

# 改进型卡尔曼滤波算法在电子皮带秤动态称重中的应用

江苏省计量科学研究院 李冰莹, 马宇明, 王海涛

南京理工大学 机械工程学院 李永新, 葛方丽

**[摘要]** 电子皮带秤的称重信号代表运输物料时称量段的瞬时重量, 信号中伴有噪声, 传统的高通、低通、带通等滤波器无法去除噪声的影响。本文引进卡尔曼滤波器, 基于状态估计方法对称重信号进行去噪滤波, 并针对传统卡尔曼滤波无法对称重信号中存在的野值进行滤除, 提出改进型算法。通过验证, 改进后的卡尔曼滤波算法具有更好的滤波效果。

**[关键词]** 电子皮带秤; 称重信号; 卡尔曼滤波; 改进型算法

## 1. 引言

电子皮带秤的称重信号代表运输物料时称量段的瞬时重量, 利用数据采集卡采集称重信号, 再利用 MATLAB 软件对采集的称重信号进行波形绘制, 如图 1 所示。观察图 1 可知, 称重信号中伴随有噪声。在工程中, 噪声的产生主要有内部噪声和外部噪声两种途径<sup>[1]</sup>。由于电子皮带秤是一种做连续机械运动的动态装置, 在运行的过程中, 受到托辊的摩擦、物料不均、托辊粘结物料使托辊直径不均等影响, 会使皮带产生振动, 这种由振动产生的噪声信号来源于系统内部, 属于内部噪声。经研究发现这部分噪声频率主要集中在 5kHz 以上, 而称重传感器和激光位移传感器信号频率均不大于 2kHz。此外, 称重传感器数据采集过程中又不可避免的随机产生一些噪声, 这些噪声频率往往是不可预计的, 传统的高通或低通、带通、带阻滤波器不能去除这部分噪声的影响。因此本文引进卡尔曼滤波器, 基于状态估计方法对称重传感器输出的称重信号进行去噪滤波。

## 2. 卡尔曼滤波算法原理

卡尔曼滤波算法是依匈牙利数学家命名的一种算法, 是一种基于统计的信号处理方法。其以最小均方误差作为最佳估计准则, 利用前一时刻的状态估计值和当前时刻的观测值来确定当前状态的估计值, 是一种递推估计算法<sup>[2]</sup>。对于一个线性离散随机系统, 其线性离散时间系统表示如下:

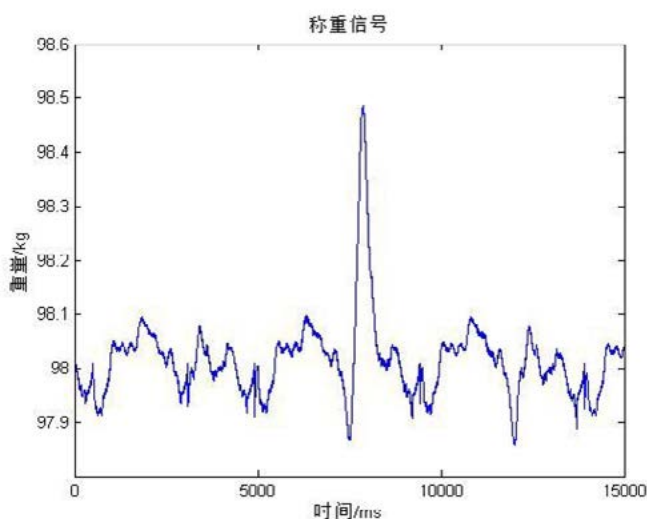


图 1 称重信号波形

$$X(k) = AX(k-1) + BU(k-1) + W(k-1) \quad (1)$$

再加上系统的测量值：

$$Z(k) = HX(k) + V(k) \quad (2)$$

上面两式中：

$X(k)$ —系统在  $k$  时刻的状态；

$U(k)$ —系统  $k$  时刻的控制量；

$A, B$ —系统参数；

$Z(k)$ —系统在  $k$  时刻的测量值；

$H$ —测量系统的参数；

$W(k)$ —系统过程噪声；

$V(k)$ —系统测量噪声。

假设  $W(k)$  和  $V(k)$  为高斯白噪声，它们的协方差（covariance）分别是  $Q, R$ （假设他们不发生变化）。下面根据以上公式估算测量系统的最优化输出，用 5 个简要的公式进行阐述。

假设用  $k$  表示系统现在的状态，根据以上系统的模型，则系统现在状态为：

$$X(k|k-1) = AX(k-1|k-1) + BU(k) \quad (3)$$

式（3）中， $X(k|k-1)$  是利用上一状态对现在状态的预测结果， $X(k-1|k-1)$  是上一状态的最优结果，为系统现在的控制量，其是否存在根据系统需求而定。

以上已完成了对系统结果的更新，下一步就是更新  $X(k|k-1)$  的协方差，用  $P$  表示协方差：

$$P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A^T + Q \quad (4)$$

式中：

$P(k|k-1)$  ——  $X(k|k-1)$  对应的协方差；

$P(k-1|k-1)$  ——  $X(k-1|k-1)$  对应的协方差；

$A^T$  ——  $A$  的转置矩阵；

$Q$  —— 系统过程的协方差。

由式（3）和（4）系统的估测能够得到目前状态的预测结果，根据现在状态的测量值结合预测值就可以得到现在状态的最优估算值为：

$$X(k|k) = X(k|k-1) + Kg(k)(Z(k) - HX(k|k-1)) \quad (5)$$

式（5）中  $Kg$  为卡尔曼滤波增益（Kalman Gain）；

$$Kg(k) = P(k|k-1)H^T[HP(k|k-1)H^T + R]^{-1} \quad (6)$$

由以上公式得到当前状态的最优估算值为  $X(k|k)$ ，但为了保证卡尔曼滤波器能持续不断地对系统进行滤波，还需要对  $X(k|k)$  的协方差进行更新：

$$P(k|k) = (I - Kg(k)H)P(k|k-1) \quad (7)$$

式中：

$I$ —为 1 矩阵，对于单测量模型  $I=1$ 。

当系统进入  $k+1$  状态时， $P(k|k)$  就是式 (6) 中的  $P(k|k-1)$ ，如此，卡尔曼滤波算法便可自回归的运算下去。式 (3) ~ (7) 是卡尔曼滤波算法的五个基本公式。

由以上描述，把皮带秤称重信号的动态测量过程看成一个系统，对此系统建立数学模型，假设称重信号的采样值和前一时刻的采样值相同，则卡尔曼滤波算法中的系统参数为 1，且本系统中没有控制量，所以  $U(k)=0$ ，由此得出：

$$X(k|k-1) = X(k-1|k-1) \quad (8)$$

则

$$P(k|k-1) = P(k-1|k-1) + Q \quad (9)$$

在进行皮带秤称重信号检测过程中，测量值即是采样值，所以  $H=1$ ，则：

$$X(k|k) = X(k|k-1) + Kg(k)(Z(k) - X(k|k-1)) \quad (10)$$

$$Kg(k) = P(k|k-1)[P(k|k-1) + R]^{-1} \quad (11)$$

$$P(k|k) = (I - Kg(k))P(k|k-1) \quad (12)$$

在进行滤波之前需要对  $X(0|0)$  和  $P(0|0)$  赋值。如果取  $P$  为 0，则卡尔曼滤波算法会完全相信给定的  $X(0|0)$  是最优的，从而使算法不能收敛。所以本文选  $X(0|0)=1$ ， $P(0|0)=10$ 。卡尔曼滤波算法的流程图如图 2 所示。

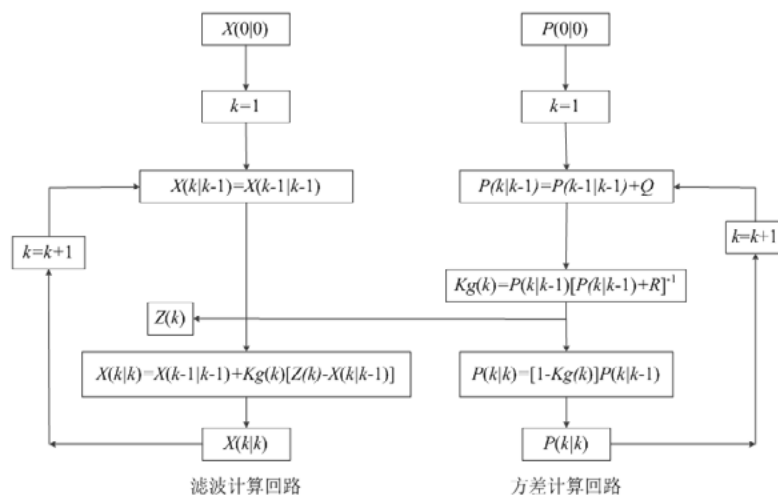


图 2 卡尔曼滤波算法流程图

对某一均匀物料流量下的称重数据进行滤波，滤波效果如图 3 所示，观察图 3 可知卡尔曼滤波能起到平滑滤波的效果，但是对于波形中某一瞬间的尖峰噪声却不能很好的滤除。

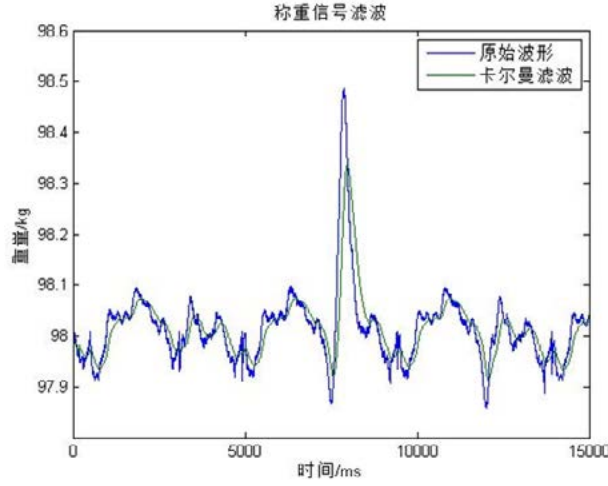


图 3 卡尔曼滤波效果图

### 3. 基于增益调整的卡尔曼滤波算法

对于相对稳定的动态测量系统，卡尔曼滤波算法有很好的滤波效果，但是在皮带秤称重过程中，易受到振动等的影响，噪声的随机性幅度比较大，使数据的可靠性和可用性下降，导致测量过程中采集到错误的数数据，以下称其为野值，这些数据明显偏大或偏小，它们的量值和正常量值有很大的差别。传统的卡尔曼滤波算法对测量数据有很明显的依赖性，如果不将野值剔除，将会给滤波估计值带来很大偏差，影响测量系统精度<sup>[9]</sup>。这时用传统的滤波算法进行称重滤波，将会造成较大的估计误差。本节通过分析卡尔曼滤波的隐含信息，对传统的卡尔曼算法进行改进，在传统算法的基础上增加野值的判断和处理环节。

由前述对卡尔曼滤波算法的描述可知，测量变量及其预测之差  $[Z(k) - HX(k, k - 1)]$  为滤波过程中的隐含信息，隐含信息在卡尔曼滤波算法中有重要作用。实际上，可以把隐含信息看作滤波器的输入信号，滤波器正是依靠它的驱动来运行的，而野值正是通过影响隐含信息而对滤波过程产生影响的。由式(5)知，当观测值中存在隐含信息时，隐含信息的影响主要以卡尔曼增益  $Kg(k)$  的倍数叠加到状态估计上的，使估计值产生较大偏差，滤波精度受到影响<sup>[4]</sup>。

为了使隐含信息序列在野值出现时仍能保持原有隐含信息序列性质，对隐含信息序列进行加权限制，从而对卡尔曼增益  $Kg(k)$  进行控制。当野值出现时，隐含信息序列的方差增大，这时给隐含信息一个小的加权值，将增益系数  $Kg(k)$  调小，抑制方差的增大，保持原有隐含信息序列的性质，没有野值时，加权值为 1，这样隐含信息序列的性质不会发生改变。

隐含信息和隐含信息方差表达式为：

$$\tilde{Z}(k) = Z(k) - HX(k, k - 1) \quad (8)$$

$$C(k) = HP(k, k - 1)H^T + R \quad (9)$$

在对称传感器测量值进行滤波的过程中，称重测量值是一维的。因此，隐含信息的方差  $C(k)$  是一个数值，可以通过以下表达式来判断当前测量值是否为野值。

$$\sigma = \sqrt{C(k)} \quad (10)$$

$$|\tilde{Z}(k)| \leq d\sigma \quad (11)$$

由式 (10) 实时求得隐含信息的平方根  $\sigma$ ，在系数  $d$  确定的情况下，根据式 (11) 判断隐含信息的绝对值是否小于门限值。一般情况下，隐含信息符合高斯分布，采用  $d=3$  进行 3 倍方差根判决，即认为 99.7% 的测量数据是没有野值的。当隐含信息的绝对值大于 3 倍方差根时，即认为该观测值为野值，则调整卡尔曼增益  $Kg(k)$ 。

$$Kg(k) = mKg(k) \quad (12)$$

式中： $m \in [0, 1]$ 。当隐含信息绝对值不小于 3 倍的方差根时，说明有野值存在，令  $m=0$ ，剔除野值点，修正状态滤波方程，避免了滤波发散的情况的出现；否则，则令  $m=1$ ，此时卡尔曼增益  $Kg(k)$  不发生变化。

由以上描述，把皮带秤称重信号的动态测量过程看成一个系统，对此系统建立数学模型，假设称重信号的当前采样值和前一时刻的采样值相同，则卡尔曼滤波算法中的系统参数为 1，且本系统中没有控制量，所以  $U(k)=0$ ，由此得出：

$$X(k | k-1) = X(k-1 | k-1) \quad (13)$$

则

$$P(k | k-1) = P(k-1 | k-1) + Q \quad (14)$$

在获取皮带秤称重信号的过程中，测量值即是采样值，所以  $H=1$ ，则：

$$X(k | k) = X(k | k-1) + Kg(k)(Z(k) - X(k | k-1)) \quad (15)$$

$$Kg(k) = P(k | k-1)[P(k | k-1) + R]^{-1} \quad (16)$$

$$P(k | k) = (I - Kg(k))P(k | k-1) \quad (17)$$

在进行滤波之前需要对  $X(0/0)$  和  $P(0/0)$  赋值，本文选  $X(0/0)=1$ ， $P(0/0)=10$ 。改进后的卡尔曼滤波算法流程如图 4 所示。

依托江苏省计量科学研究院国家自动衡器型式评价实验室的 6# 皮带秤，采集电子皮带秤的称重信号，利用基于增益调整的卡尔曼滤波算法对试验采集的部分称重信号进行滤波，滤波前后效果如图 5 所示。

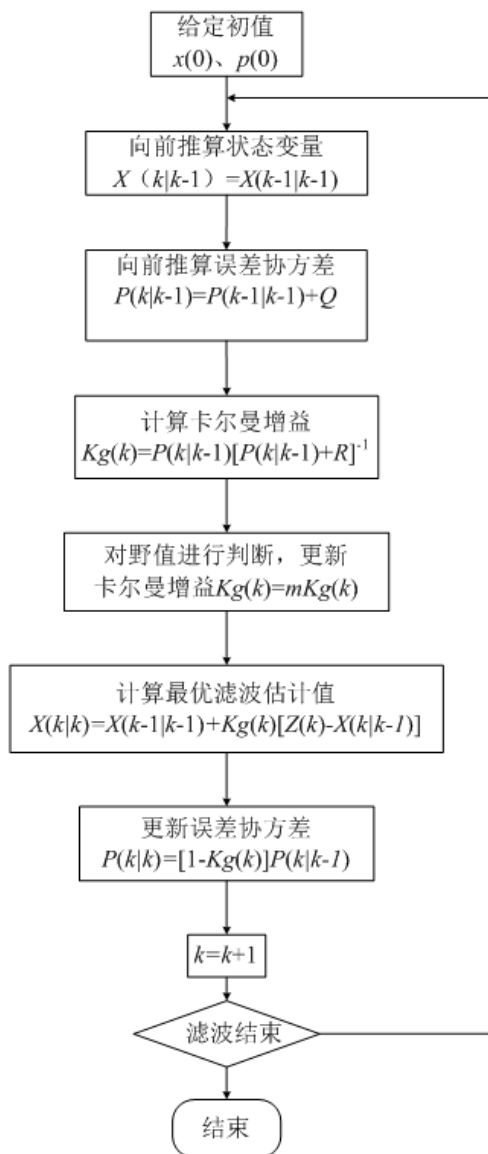


图 4 改进后卡尔曼滤波算法流程图

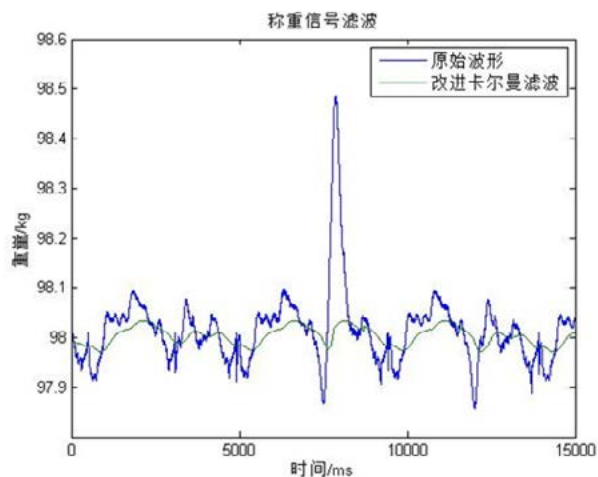


图 5 改进后卡尔曼滤波处理效果图

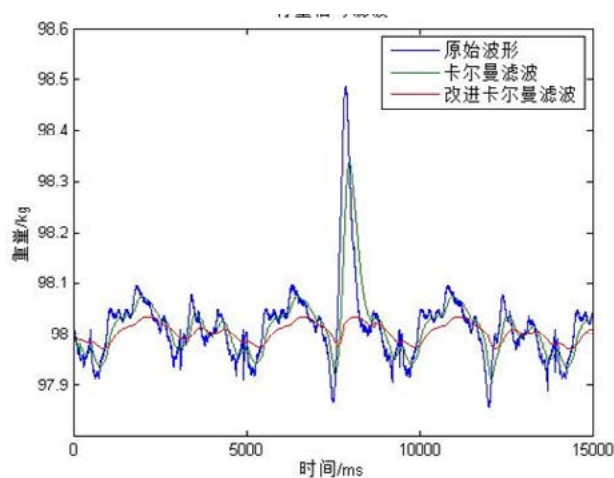


图 6 卡尔曼滤波改进前后效果对比图

观察图 6 可知，经改进后的卡尔曼滤波算法具有更好的滤波效果。

#### 4. 结语

本文针对电子皮带秤称重信号中传统的高通或低通、带通、带阻滤波器不能有效滤除的干扰噪声进行卡尔曼滤波，并针对传统卡尔曼滤波无法对称重信号中存在的野值进行滤除，在传统算法的基础上增加野值的判断和处理环节，并对滤波过程中可能会出现隐含信息提出调整增益的改进方案。依托江苏省计量科学研究院国家自动衡器型式评价实验室的 6# 皮带秤设计试验环节，采集电子皮带秤的称重信号，利用 MATLAB 软件对采集的称重信号进行仿真，验证改进型卡尔曼滤波算法，验证结果表明，改进后的卡尔曼滤波算法具有更好的滤波效果。

## [参考文献]

- [1] 文德仲. 浅析数字滤波器原理及其设计过程 [J]. 科技展望, 2016, (19): 161.
- [2] 叶中村. 统计信号处理 [M]. 中国科学技术出版社, 2013.7: 326-330.
- [3] 周德海, 崔保健, 赵海鹰. GPS 锁定晶体振荡器的数据处理方法研究 [J]. 宇航 计测技术, 2009, 29 (1): 22-24.
- [4] 胡奕明, 秦永元. 目标跟踪系统 Kalman 滤波野值修正算法研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26 (1): 330-334.

作者简介: 李冰莹 (1984-), 女, 安徽六安人, 江苏省计量科学研究院, 高级工程师, 研究方向为动态测量技术、计量技术, lby\_8441@sina.com

作者通讯地址: 江苏省南京市栖霞区文澜路 95 号

邮编: 210023