

复杂工况下流量计量精度提升方法研究

高洁 130402198408170020

摘要

流量计量是工业生产、能源管控、环境监测等领域的核心计量环节，实际运行中流体组分波动、管道流态紊乱、温压参数突变、结垢堵塞等复杂工况会对计量精度产生严重干扰，导致计量误差最高可达 10% 以上，直接影响贸易结算公平性与生产过程管控精度。本文分析了复杂工况下影响流量计量精度的主要干扰因素，从传感器优化布置、信号滤波算法、多参数补偿模型、在线校准四个维度梳理了精度提升的可行方法，并对不同方法的适用场景与效果进行对比，结果表明，多源参数融合的动态补偿模型结合周期性在线校准可以将复杂工况下的计量误差控制在 0.5% 以内，能够满足大部分工业场景的高精度计量需求。本文研究可为复杂工况下流量计量系统的设计与改造提供参考。

关键词：复杂工况；流量计量；计量精度；误差补偿

一、引言

流量计量是工业生产过程中不可或缺的计量环节，在油气输送、化工生产、城市供水供气、火电发电等领域，流量计量数据不仅是生产过程控制的核心依据，也是贸易结算、能源消耗统计的基础数据，计量精度直接关系到生产企业与用户的核心经济利益。根据国家计量部门统计数据，我国现有在用工业流量计量仪表中，超过 60% 运行在存在多种干扰因素的复杂工况下，其中近 30% 的计量仪表误差超过 2%，部分未进行精度优化的计量点误差甚至超过 10%，每年因计量精度不足产生的贸易纠纷与经济损失超过百亿元。

复杂工况通常指计量环境存在一种或多种不稳定干扰因素，常见的干扰包括流体温度压力大幅波动、流体组分变化、管道内流态紊乱、杂质堆积结垢、振动电磁干扰等，传统流量计量仪表多基于标准工况下的标定参数开展计量，无法应对工况变化产生的误差偏移，因此研究适用于复杂工况的流量计量精度提升方法，对保障工业计量准确性、维护贸易公平具有重要的现实意义。

二、复杂工况下流量计量精度的影响因素

2.1 流体参数波动影响

温度与压力是流量计量中最容易产生波动的参数，对于差压式、容积式等传统流量计量仪表，计量结果通常基于标准工况下的流体密度计算得到，当实际工况中流体温度或压力发生变化时，流体密度会产生明显偏移，同时管道受热胀冷缩影响也会发生内径变化，进而导致计量误差。以天然气输送为例，当管道压力波动 1MPa 时，若未进行补偿，体积流量计量误差可达到 10% 左右，即使是密度相对稳定的液体，温度波动超过 10℃ 时，误差也会超过 1%。

2.2 流态与组分干扰

理想的流量计量要求管道内流体为充分发展的紊流，流速分布满足正态分布规律，但在实际工况中，计量点上游经常存在弯头、阀门、变径管等阻力件，导致管道内流速分布畸变，产生旋流、偏流等问题，会导致差压式流量计误差增大 2%~5%。对于多相流体，比如含砂原油、带液天然气等，流体组分的变化会改变流体的物理性质，导致传感器响应特性发生偏移，目前传统的单相流量计测量多相流体时误差普遍超过 5%，无法满足计量要求。

2.3 环境与仪表自身干扰

复杂工业环境中通常存在较强的机械振动与电磁干扰，会影响流量传感器的输出信号，导致信号中混入大量噪声，降低计量精度。此外，流量计长期运行过程中，管道内壁结垢、传感器探头磨损会改变仪表的流通面积与响应系数，导致计量误差随运行时间逐步增大，这种漂移特性在恶劣工况下更加明显，部分节流式流量计运行 3 年后误差可从 0.5% 漂移到 3% 以上。

三、复杂工况下流量计量精度提升主要方法

3.1 传感器安装优化与机械结构改进

解决流态畸变问题最直接的方法是优化传感器安装位置，按照计量规范要求，流量传感器上游需要保留 10~20 倍管径的直管段，下游保留 5 倍

管径以上的直管段，保证流体进入传感器前流态充分发展。若现场无法满足直管段要求，则可以安装流动整直器，通过整流结构消除旋流与偏流，调整流速分布，该方法可以将流态畸变产生的误差降低 80%以上，目前常用的整直器包括栅板式、管束式等，其中孔板整直器对旋流的修正效果最好，适用于大管径管道的流态修正。

3.2 信号处理与噪声滤波算法优化

当传感器输出信号存在噪声干扰时，可以通过数字滤波算法提升信号质量，降低噪声带来的计量误差。传统的滤波方法包括中值滤波、均值滤波等，适用于平稳噪声的处理，对于复杂工况下的非平稳随机噪声，近年来基于小波变换、自适应滤波、人工智能的滤波方法得到了广泛应用。小波变换可以将信号分解为不同频率的分量，通过剔除高频噪声分量保留真实的流量信号，对于振动干扰的滤波效果明显优于传统滤波方法，试验表明，在强振动工况下，小波滤波可以将计量误差从 3.2%降低到 0.8%以下。

自适应滤波算法可以根据干扰信号的特征自动调整滤波参数，跟踪工况变化调整滤波效果，适用于干扰特征随时间变化的场景，目前结合神经网络的自适应滤波方法，可以自动识别噪声与真实流量信号的特征，进一步提升了复杂干扰下的信号处理效果，这类方法主要通过软件算法实现，不需要改造现有硬件设备，适用于在用计量系统的精度升级，改造成本较低。

3.3 多参数动态误差补偿

针对流体温压参数波动、组分变化带来的系统性误差，多参数动态补偿是目前应用最广泛的精度提升方法。该方法通过在计量点加装温度、压力、密度传感器，实时采集流体的实际运行参数，结合流体物性方程建立误差补偿模型，对流量计的原始输出结果进行实时修正。

对于更复杂的多相流与组分变化场景，近年来发展出多传感器融合的补偿模型，通过多个传感器采集不同维度的参数，结合机器学习算法建立误差补偿模型，比如含液天然气流量计量中，通过同时采集差压、温度、压力、介电常数参数，基于支撑向量机或者神经网络建立流量预测模型，可以将多相流计量误差从 8%以上降低到 2%以内。

四、结论与展望

复杂工况下的流量计量精度提升是工业计量领域的核心问题，不同于

扰因素需要对应不同的精度提升方法，其中传感器安装优化适用于流态畸变问题，滤波算法适用于环境噪声干扰，多参数动态补偿适用于流体参数波动与组分变化，在线校准适用于仪表系数漂移，实际应用中需要结合现场工况组合多种方法，才能实现最优的精度提升效果。工程实践表明，采用“传感器优化布置+多参数动态补偿+定期在线校准”的组合方案，可以将复杂工况下的流量计量误差控制在 0.5%以内，满足大部分工业领域的高精度计量需求。

未来随着物联网与人工智能技术的发展，流量计量将向智能化方向发展，智能流量计可以自动感知工况变化，自动调整补偿模型与滤波参数，实现全生命周期的精度自维护，进一步降低复杂工况下的计量误差，提升计量可靠性，这也是未来复杂工况流量计量的主要发展方向。

参考文献

- [1] 徐科军, 张崇巍. 流量测量技术与仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 124-156.
- [2] 王池, 王自和, 张宝珠. 流量计量基础与应用[M]. 北京: 中国计量出版社, 2013: 217-242.
- [3] 李旭, 谭超. 复杂流态下差压式流量计量误差补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 118-125.
- [4] 李斌, 李胜利. 油气多相流流量计量技术研究进展[J]. 计量学报, 2021, 32(10): 1265-1276.
- [5] 李洪涛, 李刚. 复杂工况下在线流量校准技术的应用研究[J]. 中国测试, 2019, 45(8): 142-146.