

引文:梁裕如,何鹏,孟祥振,等.基于旋进漩涡与文丘里流量计的湿气组合计量实验[J].油气储运,2024,43(12):1402-1412.

LIANG Yuru, HE Peng, MENG Xiangzhen, et al. Experimental study on wet gas metering by a combination of precession vortex and Venturi[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(12): 1402-1412.

基于旋进漩涡与文丘里流量计的湿气组合计量实验

梁裕如¹ 何鹏¹ 孟祥振¹ 韩建红¹ 张攀² 艾昕宇¹

1. 陕西延长石油(集团)有限责任公司天然气研究院分公司; 2. 陕西延长石油(集团)有限责任公司气田公司

摘要:【目的】延安气田普遍采用旋进漩涡流量计或差压流量计进行井口湿气计量,存在由于单井产气计量误差大、无法掌握单井产液量的难题。【方法】采用旋进漩涡流量计与文丘里流量计串联组合的计量方式,以空气-水为介质开展多相流环道实验,分析不同运行压力及表观气速条件下,旋进漩涡进动频率与文丘里压降随体积含液率的变化规律;同时,基于单相流量测量原理,采用量纲分析法提出影响频率信号与压降信号的无量纲参数,通过增加无量纲参数的幂指数修正项,建立适用的湿气双组合频率-压降计量模型。【结果】随着体积含液率的增大,旋进漩涡进动频率逐渐降低,文丘里流量计节流压降有增大的趋势,呈现“虚低”“虚高”两种不同的特性;当体积含液率大于1%时,“频率-压降”信号失真。现场试验测试数据表明,建立的组合计量模型可用于现场气井井口计量测试,求解后气相体流量的最大误差为5.2%,平均相对误差为2.5%;液相体流量的最大误差为46.8%,平均相对误差为15.0%;体积含液率的最大误差为0.15%,平均绝对误差为0.05%。【结论】在特定体积含液率条件下,旋进漩涡流量计与文丘里流量计组合计量模型测量精度可控,符合延安气田生产气井中天然气体体积含液率的分布范围,可为气井精细化管理提供有效技术支撑。(图10,表3,参20)

关键词: 延安气田; 组合计量; 计量模型; 进动频率; 压降

中图分类号: TE866

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)12-1402-11

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.12.008

Experimental study on wet gas metering by a combination of precession vortex and Venturi

LIANG Yuru¹, HE Peng¹, MENG Xiangzhen¹, HAN Jianhong¹, ZHANG Pan², AI Xinyu¹

1. Natural Gas Research Institute Branch, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd.;

2. Gas Field Company, Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co. Ltd.

Abstract: [Objective] Vortex precession flowmeters or differential pressure flowmeters are prevalently used for metering wet gas flow at wellheads in Yan'an Gas Field. However, single-well gas production metering often involves significant errors, and it is challenging to accurately determine liquid output for individual wells. To tackle these challenges, an experimental study was conducted to investigate metering rules of gas-liquid two-phase flow and a metering model was developed. This study aims to provide valuable reference for gas-liquid two-phase metering practices within Yan'an Gas Field. [Methods] Leveraging the characteristics of “under-reading” in vortex precession flowmeters and “over-reading” in Venturi flowmeters, these two kinds of flowmeters were combined in series. This combined metering approach was used to conduct a multiphase flow loop experiment using an air-water medium. This experiment focused on examining the variations in precession frequency and Venturi pressure drop with different liquid volume fractions (LVF) under varying operating pressures and superficial gas velocities. Furthermore, based on the principle of single-phase flow measurement, dimensionless parameters that affect frequency signals and pressure drop signals were introduced through a dimensional method. A combined frequency-pressure drop model for wet gas metering was rationally established, incorporating exponential correction terms for these dimensionless parameters. [Results] With the increase of LVF, the precession frequency decreased gradually while the pressure drop of the Venturi flowmeter increased, embodying their respective tendencies of “under-reading” and “over-reading”. The “frequency-pressure drop” signals became distorted at an LVF exceeding 1%. Through field experiments, the efficacy of the devised combined metering model was verified for wellhead metering at the on-site gas wells. The resultant gas-phase volumetric flows, attained through a solving process, displayed a

maximum error of 5.2% and an average relative error of 2.5%. Concerning liquid-phase volumetric flows, the maximum error reached 46.8%, with an average relative error of 15.0%. LVF calculations exhibited a maximum error of 0.15% and an average absolute error of 0.05%. **[Conclusion]** The proposed metering model that combines vortex precession flowmeters and Venturi flowmeters demonstrates controllable measurement accuracy when dealing with LVFs below 1%. This range aligns well with the LVF distribution typically observed in the natural gas from the gas-producing wells in the Yan'an Gas Field. The study outcomes offer valuable technical insights to support the meticulous management of gas wells. (10 Figures, 3 Tables, 20 References)

Key words: Yan'an Gas Field, combined metering, metering model, precession frequency, pressure drop

延安气田地处陕北黄土高原, 具有低孔、低渗、低产、低压、低丰度气藏特点, 地面集输系统采用井下节流、井间串接、井口湿气计量的中低压集输工艺。目前气田井口普遍采用传统的旋进漩涡流量计或差压流量计进行湿气计量, 气相计量误差大, 且无法计量单井产液量, 给气田精细化管理带来了巨大挑战^[1]。

目前关于湿气两相计量技术的研究较多, 按照测量原理大致可分为4类: ①将直接测量液相含率与虚高修正相结合的测量技术^[2-4], 液相含率测量手段主要包括微波、射线及示踪技术, 计量精度较高, 但存在放射源, 且设备成本较高; ②将两种不同流量计串联的组合计量方式^[5-9], 充分利用两个流量计的测量特性差异实现气液两相计量; ③取样分离法测量技术^[10-11], 通过取样分配器从主管道中分流出一小部分气液混合物, 在气液分离后测量流体各相的流量, 适用于高产气井的两相计量; ④虚拟计量技术, 主要采用神经网络方法寻找天然气流量与气井不同运行参数之间的关系, 建立天然气流量计算模型^[12-17]。孟宇飞等^[14]设计了一种由旋流器及文丘里喷嘴组成的湿气双参数测量装置, 利用旋流器将湿气强制调整为环状流, 建立节流压差与离心压差相结合的湿气双参数测量模型。王华杰等^[18]通过湿气实验分析漩涡进动的信号特征, 建立气相流量测量精度补偿模型。张春涛等^[19]将节流式流量计与涡街流量计组合集成, 通过计量混合流体平均密度实现气液两相流量测量。徐英等^[20]采用对偶模型, 在旋进漩涡流量计两端并联差压变送器, 结合频率与压降信号实现湿气两相计量。

以上计量方式均不同程度存在计量适用范围窄、计量误差偏大等问题。考虑现场计量数据呈现的旋进漩涡流量计气相测量值偏低及文丘里流量计气相测量值偏高的特点, 将旋进漩涡流量计与文丘里流量计串联组合, 开展室内空气-水多相流环道测试试验, 充分利用文丘里流量计的差压值“虚高”特性与旋进漩涡

流量计的频率值“虚低”特性, 分别建立频率模型与压降模型, 并进行联立求解, 建立气-液两相计量模型, 以期对延安气田气液两相计量提供参考。

1 测量原理

1.1 旋进漩涡流量计

旋进漩涡流量计是一种利用旋进型漩涡原理的流量计, 当流体流入流量计后, 流量计内置的螺旋型导流叶片(即漩涡发生器)迫使流体发生旋转, 在管道中心线附近产生旋流漩涡, 旋流漩涡的中心是涡核。当流体流经收缩段时, 漩涡加速, 流体流速逐渐增大; 当流体流经扩散段后, 漩涡流速逐渐下降, 压力上升。由于压差作用流体形成二次旋转回流, 产生类似陀螺式的旋进漩涡进动, 旋进漩涡进动频率与被测流体流量近似成正比关系, 不受流体物理性质及密度的影响。对于单相流体, 旋进漩涡流量计体积分量的计算公式为:

$$Q_v = 3\ 600\ f_0 / K \quad (1)$$

式中: Q_v 为气体体积流量, m^3/h ; f_0 为单相流条件下的漩涡进动频率, Hz ; K 为仪表系数, $1/\text{m}^3$ 。

以上测量原理仅适用于单相介质流体。对于湿气计量, 一方面由于天然气中含水, 混合物密度增大, 难以形成漩涡涡核, 对应进动频率降低; 另一方面, 当含水量过大时, 流体流动噪声信号逐渐增大, 最终导致主频信号被淹没, 旋进漩涡流量计所测得的气相流量低于真实流量, 即“虚低”现象。

1.2 文丘里流量计

文丘里流量计是一种经典的差压式流量计, 当流体流过文丘里管时, 由于流通面积减小, 节流元件处流速上升, 将在文丘里管前后形成一定的压差, 因此在文丘里流量计的节流元件前后取压, 通过测量压差来进行流体流量测量。对于单相流体, 压差与被测流

体的流量呈正相关关系,且与管道结构、节流元件尺寸及天然气流速相关,被测流体质量流量的计算公式为:

$$Q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \Delta p_0 \rho_G} \quad (2)$$

式中: Q_m 为经过文丘里流量计的流体总质量流量, kg/h; C 为流出因子; β 为节流装置直径比; ε 为膨胀因子; d 为文丘里管喉部直径, mm; ρ_G 为气相密度, kg/m³; Δp_0 为单相流条件下的文丘里流量计节流压降, MPa。

以上测量原理仅适用于单相介质流体。当用文丘里流量计测量湿气流量时,由于天然气中含水,导致文丘里流量计节流元件两端的摩阻压降较单相流体时显著增大,对应的气相流量测量值相比单相流体呈现偏大的趋势,即“虚高”现象。

1.3 气液两相流量测量

将旋进漩涡流量计与文丘里流量计串联组合,建立组合计量结构(图1),用于测量气液混合流体的流量。其中旋进漩涡流量计精度等级为1.0级,节流比0.48,叶片数为6个,叶片升角65°;文丘里流量计精度等级1.0级,节流比0.5,流量计入口管径为50 mm,喉部直径25 mm。在旋进漩涡流量计上安装温度传感器 T_0 与压力传感器 P_0 ,在线采集旋进漩涡流量计的压力脉冲信号,经傅里叶变换后转换成湿气测量条件下的漩涡进动频率 f ,在文丘里流量计上安装差压变送器,用于测量湿气条件下的文丘里流量计节流前后的压降 Δp 。

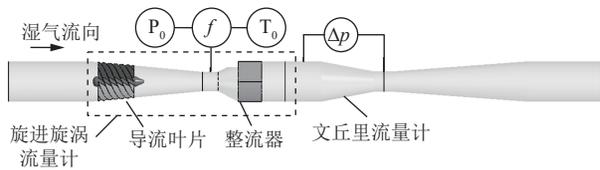


图1 旋进漩涡流量计与文丘里流量计组合计量结构图
Fig. 1 Structure of vortex precession flowmeter and Venturi flowmeter combination

量纲分析法可以在很大程度上简化实际工程问题,特别是流体力学问题。采用量纲分析法,提取频率-压降信号的主要影响参数,包括洛玛参数 X_{LM} 、气相弗鲁德数 Fr_G 、气液密度比 D_R ,均为无量纲数,其中洛玛参数是液相惯性力与气相惯性力之比的平方根;气相弗鲁德数为气体惯性力与液体重力之比;气液密度比为湿气中液体密度与气体密度之比。具体可以表达为:

$$X_{LM} = \frac{F_{L,V}}{1 - F_{L,V}} \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G}} \quad (3)$$

$$Fr_G = \frac{v_{sG}}{\sqrt{gD}} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}} \quad (4)$$

$$D_R = \frac{\rho_L}{\rho_G} \quad (5)$$

式中: $F_{L,V}$ 为体积含液率; v_{sG} 为气相表观流速, m/s; D 为管道直径, mm; g 为重力加速度, 9.8 m/s²; ρ_L 为液相密度, kg/m。

因此频率模型与压降模型的函数关系可以表示为:

$$\omega = f(X_{LM}, Fr_G, D_R) \quad (6)$$

$$\Delta p = f(X_{LM}, Fr_G, D_R) \quad (7)$$

式中: ω 为湿气测量条件下的漩涡进动频率, Hz; Δp 为湿气测量条件下的文丘里压降, MPa。

利用旋进漩涡流量计的“虚低”与文丘里流量计的“虚高”特性,将式(3)~式(7)进行联立求解,即可获得气相体积流量与液相体积流量。

2 实验装置及工况设计

2.1 实验装置与实验设计

为了获取与现场更为接近的数据,搭建了可视化的空气-水多相流环道(图2),开展组合式湿气流量计在多相流环道上的实验测试。

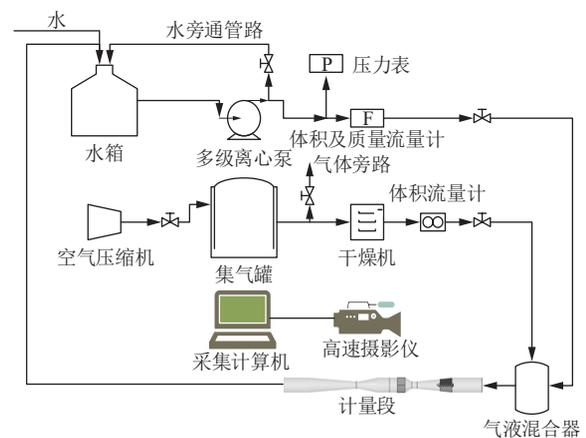


图2 空气-水多相流环道实验装置示意图
Fig. 2 Experimental setup of multiphase flow loop using an air-water medium

多相流起伏环道起始端分为两路,一路为气相,采用空气作为试验介质,空气经空气压缩机增压后经过集气罐、干燥机、体积流量计进入气液混合器,气相计量仪表采用涡轮流量计;另一路为液相,采用水作为试验介质,水经离心泵提压后,经过液相质量流量

计进入气液混合器, 液相计量仪表采用涡轮流量计。气-液两相流经气液混合器充分混合后进入多相流试验环道, 进行多相流计量实验。待实验结束后, 气液混合物进入水箱, 空气排向大气, 水循环利用。

在实验过程中, 通过调节阀门开度控制气相流量与液相流量, 通过压缩机及末端阀门调节试验管路运行压力, 与此同时, 中控详细记录了气相体积流量 Q_G 、液相体积流量 Q_L 以及运行压力 p 、温度 t 等参数的变化情况。

试验段为旋进漩涡流量计与文丘里流量计串联的湿气计量结构。旋进漩涡流量计选用江苏亚龙 YL-LUX-50, 测量精度为 1.5%, 于旋进漩涡流量计管壁上布置压电传感器; 文丘里流量计节流元件两端与差压变送器并联, 差压变送器选用罗斯蒙特 3051TG3A 型号, 量程 0~1 MPa, 电流输入为 4~20 mA, 电压为直流 24 V。实验时分别从旋进漩涡流量计与文丘里流量计上引出压力脉冲信号及压降信号, 采用 NI-9203 采集板进行数据采集, 并传送至主机箱储存, 采样频率 1 kHz, 采样次数为 3 次, 每次采样时间 30 s。

2.2 工况设计

根据延安气田现场实际生产中气田井口产量、气液比等参数范围, 依据相似性原则, 考虑多相流环道试验设备的安全性等, 开展多相流实验工况设计。设置不同运行压力 p 、气相表观流速 v_{sG} 、体积含液率共 150 组实验数据, 其中 100 组数据用于规律分析与模型建立, 另外 50 组数据用于模型验证(表 1)。

表 1 多相流测量实验参数表

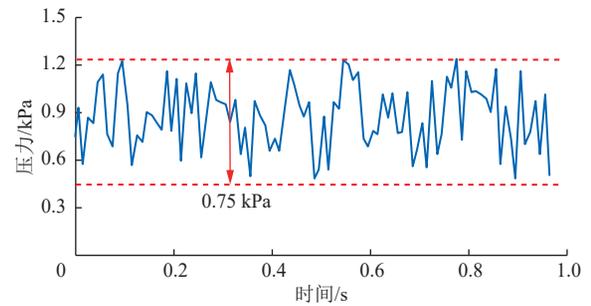
Table 1 Parameters for multiphase flow measurement experiment

p/MPa	$v_{sG}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q_G/(\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1})$	$F_{L,V}$	X_{LM}	Fr_G	D_R
0.4	1	7.2	0~10.0%	0~1.55	0.10	193.80
0.4	4	28.8	0~10.0%	0~1.55	0.41	193.80
0.4	7	50.4	0~10.0%	0~1.55	0.72	193.80
0.4	10	72.0	0~10.0%	0~1.55	1.03	193.80
0.9	1	7.2	0~10.0%	0~1.03	0.15	86.13
0.9	4	28.8	0~10.0%	0~1.03	0.62	86.13
0.9	7	50.4	0~10.0%	0~1.03	1.08	86.13
0.9	10	72.0	0~10.0%	0~1.03	1.55	86.13
1.4	1	7.2	0~5.0%	0~0.39	0.19	55.37
1.4	4	28.8	0~5.0%	0~0.39	0.77	55.37
1.4	7	50.4	0~5.0%	0~0.39	1.36	55.37
1.4	10	72.0	0~5.0%	0~0.39	1.94	55.37

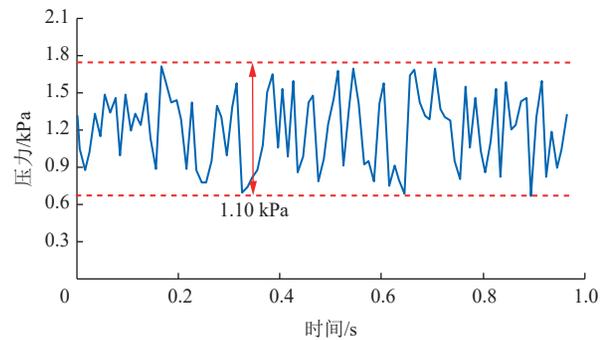
3 实验结果

3.1 频率、压降信号变化

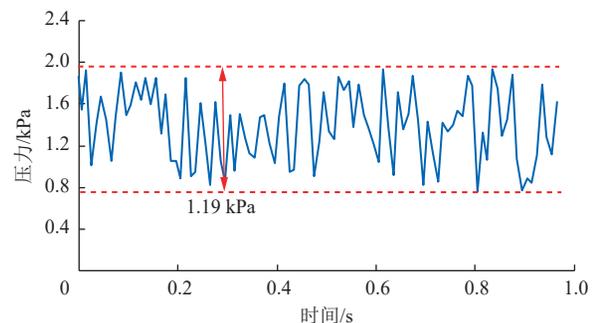
以运行压力 0.4 MPa、气相表观流速 7 m/s 为例, 体积含液率分别为 0.1%、0.5%、0.8%、1.0% 时, 绘制旋进漩涡流量计压力波动曲线(图 3)。可见, 在一定



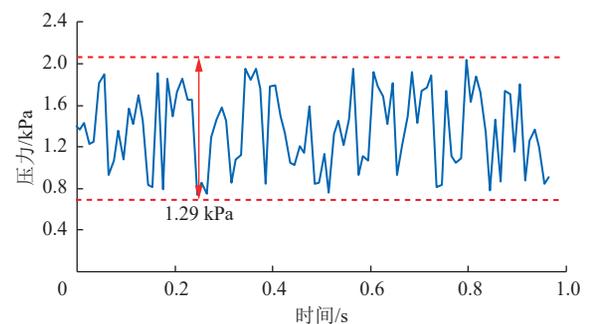
(a) 体积含液率 0.1%



(b) 体积含液率 0.5%



(c) 体积含液率 0.8%



(d) 体积含液率 1.0%

图 3 不同体积含液率下旋进漩涡流量计压力波动曲线
Fig. 3 Pressure fluctuation curves of vortex precession flowmeter at different LVFs

工况条件下,旋进漩涡流量计压力探头处具有明显的周期脉动规律,且不同工况下的脉动值与幅度均有明显差异。在相同运行工况下,随着体积含液率的增加,压力脉动均值逐渐增大,从体积含液率 0.1% 时的 0.88 kPa 增至体积含液率 1.0% 时的 1.39 kPa; 同时压力脉动幅度逐渐提高,从体积含液率 0.1% 时的 0.75 kPa 增至体积含液率 1.0% 时的 1.29 kPa。说明随着液相含量的逐渐增加,压力探头处的气液混合物压力逐渐上升且波动加剧。

由于压力脉动信号为随机信号,为了掌握旋进漩涡流量计频域测量规律,需要将采集到的压力时程信号转化为频率信号。首先对采集到的压力时程信号进行零均值处理,有效地去掉“零点漂移”,使波形归零;

再根据 Shannon 采样定理进行带通滤波,对经过零均值处理与带通滤波的时程信号施加 Hanning 窗,开展自相关函数的快速傅里叶变换,通过压力功率谱密度分布图表示压力信号的平均功率随频率的变化规律。

绘制运行压力 0.4 MPa、气相表观流速为 7 m/s 条件下,不同体积含液率条件下的旋进漩涡流量计的压力功率谱密度分布图(图 4)。可见,在相同运行工况下,随着体积含液率增加,转换后压力信号主频值呈现下降趋势,主频值由体积含液率 0.1% 时的 213 Hz 降至 1.0% 时的 194 Hz,表明体积含液率的变化会影响旋进漩涡进动涡核的振荡频率,随着体积含液率的增加,进动涡核主频值逐渐下降,从而造成旋进漩涡流量计所测得的气相流量低于真实流量的“虚低”现象。

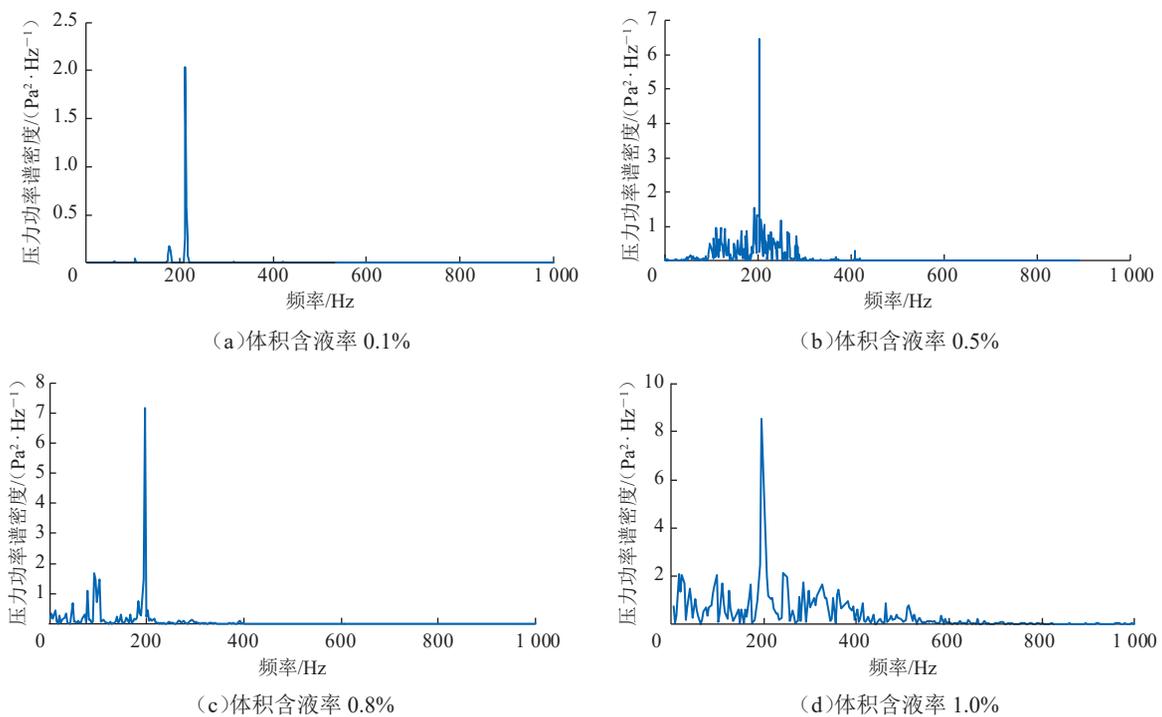


图 4 不同体积含液率下旋进漩涡流量计压力功率谱密度分布图
Fig. 4 Distributions of pressure power spectral density for vortex precession flowmeter at different LVFs

设置运行压力 0.4 MPa、气相表观流速为 7 m/s, 分别于体积含液率为 0.1%、0.5%、0.8%、1.0% 时, 测量并建立文丘里流量计压降值的变化曲线(图 5)。可见, 文丘里流量计压降变化曲线具有明显的周期脉动规律, 且波动值保持在 0.2 kPa 以内。在相同运行工况条件下, 随着体积含液率的增加, 文丘里流量计压降平均值与压降波动幅度都呈现上升的趋势, 压降平均值从体积含液率 0.1% 时 0.47 kPa 上升至 1.0% 时的 1.38 kPa, 压降波动幅度从体积含液率 0.1% 时 0.07 kPa

上升至体积含液率 1.0% 时的 0.19 kPa。进一步验证了体积含液率升高将导致文丘里流量计压降值增大, 进而导致气相体积流量测量数据偏高, 形成文丘里流量计的“虚高”特性。

3.2 频率、压降影响因素

针对不同运行压力及气相表观流速, 试验并测量得到了不同体积含液率条件下旋进漩涡流量计进动频率的变化规律(图 6)。可见, 在相同运行压力及气相表观流速条件下, 旋进漩涡流量计的进动频

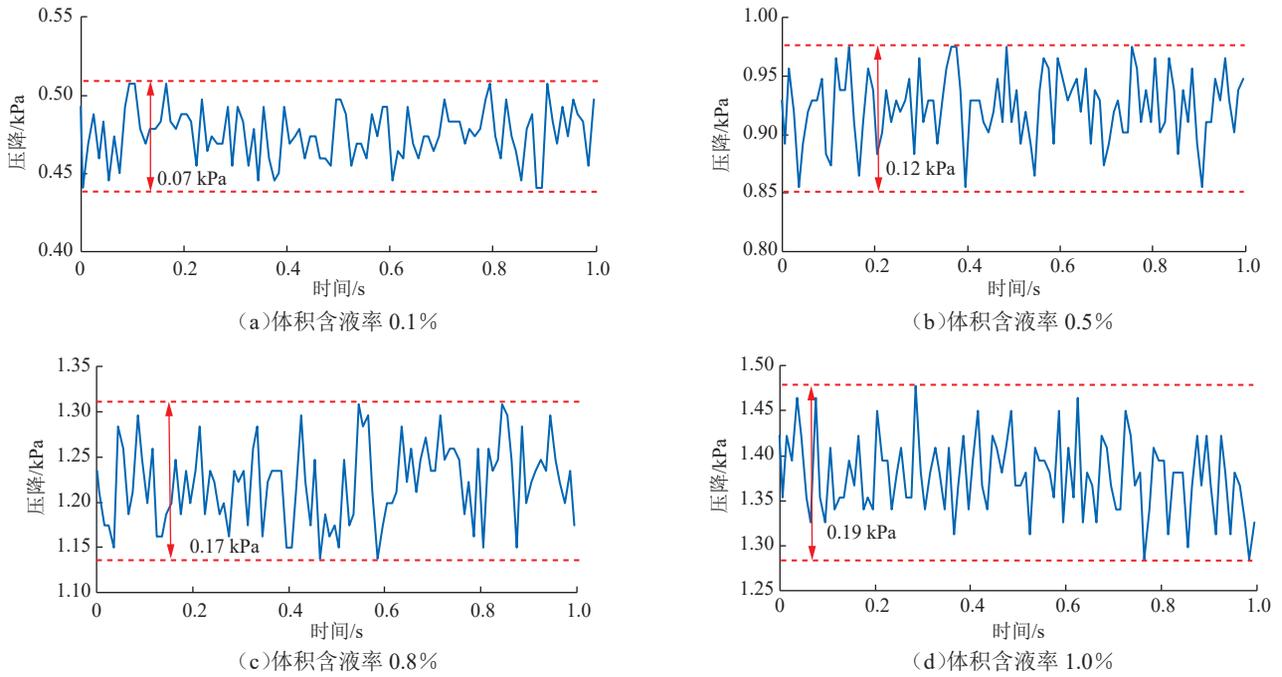


图 5 不同体积含液率下文丘里流量计压降变化曲线
Fig. 5 Pressure drop variation curves of Venturi flowmeter at different LVFs

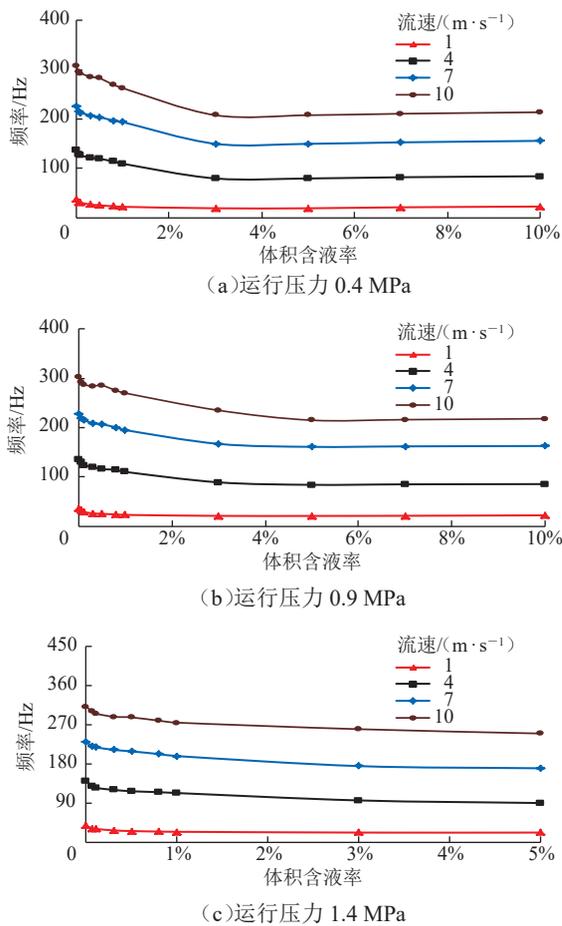


图 6 不同运行压力及气相表观流速条件下旋进漩涡流量计
进动频率随体积含液率的变化曲线
Fig. 6 Variation curves of precession frequency with LVFs of
vortex precession flowmeter under different operating
pressures and gas-phase superficial velocities

率随体积含液率的增长逐渐降低, 进动频率变化梯度逐渐减小。以运行压力 0.4 MPa、气相表观流速 10 m/s 为例, 当体积含液率处于 0~1% 范围内时, 进动频率下降趋势较明显, 单位体积含液率的进动频率变化梯度为 45.5 Hz; 当体积含液率处于 1%~5% 范围内时, 进动频率下降趋势变缓, 单位体积含液率的进动频率变化梯度为 13.8 Hz; 当体积含液率大于 5% 时, 由于体积含液率过高导致旋进漩涡进动信号被破坏, 进动频率曲线出现轻微上升。

在相同运行压力及体积含液率条件下, 气相表观流速越高, 旋进漩涡流量计进动频率越高, 对应的“虚低”特性越明显。以运行压力 0.4 MPa 为例, 随着体积含液率的提高, 气相表观流速 10 m/s 所对应的进动频率曲线下落幅度最大, 可见在含液条件下气相表观流速对进动频率影响较为明显。

由运行压力变化情况(图 7)可知, 在相同运行压力及气相表观流速条件下, 体积含液率越高, 文丘里流量计的节流压降越大。以运行压力 0.4 MPa 为例, 气相表观流速 1 m/s 时, 单位体积含液率对应的压降梯度为 0.03 kPa; 当气相表观流速 7 m/s 时, 单位体积含液率对应的压降梯度为 1.3 kPa; 当气相表观流速 10 m/s 时, 单位体积含液率对应的压降梯度为 2.5 kPa。

在相同运行压力及体积含液率条件下, 气相表观

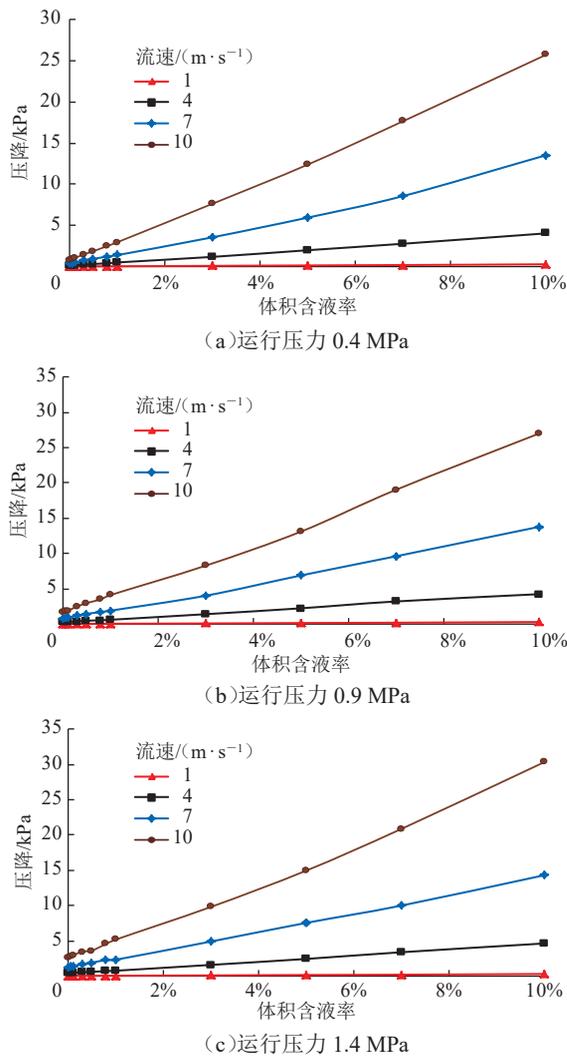


图7 不同运行压力及气相表观流速条件下文丘里流量计节流压降随体积含液率的变化曲线
 Fig. 7 Variation curves of throttling pressure drop with LVFs of Venturi flowmeter under different operating pressures and gas-phase superficial flow rates

流速越大,对应的文丘里流量计的节流压降越高,测量的“虚高”特性越明显。以运行压力 0.4 MPa 为例,随着体积含液率的提高,气相表观流速 10 m/s 时对应的压降曲线上升幅度最大。说明在含液条件下气相表观流速对文丘里流量计的节流压降影响明显。

以气相表观流速 7 m/s 为例,测量不同运行压力条件下旋进漩涡流量计的进动频率、文丘里流量计的节流压降随体积含液率的变化规律(图 8)。可见,当体积含液率为 0~1% 时,随着运行压力的变化,漩涡进动频率值随体积含液率的变化规律基本一致,说明在低含液条件下频率值与运行压力关系不大。当体积含液率大于 1% 时,不同运行压力条件下漩涡进动频率变化明显,这是由于在体积含液率较高时漩涡信号出现失真。从图 8b 可见,在相同体积含液率的条件下,随着

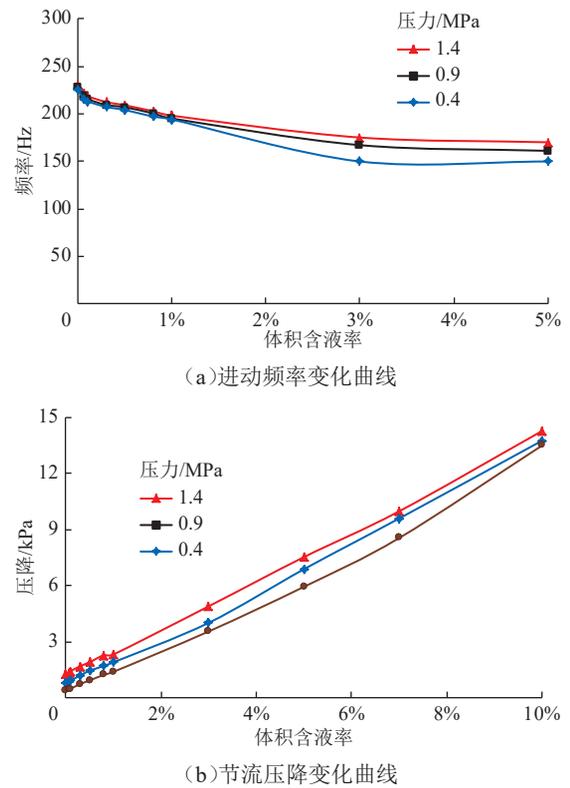


图 8 不同运行压力下旋进漩涡流量计进动频率与文丘里流量计节流压降随体积含液率的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of precession frequency and throttling pressure drop with LVFs under different operating pressures
 运行压力的上升,文丘里流量计的节流压降呈规律上升趋势,单位运行压力对应的压降梯度为 0.98 kPa。可见,含液条件下,运行压力对旋进漩涡流量计进动频率与文丘里流量计节流压降的影响较为明显。

综上,当体积含液率在 1% 范围内时,漩涡进动频率与文丘里流量计节流压降出现有规律的下降及上升趋势,应选择体积含液率为 0~1% 作为旋进漩涡流量计-文丘里流量计组合计量的有效工作范围。延安气田为“五低”气田,生产气井中天然气的体积含液率基本分布在 0~0.5% 范围内,该范围处于旋进漩涡流量计-文丘里流量计组合计量的有效计量范围内,计量精度可控。

3.3 频率模型与压降模型

分析实验数据结果,可见运行压力、气相表观流速以及体积含液率均对旋进漩涡流量计的频率及文丘里流量计的压降具有一定的影响。在一定的运行工况条件下,含液气相对组合计量频率及压降值影响较大,随着体积含液率的上升,旋进漩涡进动频率下降,旋进漩涡流量计的体积流量测量值偏低,呈现“虚低”现象;文丘里节流压降值上升,文丘里流量计的体积流量测量值偏高,呈现“虚高”现象。运行压力与气相表

观流速的变化亦对“虚低”“虚高”特性影响明显。以上研究仅定性分析了“虚低”“虚高”特性变化规律,仍无法定量计算多相流体中实际气相体积流量与液相体积流量。

为了准确计量多相流中气相流量与液相流量的数值,在单相流计量机理的基础上,通过引入修正项建立频率模型与压降模型,并将两个模型联立求解,以达到气相流量与液相流量计量的目的。

在单相流条件下,旋进漩涡流量计测量的气体体积流量 Q_V 与进动频率 ω_0 成正比,且气体体积流量 Q_V 与气相表观流速 v_{sG} 成正比,因此旋进漩涡流量计测得的进动频率 ω_0 与气相表观流速 v_{sG} 成正比;文丘里流量计节流压降 Δp_0 与气相密度 ρ_G 成正比,且与气相表观流速 v_{sG} 的平方成正比:

$$\omega_0 = a_1 v_{sG} \quad (8)$$

$$\Delta p_0 = a_2 \rho_G v_{sG}^2 \quad (9)$$

式中: a_1 为频率系数, $1/m$; a_2 为压降因子。

依据量纲分析结果,将影响频率信号与压降信号的气相弗鲁德数 Fr_G 、洛玛参数 X_{LM} 及气液密度比 D_R 引入频率-压降计算模型中,在原单相测量原理的基础上,增加幂指数无量纲修正项 n_1 和 n_2 ,建立湿气测量条件下的频率-压降计算模型:

$$\omega = n_1 \omega_0 \quad (10)$$

$$\Delta p = n_2 \Delta p_0 \quad (11)$$

$$n_1 = (1 + Fr_G^{b_1} X_{LM} D_R^{c_1})^{d_1} \quad (12)$$

$$n_2 = (1 + Fr_G^{b_2} X_{LM} D_R^{c_2})^{d_2} \quad (13)$$

式中: n_1 为频率模型幂指数无量纲修正项; n_2 为压降模型幂指数无量纲修正项; b_1 、 c_1 、 d_1 、 b_2 、 c_2 、 d_2 均为无量纲因子。

测试不同运行压力、气相表观流速及体积含液率条件下旋进漩涡流量计的进动频率与文丘里流量计的节流压降,并将测试数据点代入式(10)~式(13),采用准牛顿法及通用全局优化法进行多元非线性拟合(表2)。在频率模型、压降模型中通过非线性拟合所得相关系数分别为 0.996 8、0.998 7。

采用 Matlab 软件编写程序,对频率计算模型与压降计算模型进行联立迭代求解,并代入室内空气-水多相流环道试验的 50 组测试数据,求解气相体积流量 Q_G 、液相体积流量 Q_L 。计算结果表明,气相体积流量

表 2 频率模型与压降模型的参数拟合结果表
Table 2 Parameter fitting results of frequency model and pressure drop model

$a_1/(m^{-1})$	b_1	c_1	d_1
30.98	0.54	0.62	-0.12
a_2	b_2	c_2	d_2
1.70	0.15	0.51	1.08

Q_G 的相对误差最大值为 3.41%,液相体积流量 Q_L 的相对误差最大值为 19.28%,均在计量效果较好的情况范围内。因此,所建立的频率与压降计算模型可以较准确地预测气井井口产气量与产液量。

3.4 模型评估

室内实验所使用的介质为空气-水的气液混合物,而气田现场输送的是带有一定液量的天然气。为了验证所建立频率-压降计算模型在现场气井湿气计量的适用性,在延安气田某气区开展现场计量测试试验(图9)。井口含液的天然气首先经过组合式流量计计量,然后通过撬装式气液分离计量装置进行气液分离计量,其中气相采用旋进漩涡流量计计量,液相采用浮子式液位计计量,气液分离计量后经采气管道混输至集气站。将组合式流量计与井口撬装式气液分离计量装置串联安装,其中井口撬装式气液分离计量装置作为标准装置,组合式流量计作为测试装置,通过两种装置的测量数据,确定组合式流量计的测试精度。

将室内多相流环道的验证数据与现场实流试验测试数据均代入已建立的频率-压降计算模型,求解出气井井口的气相体积流量 Q_G 、液相体积流量 Q_L 以及体积含液率。将气相体积流量 Q_G 、液相体积流量 Q_L 及体积含液率的求解值与撬装式气液分离计量装置实流测试的气相体积流量、液相体积流量以及体积含液率进行对比分析,计算 Q_G 、 Q_L 的求解值与实测值之间的相对误差,以及体积含液率的求解值与实测值的绝对误差(图10)。计算得到气相体积流量 Q_G 、液相体积流量 Q_L 、体积含液率的相对误差或绝对误差最大值、平均误差、均方根误差(表3)。

可见,气相体积流量 Q_G 的相对误差处于 $\pm 5.2\%$ 以内,液相体积流量 Q_L 的相对误差处于 $\pm 47\%$ 以内,其中 95.2% 的气相体积流量 Q_G 相对误差值处于 $\pm 5\%$ 以内(图10a 红色虚线内),90.5% 的液相体积流量 Q_L 的相对误差值处于 $\pm 20\%$ 以内(图10b 红色虚线内),体积含液率的绝对误差处于 $\pm 0.16\%$ 以内,

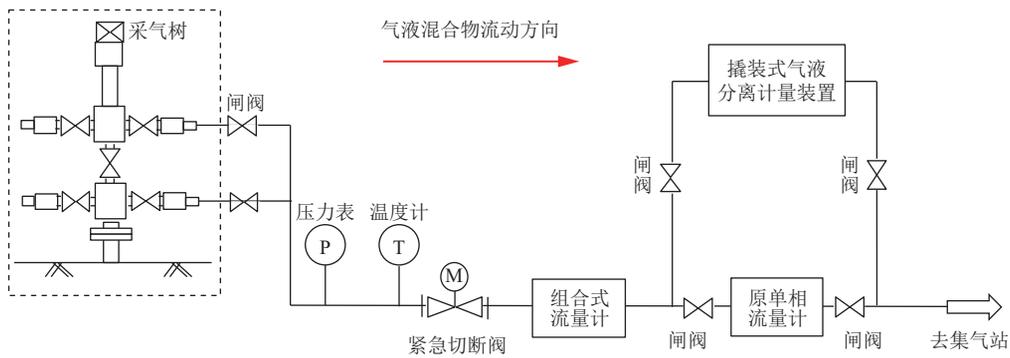
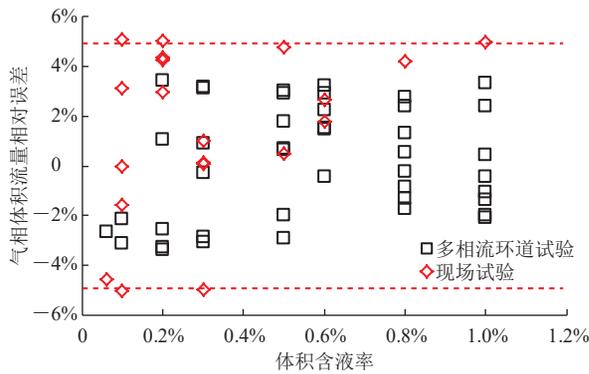
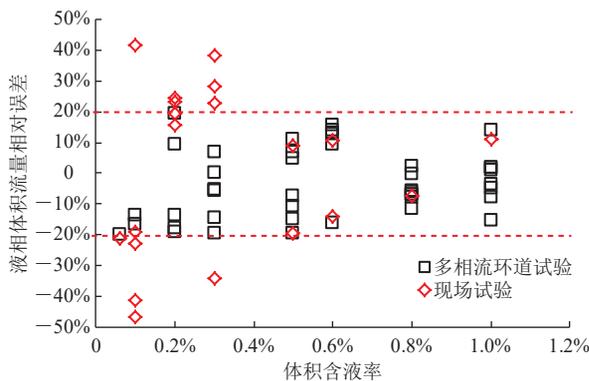


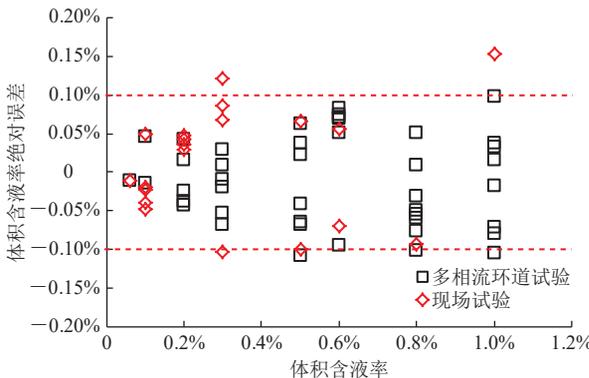
图9 现场气井井口实流试验工艺流程图
Fig. 9 Process flow chart of real flow experiment at the wellhead of on-site gas wells



(a) 气相体积流量相对误差



(b) 液相体积流量相对误差



(c) 体积含液率绝对误差

图10 典型工况下计算所得体积流量与体积含液率误差统计图

Fig. 10 Errors in calculated volumetric flows and LVFs under typical conditions

表3 流量误差最大值、平均误差、均方根误差数据表
Table 3 Datasheet of maximum, average and root-mean-square errors of the flow

参数	误差		
	最大值	平均值	均方根
气相体积流量	5.115%	2.475%	1.566%
液相体积流量	46.791%	15.005%	10.812%
体积含液率	0.152%	0.054%	0.031%

且 88.8% 的绝对误差值处于 $\pm 0.1\%$ 以内(图 10c 红色虚线内)。

由图 10b 可知, 液相体积流量 Q_L 的相对误差基本处于 $\pm 20\%$, 再由表 3 可知相对误差最大值为 46.791%。其原因主要是液相流量较小, 加之流量计本身存在计量误差, 导致液相体积流量的相对误差被放大, 影响了组合计量模型的拟合精度。各工况点的体积含液率的平均误差值为 0.054%, 体积含液率的绝对误差较低。

通过对比组合式流量计的气田现场测试数据与室内实验数据可知, 气田现场的大部分测试数据能够准确反映气井的产气量与产液量, 但天然气-水气液两相与室内实验介质在物性参数上存在较大的差异, 同时现场气井生产过程中存在段塞流等特殊工况情况, 会导致个别测试数据误差偏大。

4 结论

1) 将旋进漩涡流量计与文丘里流量计串联组合, 在多相流环道实验装置上测试了不同运行压力、气相表观流速以及体积含液率条件下旋进漩涡流量计的漩涡进动频率与文丘里流量计的节流压降数据。随着体积含液率的增大, 旋进漩涡进动频率逐渐降低, 文丘

里节流压降则呈现增大的趋势, 即“虚低”“虚高”两种不同的特性; 当体积含液率大于 1% 时, “频率-压降”信号出现失真现象。

2) 采用量纲分析法研究影响“频率-压降”信号的主要参数, 在单相测量原理的基础上增加幂指数无量纲修正项, 建立基于气相弗鲁德数 Fr_G 、洛玛参数 X_{LM} 及气液密度比 D_R 的“频率-压降”计算模型, 对气相体积流量与液相体积流量进行联立求解。从室内实验与现场试验结果来看, 建立的“频率-压降”计算模型相对误差可控, 适用于延安低渗致密气田的典型气井生产工况。

3) 因介质差异以及现场气井生产过程中极易出现的段塞流等复杂工况影响, 现场测试个别数据误差偏大, 后续建议增加现场实流试验, 对已建立的“频率-压降”模型进行进一步修正, 从而提高计量模型的适用性。

参考文献:

- [1] 张强, 宋彬, 刘丁发. 湿气流量计现场使用技术难点分析[J]. 石油与天然气化工, 2018, 47(4): 83-89. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2018.04.016.
ZHANG Q, SONG B, LIU D F. Technical difficulty analysis of field application of wet gas flow meters in the gas[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2018, 47(4): 83-89.
- [2] 闫嘉钰, 洪毅, 潘艳芝, 牛棚满. 基于文丘里管和射线技术的高压湿气虚高修正[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(8): 163-167. DOI: 10.7652/xjtub202008021.
YAN J Y, HONG Y, PAN Y Z, NIU P M. Overreading correction of high pressure wet gas flowrate measurement based on Venturi meter and gamma ray technology[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(8): 163-167.
- [3] 郑永建, 王镇岗, 潘艳芝, 赵月前. 基于文丘里管和射线技术的低压湿气测量方法[J]. 天然气工业, 2019, 39(9): 117-122. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.09.015.
ZHENG Y J, WANG Z G, PAN Y Z, ZHAO Y Q. A low-pressure wet gas measurement method based on Venturi flowmeters and gamma ray technology[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(9): 117-122.
- [4] YUAN C, XU Y, ZHANG T, WANG J J, WANG H X, DING Z X. Experimental investigation of the phase fraction of wet gas based on convective heat transfer[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 102-110. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.086.
- [5] 曾萍, 张春涛, 于志刚, 李德伦, 鲁金孝. 孔板与涡街流量计组合测量气液两相流实验[J]. 油气储运, 2019, 38(12): 1408-1413. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.12.014.
ZENG P, ZHANG C T, YU Z G, LI D L, LU J X. Experiment on the combination of orifice flowmeter and vortex flowmeter to measure gas-liquid two-phase flow[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(12): 1408-1413.
- [6] CHEN D S, CUI B L, ZHU Z C. Numerical simulations for swirlmeter on flow fields and metrological performance[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2018, 40(4): 1072-1081. DOI: 10.1177/0142331216673424.
- [7] CHEN D S, CUI B L, ZHU Z C. Internal flow characteristics and aft-cone angle on performance of swirlmeter[J]. MAPAN, 2016, 31(2): 107-113. DOI: 10.1007/s12647-015-0162-0.
- [8] WU H T, XU Y, WANG J H, YANG Y G, LI T, ZHANG T, et al. Experimental study on controllable pseudo-slug flow characteristics in horizontal pipe[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 83: 103546. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103546.
- [9] 何鹏, 韩建红, 艾昕宇, 梁裕如, 由洋, 卢雄, 等. 旋进漩涡与 V 锥组合计量气液两相流实验研究[J]. 石油与天然气化工, 2024, 53(3): 113-122. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2024.03.018.
HE P, HAN J H, AI X Y, LIANG Y R, YOU Y, LU X, et al. Experimental study on the measurement of gas-liquid two-phase flow by the combination of precession vortex and V-cone[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2024, 53(3): 113-122.
- [10] 梁法春, 陈婧, 陈俊文, 何振楠, 孟佳. 插板式变比例均匀取样器及气液两相流量计量[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 167-174. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2021.01.020.
LIANG F C, CHEN J, CHEN J W, HE Z N, MENG J. Equal sampling at various extraction ratios with plug type sampler and its application in gas-liquid two-phase flow rate metering[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2021, 45(1): 167-174.
- [11] 李金霞, 丁红兵, 孙宏军, 王超. 基于三轴加速度探头的涡街湿相流量测量[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(7): 17-27. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2210605.
LI J X, DING H B, SUN H J, WANG C. Gas and liquid flow measurement by vortex metering in wet gas based on three-axis acceleration probe[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(7): 17-27.
- [12] 唐圣来, 闫正和, 杨鹏, 秦峰, 罗睿乔, 沐峻丞, 等. 基于混合模型的井虚拟计量方法与应用[J]. 油气储运, 2023, 42(5):

- 592–600. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.05.014](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.05.014).
- TANG S L, YAN Z H, YANG P, QIN F, LUO R Q, MU J C, et al. Well virtual metering method based on hybrid model and its application[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(5): 592–600.
- [13] 门嘉铖, 樊玉光, 高琳, 林红先, 张科. EMD-Attention-GRU 天然气管网流量组合预测模型[J]. *油气储运*, 2023, 42(10): 1193–1200. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.013](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.013).
- MEN J C, FAN Y G, GAO L, LIN H X, ZHANG K. Combined flow prediction model for natural gas pipeline network based on EMD-attention-GRU[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(10): 1193–1200.
- [14] 孟宇飞, 张兴凯, 廖锐全, 王栋. 应用强制环状流的湿气双参数测量方法[J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(10): 28–35, 44. DOI: [10.7652/xjtub202010004](https://doi.org/10.7652/xjtub202010004).
- MENG Y F, ZHANG X K, LIAO R Q, WANG D. A dual-parameter measuring method of wet gas applying forced annular flow[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(10): 28–35, 44.
- [15] 宋尚飞, 洪炳沅, 史博会, 吴海浩, 康琦, 王智, 等. 基于人工神经网络的天然气井产量计算方法研究[J]. *石油科学通报*, 2017, 2(3): 413–421. DOI: [10.3969/j.issn.2096-1693.2017.03.038](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-1693.2017.03.038).
- SONG S F, HONG B Y, SHI B H, WU H H, KANG Q, WANG Z, et al. Research into calculation of natural gas well production based on an artificial neural network[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2017, 2(3): 413–421.
- [16] HONG B Y, LIU S N, LI X P, FAN D, JI S P, CHEN S H, et al. A liquid loading prediction method of gas pipeline based on machine learning[J]. *Petroleum Science*, 2022, 19(6): 3004–3015. DOI: [10.1016/j.petsci.2022.05.002](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2022.05.002).
- [17] HASHEMIZADEH A, MAAREF A, SHATERI M, LARESTANI A, HEMMATI-SARAPARDEHA. Experimental measurement and modeling of water-based drilling mud density using adaptive boosting decision tree, support vector machine, and K-nearest neighbors: a case study from the South Pars gas field[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 207: 109132. DOI: [10.1016/j.petrol.2021.109132](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109132).
- [18] 王华杰, 徐英, 张涛, 杨仓海. 湿气计量中旋进旋涡流量计信号特征与精度补偿[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(11): 1594–1598. DOI: [10.3969/j.issn.1004-1699.2020.11.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1699.2020.11.010).
- WANG H J, XU Y, ZHANG T, YANG C H. Signal characteristics and accuracy compensation of swirlmeter in wet gas measurement [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(11): 1594–1598.
- [19] 张春涛, 梁凌云, 鄒喜飞, 张沂, 曾萍. 节流式与涡街式流量计组合测量气田湿气的方法[J]. *油气储运*, 2021, 40(4): 456–461. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2021.04.015](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2021.04.015).
- ZHANG C T, LIANG L Y, XI X F, ZHANG Y, ZENG P. Method for measurement of wet gas in gas field by combining throttle flowmeter and vortex flowmeter[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(4): 456–461.
- [20] 徐英, 王森菱, 张涛, 刘焯, 巴玺立. 基于对偶模型的超低含液率湿气双参数测量方法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2022, 55(7): 665–673. DOI: [10.11784/tdxbz202108033](https://doi.org/10.11784/tdxbz202108033).
- XU Y, WANG S L, ZHANG T, LIU Y, BA X L. Dual-parameter measurement method for ultra-low liquid volume fraction wet gas based on dual-model[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2022, 55(7): 665–673.

(编辑: 祁梦瑶)

基金项目:陕西省重点研发计划——工业领域“致密气藏产水气井产量优化技术研究”, 2021GY167; 陕西延长石油(集团)有限责任公司科研项目“延安气田上古气藏湿气输送关键技术研究”, ycsy2021kyB10.

作者简介:梁裕如, 女, 1984年生, 教授级高工, 2009年硕士毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业, 现主要从事油气田地面集输研究工作。地址: 陕西省西安市高新区唐延路61号延长石油科研中心, 710075。电话: 18729976459。Email: 190187691@qq.com

通信作者:何鹏, 男, 1988年生, 高级工程师, 2014年硕士毕业于西安石油大学油气储运工程专业, 现主要从事油气田地面集输研究工作。地址: 陕西省西安市高新区唐延路61号延长石油科研中心, 710075。电话: 18092649150。Email: hp18092649150@163.com

• Received: 2024-01-26

• Revised: 2024-03-06

• Online: 2024-05-07

