

石油焦装船皮带秤贸易计量研究及应用

郭望君 柴奇勇 黄志林 钟伟生 (浙江石油化工有限公司, 浙江 舟山 316200)

摘要: 针对石油焦装船贸易计量中传统水尺计量与电子皮带秤精度不足的问题, 以浙石化百万吨级石油焦外销需求为背景, 围绕散货船贸易交接 $\pm 0.5\%$ 精度目标, 构建“硬件改造-算法补偿-校准比对-运维管理”的全流程优化方案。该方案有效解决了贸易计量纠纷, 为大宗散货连续输送计量提供了可靠技术参考。

关键词: 石油焦; 皮带秤; 贸易计量; 精度优化; 校准体系

中图分类号: TH715.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 012-0040-03

Research and application of trade measurement of petroleum coke loading belt scale

Guo Wangjun, Chai Qiyong, Huang Zhilin, Zhong Weisheng

(Zhejiang Petrochemical Co., Ltd. Zhoushan Zhejiang 316200, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient accuracy of traditional water gauge measurement and electronic belt scale in petroleum coke shipping trade measurement, based on the export demand of million-ton petroleum coke in Zhejiang Petrochemical Company, the whole process optimization scheme of “hardware transformation-algorithm compensation-calibration comparison-operation and maintenance management” is constructed around the 0.5% accuracy target of bulk carrier trade handover. This scheme effectively solves the trade measurement disputes and provides a reliable technical reference for the continuous transportation measurement of bulk cargo.

Keywords: petroleum coke; Belt scale; Trade measurement; Precision optimization; Calibration system

1 石油焦装船计量现状与问题分析

1.1 现有计量方式及缺陷

1.1.1 船舶水尺计量

船舶水尺计量通过人工观测船舶吃水深度, 结合船舶仓容表、压载水数据等换算货物重量, 是行业传统计量方式, 但存在诸多固有缺陷: ①误差范围大, 按 95% 置信概率, 计量误差约为 3%, 风浪较大时误差可达 $\pm 7\% \sim \pm 8\%$; ②环境依赖性强, 受潮汐、水流、货物分布不均等因素影响显著, 部分码头船舶停靠后甚至无法观测外挡水尺线; ③人为干扰明显, 观测结果与操作人员的经验、责任心、心理状态直接相关, 重复观测偏差较大; ④量值无法溯源, 国内缺乏船舶水尺量值传递条件, 不能按国家法定检定系统表进行周期检定, 未被列为依法管理的计量器具, 不具备贸易交接计量的法定资质^[1]。

1.1.2 传统电子皮带秤计量

浙石化原有电子皮带秤采用 ICS-FH 型浮衡系列, 配备 2 组称重桥架、4 个 3410-500kg 称重传感器, 虽具备自由浮动平衡结构, 但实际应用中存在以下问题: ①硬件精度不足, 传感器灵敏度与分辨率偏低, 无法精准捕捉石油焦瞬时载荷变化; ②称重点数有限, 2 组称重桥架难以覆盖皮带全宽的物料分布差异, 抗偏载能力较弱; ③张力影响显著, 采用重锤式拉紧装置, 皮带张力随物料量、运行时间变化, 导致皮带形变与传感器受力传递效率波动; ④干扰因素较多, 石油焦

含水量约 10%, 易粘附在皮带上形成重复计量, 同时皮带机振动、环境温度波动等均会引入额外误差; ⑤校准体系不完善, 缺乏常态化实物校准手段, 仅依赖挂码校准无法模拟实际物料输送状态, 校准结果与实际工况脱节^[2]。

1.2 计量误差影响因素系统分析

①设备因素: 包括皮带秤本身精度 (传感器线性度、重复性、温度特性)、皮带机状态 (机架振动、托辊灵活性、皮带张紧力度)、测速装置准确性等。其中, 传感器灵敏度漂移、托辊转动不灵活、皮带挠度变化是主要设备误差源。

②物料因素: 石油焦的水分含量、粒度分布、粘附性直接影响计量准确性。水分含量 10% 左右的石油焦易粘附在皮带表面与托辊上, 形成“虚假载荷”重复计量; 物料在皮带上分布不均、瞬时流量波动大, 会造成线载荷测量失真。

③环境与工况因素: 设备运行和物料冲击引起的振动、环境温度变化导致皮带热胀冷缩与传感器灵敏度漂移、皮带张力变化是核心环境与工况误差源。根据动态误差模型^[3], 振动引起的累计重量误差可表示为:

$$\Delta Q_{vib} = k_v \cdot v \cdot \int_0^T A(t) \cdot \sin(2\pi ft) dt$$

式中, k_v 为振动影响系数, v 为皮带速度, $A(t)$ 为瞬时振幅, f 为振动频率, T 为称重时间^[3]。

温度波动造成皮带长度变化与传感器灵敏度漂移

引入误差,总温度线载荷误差为:

$$\Delta q_{temp}(t) = q_{meas}(t) \cdot \Delta T(t) \cdot \left(\beta + \frac{k_s}{10} \right)$$

式中, β 为皮带线膨胀系数, k_s 为传感器灵敏度温度变化系数, $\Delta T(t)$ 为温度偏差。

④人为与管理因素:定期检定执行情况、操作人员和运维人员的技术水平、维护保养质量、校准流程规范性直接影响计量结果的稳定性和重复性。传统运维中存在皮带粘料清扫不及时、校准周期不合理、异常数据未及时分析处理等问题,导致误差累积。

2 皮带秤贸易计量优化方案设计

2.1 硬件系统升级改造

①更换高精度传感器:将型号 YLAAL0501-3410-500kg,精度 $\pm 0.5\%$ 的称重传感器更换为赛摩公司型号 YLAAL1601-PLR9363-LST-500kg,精度 $\pm 0.25\%$ 的合金钢材质的精度称重传感器。该传感器在 $(-20\sim 60)^\circ\text{C}$ 工况环境下灵敏度漂移 $\leq 0.017\%/10^\circ\text{C}$,温度特性较好,分辨率可达 20000 分度,线性度 $\leq \pm 0.02\%$,能灵敏感知瞬时载荷的变化。

②创建多点称重体系:增设多组称重托辊桥架,由 2 组增加至 6 组,每组对称配备 2 只传感器,共计 12 只,提高冗余个数,避免单只传感器发生故障时,影响测量准确性。沿输送皮带均匀布置称重托辊桥架,调整所有称量段托辊,使每组托辊的安装中心线与输送机中心线重合并覆盖皮带 2000mm 宽度与整个称量段。另外,在数据处理中心增设格拉布斯准则判断模块,取多组测得值的算术平均值作为测量结果的值,用贝塞尔公式或极差法公式计算出实验标准偏差,最后利用格拉布斯准则计算判断并剔除异常值,确保数据的准确性:

$$G = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$$

式中, x_i : 单次测得值, \bar{x} : 多组测得值的算术平均值, s : 实验标准偏差。当 $G \geq G_{(a,n)}$ (置信概率 99%) 时,判定该测得值为异常值时剔除。

③升级张力控制装置:为了在皮带运行阶段能实时监测皮带张力并自动调节维持张紧力,防止皮带打滑,减小间隔漂移等影响。将单重锤式拉紧装置更换为先进可靠的自动绞车张紧装置,该装置主要由减速机、电动机、传感器、钢丝绳、带张紧滚筒的小车、输送带、自动绞车等设备组成。根据张力误差模型,张力偏差引起的线载荷误差为:

$$\Delta q_{tens}(t) = k_t \cdot \Delta F(t) \cdot (1 + \alpha \cdot q_0)$$

式中 $\Delta F(t)$ 为张力偏差,通过减小张力偏差从而

降低张力对计量结果的影响。

2.2 整合动态补偿算法

根据动态测量影响因素及电子皮带秤称重原理,建立振动、张力和温度三个关键参数组成的综合动态补偿模型,修正各类系统误差。核心补偿流程为:①首先通过低通滤波初步剔除高频振动噪声;②采用自适应卡尔曼滤波估计振动误差并进行修正;③通过 6 组传感器进行加权平均计算消除张力影响;④结合皮带长度修正和传感器灵敏度修正消除温度漂移。最终补偿后的线载荷计算公式为:

$$q_{comp}(t) = \frac{\sum_{i=1}^{12} w_i \cdot [q_{meas,i}(t) - \Delta q_{vib,i}(t) - k_t \cdot \Delta F(t) \cdot (1 + \alpha \cdot q_{meas,i}(t))]}{1 + \Delta T(t) \cdot (\beta + \frac{k_s}{10})} - q_{zero}(T(t))$$

式中, w_i 为传感器加权系数 ($\sum_{i=1}^{12} w_i = 1$), $q_{zero}(T(t))$ 为温度相关零点漂移量^[3]。

2.3 构建贸易级溯源体系

2.3.1 依法定期检定

根据《中华人民共和国计量法》及《实施强制管理的计量器具目录》,贸易结算用皮带秤应进行强制检定。检定依据 JJG 195-2019《连续累计自动衡器(皮带秤)》检定规程进行,检定周期应不大于 1 年,确保皮带秤在检定周期内的合法性、准确性。

2.3.2 三级校准

一级校准(零点校准):每次装船前启动皮带秤空载运行一段时间,一般 30min 以上,再启动自动校准程序,完成 3 次零点校准,消除粘料清理不净、皮带自重变化等造成的间隔漂移带来的系统误差。

二级校准(挂码校准):每周采用在检定期内的 10kg 的 M1 级的标准砝码(共 48 个砝码+24 个对称挂点),对皮带秤的线性度与重复性进行校验,修正传感器静态载荷下受力的传递误差。挂码重量覆盖量程的 (20~80)% ,需连续进行 3 次。挂码等效线载荷计算公式为:

$$\text{挂码等效线载荷 (kg/m)} = \frac{\text{挂码总重量量 (kg)}}{\text{计量段长度 (m)}}$$

其中挂码总重量 480kg,计量段长度(托辊间距 \times 称重托辊数) 12m,计算得等效线载荷为 40kg/m;

三级校准(实物校准):每月以分度值 20kg 的电子汽车衡称重数量为标准值,与皮带秤称重结果进行 3 次称重比对,在 2000t 额定流量的 20%、50%、100% 三个点开展动态校验。校准偏差计算公式为:

$$\Delta = \frac{(Q_{校后} - Q_{标})}{Q_{标}} \times 100\%$$

式中, $Q_{校后}$ 为校准后皮带秤计量值, $Q_{标}$ 为标准载荷值。

③数据比对:建立“皮带秤-水尺-客户过磅”

三方数据比对库。每条船舶装载结束后,根据皮带秤累计称重数量、商检水尺计重数量,并与下游客户沟通,获得过磅数量,对三个数据计算比对;若任意两组数据偏差超出 $\pm 0.5\%$,便立即进行全面排查,检查传感器状态、皮带清洁度、运维记录、校准记录等。

2.4 运维管理体系标准化

制定贸易级的维护保养流程:①装船前检查皮带清洁度,彻底清扫皮带表面的石油焦粘料;②每周检查托辊灵活性、测速装置、传感器接线紧固性,对托辊等关键部件进行润滑保养;③每月开展深度检修保养,包括传感器受力状态检测、仪表参数校准、磨损件更换;④每季度组织维保人员专项培训,提升异常识别与处理能力。同时,建立计量数据库档案,设备更换记录、校准结果、运行参数、比对数据库等保存期限不少于5年,保证相关资料可追溯。

3 实验数据统计与效果分析

3.1 数据统计分析

从计量结果的稳定性、准确性进行评估优化效果,统计指标涵盖平均值、标准偏差、合格率、最大偏差、偏差占比,由具体数据分析可知:优化后皮带秤与客户过磅数量的偏差呈现明显减小,标准偏差降低56.9%,计量结果的离散程度大幅减小,稳定性很好;合格率提升至90%,超七成数据偏差控制在 $\pm 0.3\%$ 内,完全满足贸易计量交接的需求。

3.2 趋势分析

优化前,皮带秤-水尺偏差波动剧烈,多次超出 $\pm 1.0\%$ 、最大偏差达 -2.048% ;皮带秤-客户过磅偏差波动范围为 $\pm 1.459\%$ 。优化后,两项偏差波动幅度显著减小,计量结果一致性显著增强。优化后取得效果:①计量准确性:两项偏差均值均大幅向零偏差靠拢,优化后皮带秤-水尺偏差均值 0.072% 、皮带秤-客户过磅量偏差均值 0.022% ,接近理想计量状态;②计量稳定性:两项偏差的标准差分别降低26.7%和56.9%,尤其是客户过磅量偏差的稳定性提升显著;③合格比例:整体合格率从优化前的55%左右(两项指标平均)提升至83.75%,其中客户过磅量偏差合格率达90%,满足贸易计量的要求;④极端偏差控制:最大正负偏差均缩小45%以上,客户过磅量偏差极端值缩小超60%,彻底解决优化前部分船舶计量偏差超标问题。

3.3 经济效益与社会效益

①经济效益:按浙石化年产100万t石油焦、单价1900元/t计算,优化前平均计量误差 $\pm 0.23\%$ (以客户过磅偏差均值计),年经济损失约437万元;优化后平均误差 $\pm 0.042\%$,年经济损失降至79.8万元,年减少损失357.2万元。另外,取消了第三方商检水尺计

量,节省了此费用;同时,避免了因计量纠纷产生的法律诉讼成本与客户流失风险,间接经济效益显著。

②社会效益:优化方案使石油焦输送皮带秤计量误差稳定控制的 $\pm 0.5\%$ 以内,完全满足干散货物船舶贸易计量交接的硬性要求,从而推动了国内大宗散货贸易计量的精准化。计量数据的一致性得到了双方认可,贸易合作信任度提高;校准流程的规范化和科学的运维体系,提供了同行业可参考的计量改进方案;电子皮带秤替代传统的水尺计量,规避了人工观测的主观性,减少了劳动强度,提升了贸易计量的自动化与智能化水平^[4]。

4 应用价值

通过优化后的数据可知,大幅度提升了皮带秤计量数据的准确性、可靠性,减少了计量偏差导致的赔付,降低企业经济损失。其次,为生产指挥、能耗统计核算提供了科学准确的数据支撑,提升运营效率。优化措施的显著成效验证了技术方案的可行性,可为同类计量设备的升级改造提供参考依据^[5]。

5 结论

本文针对石油焦输送皮带秤准确度等级(计量精度)低下,水尺计量的客观缺陷,计量纠纷频发等问题,全方位构建了“硬件改造-算法补偿-校准比对-运维管理”的优化方案,试点应用效果显著:①每组托辊的安装中心线与输送机中心线重合,多传感器及多组称重托辊桥架结构完全覆盖皮带2000mm宽度与整个称量段,配合格拉布斯准则剔除异常值,增强抗干扰、抗偏载的能力,使皮带秤计量数据更加准确可靠。②自动绞车张紧装置结合综合动态补偿计算公式,有效降低了张力变化、温度波动振动变化等引入的系统误差;③三位一体的贸易计量体系,确保了数据的准确性、追溯性、稳定性,使皮带秤计量误差稳定控制在 $\pm 0.5\%$ 以内;④运维管理体系的标准化延长了设备使用寿命,降低误差累积风险,保障长期运行的稳定性和准确性。

参考文献:

- [1] 高锦滨.基于实物在线监测的连续累计自动衡器检测装置研究[J].海峡科学,2025,(05):104-107.
- [2] 郑鹏飞.油田计量站外输计量误差与应对措施研究[J].化工管理,2018,(04):60.
- [3] 葛方丽.双杠杆式皮带秤称重误差分析及补偿研究[D].南京理工大学,2018.
- [4] 刘俊.降低管道原油输送输差的措施[J].化工设计通讯,2020,46(03):28+32.
- [5] 李家沛,黄现云,陈鹏.浅谈对《连续累计自动衡器检定规程》的理解[J].工业计量,2025,35(01):88-91.