

基于 Kalman 滤波器的高精度电子秤设计

崔建峰, 钱 帅

(中北大学 电气与控制工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对传统电子秤功能单一、数据稳定速度慢、精度低等问题, 设计了一种基于 Kalman 滤波器的高精度电子秤; 系统以 STM32 为主控单元, 详细介绍了各个模块的实现方法; 首先设计了高精度的应变片式称重传感器, 并在该硬件基础上设计了更加快速有效的数据滤波算法, 然后从算法的时间复杂度和空间复杂度的角度, 对电子秤中数据的几种常用滤波方式进行了对比; 最后在传统电子秤的基础上增加了一些联网、标定等新颖功能; 实际测试结果表明, 该电子秤性能稳定, 数据稳定速度快, 称重精度满足国家规定的三级称称重标准。

关键词: Kalman 滤波器; STM32; 电子秤; 高精度; 快速稳定

Design of High Precison Electronic Scale Based on Kalman Filter

Cui Jianfeng, Qian Shuai

(School of Electronic & Control Engineering, China North University, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A high precision electronic scale based on Kalman filter was designed for the problems of traditional electronic scale with single function, slow data stability and low precision. The system takes STM32 as the main control unit, and introduces the implementation methods of each module in detail. Firstly, a high precision strain gauge weighing sensor is designed, and a more efficient data filtering algorithm is designed on the basis of this hardware. From the perspective of time complexity and space complexity of the algorithm, several common filtering methods of data in electronic scale are compared. Finally, some new functions such as networking and calibration are added on the basis of traditional electronic scale. The actual test results show that the performance of the electronic scale is stable, the speed of data stabilize is fast, and the weighing precision meets the national standard of three-level scale.

Keywords: Kalman filter; STM32; electronic scale; high precision; fast-stable

0 引言

随着生活节奏的加快, 人们对电子产品的要求越来越高。使得很多开发商不得不采用高速处理器来满足人们对于速度的追求。电子秤作为日常生活中经常使用的电子产品之一, 其显示重量的精度与稳定速度都有待提高。文献 [1-3] 中采用平均滤波、中值滤波或者去极值滑动平均滤波的方式处理重量数据, 但是此类滤波方式不仅会降低系统的动态响应速度^[4], 而且精确度也有待提高; 文献 [5] 仅采用硬件低通滤波, 相对于硬件滤波, 软件滤波可靠性高, 稳定性好, 且不存在阻抗匹配等问题^[6]。为此, 本设计提出一种 Kalman 滤波与一阶低通数字滤波相结合的数据滤波方式, 不仅提高了系统的动态响应速度, 而且使滤波后的数据更加精确。

为了拓展电子秤的功能, 为用户带来更加贴心、人性化的使用体验, 借助 STM32 高性能、低功耗等优势, 本设计集成了日常称重过程中所需要的大部分功能, 优化了用户的使用体验。同时电子秤与互联网的结合, 使得用户可

以将消费金额上传到云端, 最终可以绘制一条长期的销售额曲线, 这对于用户来说非常具有现实意义。

1 电子秤的工作原理

该系统以 32 位微控制器 STM32 作为主控芯片, 外围模块主要包括等强度悬臂梁, 应变片组成的惠斯通电桥, A/D 转换模块, HMI 触摸屏显示模块, OLED 显示模块, 时钟模块, WiFi 通信模块。系统的整体结构图如图 1 所示。

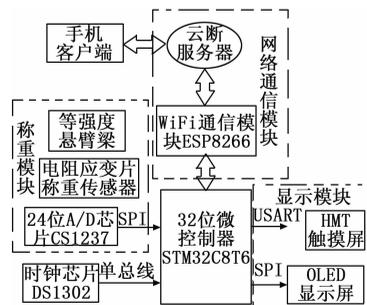


图 1 系统整体结构图

当被称物体放在称盘上时, 悬臂梁因受力而产生微小的形变, 使得称重传感器输出一对差模电压信号。A/D 转换器首先将该信号进行放大, 然后转化为数字量供主控芯片使用。主控芯片接着将 A/D 数值转换为重量, 并对该重量数据进行滤波处理, 最后显示在触摸屏上; 系统利用触摸屏与用户进行交互, 数据显示与功能按钮都一起显示在

收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-10-22。

基金项目: 山西省高等学校科技创新项目(2017150)。

作者简介: 崔建峰(1980-), 男, 河南安阳人, 博士, 讲师, 主要从事动态测控技术与智能设备设计方向的研究。

通讯作者: 钱 帅(1996-), 男, 安徽亳州人, 主要从事嵌入式系统, 传感器方向的研究。

触摸屏上, 方便用户操作; OLED 负责实时时钟的显示; ESP8266 会在用户需要上传数据时自动连接附近可用热点并完成数据上传的任务; 电子秤在空闲时能够自动进入睡眠模式, 暂停各个功能模块, 大大降低了系统的功耗。

2 电子秤的硬件设计

该电子秤的硬件部分主要由称重传感器模块、A/D 转换模块、STM32 主控模块、显示模块、WIFI 通信模块以及时钟模块组成。为了达到国家标准《非自动称通用检定规程 JJF 1336-2012》中三级称的标准^[7], 本设计采用灵敏度为 1 mV/V, 最大量程为 1 kg 的称重传感器作为该电子秤的称重传感器, 并设计电子秤的分度值为 0.1 g, 最大量程为 500 g。

2.1 称重传感器设计

为了确保四个应变片能够承受受到同等强度的应力, 设计采用特制的等强度悬臂梁^[8], 材料选用弹性较大的 45 号钢材。其形状如图 2 所示。

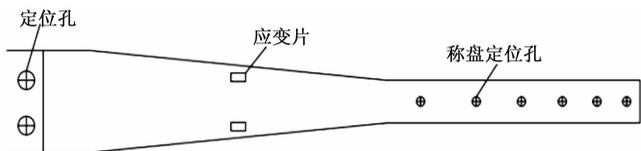


图 2 等强度梁

在悬臂梁的等强度区域处黏贴有高精度电阻应变片, 上下两面各等距离分布两个。然后将电阻应变片接成电桥的形式, 这样既可以提高测量精度, 也可以防止因温度影响电阻应变片阻值造成的测量误差^[9]。电桥原理图如图 3 所示。

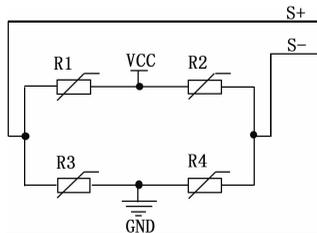


图 3 电桥原理图

当悬臂梁受到向下的压力时, 上面的应变片将受到拉应力, 电阻变大; 下面的应变片将受到压应力, 电阻减小^[10]。假设 $R1=R2=R3=R4$, 变化均为 ΔR , 由电桥分压原理可知:

$$UO = US + -US - = VCC \left(\frac{R3}{R1 + R3} - \frac{R4}{R2 + R4} \right) = VCC \frac{R2R3 - R1R4}{(R1 + R3)(R2 + R4)} \quad (1)$$

$$\Delta UO = VCC \frac{R2R3 - R1R4 + (R1 + R2 + R3 + R4)\Delta R}{(R2 + R3)(R1 + R4)} \quad (2)$$

通过上面的推导可以看出, 桥臂输出电压与应变片的电阻变化量成正比。图 4 为 0~500 g 之间重量与输出 A/D

值之间的拟合曲线。

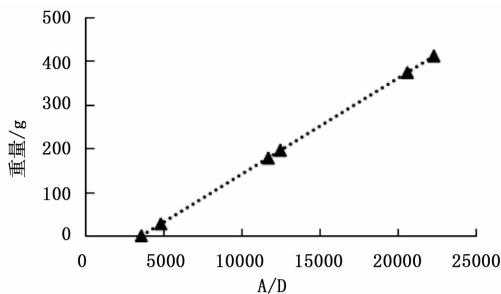


图 4 重量、ADC 拟合曲线

2.2 A/D 转换电路设计

灵敏度与最大量程是电子秤最重要的两个参数^[3], 由于该电子秤设计的分度值为 0.1 g, 最大量程为 500 g, 所以分度数为 5 000, 考虑到实际中噪声的影响, 一般增加裕量后设置为最小分辨率的 10 倍, 故 A/D 转换电路的分辨率设计为 1/50 000。此时 A/D 转换器至少为 16 位 (16 位 A/D 转换器的分辨率为 1/65 536)^[1]。本设计采用的芯海科技 24 位 A/D 转换芯片 CS1237 是一款高精度、低功耗的 Sigma-Delta 模数转换芯片, 内置一路 ADC, 一路差分输入通道和一路温度传感器, 完全能满足上述计算的位数要求。图 5 为 A/D 转换电路原理图。其中, CS1237 采用差分输入方式, 参考电压 $V_{ref}=5.0 V$ 。该芯片内部通过低噪声仪用放大器实现 PGA 放大, 并且可以通过 SPI 通信接口配置特殊寄存器的方式来选择放大倍数, 放大倍数可以设置为 1、2、64、128。

设 S 为称重传感器的灵敏度, F_{max} 为其最大量程, u_s 为称重传感器的电源电压, M_{min} 为称重传感器能够分辨的最小载荷量。所以在最小载荷下传感器的输出 u_{min} 为:

$$u_{min} = \frac{Sus}{F_{max}} M_{min} \quad (3)$$

其中: $S=1 mV/V$, $F_{max}=1 kg$, $u_s=5 V$, $M_{min}=0.1 g$, 所以 $u_{min}=0.5 \mu V$ 。

采用 24 位 A/D 转换器, 能够分辨的最小输入电压 $u_{in, min}$ 为:

$$u_{in, min} = \frac{Vref}{2^{24} - 1} \quad (4)$$

因参考电压 $V_{ref}=5.0 V$, 所以 $u_{in, min} \approx 0.29 \mu V$ 。

当称重传感器承受满载负荷时, 传感器输出电压 u_{max} 为:

$$u_{max} = \frac{Sus}{F_{max}} M = 2.5 mV \quad (5)$$

因为 A/D 转换器的最大输入电压 $u_{in, max}=V_{ref}=5 V$, 所以信号能够进行的最大放大倍数 A_{max} 为:

$$A_{max} = \frac{u_{in, max}}{u_{max}} = 2 000 \quad (6)$$

综上所述, 为了达到高精度的设计要求, 选择芯片的最大放大倍数 128 倍对信号进行放大。

2.3 STM32 控制模块设计

主控芯片选用以 ARM Cortex-M3 为内核的 STM32

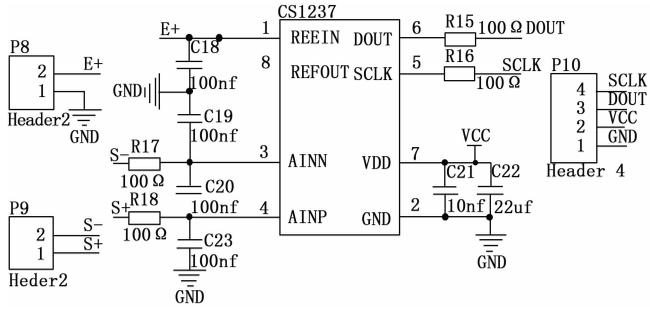


图 5 CS1237 原理图

系列微控制器 STM32C8T6。相对于传统电子秤使用的 8 位单片机，该芯片 CPU 时钟频率高达 72 M，更加适合处理复杂的计算情况。更重要的是，STM32C8T6 具有 3 种低功耗模式——睡眠、停机和待机。其中在待机模式下，内部电流仅有 2 μA。并且可以任意配置低功耗模式下的唤醒方式——中断唤醒或事件唤醒。本设计中，电子秤在一定时间内自动进入睡眠模式，其中就包含包含主控芯片的停机模式，大大降低了电量的消耗，达到了节能的目的。

3 电子秤数据滤波器设计

因为 A/D 芯片在进行数据转换的时候，容易受到各种因素的干扰，包括电源的纹波以及参考电压的浮动等，导致其输出的数据无法很快稳定在一个确定的数值。而传统电子秤的数据处理多采用中值滤波或者去极值滑动平均滤波，但是类滤波算法主要应用于高频震荡系统，虽然滤波后曲线相对光滑，但是会给系统带来很大的延迟，导致其动态响应变慢。而且此类算法在计算时需要占用比较大的系统 RAM 资源。针对目前存在的滤波精度较低、数据更新不及时和计算复杂度较高等问题，本文设计了一种将 Kalman 滤波与一阶低通数字滤波相结合的滤波算法。

3.1 Kalman 滤波器的算法

随着传感器技术的发展，各种滤波技术也得到了大量的应用和扩展。而 Kalman 滤波又是目前应用比较广泛的一种滤波技术。下面以线性系统为例，介绍 Kalman 滤波器的基本理论。

假设线性离散系统方程为：

$$x(n) = Ax(n-1) + Bu(n) + w(n)$$

$$z(n) = H(n)x(n) + v(n) \quad (7)$$

式中， $x(n)$ 为系统的状态向量， $u(n)$ 为输入向量， $w(n)$ 为估计噪声向量， A 、 B 为系统矩阵， $z(n)$ 为量测向量， $H(n)$ 为量测转移矩阵， $v(n)$ 为观测噪声向量。其中估计噪声和观测噪声均为符合高斯分布的白噪声，设其协方差矩阵为 Q 和 R 。

基于此系统方程，可以推导出线性离散系统方程的最优解。根据系统的预测性，要想估计系统 n 时刻的值，只需要知道系统 $n-1$ 时刻态即可：

$$x(n | n-1) = Ax(n-1 | n-1) + Bu(n) \quad (8)$$

则系统在 n 时刻的协方差估计为：

$$P(n | n-1) = AP(n-1 | n-1)A^T + Q \quad (9)$$

因为由 (9) 式得到了 n 时刻的状态预测结果 $x(n | n-1)$ ，而 n 时刻的系统的测量值为 $w(n)$ ，结合测量值和预测值，可以计算出系统在 n 时刻的最优估计值 $x(n | n)$ 。

$$x(n | n) = Ax(n | n-1) + K(n)[z(n) - H(n)x(n | n-1)] \quad (10)$$

其中： $K(n)$ 表示 Kalman 增益系数：

$$K(n) = \frac{P(n | n-1)H^T(n)}{R(n) + H(n)P(n | n-1)H^T(n)} \quad (11)$$

在计算出 n 时刻的最优解 $x(n | n)$ 的基础上，为了实现下一次的迭代运算，还需要更新一下系统的在 n 时刻最优解对应的协方差：

$$P(n | n) = [I - K(n)H(n)]P(n | n-1) \quad (12)$$

式中， I 为单位矩阵。式 (9) ~ (13) 就是线性离散系统的 Kalman 滤波的基本方程。

由上述分析可以看出，Kalman 滤波的工作过程就是不断的预测、矫正。它不需要知道全部过去的的数据，而是用前一个估计值和当前的实际测量值来估计信号的当前值，使用起来相对简单，且易于工程实现^[11-12]。

3.2 在电子秤数据滤波中的应用

在利用 C 语言实现 Kalman 滤波器之前，考虑到该系统为一阶线性系统，故将上述公式中的矩阵向量全部用标量替代，观测值取当前时刻传感器的返回值，系统矩阵 A 、 B 取单位矩阵，过程噪声的协方差矩阵 Q 取 0.01 倍的单位矩阵，观测噪声协方差矩阵 R 取单位矩阵。

因为电子秤最小量程为 0.1 g，需要显示的重量数据保留两位小数，考虑到绘图精度的问题，下图中纵坐标是对原始的重量数据扩大 100 倍之后再行绘制的。图 6 (a)、(b) 分别为电子秤在进行称重 10 g 和 20 g 重量时的滤波效果图。从图中曲线可以看出，滤波后的重量数据基本保持在 0.05 g 的误差范围之内。

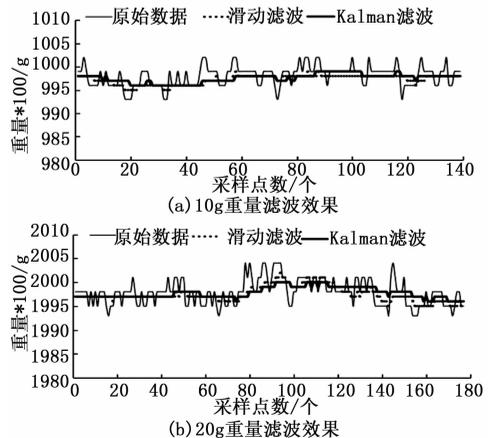


图 6 3 种滤波算法效果图

考虑到在数据上升阶段，一阶低通数字滤波器的动态响应效果更好，因此设计采用一阶低通数字滤波配合 Kalman 滤波来实现更好的滤波效果。具体实现思路是当当前

采集的数据与上一次滤波后的数据之差大于某一范围时, 采用一阶低通数字滤波, 这样有利于提高系统的动态响应速度; 而当两次数据之差小于这个范围时, 采用 Kalman 滤波, 这样有利于提高滤波后数据的准确度。相对于传统的滤波算法, 该滤波方式具有响应速度快、数字稳定度高、占用 RAM 资源小等优势。图 7 为 Kalman 滤波搭配一阶低通数字滤波与上述两种滤波算法的动态响应曲线, 图中可以看出 Kalman 滤波与一阶低通数字滤波的动态响应性最好。

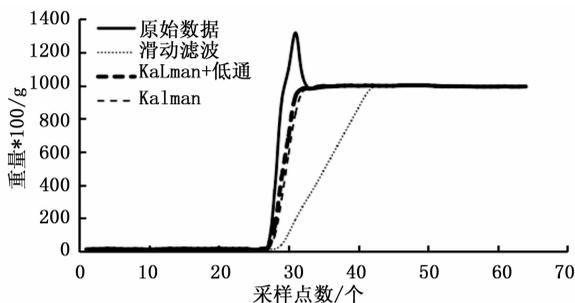


图 7 3 种滤波算法的动态响应曲线

3.3 与原始滤波算法的对比

考虑到衡量算法的主要指标为算法的时间复杂度和空间复杂度^[13], 为了更深入的分析滤波算法对高精度电子秤的影响效果, 下面根据这两个指标来对比分析上述两种滤波算法。

假设 $x(n)$ 为系统在 n 时刻的采样值, L 为去极值滑动平均滤波器需要的数据个数, 则 n 时刻滤波器的输出 $x(n)$ 为:

$$x(n) = \frac{1}{L-2} \left\{ \sum_{i=n-m}^{n+m} x(n+i) - \max_{0 \leq j \leq L} \{x(n+i)\} - \min_{0 \leq i \leq L} \{x(n+i)\} \right\} \quad (13)$$

式中, $\max_{0 \leq i \leq L} \{x(n+i)\}$ 表示取极大值, $\min_{0 \leq i \leq L} \{x(n+i)\}$ 表示取极小值。

由上式可知, 去极值滑动平均滤波器每接收一个新的采样值, 就把该值放在数据内存单元的最后一个数据位置, 再将所有数据向前移动一个内存单元, 以此覆盖掉第一个内存单元中的数据; 然后对这 L 个数据进行排序, 一般采用冒泡排序法; 最后在去掉极大值和极小值之后, 对中间的 $L-2$ 个数据计算平均值并作为滤波后的返回值^[14]。以后每调用一次这个滤波函数, 系统就会按照上述流程执行一次。

故去极值滑动平均滤波在冒泡排序最坏的情况下, 该算法的时间复杂度为:

$$O(L^2) + O(\log_2(L-2)) = O(L^2) \quad (14)$$

空间复杂度为 $O(1)$ 。

而本设计采用的线性离散系统的 Kalman 滤波与一阶低通数字滤波算法的时间复杂度和空间复杂度均为 $O(1)$ 。所以本设计的 Kalman 滤波与一阶低通数字滤波具有明显优势。

4 实验结果与分析

系统的软件部分采用 C 语言编程实现, 通过在 keil 上对 STM32 进行裸机编程, 从而实现相应的功能。本系统包含的程序功能函数分为滤波函数, A/D 采集函数, 重量显示函数, 功能选择与切换函数, 低功耗判断函数等。图 8 为系统整体流程图。

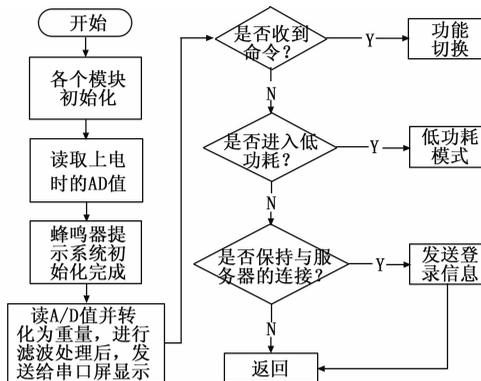


图 8 系统整体流程图

最后, 根据国家最新的电子称检定标准《非自动称通用检定规程 JJF 1336—2012》的相关要求, 需要利用 M1 级检定砝码对本文设计的电子秤进行偏载误差、线性度误差、重复性误差、鉴别力、零点误差等进行检定。表 1 为测试结果。

表 1 模拟燃料组件测量实验

项目	实测值	允许误差
鉴别力	0.1	/
置零准确度	+0.08	±0.25
偏载误差	-0.06	±0.1
称重 0~50g	-0.02	±0.05
称重 50~200g	+0.08	±0.1
称重 200~500g	-0.11	±0.15
重复性(50%MAX)	+0.12	±0.15

测试结果表明, 随着称重重量的增加, 由于等强度梁线性度的微小偏差, 使得测量误差呈现增加趋势, 但是总体误差始终保持在允许范围内, 测量精度达到 0.1 g, 最大量程达到 500 g。因此, 根据测试结果, 采用 Kalman 滤波器的高精度电子秤各项指标均达到国家规定的三级称指标。

5 结论

本文设计并实现了基于 Kalman 滤波器的高精度电子秤称重系统, 详细介绍了各个模块的基本原理及实现方案。该电子秤的最大量程为 500 g, 分度值为 0.1 g。此类高精度电子秤设计的关键在于称重传感器的设计, 难点在于其称重数据的处理。由于外部因素的影响, 导致电子秤显示的数据会出现抖动和漂移。而本设计采用的一阶低通数字滤波配合 Kalman 滤波很好的解决了这个问题, 既提高了电子