

基于文丘里管和射线技术的高压湿气虚高修正

闫嘉钰¹, 洪毅¹, 潘艳芝^{2,3}, 牛棚满³

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 100028, 北京; 2. 海默科技(集团)股份有限公司, 730010, 兰州;

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: 为了修正仅用单一节流件测量湿气时因液相存在而导致测量结果虚高的问题, 利用水平文丘里管结合伽马射线技术开展了理论分析和实验研究。实验系统管道直径 254 mm, 实验工质气相为氮气, 液相为煤油。水平安装的文丘里管入口内径为 172 mm, 直径比为 0.58, 以喉部设置的伽马射线测量装置测量截面含气率。考虑干度和气液滑速比的影响, 基于实验数据进行非线性拟合, 提出了新的虚高修正计算模型, 并将新模型计算结果同 Murdock 和 Chisholm 虚高修正模型进行了对比分析, 结果表明: Murdock 和 Chisholm 模型仅能在 Lockhart-Martinelli 参数位于 0.001~0.1 的范围内时, 与虚高具有高精度线性关系, 而新模型能够在 Lockhart-Martinelli 参数位于 0.001~0.275 的范围内时, 始终与虚高具有高精度线性关系。新模型所需参数均可现场实时测量, 具有计算简便、适用范围更宽的特点。

关键词: 湿气; 虚高; 伽马射线; 文丘里管

中图分类号: O359+.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202008021 **文章编号:** 0253-987X(2020)08-0163-05



OSID 码

Overreading Correction of High Pressure Wet Gas Flowrate Measurement Based on Venturi Meter and Gamma Ray Technology

YAN Jiayu¹, HONG Yi¹, PAN Yanzhi^{2,3}, NIU Pengman³

(1. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 2. Haimo Technologies Co. Ltd., Lanzhou 730010, China;

3. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Theoretical analysis and experiments based on horizontally installed Venturi flow meter and gamma ray sensor are carried out to correct the overreading of wet gas flow measurement caused by the existence of liquid with single differential pressure flow meter. The pipe diameter of experiment is 254 mm, test mediums are nitrogen for gas phase and kerosene for liquid phase. The inlet diameter of Venturi is 172 mm and diameter ratio is 0.58. The gamma sensor is installed at the throat of Venturi for gas void fraction measurement. The quality and gas liquid slip ratio are considered to nonlinearly fit the test data, and a new empirical correction model is obtained. Calculation results from the new model are compared with the results from modes of Murdock and Chisholm. Experimental results show that the overreading corrections calculated by the traditional Murdock and Chisholm models keep high accuracy only when Lockhart-Martinelli parameter ranges from 0.011 to 0.1, while the new empirical correction model keeps linear relationship with overreading in a larger range of Lockhart-Martinelli parameter from 0.011 to 0.275. Parameters of the new model are easy to be measured and adapts to larger range of

收稿日期: 2020-02-16。 作者简介: 闫嘉钰(1988—), 男, 高级工程师; 潘艳芝(通信作者), 女, 高级工程师。 基金项目: 国家“十三五”重大专项资助项目(2016ZX05028-003-004)。

网络出版时间: 2020-04-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20200420.0830.002.html>

Lockhart-Martinelli, and is more suitable for practical use.

Keywords: wet gas; overreading; gamma ray; Venturi meter

近年来全球新发现的油气主要来自深水 and 超深水。我国的深水油气资源十分丰富,尤其在广阔的南海区域。伴随着我国“海洋强国”战略的部署,加大对深水油气资源的勘探开发成为国家能源安全的重要举措,也是我国石油工业实现可持续发展的重要方向。国内外对深水水下生产技术和设施的需求都很旺盛,然而深水水下生产难度及风险巨大,对技术和产品的要求也非常高。中国石油在深海水下生产关键技术方面一直以来严重依赖进口,承受“卡脖子”窘境,不仅产品成本居高不下,且存在巨大风险。水下多相流量计是研究水下生产系统的关键部件,该产品的成功研发可打破欧美产品垄断局面,填补国内空白。

湿气是一种以气相为主并夹带有少量液相的气液两相流,广泛存在于能源开采和动力生产等领域。美国石油学会(API)和国际标准化组织(ISO)把体积含气率超过 95% 或者是 Lockhart-Martinelli 参数(无量纲参数 X_{L-M})小于 0.3 的气液两相流定义为湿气^[1-3]。目前国内荔湾 3-1 和陵水 17-2 气田均属于深水(水深超过 1 500 m)气田。本文基于这两个气田,针对南海深水湿气测量进行了模型研究。

随着许多气田步入生产寿命的中后期,早先产出的干气就会含有碳氢凝聚物而成为“湿气”^[4],高压湿气的精确计量显得尤为重要^[5]。对于单相气体的流量可以用孔板、文丘里等单相仪表来测量,而当气体中混入少量液体时,上述差压式仪表会出现差压读数比气体单独流动时偏高的现象,即“虚高”,因此在用差压式仪表测量湿气时,必须对单相气体计算公式进行修正。目前,国内外研究人员对虚高的修正有很多模型^[6-16],其中 Murdock^[10]和 Chisholm^[6]修正模型应用较为广泛。这些修正模型主要考虑 X_{L-M} 参数、气体 Fr 以及气液密度比等参数,修正原则就是把一些影响虚高现象的、表示湿气特征参数与所测得的压差联系起来;通常需要将 X_{L-M} 作为已知参数输入,为此国内一些学者采用双参数方法如双差压文丘里流量计等对低压下的湿气进行了研究^[17-19]。由于虚高修正是针对不同参数、不同类型的差压式仪表在不同的测试条件下导出的经验关系,因此几乎没有一种模型参数可以广泛应用。可见,对于湿气流量计来说,确定虚高修正的计算模型是至关重要的。

本文基于水平安装的文丘里管和伽马射线对高压下的湿气测量进行了研究,着重考虑干度和气液滑速比的影响,提出了新的虚高修正模型,并与 Murdock 和 Chisholm 修正模型的计算结果进行了对比。

1 实验装置及流程

文丘里流量计和单能伽马射线技术组合计量系统安装在英国国家工程实验室的水平测试管段上,实验系统环线如图 1 所示,管道直径 254 mm,实验工质气相为氮气,液相为煤油。气相由封闭鼓风机提供并通过鼓风机转速调整流量,而液相则由离心泵驱动并通过控制阀调整流量。由于气液两相的物性参数以及流量在进入测试管线混合前分别在各自的单相管路中进行标准值计量并由数据采集系统记录,因此可方便地计算出 X_{L-M} 用于参考。测量装置示意图如图 2 所示。通过控制气相和液相流量调整湿气含气率,对于液相从 0 开始逐渐提高,而对于气相则首先从低至高调整,在达到最高点后再次逐渐调低进气量,如此反复以确保实验良好的重复性。

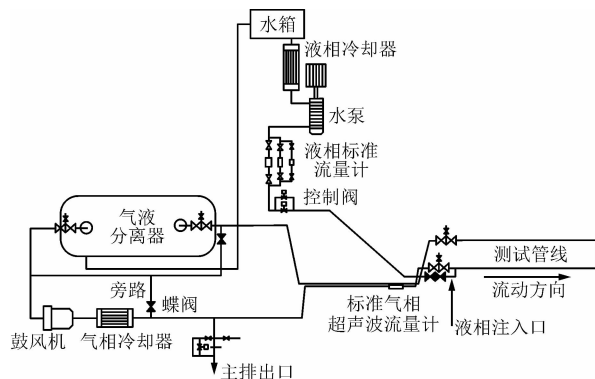


图1 英国国家工程实验室实验系统环线

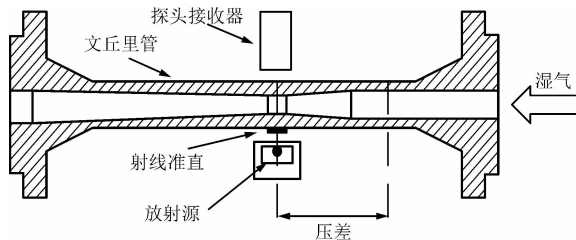


图2 测试管段所用测量装置示意图

水平安装的文丘里管入口内径为 172 mm,直径比为 0.58,在它的喉部设置了伽马射线测量装置来测量截面含气率,如图 2 所示。实验环道压力为 6 MPa,参考体积含气率为 0.924 5~0.996 7,相应

干度为 0.518~0.963, X_{L-M} 为 0.011~0.275。

2 虚高理论及其影响因素

用文丘里测量气体单相流时,气体的质量流量

$$m_g = K \sqrt{2\Delta P_g \rho_g} \tag{1}$$

式中: m_g 的单位为 kg/s; K 为文丘里的流量系数,由文丘里的结构尺寸确定; ΔP_g 和 ρ_g 分别是气体流过文丘里产生的压差和气体的密度,单位分别为 kPa、kg/m³。

当测量湿气时,式(1)中的 ΔP_g 被气液两相流流经文丘里所产生的压差 ΔP_{tp} (单位 kPa) 代替,由此产生虚高。测试环道的标准气体流量

$$m_{g,ref} = K \sqrt{2\Delta P_{tp} \rho_g} / \Phi \tag{2}$$

式中: $m_{g,ref}$ 的单位为 kg/s; Φ 为参考虚高修正系数(或参考虚高)。

湿气在流经文丘里后,液相的存在会阻塞气相而产生加速压降,进而导致摩擦阻力压降,最终使得测量值虚高^[20],因此表征液体携带量的参数(如干度)应该与虚高具有一定的内在关联。由于干度无法通过测量获得,因此本文利用能够直接采用经验公式计算的气液滑速比表征干度,将干度和气液滑速比纳入考虑因素参与虚高修正。

3 湿气虚高修正模型及优化

3.1 Murdock 模型和 Chisholm 模型

1962 年,Murdock 基于孔板流量计开展试验,提出了水平安装的孔板流量计的虚高修正模型^[10],压力范围为 0.1~4 MPa,干度范围为 0.11~0.98,工质包括汽水混合物、空气水混合物、天然气水混合物、天然气盐水混合物。Murdock 虚高修正因子为

$$\Phi_M = 1.26 X_{L-M} + 1 \tag{3}$$

式中: X_{L-M} 的表达式为

$$X_{L-M} = (m_l / m_g) \sqrt{\rho_g / \rho_l} \tag{4}$$

其中, m_l 为液相的质量流量(kg/s), m_g 为气相的质量流量(kg/s), ρ_l 为液相密度(kg/m³), ρ_g 为气相密度(kg/m³)。

该模型仅将虚高与 X 联系起来,而没有考虑压力对其影响。1998 年,菲利普斯石油公司利用文丘里对实际生产井的测量数据(压力为 4.5 MPa)进行测试,提出将 Murdock 模型中的系数 1.26 修正为 1.5。图 3 是本文工况下参考虚高与 X_{L-M} 的函数关系。在实验所涵盖的 X_{L-M} 的范围内,虚高修正显然不符合 Murdock 模型,图中的曲线是实验点的拟合

结果,比 Murdock 模型多一个 X_{L-M} 的二次项,但是在 0.011< X_{L-M} <0.1 时模型的线性关系依然是成立的。

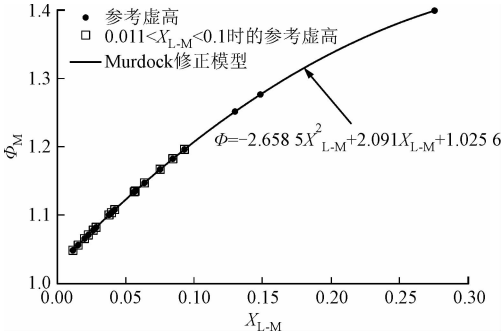


图 3 Murdock 修正模型中参考虚高 Φ_M 与 X_{L-M} 的关系

根据图 3 的数据对 Murdock 模型进行修正,得

$$\Phi_M = \begin{cases} 1.82 X_{L-M} + 1.030, & 0.011 < X_{L-M} < 0.1 \\ -2.66 X_{L-M}^2 + 2.09 X_{L-M} + 1.025, & 0.011 < X_{L-M} < 0.275 \end{cases} \tag{5}$$

Chisholm 假设气液两相流作分相流流动,通过气液两相流动动量方程导出了水平管流动状态下孔板的虚高计算模型^[6],该模型引入气液密度比,考虑压力的影响,则虚高因子

$$\Phi_C = \sqrt{C X_{L-M}^2 + C X_{L-M} + 1} \tag{6}$$

式中

$$C = (\rho_g / \rho_l)^{0.25} + (\rho_l / \rho_g)^{0.25} \tag{7}$$

Chisholm 修正模型计算的参考虚高与 X_{L-M} 的关系见图 4。图中的直线是在式(7)中用 0.495 次幂代替原来 0.25 次幂的结果,与 Murdock 模型的情况一样,在 0.011< X_{L-M} <0.1 的范围内实验点的线性非常好,而当 X_{L-M} 范围为 0.011~0.275 时,实验数据点偏离较大,拟合模型线性度有所下降。

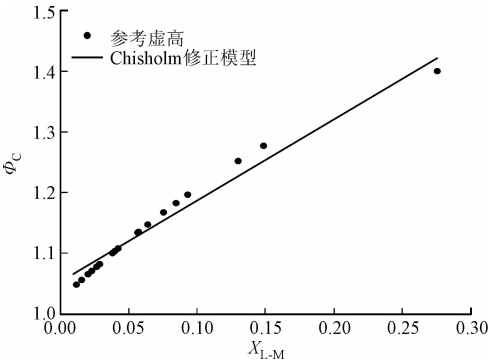


图 4 Chisholm 修正模型中参考虚高 Φ_C 与 X_{L-M} 的关系

3.2 X_s 参数模型

对试验数据分析发现,虚高与干度有非常好的

线性关系,这也验证了能够表征液体携带量的参数与虚高具有一定关联的假设。干度与气液滑速比存在如下理论关系

$$S=\frac{x(1-\alpha)\rho_l}{(1-x)\alpha\rho_g}$$

(8)

式中: S 为气液滑速比; x 为干度; α 为截面含气率。 S 和 α 为未知量,其中, S 可根据 Chisholm 提出的经验公式(9)^[6]来计算, α 可通过伽马射线测量技术测得^[21],最终将二者代入式(8)可以得出式(10)。

$$S=(\rho_l/\rho_g)^{0.25}$$

(9)

$$x_s=[(\rho_l/\rho_g)^{0.75}(1-\alpha)/\alpha+1]^{-1}$$

(10)

x_s 是利用滑速比和截面含气率计算得出的干度,虚高与 x_s 的关系见图5,可见随着 x_s 增大,虚高值逐渐降低,二者呈现良好的线性关系。根据实验数据作线性回归拟合得到基于参数 x_s 的虚高修正模型

$$\Phi_{x_s}=-1.262x_s+2.289$$

(11)

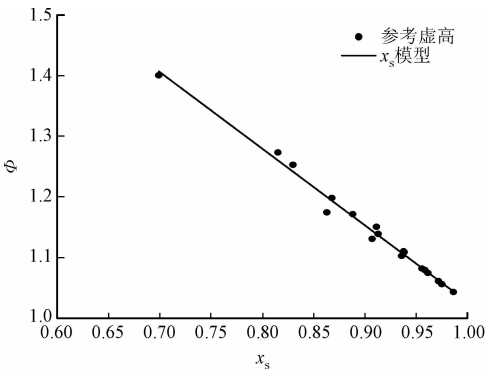


图5 参考虚高与 x_s 的关系

4 结果及讨论

表1是3种虚高修正模型的回归均方根误差,可以看到 Chisholm 修正模型出现了较大的均方根误差,而 Murdock 修正模型采用二次函数拟合具有较小均方根误差,本文提出的 x_s 修正模型均方根误差比 Murdock 修正模型略高,但仍在可接受范围内。

表1 3种虚高修正模型回归均方根误差

模型	Murdock 修正模型	Chisholm 修正模型	x_s 修正模型
均方根误差	0.004 4	0.030 9	0.008 9

根据3种虚高修正的计算公式,基于实验数据计算得到 X_{L-M} 在0.011~0.275范围内(气相折算速度21.51~44.89 m/s,液相折算速度0.098~1.495 m/s)的虚高修正值,见图6。图7是不同虚

高修正模型计算得到的气流量的相对误差。

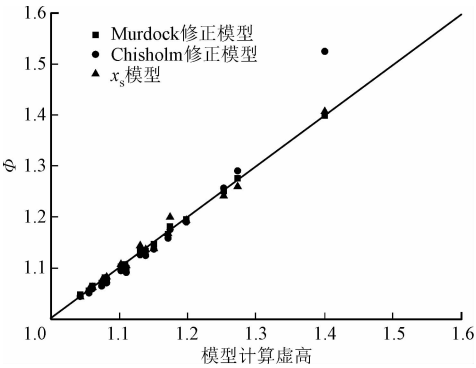


图6 参考虚高与模型计算值的比较

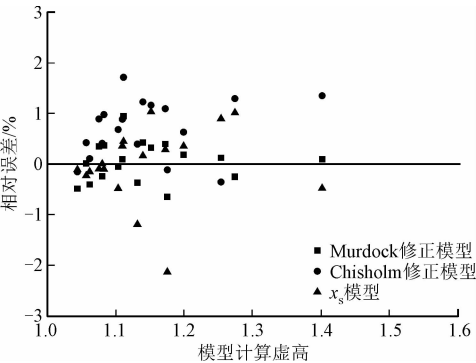


图7 不同虚高修正模型的气流量相对误差

表2为气流量相对误差的平均值和均方差。可以看出,基于本文工况修正后的 Murdock 模型的结果是最好的;结合图3和图4,对 Chisholm 模型来说,计算结果与实验值总体上存在一定的偏移,这2个模型在 $0.011<X_{L-M}<0.1$ 的工况下应用精度较高;而基于 x_s 的虚高模型,其优势是在更大的 x 范围内使得 x_s 能够与虚高值保持简单的线性关系,并且计算过程不依赖于 X_{L-M} 作为已知输入,可直接由测量参数计算虚高,简化了计算过程,具有较大的工程应用价值。但虚高计算结果的均方根误差略大,这可能是由于算法与截面含气率有较强的关联,从而对计算结果产生较大影响。

表2 气流量相对误差的平均值和均方差

模型	Murdock 修正模型	Chisholm 修正模型	x_s 修正模型
误差的平均值/%	0.051	0.704	-0.019
误差的均方差/%	0.399	0.580	0.766

5 结 论

(1)在 $0.011<X_{L-M}<0.1$ 的范围内,Murdock和 Chisholm 虚高修正模型的计算精度更高并且具有良好的线性关系,而本文提出的基于参数 x_s 的虚

高修正模型在更宽的 X_{L-M} 范围内 ($0.011 < X_{L-M} < 0.275$) 可以持续保持良好的线性关系。

(2) 基于参数 x_s 的虚高修正模型中所需参数均现场实时可测, 计算简便, 并且该模型测量误差较小, 具有较高的实用性, 更适用于工程应用。

参考文献:

- [1] American Petroleum Institute. State of the art multi-phase flow metering [M]. Washington DC, USA: API Publication, 2004: 23-25.
- [2] International Organization for Standardization. Measurement of wet gas flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits; ISO/TR 11583: 2012 [S/OL]. [2012-05-31]. <http://doi.org/10.3403/30197318>.
- [3] ASME. Wet gas flowmetering guideline: MFC-19G-2008 [Z]. New York, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 57-58.
- [4] 薛君昭. 湿气管道内腐蚀剩余寿命预测 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 25-26.
- [5] FALCONE G, HEWITT G, ALIMONTI C. Multi-phase flow metering: principles and applications [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2009: 19-20.
- [6] CHISHOLM D. Research note: two-phase flow through sharp-edged orifices [J]. Archive: Journal of Mechanical Engineering Science, 1977, 19(3): 128-130.
- [7] DE LEEUW R. Liquid correction of Venturi meter readings in wet gas flow [C]//Proceedings of the 1997 North Sea Flow Measurement Workshop. London, UK: Energy Institute, 1998: 153161.
- [8] JAMES R. Metering of steam-water two-phase flow by sharp-edged orifices [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1965, 180(1): 549-572.
- [9] LIN Zonghu. Two-phase flow measurements with sharp-edged orifices [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1982, 8(6): 683-693.
- [10] MURDOCK J. Two-phase flow measurement with orifices [J]. Journal of Fluids Engineering, 1962, 84(4): 419-432.
- [11] SMITH R, LEANG J. Evaluations of correlations for two-phase, flowmeters three current-one new [J]. Journal of Engineering for Power, 1975, 97(4): 589-593.
- [12] STEVEN R, HALL A. Orifice plate meter wet gas flow performance [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2009, 20(4/5): 141-151.
- [13] STEVEN R N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2002, 12(5/6): 361-372.
- [14] 华陈权, 王昌明, 耿艳峰, 等. 槽式孔板低压湿气计量修正模型 [J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2010, 34(1): 91-95.
HUA Chenquan, WANG Changming, GENG Yanfeng, et al. Metering correlation of slotted orifice for low-pressure wet gas flow [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2010, 34(1): 91-95.
- [15] 谭晋飞. 湿气流量测量虚高特性实验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014: 30-33.
- [16] 郑永建, 王镇岗, 潘艳芝, 等. 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.
ZHENG Yongjian, WANG Zhengang, PAN Yanzhi, et al. Study on wet gas flowrate measurement method based on venturi and gamma ray technology [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(9): 117-122.
- [17] 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.
- [18] 徐英, 张强, 于磊, 等. 利用双差压式节流装置测量湿气 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1840-1847.
XU Ying, ZHANG Qiang, YU Lei, et al. Wet gas metering using double differential pressure device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(8): 1840-1847.
- [19] 张强, 徐英, 张涛. 基于长喉径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.
- [20] CHARLES B, WALT S, JOSH K. Experimental wet gas data for a Herschel style Venturi [R]. Nunn, Colorado, USA: Colorado Engineering Experiment Station Inc., 1997.
- [21] PAN Yanzhi, MA Yugao, HUANG Shanfang, et al. A new model for volume fraction measurements of horizontal high-pressure wet gas flow using gamma-based techniques [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 96: 311-320.

(编辑 亢列梅)