

文章编号:1673-5005(2009)06-0152-05

基于神经网络的槽式孔板湿气计量修正模型

华陈权^{1,2}, 王昌明¹, 耿艳峰², 王晓智²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国石油大学 信息与控制工程学院, 山东 东营 257061)

摘要:以空气-水为介质对槽式孔板进行了湿气计量特性试验研究,提出了一种新的基于神经网络的槽式孔板湿气计量修正模型。模型以 Lockhart-Martinelli 参数 X 、气体弗劳德准数 Fr_g 、密度比 R_d 、孔径比 β 四个无量纲参数作为模型的输入,“虚高” OR 作为输出。结果表明,在表压为 0.25 ~ 0.35 MPa, X 为 0.02 ~ 0.6, Fr_g 为 0.5 ~ 2.7, β 为 0.5 ~ 0.75 的测试范围内,模型能够很好地预测实际“虚高”,用新修正模型对由于液相存在而引入的气相流量误差进行修正后,气相流量相对误差在 95% 的置信度下小于 $\pm 4\%$,明显优于其他槽式孔板湿气计量修正模型,可以满足生产计量的精度要求。

关键词:神经网络; 湿气; 槽式孔板; 计量修正模型; 虚高

中图分类号:TP 212 **文献标识码:**A

Wet gas flow metering correction model of slotted orifice based on neural network

HUA Chen-quan^{1,2}, WANG Chang-ming¹, GENG Yan-feng², WANG Xiao-zhi²

(1. College of Mechanical Engineering in Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The wet gas metering characteristics of slotted orifice meter were discussed by using air-water as media. A novel wet gas metering correction model based on BP neural network was proposed. In the model, Lockhart-Martinelli parameter X , gas Froude number, the gas to liquid density ratio R_d , and bore diameter ratio β are the inputs, and over-reading is the output. The results show that the new correction model can predict the over-reading accurately, and correct the liquid-induced gas flow rate prediction error of the wet gas flow to $\pm 4\%$ at 95% confidence level under the conditions of pressure from 0.25 MPa to 0.35 MPa, X from 0.02 to 0.6, gas Froude number from 0.5 to 2.7, and β from 0.5 to 0.75. The model is superior to other correction model and can satisfy the accuracy requirement of production metering.

Key words: neural network; wet gas; slotted orifice; metering correction model; over-reading

湿气流是气相占绝大多数的气液两相流。湿气在国际上还没有统一的定义,在油气工业领域内湿气通常指气相体积含率大于 90% 的气液两相气井产物^[1-3]。目前,湿气计量主要有两种方式^[4-6]:一种是单相干气体流量计和湿气计量修正模型相结合,用以计量湿气中的气相流量,采用这种方法主要关心的是气相流量的计量,其中液相体积含率作为修正模型的输入,需要按一定周期采用示踪、取样分析等技术独立从外部获得(该方法假设液相体积含

率在间断周期测量期间是恒定的,而通常稳定天然气井的液相体积含率是渐变的,在两次测量中间可以认为液相体积含率不变);另一种是两种单相干气体流量计结合它们的湿气修正模型,或一种单相干气体流量计结合其湿气修正模型与其他现代测量技术(微波、射线、核磁共振等)结合,用于同时计量湿气中的气、液两相流量。这两种计量方法都需要确定气体流量计的湿气计量修正模型,所以确定修正模型是湿气计量的关键。笔者通过试验研究槽式

收稿日期:2009-09-03

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)

作者简介:华陈权(1971-),男(汉族),浙江萧山人,副教授,博士研究生,从事测控技术及智能仪器方面的教学与科研工作。

孔板的湿气计量修正模型。

1 槽式孔板湿气计量特性

差压式流量计(槽式孔板、标准孔板、整流孔板、文丘里、V-Cone等)由于具有结构简单、可靠性高、对湿气流比较敏感等优点,被广泛用于湿气流计量的研究中。槽式孔板是一种新型差压式气液两相流量传感器^[7-12],其工作原理与其他标准节流元件相同。对于水平安装管道,湿气流型以分层流/分层波浪流、气弹状流和环状流/雾状流为主,由于重力作用液相成分主要集中在管壁与管底,气相成分分布在管道中心及管道偏上部分。槽式孔板特有的槽式小孔均匀径向分布在管道流通截面上,既能使液相成分自由通过(标准孔板的上游易出现液相积聚),又能起整流作用,对上游流速分布不敏感,大大减少了标准孔板的差压波动现象。

槽式孔板用于干气体计量的流量方程^[7-8]为

$$m_g = \frac{\pi C \varepsilon \beta^2 D^2}{4 \sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \rho_g \Delta p}, \quad (1)$$

$$\beta = d/D = \sqrt{A_s/A}. \quad (2)$$

式中, m_g 为气相质量流量,kg/s; Δp 为孔板前后差压,Pa; ρ_g 为气相密度,kg/m³; A_s 为所有槽孔面积总和,m²; A 为管道流通面积,m²; D 为管道直径,m; β 为孔径比; C 为流出系数,由气体(空气)试验确定; ε 为气体膨胀系数,由气体(空气)试验确定。

差压式流量计用于单相气体计量时具有较高的精度。当用于湿气计量时,被测流体夹杂少量液体(由烃类重组分、饱和水以及为保证气井正常生产加注的防冻、防蚀剂等),差压值就会发生显著变化。湿气(大量的气相中夹杂少量液相)流过差压式流量计时的差压值比夹带前显著偏高,造成计算后相应的表观气体质量流量值也偏高,这种现象称为“虚高”^[2](或过读),其原因一是液相在管道中对气相的阻塞造成的加速压力降,二是气相对液相的加速造成的摩擦压力降。对于槽式孔板,表观气相质量流量、“虚高”(OR)及实际气相质量流量定义如下:

$$m_{ga} = \frac{\pi C \varepsilon \beta^2 D^2}{4 \sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \rho_g \Delta p_{ip}}, \quad (3)$$

$$OR = \frac{m_{ga}}{m_{ge}} = \sqrt{\frac{\Delta p_{ip}}{\Delta p}}, \quad (4)$$

$$m_{ge} = m_{ga} / OR. \quad (5)$$

式中, m_{ga} 为表观气相质量流量,kg/s; m_{ge} 为实际气

相质量流量,kg/s; Δp_{ip} 为两相流孔板前后差压,Pa。

图1所示是孔径比为0.5的槽式孔板在表压0.25 MPa下的计量特性,显然气相流量呈现明显的“虚高”特性。

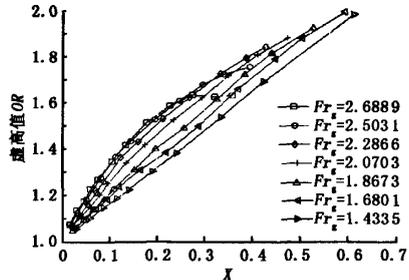


图1 孔径比0.5的槽式孔板的“虚高”特性
Fig.1 Over-reading of slotted orifice with bore diameter ratio of 0.5

研究表明^[5],槽式孔板和其他差压式流量计类似,在湿气条件下的“虚高”主要与Lockhart-Martinelli参数 X 、气体弗劳德数 Fr_g 、气液密度比 R_d 、孔径比 β 等4个无量纲的参数有关。建立槽式孔板湿气计量修正模型的目的就是要确定“虚高”OR与这4个参数之间的函数关系,OR的计算公式为

$$OR = \frac{m_{ga}}{m_{ge}} = f(X, Fr_g, R_d, \beta). \quad (6)$$

其中, X 由下式定义:

$$X = \frac{m_l}{m_{ga}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}, \quad (7)$$

式中, m_l 为液相质量流量,kg/s; ρ_l 为液相密度,kg/m³; X 与气、液相质量流量和密度之比有关,反映了某一气相流量下质量含液率。

Fr_g 由下式定义:

$$Fr_g = \frac{U_{sg}}{\sqrt{gD}} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}}. \quad (8)$$

式中, U_{sg} 为气相折算速度,m/s; g 为重力加速度,m²/s。

Fr_g 在重力条件下也是对气体流量、管径的一种度量。De leeuw首次分析了气相流量变化对“虚高”的影响^[6],Steven进一步完善了该项研究工作^[5],为消除管道直径与重力影响,使相关式的通用性更强,两人均引用了式(8)定义的 Fr_g 表示气相流量。除 X 、 Fr_g 以外,压力是研究人员最早注意到的对“虚高”影响较大的参数,通常采用反映压力变化的无量纲参数——气液密度比 R_d 来表示:

$$R_d = \rho_g / \rho_l. \quad (9)$$

本文研究的目的是通过试验来确定槽式孔板在湿气条件下的“虚高”修正模型式(6)。修正模型确定后,气相流量的计算过程为:首先由单相气体流量计量公式(1)计算出表观气体流量,然后根据已确定的湿气修正模型式(6)(需要输入液相体积含率)由式(5)对由于携带少量液体引入的气体流量误差进行修正。

2 典型槽式孔板湿气计量修正模型

许多文献^[2-10]中提出了各种差压式流量计的修正模型,其中有3个适用于槽式孔板的模型。

(1)改进的 Murdock 模型 1。Murdock 于 1962 年对标准孔板进行试验研究后,认为 OR 与 X 呈线性关系^[2]

$$OR = 1 + 1.26X. \tag{10}$$

后来的研究者将其用于文丘里、V-cone 等其他差压流量计^[3-7]时,将式(10)改进为

$$OR = 1 + MX. \tag{11}$$

其中斜率 M 需要根据试验数据确定。

(2)改进的 Murdock 模型 2。弗兰昌等将式(11)改进后用于槽式孔板湿气模型^[11],同时考虑了 Fr_g 和 β 的影响,表达式为

$$OR = C_x (1 + (\sqrt{Fr_g}/\beta)X), \tag{12}$$

其中

$$C_x = 12.6\beta^2 - 16.01\beta + 5.81.$$

(3)改进的 Steven 模型。Steven 于 2002 年提出的文丘里湿气计量修正模型为

$$OR = \frac{1 + AX + BFr_g}{1 + CX + DFr_g}. \tag{13}$$

耿艳峰等将其用于槽式孔板湿气模型^[10],只是各系数进行了修改:

$$A = 14.4809, B = 5.5479,$$

$$C = 2.3853, D = 4.8988.$$

以上 3 种修正模型采用各种函数形式拟合试验数据来获得修正模型,但由于气液两相流动机理复杂,拟合函数形式只是人为主观猜测,造成模型精度不高、适应性差。人工神经网络方法具有无须深入了解对象的机理、非线性映射的特点,正好适用于这种输入参数多、难以用显式数学函数描述的模型。

3 基于神经网络的修正模型

神经网络理论已经证明,一个 3 层的 BP 网络可以完成任意的 n 维到 m 维的映射。本文中利用 BP 神经网络对任意连续函数的逼近能力和泛化能

力,对式(6)的“虚高”特性进行函数逼近和泛化,建立基于神经网络的槽式孔板湿气计量修正模型。

3.1 网络结构的确定

采用含有一个隐含层的 3 层 BP 网络,具有 4 个输入节点(X, Fr_g, R_d, β)、11 个隐节点、1 个输出节点(OR),如图 2 所示。隐含层神经元激活函数均采用双曲正切 S 型函数,输出层采用纯线性函数。

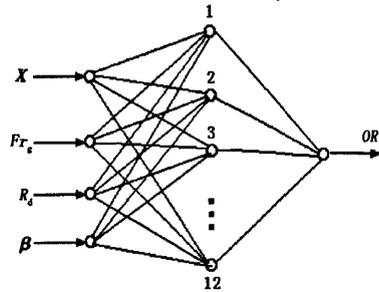


图 2 槽式孔板的 BP 网络结构

Fig. 2 BP neural network structure of slotted orifice

3.2 样本的确定

在中国石油大学大型多相流试验环道上,根据湿气条件对槽式孔板进行了试验。试验条件如下: $\beta = 0.5, 0.6, 0.75$,气相工况流量为 $25 \sim 200 \text{ m}^3/\text{h}$,液相流量为 $0.2 \sim 5 \text{ m}^3/\text{h}$,表压为 $0.25 \sim 0.35 \text{ MPa}$, X 为 $0.02 \sim 0.6$, Fr_g 为 $0.5 \sim 2.7$,温度为常温,试验介质是空气与水。试验环道可以控制气液以稳定的流量进行混合,经过充分的流型发展后进入多相流试验管段。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 0.2%。

测试段(图 3)是由槽式孔板、环室取压装置及差压变送器、前后直管段、压力变送器、温度变送器等组成,温度变送器精度为 0.5%,压力、差压变送器精度为 0.2%,数据采集系统采用 NI 公司的虚拟仪器采集系统。

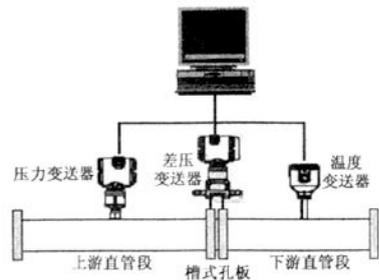


图 3 槽式孔板湿气试验测试段示意图

Fig. 3 Sketch map of wet gas experimental test section of slotted orifice

利用式(1)和已知的气相流量 m_g 求得气相单独流过节流件时的差压值 Δp ,将该值与两相流差压测量值 Δp_p 代入式(4)即可求得槽式孔板的“虚高”值;利用压力、温度测量值计算 ρ_g ,在 ρ_l 和液相流量已知的条件下,由式(7)得到 X ,获得输入 (X, Fr_g, R_d, β) 和输出 (OR) 共 526 个样本,其中 266 个作为训练样本集,260 个作为检验样本集。

3.3 模型的训练和检验

采用动量法和学习率自适应调整的改进 BP 算法,选取 266 个样本作为训练样本集,经过多次重新选择初始权值、学习速率、动量常数等参数,对网络进行训练后,获得一组权值矩阵和阈值矩阵,确定了一个 BP 网络模型。图 4 是这个神经网络模型对训练样本集“虚高”的预测结果。可以看出模型能够很好地预测出实际“虚高”,利用该修正模型结合式(3)~(5)对槽式孔板的气相流量计算修正后,得到的气相流量相对误差如图 5 所示。气相流量相对误差在 98.1% 的置信度下小于 $\pm 4\%$ 。

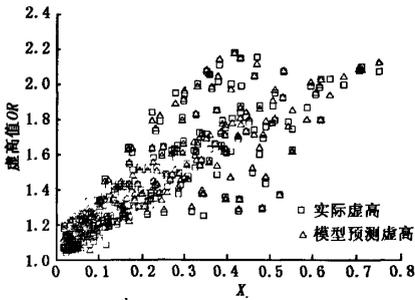


图 4 训练样本“虚高”的预测效果

Fig. 4 Over-reading prediction of training samples

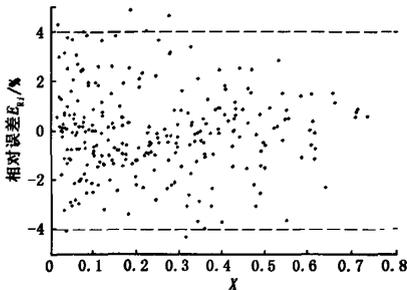


图 5 训练样本修正后的气相流量误差

Fig. 5 Corrected gas flow rate prediction error for training samples

为了检验槽式孔板 BP 网络模型的泛化能力,选择训练样本集以外的 260 个样本作为检验样本集,对训练得到的 BP 网络模型进行检验,结果见图 6。从一些典型数据(表 1)可以看出该模型对检验

样本的“虚高”预测效果也很好,这个修正模型结合式(3)~(5)对槽式孔板的气相流量计算修正后,得到的气相流量相对误差如图 7 所示。气相流量相对误差在 95% 的置信度下小于 $\pm 4\%$,说明本神经网络模型具有很好的预测和泛化能力。

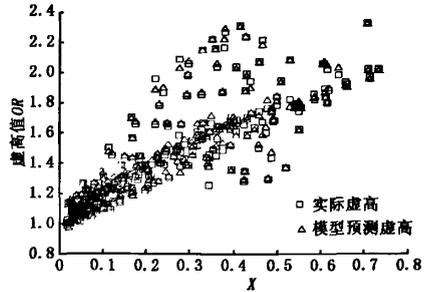


图 6 检验样本“虚高”的预测效果

Fig. 6 Over-reading prediction for test samples

表 1 检验样本“虚高”预测效果的部分数据

Table 1 Over-reading prediction data for test samples

序号	X	Fr_g	$R_d/10^{-3}$	β	实际虚高	模型预测虚高	相对误差 $E_{Ri}/\%$
1	0.015 13	2.676 4	4.403 5	0.5	1.072 8	1.063 3	0.9
2	0.268 4	2.276 2	4.334 2	0.5	1.623 4	1.622 8	0.04
3	0.342 1	0.755 5	5.577 4	0.5	1.378	1.424 5	-3.26
4	0.078 4	0.566 5	5.727 4	0.5	1.169 3	1.175 3	-0.51
5	0.135 3	2.695 8	4.344 9	0.6	1.291 9	1.287 9	0.25
6	0.289 1	2.513 4	4.314 72	0.6	1.522 9	1.525 4	-0.17
7	0.1	1.998 1	4.425 8	0.6	1.133 2	1.135 3	-0.19
8	0.197 6	1.437 2	4.383	0.6	1.220 4	1.229 9	-0.78
9	0.029 4	2.339 5	5.216	0.75	1.119 5	1.081 5	3.51
10	0.230 9	2.120 2	5.356 5	0.75	1.781 7	1.779 7	0.11
11	0.043 8	1.729 6	5.370 6	0.75	1.081 6	1.071 4	0.95
12	0.212 5	0.761	5.488 1	0.75	1.328 3	1.290 5	2.93

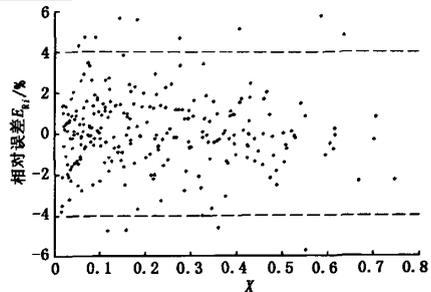


图 7 检验样本修正后的气相流量误差

Fig. 7 Corrected gas flow rate prediction error for test samples

4 槽式孔板修正模型对比

其他差压式流量计(孔板、文丘里、V-Cone 等)在湿气条件下与槽式孔板的工作原理虽然相同,但

由于结构不同,“虚高”特性差异较大,计量修正模型可比性不大。这里仅对式(11)~(13)所适用的槽式孔板湿气计量修正模型与本文中提出的模型进行比较。

为比较各个模型在计算气相流量时的精度,定义相对误差为

$$E_{Ri} = (m_{gi} - m_{gi}') / m_{gi}' \tag{14}$$

平均相对误差为

$$E_{MR} = \sum_{i=1}^N |E_{Ri}| / N \tag{15}$$

式中, i 为第 i 个试验点; N 为试验点总数; m_{gi} 为第 i 个试验点的实际气体质量流量; m_{gi}' 为修正后第 i 个试验点的气体质量流量。

表2为各修正模型对由于液相存在而引入的气相流量误差进行修正后的误差对比。显然本文中模型修正后的气相流量相对误差和平均误差明显低于其他3个模型。

表2 各修正模型误差对比

Table 2 Error comparison of various correction models

模型	相对误差 $E_{Ri}/\%$	平均相对误差 $E_{MR}/\%$
式(11)	$< \pm 12$ (置信度 90%)	≤ 5.5
式(12)	$< \pm 10$ (置信度 92.4%)	≤ 4
式(13)	$< \pm 10$ (置信度 92%)	≤ 4.8
本文	$< \pm 4$ (置信度 95%)	≤ 1.34

5 结束语

所提出的基于神经网络的槽式孔板湿气计量修正模型在 $\beta = 0.5, 0.6, 0.75$, 表压为 $0.25 \sim 0.35$ MPa, X 为 $0.02 \sim 0.6$, Fr_g 为 $0.5 \sim 2.7$ 的测试范围内,气相流量相对误差在 95% 的置信度下小于 $\pm 4\%$, 计量精度明显优于其他模型。当测量条件与模型训练时差别较大而引起模型预测误差较大时,可以通过神经网络的学习功能重新学习以适应新的测量条件,克服了其他模型适用范围窄、适应性差的局限。

参考文献:

[1] 耿艳峰,冯叔初,等. 凝析天然气计量技术[J]. 自动化仪表,2005,26(8):1-3.

[2] MURDOCK J W. Two-phase flow measurements with orifices[J]. Basic Engineer,1962,84(4):419-433.

[3] MEHDIZADEH Parviz. Wet gas metering: trends in applications and technical developments[J]. SPE 77351, 2002.

[4] FANG Li-de, ZHANG Tao. Performance of a horizontally mounted Venturi in low-pressure wet gas flow[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2008,16(2):320-324.

[5] STEVEN Richard. Wet gas metering with a horizontally mounted Venturi meter[J]. Flow measurement and instrumentation, 2002(12):361-372.

[6] De LEEUW R. Liquid correction of Venturi meter readings in wet gas flow[R/OL]. North Sea Flow Measurement Workshop. (1997-04-09)[2008-09-20]. [http://www.flowprogramme.co.uk/docs/paperslist.asp?headline=1997 North Sea Flow Measurement Workshop](http://www.flowprogramme.co.uk/docs/paperslist.asp?headline=1997%20North%20Sea%20Flow%20Measurement%20Workshop).

[7] MORRISON Gerald L, HALL K R, et al. Comparison of orifice and slotted plate flowmeters[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1994,5(2):71-77.

[8] MORRISON Gerald L, TERRACING Dwayne, BREWER Carl, et al. Response of a slotted orifice flow meter to an air/water mixture[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001,12(3):175-180.

[9] GENG Y F, FENG S C. Study on a new type of sensor for wet gas meter[C]// Chinese Mechanics Institute. Proceedings of the 4th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows, September 10-12, 2004, Hangzhou, China. Beijing: International Academic Publishers/World Publishing Corporation, c2004: 536-541.

[10] GENG Y F, ZHENG J W, SHI T M. Study on the metering characteristics of slotted orifice for wet gas flow[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006(17):123-128.

[11] 邢兰昌,耿艳峰,孙苗苗. 一种新的低含液率气液两相流槽式孔板压降倍率相关式[J]. 中国电机工程学报,2008,28(14):86-90.

XING Lan-chang, GENG Yan-feng, SUN Miao-miao. A new correlation of slotted orifice for gas-liquid two-phase flow with low liquid fractions[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2008, 28(14):86-90.

[12] 李玉星,张光华,王军,等. 湿天然气槽式孔板在线计量技术研究[J]. 天然气工业,2007,27(5):115-118.

LI Yu-xing, ZHANG Guang-hua, WANG Jun, et al. Studies on the wet gas slotted orifice plate online measurement equipment[J]. Natural Gas Industry, 2007,27(5):115-118.

(编辑 修荣荣)