

研究简报

# 槽式孔板的低含液率气液两相流测量特性

耿艳峰<sup>1</sup>, 石 岗<sup>1</sup>, 李玉星<sup>2</sup>, 郑金吾<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国石油大学信息与控制工程学院; <sup>2</sup> 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东 东营 257061)

关键词: 槽式孔板; 计量技术; 气液两相流; 凝析天然气; 组合测量

中图分类号: O 359; TH 814

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2007) 07-1719-07

## Metering characteristics of slotted-orifice for gas-liquid two-phase flow with low liquid fractions

GENG Yanfeng<sup>1</sup>, SHI Gang<sup>1</sup>, LI Yuxing<sup>2</sup>, ZHENG Jinwu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Information & Control Engineering; <sup>2</sup> School of Architecture & Storage and Transport Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China)

**Abstract:** The slotted-orifice is a new type of flow sensor for gas-liquid two-phase flow measurement, and there is no correlation of two-phase multipliers for the slotted-orifice available. Based on the air-water two-phase flow experimental data of slotted-orifice, five typical correlations of the standard throttle device were applied to the data, and the application range and the reason for error involved from these correlations were analyzed. Based on different modeling ideas, three new correlations, which include the Lockhart-Martinelli parameter, gas pressure and gas Froude number, were proposed and used in the study of metering technology of wet gas flow. The accuracy of new correlations can meet the gas industry demands for production based metering.

**Key words:** slotted-orifice; metering technology; gas-liquid two-phase flow; wet gas; multiple measurement principle

### 引 言

近 30 年来, 油气田开发的主体从陆上转移到自然条件相对恶劣的海上和沙漠, 从大型集中分布的油气田转向小型边际以及卫星油气田。油气水混相输送、多相计量等技术逐渐成为影响石油与天然气工业未来发展的关键技术<sup>[1-2]</sup>。

近十多年来, 随着天然气工业的发展, 凝析天

然气计量问题引起了国内外研究人员的关注。Steven<sup>[3]</sup>利用文丘里管测量了凝析天然气流量, 对几种典型的节流元件两相流压降相关式进行了分析比较; Morrison 等<sup>[4]</sup>研究了槽式孔板流量系数随气液相流量的变化规律; 耿艳峰等<sup>[5-6]</sup>通过数值仿真与实验分析了压力、气相流量、流型等因素对槽式孔板两相压降倍率的影响; Xu 等<sup>[7]</sup>分析了文丘里管测量气液两相流时差压信号的动态特性;

2006-10-16 收到初稿, 2007-02-01 收到修改稿。

联系人及第一作者: 耿艳峰 (1969—), 男, 博士, 副教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60672003); 中国石油大学博士科研基金项目 (Y060510)。

Received date: 2006-10-16.

Corresponding author: GENG Yanfeng, associate professor.

E-mail: gengyf@hdpu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (60672003) and the Doctoral Science Foundation of China University of Petroleum (Y060510).

Huang 等<sup>[8]</sup>利用文丘里管和电容传感器组合测量气液两相流；Steward 等<sup>[9]</sup>致力于基于文丘里管的凝析天然气流量计开发。本文根据现有标准节流元件两相流压降相关式的理论依据和实验参数范围，选择了具有代表性的 5 类相关式<sup>[10-12]</sup>，比较了这些相关式的基本原理、对槽式孔板测量数据的计算结果，着重分析其误差原因。然后依据不同的建模思想，提出了 3 种实用的槽式孔板两相流压降相关式，并应用于低含液率气液两相流计量技术研究，讨论了基于双槽式孔板组合测量凝析天然气流量的相关问题。

### 1 实验装置与测量方法

为了研究槽式孔板的低含液率气液两相流测量特性，建立其两相流压降相关式，在中国石油大学大型多相流实验装置上，以空气/水为实验介质进行了实验，实验装置介绍见文献 [13]。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 ( $\geq 300D$ ) 的流型发展段后进入测试管段，本文的测试管段由顺序串联的不同孔径比的槽式孔板和压力、温度等测量仪表组成。流经测试管段的两相流体经气液分离器进行分离，分离后的气体排空，液体循环利用。实验装置的气相流量测量采用金属转子流量计，精度为 1.5%；液相流量测量采用质量流量计，精度为 0.5%；槽式孔板差压、压力与温度测量仪表的精度均为 0.5%；数据采集系统采用了 NI 公司的虚拟仪器采集系统。

本文的实验范围： $Q_g$  为  $100 \sim 650 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ， $Q_L$  为  $0.2 \sim 4.6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ， $p$  为 400、800 kPa，温度约为  $15^\circ\text{C}$ ；实验过程的流型以分层波浪流和环状流为主。 $p=400 \text{ kPa}$  时，实验数据分布见图 1。图中横、纵坐标分别表示气相、液相流量，图中共 84 个实验数据点。在某一稳定的气相流量下，调整不同的液相流量实验点进行实验，使工况条件下体积含气率处于 95%~99.5% 之间，详细的实验方法见文献 [14]。

### 2 利用标准节流元件测量气液两相流

标准节流元件测量单相流的基本关系为<sup>[15]</sup>

$$Q = \frac{C\epsilon}{\sqrt{1-\gamma^4}} \frac{\pi}{4} \gamma^2 D^2 \sqrt{2\Delta P\rho} = K \sqrt{\Delta P\rho} \quad (1)$$

由于结构简单、可靠、测量精度高，标准节流元件一直是单相流体流量测量的主要传感器之一。

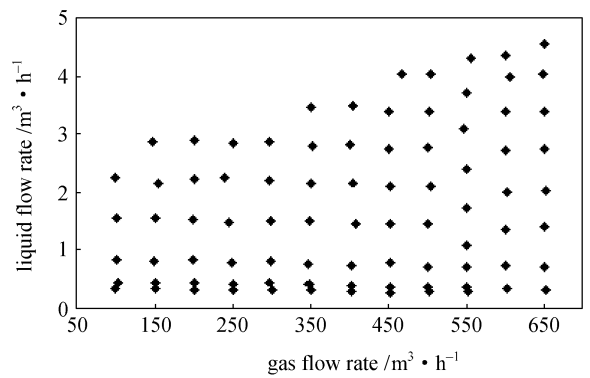


图 1  $p=400 \text{ kPa}$  时的实验数据分布  
Fig. 1 Distribution of experimental data at  $p=400 \text{ kPa}$

国内外都较早地开展了利用它测量气液两相流的研究，并提出了许多两相流压降计算相关式<sup>[10-12]</sup>。这些相关式都是在式 (1) 的基础上，增加与  $x$ 、 $p$ 、 $Q_g$  等参数有关的修正系数后得到的。不同相关式计算原理不同，但其基本思想都是根据实测  $\Delta P_{tp}$  求取  $Q_g$  或者  $\Phi_g$ 。

#### 2.1 均相流相关式

均相流相关式认为气液两相之间能够混合均匀，并以相同的速度流经节流元件。此时，气液混合物的密度可用式 (2) 计算

$$\rho_{tp} = [x/\rho_g + (1-x)/\rho_L]^{-1} \quad (2)$$

由式 (1)、式 (2) 可得均相流相关式

$$Q_g = xK \frac{\sqrt{\Delta P_{tp}\rho_{tp}}}{xK \sqrt{\Delta P_{tp}\rho_g\rho_L}/[\rho_g + (\rho_L - \rho_g)x]} \quad (3)$$

#### 2.2 Murdock 相关式

20 世纪 60 年代，Murdock 对利用标准孔板测量气液两相流进行了研究，并给出如下相关式

$$Q_g = K \sqrt{\Delta P_{tp}\rho_g} / [1 + 1.26(1-x)\sqrt{\rho_g}/(x\sqrt{\rho_L})] \quad (4)$$

该相关式考虑了  $x$  对标准孔板  $\Delta P_{tp}$  的影响。式 (4) 也可以写成  $\Phi_g = \sqrt{\Delta P_{tp}/\Delta P_g} = 1 + 1.26X$  的形式。Murdock 将  $\Phi_g$  与  $X$  相关联的方法为后来许多研究者所采用。

#### 2.3 3 个经验相关式

James、Smith & Leung、Кремльскнй 等提出了不同的经验相关式。其中，James 发现，如果将式 (3) 中  $x$  的指数由 1.0 改为 1.5，则实验值和计算值相符良好。Smith & Leung 注意到液体在标准孔板入口处堵塞气体流动的现象，在式 (1) 中引入了一个由实验数据回归的  $x$  表达式。Кремльскнй 引入  $x$  的线性函数对均相流模型进行

修正，并使相关式满足：当  $x=1$  时，相关式转变为单相气体流量公式； $x=0$  时，气相流量为零的边界条件。

James 相关式

$$Q_g = xK \sqrt{\Delta P_{tp} \rho_g \rho_L / [\rho_g + (\rho_L - \rho_g)x^{1.5}]} \quad (5)$$

Smith & Leung (S-L) 相关式

$$Q_g = K(0.637 + 0.421x - 0.00183/x^2) \sqrt{\Delta P_{tp} \rho_g} \quad (6)$$

Кремльскій 相关式

$$Q_g = x(1.56 - 0.56x)K \sqrt{\Delta P_{tp} \rho_g} \quad (7)$$

### 2.4 Chisholm、Lin Z. H. 相关式

Chisholm、Lin Z. H. 相关式首次引入压力对两相流压降的作用。其中，Chisholm 相关式由分相流模型推导获得；Lin Z. H. 相关式利用两相密度之比的多项式函数拟合 Murdock 相关式中的常数 1.26。

Chisholm 相关式

$$\Phi_g = \sqrt{1 + [(\rho_L/\rho_g)^n + (\rho_g/\rho_L)^n]X + X^2} \quad (8)$$

$(X \geq 1, n = 1/2; X < 1, n = 1/4)$

Lin Z. H. 相关式

$$\begin{aligned} \Phi_g &= 1 + \theta X \\ \theta &= 1.48625 - 9.26541(\rho_g/\rho_L) + \\ &44.6954(\rho_g/\rho_L)^2 - 60.6150(\rho_g/\rho_L)^3 - \\ &5.12966(\rho_g/\rho_L)^4 - 26.5743(\rho_g/\rho_L)^5 \end{aligned} \quad (9)$$

### 2.5 De Leeuw、Steven 相关式

De Leeuw、Steven 相关式都是近年来发表的、文丘里管计量凝析天然气流量压降相关式<sup>[2,9]</sup>。在前人考虑  $x$  和  $p$  对节流元件  $\Phi_g$  影响的基础上，De Leeuw 首次引入  $Q_g$  对  $\Phi_g$  的作用，并采用式 (12) 定义的  $Fr_g$  表示  $Q_g$  的作用。不同的是 De Leeuw 将 Chisholm 相关式中的系数  $n$  与  $Fr_g$  进行关联；Steven 通过曲面拟合技术获得  $\Phi_g$  与  $X$ 、 $Fr_g$  之间的关系。

De Leeuw 相关式

$$\begin{aligned} \Phi_g &= \sqrt{1 + [(\rho_L/\rho_g)^n + (\rho_g/\rho_L)^n]X + X^2} \\ \begin{cases} n = 0.41 & 0.5 \leq Fr_g \leq 1.5 \\ n = 0.606(1 - e^{-0.746Fr_g}) & Fr_g > 1.5 \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

Steven 相关式

$$\Phi_g = (1 + S_1 X + S_2 Fr_g) / (1 + S_3 X + S_4 Fr_g) \quad (11)$$

其中

$$Fr_g = U_{sg} \sqrt{\rho_g} / \sqrt{gD(\rho_L - \rho_g)} \quad (12)$$

式中  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  均为压力的多项式函数。表 1 列出了部分相关式的实验参数范围和实验

介质。

表 1 不同相关式的实验压力、气相质量含率及实验介质比较

Table 1 Comparison of experimental pressure, gas mass fraction and experimental fluid of different correlations

Correlation	Pressure /MPa	Gas mass fraction	Experimental fluid
Murdock	0.1—4	0.11—0.98	water/air
James	0.5—1.87	0.01—0.56	steam/water
Кремльскій	0.1—0.4	0.7—1.0	steam/water
Lin Z. H.	0.8—19.8	0.02—1.0	R-113/R-11
Steven	2.0—6.0	0.02—0.5	nitrogen/kerosene

### 3 不同相关式的计算结果分析

在节流元件流量系数、流体物性、介质压力、气相质量含率等参数已知的情况下，利用上述相关式和  $\Delta P_{tp}$  的实测值可以得到气液相流量。

采用式 (13) 定义的相对误差比较各相关式对不同测量点的计算结果。因各实验点计算误差变化较大，采用了平均误差和不同误差限内实验点数来评价各相关式的整体计算效果，平均误差采用正向与负向误差的平均值来表示。表 2 列出了  $\gamma=0.75$  的槽式孔板利用上述相关式对图 1 实验数据点的计算结果。如 Lin Z. H. 相关式的平均误差为  $-9.0\% \sim 9.2\%$ ，表示所有负向误差的平均值为  $-9.0\%$ ，正向误差平均值为  $9.2\%$ 。84 个实验数据点中，有 45 个点的相对误差绝对值小于  $10\%$ ，83 个点的相对误差绝对值小于  $15\%$ 。

$$E_g = \frac{Q_{ga} - Q_{gc}}{Q_{ga}} \times 100\% \quad (13)$$

由表 2 可见，Murdock 相关式精度最高，Lin Z. H. 与 Chisholm 相关式次之，均相流和 De Leeuw 相关式最差。其中，均相流相关式计算结果偏低，主要是因为水平管气液两相流中液相流速低于气相流速，致使气相截面含率小于体积含率、通过式 (2) 计算的气液混合物流动密度值小于真实密度值造成的。Murdock 相关式的实验介质、压力范围与本文的实验条件比较接近，可能是其计算精度较高的主要原因。3 个经验相关式由于仅考虑了  $x$  对  $\Phi_g$  的影响，计算精度均较低。其中，S-L 相关式在小气量时误差波动大，原因是该相关式所考虑的液体阻塞现象不适合槽式孔板，实验观察表明：槽式孔板不存在类似标准孔板液体堵塞气

体流动的现象。考虑压力作用后的 Chisholm 相关式和 Lin Z. H. 相关式的计算精度较 3 个经验相关式明显提高, 但平均误差仍较大。一方面可能是这两个相关式应用于槽式孔板时, 相关式的系数需要重新取值; 另一方面本文的实验压力处于两个相关式的下限。Steven 相关式的计算精度优于 De Leeuw 相关式, 但这两个相关式计算误差都比较大。一是因为这两个相关式本身是针对文丘里管的, 可能不适合槽式孔板; 二是本文实验条件与这两个相关式相差较大。

### 4.2 数据处理方法 2 (DPM 2)

文献 [5-6] 的研究发现, 在  $p$  或  $Fr_g$  一定时,  $\Phi_g$  与  $X$  几乎呈线性关系。据此, 本文提出如下相关式

$$\begin{aligned} \Phi_g &= NX + c \\ N &= f_1(Fr_g, \rho_g/\rho_L) \\ c &= f_2(Fr_g, \rho_g/\rho_L) \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $N$  是  $\Phi_g$  与  $X$  之间的线性系数, 同时又是  $Fr_g$  和  $\rho_g/\rho_L$  的函数, 在  $p$  与  $Fr_g$  一定时,  $N$  为一个常数;  $c$  是修正零点误差的参数。式 (14) 包含了  $Fr_g$ 、 $\rho_g/\rho_L$  和  $X$  对  $\Phi_g$  的影响, 比 Lin Z. H. 和 Chisholm 相关式仅考虑  $p$  和  $X$  的影响要全面, 又比 Steven 相关式物理意义明确。与图 1 对应的  $p=400$  kPa、 $\gamma=0.75$  的槽式孔板  $N$ 、 $c$  值随  $Fr_g$  的变化关系见图 2。 $N$  值随  $Fr_g$  的增大而增大。 $c$  值随  $Fr_g$  的增大而减小, 当  $Fr_g > 1.3$  以后,  $c$  值接近于 Murdock 相关式的值 1。

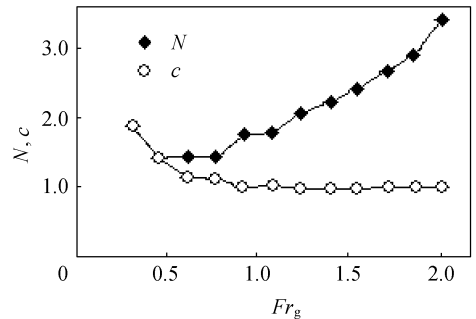


图 2  $Fr_g$  与  $N$ 、 $c$  之间的关系

Fig. 2 Relations between  $Fr_g$  and  $N$ ,  $c$

针对图 2 的变化趋势, 用最小二乘拟合得到 DPM 2 的相关式 [式 (15)]。不同压力条件下, 使  $N$ 、 $c$  表达式中的常数项与压力  $p$  相关联, 即可改变系数  $N$ 、 $c$  的值, 使相关式适用于不同压力的测量工况。

$$\Phi_g = NX + c$$

$$N = 0.4109 + 1.3066 Fr_g$$

$$c = 1.066 - 0.294/Fr_g + 0.206/Fr_g^2 \quad (15)$$

### 4.3 数据处理方法 3 (DPM 3)

Steven 将  $\Phi_g$  与  $Fr_g$ 、 $X$  之间的函数关系拟合成有理分式形式, 并没有给出可靠的理论依据, 仅仅是根据数据拟合结果发现式 (11) 的相对误差较小。既然  $X$  和  $Fr_g$  的增大都使  $\Phi_g$  增大, DPM 3 认为  $X$  和  $Fr_g$  的作用可能满足叠加原理。DPM 2 是复合函数的方法, 未必能够分别体现两个因素各自的作用。据此, 针对图 1 的实验数据点, 得到  $\gamma=0.75$  的槽式孔板相关式 [式 (16)]。不同压力条

表 2 典型的标准节流元件相关式计算结果比较

Table 2 Calculation results comparison of different typical throttle device correlations

Correlation	Mean error	Number of error points	
		<10%	<15%
Homogenous	-36.5%	0	4
Murdock	-4.8%—7.2%	77	82
James	-13.6%—12.7%	13	50
S-L	-15.6%—26.7%	19	48
Кремльський	-13.5%—6.1%	24	47
Chisholm	-10.5%—10.3%	34	81
Lin Z. H.	-9.0%—9.2%	45	83
De Leeuw	-27%	1	6
Steven	-12.1%—20.3%	33	51

综上所述, 由于早期相关式对影响节流元件  $\Phi_g$  的因素考虑不够全面, 而考虑因素较多的两个相关式又不适合槽式孔板, 所以, 现有节流元件压降相关式计算误差都较大, 需要根据槽式孔板的测量特性建立新的压降计算相关式。

## 4 槽式孔板两相流压降相关式

理论分析与实验研究均表明, 影响节流元件  $\Phi_g$  的主要因素有<sup>[2-6,9-11]</sup>  $X$ 、 $\gamma$ 、 $p$ 、 $x$  和  $Q_g$  等。借鉴前人的研究成果, 本文对实验数据采用了不同的建模思想和数据处理方法, 求取反映槽式孔板特性的两相流压降相关式, 避免冗长的理论公式推导。

### 4.1 数据处理方法 1 (DPM 1)

Steven 和 De Leeuw 相关式分别考虑了  $X$ 、 $p$ 、 $Fr_g$  的影响, 对文丘里管的测量数据进行计算, 获得较好的计算结果。文献 [5] 利用 Steven 的方法获得了槽式孔板的两相流压降相关式。计算结果表明, 有理分式函数能够较好地反映槽式孔板两相流压降变化特性。

件下，相关式的形式不变，仅改变相关式系数  $a'$ 、 $b'$ 、 $c'$  的取值。

$$\Phi_g = a' + b'X + c'(\ln Fr_g)^2 \quad (16)$$

其中， $a' = 0.90300149$ ， $b' = 1.3639784$ ， $c' = 0.19156127$ 。

与表 2 对应的，上述 3 种相关式计算的平均误差和各误差限内数据点分布见表 3。可以看出，3 个相关式的计算误差分布相对均匀，有 90% 以上的实验数据点误差在  $\pm 10\%$  之内，DPM 2 和 DPM 3 的计算结果中有 85% 左右的误差小于  $\pm 5\%$ ，计算精度明显高于表 2 中各个相关式，满足凝析天然气生产计量的精度要求。

表 3 3 种新型相关式的计算结果比较

Table 3 Calculation results comparison of three new correlations

Correlation	Mean error	Number of error points	
		$\leq 5\%$	$\leq 10\%$
DPM 1	-5.2%—3.4%	50	80
DPM 2	-5.7%—2.4%	73	74
DPM 3	-2.8%—3.3%	71	80

需要说明的是：目前不同压力下的实验数据有限，尚无法获得相关式随压力变化的规律。

DPM 2、DPM 3 计算结果表明 Steven 相关式并不是唯一的最佳表达式。最佳的相关式除了具有较高的拟合精度以外，还应该满足  $X$  与  $Fr_g$  的边界条件，表达式物理含义明确，计算简单，便于后续方程求解，与实验数据的变化趋势一致等条件。

### 5 利用相关式开发凝析天然气流量计

利用双槽式孔板串联组合实现凝析天然气在线不分离计量的基本原理见文献 [14]。本文选取由不同孔径比的两块槽式孔板作为流量传感器，利用 DPM 1 得到的两个相关式迭代求解获得气液相质量流量，进而讨论组合测量的相关问题。针对任一测量点，方程组的迭代求解过程见图 3。

迭代过程分内、外两个循环。内循环实现对任一给定的  $x$ ，由实测的  $\Delta P_{tp}$  求  $\Delta P_g$  的任务。外循环判断由上、下游两个孔板计算得到的  $Q_g$  之差是否足够小，如果足够小，则记录该输出；否则，增加  $x$  的值，进入内循环，重新求解，直到  $x = x_{max}$  时，进入计算结果取舍与输出步骤，结束该测量点的计算。

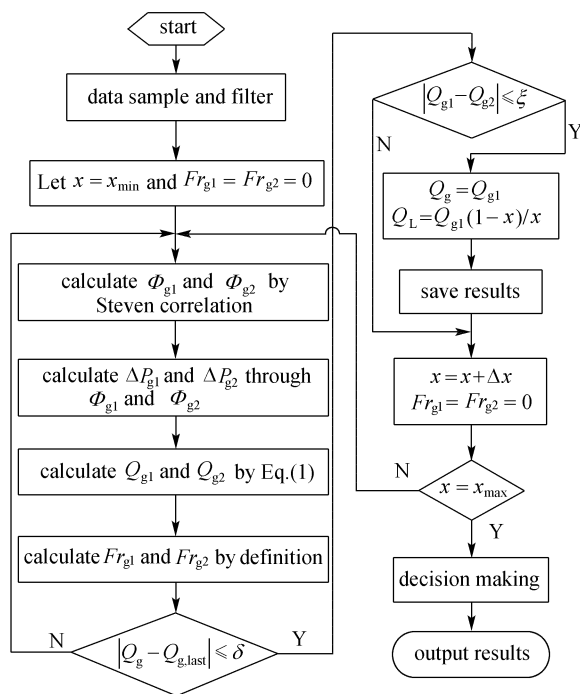


图 3 方程组求解流程图

Fig. 3 Flow chart of equation solving

计算过程中，对不同的测量值，随着  $x$  的变化，迭代求解方程组的根共有 3 种情形：(1) 方程组有惟一解；(2) 方程组无解；(3) 方程组有两个解。针对 (2) 的情形，一般选择上一个测量点的计算结果作为输出；针对 (3) 采取一定的措施对计算结果做出取舍。

方程组的求解结果见图 4。由图可以看出，大部分计算结果与实际流量接近，相对误差在  $\pm 15\%$  之内；但也有部分测量点的计算结果误差很大，气液相流量的相对误差均超过 100%。图 4 中气液流量计算值同时出现了气体偏大/液体偏小、液体偏大/气体偏小的现象，这是由于方程组迭代求解过程中出现两个根同时满足精度要求而没有正确取舍造成的。从测量原理分析：相同的  $\Delta P_{tp}$  实测值可以由小气量和大液量组合产生，也可以由大气量和小液量组合产生，求解结果是合理的。由于方程组根的取舍准则不够完善，一旦发生计算结果的错误取舍，相邻的计算结果也都出现了类似的情形。

基于双槽式孔板组合测量凝析天然气流量存在多根现象，多根的合理取舍尚需进一步研究。可以考虑的方法有：(1) 利用两相流测量信号的波动特征对多根进行取舍，一般地，大液量/小气量和小液量/大气量两种工况的测量信号波动特征差别较

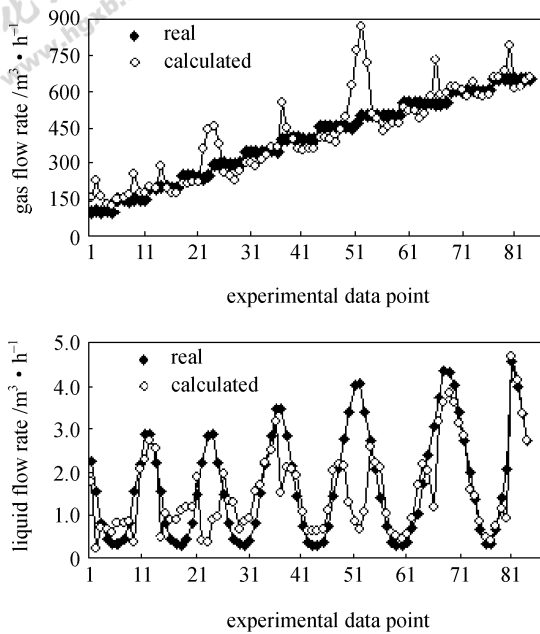


图 4 计算流量与实际流量的对比

Fig. 4 Comparison of real flow rate with calculated flow rate

大；(2) 针对凝析天然气的计量问题也可以直接选取大气量和小液量的计算结果，但在诸如井筒气举使管道出现液塞等异常工况下，可能出现较大偏差；(3) 寻找其他的组合测量方式或者增加某些冗余措施，如利用容积式流量计与槽式孔板组合或者在现有双槽式孔板的基础上增加一个容积式流量计。尽管槽式孔板差压信号可能相等，但大气量/小液量与大液量/小气量两种不同工况对应的两相流体积流量相差很大，从而对多根做出正确取舍。

## 6 结 论

比较了几种典型的标准节流元件两相流压降相关式，并对槽式孔板测量数据的计算结果和误差原因进行了分析。依据不同的建模思路，建立了 3 种实用的槽式孔板压降相关式，3 种相关式在实验参数范围内均能达到相近的计算精度，可满足生产计量的精度要求。

在精确的理论模型难以建立但节流元件两相压降倍率影响因素已知的条件下，可以基于实验数据对流量传感器的特性进行建模分析，解决生产计量问题。本文相关式的适用范围限于文中的实验参数范围，相关式的外推特性尚需进一步验证。

基于双槽式孔板组合可以实现凝析天然气计量，但多根的正确取舍是该技术实用化的关键。几

种新型的信号处理技术，如神经网络集成技术、动态神经网络技术、多传感器数据融合技术等可能为该问题的解决提供不同的技术支持。

## 符 号 说 明

- $C$ ——标准孔板流量系数
- $D$ ——管道内径, m
- $E$ ——相关式计算的相对误差
- $Fr_g$ ——气体 Froude 数
- $p$ ——介质压力, kPa
- $\Delta P$ ——节流元件产生的差压, kPa
- $Q$ ——流体质量流量,  $kg \cdot s^{-1}$
- $U_{sg}$ ——气相折算速度,  $m \cdot s^{-1}$
- $X$ ——Lockhart-Martinelli 参数
- $x$ ——气相质量含率
- $\gamma$ ——孔板孔径比
- $\epsilon$ ——气体可膨胀性系数
- $\rho$ ——流体密度,  $kg \cdot m^{-3}$
- $\Phi_g$ ——节流元件的两相压降倍率

## 下角标

- $g$ ——气相参数
- $L$ ——液相参数
- $tp$ ——气液两相参数

## References

- [1] Falcone G, Hewitt G F. Multiphase flow metering: current trends and future developments [R/OL]. US: Society of Petroleum Engineers, 2001. <http://www.spe.org/elibrary/app/search.do>
- [2] Lin Jun (林军), Dong Shouping (董守平). Experimental study on differential-resistance model in multiphase flow metering. *J. Expt. in Fluid Mechanics* (实验流体力学), 2005, **19** (1): 26-30
- [3] Steven R N. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2002, **13** (12): 361-372
- [4] Morrison G L, Terracina D. Response of a slotted orifice flow meter to an air/water mixture. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2001, **12** (12): 174-180
- [5] Geng Yanfeng (耿艳峰), Feng shuchu (冯叔初), Zheng Jinwu (郑金吾). Two-phase multipliers characteristics of slotted orifice. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (5): 1138-1142
- [6] Geng Yanfeng, Zheng Jinwu, Shi Tianming. Study on the metering characteristics of slotted orifice for wet gas flow. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2006, **17** (3): 123-128
- [7] Xu Lijun, Xu Jian, Dong Feng, et al. On fluctuation of

- the dynamic differential pressure signal of Venturi meter for wet gas metering. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2003, **14** (4): 211-217
- [8] Huang Z Y, Wang B L, *et al.* Application of electrical capacitance tomography to the void fraction measurement of two-phase flow. *IEEE Trans. on Instrum. Meas.*, 2003, **52**: 7-12
- [9] Steward D G, Brown G, Hodges D. Wet gas Venturi metering [R/OL]. US: Society of Petroleum Engineers, 2002. <http://www.spe.org/elibrary/app/search.do>
- [10] Lin Zonghu (林宗虎). Gas-Liquid Two-phase Flow and Heat Exchangers (气液两相流和沸腾传热). Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003: 169-182
- [11] Li Haiqing (李海青). The Measurements and Application of Two-phase Flow Parameter (两相流参数检测及应用). Hangzhou: Zhejiang University Press, 1991: 123-130
- [12] Hetsroni Gad. Handbook of Multiphase Systems (多相流和传热手册). Lu Zhongqi (鲁钟琪), *et al.*, trans. Beijing: China Machine Press, 1993: 174-198
- [13] He Limin (何利民), Guo Liejin (郭烈锦), Chen Xuejun (陈学俊). Measurement of slug velocity and length on horizontal pipeline by means of differential pressure fluctuation analysis. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2003, **54** (2): 192-198
- [14] Geng Yanfeng, Zheng Jinwu, Shi Tianming, Shi Gang. Wet gas meter development based on slotted orifice couple and neural network techniques. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2007, **15** (2): 281-285
- [15] Sun Huaiqing (孙淮青), Wang Jianzhong (王建中). Flow Measurement Handbook of Throttle Device Design (流量测量节流装置设计手册). Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 4-5