

# 孔板差压噪声的分析及其应用

李县法, 仲朔平, 孙艳飞

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:** 差压噪声即差压实时测量值与真实值或测量平均值之差, 传统的测量将噪声视为对被测量的干扰而设法消除或减小之, 而现代测量技术则将噪声视作被测量的信息载体, 在两相流参数测量中有着重要的意义。采用 Rosemount 3051S 智能差压变送器和 NI4350 数据采集卡, 并编制 LabVIEW 数据采集程序, 精确地取得了水与气-水两相流通过孔板时的差压噪声, 并进行了波形与频谱的对比分析。研究结果表明, 利用孔板差压噪声及其频谱可有效地判断差压变送器取压管堵塞故障。

**关键词:** 两相流; 差压; 噪声

**中图分类号:** TK313; TK314

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2010)07-0829-07

## Analysis and Application of Orifice Differential Pressure Noise

LI Xian-fa, ZHONG Shuo-ping, SUN Yan-fei

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Differential pressure noise is the difference between the real-time measurement differential pressure value and that of the truth or the average of the measurements. The traditional measurement takes the noise as the interference of the quantity being measured, and tries to eliminate or reduce it. While the modern measurement technique takes it as the information carrier of the measured quantity and it is most important in quantity measurement of two-phase flow. In this paper, the Rosemount 3051S intelligent differential pressure transmitter and the NI4350 data acquisition board were used to get the differential pressure noise through the LabVIEW data acquisition procedures when the water and gas-water two-phase flow passed through the orifice. The comparative analyses of the time-domain and spectrum of the differential pressure noise in water and gas-water two-phase flow were done. Study results show that the transmitter's blockage fault can be effectively judged by the orifice plate differential pressure noise or its spectrum.

**Key words:** two-phase flow; differential pressure; noise

两相流包括气(汽)-液、汽-气、气-固两相流等, 它广泛存在于能源、化工、食品等行业。流

量与相含率的测量对两相流有着重要的意义。传统的测量方法通过两相流的电容、电阻与差

压等特性,实现相含率、流量的测量,或利用粒子示踪与相关技术测量两相流速。欲实现流量和相含率的同时测量,传统方法通常利用两种不同特性的测量仪器来组合。

噪声一般有3种定义:1)机械振动产生的杂乱无章的波形,听觉范围内的噪声对人的听觉系统造成伤害,要尽量减小和避免,管道的振动噪声会影响测量的准确性和精度;2)由于电子统计涨落产生的电路杂散噪声,这种噪声在电学量测量中不可避免,在测量微弱信号时要特别关注;3)测量信号随统计平均值的上下波动,本工作所研究的为此种噪声。

传统的两相流测量,将噪声视为对被测量的干扰而设法消除或减小,而现代测量技术则将噪声视作被测量的信息载体,由噪声得到两相流的相关参数,比如由加速度噪声测量流量<sup>[1]</sup>,通过对差压噪声的小波分析识别流型<sup>[2]</sup>,用动态法测量两相流双参数<sup>[3]</sup>等。

由于两相流动微观不稳定性和相分离效应等原因,当两相流通过孔板或文丘里管等差压仪表时,变送器两端的差压值会随测量值上下波动。这种随机的波动遵循统计规律,其统计样本的方差或标准差是相对稳定的,代表了差压噪声水平的大小,包含了被测量的信息。

假设两相分别流过孔板,相间无动量交换、无相变过程,且满足绝热条件。再假定气液两相以环状流过孔板时,气相自由流过孔板,液相经过孔板阻滞、累积,然后喷发通过孔板,由此得到差压噪声测量两相流相含率的公式<sup>[4]</sup>。

再假设分散相浓度分布的方差正比于其平均相浓度,基于两相流的分离流模型,验证了两相流通过节流装置产生的差压噪声的方差近似正比于分散相浓度。同时假设在平稳流动中,连续相的流量恒定,推导得到利用噪声测量两相流质量流量和相含率的理论预测模型,由此可用单一孔板实现两相流量与相含率的测量。由于不再依赖阻挡体的扰动分离效应,此模型不但适用于孔板,也适用于其它节流装置<sup>[5]</sup>。

进一步的分析指出,分散相为稀相时,差压方根的统计方差近似正比于分散相流量,并由此得到用孔板两相流差压噪声进行双参数测量的理论模型。在两相流实验装置上,对6种不同尺寸的孔板,获得不同工艺参数下的78组实

验数据,测量结果与用量热法得到的质量流量和干度对照,其均方偏差分别为 $\pm 9.0\%$ 和 $\pm 6.5\%$ <sup>[6]</sup>。

## 1 孔板差压噪声测量汽-水两相流

在汽-水两相流管路设置孔板节流装置,差压信号经1151电容式差压变送器输出4~20 mA DC信号,由Z-80或8086微电脑采集信号、分离噪声并进行计算,构成汽-水两相流双参数测量仪<sup>[7]</sup>。该装置已成功应用于稠油热采工业生产中注井蒸汽的双参数测量,使用时将质量流量与直流锅炉给水孔板流量计测量结果对比,干度与滴定法测量结果对比,偏差均在允许范围之内,可满足工业测量的精度要求。利用孔板差压噪声测量汽-水两相流双参数,只需选用1块标准孔板,即可实现质量流量与干度的同时测量,这是该方法优于传统的两相流双参数测量的最大特点。

理论模型<sup>[7]</sup>中离散相质量含率为:

$$X_c = 1 - \frac{R}{\theta_x \sqrt{\rho_c/\rho_d} + R(1 - \sqrt{\rho_c/\rho_d})} \quad (1)$$

两相质量流量  $G$  为:

$$G = A\sqrt{\rho_c \Delta p} \left[ 1 + R(\sqrt{\rho_d/\rho_c} - 1) \right] / \theta_G \quad (2)$$

$$A = \sqrt{2} \alpha F,$$

$$R = \frac{\sqrt{\Delta p_0}}{\sqrt{\Delta p}},$$

$$\sqrt{\Delta p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\Delta p_i},$$

$$\sqrt{\Delta p_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\sqrt{\Delta p_i} - \sqrt{\Delta p}| \quad (3)$$

其中: $\sqrt{\Delta p}$ 为孔板差压方根均值; $\sqrt{\Delta p_0}$ 为孔板差压方根噪声均值; $\alpha$ 为孔板流量系数; $F$ 为孔板面积; $\rho_c$ 和 $\rho_d$ 分别为连续相和离散相密度; $\theta_x$ 和 $\theta_G$ 分别为离散相质量含率和两相质量流量的修正系数。

在改进的理论模型中,用孔板差压方根的标准差代替孔板差压方根噪声均值,有:

$$\sqrt{\Delta p_0} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sqrt{\Delta p_i} - \sqrt{\Delta p})^2} \quad (4)$$

由于差压噪声具有大量高阶谐波成分,同时含有瞬时脉冲。为解决这一问题,根据信号窗口原理,采用了孔板差压方根噪声的蠕动拾

取模型<sup>[8]</sup>,有:

$$\sqrt{\Delta p_0} = \frac{M}{N} \sum_{j=1}^{N/M} \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\sqrt{\Delta p_i} - \sqrt{\Delta p})^2} \quad (5)$$

上述模型中的差压噪声拾取模式,采用的是采集1组处理1组的方法,与实时测量的要求尚有差距。另外,受当时差压变送器和单片机的功能限制,信号的采样速率与数据处理方法还不够理想,影响了差压噪声信号采集的精确性和实时性,阻碍了仪表性能的进一步提高及其推广和发展。由于上述理论模型基于某些假设,只在雾状流的高干度湿蒸汽双参数测量中得到验证。模型对泡状流等其它流型的适用性有待于研究。因此,采用先进的差压变送器和数据采集分析装置,以提高差压噪声信号采集的精确性和实时性,并深入研究多流型气-水两相流差压噪声的普遍特征,对多流型下利用差压噪声测量双参数具有重要意义。

## 2 实验回路和信号采集

### 2.1 实验回路

图1为实验回路示意图,此回路用于定性研究气-水两相流孔板差压噪声信号特性。水箱中的水经由水泵沿管道通过孔板后返回水箱,差压变送器测量孔板两侧差压。气泵将压缩空气存入稳压气罐,打开注气控制阀可向管道内注入空气,产生的气-水两相流经管道返回

水箱,在水箱内实现气水分离。

### 2.2 差压测量

差压测量采用 Rosemount 3051S 智能差压变送器,该变送器采用先进的全隔离智能转换和数字补偿技术,稳定性好,并具有极高的测量精度(±0.025%),数据更新速率达 22 s<sup>-1</sup>。3051S 差压变送器为智能变送器,可通过叠加在模拟信号上的符合 HART 协议的高频数字信号获取测量数据,并通过内置的软件计算输入信号的均值和标准差。限于 HART 协议较低的通信速率,数据采集速度只能达 2~3 s<sup>-1</sup>,无法获取 3051S 智能差压变送器 22 s<sup>-1</sup> 的更新数据,故本实验另设采样电路。

### 2.3 数据采集电路

本实验的数据采集电路如图2所示。在3051S差压变送器的两线制4~20 mA模拟信号输出电路中串接24 V直流电源和1个250 Ω(±0.05%)的标准电阻,利用 NI4350 数据采集卡,通过 LabVIEW 编写数据采集程序,以 50 Hz 的采样频率,采得标准电阻两端的电压值,根据差压变送器的量程转换成差压值。

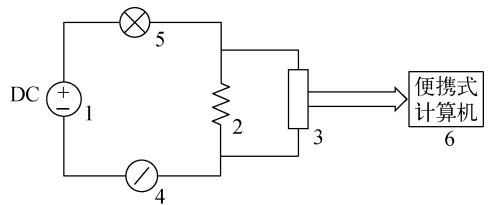


图2 数据采集电路

Fig. 2 Data acquisition circuit

- 1——24 V 直流电源;2——250 Ω 标准电阻;
- 3——NI4350 数据采集卡;4——4~20 mA 电流表;
- 5——3051S 智能差压变送器

NI4350 是一种即插即用的数据采集卡,具有 24 位精度,可精确采集标准电阻两端的电压信号,保证测量结果的精确性。50 Hz 的采集速度和内建的数字滤波器既保证了足够的信号带宽,也有效地抑制了不必要的干扰噪声。

### 2.4 噪声信号采集

为精确有效地采集差压噪声信号,采用高性能的 Rosemount 3051S 智能差压变送器和高精度的 NI4350 数据采集卡,用 LabVIEW 编制数据采集程序来采集水和气-水两相流的孔

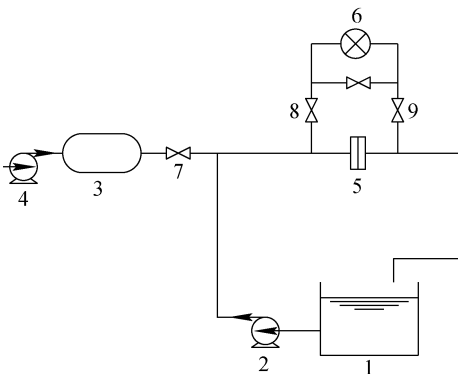


图1 实验回路

Fig. 1 Experimental loop

- 1——水箱;2——水泵;3——稳压气罐;
- 4——气泵;5——标准孔板;6——3051S 差压变送器;
- 7——注气控制阀;8——取压管上游开关控制阀;
- 9——取压管下游开关控制阀

板差压噪声信号。在差压信号测量、数据采集的精度与准确性、数据处理的速度等方面,比以往均有较大改进。

孔板差压方根噪声的拾取模型仍根据式(4),但摒弃采集1组计算1组的数据处理方式。在LabVIEW数据处理程序中设置一数据存储数组,按照先进先出的原则,每更新1个数据,计算1次数组(统计样本)的方根标准差。这种数据处理方式更符合差压方根噪声的处理原则。

LabVIEW数据采集与处理程序通过NI4350数据采集卡,采得250 Ω标准电阻两端的电压,经公式换算成差压,取256个采集数据作为样本,采用堆栈式的数据处理方式,每更新1个采集数据,计算1次样本的均值和标准差,取得噪声信号。利用LabVIEW的FFT模块,计算得到256个差压的频谱,在程序前面板显示频谱图。程序设置数据记录功能,根据控制指令,可将数据存储存储在微机中。

### 3 孔板差压噪声分析

#### 3.1 测量电路本底噪声分析

当实验回路无任何流动时,数据采集电路

及差压仪表、标准电阻、供电电源组成的电路,存在不可避免的杂散噪声,此时采集得到的250 Ω标准电阻两端电压的波动为采集电路的本底噪声。当回路有水或气-水两相流动时,在250 Ω标准电阻两端电压本底噪声的基础上,叠加了流动造成的差压噪声。若电路本底噪声与差压噪声在同一量级,则要测量的差压噪声将淹没于电路的本底噪声之中,即此种电路无法采集得到水或气-水两相流通过孔板时的噪声信号。

为确定测量电路本身的噪声大小,判断测量电路的本底噪声是否对需采集的孔板差压噪声造成影响,在实验回路无任何流动情况下,测量250 Ω标准电阻两端电压,其波动即为测量电路本底噪声(图3)。由图3的测量结果可看出,回路无流动时,标准电阻两端的电压波动在 $10^{-4}$ 量级,标准差为 $9.97 \times 10^{-5}$ ,远小于气-水两相流与水流动情况下的电压波动( $10^{-2}$ 量级,0.020 98和0.016 21),故测量电路本身的噪声对气-水两相流与水流动情况下的差压噪声基本不造成影响,实验所设计的差压噪声测量电路是有效的。

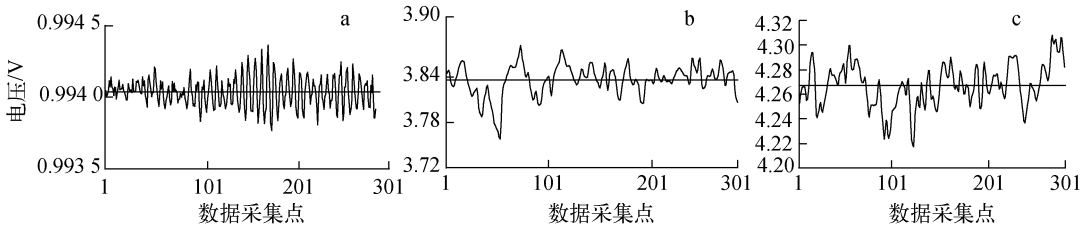


图3 电路本底噪声(a)与气-水两相流(b)、水流动(c)时的噪声对比

Fig. 3 Noise of circuit background (a), air-water two-phase (b) and water flow (c)

#### 3.2 气-水两相流流动与水流动时孔板差压噪声测量分析

利用上述实验回路和信号采集装置,对水和气-水两相流通过孔板时的差压噪声进行了测量分析。首先让水通过孔板,观察水流过孔板时的噪声特性,然后打开注气开关,观察有气体注入时孔板差压噪声特性的变化,粗略认为注气前后水流量不变。

图4示出实验条件下气-水两相流和水流动时孔板差压噪声的波形图。

通过对比可看出,在实验条件下气-水两相

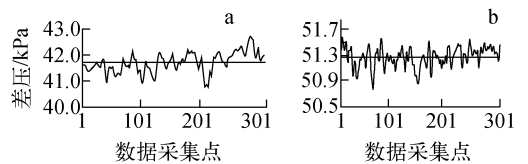


图4 气-水两相流(a)与水流动(b)时孔板差压噪声的波形

Fig. 4 Waveforms of orifice differential pressure noise in gas-water two-phase (a) and water flow (b)

流差压噪声的相对幅值(差压标准差与差压均值之比)远比水的大。

表 1 分别列出了 10 组气-水两相流与水流时孔板差压的实验数据。图 5 为程序在线测量显示的气-水两相流与水流时差压样本的频谱。

表 1 气-水两相流与水流时差压参数对比

Table 1 Comparison of differential pressures in gas-water two-phase and water flow

组号	气-水两相流时差压/kPa		水流时差压/kPa	
	平均值	标准差	平均值	标准差
1	43.067	0.372	51.430	0.261
2	43.166	0.341	51.488	0.239
3	43.323	0.355	51.590	0.222
4	43.513	0.354	51.732	0.230
5	43.682	0.341	51.821	0.241
6	43.816	0.354	51.750	0.235
7	43.984	0.357	51.881	0.258
8	44.119	0.348	52.025	0.237
9	44.254	0.331	52.155	0.252
10	44.344	0.346	52.250	0.247

由差压噪声的频谱图可看出,实验条件下气-水两相流差压噪声频谱的包络线下降趋势更陡一些。

#### 4 差压变送器取压故障诊断

通过实验发现,气-水两相流平稳流动时,若关闭差压变送器取压管上的阀门,软件监测的差压均值无明显变化,而反应差压噪声的标准差会发生显著改变。因此,有望通过对差压噪声的测量与分析,实现差压变送器取压管故障的在线诊断,这种诊断在各项工程的流量测量过程中具有重要的实际意义。

以气-水两相流为例,采集正常取压、前取压管堵塞、后取压管堵塞、前后取压管均堵塞 4 种情况的差压波形(图 6),从图 6 可明显分辨 4 个不同阶段的差压波形。

表 2 列出气-水两相流流动时正常取压和前、后取压管堵塞时差压和标准差的实验结果。

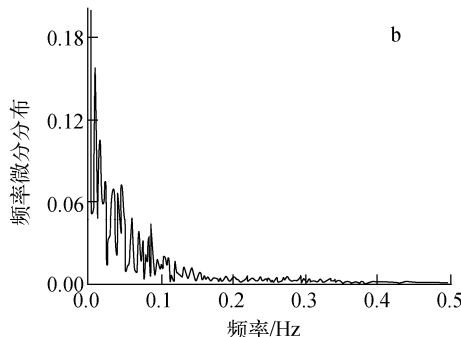
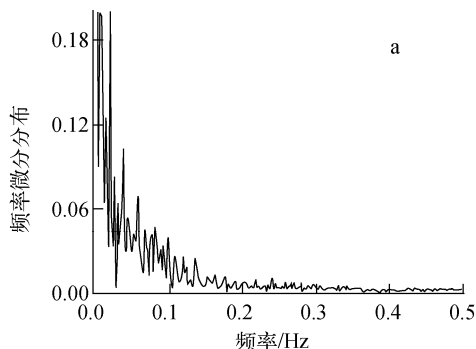


图 5 气-水两相流(a)与水流(b)时的孔板差压噪声频谱

Fig. 5 FFT of orifice differential pressure noise in gas-water two-phase (a) and water flow (b)

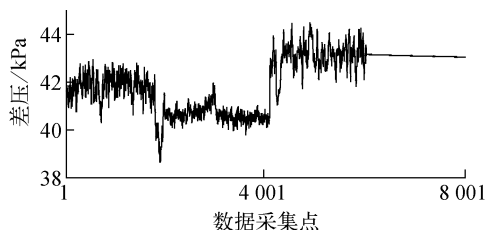


图 6 气-水两相流流动时 4 种情况下孔板差压波形

Fig. 6 Differential pressure waveforms of four different cases in gas-water two-phase flow

表 2 气-水两相流流动时堵塞实验

Table 2 Blockage experiments of gas-water two-phase flow

序号	正常取压/kPa		前取压口堵塞/kPa		后取压口堵塞/kPa	
	差压	标准差	差压	标准差	差压	标准差
1	42.660	0.358	41.819	0.162	43.248	0.443
2	42.605	0.374	41.873	0.188	43.710	0.456
3	42.337	0.465	40.509	0.162	43.223	0.527
4	41.905	0.478	41.118	0.167	43.418	0.400
5	41.894	0.457	40.866	0.172	43.319	0.440

#### 4.1 前端取压管堵塞实验

在气-水两相流平稳流动时,关闭差压变送器的前端取压管,差压变送器前端压力为静压,此时的差压波动反映后端压力波动对差压变送器差压波动的影响。图 7a、b 分别为此时孔板差压的波形图和频谱图。

与正常取压(图 4a)相比,差压波形图无明显差别。由表 2 可知,此时的标准差与正常取压时相比,几乎下降 1/2。从频谱图可看出,除了接近 0 Hz 的频率分量相对幅值较大外,其他频率分量相对幅值与正常取压(图 5a)相比明显下降,频谱图有了非常明显的变化。

#### 4.2 后端取压管堵塞实验

当差压变送器后端取压管堵塞时,差压变送器后端压力为静压,此时的差压噪声反映前端压力波动对差压波动的影响。图 8a、b 分别是此时孔板差压的波形图和频谱图。

与正常取压(图 4a)相比,差压波形图无明显差别。由表 2 可知,此时的标准差与正常取压时相比变化不大。但从频谱图可看出,与正常取压(图 5a)相比,此时的高频信号明显减小,频谱图包络线变陡。与前端堵塞实验相比,

各频率分量的相对幅值明显变大。

#### 4.3 前后端取压管堵塞实验

前后端取压管同时堵塞时,差压变送器前后端压力值均为静压,其差压噪声接近测量电路的本底噪声。

单相水流动时的 3 种孔板取压堵塞实验得到了类似的结果。

#### 4.4 分析和应用

流体通过孔板时,在孔板前端受孔板阻挡,流束强迫收缩。流体通过孔板后,流束重新扩展至整个管道。由于流体在孔板前端与孔板作用较强,因此,孔板前端的流体压力波动强烈。当孔板后取压口堵塞时,孔板前后的差压基本反映孔板前端的压力波动,噪声较大,频谱相对幅值较高。与正常取压相比,由于少了后端压力波动对差压的影响,频谱高频分量相对幅值降低。而当孔板前端取压口堵塞时,孔板前后的差压基本上反映孔板后端的压力波动,噪声小。由于前端高频信号被隔离,频谱相对幅值较低。

差压变送器一般通过小口径的引压管线与过程相连,在一些应用中,这种引压管线可能被

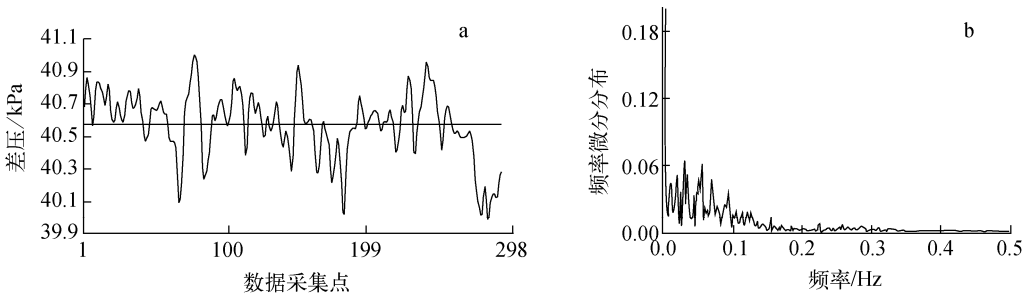


图 7 气-水两相流前端堵塞时的波形(a)与频谱(b)

Fig. 7 Waveform (a) and FFT (b) of gas-water two-phase flow with front blockage of orifice

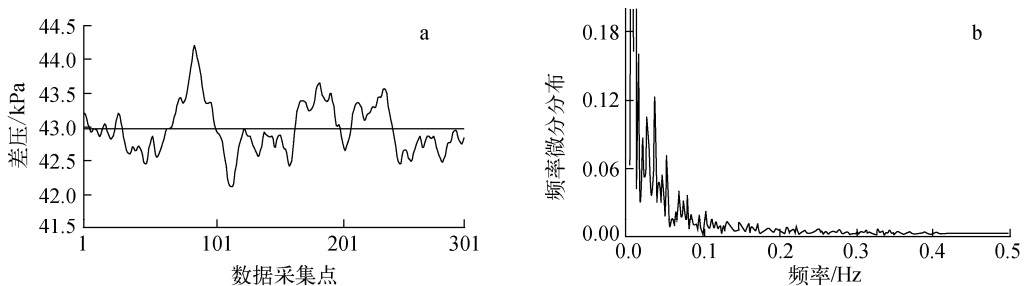


图 8 气-水两相流后端堵塞时的波形(a)与频谱(b)

Fig. 8 Waveform (a) and FFT (b) of gas-water two-phase flow with end blockage of orifice

固体物质堵住或由于气候寒冷而发生冻结堵塞,通常情况下用户无法获知这种情况,这是因为堵塞发生时压力被阻挡,变送器所提供的信号与阻塞发生前它所提供的信号完全相同。只有当变送器输出未随着实际流量变化而变化时,才有可能发现管线堵塞问题。

实验和分析表明,通过孔板差压噪声的波形和频谱分析,可实现流量测量中差压变送器的取压故障诊断。

## 5 结论

1) 采用 3051S 差压变送器和 NI4350 数据采集卡,并用 LabVIEW 软件编写数据采集程序,发展了一种精确采集孔板差压噪声的方法,其数据处理的准确性与信号采集速度均有较大改进和提高。

2) 通过实验对水和气-水两相流流动时的孔板差压噪声进行了初步的对比分析,结果表明,气-水两相流差压噪声明显大于相同流量下水流动时的差压噪声。

3) 对特定的实验回路,影响孔板差压噪声的因素很多,研究从气-水两相流孔板差压噪声中提取两相分布微观不均匀性对差压噪声的影响,对利用孔板差压噪声进行相含率测量研究有着重要意义。

4) 本实验装置的孔板前后无足够长的直管段,且两相流型只限于泡状流,因此,由实验数据所得的结论只是初步的。进行多种流型下孔板差压噪声影响因素的分析,及研究利用差压噪声实现各种流型两相流双参数的在线测量,是下一步工作的重点。

5) 利用噪声波形和频谱分析,可在线快速诊断流量测量过程中差压变送器的取压故障,在工程中有重要的实际意义。

## 参考文献:

[1] ROBERT P E, JONATHAN D B, ALAN G S. Flow rate measurements using flow-induced pipe vibration [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2004, 126: 280-285.

[2] ELPERIN T, KLOCHKO M. Flow regime identification in a two-phase flow using wavelet transform

[J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 32: 674-682.

- [3] 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 Metrological Sinica*, 1993, 14(2): 140-145(in Chinese).
- [4] 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:自然科学版*,1991,31(3):12-16. TONG Yunxian, WANG Wenran, ZHONG Shuoping, et al. Phase separation effect of orifices in two-phase flow and measurement of two-phase flow humidity[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1991, 31(3): 12-16(in Chinese).
- [5] 佟允宪,王文然,王志宣. 利用节流装置噪声测量两相流流量的理论模型[J]. *清华大学学报:自然科学版*,1992,32(6):13-17. TONG Yunxian, WANG Wenran, WANG Zhixuan. A theoretical assumption on metering of two phase massflow with noise from a throttle set [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1992, 32(6): 13-17(in Chinese).
- [6] 王文然,佟允宪,马昌文. 利用孔板差压噪声测量两相流流量和干度的研究[J]. *清华大学学报:自然科学版*,1993,33(S3):117-123. WANG Wenran, TONG Yunxian, MA Changwen. Study on measuring mass flowrate and steam quality with orifice noise in two phase flow system[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 1993, 33(S3): 117-123(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:自然科学版*, 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: Science and Technology*, 1997, 37(5): 15-18(in Chinese).
- [8] 仲朔平,李胜强,孙勇. 稠油热采注汽两相流测量新技术[C]//中国计量测试学会第7届学术会议. 北京:中国工程物理学会,2002.