

# Study on the Standard Condition Conversion Characteristics of Gas Displacement Flowmeter Based on the Sound Velocity Nozzle Device

Zhou Ye

Shanghai Gas Equipment Measurement and Testing Center Co., Ltd., Minhang district of Shanghai, 201112, China

## Abstract

This study designed and established a testing system based on a standard gas flow measurement device using the sonic nozzle method, aiming to conduct in-depth research on the working condition/standard condition conversion characteristics of gas volumetric flowmeters. By employing an experimental approach of "air medium + parameter simulation," the key parameters of the volumetric correction instrument were adjusted under actual air injection conditions to simulate conversion characteristics of various natural gas types under real-world operating conditions. The experiment investigated the impact of different simulated working pressures and gas compositions on the conversion accuracy of a DN80 Roots flowmeter. Results demonstrated that when the volumetric correction instrument parameters were accurately set, the standard condition volume conversion error could be stably controlled within  $\pm 0.15\%$ . However, when the simulated working pressure increased from 0.2MPa to 0.5MPa, a 0.5% positive deviation in pressure measurement would result in approximately +0.63% systematic error in conversion results. This study validates the feasibility of parameter simulation for flowmeter conversion characteristic research, providing crucial experimental evidence for flowmeter selection, field parameter configuration, and system error analysis.

## Keywords

Supersonic nozzle; Positive displacement flowmeter; Operating condition conversion; Volumetric correction instrument; Parameter simulation; Experimental study

# 基于音速喷嘴装置的气体容积式流量计工况标况转换特性研究

叶舟

上海市燃气设备计量检测中心有限公司, 中国·上海 201112

## 摘要

本文设计并搭建了一套基于音速喷嘴法气体流量标准装置的测试系统,旨在深入研究气体容积式流量计的工况/标况转换特性。通过采用"空气介质+参数模拟"的实验方法,在实际通入空气的条件下,调整体积修正仪的关键参数,模拟不同种类天然气在实际工况下的转换。实验研究了不同模拟工作压力及模拟气体组分对一台DN80罗茨流量计转换精度的影响。结果表明:当体积修正仪参数设置准确时,标况体积转换误差可稳定控制在 $\pm 0.15\%$ 以内;而模拟工作压力从0.2MPa升高至0.5MPa时,若压力测量存在0.5%的正偏差,将导致转换结果产生约+0.63%的系统性误差。本研究验证通过参数模拟进行流量计转换特性研究的可行性,为流量计选型、现场参数设置及系统误差分析提供了重要的实验依据。

## 关键词

音速喷嘴;容积式流量计;工况转换;体积修正仪;参数模拟;实验研究

## 1 引言

气体容积式流量计作为燃气贸易结算的关键仪表,计量准确度将直接影响供需双方的经济利益。此流量计直接测量的是气体在实际工作压力与温度条件下的工况体积,而贸易结算则需按照国家规范将其转换为标准状态下的体积。这

一转换通常由独立的流量计算机(体积修正仪)来完成,其准确度取决于压力(P)、温度(T)测量的准确性和气体压缩因子(Z)的计算是否正确。

目前,针对流量计工况与标况转换特性的研究大多采用实际天然气进行。这种方法不仅成本高、存在安全风险,而且受气源条件限制,难以开展系统性的实验。但是,如果在实验室只使用空气介质进行检定,又无法全面评估流量计算机在不同气体组分、不同压力条件下的实际转换性能。所以,本研究提出一种新的实验方案:在实际通入空气的条件

【作者简介】叶舟(1995—),女,中国上海人,本科,助理工程师,从事计量测试方向的研究。

下,通过精确设置流量计算机的参数,模拟出不同种类天然气的物理特性,从而系统的分析出工况/标况转换过程中各类因素的影响规律。该方法在保证实验安全的同时,还克服了气源限制,为深入探究流量计的转换特性提供了新的技术路径。

## 2 实验原理与方法

### 2.1 工况/标况转换的基本原理

依据气体状态方程,气体的工况体积 $Q_f$ 与标况体积 $Q_n$ 之间的转换关系为:

$$Q_n = Q_f \times \left(\frac{P_f}{P_n}\right) \times \left(\frac{T_n}{T_f}\right) \times \left(\frac{Z_n}{Z_f}\right)$$

其中, $P_f$ 和 $T_f$ 分别表示工况下的绝对压力与热力学温度, $Z_f$ 为工况下气体的压缩因子; $P_n$ 、 $T_n$ 和 $Z_n$ 则对应标准状态下的压力、温度与压缩因子。对于理想气体, $Z_n$ 与 $Z_f$ 均为1;但对于实际气体,尤其在压力较高时, $Z_f$ 的计算尤为关键。

### 2.2 音速喷嘴标准装置的原理

音速喷嘴式气体流量标准装置往往是并联多只音速喷嘴选择试验流量。采用负压法,气体来自室内的常压空气进入前直试验管道,流过被检流量计后再进入滞止容器,经音速喷嘴返回大气。通过测得仪表前后的 $P_0$ 和喷嘴入口处的 $T_0$ 等基本参数,可计算得到被检流量计的示值误差或仪表系数。

$$q_m = \frac{C_d \cdot C^* \cdot A \cdot P_0}{\sqrt{R \cdot T_0}}$$

式中, $C_d$ 为流出系数, $c^*$ 为临界流函数, $A$ 为喉部面积, $P_0$ 和 $T_0$ 分别为上游滞止压力与温度, $R$ 为气体常数。通过测量 $P_0$ 、 $T_0$ 处的压力同时明确气体组分(本次实验使用空气),即可计算出高准确度的标准质量流量。

### 2.3 实验方法

本次实验方法的核心思路如下:

(1) 实验气体介质:标准装置通入空气,确保实验的安全性与气源稳定性。

(2) 模拟参数设置:在流量计体积修正仪中设置实验需要使用的模拟气体物理参数(例如组分、压缩因子等),使其在计算工况与标况转换时,可以按照模拟气体的特性进行处理。

(3) 基准建立:音速喷嘴式气体流量标准装置提供标准的气体体积流量。在实验过程中,通过计算将该值转换为在相同压力、温度条件下模拟气体所对应的标况体积流量理论值,以此来作为对比的基准。

(4) 误差结果分析:将被测流量计体积修正仪中根据模拟参数计算得到的标况体积,与上述的理论基准进行比较,从而评估其转换的准确度。

## 3 实验系统与方案

### 3.1 实验系统的构成

实验系统主要包括以下部分:

(1) 气源系统:真空泵,配有过滤器与稳压阀。

(2) 标准装置:流量范围(0.06~2000) m<sup>3</sup>/h,工作压力(80~103) kPa,工作温度(0~45) °C,管道配置(DN25~DN150),装置扩展不确定度 $U=0.30\%$ ( $k=2$ )

(3) 被测样品:口径为DN80的气体容积式流量计,带有体积修正仪,同时支持AGA8-92DC、SGERG-88等多种压缩因子的计算模型。被测样品的准确度等级为1.0级,输出工况体积脉冲信号。

(4) 系统其他配置:0.05级绝压变送器(测量喷嘴上游压力 $P_0$ 及流量计工况压力 $P_f$ )和精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的铂电阻温度计(测量 $T_0$ 和 $T_f$ )

(5) 数据采集和控制系统:工业计算机,同步采集流量计算机和测量仪表的信号(脉冲信号:测量误差,模拟信号:压力、温度4~20mA),控制喷嘴组合阀门,计算得到气体标准流量。

### 3.2 实验方案设计

实验分为两个部分,都在空气介质下进行

实验一:模拟工作压力的影响

模拟气体:设置为12T标准天然气

参数设置:在体积修正仪中输入上述气体组分,压缩因子模型选择AGA8-92DC,标准状态设为101.325 kPa,20°C。

压力工况:调节系统压力,使流量计处工况绝压 $P_f$ 分别稳定在0.20 MPa、0.35 MPa、0.50 MPa,温度恒定在(20 $\pm$ 0.5)°C。

流量点:在每个压力点下,测试40%、70%、100%三个流量点。

数据采集:在每一点稳定后,记录数据:

a) 标准装置累计的空气标准体积 $V_{n,air,std}$

b) 流量计算机累计的标况体积 $V_{n,sim,dut}$ (按模拟天然气计算)

c) 实际工况压力 $P_f$ 和温度 $T_f$

实验二:模拟气体组分的影响

固定工况: $P_f=0.35\text{MPa}$ (绝压), $T_f=20^\circ\text{C}$

模拟气体对比:(1)纯甲烷(2)12T天然气(3)含高氮天然气

在流量计体积修正仪中分别设置上述三种气体组分,在相同的流量点上进行测试。

### 3.3 数据处理与误差计算

(1) 基准值的计算:将标准装置测得的空气标准体积 $V_{n,air,std}$ ,按照实际测量的 $P_f$ 、 $T_f$ 以及模拟气体的物性参数(采用AGA8-92DC模型独立计算),转换为模拟气体状态下在相同条件下的标况体积理论值 $V_{n,sim,theory}$

$$V_{n,sim,theory} = V_{n,air,std} \times \frac{\rho_{air,n}}{\rho_{sim,n}} \times \frac{Z_{sim,f}}{Z_{air,f}}$$

其中,  $\rho_n$  为标准状态密度,  $Z_f$  为工况压缩因子。

(2) 误差计算: 流量计体积修正的转换相对误差  $E$  为:

$$E = \frac{V_{n,sim,dut} - V_{n,sim,theory}}{V_{n,sim,theory}} \times 100\%$$

## 4 实验结果分析

### 4.1 模拟工作压力对转换精度的影响

在模拟 12T 天然气的参数设置下, 不同压力点的测试结果如表 1 所示 (以 70% 流量点为例)。

表 1: 不同模拟压力下的转换误差  
(模拟气体: 12T 天然气, 70% 流量点)

工况绝压 $P_f$ (MPa)	压力测量偏差	模拟气体 体 $Z_f$	理论标况体积 $V_{n,theory}$ (m <sup>3</sup> )	体积修正 仪示值 $V_{n,dut}$ (m <sup>3</sup> )	转换误差 $E$ (%)
0.20	+0.2%	0.991	68.75	68.73	-0.03
0.35	+0.3%	0.985	115.42	115.39	-0.03
0.50	+0.5%	0.978	162.18	163.20	+0.63

分析:

(1) 在 0.20 MPa 和 0.35 MPa 压力下, 转换误差均在  $\pm 0.03\%$  以内, 表明流量计算机在低压至中压范围内的转换算法准确。

(2) 在 0.50 MPa 压力下, 出现了 +0.63% 的显著正偏差。经排查, 此压力点下压力变送器的测量值存在约 +0.5% 的正向漂移 (与标准压力表比对发现)。这一结果实验性地证明: 在高压下, 压力测量的微小偏差会通过转换公式被显著放大, 对结算结果产生实质性影响。

### 4.2 模拟气体组分对转换结果的影响

在  $P_f=0.35$  MPa,  $T_f=20^\circ$  C 条件下, 三种模拟气体的测试结果如表 2 所示 (100% 流量点)。

表 2: 不同模拟气体组分的转换误差对比  
( $P_f=0.35$ MPa, 100% 流量点)

模拟气体	压缩 因子 $Z_f$	理论标况体积 $V_{n,theory}$ (m <sup>3</sup> )	流量计算机示值 $V_{n,dut}$ (m <sup>3</sup> )	转换误差 $E$ (%)
纯甲烷	0.984	164.88	164.85	-0.02
12T 天然气	0.985	164.92	164.90	-0.01
高氮天然气	0.990	165.10	165.07	-0.02

分析:

(1) 三种不同组分的模拟气体, 在正确的参数设置下, 流量计算机的转换误差均小于  $\pm 0.02\%$ , 表明其压缩因子计算模型 (AGA8-92DC) 对不同组分气体具有良好的适应性。

(2) 通过比较发现, 气体组分变化主要会影响压缩因子  $Z_f$  的值, 进而影响转换系数。在本实验压力下, 从纯甲烷变为高氮天然气,  $Z_f$  从 0.984 增大至 0.990, 变化约为 0.6%, 但对最终标况体积的影响较小 (约 0.13%)。

## 5 结论与工程应用

### 5.1 主要结论

(1) 通过本次的实验方法最终得到验证: 实验中数据表明, 在通过实际空气介质时调整流量计体积修正的参数, 能够有效模拟在不同天然气实际工况下的转换行为。这为在安全、经济的条件下, 系统的研究流量计转换特性提供了新方法。

(2) 压力的测量精度是高压计量的关键: 实验结果证明, 在 0.5 MPa 的压力时, 仅 0.5% 的压力测量偏差, 就有可能导致超过 0.6% 的最终结算误差。这一结果强调了高压贸易计量, 必须采用高精度压力变送器并定期校准。

(3) 流量计体积修正转换算法的准确性通过验证: 在模拟气体参数设置准确的前提下, 使用的流量计体积修正仪在对不同气体的标况体积转换误差控制在  $\pm 0.02\%$  以内, 这一结果满足贸易计量的精度要求。

(4) 气体组分变化对结果的影响相对次要: 在中压下, 气体的组分在合理范围内的变化对最终标况体积的影响较小 ( $< 0.2\%$ ), 但仍需确保流量计算机中组分参数的准确性。

### 5.2 实际工程应用建议

(1) 现场流量计体积修正的验收: 燃气公司可以考虑采用上述实验的方法, 对新采购或维修后的流量计体积修正仪进行功能性验收测试, 以此来确保其在各种模拟工况下的转换准确性。

(2) 计量系统误差的判断: 再结算时, 双方对计量数据产生争议时, 可通过此次实验方法判断问题是否来自于流量计体积修正的参数设置或转换算法。

(3) 技术人员的培训: 本次实验可直观的展示从压力、温度及气体参数对最终结算的影响, 是培训专业技术人员的有效方法。

(4) 标准规范的完善建议: 可以考虑在相关的检定规程或技术规范中, 增加对流量计体积修正的转换功能进行模拟验证的方法, 保证计量设备整体可靠性。

本研究通过较为新颖的实验设计, 实现了在空气介质下对气体容积式流量计工况、标况转换特性的研究, 所得结论可用于在燃气贸易计量的实际工作中, 有助于保障贸易双方的利益及合法权益。

### 参考文献

- [1] 国家市场监督管理总局. JJG 633-2024 气体容积式流量计检定规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [2] 蔡武昌, 孙淮清, 纪纲. 流量测量方法和仪表的选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [3] 王池, 李旭, 王振涛. 音速喷嘴气体流量标准装置及其应用[M]. 北京: 中国计量出版社, 2015.
- [4] 肖军. 天然气流量计算机压缩因子计算方法比较研究[J]. 工业计量, 2019, 29(5): 55-58.