

应用强制环状流的湿气双参数测量方法

孟宇飞^{1,2}, 张兴凯^{1,2}, 廖锐全^{1,2}, 王栋³

(1. 长江大学石油工程学院, 430100, 武汉; 2. 长江大学中国石油天然气集团公司气举试验基地多相流实验室, 430100, 武汉; 3. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对湿气中液相含量测量困难以及湿气流型对测量精度影响较大的问题, 首先设计了一种由旋流器和文丘里管喷嘴组成的湿气双参数测量装置。该装置利用旋流器将湿气调整成强制环状流, 引入了用强制环状流状态下文丘里管喷嘴节流压差与离心压差之比表示的无量纲数 M , 分别确定了湿气虚高和液气质量流量比与 M 和气相弗劳德数 Fr_g 之间的关系, 进而建立了湿气双参数测量模型。通过数值模拟对测量装置内的流场特性进行了分析, 并搭建室内实验平台对建立的湿气测量模型进行了验证。实验结果表明: 在气相弗劳德数为 0.7~1.5 以及 Lockhart-Martinelli 数为 0~0.2 的范围内, 湿气的液相流量测量误差在 $\pm 3\%$ 以内, 液相测量误差在 $\pm 10\%$ 以内。该测量方法将为工业生产中湿气的实时测量提供一种新的思路, 具有一定的工程意义。

关键词: 湿气测量; 文丘里管; 强制环状流; 径向压差; 双参数测量

中图分类号: TH814 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202010004 **文章编号:** 0253-987X(2020)10-0028-09



OSID 码

A Dual-Parameter Measuring Method of Wet Gas Applying Forced Annular Flow

MENG Yufei^{1,2}, ZHANG Xing kai^{1,2}, LIAO Ruiquan^{1,2}, WANG Dong³

(1. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
2. Laboratory of Multiphase Pipe Flow of Gas Lift Innovation Center of CNPC, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
3. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A dual-parameter measuring device of wet gas is designed to solve the difficulty in measuring liquid content in wet gas and the influence of the flow pattern on wet gas measurement accuracy, and the device consists of a swirler and a Venturi nozzle. The device uses a swirler to reform the wet gas flow into a forced annular flow. Lockhart-Martinelli parameter expressed by the ratio of the Venturi throttle pressure difference to the centrifugal pressure difference under the condition of forced annular flow is constructed. The relationships of the over-reading of wet gas flow-rate and the liquid-gas flow ratio with the M parameter and the gas phase Froude number Fr_g are determined respectively to establish the two-parameter measurement model of wet gas. The flow field characteristics in the measuring device are analyzed through numerical simulation, and an indoor experimental platform is established to verify the proposed model. Results show that when Froude number is in the range of 0.7-1.5 and the Lockhart-Martinelli parameter is in the range of 0-0.2, the measurement error of gas phase is within $\pm 3\%$ and of liquid phase is

within $\pm 10\%$. This measuring method will provide a new idea for real-time measurement of wet gas in industrial production and has certain engineering significance.

Keywords: wet gas measurement; Venturi meter; forced annular flow; radial pressure difference; dual-parameter measurement

天然气从地下开采到地面时,随着温度和压力的下降,会携带一部分液体变为湿天然气^[1]。根据 GB/Z 35588—2017^[2],湿气被定义为“气相体积比大于 95% 的气液两相流”,可见,湿气属于多相流范畴,是一种气相体积分数较高的多相流形态。由于湿气中液相的体积分数较低,且分布随机,加之气液之间存在速度滑移,因此气液含量的测量变得异常复杂。随着天然气工业的不断发展,对湿气测量精度的要求也越来越高。

差压式测量是目前应用较广的湿气流量测量方法。湿气中液相的存在,会使测量的压差高于等量单相气体流过节流件的值,产生“虚高”现象。传统差压式湿气流量计一般是通过流经节流元件的节流压差,结合由 Lockhart-Martinelli 参数 X_{L-M} 、气相弗劳德数 Fr_g 、液气密度比等建立的虚高模型进行流量的测量。应用比较广泛的虚高模型有 Murdock 模型^[3]、Chisholm 模型^[4]、Lin 模型^[5]、De Leeuw 模型^[6]以及 Steven 模型^[7]等。由于以往的研究多是基于不同的节流装置对这些经典模型进行修正^[8-11],因此几乎没有一种模型参数可以适合广泛的湿气流量计及其使用条件。传统的虚高模型中, X_{L-M} 在湿气在线不分分离测量中不易获取,为了摆脱对 X_{L-M} 的依赖,国内外学者进行了大量的研究并提出湿气在线测量的新方法。2009 年,段玉晗通过仿真与实验,提出了内锥与文丘里管相结合的比值法虚高预测模型^[12];2012 年,张强等提出了文丘里管收缩段和扩张段差压比为基础的虚高模型,实现了较高精度的气液分相计量^[13];2013 年,贺登辉等提出了 V 锥流量计为基础的双差压湿气测量方法^[14];同年,Xu 等提出了长喉径文丘里管与 V 锥流量计相结合的三差压流量测量方法^[15];2016 年,He 等针对 V 锥流量计,提出了两相质量流量系数为基础的测量方法^[16];2019 年,Pan 等采用数值模拟与实验相结合的方法,对垂直安装文丘里流量计进行了研究,提出了一种基于含气率的流量预测方法^[17]。但目前的研究中,即使解决了传统湿气测量模型中液相含量获取困难的难题,也没有很好地考虑流型对湿气测量的影响,因此消除流型的影响成为一个亟待解决的问题。

针对以上问题,本文提出了一种应用强制环状流的湿气双参数测量方法。所谓强制环状流,就是一种借助外力(如电磁力、离心力等),人为地将不可控的流型调整成气液两相环状流的过程。通过在文丘里管喷嘴前设置旋流器,湿气流过旋流器时随机分布的液相会被调整成液环或者液膜贴壁流动^[18],从而形成强制环状流。通过测量强制环状流状态下的离心压差与流经文丘里管喷嘴产生的节流压差,结合建立的湿气测量模型,便可实现液相含率和气相流量的双参数测量。

1 测量装置及工作原理

1.1 测量装置

本文设计了一种由四叶片旋流器与文丘里管喷嘴组成的湿气双参数测量装置,其几何模型如图 1 所示。旋流器与文丘里管喷嘴之间的距离为 1.5 倍管径。测量装置设置 3 个取压点,分别为:文丘里管入口中心压力点 P_1 、文丘里管入口管壁压力点 P_2 以及文丘里管喉部压力点 P_3 。其中, P_1 与 P_2 处于同一横截面, P_1 位于模型中心轴线处。文丘里管喷嘴轴向节流压差 ΔP_o 和径向离心压差 ΔP_r 的计算公式为

$$\Delta P_o = P_2 - P_3 \quad (1)$$

$$\Delta P_r = P_2 - P_1 \quad (2)$$

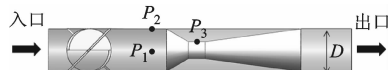


图 1 湿气双参数测量装置的几何模型

1.2 测量装置的工作原理

传统湿气测量中,常把虚高 Φ 表示为 X_{L-M} 、气相弗劳德数 Fr_g 、液气密度比 ρ_g/ρ_l 等参数为变量的函数^[3-9],即

$$\Phi = f(X_{L-M}, Fr_g, \rho_g/\rho_l) \quad (3)$$

式中: X_{L-M} 是一个无量纲参数,可以看作是等量的气相和液相单独流过节流装置时产生的压降比的平方根^[4],它在数据处理、表征关系中常常被用到,可表示为

$$X_{L-M} = \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{W_1}{W_g}} \quad (4)$$

其中, ρ_g 、 ρ_l 分别为气相和液相密度 (kg/m^3), W_l 、 W_g 分别为液相和气相的真实质量流量 (kg/s)。

Fr_g 是表征气体惯性力和重力之比的相似准则数,反映了重力、气液密度、气相表观速度等对流动的影响^[6],可以表示为

$$Fr_g = \frac{u_{sg}}{\sqrt{gD}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}} \tag{5}$$

式中: g 为重力加速度; D 为入口直径, m ; u_{sg} 为气相表观速度, m/s ,其表达式为

$$u_{sg} = \frac{4W_g}{\pi D^2 \rho_g} \tag{6}$$

在实际湿气在线不分离测量中, X_{L-M} 和 Fr_g 都比较难获取,即使通过各种方法得到了这些参数,也都存在一定的误差,这给气液的精确测量带来了不小的难题。为此引入一个新的无量纲数 M ,其为 ΔP_o 与 ΔP_r 之比。在结构参数一定的情况下, ΔP_o 取决于摩阻压降和加速压降,而这两者是由混合物的黏度和流量决定的; ΔP_r 取决于离心力,而离心力又与混合物密度及流量密切相关,因此, M 实质上是一个反映湿气流混合黏度和混合密度相对大小的物理量。把 Φ 和 W_l/W_g 分别表示为关于 Fr_g 和 M 的函数模型,便可实现湿气中气相和液相的计量,即

$$M = \frac{\Delta P_o}{\Delta P_r} \tag{7}$$

$$\Phi = f_a \{M, Fr_g\} \tag{8}$$

$$W_l/W_g = f_b \{M, Fr_g\} \tag{9}$$

本文利用迭代修正算法求解 Fr_g ,并在 2.2.5 小节给出具体的计算步骤,这样就有效解决了虚高计算中参数获取困难的问题。因此,确定式(8)和式(9)的具体函数形式,是建立应用强制环状流湿气双参数测量模型的关键。

2 数值模拟研究

2.1 数值模拟方法

测量装置的结构示意图如图 2 所示。图中, $L_1=5\text{ mm}$;文丘里管收缩角 $\theta=60^\circ$; $L_2=70\text{ mm}$;文丘里管扩散角 $\omega=15^\circ$; $L_3=80\text{ mm}$;旋流器叶片夹角 $\varepsilon=45^\circ$;管径 $D=25\text{ mm}$;旋流器叶片厚度 $h=1\text{ mm}$;文丘里管喉部直径 $d=10\text{ mm}$ 。采用 ICEM 软件对流体域进行网格的划分。由于模型存在结构较为复杂的旋流器部分,故采用较高质量的非结构化网格。本文分别划分了 6 种数量的网格对计算模型进行网格无关性验证,综合考虑计算效率和计算精度,最终确定网格数量为 759 919 个。

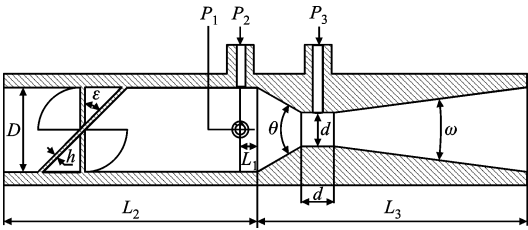


图 2 测量装置结构示意图

利用 Fluent 软件进行求解计算。多相流模型选用欧拉模型,因为其注重流动过程中各个质点的运动状态;在共享压力项的条件下求解,更适合旋流状态下的仿真模拟^[19]。王帅等人在对垂直装有旋流器的实验装置进行不同湍流模型的仿真实验时发现,雷诺应力模型(RSM)更适合叶片式旋流器的数值模拟^[20]。本文也选择雷诺应力湍流模型进行模拟研究。数值模拟采用速度入口和压力出口边界条件,以空气和水作为工质。数值模拟的具体方案参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟的具体方案参数

气相表观流速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	气相弗劳德数 Fr_g	液相体积分数 /%	X_{L-M}
10	0.72	0~0.7	0~0.20
12	0.86	0~0.7	0~0.20
15	1.07	0~0.7	0~0.20
17	1.22	0~0.7	0~0.20
20	1.43	0~0.7	0~0.20

2.2 数值模拟结果及分析

2.2.1 气液分布 以 $Fr_g=1.07$ 、 $X_{L-M}=0.20$ 为例,分析装置内部气液的分布规律,结果如图 3 所示。其中, a 为旋流器下游 3 mm 处横截面; b 为文丘里管喷嘴入口上游 5 mm 处横截面,即径向离心压差取压横截面,本文简称为“径向压差横截面”; c 为文丘里管喷嘴收缩段横截面; d 为文丘里管喷嘴

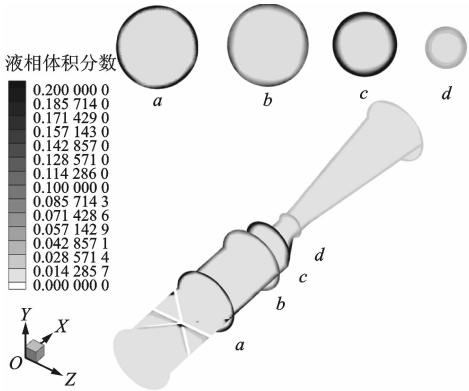


图 3 $Fr_g=1.07$ 、 $X_{L-M}=0.20$ 时模型各部分液相体积分数

喉部取压位置横截面。考虑到入口壁面引压管的壁厚等因素的影响,本文暂且将径向压差横截面选择在文丘里管入口上游 5 mm 处。值得说明的是,在本文中并未针对 P_1 的取压位置和取压方式对测量结果的影响进行专门研究,这也是未来需要开展的工作。

从图 3 可以看出,湿气从入口经过旋流器后有较好的流型转换效果,进入模型前,湿气随气相表观速度、液相含量等因素的不断变换其流型转换成强制环状流。这是由于旋流器的存在使气液两相产生了不同的离心力,密度大的水相产生较大的离心力而被甩至管壁附近,形成一层液膜,随气相的携带沿着管壁流动;而密度较小的气相其离心力小,逐渐聚结到管道中心向前流动。此外,文丘里管喷嘴收缩段的液相含量明显高于入口处的液相含量,这是收缩段的管径变小,液相的堆积所致。随着收缩段气相速度的不断增加,气相对液相的携带能力也逐渐增强。湿气经过文丘里管喷嘴喉部时,气相有足够的携带能力,使收缩段的液相堆积现象有明显的缓解。在文丘里管喷嘴扩张段,随着管径的逐渐增加,管壁处液相的含量不断减小。

2.2.2 径向压差横截面上轴向速度分布 图 4 为 $Fr_g=1.07$ 或 $X_{L-M}=0.20$ 时,径向压差横截面上轴向速度的分布图。从图中可以看出,径向压差横截面上从管壁到管道中心轴线位置轴向速度的差异十分明显,由于液相的存在,管壁处的流体流速明显小于管道中心的轴向速度,越靠近管道中心轴线位置,轴向速度越大。

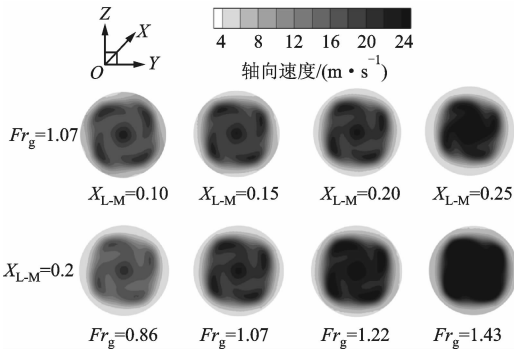


图 4 径向压差横截面上轴向速度分布图

2.2.3 径向压差分析 在径向压差横截面上,沿 Y 轴方向建立一条穿过截面中心的直线, P_1 和 P_2 都在此直线上,本文称这条直线为“径向中心线”。图 5 为径向中心线示意图。

图 6 为 $Fr_g=1.07$ 和 $X_{L-M}=0.20$ 时,径向中心线上压力的变化规律。从图中可以看出,径向中心

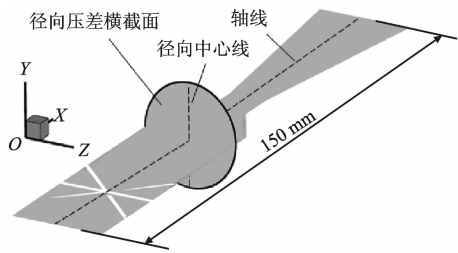
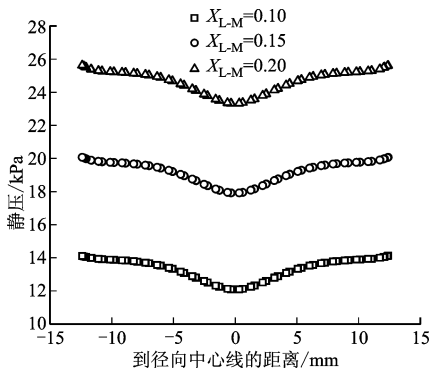
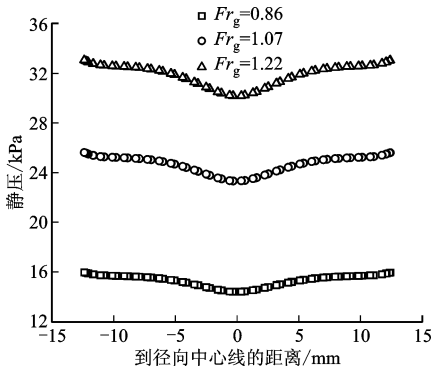


图 5 径向中心线示意图



(a) $Fr_g=1.07$



(b) $X_{L-M}=0.20$

图 6 径向中心线上各点压力分布

线上的压力呈明显的对称分布,在中点位置压力最低;从中点到壁面位置,径向中心线上的压力逐渐升高,在壁面处压力达到最大。这是由于旋流离心力的作用造成的,此压力差即为径向压差。此外,径向中心线上的压力随着液相含量和 Fr_g 的增大而增大。

径向压差随 Fr_g 和 X_{L-M} 的变化规律如图 7 所示。湿气条件下,当 X_{L-M} 恒定,即液相含量不变而改变 Fr_g 时,径向压差与 Fr_g 呈正相关关系,其随着 Fr_g 的增大而不断增加;当其他条件不变而改变 X_{L-M} 时,径向压差随着液相含量的增加而逐渐升高。这是由于随着气相和液相含量增加,流体经过旋流器后产生的离心力不断增大,导致径向压差逐渐变大。

2.2.4 M 的变化规律 图 8 为 X_{L-M} 与 M 的关系

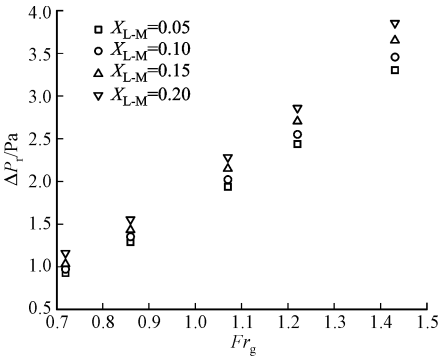


图 7 径向压差与 Fr_g 和 X_{L-M} 的关系图

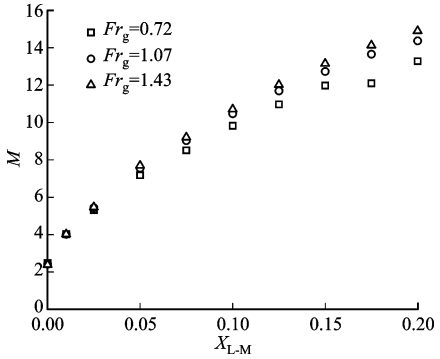


图 8 X_{L-M} 与 M 的关系图

图。从图中可以看出,在其他条件不变的情况下, M 与 X_{L-M} 有明显的函数关系, M 随着 X_{L-M} 的增加不断增大;在相同条件下, Fr_g 越大, M 就越高。因此,湿气中液相含量及虚高的大小可以利用 M 进行有效的测量。

液气质量流量比与 M 的关系如图 9 所示。当其他条件不变时,液气质量流量比随 M 的增大不断增加。当 M 一定时,液气质量流量比随着 Fr_g 的增大而逐渐减小。

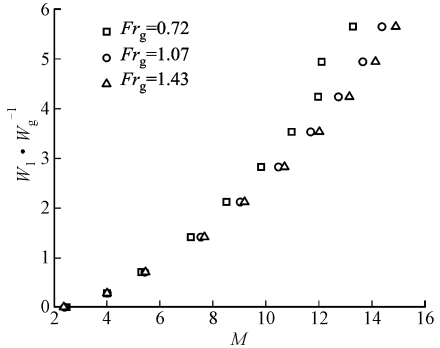


图 9 液气质量流量比与 M 的关系图

Φ 与 M 的关系如图 10 所示。当其他条件不变时, Φ 随着 M 的增大而逐渐增大;当 M 一定时, Φ 与 Fr_g 呈负相关关系,即 Φ 随着 Fr_g 的增加而不断减小。

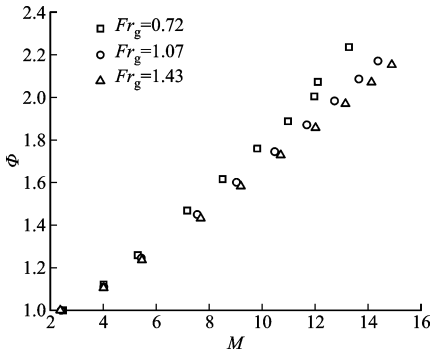


图 10 Φ 与 M 的关系图

2.2.5 气相虚高模型及液气质量流量比模型 从以上分析可以看出,液气质量流量比和 Φ 都与 M 和 Fr_g 具有很好的相关性,因此可以通过数据拟合的方式建立它们之间的函数关系,获得湿气中气液两相的分相计量模型。本文以数值模拟结果为基础,建立如下气相流量虚高模型

$$\Phi = a + bM^c + dFr_g^m + nM^c Fr_g^m \quad (10)$$

式中: $a = 4.079\ 8$; $b = 1.195\ 7$; $c = 1.244\ 4$; $d = 4.922\ 5$; $m = 0.013\ 5$; $n = 1.145\ 7$ 。如图 11 所示,气相虚高模型拟合曲线的相关系数 $R = 0.999\ 3$ 。

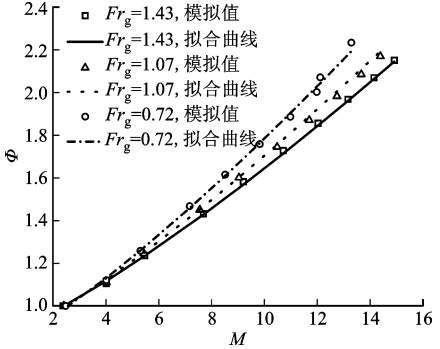


图 11 气相虚高模型的拟合曲线

在已知虚高的前提下,由文丘里管喷嘴节流流量计算式(11)结合式(12),即可求得气相真实质量流量。

$$W_{tg} = \frac{C_{d\epsilon}}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2\Delta P_o \rho_g} \quad (11)$$

$$W_g = W_{tg} / \Phi \quad (12)$$

式中: W_{tg} 、 W_g 分别为气相虚高质量流量和气相真实质量流量,kg/s; C_d 为流出系数,可由实际工况标定; ϵ 为流体可膨胀系数; β 为文丘里管喷嘴节流比,即喉部直径与入口直径之比。

为得到湿气中液相真实质量流量,建立液气质量流量比与 M 数和 Fr_g 的液相测量模型

$$\frac{W_l}{W_g} = \frac{a + bM + cFr_g + dFr_g^2}{1 + mM + nFr_g} \quad (13)$$

式中: $a=0.080\ 78$; $b=0.281\ 9$; $c=1.871\ 2$; $d=0.936\ 2$; $m=0.050\ 5$; $n=0.266\ 2$ 。如图 12 所示,液相测量模型拟合曲线的相关系数 $R=0.998\ 9$ 。需要注意的是,测量模型式(10)和式(13)是在 M 为 $2\sim16$ 、 Fr_g 为 $0.7\sim1.5$ 范围内得到的,在该范围外的测量模型的适用性和测量精度还有待进一步的研究。

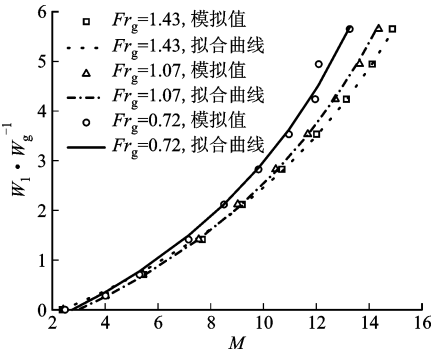


图 12 液相测量模型的拟合曲线

由式(5)和式(6)可知,虚高计算中的 Fr_g 需已知气相质量流量才能得到。从式(10)中可以看出, Fr_g 相比 M 对虚高影响较小,故本文将 Fr_g 的迭代初始值取为 1,以近似忽略其对虚高的影响。湿气双参数测量流程如图 13 所示。

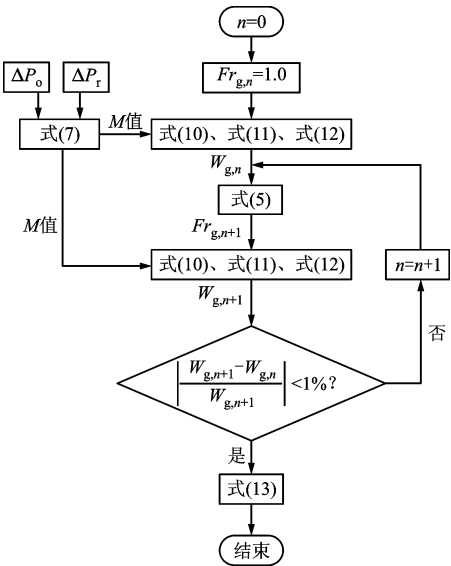


图 13 湿气双参数测量的流程图

3 室内实验研究

3.1 实验流程及设备

室内实验在长江大学中国石油天然气集团公司气举试验基地多相流实验室进行,实验工质与数值模拟工质相同,为水和空气,室内实验装置流程图如

图 14 所示。

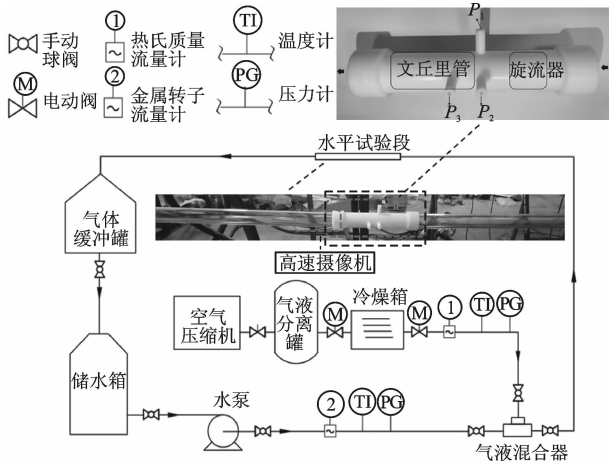


图 14 室内实验装置流程图

该实验装置大致可分为气体供给系统、液体供给系统、计量系统、水平试验管段、计算机控制系统、分离装置等。气体供给系统主要由空气压缩机、冷干燥箱、气体缓冲罐等设备组成;液体供给系统由储水箱、水泵等组成。气液两相进入水平试验管段之前分别进行流量测量。气相采用热氏质量流量计测量,范围为 $5\sim400\text{ m}^3/\text{h}$,精度为 $\pm 1.5\%$;液相采用金属转子流量计测量,量程为 $0\sim0.4\text{ m}^3/\text{h}$,精度为 $\pm 1.5\%$ 。用横河 FP101A 压力传感器测量压力,测量范围为 $0\sim1\ 000\text{ kPa}$,量程精度为 $\pm 0.065\%$;用热电偶温度计测量温度,测量范围为 $-20\sim80\text{ }^\circ\text{C}$,精度为 $\pm 0.2\%$;水平试验段的节流压差和径向离心压差由两台横河 EJA110 A 差压变送器进行测量,其量程可以根据工况压差大小进行调节,最大量程为 150 kPa ,精度为 $\pm 0.1\%$ 。根据实验所用仪器的测量频率特性,设定采样频率为 200 Hz ,每个工况采样时间为 60 s 。采样得到的模拟数据经数据采集模块采集后传送到计算机控制系统,通过 LabVIEW 软件将每秒采集到的 200 个实时数据进行算术平均后输出记录。湿气测量装置由 3D 打印而成,测量装置上下游分别设置 0.5 m 的有机玻璃直管段,保证流型充分发展和流型观察。在测量装置的出口端放置有高速摄像机,以拍摄记录流体经过装置后所形成的流型。

实验工况压力在 $0.1\sim0.2\text{ MPa}$,温度为 $2\sim10\text{ }^\circ\text{C}$,实验的气相流量范围为 $15\sim40\text{ m}^3/\text{h}$,液相流量范围为 $0.02\sim0.35\text{ m}^3/\text{h}$ 。与数值模拟实验方案相同,实验设置 5 种气相流量,每个气相流量下,从小到大调节液相流量,共约 50 种工况。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 流型转换分析 在实验范围内,进入测量装置前的湿气流的流型主要为分层流和波状分层流。在不同工况下,湿气流经旋流器后的流型如图 15 所示。由于测量装置中旋流器的存在,进入装置前不可控的湿气流型被转换为统一的强制环状流,有效消除了传统湿气计量过程中流型的影响。此外,当其他条件不变而改变液相含量时,可以看到由于液相的增加,管壁上的液膜逐渐变厚,而当只改变 Fr_g 时,由于气相表观流速的增加,气相对液相的加速作用增强,管壁上的液膜不断变薄。

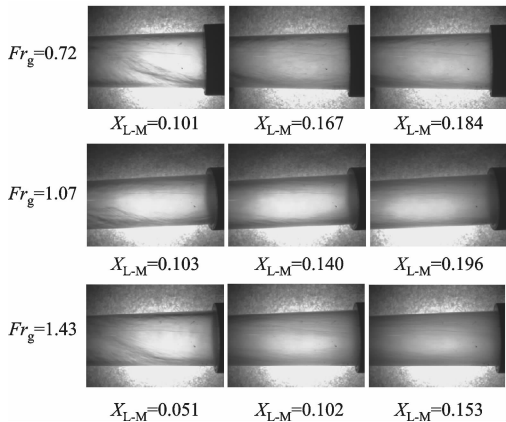


图 15 湿气流经旋流器后实验流型图

3.2.2 数值模拟可靠性验证 实验测量得到不同工况的径向压差如图 16 所示。由于数值模拟的工况条件与实流实验的并不是完全对应,为此,将数值模拟的 X_{L-M} 代入到实流实验的径向压差拟合公式中(图 16 中示出),从而得到实流实验的径向压差作为数值模拟的参比标准,以此进行数值模拟可靠性验证,结果如表 2 所示。其中,径向压差的模拟值与实验值之间的相对误差

$$E_r = \frac{\Delta P_{rs} - \Delta P_{re}}{\Delta P_{re}} \times 100\% \tag{14}$$

式中: E_r 为模拟值的相对误差; P_{rs} 为模拟实验径向

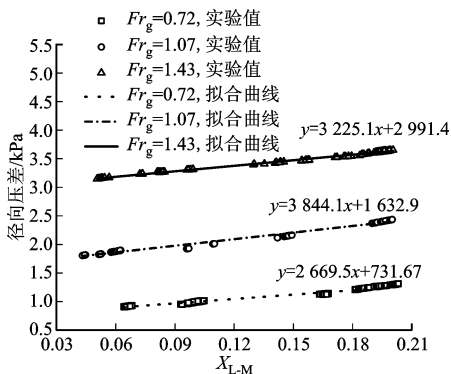


图 16 实验径向压差

压差; P_{re} 为相同 X_{L-M} 下实流实验径向压差。从表 2 可以看出,数值模拟的径向压差与实验值相比,误差在 $\pm 9\%$ 以内。

表 2 数值模拟可靠性验证结果

Fr_g	X_{L-M}	径向压差/Pa		相对误差/%
		数值模拟值	实验值	
0.72	0.05	925.57	865.15	6.98
	0.10	971.52	998.62	-2.71
	0.15	1 033.48	1 132.10	-8.78
	0.20	1 159.62	1 265.57	-8.37
1.07	0.05	1 935.41	1 825.11	6.04
	0.10	2 021.79	2 017.31	0.22
	0.15	2 148.40	2 209.52	-2.77
	0.20	2 279.88	2 401.72	-5.07
1.43	0.05	3 299.97	3 152.66	4.67
	0.10	3 454.94	3 313.91	4.26
	0.15	3 650.11	3 475.17	5.03
	0.20	3 850.51	3 636.42	5.89

3.2.3 测量模型验证 气相、液相质量流量迭代修正后的实验值与测量值分别如图 17 和图 18 所示,对应的测量相对误差分别如图 19 和图 20 所示。其中,测量的相对误差

$$E_w = \frac{E_m - E_n}{E_n} \times 100\% \tag{15}$$

式中: E_w 为测量相对误差; E_m 为气、液质量流量测量值; E_n 为气、液质量流量实验值。从图 19 和图 20 可以看出,气相质量流量的测量值与实验相比,误差在 $\pm 3\%$ 内;液相质量流量的误差在 $\pm 10\%$ 范围内。误差的产生大致可以有两个原因:一方面,数值模拟中简化流体运动过程可能会导致测量值与实验值的偏差;另一方面,室内实验计量器材的不稳定性可能带来系统误差。从图 17 和图 19 中还可以看出,本文所建立的测量模型在 $M < 14$ 时气相流量的测量值较实验值普遍偏低,而当 $M > 14$ 时,气相流量的

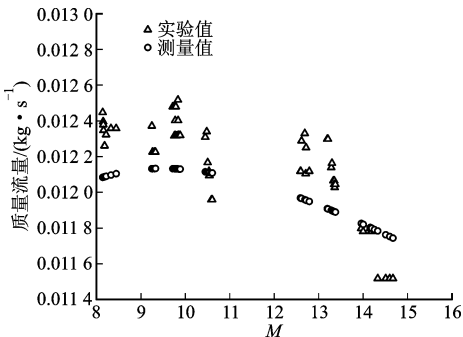


图 17 气相质量流量实验值与测量值

测量值普遍偏高。针对该问题,考虑在以后的工作中对测量模型进行进一步的修正。

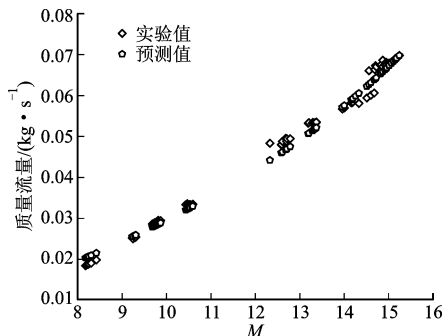


图 18 液相质量流量实验值与测量值

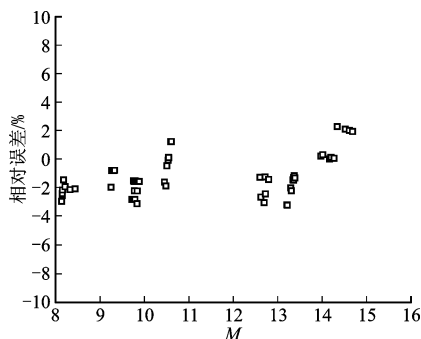


图 19 气相质量流量测量相对误差

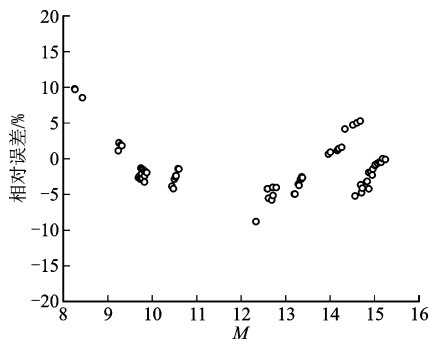


图 20 液相质量流量测量相对误差

4 结 论

(1) 本文提出了一种应用强制环状流的湿气双参数测量装置和测量方法,通过数值模拟和室内实验研究,证明该方法可以用于高气液比的湿气流中气相、液相流量的测量。

(2) 旋流器可以将分层流、波状分层流等湿气流型调整成强制环状流。在强制环状流状态下,径向离心压差随液相含量和气相弗劳德数 Fr_g 的增加而逐渐升高。

(3) 通过引入 M 数,分别确定了湿气虚高和液气质量流量比与 M 和气相弗劳德数 Fr_g 之间的联系,进而建立了应用强制环状流的湿气测量模型。

实验结果表明,所建立的测量模型气相流量测量误差在 $\pm 3\%$ 以内,液相误差在 $\pm 10\%$ 以内。

参考文献:

- [1] 孙赞东,贾承造,李相芳. 非常规油气勘探与开发 [M]. 北京:石油工业出版社,2011: 58-60.
 - [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量湿气体流量: GB/Z 35588—2017 [S]. 北京:中国标准出版社,2018.
 - [3] MURDOCK J W. Two-phase flow measurement with orifices [J]. Journal of Basic Engineering, 1962, 84 (4): 419-433.
 - [4] CHISHOLM D. Flow of incompressible two-phase mixtures through sharp-edged orifices [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1967, 9(1): 72-78.
 - [5] LIN Zonghu. Two-phase flow measurements with sharp-edged orifices [J]. International Journal of Multi-Phase Flow, 1982, 8(6): 683-693.
 - [6] De LEEUW R. Liquid correction of Venturi meter readings in wet gas flow [R]. Assen, Holland: North Sea Flow Measurement Workshop, 1997.
 - [7] STEVEN R N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2002, 12(5/6): 361-372.
 - [8] 杨会峰. 内锥流量计可膨胀系数与湿气测量特性的实验研究 [D]. 天津:天津大学,2007: 69-85.
 - [9] STEVEN R. Horizontally installed cone differential pressure meter wet gas flow performance [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2009, 20 (4/5): 152-167.
 - [10] LIU Weiye, MA Youfu, LYU Junfu, et al. Wet gas pressure drop across orifice plate in horizontal pipes in the region of flow pattern transition [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 71: 101678.
 - [11] HE Denghui, CHEN Senlin, BAI Bofeng. A V-cone meter measurement correlation in low pressure wet gas based on Chisholm model [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 66: 12-17.
 - [12] 段玉晗. 基于 CFD 的双节流湿气流量测量装置高压模型预测研究 [D]. 天津:天津大学,2009: 50-69.
 - [13] 张强,徐英,张涛. 基于长喉颈文丘里管的双差压湿气流量测量 [J]. 天津大学学报,2012, 45(2): 147-153.
- ZHANG Qiang, XU Ying, ZHANG Tao. Wet gas metering based on dual differential pressure of long throat Venturi tube [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(2): 147-153.

(下转第 44 页)

- (8): 117-123.
- LI Yunfeng, WANG Lei, WANG Zhicheng. A layered spatial modulation algorithm based on amplitude/phase-shift keying [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(8): 117-123.
- [11] 曹鑫, 王磊, 邵彦彰. 采用 Alamouti 码构造的正交空间调制及低复杂度解码算法 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 69-76.
- CAO Xin, WANG Lei, SHAO Yanzhang. A decoding algorithm with quadrature spatial modulation and low-complexity using Alamouti code [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 69-76.
- [12] SHAO Yanzhang, WANG Lei, CAO Xin. On the performance of space-time block coded spatial modulation transmission for full-duplex relay networks [J]. IEEE Access, 2019, 7: 180976-180985.
- [13] BIAN Y Y, CHENG X, WEN M W, et al. Differential spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(7): 3262-3268.
- [14] MESLEH R, ALTHUNIBAT S, YOUNIS A. Differential quadrature spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(9): 3810-3817.
- [15] ZHANG W L, YIN Q Y, DENG H. Differential full diversity spatial modulation and its performance analysis with two transmit antennas [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(4): 677-680.
- [16] HELMY A G, RENZO M D, AL-DHAHIR N. Differential spatially modulated space-time block codes with temporal permutations [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 7548-7552.
- [17] ISHIKAWA N, SUGIURA S. Unified differential spatial modulation [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(4): 337-340.
- [18] RAJASHEKAR R, ISHIKAWA N, SUGIURA S, et al. Full-diversity dispersion matrices from algebraic field extensions for differential spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1): 385-394.
- [19] XIAO L X, XIAO Y, YANG P, et al. Space-time block coded differential spatial modulation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 8821-8834.
- [20] NASSAJI E, AHMADI ALMASI M, FARDAD M. Low-complexity decoder based on conditional ML for QOSTBC [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(8): 1548-1551.

(编辑 杜秀杰 刘杨)

(上接第 35 页)

- [14] 贺登辉, 鲁斌, 李星, 等. 双差压式湿气流量在线测量新方法研究 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(5): 878-882.
- HE Denghui, LU Bin, LI Xing, et al. A new method to meter wet gas flow based on double differential pressure [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(5): 878-882.
- [15] XU Ying, YUAN Chao, LONG Zhenghai, et al. Research the wet gas flow measurement based on dual-throttle device [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013, 34: 68-75.
- [16] HE Denghui, BAI Bofeng, ZHANG Jun, et al. Online measurement of gas and liquid flow rate in wet gas through one V-cone throttle device [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 75: 129-136.
- [17] PAN Yanzhi, HONG Yi, SUN Qin, et al. A new correlation of wet gas flow for low pressure with a vertically mounted Venturi meter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2019, 70: 101636.
- [18] WEI Pengkai, WANG Dong, NIU Pengman, et al. A novel centrifugal gas liquid pipe separator for high velocity wet gas separation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2020, 124: 103190.
- [19] ANSYS Inc. ANSYS Fluent theory guide release 14.0 [EB/OL]. (2011-11-10)[2019-12-01]. <https://www.ansys.com>.
- [20] WANG Shuai, WANG Dong, NIU Pengman, et al. Mass flowrate measurement using the swirl motion in circular conduits [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2017, 54: 177-184.

(编辑 亢列梅)