

# 基于函数链神经网络的管道煤气流量计量系统

鄂加强<sup>1, 2</sup>, 张华美<sup>1</sup>, 龚金科<sup>1</sup>, 王耀南<sup>2</sup>

- (1. 湖南大学 机械与汽车工程学院, 湖南 长沙, 410082;
2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙, 410082)

**摘要:** 在管道煤气计量系统测量中引入管道煤气相对湿度修正, 并采用湿度传感器转换相对湿度信号, 利用函数链神经网络对管道煤气工况温度下所对应的水蒸汽饱和压力进行拟合, 得到基于函数链神经网络的管道煤气流量计量模型和在线计量系统, 从而大大简化管道煤气流量计量软件, 在流量计设计范围内实现管道煤气流量实时在线计量。实际应用结果表明, 该计量系统测量管道煤气流量误差小于 0.7%。

**关键词:** 函数链神经网络; 管道煤气; 数据处理; 测量

中图分类号: TB937; TP212.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2006)05-0976-05

## Measurement system for gas flux in pipeline based on function chain neural network

E Jia-qiang<sup>1, 2</sup>, ZHANG Hua-mei<sup>1</sup>, GONG Jin-ke<sup>1</sup>, WANG Yao-nan<sup>2</sup>

- (1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. School of Electrical and Informational Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Relative humidity modifying of gas in the pipeline was introduced into measurement system and a humidity sensor was used to transform the signals of relative humidity. Moreover, online measurement system can be obtained after a fitting formula about water vapour saturated pressure in the gas pipeline at different temperatures is established by using the function chain neural network, which can greatly simplify the software of measurement of gas flux in the pipeline and quickly and truly realize measurement of gas flux in the pipeline in real time and on line in the design range of flowmeter. The application results reveal that the measurement system can quickly measure the gas flux in the pipeline on line and its measurement error about gas flux in the pipeline is less than 0.7%.

**Key words:** function chain neural network; pipeline gas; data process; measurement

随着管道煤气应用的日趋广泛, 管道煤气流量计量问题也日益突出。组分复杂、流速变化很大的管道煤气的准确计量问题是摆在城市生活管道煤气以及工业环境管道煤气流量计量研究者面前的一大难题。近年来, 在管道煤气流量计量中, 人们对湿

煤气流量计量中仪表的计量误差及其修正问题进行了较深入的研究, 并取得了一些研究成果<sup>[1~9]</sup>。由于经过水洗工艺得到的管道煤气为含有水蒸汽的多组分湿煤气, 当管道煤气的温度和压力发生变化时, 煤气中所含的水蒸汽的密度与饱和水蒸汽分压

收稿日期: 2006-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60375001)

作者简介: 鄂加强(1972-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 副教授, 从事智能信息融合处理方法及应用研究

通讯作者: 鄂加强, 男, 博士, 副教授; 电话: 0731-8821750(O); E-mail: ejiaqiang@126.com

力同时变化, 一般通过测量某一工况下管道煤气的压力  $p_1$  和温度  $T_1$ , 并建立与温度  $T_1$  相对应的水蒸汽饱和压力  $p_{\max}$  的数据库来间接计算管道煤气的密度<sup>[10]</sup>, 这样, 必然带来较大的计量误差并影响计量速度。鄂加强等<sup>[11]</sup> 采用水的蒸汽压方程获得水蒸汽饱和压力  $p_{\max}$  与工况温度  $T_1$  的函数关系, 能快速且较准确计量管道煤气流量, 但仍存在一定误差。为此, 本文作者采用函数链神经网络对管道煤气工况温度所对应的水蒸汽饱和压力进行拟合, 以期快速准确地对管道煤气溶量进行在线测量。

## 1 管道煤气流量计量模型

### 1.1 管道煤气标准孔板流量计量模型

在用标准孔板流量计对管道煤气质量流量进行测量时, 煤气质量流量  $M$  与压差  $\Delta p$  和煤气密度  $\rho$  满足以下关系<sup>[11]</sup>:

$$M = A_c (\Delta p \times \rho)^{1/2}. \quad (1)$$

式中:  $A_c$  为仪表系数,  $A_c = \frac{\sqrt{2}\pi}{4} C \varepsilon d^2 (1 - \beta^4)^{-1/2}$ ;  $C$  为标准孔板流量计的流出系数, 由 Stolz 方程确定;  $\Delta p$  为标准孔板流量计的压差;  $d$  为标准孔板的最小开孔截面直径;  $\beta$  为直径比,  $\beta = d/D$ ,  $D$  为管道内径,  $D = D_{20} [1 + \lambda (T_f - 293)]$ ;  $\lambda$  为管道材料的线膨胀系数;  $T_f$  为管道煤气温度;  $D_{20}$  为管道在温度为 20 °C 时的内径;  $\varepsilon$  为流束膨胀系数, 其经验公式为  $\varepsilon = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \Delta p / (p_f \times K)$ ;  $K$  为管道煤气的绝热系数。

由煤气质量流量计算式(1)可知: 要获得管道煤气的真实流量, 必须准确测定煤气密度。若煤气密度测量不准确, 则即使高精度的差压测量也不能获得准确的煤气质量流量与煤气体积流量; 相反, 将使管道煤气计量结果产生较大误差。由于管道煤气为多组分且较脏的湿煤气, 目前在线测量其密度与相对湿度比较困难, 一般是通过测量某一工况下的压力  $p_1$  和温度  $T_1$  来间接计算湿煤气的密度。

管道煤气是由干煤气和水蒸汽组成的混合物。要确定其密度, 除了需知道它在某一状态下的压力与温度外, 还需知道管道煤气中所含水蒸汽的量, 即管道煤气的相对湿度。若将管道煤气中的水蒸汽视为理想气体, 则水蒸汽的密度  $\rho_s$  和相对湿度满足以下关系:

$$\rho_s = \frac{p_{\max} \phi}{R_s T_f}. \quad (2)$$

式中:  $p_{\max}$  为温度是  $T_f$  时的管道煤气中水蒸汽所对应的最大分压;  $\phi$  为管道煤气的相对湿度;  $R_s$  为水蒸汽的气体常数,  $R_s = 461.9 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

由道尔顿分压定律可知, 管道煤气中干煤气的分压  $p_g$  为管道煤气的总压  $p_f$  与水蒸汽的最大分压  $p_{\max}$  之差, 则管道煤气中干煤气的密度满足:

$$\rho_{gf1} = \rho_{g0} \frac{(p_f - \phi_{p_{\max}}) T_{g0} Z_{g0}}{p_{g0} T_f Z_f}. \quad (3)$$

式中:  $\rho_{g0}$  为标准状态下管道煤气中干煤气组分的密度;  $T_{g0}$  为标准状态下的热力学温度;  $Z_f$  为工况下气体压缩系数;  $Z_{g0}$  为标准状况下气体压缩系数;  $p_{g0}$  为标准状态下管道煤气中干煤气组分的压力。

因此, 管道煤气的密度可表示为:

$$\rho = \rho_{g0} \frac{(p_f - \phi_{p_{\max}}) T_{g0} Z_{g0}}{p_{g0} T_f Z_f} + \frac{\phi_{p_{\max}}}{R_s T_f}. \quad (4)$$

将式(4)代入式(1), 得采用标准孔板流量计对管道煤气流量进行计量的模型为:

$$M = A_c \left[ \Delta p \cdot \rho_{g0} \frac{(p_f - \phi_{p_{\max}}) T_{g0} Z_{g0}}{p_{g0} T_f Z_f} + \frac{\phi_{p_{\max}}}{R_s T_f} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

### 1.2 水蒸汽饱和蒸汽压的函数链神经网络拟合

假设经拟合后水蒸汽饱和蒸汽压输出值  $X(x_i)$  可用幂级数  $n$  次多项式(一般地,  $n = 3$  时能满足较高的精度要求)描述:

$$X(x_i) = c_0 + c_1 x_i + c_2 x_i^2 + c_3 x_i^3. \quad (6)$$

式中:  $x_i$  为与水蒸汽饱和蒸汽压相对应的第  $i$  个温度。

图 1 所示为函数型连接的示意图。可见, 在这个基于数学、适用于并行分布处理的网络概念化模型中, 若 1 个节点(如节点  $k$ ) 被激励, 则许多附加函数功能将被激励, 即不仅能得到  $x_i$ , 而且能得到  $g_0(x_k)$ ,  $g_1(x_k)$ , ...,  $g_n(x_k)$ , ...。原则上, 只要使用函数链方法, 就可用单层网络实现监督学习。

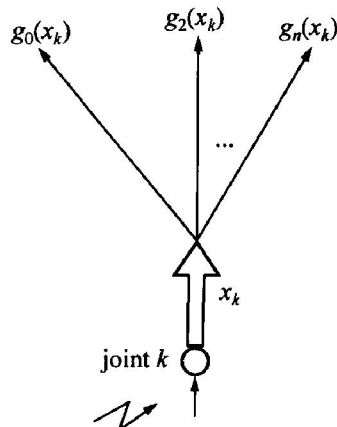


图 1 函数型连接的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of function joint

图 2 所示为一函数链神经网络。图中  $W_j(j=0, 1, 2, 3)$  为网络的连接权值。连接权值的个数与反非线性多项式的阶数相同, 即  $j=n$ 。假设神经网络的神经元是线性的, 则函数链神经网络的输入值为:  $1, x_i, x_i^2, x_i^3$ 。

函数链神经网络的输出值  $X_i^{est}(k)$  为:

$$X_i^{est}(k) = \sum_{j=0}^3 x_i^j W_j(k) \quad (7)$$

式中:  $W_j(k)$  为第  $k$  步时的权值, 且  $W_j(k+1) = W_j(k) + \eta e_j(k)$ ,  $e_j(k) = X_i - X_i^{est}(k)$ ,  $\eta$  为学习因子, 其值影响迭代的稳定性和收敛速度, 令  $\eta = 1 - k/M$ ,  $M$  为最大迭代次数,  $X_i$  为第  $i$  个温度所对应的水的蒸汽饱和蒸汽压实际值。

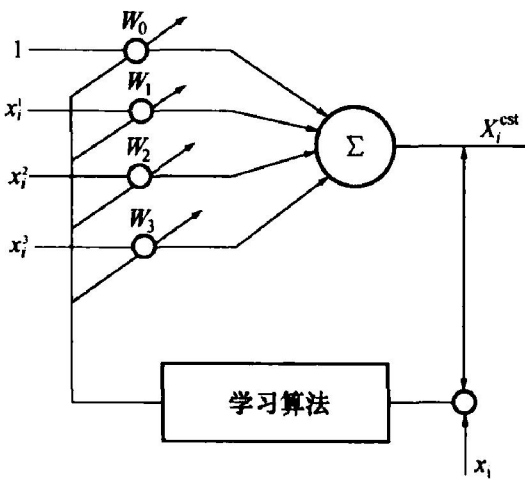


图 2 函数链神经网络示意图

Fig. 2 Schematic diagram of function link neural network

将函数链神经网络的输出值  $X_i^{est}(k)$  与第  $i$  个温度所对应的水蒸汽饱和蒸汽压的实际值  $X_i$  进行比较, 经函数链神经网络学习, 求出函数链神经网络的输出估计值与第  $i$  个温度对应的水蒸汽的饱和蒸汽压实际值  $X_i$  的均方差在全局范围内的最小值:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N [X_i^{est}(k) - X_i]^2 = \\ \min \sum_{i=1}^N [W_0(k) + W_1(k)x_i + \\ W_2(k)x_i^2 + W_3(k)x_i^3 - X_i]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

该最小值是关于权值  $W_0, W_1, W_2$  和  $W_3$  的函数。

一般地, 权值  $W_0$  和  $W_1$  为同一数量级;  $W_2$  比  $W_1$  至少小 1 个数量级;  $W_3$  比  $W_2$  小更多的数量级, 所相差的数量级由拟合模型非线性特性的非线性程度确定。当得到最优解  $W_0, W_1, W_2$  和  $W_3$  后, 有  $c_0 = W_0, c_1 = W_1, c_2 = W_2, c_3 = W_3$ , 将所求得的待定系数  $c_0, c_1, c_2$  及  $c_3$  存入内存。

### 1.3 基于函数链神经网络的管道煤气流量计量模型

将学习完毕的函数链神经网络与管道煤气标准孔板流量计量模型串联, 构成函数链神经网络煤气流量计量模型:

$$M = A_c \left[ \Delta p \cdot \rho_{g0} \frac{[p_f - \phi X_i(k)] T_{g0} Z_{g0}}{p_{g0} T_f Z_f} + \frac{\phi X_i(k)}{R_s T_f} \right]^{1/2} \quad (9)$$

基于函数链神经网络的管道煤气流量计量原理如图 3 所示。

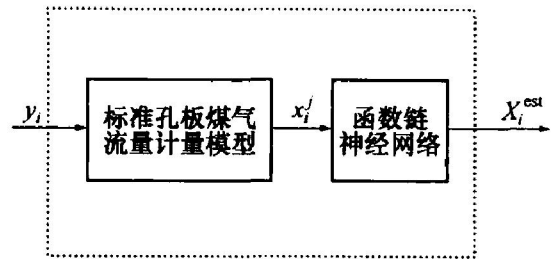


图 3 函数链神经网络煤气流量计量原理图

Fig. 3 Schematic diagram of soft-sensing principle based on function link neural network

## 2 管道煤气流量计量系统

采用如图 4 所示的管道煤气流量计量系统。

### 2.1 数据预处理

管道煤气流量计量系统所采集的数据将受到如传感器噪声、变送器噪声、信号转换噪声等各种噪声的干扰, 从而可能导致测量信号的波动和跳动。为了使测量信号数据具有真实性, 采用数学处理法进行数据预处理。

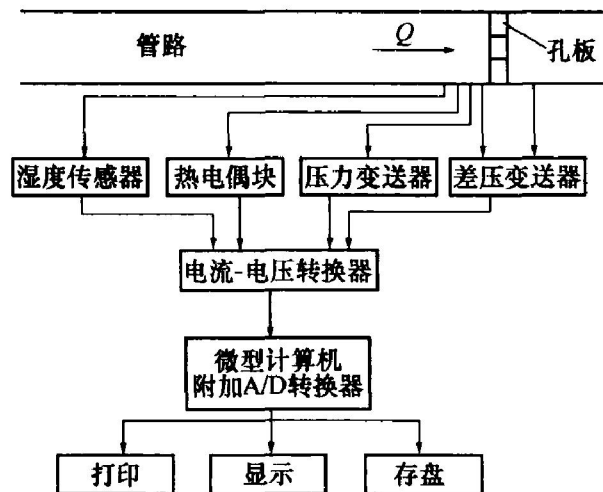


图 4 管道煤气流量计量系统

Fig. 4 Measurement system for gas flux in pipeline

针对测量信号所出现的跳动性和波动性,分别采用剔除跳变信号算法及递推平均滤波算法对测量信号进行预处理。

### 2.1.1 剔除跳变信号算法

当 $|Y(n) - y(n-1)| > D$ 时,有:

$$Y(n) = y(n-1)。 \quad (10)$$

式中: $Y(n)$ 为当前测量实时采样数据; $y(n-1)$ 为上一次测量采样、处理后的数据; $D$ 为给定的域值。

当 $|Y(n) - y(n-1)| < D$ 时,利用递推平均滤波算法对当前测量实时采样数据进行第2次滤波处理。

### 2.1.2 递推平均滤波算法

为了滤去在规定范围内测温信号较小的噪声干扰,采取递推平均滤波率进行滤波处理:

$$y(n) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y(n-i+1)。 \quad (11)$$

式中: $m$ 为采样次数; $y(n)$ 为测量信号预处理结果; $Y(n-i+1)$ 为第 $n-i+1$ 次测量采样数据, $i=1, 2, \dots, m$ 。

这样,测量采样数据经上述预处理后变得比较平稳和真实,为得到真实可靠的管道煤气流量计量结果创造了条件。

## 2.2 系统软件

微机测量系统应用软件包括以下3个部分:

**a.** 测量数据的标度转换程序。自动化仪表检测的各种物理量都是通过传感器变为电信号,再经过一定的处理,送给A/D转换器进行A/D转换,从而得到与被测物理量相对应的数字量。对于温度、压差、压力以及相对湿度等物理量,最后得到的都是相同的数字量。因此,在仪表中同样的数字量表示不同物理量的不同值,故必须通过一定的技术处理,将这些数字量转换为不同的物理量。本程序采用VISUAL BASIC6.0和汇编语言混合编写而成。

**b.** 管道煤气中工况温度下水蒸汽饱和压力的函数链神经网络拟合程序。针对干饱和和水蒸汽中0~60℃所对应的饱和压力,利用VISUAL BASIC6.0编写函数链神经网络拟合程序,当管道煤气中工况温度确定时,就能根据拟合公式快速求出所对应的水蒸汽饱和压力。

**c.** 管道煤气流量打印程序。管道煤气流量打印程序的打印内容有:日期、温度、压力、压差以及相对湿度等,采用VISUAL BASIC6.0编写而成。

此外,为了清除由于工况条件变化而引起的测

量误差,对全部工况变量、全部中间变量以及工况变量的全部范围进行补偿。本管道煤气计量系统应用软件采用VISUAL BASIC6.0和汇编语言混合编写而成,充分利用2种语言的编程优点,比较简便实用。采用随机文本文件保存原始数据,能方便地查找以前的测量记录。

## 2.3 应用

已知某输送煤气的管道在20℃时的内径 $D_{20} = 600$  mm,线膨胀系数 $\lambda_0 = 11.6 \times 10^{-6}$  mm/(mm·℃),煤气在标准状况下的密度(干状态) $\rho_{g0} = 1.3328$  kg/m<sup>3</sup>,煤气的绝热系数 $K = 1.3735$ ,压缩系数 $Z_{g0} = 1.0$ , $Z_f = 1.0$ ,标准孔板的开孔直径 $d_{20} = 219.45$  mm,采用本测量系统对此管道煤气进行测量时,能在线采集工况变量温度 $T_f$ 、压力 $p_f$ 、压差 $\Delta p$ 以及相对湿度 $\varphi$ ,通过数字滤波,实现管道煤气流量的在线计算以及流量的实时显示、打印等,其测量最大误差为0.7%,比文献[11]中的测量最大误差(1.0%)低0.3%。

## 3 结论

**a.** 在微机测量系统中引入管道煤气相对湿度修正,并采用湿度传感器转换其相对湿度信号,减小了流量的计算误差。

**b.** 利用VISUAL BASIC6.0编写0~60℃所对应的水蒸汽饱和压力的函数链神经网络拟合程序。当管道煤气中工况温度已确定时,能根据拟合公式快速求出所对应的水蒸汽饱和压力。

**c.** 采用微机测量系统对管道煤气流量进行测量时,测量精度高,其测量最大误差为0.7%,速度快,实时性强。

## 参考文献:

- [1] 黄南民,樊鑫瑞,向廷元.管道煤气流量计量方法的研究[J].化工自动化及仪表,1996,23(1):47-49.  
HUANG Nanmin, FAN Xirui, XIANG Tingyuan. Research on measurement method of pipeline gas flux [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 1996, 23(1): 47-49.
- [2] 李成伟,李朝辉.管道煤气热式质量流量计研制及标定技术研究[J].哈尔滨工业大学学报,2002,34(3):333-336.

- LI Cheng-wei, LI Zhao-hui. Development and calibration of thermal gas mass flowmeter for pipeline gas [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(3): 333 - 336.
- [3] 易灵芝, 王根平, 王志英, 等. 基于状态观测器的软测量在管道煤气控制系统中的应用研究[J]. *微计算机信息: 测控自动化*, 2004, 20(4): 90 - 92.
- YI Ling-zhi, WANG Gen-ping, WANG Zhi-ying, et al. The application of soft measurement based on state observer in pipe gas control system [J]. *Micor Computer Information: Control & Automation*, 2004, 20(4): 90 - 92.
- [4] 戴祯建. 差压式流量计在大管道煤气计量中的应用[J]. *自动化仪表*, 2002, 23(4): 25 - 28.
- DAI Zhen-jian. Measurement on big pipeline gas by using differential pressure flowmeters [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2002, 23(4): 25 - 28.
- [5] Sheriff D. Diagnostic procedures facilitate the solving of gas flow problems [J]. *Solid State Technology*, 1995, 8: 62 - 69.
- [6] Baker-Roger C, Gimson C. The effects of manufacturing methods on the precision of insertion and in-line thermal mass flowmeters [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2001, 12(2): 113 - 121.
- [7] 杨 涛, 庞问强. 内文丘里管流量计在煤气计量中的应用[J]. *煤气与热力*, 2001, 21(5): 427 - 428, 431.
- YANG Tao, PANG Wen-qiang. Application of inner venturi tube flow meter in measuring coal gas [J]. *Gas & Heat*, 2001, 21(5): 427 - 428, 431.
- [8] Yasuhit Y. Weight vector for thermal diffusion flowmeters (Part 2): Application to a particular configuration [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1995, 6(3): 149 - 156.
- [9] Sharma P, Varshney C L. Thermal dispersion effect on MHD flow of dusty gas and dust particles through hexagonal channel [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46(13): 2511 - 2514.
- [10] 王志强, 鄂加强. 基于微机系统下管道煤气流量测量研究[J]. *计量与测试技术*. 2003, 30(1): 17 - 18.
- WANG Zhi-qiang, E Jia-qiang. Research on gas flux measurement in the pipeline based on microcomputer system [J]. *Metrology and Measurement Technique*, 2003, 30(1): 17 - 18.
- [11] 鄂加强, 时章明, 刘春洋. 基于蒸汽压方程下的管道煤气流量在线计量系统[J]. *计量学报*, 2004, 25(1): 35 - 37.
- E Jia-qiang, SHI Zhang-ming, LIU Chun-yang. On-line measurement system for gas flux in the pipeline based on vapour pressure equation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2004, 25(1): 35 - 37.