

原油计量中罐容修正因素对计量精度的影响

王 芳(国家管网集团山东分公司, 山东 济南 250000)

摘要: 原油储运过程中的计量精度直接关系到油品交易、库存核算及企业经济效益。在罐式计量体系中, 储罐容积的准确性是决定计量结果的核心要素之一。本文系统梳理了原油计量的关键流程与储罐结构特性, 深入分析罐容修正因素的分类与作用机制, 探讨温度、密度及液面误差对计量精度的影响, 并结合工程案例提出精度优化措施与技术改进建议, 为提高原油计量的准确可靠提供实践路径。

关键词: 原油计量; 罐容修正; 温度影响; 密度变化; 液面误差; 精度优化

中图分类号: TE89 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 029-0031-03

The influence of tank capacity correction factors in crude oil measurement on measurement accuracy

Wang Fang(Shandong Branch of National Pipeline Network Group,Jinan Shandong 250000,China)

Abstract: The measurement accuracy during the storage and transportation of crude oil is directly related to oil product trading, inventory accounting and the economic benefits of enterprises. In a tank-type metering system, the accuracy of the tank volume is one of the core elements determining the metering results. This paper systematically reviews the key processes of crude oil measurement and the structural characteristics of storage tanks, deeply analyzes the classification and mechanism of action of tank capacity correction factors, discusses the influence of temperature, density and liquid level errors on measurement accuracy, and proposes accuracy optimization measures and technical improvement suggestions in combination with engineering cases, providing practical paths for improving the accuracy and reliability of crude oil measurement.

Key words: Crude oil measurement;Tank capacity correction;Liquid level error;Precision optimization

随着我国原油资源调运与市场交易的规模日益扩大, 油品贸易的结算、库存数据的统计与损耗核算里的计量精确性问题日益受重视。实际开展工作的阶段, 鉴于对温度、密度、液位等方面修正不充分, 老是引起计量方面偏差, 随后引起贸易争执与经济上的亏损, 详尽剖析罐容修正因子在相异计量状态下的作用机理, 优化对应的技术实施路径, 成为改善原油计量精准度的关键节点。

1 原油计量基础与罐容修正因素概述

1.1 原油计量流程与关键参数解析

在原油的罐式静态计量里, 关键流程包含液位量测、温度检测、密度敲定与体积算出等四步, 采用液位计(如雷达、磁翻板液位计)来测定油的高度, 依据罐容表查出原油初始容积; 采用温度传感器得到油品的平均气温, 做热胀冷缩引起变化的校正; 再结合标准密度, 换算得出油品的实际质量, 对计量精度起关键作用的参数包含液位高度(H)、油品平均温度(T)、密度(ρ)、罐容修正系数等, 正常标准下原油体积 V_{15} , 按下面公式计算:

$$V_{15}=V_t \times VCF$$

V_t 是现场测出体积规模数值(单位: VCF (Volume Correction Factor) 即体积修正系数, 一般按照 API 标准表格或公式, 反映出油品从现场温度(T)修正成

15℃标准状态时所需换算比值, 油品类型与温度, 极大程度影响 VCF 的取值, 为达成质量换算与贸易结算精确性的核心要点。

1.2 储罐结构特性与容量测量方法

储罐的结构形态, 直接关乎其容积测量精度, 常见的原油储罐有固定顶罐、内浮顶罐以及外浮顶罐类型, 各种罐型在罐壁的垂直特性、底部的形状(比如锥底、球底)以及罐体对热胀冷缩的响应上是有差异的, 处于容量度量过程中, 大多采用静态水尺法或激光扫描建模法实施罐容校准, 通过一级一级的测量液位跟相应体积的联系, 得出罐容相关表格。鉴于储罐长期处于运作状态, 易出现像椭圆变形、局部沉降这类结构的异样改变, 引发罐容表跟实际容量的数值存在偏差, 于是要定期做复测然后进行修正, 特别是液位靠近罐顶、罐底的那个阶段, 容积改变的速率大幅上扬, 对计量准确程度的影响愈发显著, 需采用高精度测量装置, 搭配几何修正模型进行补偿。

1.3 罐容修正因素的分类与影响机制

原油储罐在实际运行中, 其容积并非恒定不变, 而是遭到多种结构相关与工况相关因素一起作用, 应做相应的罐容调整工作, 平常碰到的修正因子有: 液体静压力引发的效应现象, 即伴随储液高度的持续上扬, 因液体静压作用罐壁出现外鼓现象, 造成实际容

量比静态罐容表值要大，尤其是大型薄壁储罐，此影响会明显增强；罐底不平会造成罐底局部出现高低落差，致使低液位阶段体积计算出现误差；罐内诸如支架、加热盘管、取样器这类固定物件会占去有效容积，要从总容量里去除相应部分；若罐体倾斜，液位对应体积的关系就会偏离标准的轴对称模型，对高精度计量换算造成干扰，罐体蠕变实际上属于长期结构性的要素，即金属材料在长时间储放液体、温差变化及压力的作用下逐渐变形，造成罐体几何形状出现无法挽回的偏移，干扰到容积的稳定性。

2 罐容修正因素对计量精度的影响分析

2.1 温度变化对罐容及计量精度的影响

温度是影响罐容和计量精度的关键变量之一，其作用主要体现在两个方面：其一，原油本身的热胀冷缩性使得其体积随温度变化而波动，通常以15℃为标准状态，通过体积修正系数（VCF）将现场体积换算至标准体积。例如，原油的体积膨胀系数大约在0.0007/℃左右，当油温由15℃升高至35℃时，每立方米原油体积可增加约1.4%，若不进行修正，将造成严重的质量低估或高估。另外，温度也影响原油的密度，而密度是从体积换算为质量的核心参数，密度变化若未修正，将导致贸易结算中吨数与货值出现偏差，特别是在夏季与冬季温差较大的地区影响尤为明显。

其二，储罐本体结构也受温度变化影响。钢制罐体具有一定热膨胀性，其线膨胀系数约为 $1.2 \times 10^{-5}/\text{℃}$ 。当环境温度升高时，罐壁与罐底可能发生微小扩张，导致同一液位下的储液体积略有增加，这种“结构膨胀误差”虽然看似微小，但在大容量储罐中累计偏差不可忽视。例如一个直径40m、高20m的储罐，在温度升高30℃时，其罐容理论上可增加约2.4m³，折合原油约2t。因此，在高精度计量场景中，既要对油品温度进行实时修正，也要考虑储罐结构的热胀冷缩特性，通过合理设置温度监测点及使用标准修正模型，确保计量结果的准确一致性。

2.2 液面测量误差与罐容修正的关系

液面高度是原油罐式计量中体积换算的直接依据，任何液位测量误差都会成倍地传导至体积计算结果，进而影响最终的计量精度。液位测量误差的来源主要包括仪表分辨率限制、罐内波动（如流动扰动或加热搅拌）、罐顶结构对测量盲区的干扰，以及液面泡沫层或浮渣干扰等。例如，在一个典型的浮顶罐中，每1mm的液位误差可能对应5~10m³的体积误差，若液位误差达±5mm，则计量误差可能达到25~50m³，相当于20~40t原油，在国际原油价格为4000元/t的

条件下，经济误差可能高达8万~16万元。此外，液面高度与罐容之间的关系并非线性，尤其在罐体顶部和底部区域，容积变化率陡增或陡降，液位每升高或下降1mm对应的容积变化值大幅波动，因此小幅度液位误差在这些区域所引起的体积偏差更为显著。使用高精度雷达液位计并配合罐底多点温度与倾斜传感器布设，可以显著降低因液面误差引起的罐容偏差。

2.3 液体密度及体积变化对计量结果的修正作用

原油从体积计量向质量计量换算，液体密度成了核心参数，其变动会直接左右最终贸易结算的结果，温度变化对原油密度的影响十分显著，在实际开展计量时，往往需把现场测得的密度修正至15℃的基准情形，从而排除热膨胀效应对质量核算的干扰。有一类轻质原油在30℃时密度达0.830g/cm³，若处于15℃的状态，标准密度为0.850g/cm³，若不进行针对密度的修正，会让每立方米原油的质量被低估差不多2.4%，当贸易量累计到5000m³时，误差估计会达到将近10t，按每吨4000元这个价格去算，会引发近4万元的经济差错，密度校正并非仅是达成计量准确的技术依仗，也作为企业控制经济风险的关键环节。

液体密度的获取跟修正，牵扯多种专业技术方式，一般可在实验室里取样本，用比重计测定原油的密度，也可利用在线密度计实时监测，得借助标准化的密度-温度换算公式（就如API MPMS Chapter 11.1），借助体积修正因子（VCF）做换算处理。特别是原油的成分繁杂，其密度-温度的变化情况并非完全线性化，重质原油与轻质原油的VCF曲线差异明显，要是选用有问题，会引起系统性的差错现象。因此，建立完善的密度监测与修正机制，是保障原油计量科学性与公正性的关键所在。

3 罐容修正应用实践与精度优化措施

本文以中石油沿海炼化厂的计量改造项目为例，分析修正措施在提升计量精度中的效果。

3.1 案例背景：某大型原油接卸储罐计量改造项目

该项目位于东部沿海某原油炼化基地，承担着年均超1500万t原油接卸任务，配备20座固定顶和浮顶混用的大型储罐，单罐容量为10,000~100,000m³不等。项目原有计量体系采用基于人工修正的静态罐容表和单点温度采集装置，存在多项问题：包括液位测量误差大、温度代表性不足、罐容表老化失真等。近年因计量误差造成的月度原油盈亏波动平均达0.7%，引发贸易纠纷频发。

3.2 技术措施与修正流程

为提升计量精度，项目系统性罐容修正改造，主要技术措施包括：

三维激光扫描建模重建罐容表：采用 Leica RTC360 激光雷达系统对每座储罐进行 360° 无死角扫描，获取罐体内壁和底部超过 500 万个空间点云数据，通过计算截面面积随高程的变化关系，生成高精度等高线体积剖面图。与传统人工测量制作罐容表相比，三维建模能全面反映罐体变形、罐底倾斜、局部凹陷等实际结构特征，最终形成数字化、可追溯的罐容表模型。经验证，修正后的罐容误差由改造前的 $\pm 0.5\%$ 下降至 $\pm 0.1\%$ 以内，极大提升了体积计算的基础准确度。

多点温度采集与平均温度修正：传统计量通常采用单点温度测量，无法反映罐内油温的垂向分层特征，特别是在罐底加热、顶部冷却或油品分层工况下误差明显。项目在每座罐体沿垂直方向设置 5 个 Pt100 高精度热电阻探头（分别布设在 10%、30%、50%、70%、90% 液深位置），通过加权算法计算平均温度，确保温度修正更具代表性。系统运行数据显示，平均温度测量误差由原 $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，直接提升了 VCF 换算准确性，并为热胀冷缩修正提供可靠依据。

高精度雷达液位计替换老旧浮球液位计：原系统使用机械浮球液位计，响应迟缓且精度受波动和附着物影响，改造中统一更换为 VEGA-Puls 69 系列 26GHz 脉冲雷达液位计，测量精度提升至 $\pm 1\text{ mm}$ ，响应时间小于 1s。同时，液位计与罐容表数据库实时联动，实现液位变化的瞬时体积计算，避免人工查表带来的读数滞后与主观误判，提升动态计量准确性。

密度自动修正系统集成：原系统依赖人工采样送检测定原油密度，无法满足在线换算与实时修正需求。此次改造接入 Anton Paar 在线振动管密度计，结合 API MPMS Chapter 11.1 标准体积修正因子（VCF）模块，实现原油密度在当前温度下的实时获取及自动修正至 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 标准状态。密度修正精度控制在 $\pm 0.0005 \text{ g/cm}^3$ 以内，保障质量换算数据严谨可靠，避免人为滞后导致吨数误差。

数据系统集成与智能控制平台搭建：构建统一的 SCADA 数据采集与罐容修正平台，集成液位、温度、密度采集模块，自动执行 VCF 计算、容积换算与质量估算，同时配备异常识别算法，自动识别传感器故障、波动偏离与数据不一致现象，实时预警提示操作人员。

3.3 数据分析与精度提升结果

在系统改造完成后，项目选取连续 6 个月的接卸作业数据进行对比分析，主要观察罐容修正对计量偏差的改善情况。结果如表 1。

例如，在一次 7 万 t 委托接卸作业中，改造前原油实卸量与账面差值达 64t，而改造后仅为 5.7t，偏差率从 0.91% 下降至 0.08%，基本符合贸易标准要求 ($\leq 0.1\%$)。现场计量主管反馈，改造后系统操作更为直观，数据分析可追溯性强，基本杜绝了因人为估算造成的误差。

3.4 成本收益与推广建议

本次改造总投资约 420 万元，主要用于设备采购、罐体建模与系统集成，按照每年减少因误差造成的损失约 280 万元测算，项目在不到两年内可收回全部投资，具有显著经济性。该模式已被中石油集团纳入原油罐区智能计量改造试点，在大庆、宁波等地成功复制推广。该案例表明，基于结构建模、实时修正与数据集成的罐容修正体系，显著提升了原油计量精度，也为行业提供了可复制、可推广的实践路径。

4 结束语

罐容修正因素在原油静态计量体系中扮演着关键角色，温度、液位与密度等物理参数变化若未加以有效修正，将直接影响体积换算与质量计算的准确性，进而导致经济纠纷与运营风险。通过引入高精度测量设备、建立标准化修正体系、加强管理制度执行，可显著提升原油计量的整体精度与可靠性。

参考文献：

- [1] 于丽华, 侯军祥, 宋维政. 原油计量中存在的问题 [J]. 中国化工贸易, 2014(32):223.
- [2] 史清刚, 丁仕兵, 杜有缘, 等. 储油罐进油体积和重量的测量及不确定度评定 [J]. 山东化工, 2023, 52(4):117-120.
- [3] 吴宗珍, 刘家超, 王洋. 储罐原油计量的差量分析及对策 [J]. 辽宁化工, 2025, 54(2):335-338.
- [4] 王书良. 储罐温度分布对计量精度的影响 [J]. 油气储运, 2017(11)1337-1341.
- [5] 张丽萍. 影响储油大罐计量准确性的因素分析 [J]. 中国化工贸易, 2014(8):131.

表 1 数据分析与精度提升结果

指标名称	改造前平均值	改造后平均值	改进幅度
月平均计量偏差率	$\pm 0.72\%$	$\pm 0.09\%$	降低 87.5%
平均温度测量误差	$\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$	降低 80%
单罐最大盈亏误差	$\pm 98.6\text{t}$	$\pm 12.4\text{t}$	降低 87.4%
平均罐容表修正偏差	$\pm 0.5\%$	$\pm 0.08\%$	降低 84%
纠纷发生频次	每季度平均 3 次	半年仅 1 次	明显减少