

油气水多相流压力和压差信号 特征分析与流型在线识别

白博峰 郭烈锦 王忠勇 张西民

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要 在宽广的实验参数范围内测量了水平管内油气水多相流动时压力和压差信号, 对信号的时域、频域、小波尺度域、分形等特征进行了提取与分析, 建立了流型的规则识别和模式识别的融合方法。经过实验测试, 该方法可以识别出泡状流、分层流、间歇流和环状流, 流型识别率高于 90%。

关键词 油气水多相流; 压力; 压差; 特征提取; 特征分析

中图分类号: O 359 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2002)03-0357-04

FEATURE ANALYSIS OF PRESSURE AND DIFFERENTIAL PRESSURE SIGNALS FOR OIL-GAS-WATER MULTIPHASE FLOW AND ONLINE RECOGNITION OF FLOW REGIMES

BAI Bo-Feng GUO Lie-Jin WANG Zhong-Yong ZHANG Xi-Min

(State Key Lab of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract Both pressure and differential pressure signals were measured for oil-gas-water multiphase flow in wide ranges of flow parameters in horizontal pipe. The signals' features were extracted and analyzed, which included time domain features, frequency domain features, scale domain features and fractal features. On the bases of the feature analysis, the online recognition of flow regimes was proposed which was a fusion method combining the regulations of flow regimes and the pattern recognition. The proposed method was examined in the oil-gas-water loop and results showed that bubble flow, stratified flow, intermittent flow and annular flow could be identified with more than 90% accuracy.

Key words oil-gas-water multiphase flow; pressure; differential pressure; feature analysis

1 引 言

当多相流混合物在管道内流动时, 壁面静压力和压差信号都包含了关于流动的大量信息, 文献 [1] 认为分析各种信号特征是实现多相流动智能控制和智能测量的基础。

采用神经网络理论智能识别流型是当前的一一个新方向。Monji 和 Matsui^[2] 采用前向网络, 将含气率信号的均方根、斜度和峰度作为网络的输入特征, 对气液两相流型的识别率可达 91%。Mi 和 Ishii^[3] 采用含气率信号的均值和方差作为神经网络的特征

输入, 分别采用有 BP 网络和自组织映射网络进行气液两相流型的客观识别。白博峰等人研究了根据压力和压差信号不同特征组合进行流型的 BP 神经网络识别方法^[4], 并采用自组织神经网络实现了气液两相流型在线识别^[5]。对于油气水三相流, 由于油水相分布的极端复杂性, 神经网络识别理论在多相流领域的应用还远不成熟。Haojiang 等^[6] 采用确定性混沌方法研究了压差波动过程的关联维数, 采用神经网络的方法得到了一种流型识别方法, 由于采用的关联维数不是饱和值, 因此有较大的随意性。文献 [7] 综述了流型智能识别的研究进展, 认为

收稿日期: 2001-11-18; 修订日期: 2002-03-01

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (No.59995460-2); 国家杰出青年科学基金资助项目 (No.59725616)

作者简介: 白博峰 (1971-), 男, 河北南皮人, 讲师, 工学博士, 主要从事多相流动与传热的研究。

有以下问题尚待深入研究：(1) 单个传感器或单个参数不能全面描述流型的特征；(2) 神经网络模型都存在着不同程度的不足；(3) 神经网络识别方法难以考虑多相流体力学的基本原理或特性。

本文根据特征提取原理在宽广的实验参数范围内研究了油气水多相流的压力和压差信号特性，最后根据数据融合的思路实现了流型的在线识别。

2 实验系统简介与油气水多相流流型

实验是在油、气、水多相流实验系统上进行的。油相采用 40# 机油。实验管段采用内径 40 mm 的有机玻璃管，长度为 20 m，测量系统位于距入口 15 m 的地方。在实验段上布置了 2 组压力变送器，这 2 组变送器的距离为 200 mm，每组由 2 只分别布置在管子上下侧的压力变送器组成，此外利用电容式压差变送器测量局部压差波动过程，压差的测量长度为 200 mm(见图 1)。

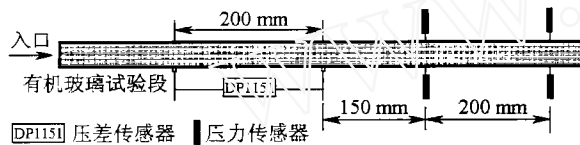


图 1 实验段测量系统的布置

实验共进行了 8 个油水比，对应的液相体积含油率(简称含油率)为 11.1%，20.0%，25.0%，33.3%，50.0%，66.7%，75.0%。其它实验参数如下：绝对压力 $P = 0.1 \sim 0.3$ MPa；温度 $t = 4 \sim 15^\circ\text{C}$ ；折算油速 $0.05 \sim 0.51$ m/s；折算气速 $0.02 \sim 50.6$ m/s；折算水速 $0.05 \sim 1.51$ m/s。

实验参考两相流流型划分的方法，将水平管内油气水三相流流型分成泡状流、间歇流(包括长气泡流、塞状流、弹状流)、分层流和环状流。

3 特征提取的相关原理和方法

3.1 信号预处理

实验测量信号包含了多种噪声，如电源的工频干扰、环境噪声、测量电路噪声，以及采样信号进行 A/D 转换时的量化噪声等。预处理主要有两步：第一步去均值；第二步根据小波变换中的奇异理论，对原始采样信号进行自适应滤波消噪。

3.2 特征提取原则

流型识别能否成功，在很大程度上取决于特征提取与分析。特征提取的主要内容是利用有关数学工具降低模式维数，寻找最有效的特征构成较低维数

表示的模式向量。实际上反映流型的特征量很多，根据反映流型变化的规律性、敏感性和在模式(即流型)空间中的聚类性、可分性的程度，选择规律性好、敏感性强、同类模式聚类性好、异类模式间可分离性好的特征量作为模式向量，才能满足模式识别的原则^[8]。

3.3 特征提取方法

特征提取的方法很多，本文主要研究了时域分析的特征生成，频域分析的特征生成，基于小波变化的特征生成和分形分析的特征生成等方法。对时域特征，分析了均值、均方根、平均偏差、脉冲因子、一步自相关系数；对频域特征，分析了 Fourier 谱、频率重心、频率方差、均方频率、 $0 \sim 10$ Hz 总功率谱；对小波变换特征，分析了采用信号在不同尺度上的能量；对混沌特性，提取了不同尺度上的网格计数分维数。

4 实验结果与分析

4.1 压力压差信号及其频谱特性

当油速和水速都很小时，各种流型压力、压差信号的差异较明显。对泡状流，压力、压差波动幅度小，功率谱近似随机分布；对长气泡流，压差信号周期成分比压力信号明显；对塞状流，压力信号类似矩形波，压差信号出现周期突升；对弹状流，压差信号出现突升的频率增加，而压力信号的周期性减小；对环状流，压力、压差信号的能量增加，压力、压差信号不再有周期现象；对分层流，低气速时类似于泡状流，高气速时出现周期波动现象。

液速和含油率的大小强烈影响压力和压差的波动特性。液速或含油率增加使得压力、压差信号的功率谱分布在各流型间的差异减小；当液速很大时，所有流型的压力、压差信号及其谱分布特性接近。

4.2 其它特征结果与分析

在低液速下，可以利用压力信号的均方根特征对相同液速的特定流型进行分类。例如，当流型从塞状流转变到弹状流时，RMS 有明显的增加，流型从弹状流转变到环状流时，RMS 出现突降。但是，对泡状流、分层流、和低气速的间歇流 RMS 随气速的变化过程无法反映出流型的变化。

压力、压差信号的其它特征参数随折算气速的变化过程，如平均偏差、一步自相关系数、脉冲因子、峰值因子、频率重心、频率方差和均方频率、分维数等，都不能体现流型的转变。

小波变换特征结果表明，压力、压差信号在各种尺度上的均方根随气速的变化规律完全相同，并

且和原信号的均方根规律完全相同, 差别在于均方根的大小随尺度的增加而增加。

4.3 特征参数在同类与异类模式中的属性

在实际应用中, 由于折算气速的大小也是一个待解决的课题, 因此采用气速的大小对流型进行分类是不现实的。图 2 给出了不同流型下压差信号的均值和 0~10 Hz 内总功率谱的数值范围。

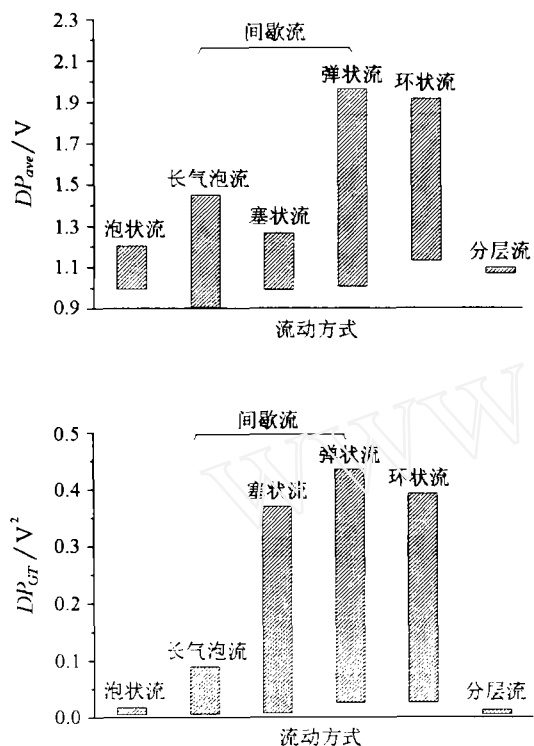


图 2 压差信号的均值和总功率谱实验结果

根据这些结果可知, 特征参数对多数流型存在严重的交叉现象, 也就是说特征参数对不同模式(流型)的可分离性很差, 不能根据一个特征参数的大小识别出某个流型。其它特征参数的实验结果也具有相同的结论。值得注意的是, 根据压差波动在 0~10 Hz 内的总功率谱, 可将所有流型分成两大类: (1) $DP_{GT} \leq 0.02$, 对应全部的环状流和部分间歇流(包括全部的弹状流和部分塞状流)。(2) $DP_{GT} \geq 0.02$, 对应全部的泡状流、分层流和部分间歇流(包括长气泡流和塞状流)。

由于压差具有直接测量的特点, 将所有特征参数在时均压差域展开, 分析这些组合特征的规律。图 3 给出了类间分离性较好的特征参数结果。根据这些组合特征, 可以确定特定流型的存在界限, 从而建立流型识别的规则。

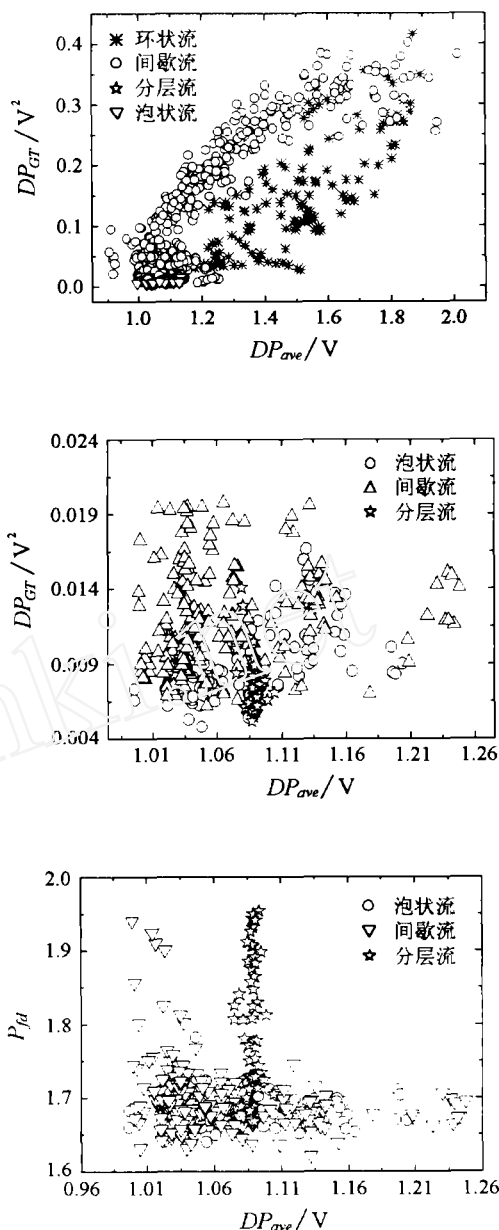


图 3 特征参数在压差域的展开

5 流型在线识别技术与实现

压力、压差信号构成了流型识别的基本信息特征空间。相对于这一空间而言, 频谱分析、统计分析和非线性分析等技术的适用范围都是有限的, 只能在一定的知识范围内提供流型识别的信息。压力和压差信号的特征在不同的层次上是互补、支持和竞争的。成功的流型识别方法必然是多信号多种分析技术与知识的集成和融合。数据融合技术的提供了一种解决方案^[9]。

5.1 流型识别数据融合技术的实现

5.1.1 流型的多信息获取 采用压力、压差的波动信号作为流型识别的信息来源。

5.1.2 信号的多特征提取 压力信号: 傅立叶功率谱, 均方根, 分维数; 压差信号: 均值, 傅立叶功率谱, 0~10 Hz 的总功率谱。

5.1.3 流型识别的规则与模式识别方法的融合 根据压力、压差信号特征提取与特征分析的结果, 建立流型识别的规则。将满足规则的流型直接识别出来。对不满足规则的流型采用模式识别理论, 即利用学习矢量量化方法(流型分类器)进行流型的识别。流型识别流程见图 4。

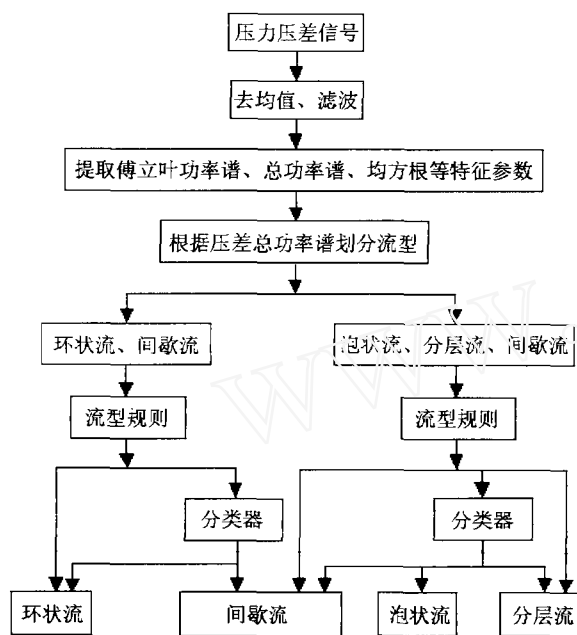


图 4 油气水多相流流型在线识别流程

5.2 测试与验证

在实验系统上直接进行检测, 测试的参数范围覆盖了所有实验流动参数和含油率的范围。压力、压差信号的采样频率为 71 Hz, 数据长度 1024 点, 时间历程 14.4 s。对相同工况采用连续三次识别的方法以检验方法的可重复性。检测结果见表 1。对识别错误的环状流, 绝大多数被误识别为间歇流; 在误识别的间歇流中, 有 7 个工况被识别为环状流, 10 个工况被识别为泡状流, 其余 6 个工况被识别为分层流; 在误识别的分层流中, 有 2 个工况被识别为间歇流, 其余被识别为泡状流; 在误识别的泡状流中, 有 3 个工况被识别为间歇流, 其余被识别为分层流。流型的总平均识别率为 93.2%。在这种流型自动识别方法中, 信号的小波自适应滤波的计算

量最大。流型识别过程所用时间主要是为获得足够流动信息所必需的采样时间。

表 1 油气水多相流流型识别技术的测试结果

流型种类	识别样本数	识别正确	识别率
环状流	200	185	92.5%
间歇流	400	377	96.8%
分层流	50	46	90.2%
泡状流	60	54	90.0%

6 结 论

(1) 液速大小和含油率强烈影响压力和压差信号的特征。特征参数对所有流型都存在严重的交叉现象。

(2) 利用压差信号的均值、均方根、总功率谱、压力信号的分维数等可建立流型识别规则。

(3) 根据数据融合的基本思想和基本方法, 采用规则与模式识别的融合技术, 实现了油气水多相流流型的智能识别。经过大量实验验证, 流型平均识别率高于 90%。

参 考 文 献

- [1] Furness R. Future Flow Measurement Has Digital Influence. Control Engineering, 1996, 20
- [2] Monji H, Matsui G. Flow Pattern Identification of Gas-Liquid Two-phase Flow Using a Neural Network. In: Proc. of 3rd International Conference on Multiphase Flow, ICMF'98. Lyon, 1998
- [3] Mi Y, Ishii M, Tsoukalas L H. Vertical Two-Phase Flow Identification Using Advanced Instrumentation and Neural Networks. Nuclear Engineering and Design, 1998, 184: 409-420
- [4] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 气液两相流流型 BP 网络识别. 计量学报, 2001, 22(2): 122-127
- [5] 白博峰, 郭烈锦, 陈学俊. 基于反传神经网络和压差波动识别气液两相流流型. 化工学报, 2000, 51(6): 848-852
- [6] Haojiang Wu, Fangde Zhou, Yuyuan Wu. Intelligent Identification System of Flow Regime of Oil-Gas-Water Multiphase Flow. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27: 459-475
- [7] 白博峰, 郭烈锦, 赵亮. 汽(气)液两相流流型在线识别的研究进展. 力学进展, 2001, 22(2): 437-446
- [8] 温熙森, 胡莺庆, 邱静. 模式识别与状态监测. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997. 203-232
- [9] 康耀红. 数据融合理论与应用. 西安: 电子科技大学出版社, 1997. 1-10