

## Method for Identifying Gas/Liquid Two-Phase Flow Patterns Using Conductance Probes Technique and Noise Recognition of Conductance Fluctuating Signals\*

ZHOU Yun-long<sup>1\*</sup>, ZHANG Xue-qing<sup>2</sup>, SUN Bin<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin Jilin 132012, China;  
2. School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin Jilin 132012, China)

**Abstract:** For the identification of gas/liquid two-phase flow in vertical upward pipe, a kind of measuring system with multiple conductance probes was presented, of which conductance sensors was composed by three conductance probes, and data acquisition of conductance fluctuation signals came true by using INV306 data collection card on the basis of measuring system. Owing to measuring the parameters of different kinds of production, signals inevitably presented noise information, conductance fluctuation signals was supposed to low frequency signals, of which the frequency was not over 128Hz, by means of wavelet decomposition and the analysis of auto-correlation function. After eliminating noise with wavelet analysis and Fourier transform, we found the useful signals were well preserved by wavelet analysis, which had more merit than Fourier transform.

**Key words:** gas/liquid two phase flow; noise recognition; conductance probes; auto-correlation function  
**EEACC:** 0545; 5230

## 应用电导探针技术识别气液两相流 流型方法及电导波动信号噪声的辨识\*

周云龙<sup>1\*</sup>, 张学清<sup>2</sup>, 孙斌<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学能源与机械工程学院, 吉林 吉林 132012;  
2. 东北电力大学自动化工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘 要:** 针对垂直上升管的气液两相流流型的识别, 提出了一种多电导探针测量系统, 该测量系统由 3 个电导探头组成电导传感器, 在此基础上利用 INV306 型数据采集卡实现了电导波动信号的数据采集。由于各种生产过程的参数进行测量时不可避免地信号中存在噪声信息, 通过对信号的小波分解和自相关函数的分析发现电导波动信号为低频信号, 且其频率一般不会超过 128Hz。又通过对信号进行了小波去噪和傅立叶变换去噪之后发现利用小波分析进行信号的消噪可以很好的保存原信号中的有用部分, 其有着傅立叶分析不可比拟的优点。

**关键词:** 气液两相流; 噪声辨识; 电导探针; 自相关函数

**中图分类号:** P631.32; O359.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2008)10-1708-05

众所周知, 两相流动现象广泛存在于自然界和许多工业过程中。目前, 在动力、化工、核能、制冷、石油和冶金等行业的许多生产设备中都涉及到气液两相流动工况。两相流动介质的分布状况, 即流型, 极大地影响着两相流动压力损失和传热传质等特性, 同时影响着流动参数的准确测量以及流动系统

的运行特性。因此气液两相流流型识别的研究一直是两相流参数测量的一个重要研究方向。

传统的两相流流型判别方法主要有两大类: 一类是采用试验方法做出的流型图。另一类是根据对流型转变机理得到的转变关系式, 利用现场的流动参数来确定具体的流型。这两大类判别方法在识别

基金项目: 吉林省科技发展计划项目资助(20040513)

收稿日期: 2008-04-16 修改日期: 2008-07-17

流型方面有很多的不足: 如精度不高局限性较大, 不同的流型图之间存在一些差别等。因此, 传统的流型识别方法仅可作为一种定性的方法<sup>[1]</sup>。

到目前为止, 利用传统的流型判别方法只能大致预测流型及其转换, 但是不能准确的获取流动状态的实时信息, 于是应用仪器设备直接识别管道内气液两相流的流型就自然而然的成为人们的选择。根据工作原理, 主要有以下两类流型识别方法: 一类是根据两相流流动图像的形式直接确定流型, 如目测法、高速摄影法、射线衰减法、接触探头法、过程层析成像法等; 另一类是间接方法, 即通过对反映两相流流动特性的波动信号进行分析处理, 提取流型特征, 进而识别流型<sup>[2]</sup>。

本课题组在用高速摄影法以及用提取反映两相流流动特性的压差波动信号的流型特征的方法来识别流型已经取得了许多宝贵的经验<sup>[3]</sup>。周云龙<sup>[4-6]</sup>等采用高速摄像机拍摄流体的流动状态, 并利用图像小波变换、图像不变矩、灰度共生矩阵、图像小波包信息熵等方法进行流型特征的提取, 并用遗传神经网络、支持向量机、概率神经网络和 Elman 神经网络等模型对流型进行了识别, 取得了很好的效果。孙斌<sup>[7-10]</sup>等通过实验采集气液两相流的压差波动信号, 利用小波能量特征、希尔伯特-黄变换、混沌理论等方法建立流型的波动特征, 结合 Kohonen 神经网络、支持向量机等模型对流型进行了很好的识别。

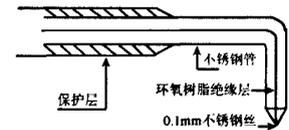
尽管目前流型识别与机理的研究已经取得了较大的发展, 而应用电导探头法又使其在近几年有了明显的进步, 但是目前设计电导探针传感器的问题还没有比较完整的设计准则。Lucas<sup>[11-12]</sup>等利用在微型绝缘探棒上镶嵌 6 个微小环形电极构成的外流式局部电导探测器实现了液/固两相流的测量。刘兴斌<sup>[13]</sup>等提出了集流型四电极电导传感器的油水两相流测量方法。金宁德<sup>[14]</sup>等利用纵向八电极阵列电导式传感器的两相流测量系统采集气液两相流电导波动信号, 然后应用混沌分形理论对流型以其转换机理进行了分析, 取得了很好的识别效果。Fossa<sup>[15]</sup>等在环状流、层状流和泡状流下, 对环形探针在管道内气液两相混合介质中的导电性进行了研究, 发现其具有很好的重复性和可用性, 测量结果与理论值的误差在 15% 以内。在环状流下, 对线性探针的测量性能进行了研究, 发现在同一流动状态下线性探针比环形探针具有更高的灵敏度, 但测量的不确定性较大。而 Bergles<sup>[16]</sup>应用单根探头进行了流型测量, 实验效果不是很理想。

本文针对环形探针和线性探针的测量性能的特

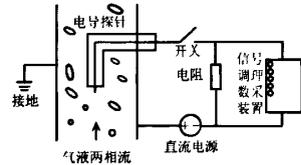
点, 提出了采用多电导探针结构测量系统来对流型进行识别, 取得了电导探头法识别流型的新认识。同时采集到的气液两相流电导波动信号难免会受到各种干扰, 如电路的工频干扰, 水泵运行带动管路的振动引起的流型不稳, 以及设备自身的影响而引起的噪声等, 而这种干扰会严重影响非线性分析的精度和结果, 目前文献中尚没有对垂直上升管中的气液两相流电导波动信号的噪声的消除问题进行报道。针对这一问题本文又应用小波分解对电导波动信号进行处理, 然后用自相关函数对不同频率分段逐一进行研究, 取得了一定的结果, 又通过对信号进行了小波变换和傅立叶变换去噪, 对比发现了它们效果的异同。

## 1 电导探针的制作工艺及测量原理

图 1(a)(b) 分别给出了本实验中采用的探头结构放大后的示意图及多电导探针的测量系统原理图。实验中所用电导探针为作者自制, 现在尚无商品探针出售。



(a) 电导探针结构图



(b) 单根电导探针测量原理电路

图 1 多电导探针测量系统示意图

其制作过程如下: 取一根直径为 0.1 mm 的不锈钢丝做探针电极, 将不锈钢丝一端研磨成楔状尖部, 然后将该端浸入腐蚀液中, 在高倍读数显微镜下测量尖部的直径尺寸直至达到 10~30  $\mu\text{m}$ ; 给整个电极均匀涂红色绝缘漆并烘干, 然后将探针小心插入一个弯度为 90° 的不锈钢外套筒中, 不锈钢套筒的外径为 1.3 mm。这样做的目的是保证管道内探针和套筒的存在对流型的影响尽可能地小。注射绝缘漆到套筒内部, 保证电极与外壳之间彼此绝缘。然后用高强度的环氧树脂固定好电极以及与外壳的连接并干燥。最后, 将探针尖轻轻地垂直滑过水砂纸, 在探针尖部产生一个非常短的导通距离。这样有利于测量结果的精确。

测量原理 电导探针的测量电路可以采用直流

法或交流法,由于本文为实验研究,因此采用了较为简单的直流法。为了防止电导探头上易产生电化学反应,将电导探头插入管道中心处作为一个电极,金属管道的内壁作为另一个电极,直流电源通过电阻 $R$ 与两个电极相连,其中电源正极与管道的内壁相连,这样做是为了减少探头处的电化学反应。用数据采集装置采集电阻 $R$ 上的电压信号,当探针接触液相时探针与管壁接通,电阻 $R$ 上出现高电平;当探针接触气相时,探针与管壁断开,电阻 $R$ 上出现低电平<sup>[17]</sup>。这样探头处液相和气相的不断交替就可以产生与各种流型对应的不同的响应信号,经过滤波和信号处理电路,由数采装置就可以对电阻上的不同的流型信号进行提取与分析。

由于本文所用的实验段的管道为有机玻璃管不能导电所以也就不能作为另一个电极使用,因此本文的实验是在有机玻璃管的内壁用一些铜丝粘附在内壁,构成上述金属管道作为另一个电极的作用。这些铜丝与玻璃管的轴向保持平行并与直流电源的正极相连。本文采用的多电导探针结构是由三个电导探针组成的测量系统,轴向距离相隔25 mm,在圆周弧度上相差 $\pi/3$ 的角度,这样主要是考虑探头与气泡接触时,有充分的空间刺穿气泡并互不干扰彼此的流型信号。

## 2 测量系统

测量系统是由电导探头、电源、信号调理模块和数据采集设备等四部分组成。其中信号调理模块主要是由差动放大、相敏解调和低通滤波三个模块组成。

数据采集选用的是 INV303~306 型智能信号采集处理系统,共有 16 个通道,且具有同步采集的功能。它自带的系统分析功能可以完成实时显示的波形变化,实时存储数据并在线完成相关运算和数据分析等功能。采用的是触发采样模式,可以完成边采边显的功能。

## 3 实验系统及方法

实验是在气水两相流实验台完成的,实验系统如图 2 所示。实验工质采用空气和水,空气经空压机增压和孔板流量计计量后进入气液两相混合器,水由水泵抽出,用电磁流量计计量后到气液两相混合器,从气液两相混合器出来的气水混合物,流经实验段进行各项数据测量后,进入旋风分离器,将空气分离出来并排入大气,剩下的水流回水箱供循环使用。

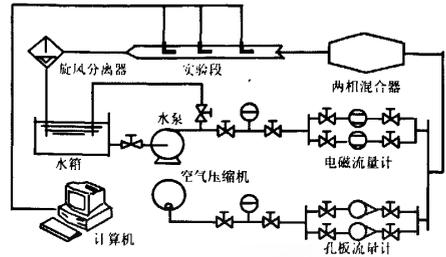


图 2 空气-水两相流实验系统

其中实验段是垂直管段,内径为 29 mm 的有机透明玻璃管,长度为 2 000 mm。气液两相流电导波动信号由自己制作的多电导探针测量系统进行测量,并由 INV306 型智能数据采集板进行采集。采样频率为 256 Hz,采样点数为 2 048。实验过程的参数范围:压力 0.1~0.5 MPa;工质温度 3~42℃;实验中空气流量为 0~25 m<sup>3</sup>/s,水的流量为 0~4.5 m<sup>3</sup>/s。

### 3.1 小波分解

由于气液两相流电导波动信号难免会受到各种干扰,如电路和实验装置的工频干扰,以及实验时水泵运行带动管路的振动等,而这些干扰会严重影响非线性分析的精度和结果。因此在利用电导波动信号进行非线性分析以获得流型之前,通常要对电导波动信号进行滤波处理。本文尝试对信号小波分解后用自相关分析来处理。

首先对采集的电导波动信号进行五层小波分解,分别提取第五层到第二层的从低频到高频 6 个频率成份的信号特征。其分解结构如图 3 所示。

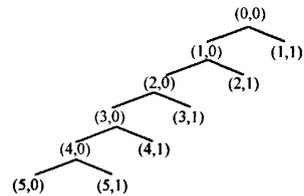


图 3 小波五层分解结构示意图

图 3 中  $(i, j)$  代表第  $i$  层的第  $j$  个节点,其中  $i, j = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ ; 每个节点都代表一定的信号特征,其中,  $(0, 0)$  节点代表原始信号  $S$ ,  $(1, 0)$  节点代表小波分解的第一层低频系数  $X_{1,0}$ ,  $(1, 1)$  节点代表小波分解的第一层高频系数  $X_{1,1}$ ,  $(5, 0)$  节点代表小波分解的第五层第 0 个节点的系数  $X_{5,0}$ 。其他依此类推。

再对小波分解系数进行重构,就可得到各频带内的时域信号。以  $S_{5,0}$  表示  $X_{5,0}$  的重构信号,  $S_{5,1}$  表示  $X_{5,1}$  的重构信号,其他依此类推。

在如图 3 所示的假设电导波动信号中小波分解

的最低频率为 0 Hz, 最高频率为 256 Hz, 则提取的 6 个频率成份所代表的频率范围分别为 (0~8 Hz), (8~16 Hz), (16~32 Hz), (32~64 Hz), (64~128 Hz), (128~256 Hz)。

3.2 自相关函数

自相关函数是反映变量  $x(t)$  及其延迟  $x(t+\tau)$  间线性相关性的函数。当变量  $x(t)$  及其延迟  $x(t+\tau)$  间的自相关函数第 1 次达到 0 时, 则可以认为变量  $x(t)$  及其延迟  $x(t+\tau)$  间线性无关。

丁晶<sup>[18]</sup> 等详细介绍了平稳各态历经过程的自相关函数  $r_k$  的计算过程。对实测样本序列  $x_i$  (其容量为  $n$ ), 其自相关函数定义为:

$$r_k = \frac{\hat{C}_k}{\hat{\sigma}_i \times \hat{\sigma}_{i+k}} \quad (1)$$

其中, 样本方差  $\hat{C}_k$ 、方差  $\hat{\sigma}_i$  和  $\hat{\sigma}_{i+k}$  分别定义为

$$\hat{C}_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_i)(x_{i+k} - \bar{x}_{i+k}) \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_i = \left[ \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_i)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_{i+k} = \left[ \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_{i+k} - \bar{x}_{i+k})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

以采集的泡状流信号为例对其进行处理。首先将信号用小波分解在频域内将时域信号分解为 6 个频段不同的时域信号, 再通过小波变换进行信号的重构得到频率分段的时间序列信号, 为检验按频带分解的线性相关性, 逐一计算了其自相关系数<sup>[19]</sup>, 图 4 为不同频带内信号第一次达到 0 时所对应的延迟时间。结果如图 4 所示。

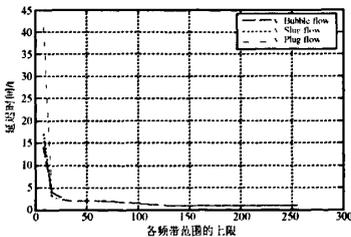


图 4 自相关函数第一次达到 0 时的延迟时间

图 4 分别为泡状流、弹状流、塞状流的电导波动信号用上述处理得到的结果。从图 4 中可以看出在 (128~256 Hz) 的频带内延迟时间均为  $1 \Delta t$ , 也就是说从 (128~256 Hz) 的频带其自相关系数第一次达到了 0, 也就可以认为 128 Hz 以上频率的信号为随机信号, 因此在进行滤波处理时应主要考虑 128 Hz 以下的信号。根据对电导波动信号中的噪声辨识的结果, 气液两相流电导波动信号的频率一般在 128 Hz 以下(气相和液相流量在实验所标定的

范围内), 所以可以对 128 Hz 以上的信号成分可以舍弃。图 5 为泡状流的原始电导波动信号图及用自相关函数逐一研究其时间延迟相关性后舍弃完的信号图形。

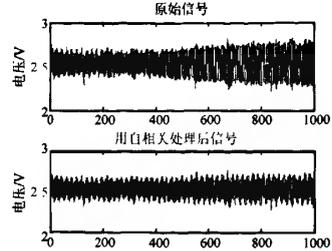


图 5 泡状流原始信号图及用自相关函数处理舍弃后的信号图

从上面的图形我们可以看出, 经过小波分解和重构并用自相关函数逐一处理后的信号图依然不能很好的反映泡状流的本质特征。由于电路和实验装置的工频干扰以及管路振动等引起的噪声还没有很好地进行处理, 所以寻找是否可以通过某种变换来进一步消除噪声就变得很关键了。

3.3 傅立叶变换与小波变换的消噪

函数  $f(t) \in L^1(R)$  的连续傅立叶变换定义为

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} f(t) dt \quad (5)$$

而  $F(\omega)$  的傅立叶逆变换定义为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} F(\omega) d\omega \quad (6)$$

小波变换的理论在文献[3]中已有详述, 在此不再叙述。有时为了计算傅立叶变换需要用数值积分, 即取  $f(t)$  在  $R$  上的离散点的值来计算这个积分。这样我们可以对信号先进行傅立叶变换, 再设定好滤波频率再进行傅立叶逆变换并取其绝对值, 信号消噪的结果如图 6 所示。而小波变换能同时在时域和频域对信号进行分析(频域内分辨率高时, 时间域内分辨率就低, 反之亦然)<sup>[20]</sup>。图 6 的小波消噪后的信号图为用 sym8 小波进行了三层分解并用 heurure 软阈值进行小波系数的阈值量化后得到的信号波形。

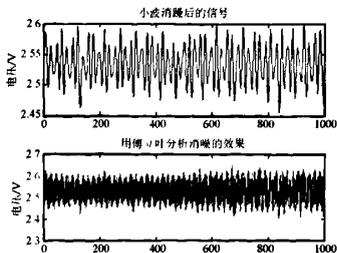


图 6 小波消噪和傅立叶变换消噪后的图形

从上面的图形我们可以看出采用傅立叶分析进行滤波后,滤波处理后的信号与原始信号没有多大的差别,并不能很好的体现本文信号消噪的目的。而用小波分析进行消噪后的信号比原始信号简单的多了,且易于对信号作进一步的信息挖掘研究。引起这种情况的原因是傅里叶变换不能将有用的信号的高频部分和噪声引起的高频干扰加以有效的区分。因此小波分析对非平稳信号消噪效果更好。

## 4 结论

① 在垂直上升管中建立了多电导探针传感器的两相流测量系统,实验结果表明,该测量系统对泡状流、弹状流、塞状流及混状流均有较好的测量响应特性。

② 气液两相流波动信号有噪声,本文对垂直上升管中气液两相流的电导波动信号进行了自相关性分析,认为在实验测定的条件下(环境温度和流体的流量),电导波动信号为低频信号,且其频率一般不会超过 128 Hz。

③ 对电导波动信号分别用小波变换和傅立叶变换进行了噪声的滤除,结果发现用小波分析进行信号的消噪可以更好的保存信号中的有用部分,其有着傅立叶分析不可比拟的优点。

④ 对于其它条件下的气液两相流 128 Hz 以上的电导波动信号是否为噪声信号,需要以后做进一步的研究。还有就是本系统还没有对各种流型之间的过渡流型进行测定,所以其他情况还有待做进一步的探讨。

## 参考文献:

[1] 林宗虎. 气液两相流与沸腾传热[M]. 西安:西安交通大学出版社,1987.  
 [2] 李海青. 两相流参数检测及应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,1991.  
 [3] 周云龙,孙斌,陈飞. 气液两相流智能识别理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2007.  
 [4] 周云龙,陈飞,孙斌. 基于灰度共生矩阵和支持向量机的气液两相流流型识别[J]. 化工学报,2007,58(9):2232-2237.

[5] 周云龙,陈飞,刘川. 基于图象处理和 Elman 神经网络的气液两相流流型识别[J]. 中国电机工程学报,2007,(29):108-112.  
 [6] 周云龙,陈飞,孙斌. 基于图像小波包信息熵和遗传神经网络的气液两相流流型识别[J]. 核动力工程,2008,29(1):115-120.  
 [7] 孙斌,周云龙,张玲等. 基于小波包分解和 Kohonen 神经网络的气液两相流流型识别方法[J]. 热能动力工程,2005,20(1):48-52.  
 [8] 孙斌,周云龙,向新星等. 基于经验模式分解和概率神经网络的气液两相流流型识别方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(17):72-77.  
 [9] 孙斌,周云龙. 基于支持向量机和小波包能量特征的气液两相流流型识别方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(17):93-99.  
 [10] 孙斌,周云龙. 基于小波包能量特征的气液两相流流型识别方法[J]. 化学工程,2006,34(2):33-36.  
 [11] Lucas G P, Cory J, Waterfall R C, Loh W W, Dickin F J. Measurement of the Solids Volume Fraction and Velocity Distributions in Solids Liquid Flows Using Dual Plane Electrical Resistance Tomography[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1999, 10:249-258.  
 [12] Lucas G P, Cory J C, Waterfall R C. A Six-Electrode Local Probe for Measuring Solids Velocity and Volume Fraction Profiles in Solids Water Flows[J]. Measurement Science Technology, 2000,11:1498-1509.  
 [13] 刘兴斌. 井下油/水两相流测量[D]. 哈尔滨工业大学,博士论文. 1996.  
 [14] 金宁德,郑桂波,胡凌云. 垂直上升管中气液两相流电导波动信号的混浊特性分析[J]. 地球物理学报,2006,49(5):1552-1560.  
 [15] Fossa M. Design and Performance of a Conductance Probe for Measuring the Liquid in Two-Phase Gas-Liquid Flows[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 1998, 9(2):103-109.  
 [16] Bergles A. E. Electrical Probes for Study of Two Phase Flows[C]// 11th Nat. ASME/AIChE Heat Transfer Conference, Minneapolis, 1969:70-81.  
 [17] 孙科震,陈学俊等. 应用双头电导探针技术测量气液两相泡状流局部参数[J]. 计量学报,1999,20(4):297-303.  
 [18] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1998.  
 [19] 孙斌,周云龙,陆军等. 气液两相流压差波动信号中噪声的辨识[J]. 2005,26(6):636-639.  
 [20] 胡柏青,魏峥,王伯雄等. 强噪条件下基于小波降噪的陀螺仪声信号处理方法[J]. 传感技术学报,2008,21(6):1007-1009.



周云龙(1960-),男,1991年于西安交通大学博士毕业,现为东北电力大学教授,博士生导师。主要从事多相流检测技术方面的研究, zyl@mail.ned. edu. cn