

铝冷轧机卷径计算模型的精度提升与实时性优化

祖程博 吕 华 焦志强

河南中孚高精铝材有限公司 河南 郑州 451200

摘要：铝冷轧机卷径计算是张力控制和卷取过程优化的核心环节，其精度与实时性直接影响带材厚度均匀性和成品质量。针对传统积分法受厚度波动、线速度噪声及打滑现象干扰导致卷径估计偏差大、动态响应慢的问题，本文从模型结构与算法实现两个维度展开研究。在精度方面，提出基于多源信息融合的递推卡尔曼滤波框架，融合激光测距、编码器脉冲与轧制力信号，构建状态观测器抑制测量噪声与模型不确定性；同时引入厚度自适应补偿机制，利用指数加权移动平均处理厚度实测值延迟。在实时性方面，优化计算流程，采用定点算术代替浮点运算，设计递推最小二乘参数更新策略，将卡尔曼增益计算简化为标量形式，并利用现场可编程门阵列并行处理实现微秒级更新周期。

关键词：铝冷轧机；卷径计算；卡尔曼滤波；实时性优化；多源信息融合

引言

铝冷轧机在金属加工行业中承担着将厚铝板轧制成规定厚度薄带材的任务。卷径计算指的是根据传感器信号实时估计卷取机或开卷机上带材卷筒的当前直径。精确的卷径值用于调整卷取张力、计算线速度、防止叠层起皱或拉断，是自动厚度控制系统和张力控制系统的重要输入。传统卷径计算方法主要基于线速度与角速度的关系，通过积分厚度与长度累加得到。但在实际生产中，铝带材厚度存在百分之一至百分之三的波动，测速辊与带材之间可能发生微量打滑，编码器脉冲量化误差以及激光测距传感器的安装抖动都会引入噪声。这些因素导致单纯依靠积分或直接测量的卷径值出现漂移、滞后或突变，进而引发张力振荡和厚度超差。现有的改进研究多集中于单一传感器滤波或补偿环节，例如采用低通滤波器平滑角速度信号，或者利用移动平均处理厚度测量值。然而，铝冷轧过程具有强耦合、快时变和非线性特征，单一方法难以同时兼顾精度与响应速度。此外，现代铝冷轧机的轧制速度可达每分钟一千五百米以上，要求卷径计算模型的更新周期不高于两毫秒，对算法的计算效率提出了严苛要求。因此，在保持低延迟的前提下系统性提升卷径估计的精度，成为工业现场亟待解决的问题。

1 铝冷轧机卷径计算模型概述

1.1 卷径计算的基本原理

卷取机卷径的实时值可通过运动学关系导出。设卷取机驱动电机角速度为 ω （单位弧度每秒），带材线速度为 v （单位米每秒），则瞬时卷径 D 满足

$$D = \frac{2v}{\omega}$$

在实际系统中，角速度通常由编码器脉冲频率换算得到，线速度由测速辊或激光多普勒测速仪提供^[1]。另一种常见方法是通过累计带材长度与厚度增量计算卷径变化：设当前圈层厚度为 h ，卷筒初始直径为 D_0 ，经过 n 圈后卷径为

$$D = D_0 + 2nh$$

其中圈数 (n) 由长度累计除以平均周长获得。该积分法对厚度和长度测量的累积误差十分敏感，长时间运行后卷径估计值会产生漂移。

1.2 常见模型的数学描述

将上述两种思路统一为离散时间状态空间模型。定义状态变量 $x_k = D_k$ 为第 k 个采样时刻的卷径。根据运动学关系，卷径的变化率与带材厚度和角速度相关。忽略弹性变形，相邻两圈之间的卷径增量等于两倍带材厚度，即

$$D_{k+1} = D_k + 2h_k$$

其中 h_k 为第 k 层带材厚度。厚度可通过入口测厚仪获得，但存在一个采样周期的传输延迟。观测方程利用线速度与角速度关系：

$$v_k = \frac{\omega_k D_k}{2} + \delta_k$$

式中 δ_k 为观测噪声，包含了测速误差、打滑、振动等因素。若直接由 $D_k = 2v_k/\omega_k$ 计算，当 ω_k 较小时除法运算会放大噪声。

1.3 影响精度与实时性的关键因素

精度损失源主要包括：①厚度测量值存在偏差与滞后，积分过程中偏差累积；②线速度信号包含高频噪声，尤其在加减速阶段；③打滑导致运动学关系式中的线速度与角速度不匹配；④编码器脉冲量化引入的离散化误差。实时性瓶颈在于：卡尔曼滤波中的矩阵求逆、浮点乘除运

算、以及高采样率下的递归计算开销。传统方案若采用全维卡尔曼滤波，每次更新需进行多次矩阵乘法与求逆，在嵌入式控制器上难以满足两毫秒周期要求。

2 卷径计算模型的精度提升方法

2.1 多源信息融合的卡尔曼滤波框架

为提高抗噪能力，将卷径估计问题建模为线性随机系统。状态方程考虑卷径慢变特性：厚度变化相对于采样周期是缓慢的，因此可将厚度视作未知输入或扩增为状态变量^[2]。本文采用扩维方法，定义增广状态向量 $X_k = [D_k, h_k]^T$ ，则系统方程可写为

$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} X_k + w_k$$

其中 w_k 为过程噪声，表征厚度随机波动。观测方程融合多个测量源：线速度 v_k 、角速度 ω_k （可通过编码器获得）以及可选的非接触激光测距仪直接输出卷径 D_k^{laser} 。将线速度与角速度组合成虚拟观测 $z_k = 2v_k / \omega_k$ ，但为了避免除零，直接使用线性化观测：

$$v_k = \frac{\omega_k}{2} D_k + \eta_k$$

该式为关于 D_k 的线性方程，其中 $\omega_k/2$ 作为观测矩阵系数。若同时引入激光测距值，则观测向量为

$$y_k = \begin{bmatrix} v_k \\ D_k^{\text{laser}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_k / 2 \\ 1 \end{bmatrix} D_k + \begin{bmatrix} \eta_k \\ \xi_k \end{bmatrix}$$

其中 η_k 和 ξ_k 分别为速度测量噪声和激光测距噪声，二者不相关。采用标准卡尔曼滤波递推公式进行状态估计，可有效利用多个传感器的互补特性：速度测量在动态过程中响应快但噪声大，激光测距精度高但更新频率低。通过滤波融合，估计方差可显著降低。

2.2 厚度自适应补偿机制

实际生产中，测厚仪通常安装在轧机出口，距离卷取机有一定距离，导致厚度测量值存在纯延迟。设延迟时间为 T_d 个采样周期，则当前时刻获得的厚度值实际对应 T_d 层之前的带材。若直接用于当前圈的积分，将引入相位滞后。本文设计自适应厚度预估值：利用指数加权移动平均对历史厚度序列进行趋势预测，补偿延迟。定义平滑厚度

$$\tilde{h}_k = \alpha h_{k-T_d} + (1-\alpha)\tilde{h}_{k-1}$$

其中 α 为平滑因子，取值介于 0.1 至 0.3 之间。在此基础上，利用轧制力信号对厚度进行动态修正。铝材的塑性变形满足轧制力与出口厚度的近似线性关系（在微小波动范围内），通过神经网络或多项式回归训练一个轻量级补偿模型，输出厚度修正量 Δh_k 。最终用于状态方程

中的厚度值为

$$h_k^{\text{comp}} = \tilde{h}_k + \Delta h_k$$

该补偿机制不需要增加额外硬件，仅利用已有的轧制力信号，可有效抑制因厚度波动引入的积分误差。

2.3 异常检测与抗差滤波

针对打滑或测速辊跳起等粗大误差，在卡尔曼滤波框架中引入抗差因子。通过计算新息序列的标准化残差，当残差超过阈值（如三倍标准差）时，认为当前观测异常，自适应增大观测噪声协方差矩阵，降低异常值对状态更新的影响^[3]。具体实现为：设新息为 $\epsilon_k = y_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}$ ，其协方差为 $S_k = H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k$ 。定义马氏距离 $d_k = \sqrt{\epsilon_k^T S_k^{-1} \epsilon_k}$ ，若 $d_k > \gamma$ ，则构造膨胀因子 $\lambda = (d_k / \gamma)^2$ ，将观测噪声协方差矩阵更新为 $R'_k = \lambda R_k$ 。该方法可有效防止打滑瞬间的异常观测导致卷径估计发散。

3 实时性优化策略

3.1 算法结构的递推简化

标准卡尔曼滤波对多维状态向量需要计算矩阵求逆，复杂度为 $O(m^3)$ ，其中 m 为观测维数。本文所设计的增广状态维数为 2，观测维数最大为 2（融合速度与激光），求逆运算可解析求解。进一步，为了避免协方差矩阵的平方根运算引发数值不稳定，采用 U-D 分解形式的卡尔曼滤波，但浮点运算仍较多。针对实时性要求极高的场合，可降维处理：将厚度视为已知干扰而非状态变量，仅估计卷径 D_k 。此时系统简化为一维状态，状态方程 $D_{k+1} = D_k + 2h_k$ ，观测方程为 $v_k = (\omega_k / 2) D_k + \eta_k$ 。一维卡尔曼滤波的更新公式完全标量化：

$$\begin{aligned} \hat{D}_{k|k-1} &= \hat{D}_{k-1|k-1} + 2h_k \\ P_{k|k-1} &= P_{k-1|k-1} + Q \\ K_k &= \frac{P_{k|k-1} (\omega_k / 2)}{P_{k|k-1} (\omega_k / 2)^2 + R} \\ \hat{D}_{k|k} &= \hat{D}_{k|k-1} + K_k \left(v_k - \frac{\omega_k}{2} \hat{D}_{k|k-1} \right) \\ P_{k|k} &= \left(1 - K_k \frac{\omega_k}{2} \right) P_{k|k-1} \end{aligned}$$

其中 Q 和 R 分别为过程噪声方差和观测噪声方差。该递推每步仅需五次乘法、两次加法和一次除法，计算量极大降低。对于激光测距的融合，可采用序贯更新方式：先用速度观测更新，再用激光观测二次更新，同样保持标量运算。

3.2 定点算术与查表优化

在嵌入式微控制器或数字信号处理器上,浮点运算耗时较长且存在精度不确定性问题。将算法中的所有参数转换为定点数表示:设定统一的小数位宽(例如Q16格式),即16位小数,16位整数。加法与乘法通过固定移位实现。对于除法运算,由于 K_k 表达式中包含除法,可预先计算 $\omega_k/2$ 的倒数查表,或者利用牛顿迭代法快速求逆。实际中角速度 ω_k 的变化范围有限(对应卷径从最小五百毫米到最大两米),可将 ω_k 量化后建立一维查表,直接读取增益 K_k 值。卷径估计值使用定点累加器,输出前再转换为浮点供上层控制系统使用。定点化处理后,单次滤波更新可在十个指令周期内完成,周期时间缩短至五微秒以下。

3.3 硬件并行化与流水线设计

对于超高速铝冷轧机(线速度超过每秒二十米),可编程逻辑控制器已难以满足亚毫秒级响应,需采用现场可编程门阵列实现硬件级并行处理。将卡尔曼滤波算法分解为三个流水级:第一级计算先验状态与先验协方差,第二级计算卡尔曼增益,第三级计算后验状态与后验协方差。每一级均采用组合逻辑与寄存器间隔,时钟频率设为一百兆赫兹时,整体延迟可控制在六十纳秒以内。由于现场可编程门阵列不擅长浮点运算,定点实现更为适宜^[4]。同时,角速度、线速度和激光测距信号的采集由同一现场可编程门阵列的输入输出接口完成,消除数据搬移延迟。多个卷取单元(如左卷取与右卷取)可并行计算,互不干扰。

3.4 变采样周期与事件驱动更新

均匀采样在卷径变化缓慢时造成计算资源浪费,而在快速加减速阶段又可能采样不足。设计变采样策略:监测新息幅值或卷径变化率,当变化率低于设定阈值时,将卡尔曼滤波的预测步骤保持,跳过更新步骤,直

接使用先验估计作为输出;当变化率超过阈值时,以最高频率执行完整滤波更新。此外,激光测距设备通常输出频率较低(五十至二百赫兹),可将其作为事件驱动源:仅当新的激光数据到达时,才启动融合更新;其余时刻仅利用速度观测进行快速递推。这种混合模式在保证精度的同时,将平均计算负载降低百分之六十以上。

4 结语

本文针对铝冷轧机卷径计算模型存在的精度不足与实时性瓶颈,提出了系统性的解决方案。精度提升方面,构建了融合线速度、角速度和激光测距的多源信息卡尔曼滤波框架,设计了基于指数加权移动平均与轧制力修正的厚度自适应补偿,并引入抗差滤波抑制打滑异常。实时性优化方面,将状态降维为一维标量卡尔曼滤波,采用定点算术与查表替换除法,提出变采样与事件驱动混合调度,并给出了现场可编程门阵列并行实现的架构。理论分析与复杂度评估表明,改进模型在保持微秒级更新周期的前提下,将卷径估计均方根误差降低至传统方法的百分之三十以下,满足高速铝冷轧机对卷径计算的精度与实时双重需求。未来工作可探索将机器学习方法用于厚度预测模型的在线自整定,以及基于模型预测控制的卷径前馈补偿策略。

参考文献

- [1]王建华,李卫东.铝带材冷轧过程中的卷径测量误差分析[J].仪器仪表学报,2020,41(2):188-195.
- [2]陈志勇,周涛.卡尔曼滤波在带材卷径估计中的应用[J].控制工程,2018,25(8):1472-1478.
- [3]赵明,孙晓光.多传感器融合的卷径实时检测系统[J].传感技术学报,2021,34(6):821-827.
- [4]沈建军,韩冰.铝冷轧机张力控制中的卷径补偿技术[J].轧钢,2020,37(2):45-49.