皮带秤动态累计误差的在线监测模型构建及实物校验周期优化探讨

□倪俊国　王述诚　秦璐璐　潘寿虎　张凯

山东省计量科学研究院

【摘　要】针对皮带秤动态累计误差的监测与校验难题，本研究构建了基于多传感器信息融合的在线监测模型，通过状态空间建模与深度学习算法实现误差实时预测与健康度评估。在此基础上，提出以精度可靠性为约束的实物校验周期动态优化方法，取代传统固定周期模式。实验表明，该方法在保证计量精度的同时显著降低了校验频次与维护成本，为实现从“定期维修”向“按需维护”的智能运维转变提供了有效路径。

【关键词】皮带秤；动态误差；在线监测；周期优化

文献标识码：A　　**文章编号：**1003-1870（2026）07-0019-03

Study on Construction of an Online Monitoring Model for Dynamic Cumulative Error of Belt Scales and Optimization of Physical Calibration Cycle

【Abstract】To address the challenges in monitoring and verifying the dynamic cumulative error of belt scales, an online monitoring model is constructed in this study based on multi-sensor information fusion, so as to achieve real-time error prediction and health assessment through state-space modeling and deep learning algorithms. On this basis, a dynamic optimization method for the physical verification cycle constrained by accuracy reliability is proposed to replace the traditional fixed-cycle mode. Experiments show that this method significantly reduces the verification frequency and maintenance costs while ensuring metrological accuracy, providing an effective approach for the transition from "scheduled maintenance" to "on-demand maintenance" in intelligent operation and maintenance.

【Keywords】belt scale; dynamic error; online monitoring; cycle optimization

引言

随着工业自动化对计量精度要求日益提高，皮带秤在复杂工况下受多维因素干扰，动态累计误差漂移问题突出。传统固定周期校验模式存在滞后性与盲目性，既难以及时识别设备性能劣化，又易增加不必要的运维成本与风险。为此，亟需构建在线监测模型并以此优化校验周期，推动维护模式从“定期计划维护”向“预知性状态维护”转变，以提升计量可靠性并降低运营成本。

1　皮带秤动态累计误差产生机制分析

1.1　机械结构的动力学影响

皮带秤在运行过程中，由于输送机架的刚度限制，电机运行及皮带接头经过称重域时会诱发机械振动，若振动频率与称重单元的固有频率发生重合，则会产生共振效应，使得计量位移发生畸变。此外，托辊的径向跳动与轴承磨损会造成称重基准

面的周期性起伏，这种微观的几何偏差在高速运行下被放大为动态累计误差，成为影响电子皮带秤长期稳定性的主要机械诱因。

1.2　准静态误差与动态误差的影响

在皮带秤计量体系中，准静态误差与动态误差具有截然不同的物理属性与演变规律。准静态误差主要由设备固有特性决定，通常表现为相对稳定的系统性偏移。动态误差源于皮带秤运行过程中的瞬态交互，涵盖了皮带刚度不均、物料分布随机性、皮带与托辊间的蠕动摩擦、速度传感器的瞬时滑移等干扰因素。动态误差具有显著的时变性与随机性，且随输送量与带速的增加而呈现非线性扩张。只有通过对动态误差的精确剥离与辨识，才能为在线监测模型提供准确的输入特征，从而实现对累计流量偏差的深度纠偏。

2　在线监测模型理论框架的构建

2.1　多源信息感知层设计

多源信息感知层是构建在线监测模型的数据基础。本设计在保留高精度称重与测速传感器的基础上，集成安装张力监测模块、位移传感器和振动加速度计等辅助感知单元，实现皮带秤运行状态的多维度同步采集。通过高采样频率的数据同步机制，实现物料流量、张力波动、振动及倾角等关键参数的精准对齐，从而为后续误差特征提取和监测模型构建提供稳定性强、完备的数据支撑如表1 所示。

表1　多源信息感知层监测参数及配置表

监测维度	传感器类型	安装位置	监测作用	监测点位
重量感知	高精度称重传感器	称重桥架承载点	采集物料瞬时载荷及重力信号	2 处
速度感知	双轮旋转编码器	皮带回程段/ 从动辊	实时监测皮带运行线速度	1 处
张力补偿	压力式张力传感器	称重域前后托辊处	监测皮带张力波动对计量的干扰	2 处
振动特征	三轴MEMS 加速度计	输送机架关键节点	捕捉机械共振及托辊跳动频率	3 处
桥架特征	倾角传感器	称重支架侧翼	监测桥架倾斜变形对计量的影响	2 处
环境反馈	温度传感器	称重支架侧翼	补偿温度变化引起的计量偏差	1 处

2.2　误差特征提取与状态空间建模

误差特征提取利用变分模态分解（VMD，Variational Mode Decomposition）从原始多源信号中剥离与计量偏差相关的特征分量。VMD 通过变分框架求解以下约束优化问题：

$$min_{u_k,\omega_k}\Sigma_k\|\partial_t[(\delta(t)+j/\pi t)*u_k(t)]e^{-j\omega_k t}\|_2^2, s.t.\Sigma_k u_k(t)=x(t)$$

式中$u_k(t)$ 为第k 个模态分量，ωk 为中心频率。引入二次惩罚因子α 与Lagrange 乘子λ(t)，转化为无约束增广Lagrangian 函数：

$$L(u_k,\omega_k,\lambda)=\alpha\Sigma_k\|\partial_t[(\delta(t)+j/\pi t)*u_k(t)]e^{-j\omega_k t}\|_2^2+\|x(t)-\Sigma_k u_k(t)\|_2^2+\langle\lambda(t),x(t)-\Sigma_k u_k(t)\rangle$$

经交替方向乘子法（ADMM，Alternating Direction Method of Multipliers）在频域迭代求解，可有效避免传统经验模态分解（EMD）的模式混叠。在此基础上构建状态空间模型，其状态方程与观测方程分别为：

$$x_k=F_k\cdot x_{k-1}+w_k$$

$$y_k=H_k\cdot x_k+v_k$$

式中x_k 为隐状态向量（计量健康度），F_k 为状态转移矩阵，w_k ~ N(0,Qk) 为过程噪声；y_k 为观测向量，H_k 为观测矩阵，v_k ~ N(0,Rk) 为观测噪声。采用扩展卡尔曼滤波（EKF）或粒子滤波（PF）实时递推

估计状态后验分布，将非线性动态误差转化为可量化的状态向量，为误差预警提供数学模型支撑。

2.3　基于数据驱动的偏差预测

在状态空间模型基础上，引入长短期记忆网络（LSTM，Long Short-Term Memory）挖掘计量数据的深层时序规律。LSTM 通过遗忘门f_t、输入门i_t与输出门o_t三个门控结构协同控制信息流：

$$f_t=\sigma(W_f\cdot[h_{t-1},x_t]+b_f)$$

$$i_t=\sigma(W_i\cdot[h_{t-1},x_t]+b_i),\tilde{a}_t=tanh(W_c\cdot[h_{t-1},x_t]+b_c)$$

细胞状态通过遗忘门与输入门的协同实现选择性更新：

$$C_t=f_t\odot C_{t-1}+i_t\odot\tilde{a}_t$$

$$o_t=\sigma(W_o\cdot[h_{t-1},x_t]+b_o),h_t=o_t\odot tanh(C_t)$$

式中x_t为当前特征输入，h_{t-1}为隐状态，C_t为细胞状态（长时记忆载体），σ为Sigmoid 激活函数，⊙为Hadamard 积。遗忘门决定历史信息丢弃比例，输入门控制新信息写入量，输出门筛选有效信息。模型以历史校验误差为标签，将多源特征输入LSTM网络，分析误差随运量累积与设备磨损的演变趋势。遗忘门与输入门的协同使模型对短期扰动具有鲁棒性，同时保持对长期退化趋势的敏感性，能在误差由随机波动向趋势性偏移的拐点处发出预警。通过在线数据滚动优化模型参数，以端到端学习方式直接从多源监测数据中提取误差的时空演变规律，为从被动校准向主动维护转变提供核心算法支撑。

3　试验验证与结果分析

3.1　试验环境搭建

试验在某火电厂输煤系统现场开展，以一台0.5 级双托辊电子皮带秤为对象。通过加装振动、张力、倾角及温度等传感器，并部署同步数据采集系统，构建了多源感知硬件环境。同时，配套部署循环链码与核子秤，形成“在线监测、模拟载荷比对、交叉验证”三位一体试验平台，为模型与算法验证提供了真实工况数据支撑。

3.2　监测模型准确度评价

通过为期六个月的试验，对比在线预测误差与循环链码实测值，验证了模型的有效性。结果表明，模型对零点漂移的识别精度超过95%，对满值漂移的识别精度超过93%，并能准确捕捉瞬时计量波动。在所有试验载荷下，预测残差的均方根误差（RMSE）均处于较低水平，尤其在额定载荷范围内，预测偏差控制在±0.1% 以内，展现了优异的线性度与稳定性。该模型成功补偿了环境温差等干扰，其输出的精度状态指标可信度高，能为实物校验决策提供有效指导如表2 所示。

表2　监测模型误差预测值与测量值对比分析（0.5级秤）

试验载荷区间	模型预测偏差(%)	循环链码实测值(%)	残差(RMSE)	判定结果
20% 额定流量	+0.06	+0.08	0.021	极优
50% 额定流量	−0.11	−0.09	0.018	极优
80% 额定流量	+0.04	+0.05	0.015	极优
满载工况	−0.15	−0.13	0.024	优
非对称偏载	+0.22	+0.25	0.032	合格

3.3　周期优化效果评估

试验结果表明，周期优化策略效果显著。应用动态校验模型后，实物校验从“固定每月一次”转为“基于状态触发”，全年校验次数减少约42%，综合计量误差控制在±0.35% 以内，优于0.5 级秤精度要求。同时，系统停机时间与维护成本显著降低，验证了该方案在保障精度前提下提升运维效率的高度实用价值如表3 所示。

表3　校验周期优化前后运维指标对比表

评价指标	优化前（传统固定周期）	优化后（动态监测触发）	改善幅度(%)
年度实物校验次数	12 次	7 次	↓ 41.7%
单次校验平均工时	4.5 小时	3.2 小时（基于状态预判）	↓ 28.9%
年综合计量误差	±0.48%	±0.34%	↑ 29.2%（精度提升）
因校准导致的停机时间	54 小时/ 年	22.4 小时/ 年	↓ 58.5%
年度维护综合成本	100%（基准值）	65%	↓ 35.0%

4 结语

本文针对皮带秤动态累计误差的实时监测难题，构建了基于多源信息感知的在线监测模型，融合状态空间理论与数据驱动算法，实现了对计量偏差演变趋势的精准识别。在此基础上，提出基于可靠性理论与动态决策树的校验周期优化方法，成功将维护模式从“计划维护”转变为“按需校验”。试验验证表明，该方法在确保计量精度的同时，可显著降低了校验频率与运维成本，并能够在触发校验时精准定位重点关注的维护部件及参数。研究成果为散料连续计量的智能化升级提供了有效方案，未来可进一步探索模型在极端工况下的适应能力。

参考文献

[1] 袁海琛, 滕杉. 皮带秤计量精度的影响因素分析 [J]. 机械制造, 2019, 57 (02): 89−90+93.

[2] 段卫东, 魏晓光. 连续累计自动衡器(皮带秤) 模拟载荷示值误差测量结果的不确定度评定 [J]. 科技与创新, 2017, (07): 119−120.

[3] 本刊.《定量皮带秤》标准项目正式启动 [J]. 衡器, 2013, 42 (12): 3.

[4] 张加营, 何小峰, 唐慎涛. 一种皮带秤测速装置 [J]. 衡器, 2011, 40 (03): 46−47.

[5] 尚贤平, 孙世勃. 电子皮带秤累计示值误差测量结果的不确定度分析和评定 [J]. 衡器, 2008, (05): 42−44.

[6] 夏双杰. 电子皮带秤动态控制性能研究方法的探讨[C]// 上海市烟草专卖局2007 年度获奖论文集（工程技术类）. 上海烟草(集团) 公司基建设备处，2007，108−117.

[7] 张加营, 马云天, 程继坤等. 电子皮带秤的共振频率分析及解决方法 [J]. 衡器, 2007, (01): 26−28.

[8] 陆少萍. 动态累计误差与称量示值的修正 [J]. 自动化仪表, 1992, (10): 15−19+45−46.

[9] 顾瑞良, 肖衍雄. 与电子皮带秤精确度有关技术性能试验评定方法的探讨 [J]. 自动化仪表, 1986, (05): 31−35+45−46+37.

作者简介

倪俊国：大学，研究方向：质量专业衡器检测。

王述诚：大学，研究方向：质量专业衡器检测。

秦璐璐：硕士研究生，研究方向：压力、真空计量。

潘寿虎：硕士研究生，研究方向：质量专业衡器检测。

张凯：本科，研究方向：质量专业衡器检测。