

# 天然气贸易交接计量系统的误差分析与优化控制研究

安娜 (中石油京唐液化天然气有限公司, 河北 唐山 063200)

**摘要:** 天然气贸易交接计量系统使用时很容易受到天然气介质成分、管输工况, 计量设备、测量环境及数据处理方法等多方面因素的影响, 这些因素都有可能引发系统误差, 所以天然气贸易交接计量系统的误差一般呈现出多源性、动态性和耦合性等特点, 如果未及时控制这些误差情况, 后续一旦因误差引起计量偏差, 就会产生贸易纠纷。本文主要分析系统误差产生原因及影响程度, 提出系统误差的综合优化策略。

**关键词:** 天然气贸易; 交接计量系统; 误差

**中图分类号:** TE863      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-5167 (2026) 011-0026-03

## Research on Error Analysis and Optimization Control of Natural Gas Trade Handover Metering System

Anna (PetroChina Jingtang Liquefied Natural Gas Co., Ltd., Tangshan Hebei 063200, China)

**Abstract:** The natural gas trade handover metering system is prone to be affected by multiple factors such as the composition of natural gas medium, pipeline transportation conditions, metering equipment, measurement environment, and data processing methods. These factors may all cause system errors. Therefore, the errors of the natural gas trade handover metering system generally present characteristics such as multi-source, dynamic, and coupling. If these error situations are not controlled in a timely manner, trade disputes may arise due to measurement deviations caused by errors in the future. This paper mainly analyzes the causes and influence degrees of system errors and proposes a comprehensive optimization strategy for system errors.

**Keywords:** Natural gas trade; Handover metering system; Error

天然气贸易交接计量系统是天然气贸易时用作计量天然气体积、质量和能量的系统, 天然气交接计量系统的误差会直接影响天然气贸易结算, 所以需要格外注意。天然气贸易交接计量系统使用期间, 也难免会受到设备性能退化、工况参数波动、管网运行状态差、环境干扰等问题影响, 出现较多样化的计量误差。

### 1 天然气贸易交接计量系统的误差及产生原因

#### 1.1 仪表设备误差分析

有一些天然气贸易交接计量系统使用超声流量计, 需要靠声波传播特性获取流量信息, 所以计量系统声道结构、换能器耦合情况及声速模型细微变化都会影响计量结果。有些系统使用涡轮流量计进行计量, 这类仪表属于机械式测量装置, 叶轮的转动灵敏度与轴承摩擦状况相关, 运行时间越长轴承磨损越明显, 设备误差也就越大。还有部分传统的差压式流量计的节流件形状精度、差压传感器线性特性要求较高, 任何细微偏差都容易被计算放大。也就是说, 受时间影响, 大部分系统使用的仪表都有可能出现偏差<sup>[1]</sup>。

设备长期运行, 天然气介质不可避免会遗留粉尘、凝液及微量腐蚀成分, 这些物质会随着时间的增加逐渐附着到仪表测量面或内部结构上, 使换能器效率下降、叶轮转动阻力增大, 外界温度和压力的周期性变化也会让材料微小变形, 使某些结构参数不再保持初

始状态, 这些情况最终都会影响系统计量的准确性, 容易让系统产生误差。

#### 1.2 工况参数测量误差

天然气贸易交接计量系统计量天然气体积、能量时主要依靠流量、压力、温度、组分、含水量等工况参数的综合测算, 但天然气管输时物性会结合环境和运行状态不断变化, 任何一个参数的偏差都会反映到体积转换、能量计算或压缩因子上, 所以工况参数测量看似独立, 实则相互牵动, 是整个计量系统最容易因多因素耦合产生误差的环节。

如天然气管道内的压力波动会随时间变化, 有一定频率和幅度, 部分站场受压力脉动、阀门切换、压缩机启停等工况影响, 压力信号波动更为明显, 如果测量传感器响应速度不够, 测得的压力就会滞后于实际变化, 压力取源位置若设在流体扰动区域, 与主流区相距过远, 信号也会偏离真实工况<sup>[2]</sup>。

而且天然气温度会随着流速、压力和外界环境不断变化, 温度套管过长、插入深度不足或与主流区接触不良时传感器都无法及时反映流体温度变化, 管道表面散热较大或保温措施不到位时, 管壁与流体之间的温度会出现差异, 使测量结果低于真实温度。

#### 1.3 管道运行工况变化的影响

管输系统调峰、切换支线、启停压缩机或调整负

荷时内部气流速度短时间内就会出现变化,这种流速变化影响瞬时流量,改变流体的速度分布,会快速改变部分仪表的测量状态,如超声流量计依赖声程稳定性,涡轮流量计依赖叶轮转速与流速的比例关系,这些结构都没办法完全抵消大幅度波动带来的影响,流速变化频繁时仪表输出会突然抖动,计量系统很难获得平稳的数据。

如果管道直管段较长、流体稳定,速度剖面呈现规律性结构,仪表就能按照设计状态工作,若受到阀门调节、弯管扰动、分输操作等情况影响,流体会从层流状态或近层流状态转变为紊流,局部甚至可能形成漩涡区,这些变化会使流场结构更加复杂,速度分布不再对称,仪表的测量路径或测量截面就无法准确反映整体流量。

#### 1.4 环境与外界条件误差

大多数天然气贸易交接计量系统处于户外或半开放环境,周围的气象条件、场站布置、电磁环境以及机械振动都会影响仪表的测量状态,仪表本体虽具备一定防护等级,但外界因素的作用长期存在,影响也更容易逐渐累积后使计量系统呈现出缓慢偏移或周期性波动的特征。

一般夏季高温、冬季低温或昼夜温差明显的地区系统仪表内部元件都会因温度变化微小变形,传感器的零点与量程都会发生偏移,部分流量计使用超声传播、机械旋转或电信号处理,温度波动会改变材料弹性模量、空气间隙、电子元件阻值等参数,不同温度的仪表区间就会表现出不同的灵敏度<sup>[3]</sup>。

#### 1.5 数据采集处理误差

天然气贸易交接计量系统测量完现场情况后,还要经过数据采集、传输、过滤、计算和存储等一系列处理环节才能得到最终计量结果,数据链条每一个步骤都有出现细微偏差的可能,这些偏差经多次转换后被放大,最后让最终数据与现场真实情况产生差距。

系统采样数据时主要使用采集器、变送器和通讯模块等设备,采样频率设置过低数据无法反映工况的动态变化,高频波动容易被忽略。采样频率过高数据量过大,系统处理时容易延迟或丢包。数据传输时,长距离传输会受到电磁干扰、线路老化、接头接触不良等因素影响,传输信号容易衰减或畸变,部分场站网络数据需经过多个节点转发,某些节点延迟较高,数据又没办法实时传输。

## 2 天然气贸易交接计量系统的误差优化控制措施

### 2.1 流量计与测量设备选型校准

流量计选型主要参考压力等级(4.0MPa、6.3MPa)、流量变化范围(最小流量 $Q_{min}$ 、最大流量 $Q_{max}$ )、

雷诺数区间、管道直径及流型状况。雷诺数较高、流速稳定、DN300以上的大口径管线一般使用超声流量计,且应优选多声道结构(如4声道或6声道),改善流型畸变的测量影响。涡轮流量计测量雷诺数变化频繁或流速较大(大于2m/s)的场景时表现更好,但必须选用低摩擦陶瓷轴承或磁悬浮轴承降低磨损误差。差压流量计适用于检测压力高、湿气和杂质较多的介质,节流件一般使用高精度加工的标准孔板并保持ISO 5167的公差要求(锐边半径小于0.1mm)。

测量使用的压力传感器宜为0.05级或0.1级高精度硅膜传感器,要求具有温度漂移补偿模块,温度计套管需达到插深管径的1/3以上,并使用响应时间小于8s的铂电阻(Pt100三级或二级)。检测使用的色谱仪主要关注检测器灵敏度(FID检测限低于0.1ppm)、进样系统的稳定性及全组分重复性误差情况<sup>[4]</sup>。

设备校准使用标准表法校准、标准装置溯源校准以及在线比对校准三种方法,比如使用0.2级或以上精度的标准金属管超声流量计串联比对相同工况下的设备情况,确定被校流量计的线性误差曲线,或依托气体质量法或临界流喷嘴装置按照国家计量院或省级计量院标准溯源,使计量结果可追溯至国家基准。超声流量计使用双计量回路结构实时比对,当两台设备的差值超过预设阈值(如0.3%)时触发报警,并依据偏差趋势自动调整换能器增益或声速修正参数。设备校准期间,一般使用最小二乘拟合流量-差压特性曲线、建立流型畸变修正模型、使用声速数据库(AGA-10)修正温压波动影响,使校准满足动态补偿要求。长期运行仪表必须建立校准周期自适应机制,定期监测功率谱变化、噪声水平、信号一致性等参数判断性能衰退程度,确定校准周期。

### 2.2 工况参数测量管理

系统测量使用的压力传感器尽量选择具备数字温漂补偿模块的硅膜式型号,并把温度漂移控制到 $\pm 0.02\%F.S./10^{\circ}C$ 以内。温度传感器使用Class A等级的Pt100,保证基本误差不超过 $\pm 0.15^{\circ}C$ ,响应时间 $t_{0.9}$ 小于8s。若站场工况波动较大则选用带自诊断功能的智能传感器,使系统实时检测零点漂移并自动修正。色谱分析系统配置具备自动基线校正、自动校准气进样功能的型号,使组分分析的精度和重复性保持到0.1%以内。

组分采样时使用等速取样探头,保证采样流速与主管道流速的偏差不超过 $\pm 5\%$ 。采样管路需恒温控制(40-50 $^{\circ}C$ ),并使用PTFE或不锈钢材料,避免重烃吸附。测量含水量时露点仪需布置到压力稳定点,配备自动吹扫功能,使探头保持干净,恢复时间维持

30—60s 以内<sup>[5]</sup>。

系统可通过计算 Z 因子变化幅度、对比压力、温度曲线趋势等方式判断工况参数是否具备物理一致性,当色谱组分更新后系统自动计算 Z 值并与前一周期对比,若偏差超过设定阈值(如  $\pm 0.5\%$ )系统暂不更新该组分,并自动触发二次分析,避免异常值直接进入计量核心。

### 2.3 管道运行工况改善措施

管道计量段前的直管段长度尽量与仪表检测要求匹配,允许流体在雷诺数大于  $2 \times 10^5$  的条件下形成充分发展的湍流速度剖面。比如多声道超声流量计宜布置  $\geq 15D$  的直管段, D 为管道内径。涡轮流量计保持  $\geq 10D$ 。差压式仪表使用  $\geq 12D$  的直管段。当现场布置无法满足上述要求时可使用整流装置替代部分直管段,如使用多柱式整流器,柱体直径加工偏差应控制在  $\pm 0.10\text{mm}$ ,柱体轴线平行度保持  $\leq 0.05^\circ$ ,装配后整流器几何中心偏移不得超过  $0.50\text{mm}$ 。整流器表面粗糙度保持  $Ra 3.2\mu\text{m}$  以内。整流装置的总压损需经过计算确认,一般要求  $\Delta p \leq 0.3\%p_0$  ( $p_0$  为计量段平均压力)。

站场负荷波动条件下,管道需使用容积型缓冲腔削弱压力脉动,缓冲腔容积按照主管道截面积 A 的 25A—35A 范围配置,使腔体固有频率低于压缩机脉动主频 50% 以下。缓冲腔内部宜设置 8mm—12mm 的阻尼板提高脉动衰减效率。如果使用的是差压式流量计,取压支路可配置毛细阻尼管,内径宜 0.30mm—0.60mm,长度 0.20m—0.40m,使差压信号时间常数  $\tau$  增加至约 0.5s—1.2s,防止瞬态信号影响计算结果。

湿度波动或温度较低时计量段前需布置可靠的排液结构,湿度过大产生液滴时,要在液滴进入仪表前清除。比如管道内一般使用差压驱动形式的自动排液器排湿,设备启动压差  $\Delta p_r$  设定 5kPa—10kPa 区间。冬季计量段宜使用电伴热器伴热,功率一般 20W/m—30W/m,使管壁温度保持天然气露点温度以上至少  $3^\circ\text{C}$ ,减少液滴附着管壁的可能性,但伴热器温度需设上下限保护,通常保持  $35^\circ\text{C}$ — $45^\circ\text{C}$  区间。

计量管段管道的几何精度也要适当调整,保持计量段的椭圆度  $\leq 0.3\%$ ,直线度偏差  $\leq 1\text{mm/m}$ ,内壁粗糙度需保持  $Ra 1.6\mu\text{m}$ 。焊缝内部处理至与管壁齐平,错边量不得超过  $0.50\text{mm}$ 。计量段宜安装柔性支撑结构,使接触部位振动快速衰减,防止直接传播至流量计主体。长距离输送的高压站流量计周围需布置振动监测点,把振动加速度控制到  $\leq 0.5\text{m/s}^2$ ,使仪表内部结构免受高频激励影响<sup>[6]</sup>。

但需要注意,系统使用阶段如果想让上述措施持

续发挥作用,还需要使用仪表自身数据判断流场状态,再结合流场状态适当调整管道运行工况。

### 2.4 数据处理与计算模型优化

系统需把压力 p、温度 T、流量信号  $Q_m$  以及组分浓度  $x_i$  的采样时间对齐,使数据时间差控制到  $\pm 0.1\text{s}$  范围内,主时钟漂移率需要稳定在  $\leq 1 \times 10^{-6} \text{ s/s}$ ,防止累计时间误差影响贸易交接计量。原始数据计量计算之前需使用一阶低通滤波方法控制高频噪声占比较明显的信号,把滤波时间常数  $\tau$  控制到 0.20s—0.50s 区间。系统采集的流量信号用卡尔曼滤波模型处理,使用状态预测与观测修正相结合的方式修正瞬时波动,使输出结果更加稳定而不过度滞后。温度与压力信号用滑动平均方式处理,窗口宽度设置成 3—5 个采样点,满足稳定性与实时性之间的平衡要求。

压缩因子 Z 计算模型宜采用 AGA8-92DC 或 AGA8-GE 状态方程,结合在线色谱分析获得的天然气组分数据实时计算 Z 值。组分更新周期内同步更新压缩因子,使其与压力和温度变化保持一致。计算压缩因子时保证好输入参数的有效位数,把压缩因子计算误差控制到  $\Delta Z \leq 0.0003$  范围内。高压输送条件下则使用迭代算法求解状态方程提高密度和压缩因子计算的准确性,把相对误差控制到  $\pm 0.05\%$  以内。

## 3 结论

总而言之,天然气贸易交接计量系统使用时可能会受到周边环境、设备情况、操作方式等因素影响出现误差,维护人员必须及时发现这种误差并做好相关控制措施,及早结合实际原因解决引发误差的情况,日常使用计量系统时也要做好充分的维护工作,防止出现严重误差引起的问题情况。

### 参考文献:

- [1] 姚建鑫. 基于流体仿真的天然气管网计量方法研究[J]. 石油石化节能与计量, 2025, 15(02): 51-56.
- [2] 陈志刚, 马瑾, 康国强. 国产超声波流量计在天然气贸易计量中的应用[J]. 石油工程建设, 2025, 51(01): 68-71.
- [3] 赫忱. 基于能量计量的管道运行优化技术研究[J]. 石油石化节能与计量, 2025, 15(01): 37-42.
- [4] 刘玉莹. 关于天然气能量计量应用的探讨研究[J]. 化工设计通讯, 2024, 50(11): 38-40.
- [5] 高志国, 曹斌, 孙丽敏. 天然气实流检定站循环风机的设计选型及建模技术研究[J]. 石油化工自动化, 2024, 60(06): 49-52.
- [6] 胡雪斌, 沈丹, 甘建红. 数字化智能化助推天然气计量工作的思考[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024(20): 94-96.