

文章编号: 1000-8152(2005)06-0861-04

一种新的模糊-卡尔曼滤波器的控制算法及应用

张高煜, 赵恒, 杨万海

(西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对高速剪切中管材运动需要精确而快速的预测问题, 提出了一种新的模糊-卡尔曼滤波器: 将过程噪声、量测噪声与残差均值和残差方差之间分别建立模糊曲面; 省略模糊规则推理; 将滤波器的采样时间与剪切误差之间的关系模糊化. 以这样结构的滤波器来提高对剪切误差的跟踪和预测能力. 仿真结果显示, 新的模糊-卡尔曼滤波器比传统的卡尔曼滤波器更快和更稳定地将剪切误差进行抑制, 而且剪切精度得到提高.

关键词: 模糊-卡尔曼滤波; 高速剪切; 预测

中图分类号: O231 **文献标识码:** A

Control algorithm and application of a new fuzzy-Kalman filter

ZHANG Gao-yu, ZHAO Heng, YANG Wan-hai

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: A new fuzzy-Kalman filter is presented to meet the requirement of accurate and quick prediction of the tube's movement in high speed cutting machine. Two fuzzy surfaces are used to represent respectively the relation between process noise and the mean and covariance of residual, as well as the relation between measurement noise and the mean and covariance of residual, which makes the reasoning of fuzzy rule unnecessary. The relation between the filter sampling time and cutting error is fuzzed. The capability of tracking and the prediction of cutting error are improved by the filter with this structure. The simulation shows that the new fuzzy-Kalman filter has advantages over those available methods in higher speed and better stability in reducing cutting error and improving precision.

Key words: fuzzy-Kalman filter; high speed cutting; prediction

1 引言 (Introduction)

高精度、高速度的剪切一直是管材飞剪控制的终极目标, 通常管材传送机组的绝对速度的不恒定性使得飞剪控制采用有自适应能力的算法成为必要.

本课题是中国国家 863 项目“热交换器用特薄壁高频焊铜管材制造技术研究”的子项目——加工自动线中的高速剪切伺服控制, 所研究的对象是基于伺服系统的高速剪切机. 整个自动线硬件配置如图 1 所示.

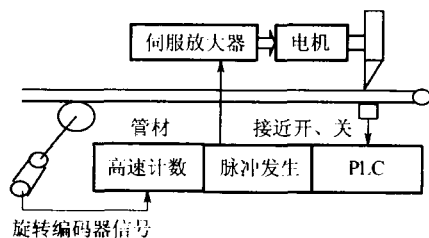


图 1 自动线高速剪切部分
Fig. 1 High speed cutting part of automechanism

自动线高标准的指标对伺服系统的控制算法要求非常严格. 必须使得高速剪切部分的控制算法具有快速跟踪和预测的能力, 及时调整任意两个剪切动作之间的时间间隔, 使剪切误差快速而且稳定地被压缩在指标范围之内.

在本文中, 介绍了一个新的状态量测更新的方法, 用以提高估计的能力.

2 常规卡尔曼预测及剪切控制策略 (Traditional Kalman prediction and cutting control policy)

高速剪切管材运动预测问题在图 2 中表示出来.

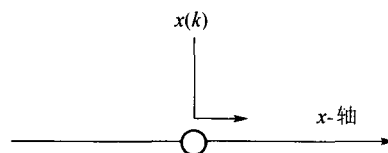


图 2 管材质点运动估计
Fig. 2 Estimation of point on moving tube

在考虑自动线上的随机扰动和剪切动作对管材周期性的扰动时,目标(运动中的管材上的某质点)的速度假设为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \dot{x}_{\text{base}} + c \sin(2\pi ft) + w(t) = \\ &\dot{x}_{\text{base}} + t(c' \cos(2\pi ft)) + w(t), \\ c' &= \frac{c}{2\pi f}. \end{aligned}$$

\dot{x} 为目标的速度; \dot{x}_{base} 为目标的基本速度(管材开卷速度); $c \sin(2\pi ft)$ 为目标的附加速度; $w(t)$ 为目标速度的随机扰动, $w(t)$ 是 0 均值的高斯白噪声,用来表示目标在自动线上受到的随机扰动,其方差为 $Q(k) = E\{(w(k))^2\}$.

因为开卷系统是一直流电机恒速控制系统,理论上管材的开卷速度是恒定的 \dot{x}_{base} ,但是由于剪切动作对管材周期性的扰动,使采用偏差调节的开卷系统出现周期性的速度波动,即可以假设目标的附加速度为 $c \sin(2\pi ft)$, $c \ll \dot{x}_{\text{base}}$. 其目标运动的状态方程就可以表示为^[1]

$$\begin{aligned} X(k+1) &= \\ AX(k) + B(c' \cos(2\pi f k T_s)) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(k). \end{aligned}$$

这里: $A = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ T_s \end{bmatrix}$, 向量 $X(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \end{bmatrix}$, 表示目标的位置和速度; T_s 是采样的周期,在这里的具体情况下则是表示任意两个剪切动作之间的时间间隔.

目标的量测方程为

$$Z(k) = CX(k) + v(k).$$

这里 $C = [1 \ 0]$. 在图 1 中可看到,管材的行走长度是通过压带轮-光电旋转编码器-高速计数模块-PLC(可编程控制器)来得到的,剪切控制系统量测到的是目标的位置; $v(k)$ 是具有 0 均值的非关联的量测噪声,其方差为 $R = E\{v(k)^2\}$. 将卡尔曼滤波器应用到以上标准的运动方程,分两个阶段进行:

i) 预测.

$$\begin{aligned} X(k+1|k) &= AX(k|k) + Bc' \cos(2\pi f k T_s), \\ \hat{Z}(k+1|k) &= C\hat{X}(k+1|k), \\ P(k+1|k) &= AP(k|k)A' + BQ(k)B'. \quad (1) \end{aligned}$$

ii) 更新.

$$\hat{X}(k+1|k+1) =$$

$$\begin{aligned} &\hat{X}(k+1|k) + K[Z(k+1) - \hat{Z}(k+1|k)], \\ P(k+1|k+1) &= P(k+1|k) - KCP(k+1|k), \\ K &= P(k+1|k)C'[CP(k+1|k)C' + R(k)]^{-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

这里 \hat{X} , \hat{Z} , K 和 P 分别表示状态估计值、量测估计值、卡尔曼增益矩阵和预测误差方差矩阵.

剪切自动线最终的输出结果是被切断的管材的长度值 $L(n)$, 所以

$$L(k) = CX(k) - CX(k-1).$$

管材长度的量测值为

$$L_z(k) = Z(k) - Z(k-1).$$

下一步管材长度的预测值为

$$\hat{L}(k+1|k) = C\hat{X}(k+1|k) - Z(k).$$

设管材的标准剪切长度为 L_B , 那么量测的剪切误差为

$$E_L(k) = L_z(k) - L_B.$$

下一步预测剪切误差为

$$\hat{E}_L(k) = \hat{L}(k+1|k) - L_B(k).$$

高速剪切控制的方法就是在预测到将来的剪切误差大于允许误差的情况下,及时进行在线调整,减小下一步的量测剪切误差.

在标准 Kalman 方法进行预测的情况下,常规的调整策略为

$$T_s(k+1) = \begin{cases} T_B + b, & \hat{E}_L(k) < -\epsilon, \\ T_B, & -\epsilon < \hat{E}_L(k) < \epsilon, \\ T_B - b, & \hat{E}_L(k) > \epsilon. \end{cases}$$

这里: T_B 是任意两个剪切动作的基础时间间隔; $\pm \epsilon$ 是允许的剪切误差的上下限, b 是一个固定的常数,在仿真试验中来确定最优值. 对 T_s 的在线调整是由 PLC 发出指令决定脉冲发生器的单位时间的脉冲输出个数,进而调整剪切电机的转速来完成的.

在下述情况下进行仿真:管材行走速度为

$$\dot{x} = \dot{x}_{\text{base}} + c \sin(2 * 3.14158 / T * n * T_s).$$

其中: $T = 31.4\text{s}$, $T_B = 0.25$, $c = \dot{x}_{\text{base}} \times 0.002$, $\dot{x}_{\text{base}} = 60\text{cm/s}$; 剪切的标准长度为 15 cm; 允许剪切误差为 $\pm 0.20\text{cm}$, $R = 0.0001$, $Q = 0.005$, $b = 0.00985$. 不加调整策略的量测剪切误差和常规调整后的量测剪切误差如图 3 所示(图中 n 为剪切次数). 可以看到,调整后的结果有一些改善,但是还有 25% 没有达到标准,必须采用新的调整策略.

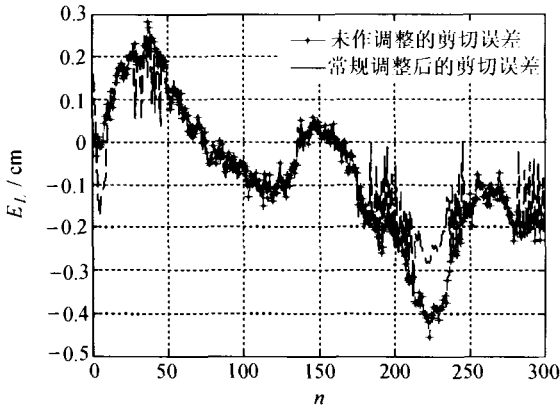


图 3 常规调整前后的量测剪切误差 E_L

Fig. 3 Comparison of the measured cutting errors before and after the traditional adjustments

3 模糊-卡尔曼滤波器(Fuzzy-Kalman filter)

3.1 新的模糊-卡尔曼滤波结构(New fuzzy-Kalman filter structure)

将系统模型的噪声方差阵改写为

$$\begin{cases} R(k) = \beta(k)R, \\ Q(k) = \alpha(k)Q. \end{cases}$$

α, β 是调整值. 则式(2)可改写为

$$K = P(k+1|k)C'[CP(k+1|k)C' + \beta(k)R]^{-1}.$$

而式(1)可改写为

$$P(k+1|k) = AP(k|k)A' + B\alpha(k)QB'.$$

理想情况下的残差 $r = Z(k) - \hat{Z}(k)$ 为零均值白噪声, 如果系统运行过程中残差不再是零均值, 则滤波器存在问题. 残差的方差阵 P_r 与 Q 和 R 的关系如下^[2]:

$$P_r = C(AP(k-1)A' + Q(k))C' + R(k), \quad (3)$$

那么采用模糊控制器, 检测残差, 连续调整 α 和 β 的值, 可使残差方差阵加以改变, 来改善滤波性能. 另外, 基于第 2 节的讨论, 为了将剪切误差能够压缩在允许范围之内, 也考虑将 T_s 的取值与 E_r 建立一定的模糊映射, 所以, 为解决剪切精度和滤波发散的性能问题, 提出了一种新的模糊-广义卡尔曼滤波结构, 如图 4 所示.

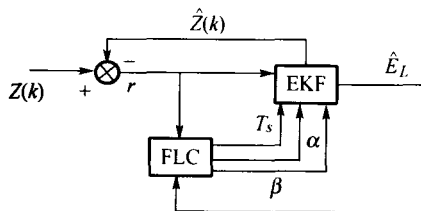


图 4 采用模糊广义卡尔曼滤波的剪切控制

Fig.4 Cutting control using fuzzy extended Kalman filter

3.2 模糊-卡尔曼滤波器的设计 (Design of fuzzy-Kalman filter)

由于剪切系统高度的实时性, 不宜于在模糊控制器 (FLC) 中进行模糊推理运算, 所以, 采用了直接将输入与输出进行模糊隶属度匹配的方法, 来实时得到 T_s, α 和 β 的值.

将 FLC 与卡尔曼滤波结合, 构成了模糊-卡尔曼滤波器. 滤波器中残差 r 的方差和均值可以判断滤波器性能的好坏. 假设 n 表示一段时间内的统计数, 则残差的均值和估计方差分别为^[3]

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{j=t-n}^t r_j,$$

$$\hat{P}_r = \frac{1}{n} \sum_{j=t-n+1}^t r_j r_j^T.$$

将估计值 \hat{P}_r 与式(3)求得的理论值 P_r 进行比较, 当 \hat{P}_r 越来越大于 P_r , 且均值 \bar{r} 渐渐远离零时, 说明滤波器趋于不稳定, 这时, 为了改善滤波器性能, 需要调整噪声强度, 减少系统噪声并增加量测噪声, 就必须获得一个较小的 α 来减小 Q_k 值, 和较大 β 值来增加 R_k . 这样, 滤波器增益矩阵会相应减小, 系统对量测值的信赖和利用程度减小, 滤波性能趋于稳定. 在本文中, 提出一种新的确定 α 和 β 值的方法:

$$\alpha = \frac{F_{lcz}(\bar{r}) + F_{lcs}(\hat{P}_r)}{2},$$

$$\beta = 1 + \mu\beta_c,$$

$$\mu = \frac{F_{lcs}(\bar{r}) + F_{lcs}(\hat{P}_r)}{2}.$$

这里: $F_{lcz}(\cdot)$ 和 $F_{lcs}(\cdot)$ 分别是 Z 型和 S 型模糊化函数^[4,5], β_c 是常数, 在试验中确定, α 和 μ 的分布见图 5 和图 6 所示.

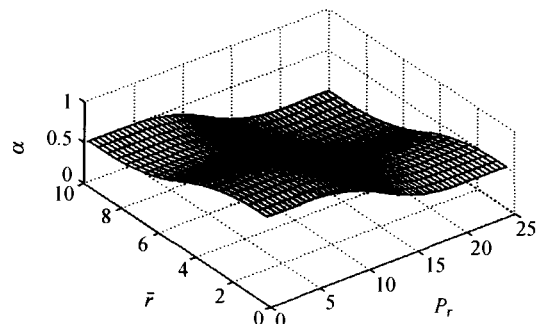


图 5 α 的取值与残差均值和残差方差之间的模糊关系

Fig. 5 Fuzzy relationship of the mean and variance of residual and the value of α

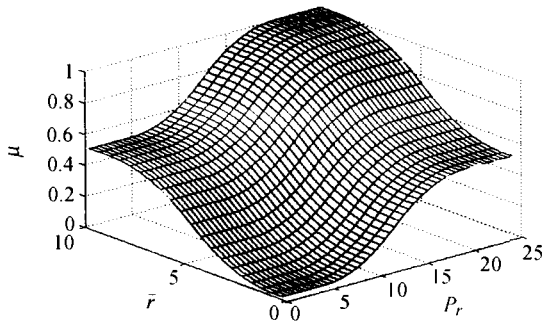


图6 μ 的取值与残差均值和残差方差之间的模糊关系
Fig. 6 Fuzzy relationship of the mean and variance of residual and the value of μ

另外,由于下一步的预测值 \hat{E}_L 不遵从一定的函数规律,而且 \hat{E}_L 影响着 T_s 的调整策略. T_s 与 \hat{E}_L 之间的关系很简单: $\hat{E}_L = 0$, T_s 不作调整; $\hat{E}_L < 0$ 时,随着 $|\hat{E}_L|$ 增加, T_s 变大, $\hat{E}_L > 0$ 时,随着 \hat{E}_L 增加, T_s 变小. 调整策略如下:

$$T_s = T_B(1 + (\lambda - 0.5)t_c),$$

$$\lambda = F_{icz}(\hat{E}_L).$$

其中: t_c 是一个常数,在试验中确定, λ 与 \hat{E}_L/L_B 之间的关系符合图7所示的Z型模糊隶属度.

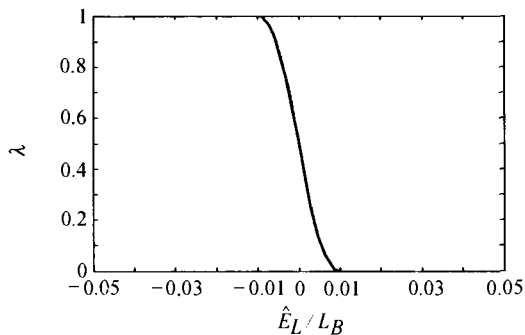


图7 λ 的模糊化
Fig. 7 Fuzzy relationship of λ and \hat{E}_L/L_B

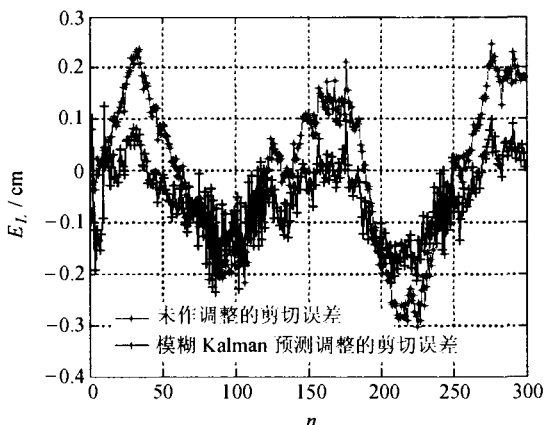


图8 模糊 kalman 预测调整前后的量测剪切误差 E_L
Fig. 8 Comparisons of E_L , the measured cutting errors, before and after the fuzzy-Kalman prediction adjusting

在与第2节相同条件下进行仿真后,得到量测剪切误差 E_L 如图8所示(图中 n 为剪切次数). 可以看到,图8比图3有了很大的改善,低于2%的剪切件没有达标,但是整体的剪切精度已经提高23%.

4 结论(Conclusion)

本文提出了一种新的模糊卡尔曼滤波,在模糊控制器设计中采用了新的方法和提出了新的概念,应用于跟踪和预测实时性要求很高的高速剪切系统,有效地检测和防止卡尔曼滤波器的发散,快速而稳定地将剪切精度加以提高,并给出了仿真结果和分析.

本文仅以高速剪切系统为例论证了此方法的可行性,该滤波技术还可以应用于雷达目标跟踪,车辆导航系统等,应用领域很广泛.

参考文献(References):

- [1] HSENG T. Estimation of one-dimensional radar tracking via fuzzy-kalman filter[C]// *Proc of Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON'93*. Maui, Hawaii: [s. n.], 1993: 2384-2386.
- [2] SASIADEK J Z, WANG Q, ZEREMBA M B. Fuzzy adaptive Kalman filtering for INS/GPS data fusion [C]// *Proc of the 15th IEEE Int Symposium on Intelligent Control*. Patras, Greece: [s. n.], 2000: 181-186.
- [3] STUBBERUD S C, LOBBIA R N, OWEN M A. An adaptive extended kalman filter using artificial neural networks [C]// *Proc of the 34th Conf on Decision & Control*. New Orleans: [s. n.], 1995: 1852-1856.
- [4] 童树鸿,沈毅,刘志言. 数据融合的模糊模型和算法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(1): 7-10.
(TONG Shuhong, SHEN Yi, LIU Zhiyan. Fuzzy model and algorithms for data fusion [J]. *J of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(1): 7-10.)
- [5] 王磊,王为民. 模糊控制理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
(WANG Lei, WANG Weimin. *Fuzzy Control Theory and Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997.)

作者简介:

张高煜 (1972—),男,博士研究生,研究兴趣为数据融合和智能控制, E-mail: farwind1972@yahoo.com.cn;

赵恒 (1975—),博士研究生,研究兴趣为数据挖掘、模糊聚类, E-mail: yaheng2000@sina.com;

杨万海 (1939—),男,教授,博士生导师,研究兴趣为智能信息处理、多传感器数据融合, E-mail: yy3941@126.com.