

基于文丘里的湿气流量测量实验研究

何灿阳, 顾嘉祺, 胡衍聚, 咎元锋, 闫晓

(中国核动力研究设计院 中核核反应堆热工水力技术重点实验室, 成都 610041)

摘要: 对可应用于民用湿天然气流量测量的小口径文丘里管进行了实验研究; 通过一台气流式雾化器用氮气把水雾化成湿气, 再通过一台入口直径 6 mm, 直径比 0.567 的文丘里管进行在线流量测量, 获得了一定工况参数范围内不同压力、气体密度弗鲁德系数和洛克哈特-马蒂内利参数下的湿气虚高特性数据; 分析了洛克哈特-马蒂内利参数、气液密度比、气体密度弗鲁德系数、韦伯数和液气体积比对湿气虚高修正系数的影响; 调研了基于差压流量计的 7 种虚高指数修正关系式, 并根据实验数据改进了 R-H 关系式; 提出了针对小口径文丘里测量湿气的相流量计算模型; 实验结果表明, 在压力 0.5~2.0 MPa, 气体密度弗鲁德系数 1.0~8.5, 洛克哈特-马蒂内利参数 0~0.34, 气相体积比 95%~100% 范围内, 该模型修正的气相流量相对误差小于 ±2.1%, 气相均方根误差为 1.2%, 优于其他模型的修正结果。

关键词: 湿气; 文丘里; 虚高修正系数; 两相流量测量

Experimental Study on Venturi in Wet Gas Flow Measurement

He Canyang, Gu Jiaqi, Zan Yuanfeng, Yan Xiao

(CNNC Key Laboratory on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics Technology, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: The small-caliber Venturi tube was studied experimentally, which could be applied to the flow measurement of civil wet natural gas. An airflow atomizer was used to atomize water into wet gas with nitrogen, and then a Venturi tube with an inlet diameter of 6 mm and a diameter ratio of 0.567 was used for on-line flow measurement. The wet gas over reading characteristics data of different pressures, gas densimetric Froude numbers and Lockhart-Martinelli parameters within a certain range of operating parameters were obtained. The effects of Lockhart-Martinelli parameter, gas-to-liquid density ratio, gas densimetric Froude number, Weber number and liquid-gas volume ratio on wet gas over-reading correction factor were analyzed. 7 kinds of over-reading exponent correction equations based on differential pressure flowmeter were investigated, and the R-H over-reading exponent correction equation was improved according to the experimental data. A model for calculating gas flow rate in mass of wet gas measured with small-caliber Venturi tube was proposed. The experimental results show that, in the range of pressure 0.5~2.0 MPa, gas densimetric Froude number 1.0~8.5, Lockhart-Martinelli parameter 0~0.34 and gas volume fraction 95%~100%, the relative error range of gas flow rate in mass is ±2.1% and the gas root-mean-square error is 1.2%, which are predicted by this model and better than the results predicted by other models.

Keywords: wet gas; Venturi tube; over-reading coefficient; two phase flow rate measurement

0 引言

湿气作为一种特殊的气液两相流广泛存在于注汽采油、天然气开采和运输、火力发电和核电汽轮机中。从气田开采出的天然大多都会携带少量水或液态烃而变成湿天然气^[1]。即使经过气液分离的干天然气, 在运输过程, 受温度和压力的变化, 会凝析出液态碳水化合物, 并输送距离逐渐增多, 最终形成湿天然气^[2]。因此湿气流量的在线测量既可以降低油气田投资和运营成本, 也为简化生产工艺和提高气藏和气井的综合管理水平提供科学依据。随着第四次工业革命的迅速推进, 物联网将会得到迅速发展, 如果能对每口井的产量和每根支线的气量有精确采集, 并根据市场的需求去控制油气的产量, 能给城市智慧化提供更有利的支撑。

文丘里已成为一种最常用的湿气流量计, 因为它结构简单, 测量重复性好且造价低廉。国内外很多商用湿气和多相流量计都采用它进行流量测量^[3]。

根据等同翻译 ISO/TR 11583^[4]的 GB/Z 35588^[5], 对于气相体积比大于 95% 的气液两相流被认为湿气。标准还给出针对文丘里和孔板测量湿气的指导性修正模型, 但 ISO/TR 12748^[6]给出的文丘里测量湿气指导性修正模型就与 ISO/TR 11583 不同。GB/T 35065.1^[7]也给出了湿天然气的流量修正模型但与前几个标准都不相同。因此用文丘里测量湿气的修正模型仍需进一步研究。

当前国内外学者也提出各种虚高模型, 但这些模型都是针对工业湿气测量而提出来的, 这些流量计的入口直径都在 2~48 in 范围^[8]。但几乎未见到针对民用的小口径湿天然气流量虚高研究报道。Britton 等人^[9]在研究文丘里测量湿气时发现, 在湿气参数不变, 流经入口直径不同, 其他参数相同的两个文丘里时, 入口直径越小的虚高越小。因此, 本文将采用入口直径为 6 mm 的小文丘里开展氮气和水的

收稿日期: 2019-01-06; 修回日期: 2019-02-19。

作者简介: 何灿阳(1980-), 男, 湖南长沙人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事反应堆仪控设计方向的研究。

$$Fr_g = \frac{v_{sg}}{\sqrt{gD}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}} = \frac{4W_g}{\pi D^{2.5} \sqrt{g(\rho_g(\rho_l - \rho_g))}} \quad (6)$$

其中： v_{sg} 是气相表观速度 (m/s)； g 为重力加速度 (m/s²)； D 为入口直径 (m)。

1.3.1.4 韦伯数

韦伯数是表示惯性力和表面张力效应之比，而湿气的韦伯数^[11]可表示为：

$$We_{tp} = \frac{\rho_g v_{sg}^2 D^2}{\sigma_l D} = \left(\frac{16}{\pi^2}\right) \frac{W_g^2}{\sigma_l \rho_g D^3} \quad (7)$$

其中： σ_l 为液相表面张力 (N/m)。

1.3.1.5 液气体积比

把液相体积流量与气相体积流量比值定义为液气体积比：

$$LGR_v = \frac{Q_l}{Q_g} = X_{LM} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (8)$$

其中： Q_l 和 Q_g 分别为液相和气相体积流量 (m³/h)。

1.3.2 湿气虚高模型

对于满管稳定流动且质量流速不随时间变化的流体，其动量方程^[12]可以表示为：

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{\tau_0 L}{A} + \rho_{tp} g \sin\theta + \frac{1}{A} \frac{d}{dz} \left\{ AW^2 \left[\frac{(1-\chi)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{\chi^2}{\rho_g \alpha} \right] \right\} \quad (9)$$

其中： τ_0 为流体与单位长度管壁的切应力 (N/m)； L 为边界长度 (m)； α 为截面含气率； χ 为质量含气率； ρ_{tp} 为气液两相混合物密度 (kg/m³)； A 为截面积 (m²)； θ 为流动方向与水平线的夹角 (°)。

流体在水平安装的文丘里中流动时，其压力损失主要来自与管道摩擦产生的摩擦压降和沿流动方向的流通截面积变化产生的加速压降。由于文丘里较短，所以摩擦压降相比加速压降可以忽略不计。

从而对式 (9) 简化后可以得到流体在文丘里中的加速度压降：

$$dP_a = W^2 d \left[\frac{(1-\chi)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{\chi^2}{\rho_g \alpha} \right] + \frac{W^2}{A} \left[\frac{(1-\chi)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{\chi^2}{\rho_g \alpha} \right] dA \quad (10)$$

忽略气液两相流体流经文丘里时的密度变化，假定在整个流通截面上压力均匀分布，即可以用文丘里测量差压替代实际差压。同时假定气液两相间滑速比和截面含气率都保持不变，对式 (10) 沿文丘里管入口截面到喉部截面进行面积积分，可以得到：

$$\Delta P_{tp} = W^2 \left[\frac{(1-\chi)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{\chi^2}{\rho_g \alpha} \right] \left[(A_1 - A_0) + \ln \frac{A_1}{A_0} \right] \quad (11)$$

其中： A_1 为入口段截面积，m²； A_0 为喉部段截面积，m²。

根据式 (10)，当气相单独流过文丘里时，其差压可以表示为：

$$\Delta P_g = W_g^2 \frac{\chi^2}{\rho_g} \left[(A_1 - A_0) + \ln \frac{A_1}{A_0} \right] \quad (12)$$

由式 (10)、(11) 和 (5) 可得虚高修正系数与质量含

气率、气液密度比、截面含气率及 L-M 参数的关系式：

$$\Phi^2 = \frac{\Delta P_{tp}}{\Delta P_g} = \frac{1}{1-\alpha} \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{(1-\chi)^2}{\chi^2} + \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{1-\alpha} X_{LM}^2 + \frac{1}{\alpha} \quad (13)$$

再结合截面含气率 α 、质量含气率 χ 、滑速比 s ^[13] 的关系式：

$$\frac{1}{\alpha} = 1 + s \frac{1-\chi}{\chi} \frac{\rho_g}{\rho_l} = 1 + s X_{LM} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (14)$$

将式 (14) 代入式 (13) 得：

$$\Phi^2 = 1 + \left(\frac{1}{s} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} + s \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \right) X_{LM} + X_{LM}^2 \quad (15)$$

$$C_{Ch} = \frac{1}{s} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} + s \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \quad (16)$$

$$\Phi = \sqrt{1 + C_{Ch} X_{LM} + X_{LM}^2} \quad (17)$$

式 (17) 就是湿气的虚高模型，根据 GB/Z 35588，模型中 Chisholm 系数 C_{Ch} 可以表示为：

$$C_{Ch} = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^n + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^n \quad (18)$$

标准认为虚高指数 n 是一个与气相弗鲁德数、液相物性和直径比有关的参数。

结合式 (1) 和 (5) 可以获得气相的真实质量流量修正模型：

$$W_g = \frac{\pi f (Re_d) \epsilon d^2 \sqrt{2\Delta P_{tp} \rho_g}}{4\Phi \sqrt{(1-\beta^4)}} \quad (19)$$

结合式 (4)、(5) 和 (17)，可以把 Chisholm 系数表示为：

$$C_{Ch} = \frac{\Phi^2 - 1}{X_{LM}} - X_{LM} = \frac{(W_{m,g}^2 - W_g^2) \rho_l - W_l^2 \rho_g}{\sqrt{\rho_l \rho_g} W_g W_l} \quad (20)$$

通过对式 (18) 进行变换，可以把虚高指数表示为：

$$n = \frac{\ln(C_{Ch} \pm \sqrt{C_{Ch}^2 - 4}) - \ln 2}{\ln \left\{ \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \right\}} \quad (21)$$

1.3.3 虚高指数经验关系式

1.3.3.1 Chisholm 孔板虚高指数

在 1977 年，Chisholm^[14] 基于均相流密度模型，推导出滑速比 $s = (\rho_l/\rho_g)^{0.25}$ ，入式 (16) 可得：

$$C_{Ch} = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^+ + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^+ \quad (22)$$

因此，Chisholm 孔板经验关系式为：

$$n = 0.25 \quad (23)$$

结合 (22) 和 (17) 可以获得 Chisholm 的虚高模型，在 2018 年该模型被 GB/T 35065.1^[7] 采纳作为测量湿天然气流量的指导性修正模型。

1.3.3.2 De Leeuw 文丘里虚高指数

在 1997 年，De Leeuw 对入口直径 4 in，直径比 0.4 的文丘里管进行湿气测量虚高研究，发现虚高指数与气相弗鲁德数有关，通过实验数据拟合，获得经验^[15] 关系式：

$$n = \begin{cases} 0.41 & 0.5 \leq Fr_g \leq 1.5 \\ 0.606(1 - e^{-0.746 Fr_g}) & Fr_g \geq 1.5 \end{cases} \quad (24)$$

1.3.3.3 R-H文丘里虚高指数

在2009年,Reader-Harris等人对入口直径4 in直径比0.4、0.6和0.75,以及对入口直径6 in直径比0.55的水平安装文丘里管进行了大量的湿气测量虚高研究,发现指数与气相弗鲁德数、直径比和液体类型有关,获得经验^[16]关系式:

$$n = \max(a_1 + a_2\beta^2 + a_3e^{a_4Fr_g/H}, a_5 + a_6\beta^2) \quad (25)$$

其中: $a_1 = 0.583, a_2 = -0.18, a_3 = -0.57, a_4 = -0.8, a_5 = 0.392, a_6 = -0.18$ 。 H 是一个与液相表面张力有关的系数,对于液态烃 $H = 1$,对于常温水 $H = 1.35$,对于饱和湿蒸汽 $H = 0.79$ 。

结合(25)、(18)和(17)可以获得R-H的虚高模型,在2012年该模型被ISO采纳作为文丘里测量湿气流量的指导性修正模型^[4]。

1.3.3.4 Steven孔板虚高指数

在2009年,Steven R.等人通过对近几年的大量水平安装孔板湿气测量数据进行整理获得经验^[17]关系式:

$$n = \begin{cases} 0.214 & Fr_g \leq 1.5 \\ \left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) - \left(\frac{0.3}{\sqrt{Fr_g}} \right) \right)^2 & Fr_g > 1.5 \end{cases} \quad (26)$$

结合(26)、(18)和(17)可以获得Steven的孔板虚高模型,在2012年该模型被ISO采纳作为孔板测量湿气流量的指导性修正模型^[4]。

1.3.3.5 Steven V锥虚高指数

在2009年,Steven R.等人通过对近几年的大量水平安装V锥,液相介质含水的湿气测量数据进行整理,获得经验^[18]关系式:

$$n = \begin{cases} 0.143 & Fr_g \leq 0.5 \\ \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{0.83}{e^{0.3Fr_g}} \right) \right) & Fr_g > 0.5 \end{cases} \quad (27)$$

1.3.3.6 徐式长喉文丘里虚高指数

在2012年,徐立军等对垂直安装,入口直径50 mm,直径比0.45的长喉文丘里进行湿气测量虚高研究,发现指数与气相弗鲁德数和气液密度比有关,其经验^[19]关系式为:

$$n = b_1 \exp \left\{ (-0.5) \left[\left(\frac{\ln \left(\frac{Fr_g}{b_2} \right)}{b_3} \right)^2 + \left(\frac{\ln \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)}{b_4} \right)^2 \right] \right\} \quad (28)$$

其中: $b_1 = 0.47359213, b_2 = 1.9897702, b_3 = 1.8384189, b_4 = 0.087328207, b_5 = 7.4636959$ 。

1.3.3.7 Graham文丘里虚高指数

在2014年,Emmelyn Graham等对垂直安装,入口直径4 in,直径比0.6的文丘里进行湿气测量虚高研究,发现指数可以直接用气液密度比表示,其经验^[3]关系式为:

$$n = 0.5 - 0.00283 \left(\left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{-0.75} - 1 \right) \quad (29)$$

2 实验及结果分析

2.1 实验工况

由上所述,虚高修正系数主要跟气液密度比、气相弗

鲁德数和L-M参数有关。从De Leeuw文丘里和Steven孔板虚高指数经验关系式,可以发现,气相弗鲁德数在1.5附近关系式有拐点。在2012年,Steven等人^[20]对湿气进行可视化实验时发现,虚高指数经验关系式的拐点正好对应湿气流型从层流转变为环雾状流。因此实验工况中气相弗鲁德数在1~2.5每隔0.5有一个气相弗鲁德数点,并在每个气相弗鲁德数点下完成多个L-M参数点,实验的主要工况参数如表1所示。

表1 实验工况分布表

P/MPa	Fr_g	X_{LM}
0.5	1.0	0~0.34
	1.5	
	2.0	
	2.5	
	3.5	
	5.0	
1.0	8.5	0~0.34
	1.0	
	1.5	
	2.0	
	2.5	
	3.5	
1.5	5.0	0~0.34
	8.5	
	1.0	
	1.5	
	2.0	
	2.5	
2.0	3.5	0~0.34
	5.0	
	8.5	
	1.0	
	1.5	
	2.0	

2.2 实验方法和步骤

实验的氮气是从20 MPa高压氮气瓶中减压进入实验回路。因此实验优先完成高压工况。液相流量是通过氮气把液相缓冲罐内水压入混合器,因此优先完成低液相流量工况。实验中如果液相流量、气相流量或湿气压力不满足工况参数时,应先调节气相流量,再调压力最后再调液相流量。

实验步骤:先关闭阀门KV1、KV2、PV1、PV2和PV3,打开阀门V1、V2、V3和V4给液相缓冲罐补水直到阀门V4处溢流,停柱塞泵,关闭阀门V3和V4。打开气相缓冲罐接入的多个氮气瓶出口减压阀,使得气相缓冲罐内压力比实验工况压力高1.5 MPa左右,打开阀门KV2,调节

阀门 PV2 控制气相支路压力比实验工况压力高 0.5 MPa 左右, 调节阀门 FV2 和 FV3 使氮气流量比工况参数高 1% 左右。调节阀门 PV3 使得文丘里入口压力达到工况参数。打开阀门 KV1, 调节阀门 PV1 和 FV1 使水流量达到工况参数, 适当调整阀门 FV2 和 FV3 使氮气流量达到工况参数。稳定 1 分钟后, 开始采集一组数据, 然后开始下一组工况。

实验中, 如果液相缓冲罐内液位低于 100 mm 时, 测控系统自动提醒。完成当前工况后, 关闭阀门 KV1、KV2、KV3 和 PV1。打开阀门 V4 释放液相缓冲罐内的氮气, 打开阀门 V3 后, 开启柱塞泵给液相缓冲罐补水, 直到阀门 V4 处溢流, 停柱塞泵, 关闭阀门 V3 和 V4。如果气相缓冲罐上压力低于 2.0 MPa 时, 测控系统自动提醒。完成当前工况后, 关闭阀门 KV1、KV2 和 KV3, 更换所有连接气相缓冲罐的氮气瓶。

2.3 文丘里流出系数标定

实验中每做一个不同压力下的气相弗鲁德数工况点时都进行一次纯氮气实验。通过质量流量计的流量和文丘里入口压力来标定文丘里的流出系数, 文丘里流出系数和喉部雷诺数关系如图 2 所示。从图中曲线可得到喉部雷诺数与流出系数的关系式。

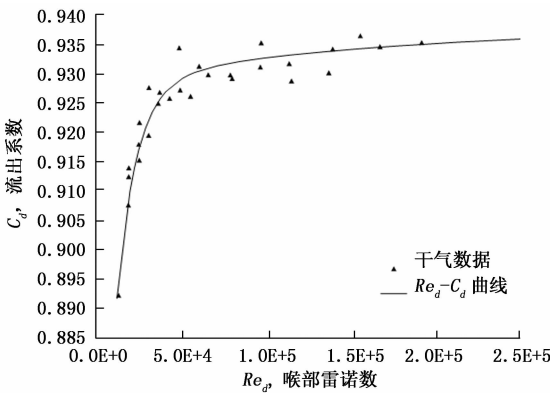


图 2 流出系数和喉部雷诺数关系图

2.4 影响虚高的因素

2.4.1 L-M 参数

从图 3 实验的虚高修正系数数据与 L-M 参数的分布关系图可以看出, 随着 L-M 参数的增大, 虚高修正系数增大, 并且系数分布越离散。由此可见, 影响虚高的因素不仅仅只有 L-M 参数。

L-M 参数是表示液相质量影响的重要指标, 随着 L-M 参数的增加, 液相对气相的阻塞就会越明显, 气相对液相加速会造成更多的能量损失, 从而造成更大的流量虚高。因此, L-M 参数的变化与虚高修正系数呈递增关系。

2.4.2 气液密度比

从式 (18) Chisholm 系数可以看出, 气液密度比是影响虚高的一个重要参数, 同时 L-M 参数中也包含气液密度比, 并且部分学者^[3]认为气液密度比还是虚高指数的重要影响参数。

图 4 和图 5 分别是气相弗鲁德数为 1.0 和 8.5 时不同气

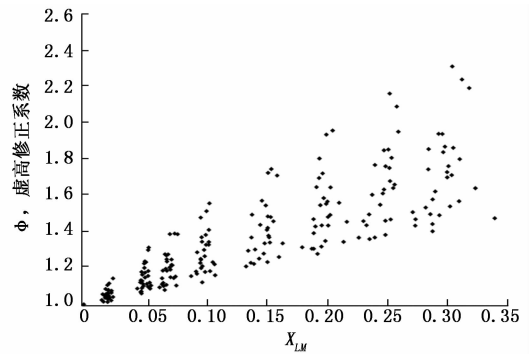


图 3 虚高修正系数与 L-M 参数分布图

液密度比下虚高修正系数的分布图。从图中可以看出气液密度比在相近的 L-M 参数下, 随着气液密度比的增加, 虚高修正系数变小。比较图 4 和图 5 可以发现, 随着气相弗鲁德数的增大, 气液密度比对虚高的影响越明显。

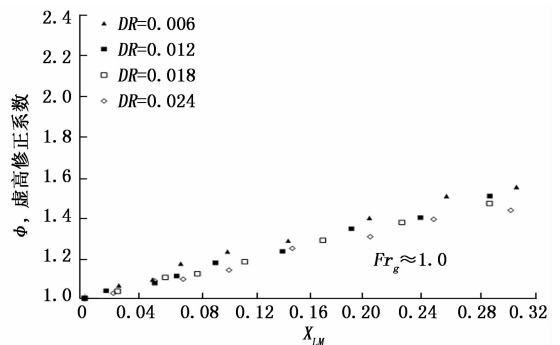


图 4 $Fr_g \approx 1.0$, 不同密度比下虚高修正系数分布图

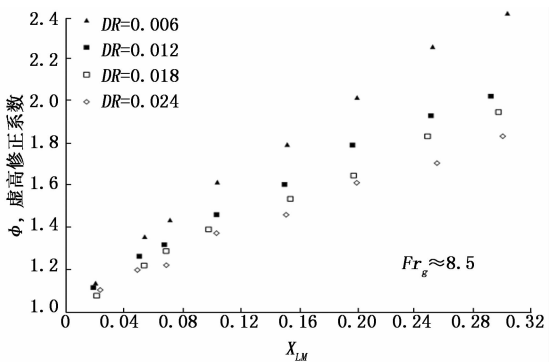


图 5 $Fr_g \approx 8.5$, 不同密度比下虚高修正系数分布图

对于常温下氮气水湿气的气液密度比是压力的函数, 当压力上升时, 气液密度比增大。由于水的可压缩性相比氮气来说很小, 当压力上升时, 水密度增加很小。这时, 氮气单位体积内的质量上升, 氮气驱动水需要的能量就会下降, 从而虚高修正系数减小。

Steven^[21]用入口直径 4 英寸, 直径比 0.401 的文丘里在 CEESI 实验平台对 DR 为 0.013、0.052 和 0.088 的天然气和癸烷湿气进行研究, 也给出了类似的结论。Steven 等人^[22]用入口直径 4 英寸, 直径比 0.66 的孔板在 CEESI 实验平台对 DR 为 0.024 和 0.089 的湿天然气进行研究, 也给出

了类似的结论。同时, 他们对入口直径为 8 英寸的四声道超声波流量计在 DR 为 0.017、0.035 和 0.074 的湿天然气进行研究, 也给出了类似的结论。

2.4.3 气相弗鲁德数

图 6 和图 7 对比了气相弗鲁德数在 1.0、1.5、2.0、3.0、5.0、7.0 和 8.5 下, 不同密度下的虚高修正系数分布。从图可以看出, 接近的 L-M 参数下, 气相弗鲁德数减小, 虚高修正系数降低, 且密度比越低气相弗鲁德数对虚高影响越明显。

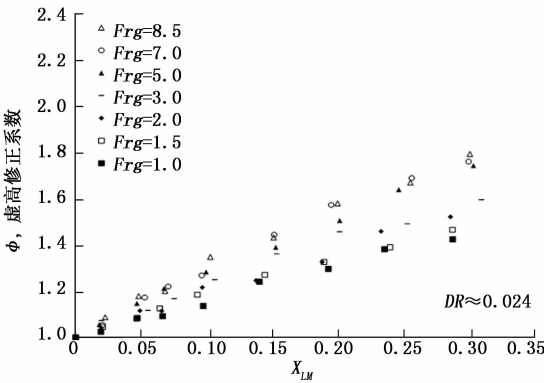


图 6 DR=0.024, 不同 Fr_g 下虚高修正系数分布图

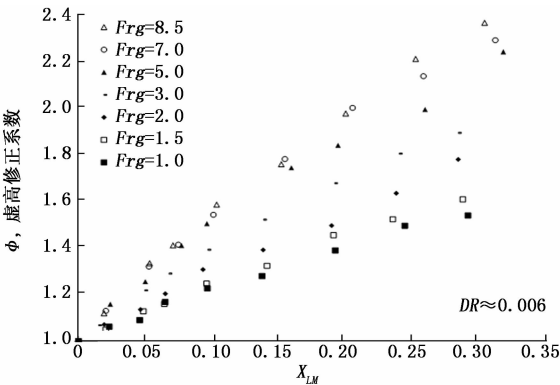


图 7 DR=0.006, 不同 Fr_g 下虚高修正系数分布图

由于气相弗鲁德数 $Fr_g = f(v_{sg}, \rho_g, \rho_l)$, 当气液密度不变时, 气相弗鲁德数减小相当于气相表观速度降低, 这样气相对液相的摩擦力减小, 液相对气相的阻碍变小, 从而两相间的动量交换损失会随着流速的降低而减小, 因此气相弗鲁德数变化与虚高修正系数呈递增关系。

STEWART 等人^[23]分别用入口直径 4 英寸, 直径比为 0.4、0.6 和 0.75 的文丘里管在 NEL 实验平台对气相弗鲁德数 0.5~3.5 (直径比为 0.4) 和 1.5~5.5 (直径比为 0.6 和 0.75) 的氮气和 Exxsol D80 湿气进行研究, 也给出了类似的结论。Steven 等人^[24]入口直径 8 英寸, 直径比为 0.6 的文丘里管在 CEESI 实验平台对气相弗鲁德数为 1.50、2.65 和 3.63 的天然气和 Exxsol D80 湿气进行研究, 也给出了类似的结论。

2.4.4 韦伯数对虚高修正系数影响

图 8 和图 9 对比了韦伯数在 4.6、10、18 和 41 下, 不同密度比下的虚高修正系数分布。从图可以看出, 接近的 L

M 参数下, 韦伯数增大, 虚高修正系数上升, 且密度比越低韦伯数对虚高影响越明显。

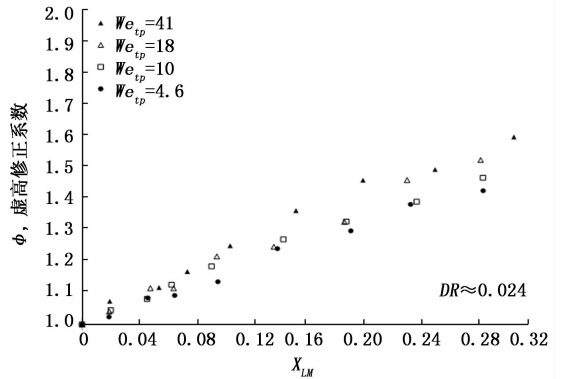


图 8 DR=0.024, 不同 We_{tp} 下虚高修正系数分布图

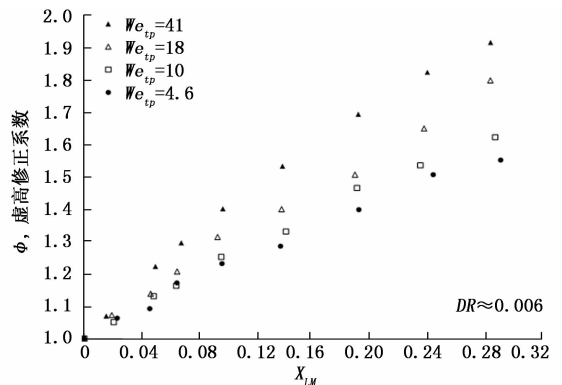


图 9 DR=0.006, 不同 We_{tp} 下虚高修正系数分布图

由于韦伯数 $We_{tp} = f(v_{sg}, \rho_g, \sigma_l)$, 当压力变化很小时, 气相密度和表面张力变化很小, 韦伯数的变化就相当于气相表观速度的变化, 因此, 韦伯数的对虚高修改系数的影响与气相弗鲁德数相似。

2.4.5 液气体积比对虚高修正系数影响

从图 10 和图 11 可以看出, 液气体积比的变化与虚高修正系数呈递增关系。对比图 4 和图 10, 以及图 5 和图 11, 在气液密度比和气相弗鲁德数均相同下, 液气体积比与虚高修正系数的斜率大于 L-M 参数与虚高修正系数的斜率。并且在气液密度比减小或气相弗鲁德数增加时表现越明显。

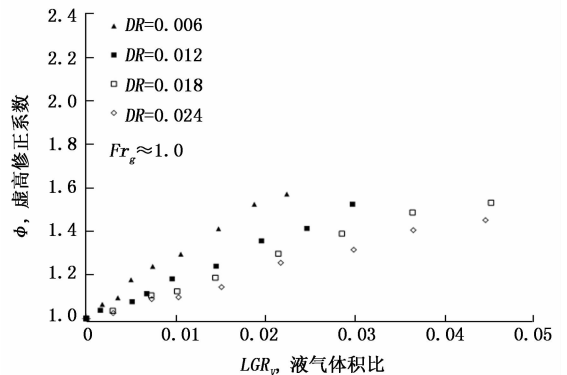


图 10 $Fr_g \approx 1.0$, 不同密度比下虚高修正系数与液气体积比的分布图

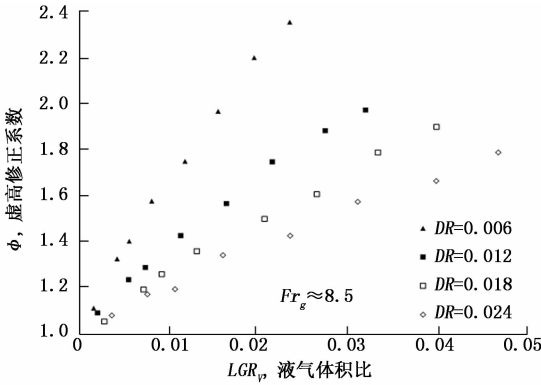


图 11 $Fr_g \approx 8.5$, 不同密度比下虚高修正系数与液气体积比的分布图

液气体积比即液相相对于气相的体积比例, 液气体积的增加就会使液相对气相的阻塞越明显, 因此, 其作用与 L-M 参数相似。

3 实验数据处理

3.1 改进的指数关系式和修正模型

把实验数据按式 (4) ~ (6)、(20) 和 (21) 进行计算, 可以获得气相弗鲁德数和虚高指数的分布。本文参考 R-H 文丘里虚高指数修正关系式对两者进行了非线性规划求解, 获得了改进的虚高指数经验关系式:

$$n = \max \left(\begin{matrix} 0.4934 + 0.1213\beta^2 - 0.399e^{-0.356Fr_g} \\ 0.3755 - 0.1747\beta^2 \end{matrix} \right) \quad (30)$$

结合式 (1)、(5)、(17)、(18) 和 (25), 可以获得适合于小口径文丘里测量湿气的气相流量修正模型:

$$W_g = \frac{\pi f (Re_d) \epsilon d^2 \sqrt{2\Delta P_{tp} \rho_g}}{4 \sqrt{(1-\beta^4) \left(1 + \left(\left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^n + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^n \right) X_{LM} + X_{LM}^2 \right)}} \quad (31)$$

3.2 虚高指数比较

把实验数据代入式 (23) ~ (30) 这 8 个虚高指数经验关系式, 就可获得不同关系式预测的虚高指数与气相弗鲁德数分布。图 12 为预测虚高指数与实验数据对比图。从图可以看出 De Leeuw 文丘里虚高指数、R-H 文丘里虚高指数、

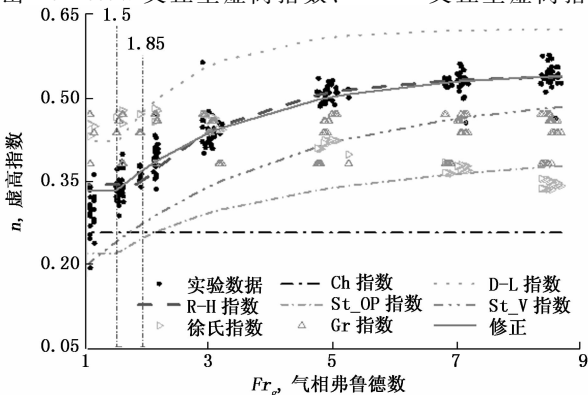


图 12 预测虚高指数与实验数据对比

Steven 孔板虚高指数和 Steven V 锥虚高指数的分布与实验数据分布趋势相似, R-H 虚高指数与改进虚高指数分布基本重合。但两者的拐点不同, 其中 R-H 关系式拐点在 $Fr_g = 1.85$ 附近, 改进关系式拐点在 $Fr_g = 1.5$ 附近, 与 De Leeuw 文丘里和 Steven 孔板虚高指数经验关系式拐点一致。

3.3 误差分析

分别把 8 个虚高指数关系式代入式 (16) 和 (19) 可获得每个虚高模型下气相流量修正值, 再与实验真实的气相流量进行误差比较。气相流量的相对误差 ΔE 和均方根误差 δ 计算方法如下:

$$\Delta E = \frac{W_{m,g} - W_g}{W_g} \times 100\% \quad (32)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{W_{m,g}(i) - W_g(i)}{W_g(i)} \right)^2} \times 100\% \quad (33)$$

表 2 不同虚高模型的气相流量均方根误差

虚高模型	均方根误差/%
Ch 模型	14.1
D-L 模型	11.6
R-H 模型	1.7
St_OP 模型	11.0
St_V 模型	6.6
徐氏模型	11.2
Gr 模型	8.6
改进模型	1.2

图 13 和表 2 分别是 8 个不同虚高模型修正的气相流量与实验真实气相流量的相对误差和均方根误差比较图表, 从图表可以看出 R-H 文丘里虚高模型、Steven V 锥虚高模型和改进模型修正的气相流量相对误差和均方误差都较小。其中, Steven V 锥虚高模型 95.1% 的数据都落在 $[-11.5\%, 0\%]$ 相对误差带内, 该模型的均方误差为 6.6%。R-H 虚高模型 95.1% 的数据都落在 $\pm 3.2\%$ 相对误差带内, R-H 虚高模型的均方误差为 1.7%。改进虚高模型 96.4% 的数据都落在 $\pm 2.1\%$ 相对误差带内, 改进虚高模型的均方误差为 1.2%。

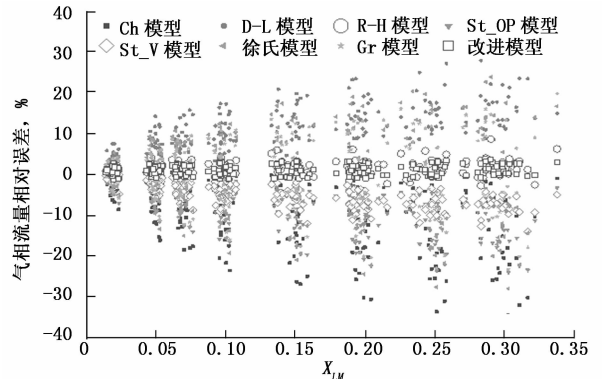


图 13 不同虚高模型修正的气相流量相对误差分布

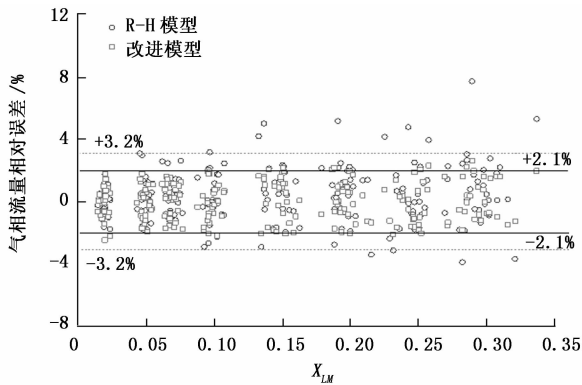


图14 R-H和改进虚高模型的气相流量相对误差比较

4 结论

本文采用一台入口直径6 mm,直径比0.567的文丘里对氮气水湿气进行了流量测量虚高实验研究,并获得如下结论:

1) 实验研究了常温下氮气水湿气流经文丘里时的虚高特性,共获得224组实验数据。其中实验湿气的参数范围:压力0.5~2.0 MPa,气相弗鲁德数1.0~8.5,L-M参数0~0.34。

2) 分析了L-M参数、气液密度比、气相弗鲁德数、韦伯数和液气体积比对湿气虚高修正系数的影响。其中L-M参数、气相弗鲁德数、韦伯数和液气体积比与虚高修正系数呈递增关系,气液密度比与虚高修正系数呈递减关系。

3) 调研了基于差压流量计的典型虚高指数关系式,并根据实验数据改进了R-H关系式。改进的关系式与De Leeuw文丘里和Steven孔板关系式拐点一致。

4) 对比了多个虚高模型修正的气相流量值与实验真实气相流量值的相对误差和均方根误差。发现R-H文丘里虚高模型和Steven V锥虚高模型误差较小。

5) 改进的虚高模型修正的气相流量相对误差96.4%落在±2.1%误差带内,虚高修正系数的均方根误差为1.2%,优于其他模型的修正结果。

参考文献:

[1] 孙赞东,贾承造,李相方,等.非常规油气勘探与开发[M].北京:石油工业出版社,2011:58-60.

[2] 袁颖.低含液气液两相流在文丘里管内的流动特性研究[D].西安:西安石油大学,2018.

[3] Graham E, Reader-Harris M, Hodges D, et al. Performance of a vertically installed Venturi tube in wet-gas conditions [A]. 32nd International North Sea Flow Measurement Workshop [C]. 2014.

[4] ISO. ISO/TR 11583 Measurement of wet gas flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits [S]. 2012.

[5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/Z 335588-2017 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量湿气体流量[S].北京:中国标准出版社,2018.

[6] ISO. Natural Gas - Wet gas flow measurement in natural gas

operations [S]. 2012.

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 35065.1-2018 湿天然气流量测量第1部分:一般原则[S].北京:中国标准出版社,2018.

[8] Steven R, Kinney J, Britton C. Liquid property and diameter effects on Venturi meters used with wet gas flows [A]. 6th International Symposium on Fluid Flow Measurement [C]. 2006.

[9] Britton C, Kinney J, Steven R. A review of the parameters influencing Venturi meters with wet gas flows [A]. North Sea Flow Measurement Workshop [C]. Norway, 2008.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 2624.4-2006 用安装在圆形截面管道中的差压装置测量满管流体流量_第4部分:文丘里管[S].北京:中国标准出版社,2007.

[11] ASME. Wet gas flowmetering guideline, MFC-19G-2008 [S]. New York, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 2008.

[12] 陈听宽.两相流与传热研究[M].西安交通大学出版社,2004.

[13] 鲁钟琪.两相流与沸腾传热[M].清华大学出版社,2002.

[14] Chisholm D. Research note: two-phase flow through sharp-edged orifices [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1977, 19 (3): 128-130.

[15] Leeuw D R. Liquid correction of Venturi meter readings in wet gas flow [A]. North Sea Flow Measurement Workshop. 8th International Conference on Multiphase 97 [C]. UK: 1997.

[16] Reader-Harris M, Graham E. An improved model for Venturi tube over-reading in wet gas [R]. North Sea Flow Measurement Workshop, 2009.

[17] Steven R, Stobie G, Hall A. Further evaluation of the performance of horizontally installed orifice plate and cone differential pressure meters with wet gas flows [A]. 7th South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop [C]. 2008.

[18] Steven R. Horizontally installed cone differential pressure meter wet gas flow performance [A]. 8th South East Asia Hydrocarbon Flow Measurement Workshop [C]. 2009.

[19] Xu L, Zhou W, Li X. Wet gas flow modeling for a vertically mounted Venturi meter [A]. Measurement Science and Technology [C]. 2012, 23.

[20] Steven R, Stobie G, Hall A, et al. Horizontally installed orifice plate meter response to wet gas flows [R]. Appalachian Gas Measurement Short Course, 2012.

[21] Steven R. A discussion on horizontally installed differential pressure meter wet gas flow performances [A]. 24th International North Sea Flow Measurement Workshop [C]. 2006.

[22] Steven R, Kinney J, Britton C. Comparisons of ultrasonic and differential pressure meter responses to wet natural gas flow [R]. North Sea Flow Measurement Workshop, 2015.

[23] Stewart D G, Hodges D, Brown G. Venturi meter readings in wet gas flow [R]. North Sea Flow Measurement Workshop, 2003.

[24] Steven R, Britton C, Kinney J. Horizontally installed 8, 0.6 Beta ratio Venturi meter wet natural gas flow response [A]. 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement [C]. 2012.