

文章编号:1006-1355(2021)02-0062-08

基于自适应滤波的锂电池隔膜卷绕系统张力估计

周亚林¹, 王恒升^{1,2}

(1. 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;

2. 高性能复杂制造国家重点实验室(中南大学), 长沙 410083)

摘要: 锂电池隔膜卷绕系统的电机转速、放卷辊的卷材卷径和放卷张力等实时信号都带有高斯白噪声, 易形成较大的滞后, 从而导致控制系统的稳定性和精度降低。现以协方差匹配技术为滤波发散判据, 再结合对于指数加权系数的表达式限定记忆滤波的次数, 提高噪声初始值的分配权重, 来保持滤波的自适应程度, 提出一种基于改进型 Sage-Husa 自适应滤波估计张力的方法, 实现对系统噪声协方差阵与测量噪声协方差阵的自适应变化。实验结果表明, 所提出的方法不仅能更准确、稳定地估计出锂电池隔膜卷绕系统放卷张力, 还能在一定范围内使其不受给定的噪声协方差阵初值影响, 而且具有较高的精度和较强的实时性, 优于一般的扩展卡尔曼滤波算法。

关键词: 振动与波; 锂电池隔膜卷绕系统; Sage-Husa 滤波; 协方差匹配; 非线性动力系统; 卡尔曼滤波器

中图分类号: TP274

文献标志码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2021.02.010

Tension Estimate for Lithium Battery Diaphragm Winding Systems Based on Adaptive Extended Kalman Filter

ZHOU Yalin¹, WANG Hengsheng^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory for High Performance Complex Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The real-time signals of the motor speed of the lithium battery diaphragm winding system, the winding diameter of the unwinding roller and the unwind tension are all accompanied by Gaussian white noise, which tends to form a large lag and leads to a reduction in the stability and accuracy of the control system. In this study, a method for estimating the tension based on improved Sage-Husa adaptive filtering is proposed. In this method, the covariance matching technology is used as the filter divergence criterion. Combined with the expression of the exponential weighting coefficient to limit the number of memory filtering, the weight of the initial value of the noise is raised to maintain the degree of adaptive filtering. Finally, the adaptive change of system noise covariance matrix and measurement noise covariance matrix is realized. The experimental results show that the proposed method can estimate the unwind tension of the lithium battery diaphragm winding system more accurately and stably and eliminate the effect of the initial value of the given noise covariance matrix. It also has higher accuracy and stronger real-time performance, which is superior to the general extended Kalman filter algorithm.

Key words: vibration and wave; lithium battery diaphragm winding system; Sage-Husa algorithm; covariance matching; nonlinear dynamic system; Kalman filter estimator

在新能源领域锂电池占有重要地位, 而锂电池隔膜是其关键的 inner 组件之一。在卷绕过程中隔膜

张力及传送速度是达到预期产品质量的两个关键因素^[1], 而放卷部分作为卷绕装置的核心部分, 其主要目标之一是达到预期的隔膜传送速度, 同时将隔膜张力的跟踪误差保持在一定范围内。一般的卷绕工业设备通常配有张力传感器, 通过张力传感器测量卷绕物之间的张力大小, 然后反馈到控制器形成闭环。这种控制方法具有较高的控制精度和响应速度, 此外, 张力传感器不仅信号容易受到外部影响, 而且在一些特殊场合不便安装。

收稿日期: 2020-06-04

基金项目: 国家 973 课题资助项目(2013CB0335504)

作者简介: 周亚林(1993-), 男, 湖南省邵东市人, 硕士研究生, 主要从事信号处理与机电系统控制研究。

通信作者: 王恒升, 男, 博士生导师。

E-mail: whsheng@csu.edu.cn

近年来,工业中的卷绕系统普遍使用重力传感器或浮动辊测量卷绕物的张力,在对锂电池隔膜卷绕系统的运行状态进行监测的时候,张力是一个非常重要的评价指标。同时,这些张力测量元件价格一般都比较昂贵,在使用中需要定期维修、校准甚至更换,给使用带来很大不便^[2]。另一方面,它们都需要增加额外的辊轴直接与卷绕物进行接触式测量,不仅降低系统的可靠性,还增加系统的复杂度和控制的难度。张力观测器为张力测量问题提供了一种划算而实用的解决方法。为解决上述问题而提出的无传感器测量技术,已经成为近年来的研究热点。Abjadi等^[3]在文献的基础上设计了无张力传感器的分散滑模控制器,仿真实验结果表明即使存在参数不确定时,该控制方法都具有较高的跟踪精度;瞿成明等^[4]采用专家推理策略给出了一种在线多模态状态观测和参数修正的智能张力观测器,并用张力观测值对控制系统进行前馈补偿,取得的控制效果满足了工艺要求。文献[5-6]利用相邻两个电机驱动轴上的光电编码器信号,获取放卷辊上隔膜的卷径和线速度信号,进而利用放卷线速度与进给线速度信号获取张力的观测信号,这种方法无需张力传感器就可以在稳态状态下很好地观测张力;文献[7-8]提出了一种不需要传感器的V-F协调控制策略,并通过实验验证了方案的可行性。

在隔膜卷绕过程中,隔膜的卷径与转动惯量随时间变化,加之摩擦力、辊轴布局等其它不确定因素的影响,使得锂电池隔膜卷绕系统成为集多输入、多输出、强耦合、非线性等为一体的复杂机电系统^[9]。对隔膜张力进行控制的时候,若用带有较大噪声的数据进行计算会造成控制量计算的抖动,影响控制效果;而如果用一般的低通滤波处理,会造成较大的滞后,影响控制系统的稳定性和精度。由于很难建立锂电池隔膜卷绕系统精确模型及系统噪声、测量

噪声的统计特性具有不确定性,采用一般的Sage-Husa滤波算法,存在既不能同时估计噪声特性又不能确保滤波以及跟踪精度甚至可能出现滤波发散的缺点^[10]。

根据锂电池隔膜卷绕系统以及隔膜的动力学模型,建立了系统状态方程和测量方程,其次利用限定记忆滤波法改变预先规定的记忆长度,再结合以协方差匹配为滤波发散判据的技术,进而提出了一种基于改进型Sage-Husa自适应滤波的张力估计方法。最后通过实验表明,基于转变后的模型,在估计锂电池隔膜卷绕系统中的放卷张力时,实现了噪声协方差阵的自适应变化。同时,所提出的方法比传统的扩展卡尔曼滤波相比,不仅减小了系统控制量张力的滞后性,还提高了估计精度,而且稳定性和实时性也得到了显著提升。

1 系统建模

一个完整的系统主要由放卷辊1、牵引辊2、主辊3、收卷辊4、若干个过辊、张力检测装置、控制器和其他辅助装置等组成。放卷辊1、牵引辊2、主辊3和收卷辊4是卷绕系统的重要组成部分,隔膜从放卷辊1释放,经过一系列处理后由收卷辊4收集,因此,随着隔膜的释放和收集,放卷辊1和收卷辊4的半径和转动惯量不断变化。牵引辊2为整个卷绕系统设置参考速度,它一般为紧邻放卷辊的第一个辊,其作用为调节系统速度与带动隔膜。主辊3调节隔膜的张力。收卷辊4无电机驱动,进行被动表面收卷,依靠主辊产生的摩擦力对卷绕物进行驱动,作用在主辊上的线速度不受卷材直径变化的影响,通过调节主辊的转矩和速度,便可获得不同要求的卷材。张力检测装置测力传感器辊(Load Cell Roller)主要用于检测隔膜张力的大小,然后将检测的张力值反馈给控制器。

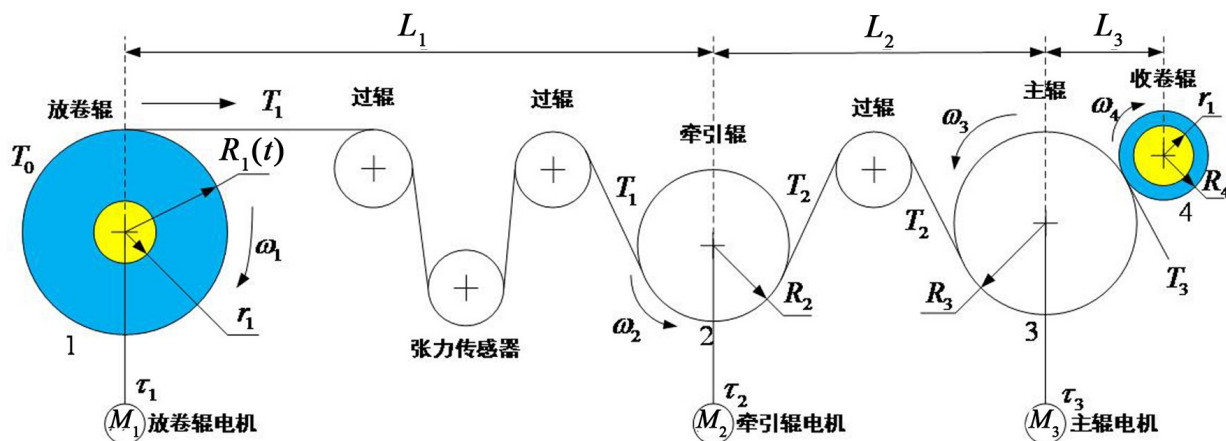


图1 锂电池隔膜卷绕系统的简化结构图

锂电池隔膜卷绕系统的动态特性可以通过将两个连续辊轴间的隔膜张力模型和每个辊轴速度模型结合起来进行描述。通常将两个连续的驱动辊之间看成一个张力区,以张力区为界可以将整个卷绕系统分成多个子系统,如图1所示,将张力区域分别划分为放卷端 L_1 、牵引端 L_2 、收卷端 L_3 3个张力区。

1.1 辊轴的运动方程

在卷绕过程中,假设卷绕物和辊轴之间没有相对滑动,卷绕物的线速度等于辊轴表面的线速度。根据图1中辊轴的受力分析,第 $k(k=1,2,3)$ 个驱动辊轴的转矩平衡方程为

$$\frac{d(J_k j_k \omega_k(t))}{dt} = \tau_k - M d_k + \frac{(T_k - T_{k-1}) R_k}{j_k} - \frac{b_k \omega_k(t)}{j_k} \quad (1)$$

式中: $\omega_k(t)$ 为第 k 个驱动辊轴的角速度; $\omega_k(t) = v_k(t)/R_k$, R_k 为第 k 个驱动辊轴的半径; J_k 为折算到第 k 个伺服电机轴上的转动惯量; τ_k 为第 k 个驱动辊轴的伺服电机输入转矩; b_k 为卷绕物和驱动辊轴间的摩擦系数; j_k 为第 k 个驱动辊的传动比; $M d_k$ 为折算到第 k 个伺服电机轴上的阻尼力矩; T_k 为第 k 个张力区隔膜受到的张力。放卷辊轴的转动惯量 J_1 和半径 R_1 是不断变化的,其他驱动辊轴的则为常值。

假设认为放卷辊半径变化是连续的且不考虑隔膜中空气间隙等因素对隔膜厚度的影响,设隔膜为致密隔膜,则在卷绕过程中放卷辊上隔膜的半径变化率为

$$\frac{dR_1}{dt} = -\frac{h v_1}{2\pi R_1} = -\frac{h \omega_1}{2\pi} \quad (2)$$

式中: h 是隔膜的厚度。考虑动态过程的任意 t 时刻,放卷部分折算到放卷电机轴上的转动惯量为

$$J_1(t) = J_m + \frac{1}{j_1^2} [J_c + J_{\omega_1}(t)] = J_m + \frac{1}{j_1^2} [J_c + \frac{\pi}{2} H \rho (R_1^4(t) - r_1^4)] \quad (3)$$

式中: J_m 为驱动部分的转动惯量(常量),包括电机电枢、联轴器等部件; H 为隔膜的宽度; ρ 为隔膜密度; r_1 是放卷辊的初始半径; J_c 是放卷辊(芯轴)的转动惯量(常量); J_{ω_1} 为放卷辊上隔膜的实时转动惯量。

1.2 隔膜的张力方程

隔膜的张力产生是由于隔膜在长度方向上存在速度差使隔膜本身发生形变而产生的一种内应力^[1];由图1所示,假定隔膜受到拉伸的形变为弹性形变,忽略其塑性形变,根据胡克定理、库伦定理和质量守恒定理可以建立隔膜张力的动态模型。

(1) 胡克(Hooke)定理:在一定的弹性形变范围

内,隔膜受到拉伸产生的弹性应力 T 与隔膜的形变率成正比。

$$T = EA \varepsilon = EA \frac{L - L_0}{L_0} \quad (4)$$

式中: E 为隔膜的弹性模量; A 为隔膜的横截面积; ε 为隔膜的形变率; L 和 L_0 分别为隔膜的自然长度和受张力作用拉伸后的长度。

(2) 库伦(Coulomb)定理:隔膜与辊轴之间发生摩擦时两个辊轴间隔膜张力变化情况可以被认为是两个物体之间的摩擦。

(3) 质量守恒定理:隔膜在有张力和无张力状态下质量是保持不变的。根据前面的假设认为隔膜在拉伸前后横截面积保持不变。因此,两个驱动辊轴间的隔膜质量的变化率等于质量的流入量减去质量的流出量^[12]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\rho_0 L}{1 + \varepsilon_2(t)} \right) = \frac{\rho_0}{1 + \varepsilon_1(t)} v_1(t) - \frac{\rho_0}{1 + \varepsilon_2(t)} v_2(t) \quad (5)$$

一般情况下形变率 ε_i 很小,可认为 $(1 + \varepsilon_i(t))^{-1} \approx 1 - \varepsilon_i(t)$,则式(5)两边同乘以 EA ,在放卷端张力区,可得:

$$L_1 \frac{dT_1}{dt} = v_1 T_0 - v_2 T_1 + EA(v_2 - v_1) \quad (6)$$

式中: v_1 为放卷辊展开隔膜的线速度; v_2 为牵引辊的线速度; T_0 为卷绕在放卷辊上隔膜的初始张力。由式(6)可以看出,放卷张力与放卷辊的线速度、牵引辊的线速度是相互耦合的,放卷辊的线速度与牵引辊的线速度的滤波估计的好坏决定了放卷张力估计值的精度。

2 改进的自适应滤波的张力估计

卡尔曼滤波算法作为基于最小方差估计理论的数据处理算法,利用系统的状态方程和测量方程,通过与被估计信号有关的观测量,估计出要估计的状态变量。在系统的模型噪声和测量噪声的统计特性已知的情况下,卡尔曼滤波能使估计均方误差最小,但在噪声的统计特性不能准确获取的情况下,卡尔曼滤波的估计性能就会下降,而且很可能会发散^[13]。在锂电池隔膜卷绕系统的应用环境中,隔膜的厚度不均、零部件之间的共振、建模误差等多种因素会造成系统噪声和测量噪声特性发生变化,使得初始的先验值不能代表实际系统工作时的噪声情况,使得本系统存在张力估计值发散的问题,而传统的卡尔曼滤波难以解决此问题。因此,本文提出了一种适用于锂电池隔膜卷绕系统的基于改进型 Sage-Husa

自适应滤波的张力估计。

2.1 常规的 Sage-Husa 自适应滤波算法

为解决上述存在的问题,常采用自适应滤波的方法,通过在线估计修正模型参数。国外学者 Sage 和 Husa^[14]提出的自适应卡尔曼滤波算法以其原理简单、实时性好等优点在许多领域得到了广泛的应用;这是基于极大后验准则来估计统计特性的方法,该方法利用过去的信息的平均来估计当前的系统噪声和测量噪声,再借助卡尔曼滤波框架进行滤波解算,从而获得系统状态的最优解。

针对锂电池隔膜卷绕系统以及隔膜的动力学模型,定义状态变量为:

$$x = [T_1 \quad v_1 \quad v_2]^T \quad (7)$$

在状态变量中,隔膜放卷端张力传感器的张力 T_1 、放卷辊的线速度 v_1 、牵引辊的线速度 v_2 属于易测量的状态量,隔膜放卷端张力 T_1 、放卷辊的线速度 v_1 和牵引辊的线速度 v_2 属于待估计状态。则定义测量方程的真实值为

$$Z = [\bar{T}_1 \quad \bar{v}_1 \quad \bar{v}_2]^T \quad (8)$$

根据锂电池隔膜的动力学模型以及系统速度公式可得到系统的状态方程和测量方程,最后经线性化之后离散形式可写成:

$$\begin{cases} X(k) = f(X(k-1), U(k-1)) + W(k-1) \\ Z(k) = h(X(k-1), k-1) + V(k) \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$\phi_{(k-1)} = \frac{\partial f(X(k-1), U(k-1))}{\partial x} \quad (10)$$

$$C = \frac{\partial h(X(k-1), (k-1))}{\partial x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$f(X(k-1), U(k-1)) =$$

$$\begin{bmatrix} T_1(k-1) + \frac{v_1(k-1)T_0}{L_1}T_s - \frac{v_2(k-1)T_1(k-1)}{L_1}T_s + \\ \frac{EAT_s}{L_1}(v_2(k-1) - v_1(k-1)) \\ v_1(k-1) + a_1T_s \\ v_2(k-1) + a_2T_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $f(X(k-1), U(k-1))$ 为状态转移函数; $U(k-1) = [a_1 \quad a_2]^T$ 为控制输入量; $Z(k)$ 为系统实际可测的量; $h(X(k-1), k-1)$ 为测量函数; $W(k-1)$ 为系统过程噪声序列,是均值为 q_k 、协方差为 Q_{k-1} 的高斯白噪声; $V(k)$ 为测量噪声序列,是均值为 r_k 、协方差为 R_{k-1} 的高斯白噪声; T_s 为采样时间; $\phi_{(k-1)}$ 为状态转移函数的雅可比矩阵,通过求状态转移函数关于自变量的偏导数得到; C 为测量方程的雅可比矩阵,通过求测量函数关于自变量的偏导数

得到。

对上述锂电池隔膜卷绕系统,有递推形式的简化 Sage-Husa 自适应滤波算法可描述为

(1) 状态预测

$$\hat{X}_{k|k-1} = \phi_{(k-1)} \hat{X}_{k-1} + q_k \quad (13)$$

$$P_{k|k-1} = \phi_{k-1} P_{k-1} \phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (14)$$

(2) 状态校正

$$K_k = P_{k|k-1} C^T (C P_{k|k-1} C^T + R_{k-1})^{-1} \quad (15)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - C \hat{X}_{k|k-1}) \quad (16)$$

$$P_k = (I - K_k C) P_{k|k-1} \quad (17)$$

(3) 噪声统计特性的估计

$$r_k = (1 - d_{k-1}) r_{k-1} + d_{k-1} (Z_k - C \hat{X}_{k|k-1}) \quad (18)$$

$$\gamma_k = Z_k - C \hat{X}_{k|k-1} - r_k \quad (19)$$

$$q_k = (1 - d_{k-1}) q_{k-1} + d_{k-1} (\hat{X}_k - \hat{X}_{k|k-1}) \quad (20)$$

$$R_k = (1 - d_{k-1}) R_{k-1} + d_{k-1} (\gamma_k \gamma_k^T - C P_{k|k-1} C^T) \quad (21)$$

$$Q_k =$$

$$(1 - d_{k-1}) Q_{k-1} + d_{k-1} (K_k \gamma_k \gamma_k^T K_k^T + P_k - \phi_{k-1} P_{k-1} \phi_{k-1}^T) \quad (22)$$

$$d_k = (1 - s) / (1 - s^{(k+1)}) \quad (23)$$

式中: γ_k 为新息序列,指测量变量的实际值与预测值之间的误差; d_k 为指数加权系数,指数加权的作用是通过给予陈旧测量的数据和新近测量数据不同的系数,使得新近数据在估计中发挥主要作用,而使陈旧数据逐渐被遗忘^[15]; s 为遗忘因子^[16],通常 s 的范围为 $0.95 < s < 0.99$,采用遗忘因子 s 可以限制滤波器滤波估计的记忆长度, s 越大就越加重重新测量数据对当前实时估计的作用;从式(21)得出等号右边的第一项代表在 k 时刻之前的所有的测量噪声协方差信息的总和,第二项代表新近测量噪声协方差信息。

2.2 改进的 Sage-Husa 自适应滤波算法

由于常规的 Sage-Husa 自适应滤波 (SHAETF) 算法需要根据对系统噪声和测量噪声的统计特性进行自适应调整,这不仅易造成求解计算时计算量过大,而且求解结果对于初值变得较为敏感,滤波不稳定,易增加滤波发散的概率^[17];因此,本文加入基于“协方差匹配”技术的滤波发散判据,目的是对测量信息是否异常做出判断,并以此判据为基准对自适应卡尔曼滤波的过程进行干预,来提高滤波器解算的实时性。

协方差匹配技术的基本思想是:实际的余项应和它的理论特性“相匹配”,即在滤波估计的同时检验实际的余项,来判断它是否是相容,如果不相容即滤波出现异常,当实际的余项在原假设 R_{k-1} 、 Q_{k-1} 下

不相容时,则对 R_k 、 Q_k 进行噪声估计来代替原假设的 R_{k-1} 、 Q_{k-1} 。

根据文献[18],来判断滤波异常的判据是:

$$\gamma_k \cdot \gamma_k^T > \lambda \cdot \text{Tr}(E[\gamma_k \cdot \gamma_k^T]) \quad (24)$$

式中: λ 为可调系数, $\lambda > 1$; Tr 表示对矩阵求迹; E 是对矩阵求均值; 式(24)的左边表示新息的平方和, 反映了系统实际估计误差的新息; 右边与新息序列的协方差阵的迹有关, 反映了理论预测误差的新息。如果式(24)成立, 表示此刻的实际误差超过理论的 λ 倍, 滤波异常。 $\lambda = 1$ 则为最严格的收敛判据条件。假设 $R_k = R_{k-1}$, 则有:

$$E[\gamma_k \cdot \gamma_k^T] = CP_{k|k-1}C^T + R_k \quad (25)$$

因此, 由式(24)、式(25)可推出滤波异常的判据为

$$\gamma_k \cdot \gamma_k^T > \lambda \cdot \text{Tr}(CP_{k|k-1}C^T + R_k) \quad (26)$$

在滤波过程中, 利用式(26)对此时滤波的状态进行判断, 若式(26)成立, 则说明出现滤波异常, 应采用加重当前测量数据的权重方法来使其适应系统模型变化对滤波产生的影响, 需要对 R_k 、 Q_k 进行估计, 使其适应当前的滤波; 反之, 式(26)不成立, 说明滤波解算无异常, 不需要估计 R_k 、 Q_k , 即在进行第 k 次滤波时, 利用 γ_k 对 R_k 、 Q_k 进行检验。若式(26)成立, 则认为实际的余项与原假设 $R_k = R_{k-1}$ 、 $Q_k = Q_{k-1}$ 是不相容的, 此时由式(21)、式(22)分别计算 R_k 、 Q_k 代替 R_{k-1} 、 Q_{k-1} ; 相反, 若式(26)不成立, 则省去式(21)、式(22)的计算, 则 $R_k = R_{k-1}$ 、 $Q_k = Q_{k-1}$, 从而分别实现了对 R_k 、 Q_k 的自适应估计。

由式(21)、式(22)得知, 随着滤波次数 k 的不断增加, $s^{(k+1)}$ 会接近于 0, 自适应滤波的权重会逐渐趋于 $1-s$, 并不会保持不变。同时, 测量噪声的协方差初始值 R_0 对 R_k 的分配权重会逐渐衰减, 并会慢慢趋于 0。上述原因造成噪声估计器的自适应度降低, 滤波的估计精度也会随之降低, 考虑到锂电池隔膜卷绕系统的生产环境是多变的, 这种情况是不能满足常规应用的。因此, 为提高算法的稳定性, 需对 Sage-Husa 自适应滤波进行相应的改进, 使其在推导过程中能够一直保持正定, 从而使滤波估计的稳定性得到改善^[19]。

当 s 选择为 0.95 至 0.99 之间的数值时, 分别进行 500 次和 1000 次的滤波估计时, 会有:

$$0.95^{500} \sim 0.99^{500} = 7.29 \times 10^{-12} \sim 6.57 \times 10^{-3}$$

$$0.95^{1000} \sim 0.99^{1000} = 5.29 \times 10^{-23} \sim 4.32 \times 10^{-5}$$

由上述分析可知, 大概在经历 500 次至 1000 次滤波后, 大约在滤波解算的 100 s 至 200 s 时, 滤波的初始值基本上不会对滤波解算产生影响了, 而系统

信息和测量信息在滤波中的权重会不断加大, 直至稳定到最后的 $1-s$ 。如图 2 所示, 指数加权系数 $d_k = (1-s)/(1-s^{k+1})$ 的衰减是很快的。

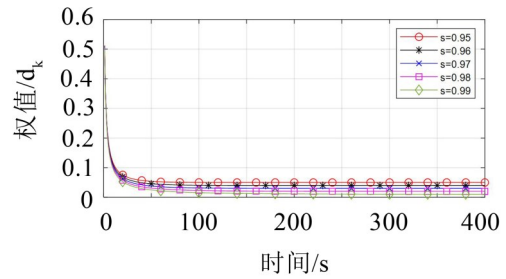


图2 权值 d_k 的衰减情况

由图 2 可知, 当遗忘因子 s 在 0.95 至 0.99 范围内取值时, 权值 d_k 衰减很快, 大概在 200 s 左右便衰减到稳定值 $1-s$ 。因此, 新近的系统信息与测量信息对滤波估计的贡献值在固定, 同时滤波的自适应度也在随之快速下降, 通过采取相应的改进策略进行干预显得尤为重要^[20]。

针对上述出现滤波自适应度降低的问题, 对判据的应用方法进行如下的干预改进措施: 选择限定记忆滤波次数 $k = \beta$ (β 是一个较大的整数), 当滤波估计次数累积达到 β 时, 在计算 d_k 时, 便将 k 重新置为 0, 让滤波估计从初始值处再开始计算权值, 然后, 重新进行系统噪声和过程噪声协方差阵的估计, 虚线方框是改进后的 Sage-Husa 自适应滤波, 如图 3 所示。

3 实验分析与验证

本实验基于锂电池隔膜卷绕系统的实验平台进行, 实验设备有伺服电机 (Beckhoff, AM-8042)、伺服驱动器 (Beckhoff, AX-5103)、PLC 控制器 (Beckhoff, CX-3E80AE)、张力传感器和若干组辊, 主站、从站与 PC 之间的通讯通过 EtherCAT 总线实现。其中实验设置的采样时间为 0.005 s, 实验平台如图 4 所示。

在本次实验中, 设置的放卷张力期望值为 $T_{\text{set}} = 10 \text{ N}$, 锂电池隔膜卷绕系统的运行状态如图 5 所示, 实验参数分别为: $r_1 = 0.04615 \text{ m}$; $j_1 = 2$; $E = 2.0982 \times 10^7 \text{ N/m}^2$; $T_0 = 0 \text{ N}$; $H = 0.33 \text{ m}$; $h = 0.00012 \text{ m}$; $b_1 = 0.0084$; $M_{d1} = 0.42$; $s = 0.989$; $\rho = 798.7879 \text{ kg/m}^3$; $\beta = 1000$; $L_1 = 0.56 \text{ m}$; $J_0 = 0.00104 \text{ kg/m}^2$ 。

在 ISHAEKF 算法和 EKF 算法中, 初值选择如下:

$$X_0 = [7.109 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$P_0 = \text{diag}([1 \quad 1 \quad 1])$$

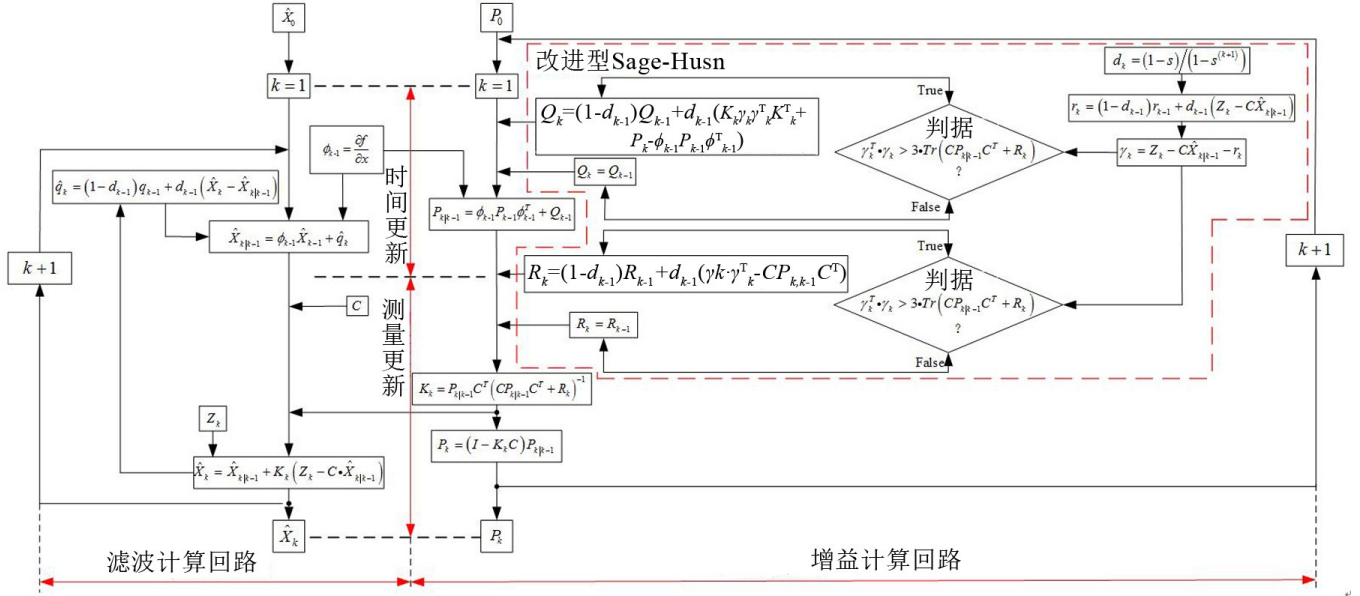


图3 改进型 Sage-Husa 自适应滤波的流程图



图4 锂电池隔膜卷绕系统的实验平台

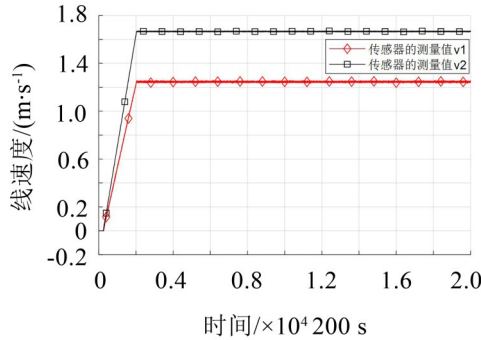


图5 锂电池隔膜卷绕系统状态估计算法的输入信号

$$Q_0 = \text{diag}([1 \times 10^{-6}, 2 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-5}])$$

$$R_0 = \text{diag}([1, 0.001, 0.001])$$

对于基于改进的自适应滤波的判据应用的方法所涉及的滤波估计次数 β ,将取不同的值进行实验验证,其放卷张力的估计值的变化趋势如图6所示,经过4次对比实验发现,当 $\beta = 200$ 时,曲线的误差较大,这是在滤波200次时将 k 重新置为0,使得滤波权值调整的次数太多导致过分加重现时的数据,导致放卷张力的滤波的动态误差、稳态误差都比较大;当 $\beta = 1000$ 时,滤波的效果趋于变好;当 $\beta = 2000$ 时,比 $\beta = 1000$ 的滤波的误差要差一些。综上所述,

当 $\beta = 1000$ 左右时的滤波效果最好。

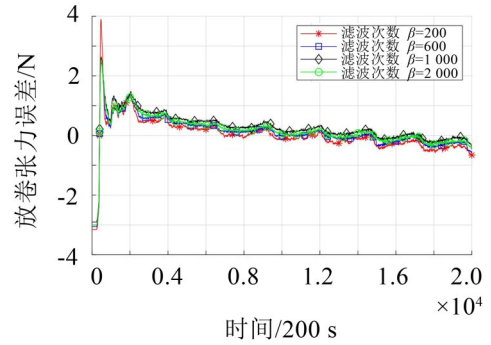


图6 放卷张力的误差曲线

图7(a)、图7(b)、图7(c)给出了基于 ISHAEKF 与 EKF 不同观测量的估计结果比较,虽然通过人工给定了最优先验参数,但是 ISHAEKF 算法不仅实现了噪声统计参数的自适应,而且更好抑制了滤波发散。在加速阶段的时候,图7(a)中 EKF 放卷张力明显脱离真实值,而 ISHAEKF 算法能更好跟踪真实值。在滤波估计过程中,ISHAEKF 算法通过自适应实时修正和估计系统噪声协方差阵 Q 和观测噪声协方差阵 R ,对系统模型线性化误差进行了补偿,使得滤波估计值 T_1, v_1, v_2 能较快收敛于真实值。

为了进一步分析 ISHAEKF 算法的估计效果,对基于 ISHAEKF 和 EKF 算法的估计结果稳态精度进行比较,表1给出了基于 EKF 和 ISHAEKF 的稳态估计精度比较结果,表中 e_n 为测量值与状态估计值的平均偏差, e_{RMS} 是状态估计误差的均方根值,定义为

$$e_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (27)$$

式中: y_i, \hat{y}_i 分别为分析信号的实际测量值和估计值。

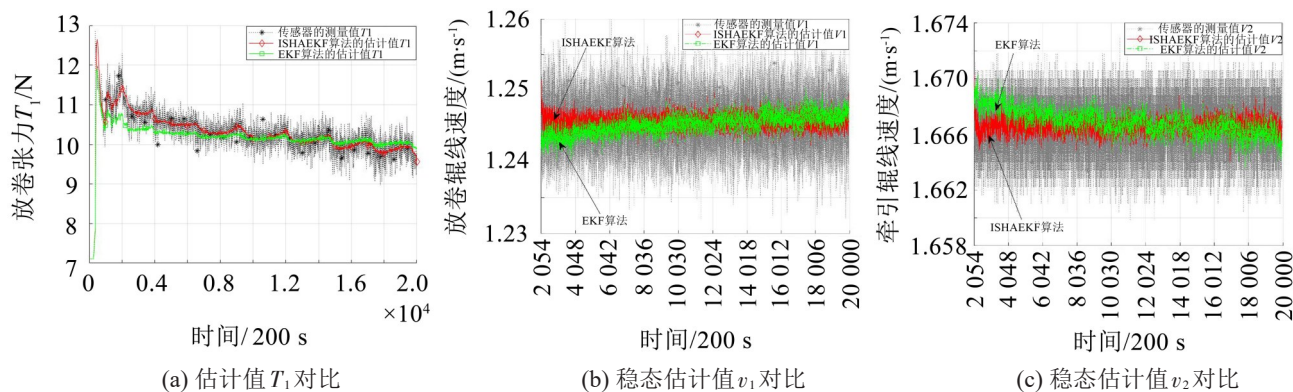


图7 基于ISHAEKF与EKF两种算法的状态量对比

从表1中可以看出,与EKF算法相比,ISHAEKF算法有较高的估计精度。当测量噪声偏离真实统计特性时,估计精度会降低。说明EKF算法对测量噪声协方差阵初值非常敏感,这也是造成EKF在实际应用中很难保证估计精度的原因。

为了验证ISHAEKF算法的估计结果不受 Q 和 R 的初值影响,分别随机产生两组 Q 和 R 的初值 Q_0 和 R_0 ,如表2所示。

表1 状态量估计误差结果分析

算法	状态量	e_n	e_{RMS}
EKF	T_1	-0.121	0.456 2
	v_1	-2.5×10^{-4}	0.010 7
	v_2	-2.2×10^{-4}	0.012 5
ISHAEKF	T_1	0.011 7	0.269 9
	v_1	5.7×10^{-5}	0.003 5
	v_2	-2.8×10^{-5}	0.002

表2 不同 Q_0 和 R_0 组合

序号	Q_0	R_0
1	$Q_0 = \text{diag}([1 \times 10^{-6}, 2 \times 10^{-5}, 2 \times 10^{-5}])$	$R_0 = \text{diag}([1, 0.001, 0.001])$
2	$Q_0 = \text{diag}([1.76 \times 10^{-5}, 8.8 \times 10^{-5}, 8.8 \times 10^{-5}])$	$R_0 = \text{diag}([10, 0.01, 0.01])$

图8给出了不同 Q_0 和 R_0 下的估计结果比较,ISHAEKF算法中序号1为第一组 Q_0 和 R_0 的估计结果,ISHAEKF算法中序号2为第二组 Q_0 和 R_0 的估计结果,从图中可以看出,不同的 Q_0 和 R_0 对估计结果的影响较小。

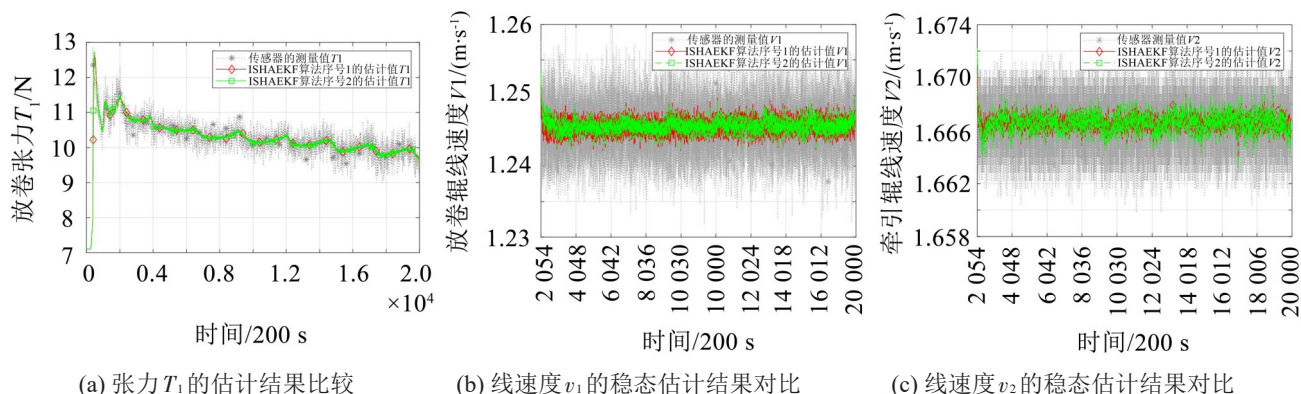
表3给出了在不同的噪声协方差阵初值下放卷张力 T_1 、线速度 v_1 和线速度 v_2 估计值的平均偏差和均方根值。表3中的数据表明估计结果受噪声协方差阵初值的影响程度较小。

表3 状态量估计误差结果分析

序号	估计量	e_n	e_{RMS}
1	T_1	0.086 4	0.981 3
	v_1	4.7×10^{-4}	0.008 4
	v_2	-4.1×10^{-4}	0.005
2	T_1	0.045 4	0.617 8
	v_1	1.7×10^{-4}	0.006 2
	v_2	-1.5×10^{-4}	0.002 9

综上所述,可验证改进型Sage-Husa自适应滤波算法在滤波精度、收敛速度、易用性等方面均体现出不错的效果。

在实验数据中,由张力传感器所得的放卷张力 T_1 、放卷辊的线速度 v_1 、牵引辊的线速度 v_2 、放卷辊的隔膜卷径 R_1 带有高斯白噪声,而且与张力估计值相

图8 不同 Q_0 和 R_0 的ISHAEKF结果比较

关的系统参数 E 、 H 、 h 的波动会带来张力估计值的波动。根据式(6)可得出,采用ISHAEKF算法估计放卷辊的线速度 v_1 和牵引辊的线速度 v_2 后,放卷张力估计的精度明显比张力传感器的更好。从细节上看,采用基于改进型Sage-Husa自适应滤波算法(ISHAEKF)估计的放卷张力虽然有毛刺,但这主要是由于张力观测值是通过计算得到的,任何相关参数的细微变化都会导致张力的波动。

4 结语

本文着重研究了一种基于改进型Sage-Husa自适应滤波的张力估计方法,并将其应用在锂电池隔膜卷绕系统中。在常规的Sage-Husa自适应滤波的基础上,对指数加权表达式中的滤波次数进行限定记忆并结合协方差匹配为滤波发散判据。该方法不仅滤波估计精度高,计算量较小,而且能够克服传统EKF估计结果受噪声协方差阵初值影响较大以及易滤波发散的问题。实验结果表明,将ISHAEKF与EKF的估计结果相比,ISHAEKF算法能以较高的精度同时估计出张力和速度;接下来比较选取不同噪声协方差阵 Q_0 和 R_0 的估计结果,可知所提的方法克服了EKF算法估计结果受噪声协方差阵影响较大的问题,不同的 Q_0 和 R_0 条件下均能以较高的精度估计出张力。

本文估计出的张力是通过计算得到的,实际系统中的相关参数没有通过严格的实验得出,而参数的细微变化会导致张力估计值的波动。在今后的工作中,可考虑通过系统参数辨识的方法来提高张力估计的精度。

参考文献:

- [1] GASSMANN V, KNITTEL D, PAGILLA P R, et al. H_∞ unwinding web tension control of a strip processing plant using a pendulum dancer[C]. 2009 American Control Conference. IEEE, 2009: 901-906.
- [2] HOU H, NIAN X, XIONG H, et al. Robust decentralized coordinated control of a multimotor web-winding system [J]. IEEE Transactions on Control Systems and Technology, 2016, 24(4): 1495-1503.
- [3] ABJADI N R, SOLTANI J, ASKARI J, et al. Nonlinear sliding-mode control of a multi-motor web-winding system without tension sensor[J]. IET Control Theory and Applications, 2009, 3(4): 419-427.
- [4] 瞿成明, 王建平, 凌有铸, 等. 卷绕系统中一种张力智能观测器的设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(10): 2349-2355.
- [5] 李江波, 陈德传, 张培娟. 基于相邻两轴速度信号的带材张力观测方法[J]. 杭州电子科技大学学报, 2012, 32(4): 133-136.
- [6] 李江波. 基于材料参数与张力观测的隔膜生产过程多电机协调控制[D]. 杭州: 电子科技大学, 2013.
- [7] 屠鸿斌. 无张力传感器的隔膜多电机VF协调控制[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2012.
- [8] 陈德传, 李江波, 廖玉忠. 无张力传感器的隔膜放卷过程V-F协调控制系统[C]. Proceedings of 2010 3rd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System. 2010.
- [9] JIANG C, WANG H, HOU L, et al. Sliding mode compensation control for diaphragm tension in unwinding process of lithium battery diaphragm slitting machine[J]. IEEE Access, 2020: 21302-21313.
- [10] 徐晓苏, 潘永飞, 邹海军. 基于自适应滤波的SINS/DVL组合导航系统[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015 (3): 95-99+106.
- [11] 何金保. 卷绕张力系统鲁棒控制策略的研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.
- [12] BRANCA C, PAGILLA P R, REID K N, et al. Governing equations for web tension and web velocity in the presence of nonideal rollers[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-transactions of The ASME, 2013, 135(1): 011018.
- [13] 于洪霞, 胡静涛. Speed and load torque estimation of induction motors based on adaptive kalman filtering[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(5): 552-558.
- [14] SAGE A P, HUSA G W. Adaptive filtering with unknown prior statistics[C]. Joint Automatic Control Conference. 1969 (7): 760-769.
- [15] 赵欣, 张金生, 刘志国, 等. 基于自适应滤波辅助残差 χ^2 法的导航系统故障诊断方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2012(5): 490-496.
- [16] 石勇, 韩崇昭, 梁勇奇, 等. 自适应UKF算法在目标跟踪中的应用[J]. 自动化学报, 2011, 37(6): 755-759.
- [17] 明星, 邱红专. 改进的Sage-Husa滤波及在卫星姿态估计中的应用[J]. 上海航天, 2013, 29(6): 21-25.
- [18] 戴洪德, 邹杰, 徐胜红, 等. 含预测和容错的自适应Kalman目标跟踪[J]. 南京理工大学学报, 2015, 39(1): 108-114.
- [19] 范晓亮. 基于自适应滤波的SINS/DVL组合导航算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [20] 葛健, 董浩斌, 刘欢, 等. 基于Sage-Husa算法的拖曳式Overhauser海洋磁场传感器海浪磁场噪声实时抑制方法[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3792-3798.