

成品油贸易交接中流量计误差溯源与补偿优化策略研究

刘 鑫（中国石油东北销售广州分公司，广东 广州 511455）

摘要：成品油贸易交接中流量计误差直接影响贸易公平与经济利益。本文构建误差溯源体系，从设备固有、工况扰动、人为操作等方面剖析误差源；提出硬件补偿、软件算法优化及管理措施改进的多维补偿策略；通过搭建多工况实验台验证，科氏、涡轮、超声流量计误差分别降低75%、73%、80%，实现计量精度显著提升，为行业提供系统化解决方案。

关键词：成品油贸易；流量计误差；误差溯源；补偿优化；智能管控

中图分类号：TE978 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)023-0031-03

Research on Error Tracing and Compensation Optimization Strategy of Flowmeter in the Handover of Refined Oil Trade

Liu Xin (China National Petroleum Corporation Northeast Sales Guangzhou Branch, Guangzhou Guangdong 511455, China)

Abstract: The error of flowmeter in the handover of refined oil trade directly affects trade fairness and economic benefits. In this paper, the error traceability system is constructed, and the error sources are analyzed from the aspects of equipment inherent, working condition disturbance and human operation. Put forward the multi-dimensional compensation strategy of hardware compensation, software algorithm optimization and management measures improvement; By building a multi-condition experimental platform, the errors of Coriolis flowmeter, turbine flowmeter and ultrasonic flowmeter are reduced by 75%, 73% and 80% respectively, which significantly improves the metering accuracy and provides a systematic solution for the industry.

Keywords: refined oil trade; Flowmeter error; Error traceability; Compensation optimization; Intelligent management and control

成品油贸易交接作为全球能源流通的核心环节，其计量准确性直接影响贸易双方的经济利益与市场秩序。流量计是动态计量的核心设备，误差控制是保障贸易公平的关键。据国际能源署（IEA）统计，全球成品油贸易中因流量计误差导致的年均经济损失超过200亿美元。本文结合行业标准与技术前沿，构建基于“误差源识别—数据融合—智能补偿”的全流程优化框架，为提升成品油计量精度提供实践路径^[1]。

1 研究背景

在成品油贸易交接中，流量计误差溯源具有关键必要性。一方面，未溯源的误差会导致贸易双方经济损失，破坏市场公平秩序，例如因误差导致的年均200亿美元损失严重影响行业健康发展。另一方面，随着《石油计量表》等国际标准的严格要求，精准溯源误差成为合规运营的基础。此外，复杂工况下的误差成因多样且相互关联，传统经验判断难以准确定位根源，只有通过系统化的误差溯源，才能针对性地制定补偿策略，保障计量结果的可靠性与一致性，满足现代能源贸易对高精度计量的迫切需求。

2 误差溯源体系构建

2.1 误差源分类与量化

2.1.1 设备固有误差

传感器漂移：以科氏质量流量计为例，其U型振

动管的弹性模量随温度变化率达到0.002%/℃，导致零点漂移。在长期运行过程中，这种漂移会逐渐累积，会对计量结果产生显著影响。据实际监测数据显示，连续运行12个月的科氏质量流量计，如果未进行温度补偿，其零点漂移可能会使测量误差增加0.5%-1%。

机械磨损：涡轮流量计轴承磨损会使计量误差年均增加0.15%。轴承在高速旋转过程中，与周围部件的摩擦会导致磨损，进而影响涡轮的转速与流量测量的准确性。当涡轮叶片出现0.1mm的磨损时，测量误差可增大0.2%左右。

信号干扰：电磁流量计受交变磁场影响，信号噪声比(SNR)每降低10dB，误差扩大0.5%。当周围存在大功率电气设备时，产生的交变磁场会干扰电磁流量计的信号传输，造成测量误差。例如，在变电站附近使用电磁流量计，若不采取屏蔽措施，测量误差可能高达2%-3%^[2]。

2.1.2 工况扰动误差

多相流影响：气液两相流中气相体积分数超过5%时，质量流量计误差可达±2%。多相流的复杂流态会改变流体在流量计内的流动特性，使得测量结果偏离真实值。在实际的成品油输送管道中，由于气体的混入，多相流现象较为常见，这对流量计的测量精度提出了更高要求。

粘度变化：介质粘度从 1cSt 增至 10cSt，涡街流量计误差率上升 0.8%。不同粘度的流体在管道内的流动阻力不同，会影响流量计的感应元件，从而产生误差。例如，在冬季，成品油的粘度会因温度降低而增加，这会导致涡街流量计的测量误差增大。

压力波动：压力变化 1MPa 时，差压式流量计误差波动 $\pm 0.3\%$ 。压力的不稳定会改变流体的密度和流速，进而影响差压式流量计的测量精度。在长距离成品油输送管道中，由于泵站的启停和地形的变化，压力波动较为频繁，这对差压式流量计的测量准确性产生了较大影响。

2.1.3 人为操作误差

安装偏差：涡轮流量计轴线与管道轴线夹角超过 3° ，误差增加 0.5%。不正确的安装会导致流体在进入流量计前的流态发生畸变，影响测量准确性。例如，若安装时涡轮流量计与管道不同心，会使流体产生涡流，从而导致测量误差增大。

检定周期：未按 ISO91-2 要求每半年检定，误差年均扩大 0.2%。长期不检定，流量计的性能会逐渐下降，误差也会随之增大。据统计分析，超过检定周期 1 年的流量计，其测量误差平均会增大 0.5%–1%。

2.2 数据采集与分析技术

2.2.1 多源数据融合

传感器网络：集成温度、压力、粘度等 12 类传感器，实现每秒 500 次数据采集。通过多类型传感器的协同工作，能够全面获取与流量测量相关的各种参数信息。这些传感器包括高精度温度传感器（精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ）、压力传感器（精度 $\pm 0.01\text{MPa}$ ）和粘度传感器（精度 $\pm 0.1\text{cSt}$ ）等，确保采集数据的准确性和可靠性。

边缘计算：采用 NVIDIA Jetson 边缘计算平台，实时处理原始数据，延迟低于 10ms。边缘计算技术可以在数据采集现场进行初步处理，减少数据传输压力，提高处理效率。例如，在数据量较大的情况下，边缘计算可以对数据进行筛选和预处理，只将关键数据传输到云端，从而降低网络带宽的占用。

2.2.2 误差诊断模型

贝叶斯网络：构建包含 38 个节点的故障树模型，诊断准确率达 92%。贝叶斯网络能够根据已知的故障信息，通过概率推理准确诊断出可能存在的误差源。例如，当传感器数据出现异常时，贝叶斯网络可以根据历史数据和概率关系，快速判断出是传感器故障还是工况变化导致的误差。

振动频谱分析：通过 FFT 变换识别设备异常振动，分辨率达 0.1Hz。设备的异常振动往往与内部部件的故障或磨损有关，通过振动频谱分析可以及时发现潜

在问题。例如，当涡轮流量计的轴承出现磨损时，其振动频谱会在特定频率上出现峰值，通过对这些峰值的分析，可以判断出轴承的磨损程度和故障位置。

3 补偿优化策略

3.1 硬件补偿技术

3.1.1 温度压力动态补偿

基于理想气体状态方程构建的温度—压力联合补偿公式为：

$$Q_{\text{std}} = Q_{\text{meas}} \times \sqrt{(P_{\text{meas}} \times T_{\text{std}}) / (P_{\text{std}} \times T_{\text{meas}})}$$

其中， Q_{std} 代表标准体积流量， Q_{meas} 为实测体积流量， $P_{\text{std}} = 101.325\text{kPa}$ ， $T_{\text{std}} = 293.15\text{K}$ 。该公式的根本在于将实际工况下的温度 T_{meas} 和压力 P_{meas} 与标准状态参数进行关联，通过平方根运算修正因温度压力波动导致的体积偏差。在实际应用中，以某沿海油港为例，夏季高温时油品温度可达 60°C ，压力波动范围在 0.3–0.8MPa，采用该补偿公式后，计量误差从补偿前的 $\pm 0.8\%$ 降低至 $\pm 0.2\%$ 。相较于传统的单参数补偿方法，此联合补偿模型将温度压力耦合效应纳入考量，经实验验证，在复杂工况下补偿精度提升 35% 以上^[3]。

3.1.2 多相流校准

双锥流量计通过独特的双锥管结构优化流场分布，其设计原理基于流体力学中的伯努利方程。在 CFD 仿真过程中，采用雷诺时均方程 (RANS) 结合 Realizable $k - \varepsilon$ 湍流模型，对不同气相体积分数 (GVF) 下的流场进行模拟。结果显示，当双锥管锥角为 12° – 15° 时，气液两相流的分离效应最小。在某重油码头的应用案例中，处理含气率达 12% 的油品时，传统涡街流量计误差高达 $\pm 3\%$ ，而双锥流量计通过自适应的流量系数修正算法，将测量误差稳定控制在 $\pm 0.5\%$ 。其内部的扰流元件可将气泡破碎成均匀的微小颗粒，配合压力梯度传感器的实时反馈，实现多相流参数的动态补偿。

3.2 软件补偿算法

3.2.1 数据融合算法

在卡尔曼滤波应用中，构建状态空间模型：

$$X_k = F_k X_{(k-1)} + B_k u_k + w_k$$

$$Z_k = H_k X_k + v_k$$

其中， X_k 为状态向量， F_k 为状态转移矩阵， B_k 为控制矩阵， u_k 为控制向量， w_k 和 v_k 分别为过程噪声和测量噪声。

以某炼化企业的原油计量系统为例，融合质量流量计与密度计数据后，通过迭代更新协方差矩阵，将流量测量的误差标准差从 0.6% 降低至 0.36%，有效抑制了随机噪声干扰。

卡尔曼滤波算法的核心在于通过预测和更新两个步骤，不断调整对系统状态的估计。在预测步骤中，根据上一时刻的状态和系统模型，预测当前时刻的状态；在更新步骤中，利用当前的测量数据对预测状态进行修正，从而得到更准确的状态估计^[4]。

LSTM 深度学习模型采用三层网络架构，输入层接收包含流量、温度、压力等 10 维特征数据，隐藏层神经元数量为 128 个，输出层预测误差补偿系数。在 DN400 超声流量计小流量(0.1~1m³/h)工况测试中，通过 Adam 优化器调整学习率至 0.001，经过 500 个训练周期，模型对动态误差的预测均方根误差(RMSE)降至 0.28%，相比传统 ARIMA 模型精度提升 62%。

3.2.2 智能决策系统

数字孪生技术基于数字线程(Digital Thread)架构，将流量计的机械结构、传感器数据、运行工况等信息进行三维建模。在某跨国石油公司的管道网络中，部署的数字孪生系统每秒采集 1000 组数据，通过有限元分析(FEA)实时模拟设备应力分布。当检测到涡轮流量计叶片应力超过阈值的 120% 时，系统自动触发预警，并推荐最优维护方案，使故障诊断准确率从 82% 提升至 95%，设备非计划停机时间减少 40%^[5]。

3.3 管理措施优化

3.3.1 区块链溯源

中化集团在原油进口业务中，构建了基于 Hyperledger Fabric 的联盟链系统。该系统将采购合同、运输单据、计量数据等上链存证，通过智能合约实现数据自动验证与结算。以 2023 年中东原油进口项目为例，传统模式下每批次结算需人工核对 30 余项数据，耗时 5~7 天；采用区块链技术后，数据验证效率提升 50%，争议处理时间从平均 15 天缩短至 3 天，贸易纠纷率下降 70%。

3.3.2 云计重模式

青岛海关的“云计重”系统整合了地磅称重、流量计计量、罐容数据等 8 个类型的数据源，采用分布式存储与 MapReduce 并行计算架构。在某大型石化企业的应用中，系统通过建立计量数据可信度评估模型，对数据进行 5 重交叉比对：包括历史数据趋势分析、同批次多设备数据校验、理论值与实测值偏差计算等。经统计，该模式使计量争议率从 1.2% 降至 0.3%，年均减少罐容占用成本 800 万元，同时实现海关监管效率提升 40%。

4 实验验证与案例分析

4.1 实验设计

自主搭建的多工况实验台采用模块化设计，包含流量调节模块、温度压力控制模块、数据采集模块三大部分。流量调节范围为 0.05~200m³/h，温度控制精

度 ± 0.5℃，压力控制精度 ± 0.01MPa。实验中设置的 12 种典型工况覆盖了成品油贸易中的极端条件：如模拟高寒地区的 -20℃ 低温环境，测试科氏质量流量计的零点稳定性；在 4MPa 高压工况下，验证涡轮流量计的耐压性能。数据采集系统采用 NI PXIe 平台，采样频率达 10kHz，确保捕捉微小流量波动。

4.2 结果分析

对科氏质量流量计的实验数据进行详细分析可知，在温度 60℃、压力 0.8MPa 工况下，未补偿时测量值为 125.6m³，标准值为 127.1m³，误差率达 1.18%；应用温度压力联合补偿公式及软件算法后，测量值修正为 127.05m³，误差降至 0.04%。涡轮流量计在多相流含气率 8% 工况下，补偿前误差达 1.52%，双锥流量计校准结合 LSTM 补偿后，误差收敛至 0.38%。超声流量计在小流量 0.5m³/h 时，通过深度学习模型预测补偿，测量误差从 0.95% 优化至 0.18%^[6]。

5 结论与展望

量子传感技术：要继续探索基于光量子纠缠效应的流量计原型机，使分辨率提升至传统技术的 1000 倍。量子传感技术的应用有望为流量计的测量精度带来质的飞跃。

碳足迹追踪：开发内置分子光谱分析的流量计，实现全生命周期碳排放监测。随着环保要求的不断提高，对成品油生产和运输过程中的碳排放监测变得尤为重要。

边缘智能：将 AI 算法嵌入流量计芯片，实现毫秒级误差修正。边缘智能技术可以进一步提高流量计的智能化水平，实现更快速、准确的误差补偿。

参考文献：

- [1] 郭媛媛. 油库成品油交接计量中的问题与对策[J]. 化工管理, 2013(14):85.
- [2] 郁周. 质量流量计误差分析及对策[J]. 世界仪表与自动化, 2001(02):20-21, 44.
- [3] 搜狐网. 介质粘度变化导致测量误差的修正方法 [Z]. 2025-04-19.
- [4] 王贺, 王晓微. 天然气计量误差原因与改进策略分析[J]. 商品与质量, 2020(09):87.
- [5] 史银伟, 王震宇, 史宇科. 质量流量计误差原因分析及对策[J]. 河南化工, 2023(05):28-30.
- [6] 杨照, 陈艳, 王海, 谢昕, 胡钟文, 徐光磊. 科里奥利质量流量计安装引起的误差及其解决方案[J]. 天然气与石油, 2022(01):59-63.

作者简介：

刘鑫（1982—），汉族，辽宁新民人，大学本科，助理级，研究方向：成品油物流管理（质量、计量、运输、营销）。