

# 一种新的低含液率气液两相流槽式孔板压降倍率相关式

邢兰昌, 耿艳峰, 孙苗苗

(中国石油大学信息与控制工程学院, 山东省 东营市 257061)

## A New Correlation of Slotted Orifice for Gas-liquid Two-phase Flow With Low Liquid Fractions

XING Lan-chang, GENG Yan-feng, SUN Miao-miao

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China)

**ABSTRACT:** For the purpose of accurately measuring flow rates of wet gas, the multiplier correlation for slotted orifice was studied based on experimental data and some theoretical results. Qualitative conclusions about how two-phase multipliers changing with Lockhart-Martinelli parameter, gas Froude number and beta ratio were made for slotted orifices with beta ratios equal to 0.50, 0.60 and 0.75. A new correlation for slotted orifice was put forward, and the performance of existed correlations for the standard orifice plate and the new correlation was compared and analyzed in detail. The proposed correlation shows a more accurate calculation results, and the mean relative errors are all less than 4% for slotted orifice with different beta ratios.

**KEY WORDS:** gas-liquid two-phase flow; two-phase multiplier; differential pressure correlation; slotted orifice; metering technology

**摘要:** 为准确测量凝析天然气流量, 对低含液率气液两相流条件下槽式孔板的压降相关式进行了实验研究。总结了孔径比为 0.50、0.60 和 0.75 的槽式孔板气相压降倍率  $\phi_G$  随 Lockhart-Martinelli 参数  $X$ 、气体 Froude 数  $Fr_g$  和孔径比  $\beta$  变化的规律; 将  $X$ 、 $Fr_g$  和  $\beta$  作为变量对 Murdock 相关式进行修正, 提出了一种新的适用于不同孔径比槽式孔板的压降相关式, 并与前人建立的标准孔板压降相关式进行了对比分析。结果表明: 对于 3 种不同孔径比的槽式孔板, 所提出的相关式流量计算精度最高, 平均相对误差均小于 4%。

**关键词:** 气液两相流; 两相压降倍率; 压降相关式; 槽式孔板; 计量技术

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(60672003); 山东省自然科学基金项目(Y2006F49)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60672003).

## 0 引言

近年来, 我国陆续在渤海、黄海和南海等地发现大型油气藏, 提出了凝析天然气的计量问题。该问题属于特殊的多相流测量范畴, 现有的计量技术一般将其简化为低含液率气液两相流测量问题<sup>[1]</sup>。

采用单相流仪表和两相流测试模型相结合的测量方法是解决两相流计量问题的重要技术途径之一。标准节流元件是测量单相流量的常用传感器, 由于其结构简单、无可动部件、使用方便、运行可靠, 因而也被用于气液两相流测量的研究中。基于标准孔板测量气液两相流的研究有: Murdock<sup>[2]</sup>和 James<sup>[3]</sup>分别建立了分离流和改进的均相流模型, 林宗虎<sup>[4]</sup>和王文然<sup>[5]</sup>分别用两相密度比修正了分离流和均相流模型; 申国强<sup>[6]</sup>基于林宗虎关系式、仲朔平<sup>[7]</sup>基于分离流模型和相分离模型均应用差压的稳态值和差压方根的相对方差进行了流量和质量含气率的测量。基于文丘里管的研究有: Steven<sup>[8]</sup>基于改进的文丘里管提出了进行凝析天然气计量的 Steven 压降相关式; Xu<sup>[9]</sup>定义了修正的差压方根的相对方差, 拟合了其和质量含气率的关系式, 结合林宗虎关系式来测量凝析天然气流量和质量含气率; 张宏建<sup>[10-11]</sup>研究了差压方根的相对方差与空隙率的关系, 并利用空隙率和差压稳态值相结合实现分相流量的测量。依据测试模型所采用信号的性质以及输出参数的数量, 以上路线又可分为单参数静态测量和双参数动态测量, 其中前者是后者的研究基础。

气液两相流条件下, 文丘里的缩颈和标准孔板的相分离效应将会导致很大的附加阻力和差压波动, 影响测量精度; 而槽式孔板可以使液相成分自

由通过，避免了标准孔板在上下游产生积液，大大减小了标准孔板的差压波动现象，且槽式孔板较文丘里加工更加容易。

本文采用槽式孔板为节流元件，借鉴前人基于标准节流元件静态法单参数测量的研究思路，建立低含液率气液两相流条件下槽式孔板压降相关式。具体做法为：首先，对孔径比分别为 0.50、0.60 和 0.75 的槽式孔板的气相压降倍率特性进行了实验研究；然后，以影响气相压降倍率的显著因素为变量，对 Murdock 相关式进行修正，提出了适用于不同孔径比槽式孔板的低含液率气液两相流压降相关式；最后，在本文的实验条件下，比较了标准孔板相关式与本文所提出的相关式对槽式孔板测量数据的计算结果，并对误差进行了分析。

## 1 基于标准节流元件的压降相关式

### 1.1 气液分相流量的计算

标准节流元件测量单相流的基本关系式<sup>[12]</sup>为

$$W = \frac{C\varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi}{4} \beta D^2 \sqrt{2\Delta P\rho} = K\sqrt{\Delta P\rho} \quad (1)$$

式中： $W$ 为流体质量流量，kg/s； $C$ 为流出系数； $D$ 为管道内径，m； $\beta$ 为节流元件孔径比； $\varepsilon$ 为气体可膨胀性系数； $\Delta P$ 为节流元件产生的差压，kPa； $\rho$ 为流体密度，kg/m<sup>3</sup>；气相压降倍率的定义式<sup>[2]</sup>为：

$$\Phi_G = \sqrt{\Delta P_{TP}/\Delta P_G} \quad (2)$$

式中： $G$ 和 $TP$ 分别表示气相和气液两相的参数。

为计算两相流压降与气相单独流过时的压降之间的关系，假定 $\Delta P_{TP}$ 全部由气相产生，由式(1)可得对应的气相流量：

$$W'_G = K_{TP}\sqrt{\Delta P_{TP}\rho_G} \quad (3)$$

而真实的气相质量流量表示为

$$W_G = K_G\sqrt{\Delta P_G\rho_G} \quad (4)$$

对低含液率气液两相流， $K_{TP}\approx K_G$ ，式(3)除以式(4)得：

$$W'_G/W_G = \sqrt{\Delta P_{TP}/\Delta P_G} \quad (5)$$

结合式(5)和式(2)得：

$$W_G = W'_G/\Phi_G \quad (6)$$

若质量含气率 $x$ 已知，则液相质量流量 $W_L$ 为

$$W_L = W_G[(1-x)/x] \quad (7)$$

式中下标 $L$ 表示液相参数。可见，为得到气液分相流量，需研究 $\Phi_G$ 的计算式。

### 1.2 压降倍率相关式

James<sup>[3]</sup>在实验的基础上将均相流模型平均密

度计算式中的 $x$ 的指数由 1.0 改为 1.5；Кремльський<sup>[13]</sup>假定在孔板入口处气、液相速度相同，低压条件下，在孔板后最小流束截面处气相速度比液相速度大的多，推导得到的相关式为均相流模型相关式乘以一个 $x$ 的线性表达式。

Smith & Leung<sup>[14]</sup>引入阻塞系数 $BF$ 来表示液相对气相的阻塞程度， $BF$ 为由实验数据回归的 $x$ 的表达式；基于两相流的分离流模型，Murdock<sup>[2]</sup>假设两相流体完全分开地流过孔板，其相关式将 $\Phi_G$ 与 Lockhart-Martinelli 参数 $X$ 相关联：

$$\Phi_G = 1 + 1.26X \quad (8)$$

$$X = \sqrt{\Delta P_L/\Delta P_G} = [(1-x)/x]\sqrt{\rho_G/\rho_L} \quad (9)$$

同样基于两相流的分离流模型，并考虑气液相之间的相互作用以后，Chisholm<sup>[15-16]</sup>假设两相流体在流过孔板时作分层流动，在推导公式时将两相间的剪切力考虑在内，所得到的相关式既包含了 $X$ 的影响，又将压力 $P$ 的影响独立出来，其影响通过气液相密度比 $\rho_G/\rho_L$ 来体现；林宗虎<sup>[4]</sup>基于和Chisholm相同的考虑，采用与Murdock相关式相同的型式，其相关式利用两相密度比的多项式函数拟合Murdock相关式 $X$ 的系数；在前人考虑 $X$ 和 $P$ 对 $\Phi_G$ 影响的基础上，De Leeuw<sup>[8]</sup>将气相流量以气体Froude数 $Fr_g$ 为变量引入相关式，采用Chisholm相关式的型式，并将 $\rho_G/\rho_L$ 和 $\rho_L/\rho_G$ 的指数 $n$ 与 $Fr_g$ 进行关联，考虑了流型对压降的影响，其中 $Fr_g$ 的定义为：

$$Fr_g = (U_{sg}/\sqrt{gD})\sqrt{\rho_G/(\rho_L - \rho_G)} \quad (10)$$

式中： $U_{sg}$ 为气相折算速度，m/s； $g$ 为重力加速度，m/s<sup>2</sup>； $D$ 为管道内径，m。

Steven<sup>[8]</sup>应用曲面拟合技术获得 $\Phi_G$ 与 $X$ 和 $Fr_g$ 之间的关系式， $X$ 和 $Fr_g$ 的系数进一步以 $\rho_G/\rho_L$ 为变量通过多项式拟合得到，即系数随着 $P$ 的变化而变化。

即基于标准节流元件，前人总结了影响节流件两相压降倍率的主要因素，如：压力、Lockhart-Martinelli参数和气相流量，这些因素对槽式孔板 $\Phi_G$ 的影响仍然值得进一步研究，而且现有的 $\Phi_G$ 计算式中所包含的变量最多的只有 $\rho_G/\rho_L$ 、 $X$ 和 $Fr_g$  3 个， $\beta$ 却没有作为计算式的独立变量，但是节流件孔径比对 $\Phi_G$ 有显著的影响<sup>[17]</sup>。

## 2 基于槽式孔板的压降相关式

### 2.1 两相流实验

以空气和水为实验工质的气液两相流实验在中国石油大学大型多相流实验环道上进行，有关实

验装置参数范围参见文献[18-19]。实验装置能够控制气液两相流以稳定的流量进行混合,流经足够长的流型发展段后进入测试段,流经测试段的两相流体经气液分离器进行分离,分离后的气体排空,液相循环利用。

测试段是由 $\beta$ 为0.50、0.60和0.75的槽式孔板、相应的取压装置和压力温度等测量仪表组成,仪表的精度均为0.5%;气液相流量测量分别采用金属转子流量计和质量流量计,精度分别为1.5%和0.5%;数据采集系统采用NI公司的虚拟仪器采集系统。

实验范围:  $P$ : 390~420 kPa;  $T$ : 5~15 °C;  $W_G$ : 200~800 kg/h;  $x$ : 0.10~0.80;  $X$ : 0.02~0.80;  $Fr_g$ : 0.50~2.00; 流型: 分层波浪流和环状流。

针对3组孔径比的槽式孔板分别进行了3组实验,1组实验过程中,实验点是在控制气相流量一定的条件下变化液相流量得到的。其中1组气液流量的变化参见图1。

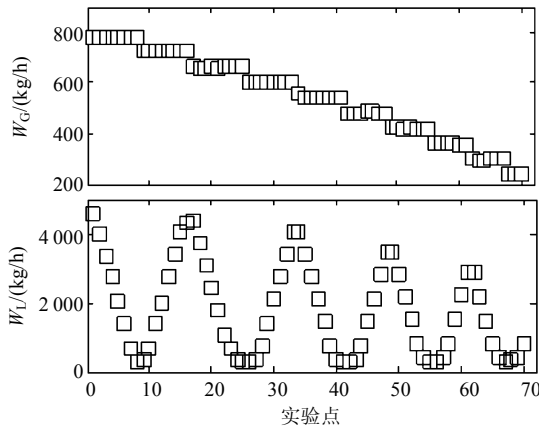


图1 气/液流量的变化

Fig. 1 Changes of gas/liquid flow rates

## 2.2 压降倍率相关式

在本文的实验条件下, $P$ 的变化范围较小,而且 $X$ 和 $Fr_g$ 已将 $\rho_G$ 包含在定义式中,所以本文没有将 $P$ 的影响作为一独立因素,着重研究 $X$ 、 $Fr_g$ 和 $\beta$ 对 $\Phi_G$ 的影响,并将它们作为 $\Phi_G$ 计算式的3个独立变量。

利用式(1)和 $W_G$ 测量值求得 $\Delta P_G$ ,将 $\Delta P_G$ 与 $\Delta P_{TP}$ 测量值代入式(2)即可求得 $\Phi_G$ 的实验值;利用 $P$ 和 $T$ 的测量值计算 $\rho_G$ ,在 $x$ 和 $\rho_L$ 已知的条件下,由式(9)和(10)分别计算得到 $X$ 和 $Fr_g$ ,分析 $X$ 、 $Fr_g$ 和 $\beta$ 对 $\Phi_G$ 的影响。

图2为不同 $Fr_g$ 和 $\beta$ 条件下槽式孔板 $\Phi_G$ 随 $X$ 变化的规律,图中选取了 $\beta=0.75$ 和0.50的部分实验工况,其中,对于相同气相流量的实验点,用实线或虚线将相邻的两点连接。

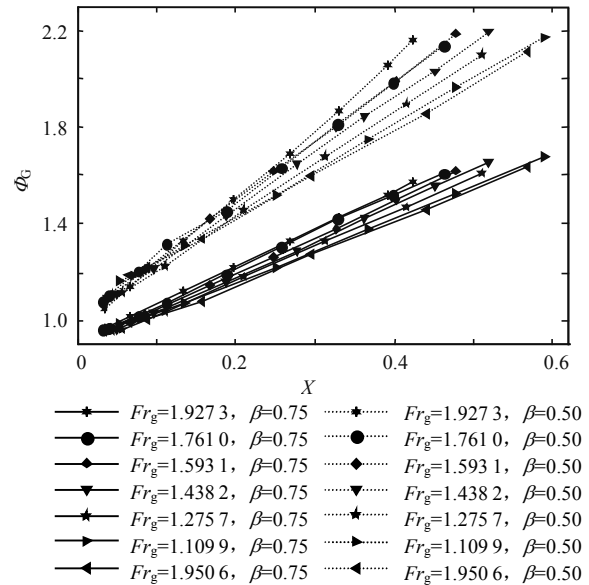


图2 槽式孔板的气相压降倍率特性

Fig. 2 Two-phase multiplier characteristics of slotted orifice

由图2可见:

(1)  $Fr_g$ 相同时,  $\Phi_G$ 随 $X$ 增大而增大,且从图中相邻点之间连线来看,  $\Phi_G$ 与 $X$ 呈近似线性关系,此结果与Murdock结论一致,所以本文对式(8)进行修正。

(2) 若对 $\Phi_G$ 与 $X$ 的关系进行线性拟合,拟合直线的斜率受到 $\beta$ 和 $Fr_g$ 显著的影响。 $X$ 相同时,斜率随 $\beta$ 的增大而减小,随 $Fr_g$ 的增大而增大,而Murdock相关式中,斜率值为一常数1.26,所以考虑应用 $\beta$ 和 $Fr_g$ 对斜率进行修正。

(3)  $\Phi_G$ 与 $X$ 拟合直线在 $\Phi_G$ 轴的截距明显受到 $\beta$ 的影响, $\beta=0.50$ 时截距接近于1, $\beta=0.75$ 时截距小于1, $Fr_g$ 对截距的影响很小,而Murdock相关式,截距值为一常数1,所以考虑应用 $\beta$ 对截距项进行修正。

对于 $\beta=0.60$ 的孔板,以上关系式(1)和(2)依然成立;但是关系式(3)中 $\beta$ 对截距的影响方面, $\beta=0.60$ 时小于 $\beta=0.75$ 时的截距。

综上所述, $\Phi_G$ 与 $X$ 之间的关系与基于标准孔板的Murdock相关式有很大的相似性,而且对于槽式孔板, $\beta$ 同时显著影响着 $\Phi_G$ 与 $X$ 拟合直线的斜率和在 $\Phi_G$ 轴的截距, $Fr_g$ 仅显著影响其斜率。

基于以上定性的结论,对Murdock相关式进行相应的修正。进一步整理数据表明,将 $Fr_g$ 的影响以其平方根为变量引入效果较好,从而得到槽式孔板的 $\Phi_G$ 计算式:

$$\Phi_G = C_x (1 + (\sqrt{Fr_g} / \beta) X) \quad (11)$$

修正系数 $C_x$ 以 $\beta$ 为变量,即上式中显含了 $\beta$ 、 $X$

和 $Fr_g$ 等变量。应用本文实验数据按照式(11)的型式进行非线性回归，得到

$$C_x = 12.60\beta^2 - 16.01\beta + 5.81 \quad (12)$$

### 3 典型相关式流量计算误差的比较分析

槽式孔板和标准孔板的工作原理相同，所以本文仅对基于标准孔板所提出的几种典型的相关式与本文提过相关式进行比较，即：均相流模型，James 相关式，Кремльський 相关式；分相流模型，Smith & Leung 相关式，Murdock 相关式，Chilsholm 相关式和林宗虎相关式。

均相和分相流模型是纯理论流动模型，在一定条件下是适用的；其他均是对理想模型所进行的修正，即在理论上结合实验验证得到的半经验关系式，其实验参数范围与本文实验有所重叠。

为比较各个相关式在计算气液分相流量时的精度，所采用的误差指标为：

相对误差

$$E_{Ri} = (W_{Ci} - W_{Ei}) / W_{Ei} \times 100\% \quad (13)$$

平均相对误差

$$E_{MR} = \sum_{i=1}^N |E_{Ri}| / N \times 100\% \quad (14)$$

比例数

$$P_5 = N_5 / N \times 100\% \quad (15)$$

比例数

$$P_{10} = N_{10} / N \times 100\% \quad (16)$$

式中： $i$ 为第 $i$ 个实验点； $W_{Ci}$ 为气相质量流量计算值，kg/s； $W_{Ei}$ 为气相质量流量实验值，kg/s； $|E_{Ri}|$ 为 $E_{Ri}$ 的绝对值； $N$ 为实验点总数； $N_5$ 为 $|E_{Ri}| < 5\%$ 的实验点数； $N_{10}$ 为 $|E_{Ri}| < 10\%$ 的实验点数。

图3比较了各个相关式对孔径比为 $\beta=0.50、0.60$ 和 $0.75$ 槽式孔板的实验数据的计算结果，图中误差 $E_R$ 为气相流量相对误差。

由图3可见：

(1) 对于3种孔径比的工况，本文所提出的相关式计算精度均最高；总体上，基于分相流模型的相关式精度高于基于均相流模型的相关式。由于前人提出的相关式均是基于各自的实验数据建立的，节流件、压力、温度以及气液流量范围的不同均是产生较大误差的原因。尤其是这些关系式并没有将 $\beta$ 作为变量，所以其计算误差大小及分布受到孔径比的显著影响，如精度较高的Murdock关系式，对于 $\beta=0.75$ 的工况， $E_{MR} < 5\%$ ，而对于 $\beta=0.50$

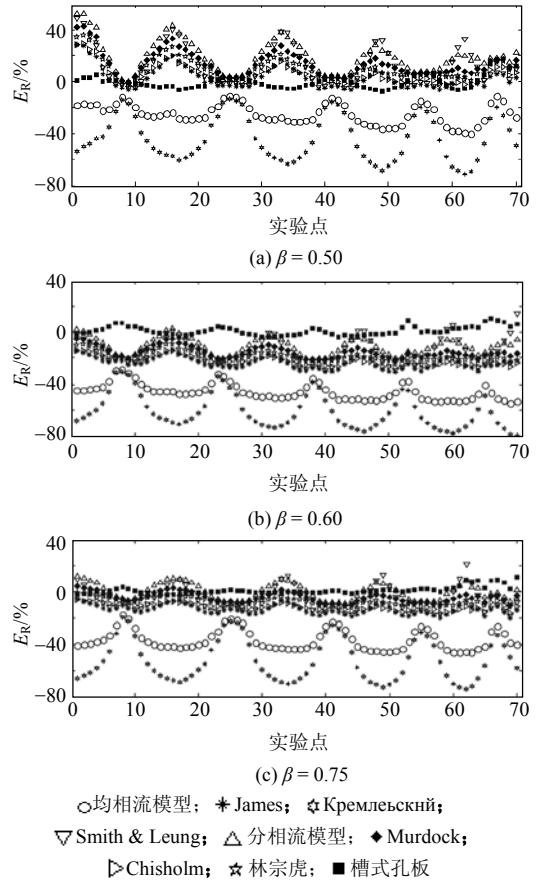


图3 标准孔板与槽式孔板压降相关式计算误差比较  
Fig. 3 Error comparison between differential pressure correlations for standard orifice plate and slotted orifice

和 $0.60$ 的工况， $E_{MR} > 15\%$ ； $\beta=0.50$ 时 $E_R > 0$ ， $\beta=0.60$ 和 $0.75$ 时 $E_R$ 几乎均小于 $0$ 。

(2) 对于 $\beta=0.50$ 工况，本文所提出的相关式 $E_{MR} < 4\%$ ， $P_5 > 72\%$ ， $P_{10} > 92\%$ ，其他相关式仅有James相关式计算精度相对较高， $E_{MR} < 7\%$ ， $P_{10} > 82\%$ 。

在孔径比较小时，槽式孔板总的等效开孔面积较小，气液两相流体在通过槽式孔板时相间作用力加大，孔板表面的气液湍流和混拌现象加剧，使槽式孔板处流动条件接近于均相流模型假设，James相关式是基于对均相流模型进行修正得到的，所以在此种工况下，相对于其他相关式其流量计算精度较高。

(3) 对于 $\beta=0.75$ 工况，本文所提出的相关式 $E_{MR} < 2\%$ ， $P_5$ 为 $90\%$ ， $P_{10} > 98\%$ 。计算精度仅次于它的是Murdock相关式，其 $E_{MR} < 5\%$ ， $P_{10} > 97\%$ 。分相流模型和林宗虎相关式的 $E_{MR}$ 也分别达到 $5.4\%$ 和 $7.1\%$ 。

在孔径比较大时，槽式孔板每个槽孔的面积及总的等效开孔面积均较大，推测其测量特性接近于标准孔板，所以基于标准孔板所建立的相关式在一

定条件下也适用于槽式孔板；在文中的实验条件下，管道中出现的流型大部分为环状流，此流型条件下只有少量的液体被高速气体所挟带，大部分液体沿管壁流动，相对于小孔径比的工况，此时气液两相流体可以相对自由地通过孔径比较大的槽式孔板，孔板表面的气液湍流和混拌现象减弱，孔板处实际流动条件与分相流模型假设更接近，且本文实验结果也表明 $\phi_G$ 与 $X$ 之间呈近似线性关系。基于以上2点原因，对于较大孔径比的槽式孔板，Murdock相关式、分相流模型和林宗虎相关式的计算精度也相对较高。

(4) 各个相关式的计算误差出现不同程度的很有规律的起伏波动，槽式孔板相关式的误差波动最小，其他均较大。

结合图1观察，计算误差的波动与液相流量的高低呈现明显的一致或相反的对立关系。可见，前人所建立的相关式计算误差受到液相流量的显著影响，其因为这些相关式均是基于差压的稳态值进行计算的，而由于标准孔板的相分离效应，差压将会产生很大的波动，且有关研究发现标准孔板的差压方根的脉动幅度近似正比于液相流量<sup>[20]</sup>，而此脉动越大差压稳态值的测量精度越低；槽式孔板可以使液相成分自由通过，很大程度上减弱了相分离效应所导致的差压波动现象，但是由于两相流动本身的微观不稳定性，差压的脉动性无法从根本上消除，所以本文相关式计算误差也受其影响，但此影响相对小得多。

气液两相流的基本特性是不稳定性，压力、温度和差压等测量信号的脉动部分蕴含了大量的有用信息。文中所述均是针对测量信号稳态值进行的处理，并建立了实现单参数测量的静态模型，下一步的研究将借助各种信号处理技术，如已被用于气液两相流流型识别的Hilbert-Huang变换<sup>[21-23]</sup>和小波分析<sup>[24-25]</sup>等，目的在于提取测量信号的脉动特征，应用多传感器融合技术建立流量测量动态模型，从而结合静、动态模型以实现气液两相流双参数测量的目的，为基于槽式孔板的凝析天然气流量计计量算法的开发与完善奠定基础。

## 4 结论

基于大量的气液两相流实验，本文对孔径比分别为0.50、0.60和0.75的槽式孔板的气相压降倍率特性进行了定性和定量研究，并在此基础上对Murdock相关式进行修正，提出了适用于不同孔径

比槽式孔板的压降相关式。

与前人所提出的基于标准孔板的压降相关式相比，所提出的相关式中包含了 $\beta$ 这一变量，所以在本文实验条件下，对于3种不同孔径比槽式孔板的工况，流量计算精度均最高，误差分布均匀，平均相对误差均小于4%，大于92%的实验点的相对误差小于10%，而其他的相关式计算误差的分布受到孔径比的影响很大，而且精度相对较低。

## 参考文献

- [1] 耿艳峰, 冯叔初, 郑金吾, 等. 凝析天然气计量技术[J]. 自动化仪表, 2005, 26(8): 1-3.  
Geng Yanfeng, Feng Shuchu, Zheng Jinwu, et al. Metering technology for condensate natural gas[J]. Process Automation Instrumentation, 2005, 26(8): 1-3(in Chinese).
- [2] Murdock J W. Two-phase flow measurement with orifices [J]. Journal of Basic Engineering, 1962, 84(4): 419-433.
- [3] James R. Metering steam-water two-phase by sharp-edged orifices [J]. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, 1965, 180(23): 549-566.
- [4] Lin Zonghu. Two-phase flow measurements with sharp-edged orifice[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1992, 8(6): 683-693.
- [5] 王文然, 佟允宪, 仲朔平. 利用标准锐边孔板测量汽水两相流的实验研究[J]. 清华大学学报, 1988, 28(S2): 74-82.  
Wang Wenran, Tong Yunxian, Zhong Shuoping. Study on measurement of steam-water two-phase flow by using standard sharp-edged orifice[J]. Journal of Tsinghua University, 1988, 28(S2): 74-82(in Chinese).
- [6] 申国强, 林宗虎. 应用动态法进行气液两相流的双参数测量[J]. 计量学报, 1993, 14(2): 140-145.  
Shen Guoqiang, Lin Zonghu. A dynamic method for dual parameter measurements of gas liquid biphasic flow[J]. Acta Metrologica Sinica, 1993, 14(2): 140-145(in Chinese).
- [7] 仲朔平, 佟允宪, 王文然. 利用孔板差压噪声测量汽水两相流[J]. 清华大学学报, 1997, 37(5): 15-18.  
Zhong Shuoping, Tong Yunxian, Wang Wenran. Double parameter measurement of steam-water two-phase flow by using differential pressure noise of orifice[J]. Journal of Tsinghua University, 1997, 37(5): 15-18(in Chinese).
- [8] Steven R N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2002, 13(12): 361-372.
- [9] Xu Lijun, Xu Jian, Dong Feng, et al. On fluctuation of the dynamic differential pressure signal of Venturi meter for wet gas metering [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2003, 14(4): 211-217.
- [10] 张宏建, 岳伟挺, 马龙博, 等. 文丘里管中气液两相流差压波动信号与空隙率关系[J]. 化工学报, 2005, 56(11): 2102-2107.  
Zhang Hongjian, Yue Weiting, Ma Longbo, et al. Relationship between fluctuating differential pressure and void fraction of gas-liquid two-phase flow in Venturi tube[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2005, 56(11): 2102-2107(in Chinese).

- [11] Zhang Hongjian, Yue Weiting, Huang Zhiyao. An investigation of oil-air two-phase mass flow rate measurement using Venturi and void fraction sensor[J]. Journal of Zhejiang University(Science), 2005, 6A(4): 601-606.
- [12] 孙淮青, 王建中. 流量测量节流装置设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [13] 林宗虎, 王树众, 王栋. 气液两相流与沸腾传热[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
- [14] Smith R V, Leang J T. Evaluation of correlations for two-phase flowmeters three current - one new[J]. Journal of Engineering for Power, 1975, 97(4): 589-593.
- [15] Chisholm D. Flow of incompressible two-phase mixtures through sharp-edged orifices[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1974, 16(5): 353-355.
- [16] Chisholm D. Two-phase flow through sharp-edged orifices[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1977, 19(3): 128-130.
- [17] Steward D G, Brown G, Hodges D. Wet gas Venturi metering 者按 [C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio US, 2002.
- [18] 何利民, 郭烈锦, 陈学俊. 测量水平管道液塞速度和长度的差压波动分析法[J]. 化工学报, 2003, 54(2): 192-198.  
He Limin, Guo Liejin, Chen Xuejun. Measurement of slug velocity and length on horizontal pipeline by means of differential pressure fluctuation analysis[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2003, 54(2): 192-198(in Chinese).
- [19] 何利民, 赵庆军, 陈振瑜. 水平管段塞流液塞速度波动的非线性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 189-193.  
He Limin, Zhao Qingjun, Chen Zhenyu. Fluctuation analysis of slug velocities for two-phase slug flow in a horizontal pipe[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 189-193(in Chinese).
- [20] 佟允宪, 王文然, 仲朔平, 等. 孔板在两相流中的相分离效应与两相流湿度测量[J]. 清华大学学报, 1991, 31(3): 12-17.  
Tong Yunxian, Wang Wenran, Zhong Shuoping, et al. Phase separation effect of orifice in two-phase flow and measurement of two-phase flow humidity[J]. Journal of Tsinghua University, 1991, 31(3): 12-17(in Chinese).
- [21] Sun Bin, Zhang Hongjian, Cheng Lu, et al. Flow regime identification of gas-liquid two-phase flow based on HHT[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2006, 17(1): 24-30.
- [22] 周云龙, 王强, 孙斌, 等. 基于希尔伯特-黄变换和 Elman 神经网络的气液两相流流型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(11): 50-56.  
Zhou Yunlong, Wang Qiang, Sun Bin, et al. Applied study of Hilbert-Huang transform and Elman neural network on flow regime identification for gas-liquid two-phase flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(11): 50-56(in Chinese).
- [23] 孙斌, 周云龙, 向新星, 等. 基于经验模式分解和概率神经网络的气液两相流识别[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 72-77.  
Sun Bin, Zhou Yunlong, Xiang Xinxing, et al. Identification method of gas-liquid two-phase flow regime based on empirical mode decomposition and probabilistic neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 72-77(in Chinese).
- [24] 孙斌, 周云龙. 基于支持向量基和小波包能量特征的气液两相流流型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 93-99.  
Sun Bin, Zhou Yunlong. Identification method of gas-liquid two-phase flow regime based on support vector machine and wavelet packet energy feature[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 93-99(in Chinese).
- [25] 黄竹青. 基于小波分析的垂直上升管气液两相流流型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 26-29.  
Huang Zhuqing. Wavelet analysis of distinguish flow pattern in vertical upward gas-liquid two-phase flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 26-29(in Chinese).

收稿日期: 2007-11-20.

作者简介:

邢兰昌(1983—), 男, 硕士研究生, 专业为检测技术与自动化装置, 研究方向为气液两相流计量技术和数字信号处理 xinglanchang@163.com;

耿艳峰(1969—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为仪器仪表开发、多相流计量技术和数字信号处理;

孙苗苗(1981—), 女, 硕士研究生, 专业为检测技术与自动化装置, 研究方向为气液两相流计量技术和数字信号处理。

(责任编辑 王庆霞)