

气液两相流下微弯型科氏质量流量计信号建模^{*}

张建国,徐科军,方正余,董 帅,乐 静

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘 要:相比于普通的 U 型和 Δ 型科氏质量流量计,微弯型科氏质量流量计具有更高的频率和更小的相位差,测量气-液两相流时误差更大。为了揭示气液两相流测量误差的特性,针对微弯型科氏质量流量传感器输出信号的实验数据,采用数字过零检测方法提取流量序列。用概率密度分析流量序列的分布规律,再通过相关分析得到流量序列的数学模型,并验证模型的准确性。该数学模型由稳定分量和波动分量组成。稳定分量对应于气液两相流下流量实际测量的均值,其与真实值之间的偏差反映了气液两相流的测量误差;波动分量反映了瞬时流量测量的稳定性。

关键词:微弯型科氏质量流量计;气-液两相流测量;流量序列;信号建模;测量误差

中图分类号: TH814

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 470.40

Signal modeling for micro-bend type Coriolis mass flowmeter under gas-liquid two-phase flow

Zhang Jianguo, Xu Kejun, Fang Zhengyu, Dong Shuai, Yue Jing

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Anhui 230009, China)

Abstract: Compared with ordinary U-shape and Δ -shape Coriolis mass flowmeters, the micro-bend type Coriolis mass flowmeter has larger measurement error in measuring gas-liquid (air-water) two-phase flow because it has a higher natural frequency and smaller phase difference. To reveal the characteristic of gas-liquid two-phase measurement error, the flow sequence is obtained by adapting a zero-crossing detection method based on experimental data of the micro-bend type Coriolis mass flowmeter. The distribution pattern of the flow sequence is analyzed with the probability density. The mathematical model of the flow sequence is built by the correlation analysis and its veracity is confirmed. The mathematical model consists of a stable component and a fluctuating component. The stable component corresponds to the mean value of the practical flow measurement and the difference between it and the true value of the flow measurement reflects the gas-liquid two-phase flow measurement error of the micro-bend type Coriolis mass flowmeter. The fluctuating component reflects the stability of the instantaneous flow measurement.

Keywords: micro-bend type Coriolis mass flowmeter; gas-liquid two-phase flow measurement; flow sequence; signal modeling; measurement error

1 引 言

科里奥利质量流量计(以下简称科氏质量流量计)是一种具有广阔应用前景的直接式质量流量测量仪表,同时,可以对密度、频率等物理量进行多参数测量^[1-2]。科氏质量流量计在测量过程中,有时会不可避免地遇到气液两相流的情况,从而造成较大的测量误差。例如,在

油料装车、食品的批次加工等场合气体混入液体当中,导致气液两相流的发生。为此,国内外学者对大弯管型科氏质量流量计测量气液两相流问题进行了研究。Gysling D. L.^[3]提出空气弹性模型来修正气液两相流测量误差。但是,该模型是假设气泡较为均匀地混合在连续的液相中,只能表征含气量较小的情况,且文中未给出在线校正后的测量误差数据,所以,该模型的误差修正精度未知。Hemp J 等人^[4]提出用“气泡”模型来进行误差预测,认为

液体流量的测量误差仅与含气量有关,且为单调的、负的误差。但是,Liu R. P. 等人^[5]和 Henry M. P. 等人^[6-7]的进一步研究发现该模型不具有通用性,并且提出用多层感知器 (multi-layer perceptron, MLP) 和径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络对测量误差进行修正,修正后的误差约为 4%。Hou Q. L. 等人^[8]提出采用 BP (back propagation) 神经网络建立气液两相流测量误差模型,并对误差进行修正,修正后误差约为 2%。

迄今国内外在研究科氏质量流量计测量气液两相流测量方面还存在两个问题。1) 基本上研究的是用大弯管型科氏质量流量计测量气液两相流。根据流量管的管型,科氏质量流量计主要分为大弯管型和微弯型。大弯管型科氏质量流量计振动频率较低,一般为 70 ~ 150 Hz; 同时,流量管振幅较大、相位差大和灵敏度高,因此,信号处理较为容易。但是,大弯管型科氏质量流量计的体积大,应用范围受限。而微弯型科氏质量流量计体积小,应用更为广泛。但是,它的振动频率较高,一般为 300 ~ 400 Hz; 在相同流量下,其相位差约为大弯管型的 1/10, 信号处理较为困难,测量气液两相流时误差就更大。2) 着重研究的是测量气液两相流时测量误差的预测与修正,而没有对气液两相流测量误差的特性,即流量信号进行相应的研究,从而无法进一步提高测量精度^[9]。

为此,本文从微弯型科氏质量流量传感器输出信号的特点出发,先进行气液两相流实验,采集不同流量、不同含气量下科氏流量传感器输出信号的原始数据;采用过零检测算法提取瞬时流量这一关键特征量,得到流量

序列;采用时间序列分析方法建立流量序列的数学模型;分析流量序列模型的变化规律,探究气-液两相流下测量误差的特性,为微弯型科氏质量流量计测量误差修正奠定理论基础。

2 实验研究

相比于单相流,气液两相流的流型复杂多变,使传感器信号波动剧烈的因素十分复杂,很难从机理方面进行分析,所以,本文基于大量的实验数据,研究传感器输出信号的特点。为此,进行了微弯型科氏质量流量计气液两相流实验。

2.1 实验装置

气液两相流实验装置由水路通道和气路通道组成,如图 1 所示。水路通道包括水泵、气液混合器、被测科氏质量流量计、数据采集卡、PC 机、换向器和称重装置等。其中,被检表传感器为国内某厂家生产的 DN25 微弯型科氏质量流量传感器,被检表变送器由我们课题组自行研制^[8,10-12]。气路通道包括空压机、气体罗茨流量计和气体玻璃浮子流量计等。实验装置通过可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 控制各器件动作、采集各器件参数,协调完成整个实验过程。当进行气液两相流实验时,水从水箱中抽出,按照箭头方向流动,再通过气液混合器与空气压缩机产生的空气混合后,形成气液两相流,然后,流经微弯型科氏质量流量计,最终流入称重装置。

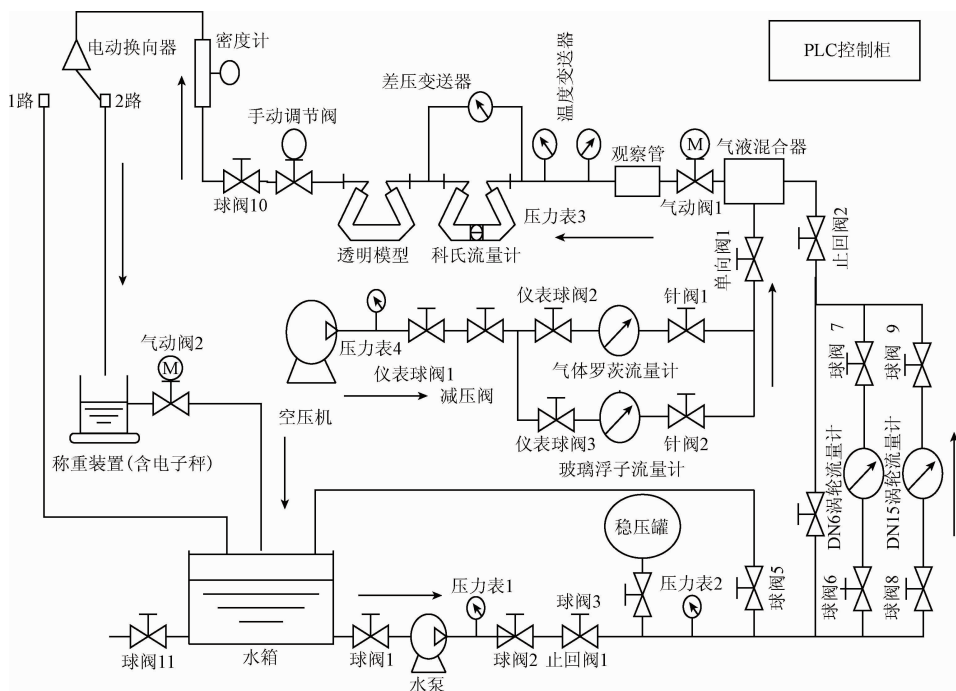


图1 实验装置框图

Fig. 1 Structure of experimental setup

对于气液两相流,通常使用含气量(gas void fraction, GVF)来表征气液两相流中的气体含量大小。在实际测量中,变送器无法在线实时计算 GVF。但是,科氏质量流量传感器输出信号的频率反映了被测混合流体的密度 D_1 [5,8] 为:

$$D_1 = \frac{(\alpha_1 \cdot \Delta T + \alpha_2)}{f^2} + \alpha_3 + \alpha_4 \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中: $\alpha_1 \sim \alpha_4$ 为待标定密度系数, f 为信号频率, ΔT 为温度变化值。变送器再根据已知的单相液体的密度 D_0 , 就可以计算出密度降 D_d 为:

$$D_d = \frac{(D_0 - D_1)}{D_0} \quad (2)$$

被测流体密度的变化情况在一定程度上反映了液体和气体相对含量的大小。因此,可以用实测的密度降来表征含气量的大小 [8,12]。

2.2 实验过程

1) 调节水路上、下游的阀门,将单相液体质量流量固定为某一数值,如 30 kg/min。

2) 调节气路上的阀门,将气体流量固定为某一合适数值,如密度降为 3% 左右。

3) 记录当前被测表计算的质量流量、密度降以及气体浮子流量计的测量值。

4) 开始实验,PLC 将被测表计算的质量流量实时上传至 WinCC 监控软件;PC 机通过数据采集卡实时采集传感器输出信号;将被测表计算出的信号频率、温度、时间差、密度降等,通过 SCI 接口实时上传至 PC 机保存。

5) 重复步骤 2) ~ 4), 改变气体流量,使密度降以 3% 左右的间隔在约 0% ~ 35% 的范围内变化。

6) 重复步骤 1) ~ 5), 改变液体质量流量,使液体质量流量以 10 kg/min 的间隔在 30 ~ 100 kg/min 的范围内变化。得到不同质量流量、不同含气量下,被测微弯型科氏质量流量计气液两相流测量误差、传感器输出信号等。采集 140 个样本数据。

2.3 实验结果

根据气液两相流实验,通过对比被检表测量值与称重装置的称重值可以得到微弯型科氏质量流量计气液两相流测量误差,如图 2 所示。可见,当水的质量流量在 30 ~ 100 kg/min 变化,密度降在 0% ~ 35% 变化时,气液两相流测量误差最大为 -50%,测量误差表现为非线性,且随着密度降的升高,测量误差的规律性变差。

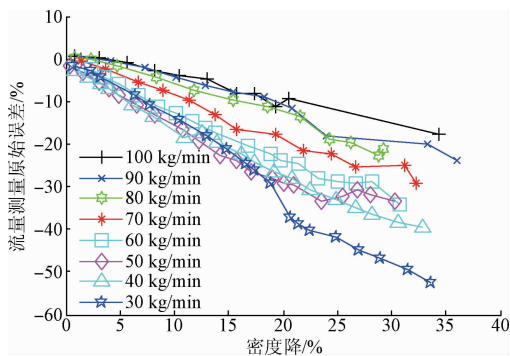


图2 气液两相流测量原始误差

Fig. 2 Raw measurement errors under gas-liquid two-phase flow

3 模型建立

在气液两相流下,流量信号包含了微弯型科氏质量流量计最主要的测量信息,即质量流量。因此,基于实验数据,采用时间序列分析的方法研究流量信号的变化规律,建立流量信号的数学模型。先从传感器信号中提取流量序列,然后从统计学角度分析流量信号的数学规律。建模分 3 个步骤:1) 采用过零检测算法,计算科氏质量流量传感器输出正弦信号的过零点,根据过零点,计算科氏质量流量计上游磁电式传感器输出正弦信号与下游磁电式传感器输出正弦信号之间的时间差,再乘以仪表系数,即可得到流量序列;2) 采用概率密度分析方法,确定流量序列的分布规律;3) 采用相关分析得到流量序列的数学模型。

3.1 过零检测

过零检测方法通过检测信号过零点的时刻,得到相邻过零点之间的时间间隔,进而求取信号频率、时间差,如图 3 所示。可见,信号频率为 $f = 1/(R_3 - R_1)$, 两路信号时间差为 $TimeDiff = (R_2 - L_2)$ 。

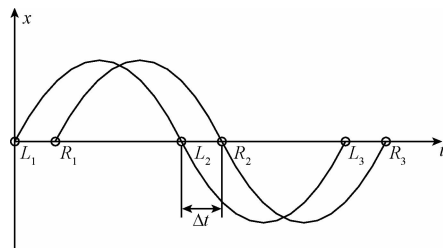


图3 过零检测原理

Fig. 3 Schematic diagram of zero-crossing detection

实际上,变送器处理的是经 ADC 采样后离散信号 $x(n)$, 如果 $x(n-1)x(n) < 0$, 根据零点定理,则过零点

一定在 $x(n-1)$ 和 $x(n)$ 之间,再通过拉格朗日二次插值拟合,得到精确的过零点,进而计算出频率和时间差,再用时间差乘以仪表系数即可得到瞬时流量。

3.2 概率密度分析

实际流量约为 76 kg/min、密度降约为 15% 时的质量流量序列如图 4 所示。

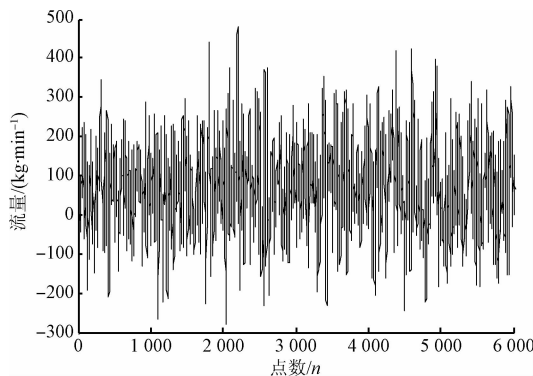


图4 质量流量序列

Fig. 4 Mass flow sequence

在气液两相流下,从传感器输出信号中直接提取的流量信号波动十分剧烈,很多流量序列值严重偏离真实值,甚至出现负值。这是由于气体对传感器输出信号产生的强烈冲击所造成的误差。

为了对流量序列进行建模,需先确定流量序列的分布规律。采用式(3)所示的核密度估计(kernel density estimation, KDE)方法分析流量序列的概率分布^[13]。该方法具有不利用有关数据分布的先验知识、对数据分布不附加任何假定、仅从数据样本本身出发研究数据分布特征等优点,在统计学中得到了广泛的应用。

$$\hat{f}_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h} K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (3)$$

式中: x 为随机变量,即流量信号; $\hat{f}_n(x)$ 为 x 的概率密度函数,即流量信号的概率密度函数; x_i 为样本观测值, n 为样本容量, h 为带宽, $K(x)$ 为核函数。

由上述概率估计方法可以得到概率密度估计的直方图,但是,直方图是不平滑的,且受子区间宽度影响大。一般来说,为了得到一致性的估计,需要对概率密度函数做一些平滑性假设。采用式(4)所示的标准平滑核函数作为权重函数,估算出平滑的概率密度函数。

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} \quad (4)$$

当样本和核函数选定后,KDE 直接和 h 相关。 h 越大,KDE 的估计误差也就越大,而概率密度函数(probability density function, PDF)曲线则会越平滑。通常采用式(5)所示的平均积分平方误差(mean integrated squared error, MISE)判断所选的 h 是否合适^[14]。

$$MISE(\hat{f}_h) = E \left\{ \int [\hat{f}_h(x) - f(x)]^2 dx \right\} \quad (5)$$

式中: $f(x)$ 是样本的真实的概率密度函数,核函数为高斯核函数时,最佳窗宽为:

$$h = 1.06 \sigma n^{-1/5} \quad (6)$$

式中: σ 为样本的标准差。

通过 MATLAB 编程得到流量序列的概率密度估计如图 5 所示。

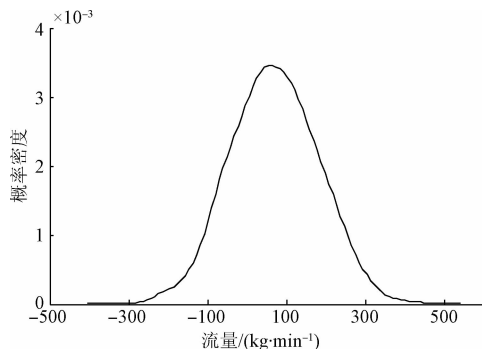


图5 流量序列的概率密度

Fig. 5 PDF of flow sequence

W(Shapiro-Wilk) 检验是一种基于相关性检验序列是否符合高斯分布的检验算法。先假设流量序列符合高斯分布,通过统计分析软件 R 语言的 Shapiro.test 函数对流量信号进行 W 检验,检验结果的 $W = 0.994$,相应的 $p\text{-value} = 0.1148$,大于显著水平临界值 0.05。所以,接受假设,即流量序列符合高斯分布。

3.3 自回归移动平均模型

由于流量序列 $Flow_t$ 经过 W 检验符合高斯分布,可表示为:

$$Flow_t = Flow_0 + \delta_t \quad (t = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

式中: N 为序列点数, $Flow_0$ 为流量序列的稳定分量, δ_t 为流量序列的波动分量。

为了得到 $Flow_t$ 的具体数学表达式,将使用统计分析软件 Eviews 和 R 语言对流量序列做进一步深入研究。采用 Eviews 的 Phillips-Perron 单位根校验方法检验流量序列的平稳性,校验结果的 t 的统计量 = -6.8132,小于检验水平为 1%、5%、10% 的 t 统计量临界值(-3.42, -2.862, -2.5672),而且 t 统计量相应的概率值 $p\text{-value} < 0.0001$,因此,流量序列存在单位根的假设不成立,即流量序列是平稳的。

当流量序列为平稳信号时,便可以用自回归移动平均(auto-regressive and moving average, ARMA)模型进行描述^[15]。通过 R 语言的自相关函数函数(auto correlation function, acf)和偏自相关函数(partial correlation function, pacf)对流量序列 $Flow_t$ 进行相关分析。分析结果表明,流量序列的自相关系数以单侧(均大于 0)进行

趋于 0 的拖尾,而偏自相关系数以双侧(>0 和 <0)进行趋于 0 的拖尾。此时,移动平均(auto-regressive, AR)和自回归(moving average, MA)两种过程的自相关系数和偏置相关系数重叠在一起,无法通过观察序列自相关系数和偏自相关系数的特征来确定其 ARMA 模型的阶数。为此,引入 R 语言中扩展的自相关函数(extended auto correlation function, eacf)对流量序列进行分析,检验结果如图 6 所示。

根据图 6 中的三角形区域可以确定 AR 和 MA 过程的阶数分别为 2 和 4。在 Eviews 中,采用最小二乘法估计参数得到流量序 $Flow_t$ 列的模型如式(8)所示。

$$Flow_t = \frac{[70.258\ 1 + (1 + 1.206\ 2B + 0.083\ 4B^2 + 0.057\ 2B^3 + 0.181\ 5B^4)\varepsilon_t]}{1 + 1.589\ 9B - 0.670\ 5B^2}$$

(8)

式中: B 为滞后算子, ε_t 为随机噪声序列。

4 模型验证与分析

对流量序列的 ARMA 模型进行诊断和检验,以验证模型的准确性。

4.1 模型验证

残差分析是检验模型是否准确的一种有效途径。德宾-沃森(Durbin - Watson)检验是目前检验自相关性最常用的方法,它适用于检验序列的是否具有一阶自相关性。D. W. 值为 2 时,即表明序列不具有相关性。在 R 语言中采用 dwtest 函数对残差序列(ε_t)的自相关性进行 D. W. 检验,检验结果为 2.032 1,非常接近 2,这表明残差不具有自相关性。在 R 语言中采用 Shapiro-Wilk 检验对残差序列的正态性进行检验,检验结果的 $W = 0.998$ 对应的 $p - value = 0.283$,大于 0.05 的显著水平。因此,残差序列可以看作是符合高斯分布的白噪声。通过分析,可以用均值为 0、标准差为 10.081 2 的高斯白噪声序列来表示残差序列。而式(8)的 ARMA 模型中的随机噪声序列 ε_t 无法直接观测得到,因此,用残差序列来预测随机噪声序列 ε_t ,即 ε_t 可以表示为均值为 0、标准差为 10.081 2 的高斯白噪声序列。

模型的过参数化分析即过度拟合是另一种校验模型是否准确的常用方法。该方法在得出认为合适的 ARMA 模型之后,拟合一个更加一般的模型,即一个“接近”模型,该模型以原始模型为特例包含原始模型,来检验是否存在更加有效的模型来替代原有的模型。对流量序列 ARMA 模型的 AR 和 MA 过程分别进行过度拟合检验,建立 ARMA(3,4)和 ARMA(2,5)模型。过度拟合的 ARMA 模型得到的 AR(3)和 MA(4)参数分别为



图 6 流量序列扩展的自相关图
Fig. 6 The eacf of the flow sequence

-0.000 9 和 0.007,均不显著不为零,因此,不存在更加一般的 ARMA 模型来描述该流量序列。

模型的残差分析表明残差序列具有高斯白噪声的性质,模型的过度参数化分析即过度拟合分析表明不存在更有效的模型来表征流量序列。因此,流量序列的模型,即 ARMA 模型被正确识别,并且模型的参数估计充分接近真值。

$Flow_t$ 实际序列和拟合序列对比,如图 7 所示。可见,用 ARMA 模型拟合的流量序列与实际的流量序列基本吻合。

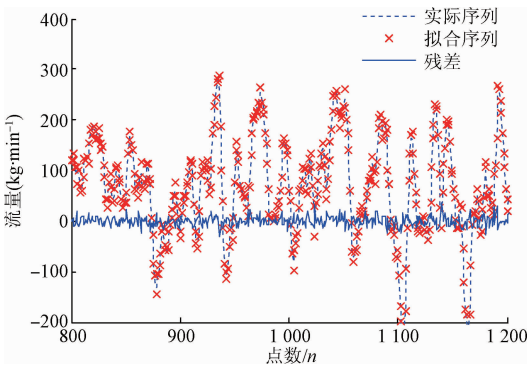


图 7 实际序列和拟合序列对比
Fig. 7 Comparison of the actual sequence and fitted sequence

为了进一步验证模型信号的准确性,用 MATLAB 软件编程生成式(8)的模型信号,分别从 PDF 估计和累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)估计这两个方面,对比模型信号与实际信号,分别如图 8、9 所示。采用核密度估计方法分别对实际流量信号和模型流量信号进行概率密度函数估计和累积分布函数估计。

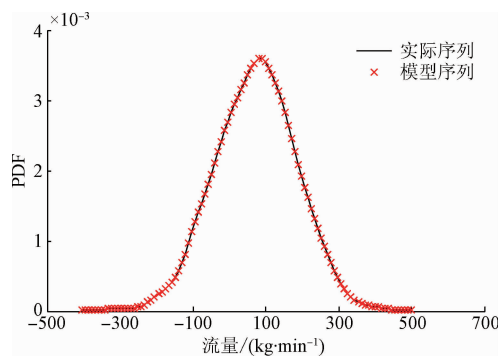


图8 序列的PDF对比

Fig. 8 PDF comparison of the sequences

由图8可知,模型信号和实际信号的概率密度函数曲线基本吻合。相关系数是用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标,本文选择式(9)所示的表达式来计算模型信号与实际信号概率密度函数之间的相关系数 ρ_{xy} 。 $|\rho_{xy}|$ 的取值范围为 $[0,1]$,越接近1,两变量的相关性越强; $|\rho_{xy}|$ 越接近0,两变量的相关性越弱。

$$\rho_{xy} = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sqrt{\text{cov}(x, x)} \sqrt{\text{cov}(y, y)}} \quad (9)$$

式中: x 为实际信号概率密度函数, y 为模型信号概率密度函数, $\text{cov}(x, y)$ 为变量 x 和 y 的协方差。实际信号与模型信号概率密度函数之间的相关系数 $\rho_{xy} = 0.9983$ 。

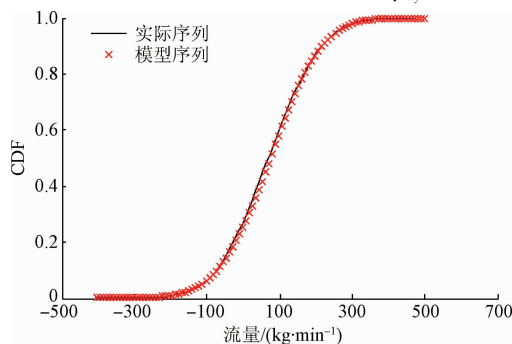


图9 序列的CDF对比

Fig. 9 CDF comparison of the sequences

由图9可知,模型信号与实际信号的累积分布函数具有十分相近的趋势,重合度较高,因此,选用式(10)所示的平均偏差公式来分析两条曲线之间的误差 e 。

$$e = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_1(i) - C_2(i))^2}}{n} \quad (10)$$

式中: C_1 为实际信号的累计分布函数, C_2 为模型信号的累计分布函数。实际信号与模型信号累积分布函数之间的误差 $e\% = 0.07385$ 。

可见,模型信号与实际信号概率密度函数的相关系

数 ρ_{xy} 非常接近1,相似程度高;累积分布函数的平均偏差 e 也很小。因此,可以进一步判断流量信号的 ARMA 数学模型是比较准确有效的。

4.2 模型分析

由建立的流量信号 ARMA 数学模型可知, $Flow_t$ 可由稳定分量 $Flow_0$ 和波动分量 δ_t 组成。其中,稳定分量反映的是一段时间内微弯型科氏质量流量计测量的平均质量流量,而波动分量则反映的是微弯型科氏质量流量计测量的瞬时质量流量的波动。

从气液两相流实验结果看,在液体质量流量约为 76 kg/min、密度降约为 15% 时,实际平均流量为 76.60 kg/min。根据流量信号数学模型可知,微弯型科氏质量流量计输出流量信号的稳定分量值 70.50 kg/min,其误差为 -7.96%,这就是气液两相流下一个流量点的测量误差。而不同流量、不同密度降下流量信号的稳定分量的误差如图2所示。可知,气液两相流下,随着流量和密度降的变化,流量信号稳定分量出现较大的误差,且误差主要为负值。稳定分量误差呈现出非线性、非完全单调性的特点。微弯型科氏质量流量计用于测量气液两相流时,其测量误差是就一段时间内累积流量的测量误差,也就是平均流量的测量误差。同时,流量信号中稳定分量对应着平均流量,因此,稳定分量与真实的平均流量之间存在的偏差反映了气液两相流测量误差,如图10所示。

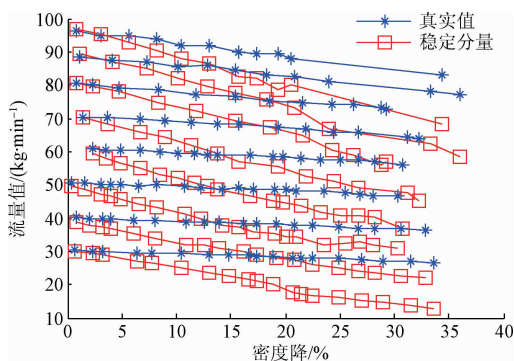


图10 流量序列稳定分量与真实值

Fig. 10 The stable components and true values of the flow sequences

这从理论上解释文献[16]所采用误差修正方法的合理性,即对流量序列的稳定分量进行修正,可以提高微弯型科氏质量流量计测量精度。

波动分量反映了实际流量瞬时值的波动。气液两相流下,波动分量变化巨大,也即瞬时流量波动剧烈。我们研制的微弯型科氏流量变送器采用“信号参数估计+滑动平均”的处理算法,即在一个参数估计周期(133 ms)内对计算得到的信号参数(频率、相位等)做排序、去异常值及取均值处理,得到一个流量结果;然后,将该流量

结果再送入下一级滑动平均数组中,进行二次平均。这里,考虑到仪表的响应时间的限制,滑动平均数组窗长 N 为 15。采用该信号处理算法的优点是:在参数估计部分,排除了异常值并做了均值处理,可以保证流量计算结果更精确,而后续滑动平均的加入,可以保证流量计算结果更平稳。通过该算法可以抑制波动分量对瞬时流量的影响,降低瞬时流量计算值的波动程度,提高质量流量测量的稳定性。流量序列符合均值非零的高斯分布,稳定分量对应着非零均值,波动分量对应着高斯分布特性。通过有限长度滑动平均的处理,可以在一定程度上抵消波动分量的高斯分布特性,使得稳定分量的非零均值显现出来,如图 11 所示。

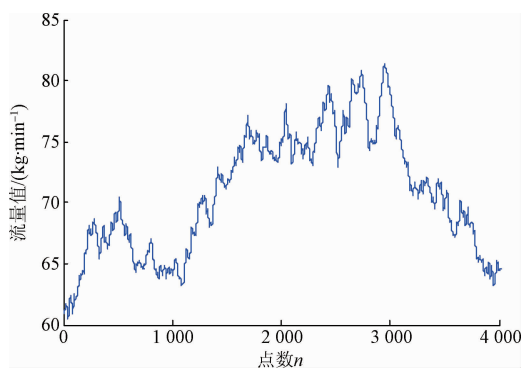


图 11 流量序列滑动平均输出

Fig. 11 The sliding average outputs of the flow sequence

此时,输出值均为一定范围内较为稳定的正值,这与变送器的的工作原理相符;同时,也符合微弯型科氏质量流量计的计量要求和目标。

5 结 论

设计微弯型科氏质量流量计气-液两相流的实验方案,并进行水流量为 30 ~ 100 kg/min、密度降为 0% ~ 35% 的气液两相流实验。实验结果表明,气-液两相流测量误差最大达到 -50%,误差表现为非线性和非完全单调性,且随着密度降升高,测量误差的规律性变差。

针对微弯型科氏质量传感器输出信号,提取瞬时流量这一特征量,得到流量序列,采用时间序列分析的方法对流量序列进行分析建模,得到其完整的 ARMA 数学模型,并验证了模型的准确性,为进一步研究微弯型科氏质量流量计气液两相流测量问题提供了可靠的流量信号的数学模型。

分析流量序列的稳定分量和波动分量对气-液两相流测量的影响,稳定分量与真实值的偏差反映了气液两相流测量误差,而波动分量则直接反映了瞬时流量

测量的稳定性。因此,对稳定分量进行修正可以减小测量误差,对波动分量进行抑制可以提高瞬时流量测量的稳定性。这为后续进一步提高微弯型科氏质量流量计测量气-液两相流的测量精度和测量稳定性奠定了基础。

参考文献

- [1] ANKLIN M, DRAHM W, RIEDER A. Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(6): 317-323.
- [2] TAO W, ROGER B. Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2014, 40(12): 99-123.
- [3] GYSLING D L. An aeroelastic model of Coriolis mass and density meters operating on aerated mixtures [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2007, 18(2): 69-77.
- [4] HEMP J, YEUNG H. Coriolis meters in two phase conditions [J]. IEEE Computing & Control Engineering, 2003, 14(4): 36.
- [5] LIU R P, FUENT M J, HENRY M P, et al. A neural network to correct mass flow errors caused by two-phase flow in a digital Coriolis mass flowmeter [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12(1): 53-63.
- [6] HENRY M D, TOMBS M, DUTA M D, et al. Two-phase flow metering of heavy oil using a Coriolis mass flow meter: A case study [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(6): 399-413.
- [7] HENRY M P, FUENTE M J D L. Correcting for two-phase flow in a digital flowmeter, U. S. Patent 6 758 102 B2[P]. 2004.
- [8] HOU Q L, XU K J FANG M. Gas-liquid two-phase flow correction method for digital CMF [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(10): 2396-2404.
- [9] 王力勇, 王兴才. 弯管式 CMF 和直管式 CMF 的特点比较 [J]. 自动化与仪器仪表, 2001(3): 54-57, 60. WANG L Y, WANG X C. The comparison between curve-shaped and straight-shaped CMF [J]. Automation & Instrumentation, 2001(3), 54-57, 60.
- [10] 李叶, 徐科军, 朱志海, 等. 面向时变的科里奥利质量流量计信号的处理方法研究与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 8-14. LI Y, XU K J, ZHU ZH H, et al. Study and implementation of processing method for time-varying signal of Coriolis mass flow-meter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 8-14.

- [11] HOU Q L, XU K J, FANG M, et al. A DSP-based signal processing method and system for CMF [J]. Measurement, 2013, 46(7): 2184-2192.
- [12] 陶波波, 侯其立, 石岩, 等. 科氏质量流量计测量含气液体流量的方法与实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1796-1802.
TAO B B, HOU Q L, SHI Y, et al. Method and implementation of measuring liquid flow mixed with gas for coriolis mass flowmeter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1796-1802.
- [13] GIVENS G H. Givens, consistency of the local kernel density estimator [J]. Statistics & Probability Letters, 1995 25(1): 55-61.
- [14] WAND M P, JONES M C. Kernel smoothing [M]. London: Chapman & Hall, 1995.
- [15] SHUMWAY R H, STOFFER D S. Time series analysis and its applications: With R examples [M]. 2nd ed, New York: Springer, 2006.
- [16] 董帅, 徐科军, 侯其立, 等. 微弯型科氏质量流量计测量气-液两相流研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1972-1977.
DONG SH, XU K J, HOU Q L, et al. Study on measuring gas-liquid two-phase flow with micro-bend type

Coriolis mass flowmeter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(9): 1972-1977.

作者简介



张建国, 2015 年于合肥工业大学获工学学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为 DSP 应用技术。

E-mail: 15256005930@163.com

Zhang Jianguo received his B. Sc. degree in 2015 from Hefei University of Technology. He is currently a Master student in Hefei University of Technology. His main research interest is DSP application technology.



徐科军(通讯作者), 1988 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为传感器技术、自动化仪表和数字信号处理。

E-mail: dsplab@hfut.edu.cn

Xu Kejun (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 1988 in electrical engineering and automation from China University of Mining and Technology. Now he is a Professor at Hefei University of Technology. His main research interests include sensor technology, process instrumentation, and digital signal processing.