

研究简报

利用 U 形管测量低压环雾状流与 液束环状流体积含气率

方立德, 张 涛, 徐 英, 姜庆勇
(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

关键词: U 形管; 气液两相流; 体积含气率; 流动密度

中图分类号: O 359.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 05-1131-05

Gas volume fraction metering with U tube in low pressure annular-mist and wispy annular two-phase flow

FANG Lide, ZHANG Tao, XU Ying, JIANG Qingyong

(School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A measurement model of gas volume fraction (GVF) was deduced based on the energy equation, and the relationship of friction pressure drop between two vertical sections of U tube was considered. The measurement errors were investigated through experiment under low pressure annular-mist and wispy annular two-phase flow. The effects of gas mass friction, gas volume friction and flux density on gas volume fraction were analyzed and gas volume fraction was corrected with flux density. This correction improved the accuracy of gas volume fraction, and the correction method was verified through another independent test.

Key words: U tube; gas-liquid two-phase flow; gas volume fraction; flux density

引 言

气液两相流的含气率和含水率是两相流研究中的重要参数, 目前国内外对两相流相含率的测量多采用射线衰减法、电容法、电导法、微波法、光纤探针及电导探针法等^[1-6]。研究表明射线衰减法是确定两相流相含率比较有效的方法, 但由于射线的辐射而使这种技术的应用受到一定限制。劳力云等^[7]分析了水平管道气液两相流中空隙率对动态压降信号的影响; 张宏建等^[8]利用气液两相流差压波

动信号与空隙率之间的关系, 建立了差压波动信号均方根与空隙率的关系式, 提供了一种间接测量空隙率的方法。罗毓珊等^[9]采用一种简单的差压式测量方法进行了两相流相含率测量的研究, 该方法利用垂直管重位压降与相含率的关系进行测量, 其关键是根据不同流型拟合水平管与垂直管摩阻压降的关联式, 以消去垂直管的摩阻压降, 获得垂直管重位压降, 进而获得相含率。本文也采用差压式测量方法, 利用 U 形管垂直上升段与垂直下降段压力降与重位及摩阻压降的关系来获得相含率。

2007-10-12 收到初稿, 2008-01-08 收到修改稿。

联系人及第一作者: 方立德 (1974—), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA04Z167, 2007AA04Z180)。

Received date: 2007-10-12.

Corresponding author: FANG Lide, PhD candidate. E-mail: fanglide@sina.com

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2006AA04Z167, 2007AA04Z180).

1 测量原理

通常求相含率都是从两相流体一元稳定流动的动量方程出发, 得到两相流真实密度与截面含气率之间的关系, 但对于两相流量的测量则需要体积含气率或质量含气率, 得到截面含气率后还要寻求其与体积含气率或质量含气率的关系。本文选用能量方程进行分析, 可以直接获得体积含气率。

两相流体一元稳定流动时的能量方程^[10-13]为

$$-\frac{dP}{dz} = \rho_0 \frac{dF}{dz} + \rho_0 g \sin\theta + \frac{\rho_0 G^2}{2} \frac{d}{dz} \left[\frac{(1-x)^3}{\rho_l^2 (1-\alpha)^2} + \frac{x^3}{\rho_g^2 \alpha^2} \right] \quad (1)$$

可见, 压力降由 3 部分构成: 摩阻压降、重位压降、加速压降, 即

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{dP_f}{dz} + \frac{dP_g}{dz} + \frac{dP_a}{dz} \quad (2)$$

理想情况下可以认为, 摩阻压降的方向与流动方向相反。实际中的两相流动与分相流模型有差别, 可以通过实验予以修正。

对于 U 形管垂直上升段和下降段, 当流动状态为等截面直管内的稳定流动时, 加速压降可以忽略, 摩阻压降在 U 形管垂直上升段和下降段方向是相反的, 假设其大小相等, 则可以通过代数运算将摩阻压降消去, 从而获得重位压降。如图 1 所示。

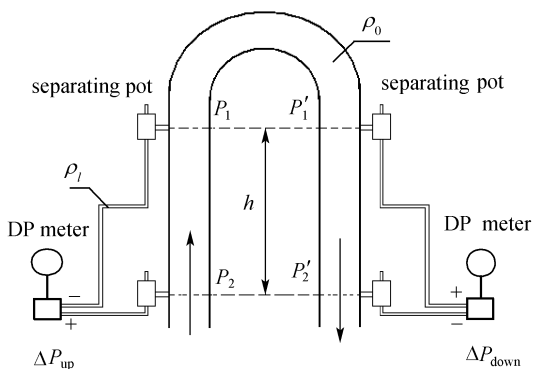


图 1 U 形管测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of U tube

取流动方向为压降的正方向, 得

$$\Delta P_{up} = P_2 - P_1 - \rho_l g h = \Delta P_{f,up} + \Delta P_{g,up} + \Delta P_{a,up} - \rho_l g h \quad (3)$$

$$\Delta P_{down} = P'_1 + \rho_l g h - P'_2 = \Delta P_{f,down} - \Delta P_{g,down} + \Delta P_{a,down} + \rho_l g h \quad (4)$$

假设两侧的摩阻压降及重位压降大小相等, 并忽略

加速压降, 则

$$\Delta P_g = \frac{\Delta P_{up} - \Delta P_{down} + 2\rho_l g h}{2} \quad (5)$$

$$\Delta P_g = \rho_0 g h = [\rho_g \beta + \rho_l (1 - \beta)] g h \quad (6)$$

则体积含气率为

$$\beta = \frac{\rho_l - \frac{\Delta P_{up} - \Delta P_{down} + 2\rho_l g h}{2g h}}{\rho_l - \rho_g} \quad (7)$$

2 实验系统及参数

实验在天津大学低压油气水三相流实验装置上进行 (图 2)。



图 2 实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of TJU multiphase flow loop

实验参数如下: U 形管两侧管段的取压距离为 0.5 m; 实验压力为 0.02~0.2 MPa; 工质温度为 20~30℃; 质量含气率为 0.15~1; 体积含气率为 0.95~1; 气相表观速度为 10~35 m·s⁻¹; 液相表观速度为 0.002~0.2 m·s⁻¹。

3 实验结果与分析

3.1 体积含气率测量误差分析

根据实验测得的压差, 由式 (7) 可求得体积含气率, 标准体积含气率与质量含气率可通过三相流装置的标准表获得。体积含气率的测量误差见图 3。

从图 3 可以看出, 体积含气率测量误差随质量含气率 (GMF) 增加而减小, 误差曲线近似由两条直线组成, 质量含气率在 0.4~0.5 范围内, 曲线有拐点, 当质量含气率 > 0.5 时, 体积含气率误差较小, 反之则较大。结合实验流型分析发现, 在质量含气率 > 0.5 时, 流型为环雾状流, 质量含气率 < 0.5 时, 流型为混块状流。环雾状流动时, U 形管两管段内流型基本一致, 因此前面对摩阻压降的假设近似成立; 而当流型为混块状流时, U 形

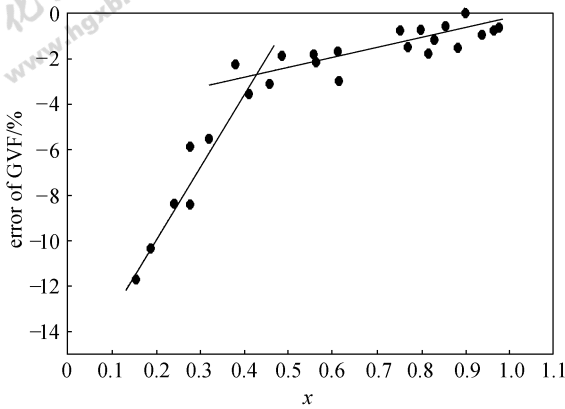


图 3 体积含气率测量误差与质量含气率的关系曲线

Fig. 3 Effect of GMF on error of measured GVF

管垂直上升段与垂直下降段内流型差别较大，摩阻压降大小不等，造成测量误差增大。所以要准确测量体积含气率应该根据不同流型确定 U 形管垂直上升段与垂直下降段摩阻压降的关联式，进而修正式 (7)。罗毓珊等^[9]采用这种方法取得了一定的效果。但采用这种方法需要先进行在线流型识别，而准确的在线流型识别目前仍具有一定困难，对于不同流型的过渡过程的判别则更加困难^[14-17]。因此本文没有采用这种方法进行修正。

3.2 体积含气率修正

通过研究体积含气率测量误差与质量含气率、体积含气率、两相流体的流动密度等参数的关系发现，体积含气率测量误差与流动密度之间有较好的线性关系 (图 4)。

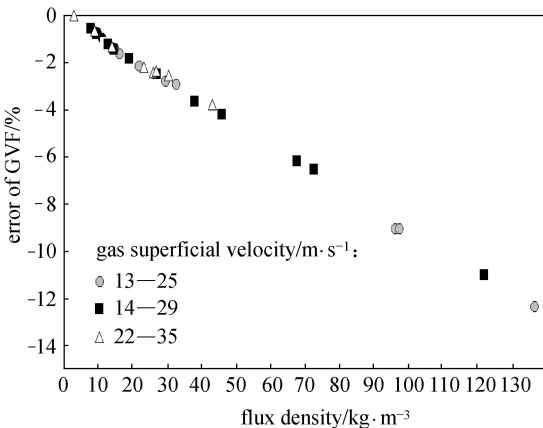


图 4 体积含气率测量误差与流动密度的关系曲线

Fig. 4 Effect of flux density on error of measured GVF

图 4 所示为体积含气率测量误差与流动密度的关系曲线，测量误差随流动密度的增加呈负线性增加，其线性度近似为 1，并且在不同的流速下及两

种不同的实验流型下，曲线互相重合，这说明体积含气率测量误差与流动密度之间是线性单值函数。

这种线性关系产生的原因主要是因为因为在低压下，环雾状流动中体积含气率都很高，通常都在 95% 以上，即标准体积含气率变化很小，这时，可近似认为是常数。因此，平均密度测量值 [式 (8)] 与体积含气率相对误差 [式 (9)] 都只是体积含气率测量值的线性函数，故平均密度与体积含气率测量相对误差 (E_{GVF}) 之间也为近似线性关系。

$$\rho_0 = \rho_g \beta_m + \rho_l (1 - \beta_m) \quad (8)$$

$$E_{GVF} = (\beta_m - \beta) / \beta \quad (9)$$

这实际上提供了一种测量小范围变化的信号的一种方法。首先选择一个与被测量有关的容易测得的量，求出该量与被测量之间的相对误差。再分析该量与相对误差之间的关系，如果是比较固定的线性关系。则可以通过线性拟合求出相对误差，反过来修正测量结果，使测量精度提高。本文即采用这种方法来修正体积含气率测量值。

式 (10) 即为体积含气率测量误差与流动密度的拟合关系式

$$E_{GVF} = 0.17262 - 0.09131\rho_0 \quad (10)$$

修正的体积含气率可通过式 (11) 求得

$$\beta_c = \beta_m / (1 + E_{GVF} / 100) \quad (11)$$

图 5 为修正体积含气率测量误差与质量含气率关系。可见，通过简单的线性关系式修正后测量误差明显减小，都在 $\pm 0.35\%$ 以内。

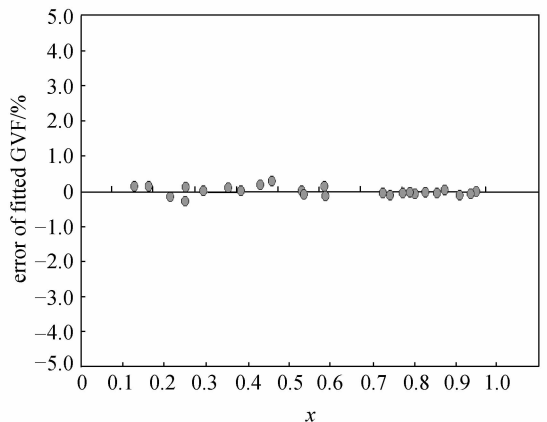


图 5 修正后体积含气率的测量误差

Fig. 5 Measurement error of correction GVF

3.3 验证

为了验证通过流动密度测量值修正体积含气率测量值的方法是否具有通用性，在实验装置上进行

了独立实验，该次实验选取压力分别为 0.02、0.05、0.10、0.20 MPa，每个压力下调节不同的气相流速及液相含率，实验流型为环雾状流、液束环状流、混块状流。实验结果如图 6、图 7 所示。

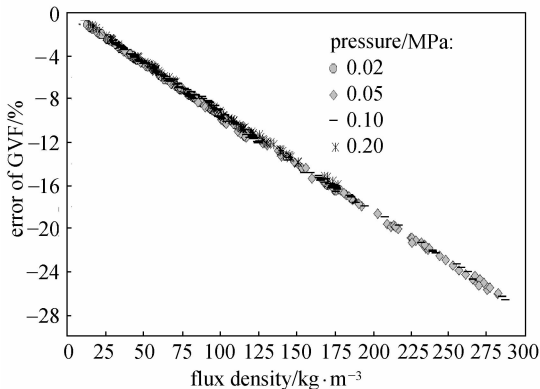


图 6 体积含气率测量误差与流动密度的关系验证
Fig. 6 Effect of flux density on error of measured GVF in another independent experiment

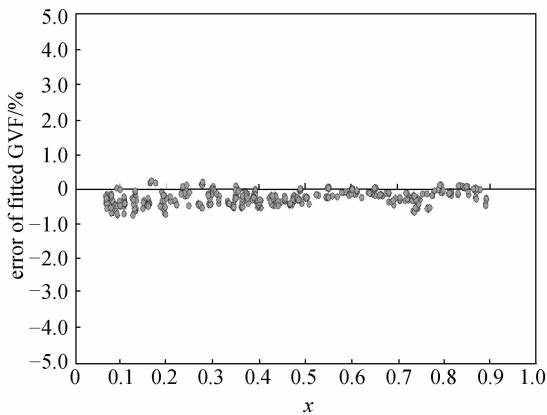


图 7 修正体积含气率的误差验证
Fig. 7 Measurement error of correction GVF in another independent experiment

图 6 为体积含气率测量误差与流动密度的关系验证曲线，从图中可看出体积含气率测量误差与流动密度测量值之间呈明显的线性关系，并且在不同的压力、流速及不同的实验流型下曲线互相重合，体积含气率测量误差与流动密度测量值之间是线性单值函数。图 7 是修正体积含气率的误差验证曲线，将式 (10)、式 (11) 用于新测的实验数据求得修正体积含气率的误差在 $-0.65\% \sim +0.2\%$ 之间，并且有 90% 以上的误差点在 $\pm 0.5\%$ 以内。图 6、图 7 是直接实验瞬时值绘制没有做平均处理，这更能说明通过该方法修正体积含气率是可行的。

4 结 论

通过以上分析得出，流动密度测量值与体积含气率测量误差之间有良好的线性关系，在气相为连续相、液相为离散相的流动状态下，气相的流速及实验流型对这种线性关系影响很小，体积含气率测量误差与流动密度测量值之间是线性单值函数。利用 U 形管测量体积含气率，并通过流动密度测量值进行修正，可以获得较高的精度，误差在 $-0.65\% \sim +0.5\%$ 之间。该方法适用于体积含气率较高，且变化范围较小的工况条件。

符 号 说 明

- G ——混合物的质量流速， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- F ——摩擦消耗的能量，J
- h ——测量段高度，m
- $\Delta P_{\text{down}}, \Delta P_{\text{up}}$ ——分别为下降段、上升段测得的压差，Pa
- x ——质量含气率 (GMF)，%
- α ——截面含气率，%
- β ——体积含气率 (GVF)，%
- β_c ——体积含气率修正值，%
- β_m ——体积含气率测量值，%
- ρ_g, ρ_l ——分别为气相、液相的密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- ρ_0 ——两相流体流动密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

References

- [1] Chen Bin (陈斌), Fu Yuchen (傅宇晨), Guo Liejin (郭烈锦), Zhang Ximin (张西民). Experimental investigation of distribution of void fraction between horizontal tube bundle. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, **54** (3): 316-320
- [2] Zhao Xin (赵鑫), Jin Ningde (金宁德), Li Weibo (李伟波). Soft measurement method of phase volume fraction for oil/water two-phase flow. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (10): 1875-1879
- [3] Huang Zhiyao, Wang Baoliang, Li Haiqing. Application of electrical capacitance tomography to the void fraction measurement of two-phase flow. *IEEE Transactions on Instrum. Meas.*, 2003, **52** (1): 7-12
- [4] Li Qiangwei (李强伟), Huang Zhiyao (黄志尧), Wang Baoliang (王保良), Li Haiqing (李海青). Void fraction measurement of oil-gas two-phase flow based on ant system and electrical capacitance tomography. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2007, **58** (1): 61-66
- [5] Huang Zhiyao (黄志尧), Wang Baoliang (王保良), Li

- Haiqing (李海青). Applications of electrical capacitance tomography technique to flow pattern display and voidage measurement of two-phase flow. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*(化工学报), 2001, **52** (11): 1035-1038
- [6] Wang Wuchang (王武昌), Li Yuxing (李玉星), Tang Jianfeng (唐建峰), Yu Xichong (喻西崇). Average holdup in multiphase pipelines with low loads of liquids. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (6): 1005-1008
- [7] Lao Liyun (劳力云), Zhang Hongjian (张宏建), Wu Yingxiang (吴应湘), Li Donghui (李东晖), Zheng Zhichu (郑之初). Influence of void fraction on dynamic characteristics of pressure drop fluctuation in horizontal gas-liquid two-phase flow. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2000, **51** (4): 547-551
- [8] Zhang Hongjian (张宏建), Yue Weiting (岳伟挺), Ma Longbo (马龙博), Zhou Hongliang (周洪亮). Relationship between fluctuating differential pressure and void fraction of gas-liquid two-phase flow in Venturi tube. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2005, **56** (11): 2102-2107
- [9] Luo Yushan (罗毓珊), Li Aihua (李爱华), Chen Tingkuan (陈听宽), Du Shejiao (杜社教). Investigation on measurement of phase fraction in two-phase flow using pressure drop method. *Journal of Engineering Thermophysics* (工程热物理学报), 2004 (5): 789-792
- [10] Hewitt G F. Measurement of Two-phase Flow Parameters. London: Academic Press, 1978
- [11] Chen Zhihang (陈之航), Cao Bolin (曹柏林), Zhao Zaisan (赵在三). Gas-Liquid Two-phase Flow and Heat Transfer (气液两相流动与传热). Beijing: Mechanical Industry Press, 1983: 46-51
- [12] Lin Zonghu (林宗虎), Wang Shuzhong (王树众), Wang Dong (王栋). Gas-Liquid Two-phase Flow and Boiling Heat Transfer (气液两相流动与沸腾传热). Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003: 167-186
- [13] Luo Yi (罗翼). The study of wet gas measurement technology for applications: Venturi tube [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005
- [14] Woldeesemayat M A, Ghajar A J. Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in horizontal and upward inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 2007, **33** (4): 347-370
- [15] Roig V, de Tournemine A L. Measurement of interstitial velocity of homogeneous bubbly flows at low to moderate void fraction. *Journal of Fluid Mechanics*, 2007, **572** (10): 87-110
- [16] Kuwahara T, Yamaguchi H. Void fraction measurement of gas-liquid two-phase flow using magnetic fluid. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2007, **21** (1): 173-180
- [17] Wongwises S, Pipathattakul M. Flow pattern, pressure drop and void fraction of two-phase gas-liquid flow in an inclined narrow annular channel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, **30** (4): 345-354