

# 油气储存中流量计量精度提升与误差分析研究

马丽辉（中石化（河南）炼油化工有限公司，河南 洛阳 471012）

**摘要：**油气产业是我国国民经济支柱产业，经济总量庞大，关乎国家能源产业供应链的安全稳定。但介质物性的变动、工况的波动及设备老化等因素，造成计量误差问题突出。本文提出一种采用多参数动态补偿提升流量计量精度的方法，该方法把实时温度-压力修正、组分分析及长短期记忆（LSTM）神经网络预测技术进行融合，形成闭环优化的计量模型，重点剖析了温度-密度变动、气相挥发、机械磨损以及压力波动对计量精度的影响机制。

**关键词：**油气储存；流量计量；误差分析；动态补偿；科里奥利质量流量计

**中图分类号：**TE973.7 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-5167（2025）026-0109-03

## Research on the Improvement of Flow Measurement Accuracy and Error Analysis in Oil and Gas Storage

Ma Lihui(Sinopec (Henan) Refining & Chemical Co., LTD, Luoyang Henan 471012,China)

**Abstract:** The oil and gas industry is a pillar industry of China's national economy, with a huge economic volume and is related to the security and stability of the national energy industry supply chain. However, factors such as changes in the physical properties of the medium, fluctuations in working conditions, and equipment aging have led to prominent problems of measurement errors. This paper proposes a method to enhance the accuracy of flow measurement by using multi-parameter dynamic compensation. It integrates real-time temperature-pressure correction, component analysis, and long short-term memory (LSTM) neural network prediction technology to form a closed-loop optimized measurement model, with a focus on analyzing the influence mechanisms of temperature-density variation, gas phase volatilization, mechanical wear, and pressure fluctuation on measurement accuracy.

**Key words:** Oil and gas storage; Flow measurement; Error analysis; Dynamic compensation; Coriolis mass flowmeter

石油流量计量的精确程度直接关乎贸易结算的公平公正和库存管理的准确无误。本文制定“传感器融合+在线补偿”闭环计量策略，整合多源感知数据与智能算法，显著提升计量精度。该策略创新点在于：依化工热力学原理构建介质物性参数动态修正模型，消除温度-密度变动系统误差；用机器学习算法预测流量计历史漂移特性，提前补偿设备老化误差；借助多传感器数据融合构建自适应反馈系统，形成“测量-分析-补偿”闭环优化机制。实验表明，该方法能有效抑制复杂工况计量误差，为油气储存高精度计量提供新途径。

### 1 误差来源与机理分析

#### 1.1 主要误差源分类

在油气储存过程中，流量计量误差主要来源于介质物性变化、设备机械磨损以及工况波动三个方面。

##### ①原油密度温度修正公式：

$$\rho(T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]$$

式中： $\rho(T)$ —温度 $T$ 下的原油密度（ $\text{kg/m}^3$ ）； $\rho_0$ —参考温度 $T_0$ 下的密度（ $\text{kg/m}^3$ ）； $\beta$ —体积膨胀系数（原油典型值 $0.00065/^\circ\text{C}$ ）。

介质物性误差，典型影响幅度： $\pm 0.8\%$ 。

##### ②涡轮流量计磨损模型：

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = k \cdot t^n$$

式中： $\Delta Q$ —流量测量偏差（ $\text{m}^3/\text{h}$ ）； $Q_0$ —初始流量值（ $\text{m}^3/\text{h}$ ）； $k$ —磨损系数（实验值 $0.0012$ ）； $n$ —时间指数（实验值 $1.3$ ）； $t$ —运行时间（ $\text{h}$ ）。

设备机械误差，典型影响幅度： $\pm 1.5\%$ 。

##### ③压力波动流量修正公式：

$$\Delta Q = K \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

式中： $\Delta Q$ —流量波动量（ $\text{m}^3/\text{h}$ ）； $K$ —系统特性系数（实验值 $0.015$ ）； $\Delta P$ —压力变化量（ $\text{MPa}$ ）； $\rho$ —介质密度（ $\text{kg/m}^3$ ）。

工况波动误差，典型影响幅度： $\pm 0.7\%$ 。

介质物性出现的误差里面，温度变化引起的密度不一样是主要因素，以API度是32的原油做例子，当温度升高 $1^\circ\text{C}$ ，密度差不多下降 $0.65\text{kg/m}^3$ ，在 $30\sim 60^\circ\text{C}$ 这一典型的储存温度区间里，也许会引起 $\pm 0.8\%$ 的体积流量测量失误。涡轮流量计轴承磨损是典型实例，其性能衰减依照三阶段规律，早期磨合阶段：表面粗糙度慢慢降低，误差出现 $\pm 0.3\%$ 左右的波动；稳定磨损这个阶段：线性磨损造成误差持续上升；急

剧磨损阶段：轴承间隙超出合理范围引发振动，误差出现非直线式增长。针对工况波动误差开展分析，要是  $\Delta P$  超出 0.2MPa 时：压力波的传播速度差不多是 1000m/s，系统响应时间出现 3-5 秒的滞后，引发水锤效应。

## 1.2 化工特性对计量的影响

油气储存中的化工特性对计量精度产生显著影响，主要体现在以下两个方面：①含蜡原油的流变特性影响：当温度低于析蜡点（WAT）时，原油粘度急剧上升，遵循修正的 Vogel 方程：

$$\mu(T) = \mu_{\infty} \exp\left(\frac{E}{RT}\right)$$

其中 E 为活化能（典型值 15-25kJ/mol）。实验数据显示，在 WAT 以下每降低 5℃，粘度增加 2-3 倍，导致容积式流量计转子扭矩不足而产生卡滞现象，在渤海某油田的实测中曾造成 1.2% 的计量偏差。

② LNG 储存的闪蒸效应。低温储罐中 BOG 产生率可由 Clausius-Clapeyron 方程估算：

$$\frac{dm}{dt} = \frac{UA(T_{ext} - T_{LNG})}{\Delta H_v}$$

其中，U 为传热系数（约 25W/m<sup>2</sup>·K）， $\Delta H_v$  为汽化潜热（甲烷约 510kJ/kg）。对于 10 万 m<sup>3</sup> 储罐，日蒸发率可达 0.05%-0.15%，若不进行补偿将直接导致质量流量计量损失。某 LNG 接收站的实测数据表明，夏季高温时段因此产生的计量偏差可达 0.8%。

## 2 精度提升方法

### 2.1 多传感器数据融合架构

①感知层硬件配置。主流量测量单元：科里奥利质量流量计（±0.1% 精度）；辅助传感阵列：PT100 温度传感器（±0.1℃）；压阻式压力变送器（0.075%）；微波含水率分析仪（±0.5%）；振动加速度计（50kHz）。

②数据传输协议。建立基于 OPC UA 的实时通信框架：

$$\tau_{max} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i}} \leq 50ms$$

式中： $\tau_i$ —第 i 个传感器的响应时间（单位：毫秒）； $\tau_{max}$ —系统整体同步误差上限，表征多传感器数据的时间对齐精度；要求  $\tau_{max}$  不超过 50 毫秒，确保动态工况下的数据时效性。

③数据预处理模块。状态预测方程：

$$\hat{x}_K = F_k \hat{x}_{K-1} + B_k u_k + w_k$$

式中： $\hat{x}_K$ —k 时刻的先验状态估计（如流量、温度、压力的联合估计值）； $F_k$ —状态转移矩阵（描述系统动力学特性）； $\hat{x}_{K-1}$ —k-1 时刻的后验状态估计； $B_k u_k$ —控制输入项（如泵阀调节指令）； $w_k$ —过程噪声（服从高斯分布）。

误差协方差预测方程：

$$P_k^- = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k$$

式中： $P_k^-$ —先验估计误差协方差矩阵； $P_{k-1}$ —上一时刻后验误差协方差； $Q_k$ —过程噪声协方差（根据传感器置信度动态调整）。

## 2.2 动态补偿算法

### 2.2.1 物性参数实时修正

①温度-密度耦合模型。扩展 Clausius-Clapeyron 方程为：

$$\rho(T, P) = \rho_0 \exp[-\beta(T - T_0) + k(P - P_0)]$$

式中： $\rho$ —当前工况下介质密度（kg/m<sup>3</sup>）； $\rho_0$ —参考状态（ $T_0, P_0$ ）下的密度（kg/m<sup>3</sup>）； $\beta$ —热膨胀系数（1/℃）； $k$ —等温压缩系数（1/MPa）， $k=1.5 \times 10^{-4}$ /MPa； $T, P$ —当前温度与压力（℃, MPa）

②粘度补偿模块。采用 Cross 模型处理非牛顿流体特性：

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + (K\dot{\gamma})^m}$$

式中： $\mu(\dot{\gamma})$ —表观粘度（随剪切速率变化）（MPa·s）； $\mu_0$ —零剪切粘度（MPa·s）； $\mu_{\infty}$ —无限剪切粘度（MPa·s）； $k$ —时间常数（s）； $m$ —无量纲剪切稀化指数； $\dot{\gamma}$ —剪切速率（1/s）。

### 2.2.2 智能误差预测系统

①LSTM 设计三层网络结构：输入层：12 个特征（流量、温度、压力等历史数据）；隐藏层：64 个神经元，dropout=0.2；输出层：未来 5min 流量偏差预测。

②训练策略：损失函数采用 Huber 损失：

$$L_{\delta}(y, f(x)) = \frac{1}{2}(y - f(x))^2 \text{ 当 } |y - f(x)| \leq \delta$$

$$L_{\delta}(y, f(x)) = \delta|y - f(x)| - \frac{1}{2}\delta^2 \text{ 当 } |y - f(x)| > \delta$$

式中： $y$ —真实值（m<sup>3</sup>/h）； $f(x)$ —模型预测值（m<sup>3</sup>/h）； $\delta$ —阈值参数（相对误差 10% 时切换）。

③在线学习机制：建立滑动窗口更新策略：

$$W_{new} = W_{old} - \eta \frac{\partial L}{\partial W} + \lambda \sum_{i=k-m}^k x_i^T e_i$$

式中： $W_{new}$ —更新后的权重矩阵（R<sup>m</sup>）； $\eta$ —基础学习率； $\frac{\partial L}{\partial W}$ —损失函数梯度； $\lambda$ —增量学习系数； $X_i$ —第 i 时刻的输入特征向量（R<sup>n</sup>）； $e_i$ —第 i 时刻的预测误差）； $m$ —滑动窗口宽度。其中， $m=200$  为窗口宽度， $\lambda=0.01$  为增量学习率。

2.3 系统实现效果

该方案在某 10 万 m<sup>3</sup> 储罐实施后：温度突变工况（ΔT=15℃/h）下，密度补偿残差 <0.05%；LSTM 预测与实测误差相关系数达 0.98；综合计量不确定度从 1.2% 降至 0.35%（k=2）。

3 实验验证

3.1 测试平台搭建

①实验场地配置。在某国家级原油储备库建立测试平台，其核心设施包括：2×10<sup>5</sup>m<sup>3</sup> 双盘式浮顶储罐（直径 90m，高 22m），并联计量支路系统：

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^3 C_d A_i \sqrt{\frac{2\Delta P_i}{\rho_i}}$$

式中：Q<sub>total</sub>—系统总流量；C<sub>d</sub>—流量系数；A<sub>i</sub>—第 i 支路的流通截面积；ΔP<sub>i</sub>—第 i 支路的压差；ρ<sub>i</sub>—第 i 支路的介质密度。

②仪器仪表系统。

表 1 三级计量验证体系

| 设备类型                 | 技术参数                                  | 校准依据                 |
|----------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Rosemount 8712C 流量计  | 量程 0-3000m <sup>3</sup> /h，±0.1% 读数精度 | JJG1030-2020         |
| Emerson X-stream 分析仪 | 组分分析周期 20s，CH 含量误差 <0.3%              | ASTM D7165           |
| 标准体积管校验装置            | 容积 5000L，不确定度 0.05%（k=2）              | API MPMS Chapter 4.8 |

③工况模拟系统。建立温度-压力耦合控制模型：

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{heater} - UA(T - T_{amb})}{mc_p}$$
$$\frac{dP}{dt} = \frac{RT}{V} \frac{dn}{dt} - \frac{P}{V} \frac{dV}{dt}$$

实现以下测试场景：快速卸油工况：ΔT=25→40℃/3h，Q=2500m<sup>3</sup>/h；静态储存工况：T=15±0.5℃ 恒温，ΔP<5kPa。

3.2 实验结果分析

①动态卸油工况测试。在 40℃卸油过程中，传统方法与本文方法对比结果如下：

表 2 对比结果

| 参数      | 传统方法   | 本文方法   | 改进幅度 |
|---------|--------|--------|------|
| 密度测量误差  | +0.72% | +0.08% | 89%  |
| 流量波动标准差 | 1.25%  | 0.31%  | 75%  |
| 累计计量偏差  | +1.05% | +0.32% | 70%  |

误差降低主要来源于，温度梯度补偿效果：

$$\delta_{temp} = \frac{\int \beta \Delta T dV}{\int dV} = 0.41\% \rightarrow 0.05\%$$

LSTM 预测对压力突变的抑制：

$$\sigma_{flow} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (\Delta Q - \mu)^2 + 76\%}$$

②静态储存工况验证

表 3 72h 连续监测数据（15℃ 恒温）

| 时间区间   | 传统方法误差 | 本文方法误差 | 误差来源分析   |
|--------|--------|--------|----------|
| 0-24h  | -0.81% | -0.15% | 轴承磨损累积误差 |
| 24-48h | -0.76% | -0.10% | 介质分层效应   |
| 48-72h | -0.77% | -0.11% | 设备零点漂移   |

关键改进指标，长期稳定性：

$$\frac{\Delta E_{max}}{E_{may}} = \frac{0.05\%}{0.12\%} = 41.7\%$$

昼夜温差影响：

$$\frac{\partial \delta}{\partial T} = 0.008\% / ^\circ C$$

③不确定度分析。基于 GUM 方法评定：

$$u_c = \sqrt{u_{flow}^2 + u_{temp}^2 + u_{comp}^2} = 0.17\%$$

扩展不确定度（k=2）：

$$U=0.34\%(\text{置信概率 } 95\%)$$

本实验结果证实，所提方法在动态与静态工况下均显著优于传统计量方式，满足 API MPMS 标准中贸易交接计量的精度要求。

4 结论与展望

本研究通过系统分析油气储存阶段计量误差的来源，富有创新地提出基于多参数动态补偿的智能计量方法，并在实际工业场景当中验证了其有效性，研究结果说明，所开发的“传感器融合+在线补偿”系统可将贸易交接计量误差从一开始的 ±1.2% 显著降低到 ±0.5% 以内，全然契合国际标准要求。尤其是处于动态卸油工况时，计量精度提升幅度高达 70%，就静态储存工况而言，长期稳定性提高了 60% 以上，这一成果攻克了传统计量方法在温度波动、设备老化等条件下精度降低的难题，更主要的是形成了可工程化推广的技术方案。

参考文献：

[1] 饶小惠. 油气储存重大基础设施 Natech 事件场景三维可视化系统研究与应用 [D]. 华南理工大学, 2023.  
[2] 陆斌. 计量技术在石油石化企业中的应用 [J]. 化工设计通讯, 2020, 46(08): 172-176.  
[3] 于艳. 标准化方法对计量检测过程的质量控制 [J]. 大众标准化, 2025(07): 181-183.

作者简介：

马丽辉（1977—）女，汉族，河南洛阳人，中国石油大学（北京），化学工程与工艺专业，本科，工程师，研究方向：计量技术。