 基金项目:国家自然科学基金(12074354)项目资助

针对目前的研究现状,为考虑在 A/D 采集过程中各方面因素引起的测量误差,本文希望对流量采集的误差构建概率分布模型以更好的描述多方面误差带来的影响。同时提出了一种结合一阶滞后滤波的改进的 Kalman 软件滤波补偿算法,通过对误差模型进行分析,完成卡尔曼方程的构建,分析了 Kalman 方程超参数的最佳取值方式。相比与传统 Kalman 算法,改进算法能有效提高 Kalman 的收敛速度。本文算法将 FPGA 上进行实现,并搭建质量流量测量系统进行试验验证。

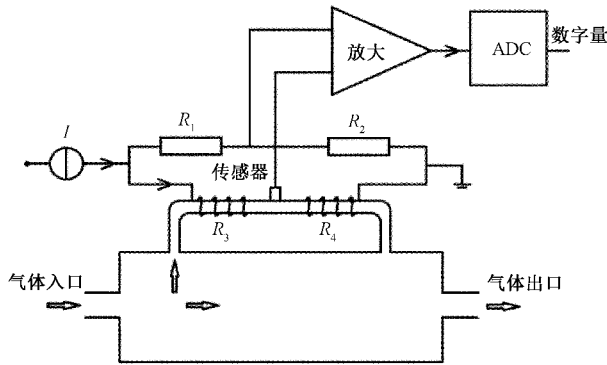


图 1 传感器结构图

1 误差分析

ADC 的目的是将传感器输出的连续变量的电压值转换为表示该电压值的数字量。ADC 的转化步骤一般可分为采样、保持、量化和编码 4 个步骤^[6]。输入模拟量与转化的数字量之间的直接关系称为 ADC 的传递函数,理想的传递函数为只与输入量和分辨率有关的一次函数,满足表达式:

$$\text{Code} = \frac{2^n - 1}{V_{\text{ref}}} \cdot V_{\text{in}} \quad (1)$$

其中, n 为 ADC 的分辨率, V_{ref} 为参考电压, V_{in} 为输入模拟量。但实际的传递函数受限于器件和工艺,不存在理想的线性关系。同时由于 ADC 自身结构和外界噪声等多因素影响,使得 ADC 的输出偏离理论值^[7]。本章分析了传递函数影响的较大的两方面误差来源,为之后的补偿算法提供理论依据。

1.1 系统误差

为方便不同误差量化之间的统一,误差精度表示为 1 LSB 的倍数。LSB 称为最低有效位,其大小取决于参考电压和分辨率,满足:

$$\Delta V = 1 \text{ LSB} = \frac{V_R}{2^n} \quad (2)$$

由于实际的 ADC 分辨率有限,实际的传递函数为阶梯状,如图 2 虚线所示,即实际输出与理想输出存在 $\pm 0.5 \text{ LSB}$ 的误差,称为量化误差^[8]。此外,由于实际 ADC 最小转化值在模拟输入范围 $0.5 \sim 1.5 \text{ LSB}$ 之间,而理论上应在 0.5 LSB 处输出数字量由 $0 \sim 1$,因此使得曲线

发生偏移的现象称为偏移误差。如图 2 实线所示,其大小为 V_{offset} 与 0.5 LSB 电压的差值。在偏移误差发生的同时,因后续的每次数字量递增并不能严格与 1 LSB 对齐,存在模拟输入大于或小于 1 LSB 时数字量递增,由此产生微分线性误差,其大小为实际数字量递增所需电压值与 1 LSB 的差值。在多种误差的综合作用下,一般称理想传输曲线与实际曲线之间的最大偏离为总未调整误差。一般 ADC 的数据手册会给出总未调整误差的值。

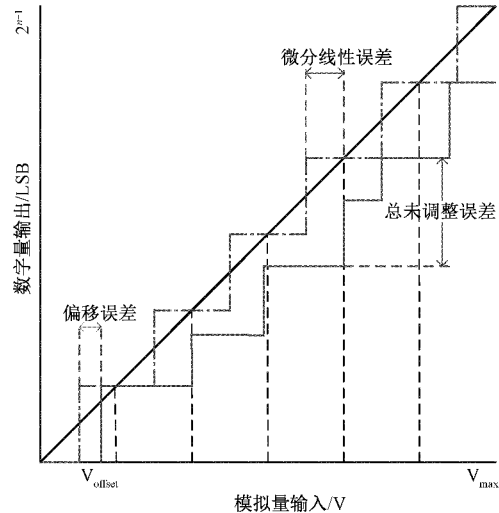


图 2 传递函数曲线

流量传感器输出的模拟量为直流电压,设单位时间内采样点数为 N ,取平均值为有效值,即:

$$X = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) \quad (3)$$

其中, X_i 为第 i 次的采样值,设 \hat{X}_i 为输入模拟量的理论输出值,可得到 ADC 转化的误差为:

$$e_i = \hat{X}_i - X_i \quad (4)$$

通过上文误差分析可将误差视为服从 $e \in [-E_T, +E_T]$ 的均匀分布^[9], E_T 为总未调整误差,则可知误差的均值 $E(e)$ 和方差为 $D(e)$ 为:

$$\begin{cases} E(e) = 0 \\ D(e) = \frac{(2E_T)^2}{12} = \frac{E_T^2}{3} \end{cases} \quad (5)$$

设模拟输入量保持不变,由此可得 X 的方差为:

$$D(X) = D\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{X}_i + e_i)\right) = \frac{1}{N^2} D\left(\sum_{i=1}^N e_i\right) = \frac{E_T^2}{3N} \quad (6)$$

标准差体现流量数据偏离平均数的距离平均数,即可用 X 的标准差表示 ADC 测量值偏离理论值的平均水平,则系统误差的平均值为:

$$e = \sqrt{\frac{E_T^2}{3N}} \quad (7)$$

由上式可知,系统误差大小与采样率大小相关,采样率

较大时,所产生的系统误差越小,其关系如图 3 所示。

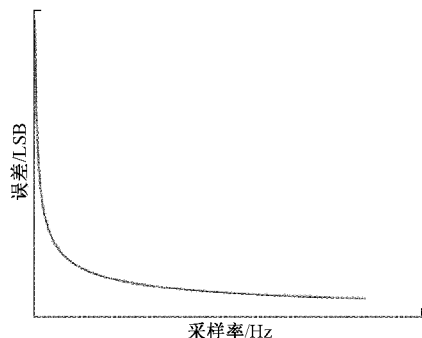


图 3 误差与采样率关系曲线

1.2 噪声误差

在 ADC 工作过程中,不可避免的受到外界噪声干扰,而其中对输出编码值直接产生影响的主要为输入信号噪声和基准电压噪声,噪声是造成转化数据波动的主要原因^[10],由式(1)可得,输出编码值与输入信号和参考电压满足比例关系为:

$$\text{ADC code} \propto \frac{V_{in}}{V_{ref}} \propto \frac{V_{in} + N_{(V_{in})}}{V_{ref} + N_{(V_{ref})}} \quad (8)$$

其中, $N_{(V_{in})}$ 和 $N_{(V_{ref})}$ 为输入信号和基准电压的噪声。由于输入信号由实际被测气体决定,设输入信号的噪声为定值。由上式可知,当 V_{in} 为 0 时,比值恒为 0,即参考电压噪声对 ADC 的输出值无影响,而当 V_{in} 等于参考电压时,即上式比值接近 1 时,ADC 的输出编码值将很大程度上受 $N_{(V_{ref})}$ 影响。输入电压与噪声的关系如图 4 所示。从图 4 中可看出 ADC 输入信号值在接近正负上限时,误差值达到最大,最大值为输入噪声误差与基准源噪声误差之和。

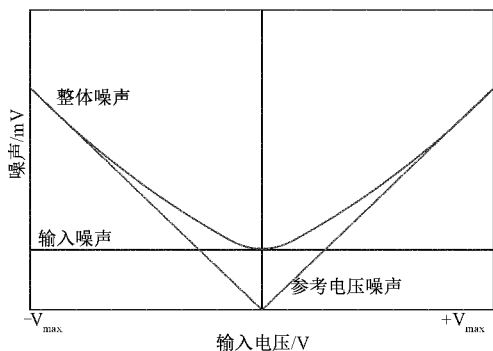


图 4 输入量与噪声关系

基准电压噪声主要包括基准电源芯片固有的纹波^[11]和外部电路所产生的的噪声两部分构成,其中电源纹波为占据主导地位。纹波作为直流电压中的交流分量,一般无法完全消除,与输入噪声伴随 ADC 的输入信号被转化为数字量,表现为输出编码值的不断波动。以转化后的数字量描述噪声,即可将噪声信号视为离散的随机值在一定范围变化,其幅值,满足以时序为自变量的离散函数关系 $f(t)$,即任意噪声可表示为 N 个离散值的集合 $\{f_i\}$,其中 $i =$

$1, 2, \dots, N$ 。将某一信号通过 ADC 转化后,可由式(1)得到直流分量理论值并减去理论值,可得到噪声的离散集合并拟合为曲线如图 5 所示,图中横坐标的时序间隔即为 ADC 的采样间隔。

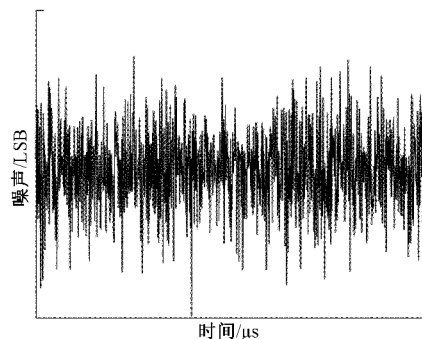


图 5 噪声分布图

对图 5 中的幅值按照数值大小进行排序,可得噪声分布直方图如图 6 所示,以自变量为幅值的高斯分布函数 $f(x)$ 对直方图进行拟合,如图 6 曲线所示,噪声的离散集合 $\{f_i\}$ 与拟合函数基本吻合。高斯分布函数表达式为:

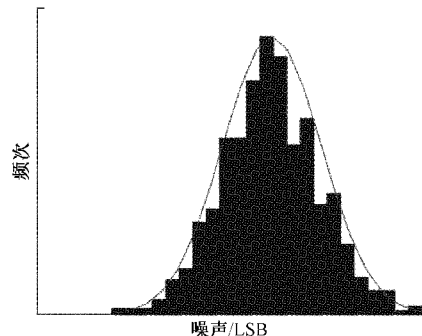


图 6 噪声曲线拟合图

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{6}(f_{max} - f_{min})}} \cdot \exp\left(-\frac{x - \frac{1}{2}(f_{max} + f_{min})}{\frac{1}{3}(f_{max} - f_{min})}\right) \quad (9)$$

令 $f = f_{max} - f_{min}$, 则有

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{3}\pi\Delta f}} \cdot \exp\left(\frac{3}{2\Delta f} \cdot (\Delta f + 2f_{min} - 2x)\right) \quad (10)$$

式中: f_{max} 和 f_{min} 为集合 $\{f_i\}$ 的最大值和最小值。拟合高斯分布的均值 $E(f_i)$ 和方差 $D(f_i)$ 分别为

$$\begin{cases} E(f_i) = \frac{1}{2}(\Delta f + 2f_{min}) \\ D(f_i) = \frac{1}{36}(\Delta f)^2 \end{cases} \quad (11)$$

通过曲线拟合,可将噪声近似视为服从高斯分布的高斯噪声,其方差表征了噪声对 ADC 带来的误差范围,所以只需测得噪声在转化后数字量的极值,即可用其方差描述噪声带来的误差大小。

2 Kalman 滤波算法

由上文可得 ADC 误差主要来自自身所带来的系统误差和高斯噪声误差,由概率分布理论将整个系统视为由式(1)所示的线性转化模型和服从均匀分布与高斯分布的二维概率密度分布模型所叠加的系统。Kalman 滤波是一种利用线性系统方程,通过系统输入输出观测数据,对受高斯噪声干扰的系统状态进行最优化估计的算法^[12]。所以选择卡尔曼滤波算法对 ADC 采集数据进行滤波以消除误差影响是一种较优的选择。但在实验中发现由于 MCU 的处理能力的差异和参数选择的不同,会导致 Kalman 算法的收敛延时较大,使得该算法无法满足流量测量中实时性的要求。对数据进行预处理可有效改善该问题,消除高斯噪声一个有效的方式是通过简单的数理统计^[13]。选用均值滤波的方式对数据进行预处理,以最大程度上减小高斯噪声带来的误差,提高 Kalman 的精度。同时采用一阶滞后滤波与 Kalman 滤波相结合的方式对数据进行滤波可有效提高迭代速度。算法框图如图 7 所示。

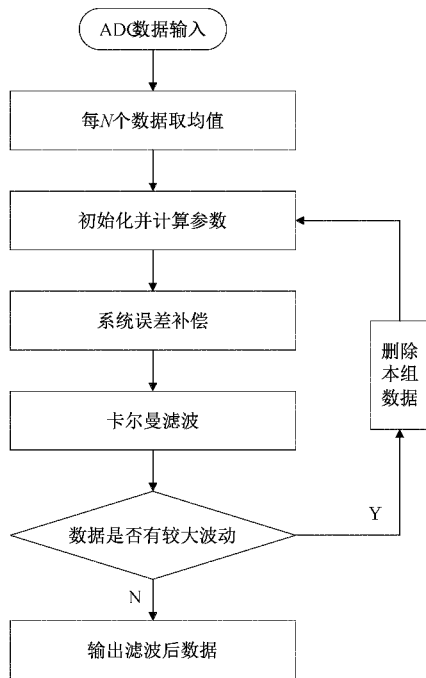


图 7 算法框图

由于 Kalman 滤波的目标是获得准确且稳定的 ADC 采集数据,则可建立 Kalman 的预测模型为:

$$\hat{x}_k = F\hat{x}_{k-1} \quad (12)$$

其中, \hat{x}_k 为先验估计值; k 与 $k-1$ 表示当前状态和前一状态; F 为状态转移矩阵,为保证数据稳定,可取 F 为单

位矩阵^[14]。预测协方差表示为 p_k , 则有

$$p_k^- = Fp_{k-1}F^T + Q \quad (13)$$

式中: Q 为式(12)所示预测模型误差,所以该值可取较小的定值以保证预测模型稳定^[15]。由协方差可得 Kalman 增益 k_k 为:

$$k_k = p_k^- H^T (H p_k^- H^T + R)^{-1} \quad (14)$$

式中: H 为观测矩阵,一维 Kalman 模型中取 H 为单位矩阵; R 为测量误差,一般称为超参数, R 越大表示 ADC 输出数据波动越大, Kalman 收敛所需时间越长,反之 R 越小,表示数据波动越小,收敛延时越短,即 R 的取值会影响系统的精度与速度。由图 4 分析可知, ADC 在满量程时输出受噪声影响最大,所以测量误差 R 可由满量程时噪声分布的标准差表示,即由式(11)可得:

$$R = \sqrt{D(f_i)} = \frac{1}{6} \Delta f \quad (15)$$

由先验估计值 \hat{x}_k^- 、Kalman 增益 k_k 和测量值 Z_k 可得状态 k 的最优估计值 \hat{x}_k 为:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + k_k (Z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (16)$$

为消除高斯对测量数据进行预处理,上式的 Z_k 为每连续 N 个输入数据为一组取均值,并对式(7)所示 ADC 固有的系统误差进行补偿, Z_k 可表示为:

$$Z_k = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N X_i \right) + G \sqrt{\frac{E_T^2}{3N}} \quad (17)$$

由于不同采样率对系统误差的影响存在差异,其中 G 为经验参数,一般取 ± 1 ,可根据器件和采样率的差异适当调整。最后计算协方差的更新值 p_k 为:

$$p_k = (1 - k_k H) p_k^- \quad (18)$$

Kalman 的收敛延时最大值出现在输入值有较大跳变时,需要多次迭代以得到准确的新最优估计值。所以为提高 Kalman 的收敛速度,可设定一临界值,在当前状态的输入值和前一状态的估计值的差值绝对值小于该临界值时,继续进行 Kalman 滤波,而当该差值大于临界值时,采用一阶滞后滤波,使得估计值能快速跟随输入值变化。一阶滞后滤波为:

$$\hat{x}_k = m\hat{x}_{k-1} + (1-m)Z_k \quad (19)$$

其中, m 为滤波参数,可根据使用场景调整。通过改进 Kalman 滤波算法可提高收敛速度,明显改善滞后延时问题。

3 实验与验证

因为 FPGA 具有的高并行运算特性^[16],可对多个进程同时进行计算,同时由于 FPGA 能进行高精度的时序控制,所以选用 FPGA 作为流量采集的 MCU 可提高 Kalman 算法的运算速度,增加滤波的实时性^[17]。FPGA 采用 Cyclone IV 系列的 EP4CE6F17C8,并基于 ADC0820 构建流量计量电路。AD0820 分辨率为 8 位,最大模拟量输入为

5 V。由于滤波过程主要为浮点运算,于是调用 float IP 核统一数据类型为 IEEE-754 标准的单精度浮点数据。

在实际工程应用中,由于在气体流量过大时,气体流过传感器时会带走热量,导致传感器呈现非线性状态^[18]。所以一般情况下,把分流流过传感器的气体流量 $5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ (标准状态下的体积流量)作为传感器的满量程流量,通过对运算放大器放大倍数的调整,使得在量程范围内输出 $0 \sim 5 \text{ V}$ 的标准信号。

在常温常压条件下,选择空气作为待测混合气体,设计标准流量发生装置如图 8 所示,装置采用气泵作为风源,通过控制球形阀的开度,采用标准的流量表测得标准表流量数据,作为待测气体送入测量电路。标准流量计如图 9(a)所示,测量电路如图 9(b)所示,测量电路主要包括传感器信号采集电路、放大模块、ADC 采集模块、主控 FPGA 芯片及外围电路和 $4 \sim 20 \text{ mA}$ 输出模块。

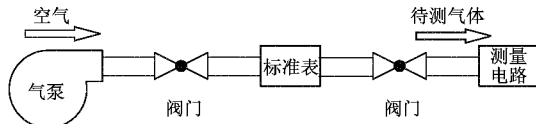


图 8 标准流量发生装置

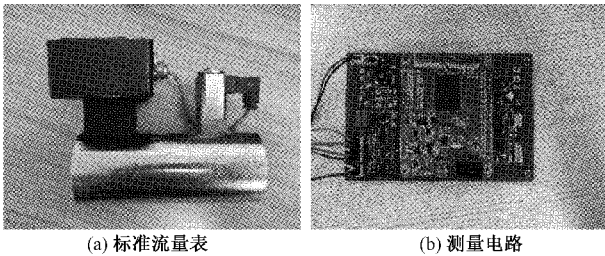


图 9 标准流量计与测量电路

实验记录不同流量输入时一段时间内的滤波前后数据,每组数据取 1 000 个样本,如表 1 和 2 所示。

表 1 滤波前 ADC 采集数据

气体流量/ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	理论值/ LSB	平均值/ LSB	最大波动 范围/LSB	误差/ %	平均 误差/ %
65.84	34	32.98	2	3.00	1.81
120.56	61	59.70	2	2.13	
201.05	103	100.26	3	2.66	
240.08	122	120.90	3	0.90	
353.28	180	175.63	5	2.42	
386.63	197	195.22	4	0.40	
438.50	224	220.43	8	1.6	
491.09	250	247.50	11	0.10	

综上可得,滤波前由于系统误差和噪声误差影响使得转化数据偏离理论值且波动较大,最大误差为 3%,最大数据波动达 11 LSB。且误差呈现出随气体流量变大而变大

表 2 滤波后 ADC 采集数据

气体流量/ ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	理论值/ LSB	平均值/ LSB	最大波动 范围/LSB	误差/ %	平均 误差/ %
65.84	34	34.00	0	0	0.82
120.56	61	60.00	0	1.63	
201.05	103	101.70	1	1.26	
240.08	122	122	0	0	
353.28	180	176.61	2	1.89	
386.63	197	196.00	1	0.50	
438.50	224	222.33	2	0.74	
491.09	250	248.61	2	0.56	

的趋势,符合如图 4 所示规律。滤波后数据与理论值相近,数据波动现象得到改善,波动控制在 2 LSB 范围内。但仍有个别流量组误差较大,这部分误差来自传感器的误差,需要在传感器设计时进行优化以得到改善。平均误差由 1.83% 下降至 0.82%,误差符合流量计要求。

为直观表现滤波前后的效果对比,分别采用传统 Kalman 算法和改进算法进行滤波,选取气体流量从 $240.08 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 跳变到 $353.28 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的数据,制作统计波形图如图 10 和 11 所示。图中曲线①、②、③分别为理

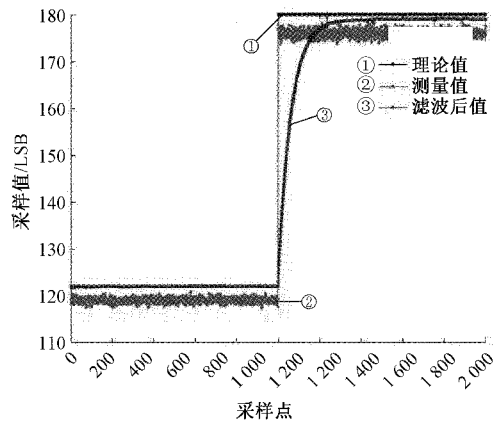


图 10 传统 Kalman 滤波效果

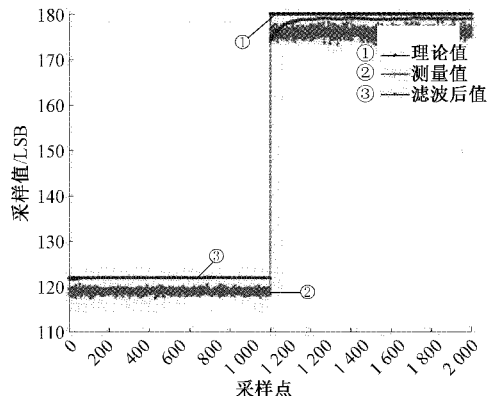


图 11 改进 Kalman 滤波效果

论值,测量值和滤波后值。通过图中可以看到改进 Kalman 由于在较大数据跳变时使用一阶滞后滤波,使得收敛速度较改进前明显提高,且通过对采样值取均值再滤波进一步减小了误差,增加了数据的稳定性。误差与收敛延时见表 3 所示。其中 Kalman 算法中超参数 Q 取 0.01 以保证数据稳定, R 由式(15)可得取 1.83。结果表明,将 ADC 噪声误差近似视为高斯分布并以此确定 Kalman 参数在实际应用中是可行的,是一种较为可靠的思路与方法。

表 3 算法对比

方法	误差/ %	最大波动 范围/LSB	收敛延时/ μs
传统 Kalman	1.21	3	5.2
改进 Kalman	0.82	2	1.8

4 结 论

针对热式质量流量计 ADC 对传感器采集的电信号转化过程中,由于器件本身的系统误差和输入信号、外部电路引起的噪声误差导致的转化的数字量偏离实际值且不断波动的情况,提出了基于改进卡尔曼滤波的软件滤波方法消除误差,并通过概率统计的方法对误差数据建立概率分布模型,为 Kalman 参数的选择提供理论依据。实验结果证明,该方法能有效消除误差,滤波后数据与理论值基本一致,误差降低至 0.82%,数据波动范围控制在 2 LSB 范围内。且对比传统 Kalman 滤波方法能有效减小收敛延时,提高运算速度。该算法简单有效,对于数字化数据采集中的误差消除具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 张建国,徐科军,方正余,等. 数字信号处理技术在科氏质量流量计中的应用[J]. 仪器仪表学报,2017,38(9): 2087-2102.
- [2] 刘家旭,徐英,张涛,等. 热式气体质量流量计动态响应的优化[J]. 传感技术学报,2021,34(4):489-495.
- [3] ZHENG Y, ZHAO Y, ZHOU N, et al. A short review of some analog-to-digital converters resolution enhancement methods [J]. Measurement, 2021, 180(1), DOI:10.1016/j.measurement.2021.109554.
- [4] 彭巧君,任勇峰,王强,等. 基于 FPGA 的软件滤波算法设计及实现[J]. 科学技术与工程,2014,14(3):166-169,174.
- [5] 黄健,张善文,周端. 基于 STM32 的 A/D 采样软件滤波改进算法研究[J]. 仪表技术与传感器,2016(3): 83-85.
- [6] 王洪林,曹敏,李波,等. 基于数字化计量体系的有限字长效应分析[J]. 电测与仪表,2017,54(16):110-116.
- [7] 肖瑞,陈红梅,王舰,等. 基于参考通道随机化的 TIADC 校准算法[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(6): 147-153.
- [8] 陆祖良,杨雁,黄璐,等. 片段采样与阶梯波测量——阶梯波研究之二[J]. 计量学报,2019,40(1):31-39.
- [9] ZEITLER G, KRAMER G, SINGER A C. Bayesian parameter estimation using single-bit dithered quantization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(6):2713-2726.
- [10] 刘敬坤,李继森,孙凯. 矢量网络分析仪大动态范围接收机设计[J]. 国外电子测量技术,2021,40(12): 131-134.
- [11] 王娜,赵寰宇. 开关电源模块的纹波和噪声分析[J]. 铁道通信信号,2021,57(4):18-21.
- [12] 戴彬彬. 基于 FPGA 的高速低功耗卡尔曼滤波器的架构设计和实现[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [13] VERMA K, SINGH B K, THOKE A S. An enhancement in adaptive median filter for edge preservation[J]. Procedia Computer Science, 2015, 48:29-36.
- [14] 任昊誉,郭晨霞,杨瑞峰. 卡尔曼滤波提高 UWB 测距精度研究[J]. 电子测量技术,2021,44(18):111-115.
- [15] YANG Y, SHI Y. State and parameter estimation algorithm for state space model based on linear neural network and Kalman filter [C]. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA), 2019: 2314-2318.
- [16] LI T Y, ZHANG F, GUO W, et al. A survey: FPGA-based dynamic scheduling of hardware tasks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2021, 30(6):991-1007.
- [17] 周志娟,张玉贵,樊奔. 基于 FPGA 的干涉信号双 ADC 采集系统设计[J]. 电子测量技术,2016, 39(12): 136-139.
- [18] 苏乾益,吴薇. 热式气体质量流量传感器的工作原理[J]. 中国仪器仪表,2017(1):62-66.

作者简介

刘宁庄,副教授,主要研究方向为 SOC 嵌入式系统应用技术、FPGA 应用技术、智能检测和控制等方面的相关理论研究和研发工作。

E-mail:liuningzhuang@126.com

戴伟,硕士研究生,主要研究方向为 FPGA 应用技术、嵌入式系统。

E-mail:745182734@qq.com