

基于随机子空间结合稳定图的气液两相流型分析*

李洪伟 周云龙[†] 刘旭 孙斌

(东北电力大学能源与动力工程学院, 吉林 132012)

(2011年5月16日收到; 2011年6月2日收到修改稿)

研究了儿种典型气液两相流型的稳定图特征, 并应用随机子空间方法对 47 种流动条件下的流型信号进行了识别. 研究表明: 稳定图特征能够反映出复杂时间序列的内部特征, 利用其提取的直线度特征值可以对时间序列的特征进行量化分析, 三种典型流型的稳定图特征差异较明显, 泡状流的稳定图特征最为混乱, 雾状流次之, 段塞流最为规整. 应用随机子空间方法对气液两相流图像灰度波动序列进行特征向量提取和辨识, 通过幅值以及相角的分布特征能够对不同工况下的流型样本进行准确分类, 为多相流的分类提供了一条新路径. 同时基于稳定图的分析方法为进一步揭示多相流的流动机理提供有益的探索.

关键词: 随机子空间, 稳定图, 气液两相流, 动力学特性

PACS: 05.45.-a, 47.54.-r, 47.55.Ca

1 引言

两相流动现象广泛存在于化学、石油、动力工程以及各种加工工业的换热设备中, 如蒸发器、冷凝器、锅炉以及油气输送等. 流型在两相流的流动和传热特性的研究中是非常关键的, 它虽然没有定量的描述, 但它是决定传热与流动的计算依据. 不同的流型, 有其独特的传热与流动机理. 流道中流型的变化往往会引发流阻、流动的稳定性改变以及出现传热危机. 因此, 在气液两相流动中, 流型的研究与确定是首要任务^[1]. 由于两相流存在复杂相间界面效应及相对运动, 所以, 准确识别两相流型还相当困难, 尤其是流型动力学机理至今尚不十分清楚.

两相流是一个复杂的非线性动力学系统, 自 20 世纪 90 年代以来, 基于混沌及分形时间序列分析的流型识别研究成果日趋增多^[2], 金宁德等^[3-5]采用多个混沌指标参数分析了油水和气液两相流型电导信号的混沌特征, 对两相流型流动机理进行了很好的揭示. 随着图像处理技术的发展和改进, 其越来越多地被应用于多相流的研究中, 其非接触、不干扰流场的特点使之较其他流型分析方法

具有一定的优势. 运用两相流动态图像平均灰度的脉动信号进行非线性动力学特性表征分析, 对揭示及理解具复杂性、不确定性且很难用数学模型精确描述的两相流流型转化机理是有益的补充与探索.

随机子空间 (stochastic subspace parameter identification, 简称 SSI) 方法可以直接从环境激励的响应信号中提取结构的模态参数, 是近年来发展起来的一种基于输出的时域线性辨识方法^[6-8]. 稳定图是一种比较新颖的确定系统阶次的方法^[9]. 本文尝试应用随机子空间结合稳定图的方法对水平管中气液两相流三种典型流型的图像灰度序列进行分析, 以期进一步揭示两相流型动力学特性, 并基于 SSI 分析提出一种新的两相流流型定量识别准则.

2 理论基础

2.1 随机子空间辨识方法

在实际应用中, 量测数据在时间上都是离散的, 所以经离散采样后, 可得如下随机状态空间系

* 国家自然科学基金 (批准号: 50976018) 和吉林省自然科学基金 (批准号: 20101562) 资助的课题.

[†] E-mail: ylzhou@mail.nedu.edu.cn

统^[10]

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_d x_k + w_k, & A_d = e^{A\Delta t}, \\ y_k = C x_k + v_k, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_k \in R^l$ 为系统状态量; $y_k \in R^n$ 为测量得到的输出量; $w_k \in R^n$ 和 $v_k \in R^l$ 均为假定白噪声, 且 $E(w_k) = E(v_k) = 0$; $A \in R^{n \times n}$ 和 $C \in R^{l \times n}$ 分别代表系统状态矩阵和输出矩阵; Δt 为采样间隔.

对 (1) 式所示的随机系统, 由采样时序数据组成 Hankel 矩阵

$$H = Y_{0|2i-1} = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \cdots & y_{j-1} \\ y_1 & y_2 & \cdots & y_j \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-1} & y_i & \cdots & y_{i+j-2} \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{i+j-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{i+j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{2i-1} & y_{2i} & \cdots & y_{2i+j-2} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} Y_{0|i-1} \\ Y_{i|2i-1} \end{bmatrix} = \frac{Y_P}{Y_f} \quad (2)$$

令 $Y_P^+ = Y_{0|i} Y_f^- = Y_{i+0|2i-1}$,

式中: $i = 2n$, n 为系统阶数; j 为量测量采样数.

令正交投影所得矩阵为

$$O_i = Y_f / Y_P, \quad (3)$$

$$O_{i-1} = Y_f^- / Y_P^+, \quad (4)$$

计算 O_i 奇异值分解值

$$W_1 O_i W_2 = U S V^T = [U_1 \quad U_2] \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: 系数矩阵 $W_1 = [(1/j)Y_f Y_f^T]^{-1/2}$; W_2 为 $j \times j$ 单位阵.

延伸可观察矩阵 Γ_i 和 Γ_{i-1} 可表示为

$$\Gamma_i = W_1^{-1} U_1 S_1^{1/2}, \quad (6)$$

$$\Gamma_{i-1} = \Gamma_i. \quad (7)$$

利用 (3), (4), (6), (7) 式可得 Kalman 滤波状态序列

$$\hat{X}_i = \Gamma_i^\dagger O_i, \quad (8)$$

$$\hat{X}_{i+1} = \Gamma_{i-1}^\dagger O_{i-1}, \quad (9)$$

式中 \dagger 为相应矩阵的伪逆.

将 (2), (8), (9) 式代入 (10) 式可计算得到状态

矩阵及输出矩阵

$$\begin{bmatrix} A_d \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_{i+1} \\ Y_{i|i} \end{bmatrix} \hat{X}_i^\dagger. \quad (10)$$

在确定离散系统状态矩阵 A_d 后对其进行特征值分解

$$A_d = \psi \Lambda \psi^{-1}, \quad (11)$$

式中: $\Lambda = \text{diag}(\eta_i) \in R^{n \times n}$, $i = 1, 2, \dots, n$; η_i 为离散系统特征值; ψ 为系统特征向量. 根据离散系统与连续系统的特征值关系可得连续时间系统特征值

$$\lambda_i = a_i \pm b_i = \ln(\eta_i) / \Delta t, \quad (12)$$

进而可以得到振荡频率及阻尼比计算公式为

$$\begin{cases} f_i = \sqrt{a^2 + b^2} / (2\pi) \\ \xi_i = -a / \sqrt{a^2 + b^2} \end{cases}. \quad (13)$$

系统的模态振型定义为输出点处的系统特征向量

$$\varphi = C \psi. \quad (14)$$

有了特征向量就可以通过其频率、阻尼比以及相位角来对模态进行辨识.

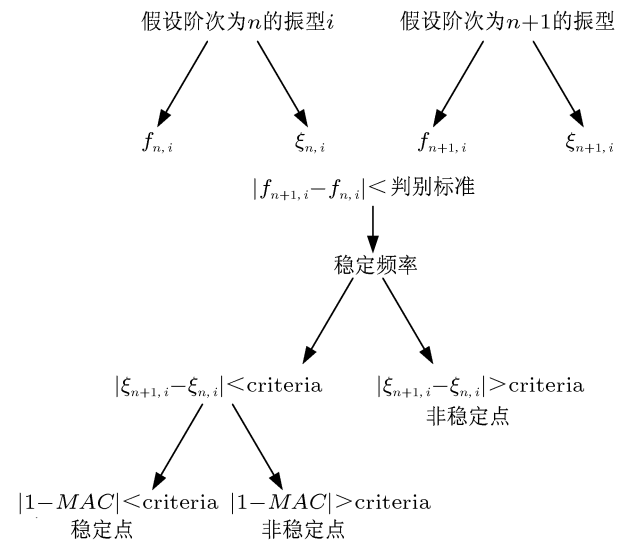


图1 稳定图的原理

2.2 稳定图原理

时间序列在振动系统的参数识别中, 现有几种鉴别模态真假的方法, 稳定图方法就是其中一种较新的方法^[11]. 稳定图的基本思路如图1所示^[12].

图1中 f 为模态振型频率, ξ 为模态振型阻尼比, MAC 为模态置信度, $criteria$ 为阻尼比判据. 稳定图的做法: 依次假定系统的阶次为从 n_{min} 到 n_{max} . 由于系统的特征值具有两两共轭的特点, 所以阶次

必须是偶数. 从而得到 $(n_{\max} - n_{\min})/2 + 1$ 个结果. 然后把所计算的结果画到二维坐标图中, 坐标图的横坐标为频率值, 纵坐标为阶次, 得到稳定图. 两相邻的点的频率、阻尼及振型在容差范围内, 则认为是一样的. 稳定图是用来对随机子空间定阶, 本文应用其原理对气液两相流型图像灰度序列进行动力学特性分析.

2.3 典型信号的稳定图分析

本文对正弦、正弦 + 噪声混合信号、Lorenz 以及 Gauss 白噪声四种典型信号进行稳定图计算, 结果如图 2 所示. 几种时间序列的产生条件如下.

1) 正弦信号: $y_1 = \sin(x)$ 采样间隔为 $\pi/50$;

2) 正弦 + 噪声: $y = y_1 + p \times y_2$, 其中 y_1 为正弦序列, y_2 为白噪声序列, p 为随机成分的比例, 这里取 $p = 0.2$;

3) Lorenz 混沌信号: 由 Lorenz 方程

$$\frac{dx}{dt} = -10(x - y),$$

$$\frac{dy}{dt} = -y + 28x - xz, \quad (15)$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - \frac{8}{3}z,$$

初始条件 $x = 2, y = 2, z = 20$ 采用四阶 Runge-Kutta 方法迭代, 取变量 x 为仿真序列 [13];

4) Gauss 白噪声信号序列.

从图 2 可以看出, 不同序列类型的稳定图差异比较明显. 正弦信号的稳定图规律特别明显, 所有点都集中在两条频率线上, 这与正弦信号规则的周期性相关. 而在加入白噪声以后, 稳定图变得混乱, 规律性较差, 频率分布在不同区域, 且存在跳点现象. Lorenz 信号稳定图呈一个斜三角形形状, 频率相同点在 0—25 区域成递减趋势集中分布. 但仔细观察可以发现, 其并不像正弦信号稳定图所有点都成为垂直线, 而是在整体有直线摸样的情况下, 存在小的跳点现象, 从稳定图分布可以看出 Lorenz 信

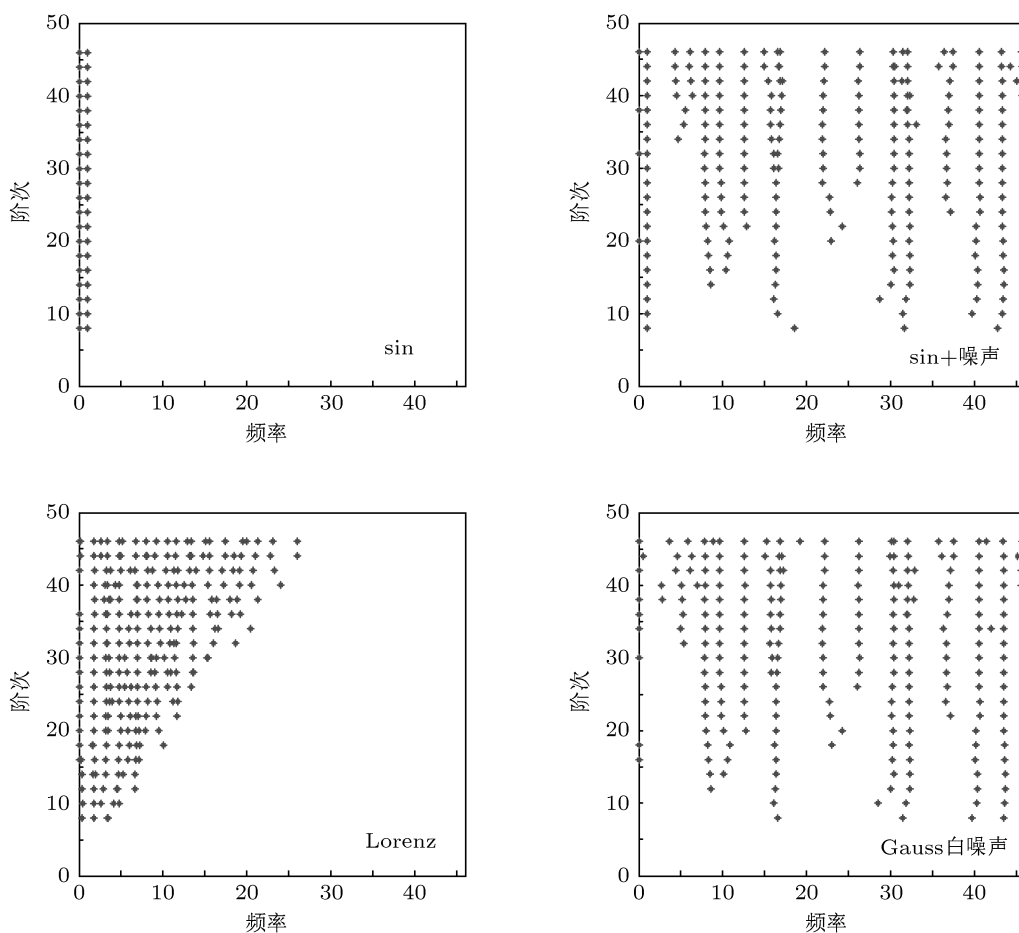


图 2 各种典型信号时间序列稳定图

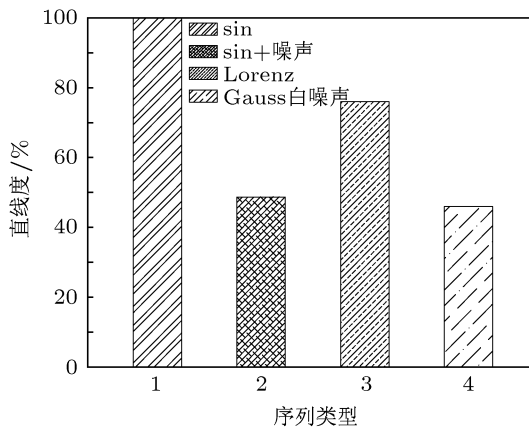


图3 各种典型信号时间序列稳定图直线度

号具有更高的复杂度. Gauss 白噪声的稳定图从整体上看与正弦 +Gauss 白噪声混合信号分布较相似, 这主要是 Gauss 白噪声对稳定图的分布情况起到决定性作用. 但仔细观察可以发现略微的不同, 主要体现在频率较小区域, 从混合信号还可以看到正弦信号的一些端倪, 而 Gauss 白噪声信号则完全没有规律, 分布散乱. 这四个典型时间序列的稳定图分布特征之间的差异说明稳定图可以用来研究时间序列的复杂性. 但这种定性分析有些模糊, 本文就此提出了一种定量评价序列稳定图的方法, 即提取稳定图频率相同点分布的直线度特征, 这样可以对序列的规律性、周期性有一个很好的表征, 同时也可以将稳定图中的跳点等现象用数值形式表现出来.

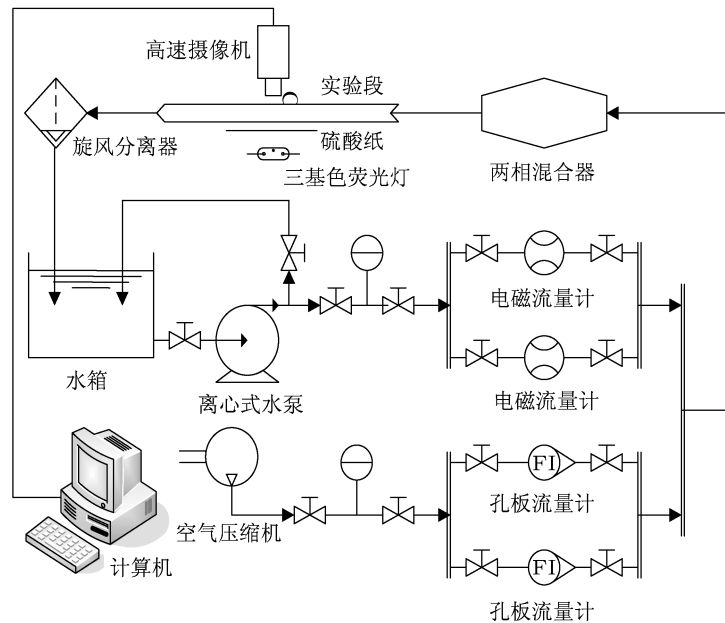


图4 空气 - 水两相流实验系统

稳定图是从 8 阶到 46 阶每隔 1 阶进行一次计算, 如正弦信号具有稳定周期性, 在固定频率值处就会出现所有点都存在, 整 20 个点连成一条直线, 无跳点现象. 这里规定其为标准线 $x = [1, 1, \dots, 1]$, x 共含 20 个元素. 每一个频率值对应的线型表示为 $x(i)$, i 为频率值, 如果存在频率点, 元素则为 1, 否则为 0. 每一频率对应的直线度即其线型与标准线做相关计算所得的相关系数

$$r(i) = \frac{\sum x x(i) - \frac{\sum x \sum x(i)}{n}}{\sqrt{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right) \left(\sum x(i)^2 - \frac{(\sum x(i))^2}{n}\right)}}, \quad (16)$$

式中, n 为标准线元素个数, 本文 $n = 20$. 这里取稳定图总直线度 r 进行分析:

$$r = \sum_{i=0}^M \frac{r(i)}{M+1}, \quad (17)$$

式中, M 为稳定图中所计算的最大频率值.

几种典型序列的直线度分布如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 四种典型序列的稳定图直线度存在较明显的差异, 其中混合序列与 Gauss 白噪声序列较为相近, 这一点从稳定图的分布可以得到验证. 而正弦信号凭借其完整的周期性及规则性使直线度达到 100%. Lorenz 序列的直线度较正弦信号要小, 比白噪声信号则要大, 其 76% 的直线度从某种

程度上可以看出其在混乱的表面分布上存在着一定的规律. 混合信号与 Gauss 白噪声信号的直线度较低, 前者为 48%, 后者为 43%, 直线度大小与二者的组成结构是一致的, 由此可以看出直线度对不同序列的稳定图分布可以进行较好的表征, 是稳定图分析的一个较好的辅助手段.

3 气液两相流图像信号采集

实验是在空气 - 水两相流系统上完成的, 如图 4 所示. 本实验选用内径 40 mm, 长为 2 m 的透明有机玻璃管. 水体积流量范围为 0.007—3.180 m³/h, 空气体积流量范围为 0.500—4.585 m³/h. 在水平测试管中采集到大小为 1536×1024, 帧频为 250 帧/s 的动态流型图像中截取 3 种典型图像如图 5 所示.

在图像的诸多特征中灰度是最重要的参数之一, 采用 (18) 式求解图片的灰度均值 g :

$$g = \sum_{i=0}^{L-1} z_i p(z_i), \quad (18)$$

式中, L 为可能的灰度级数, z_i 为表示亮度的随机变量, $p(z_i)$ 为 1 个区域中的灰度级的函数. 实验中将每个流型动态图像中每帧图像的灰度均值组成 1 个时间序列, 三种典型流型的灰度波动序列如图 6 所示. 采样点数过大会给计算分析带来不便, 过小则会遗漏一些有效信息, 本文采用 3 个参数作为序列长度优化的指标, 分别为波动强度 (p)、偏斜因子 (s) 和平坦因子 (F) 值. 如图 7 所示, 当采样点 N 达到 1400 时各项指标大致趋于稳定, 因此 N 取 1400.

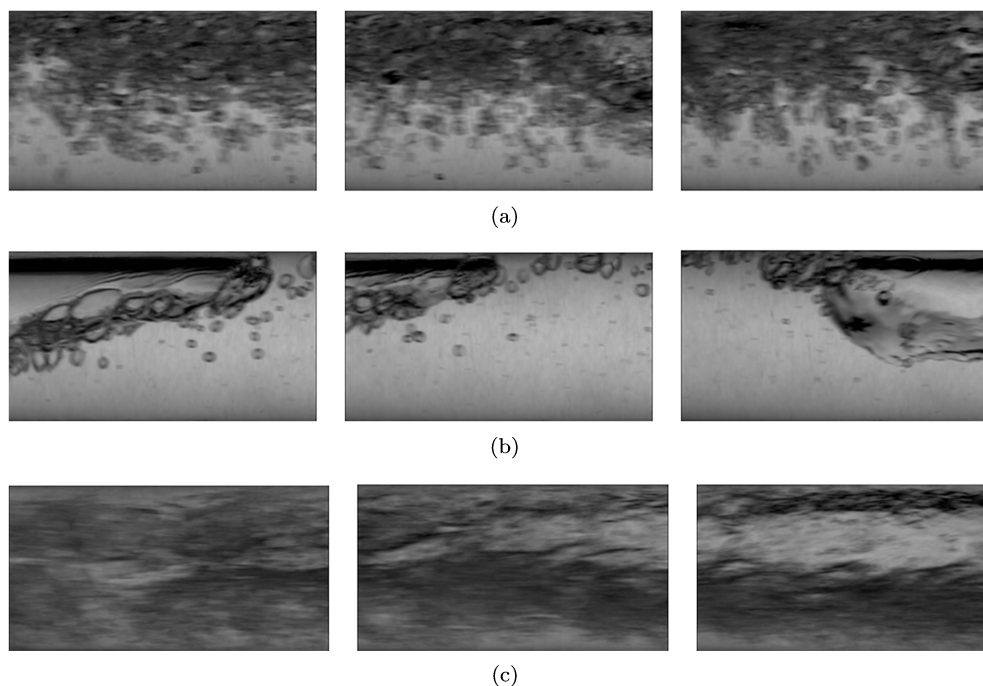


图 5 不同帧数的 3 种典型气流两相流流型图像 (a) 泡状流 (分别为第 5 帧、第 25 帧和第 100 帧); (b) 段塞流 (分别为第 5 帧、第 25 帧和第 100 帧); (c) 雾状流 (分别为第 5 帧、第 25 帧和第 100 帧)

4 两相流稳定图的动力学特性分析

三种典型流型的灰度波动序列稳定图如图 8 所示. 从稳定图中可以看出三种典型流型图像灰度波动序列的相同频率点分布情况存在较大差异. 整体上来说, 段塞流的稳定图最为规整, 雾状流次之, 泡状流最为混乱. 段塞流在频率为 0—10 Hz 范围内, 相同频率点分布十分规整, 几乎全部成垂直

线状, 在频率为 20 Hz 处有两条近似直线段, 整体分布较规整, 跳点较少, 在高频处分布较稀疏, 但在频率为 35 Hz 处依然可以看到呈直线状, 这与段塞流较好的周期性有关. 泡状流相对段塞流稍显混乱, 在 0—5 Hz 频率范围内稍好, 在 5—10 Hz 处不如段塞流规律性强, 且频率相同点少, 分布不如段塞流密集, 中高频区域分布稀疏凌乱, 只有在频率为 23 Hz 处勉强可以看到一条直线状频率分布. 雾

状流在 0 与 3 Hz 处直线效果较好, 其低频区域的规整程度较泡状流与段塞流都差, 相反在中高频处, 雾状流的频率点分布要略好于前两者, 在 32, 37 和 44 Hz 处均有直线状频率点分布.

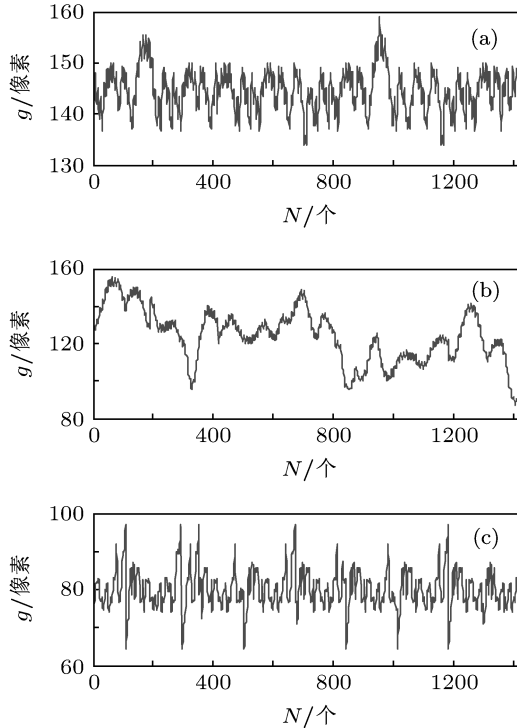


图 6 三种典型流型的灰度波动序列 (a) 泡状流; (b) 段塞流; (c) 雾状流

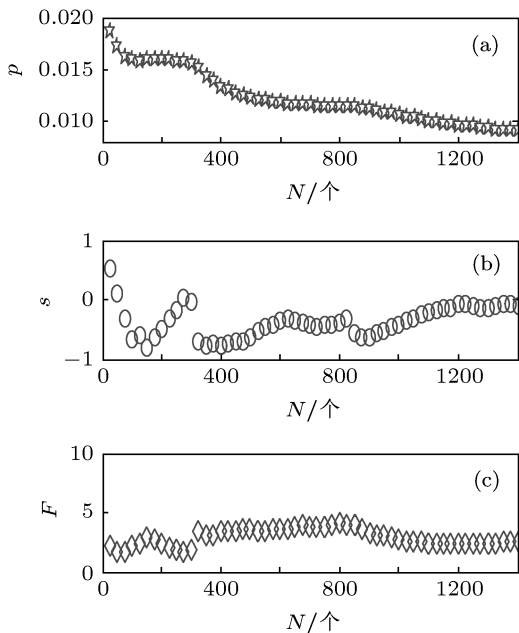


图 7 不同信号长度下的湍流统计参数

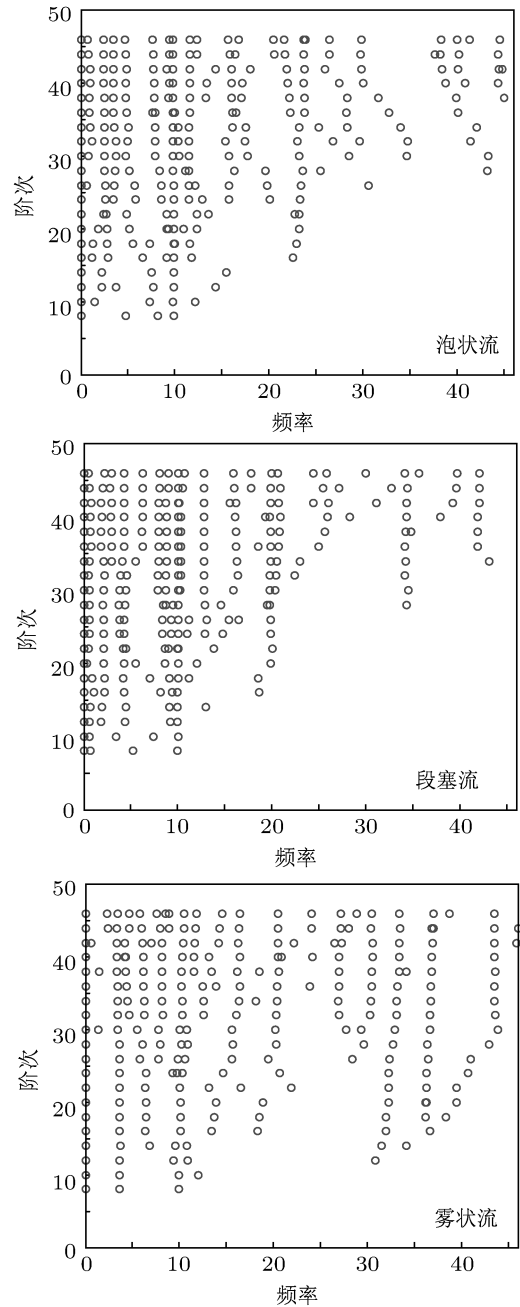


图 8 三种典型流型的灰度波动序列稳定图

各流型的稳定图所表现的特征正是各流型演化特征的反映: 泡状流中气泡运动轨迹非常随机复杂, 总体表现为气泡群在管中随液相流动状态, 信号稳定图与 Gauss 白噪声有些相似, 随机性较强; 而段塞流中气塞与液塞有规律地交替变化使得图像灰度波动信号具有一定的周期性, 所以其稳定图的分布比较规整; 对于雾状流, 当气塞驱动液相做前进运动时, 由于冲击作用, 使得气塞周围的液相向后脱落, 并与下一时刻来流产生冲击与振荡, 气塞被击碎后的雾状流湍动现象非常剧烈, 呈现气相

与液相上下振荡的随机流动现象,与泡状流类似,但存在区别,其小的气泡的随机运动是与泡状流相似之处,而在气塞破碎后形成小的碎气泡并未完全散开,抱成团状向前运动,从图像的角度来看,使得图像的灰度呈现偏低的效果,湍动现象使得这样的气泡团间歇出现,这样就出现了在高频处存在一定周期性现象.三种流型稳定图的直线度如图 9 所示,从图中可以看出,直线度的分布情况与之前关于流型流动特性分析相吻合,段塞流最高,雾状流次之,泡状流最低.

5 两相流流型分类

在前面已经对 SSI 提取信号特征向量的方法进行了简单的描述,SSI 方法最大的优点是支持多输入多输出,且计算速度快,在信号的模态辨识方面具有很大的优势.从三种流型的稳定图可以看出,存在主频,但其间也同样掺杂噪声.本文取阶数为 10,虽然要牺牲一点计算速度,但可以有效地屏蔽噪声影响.本文首先对水相流量为 $2.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时六种不同气相流量下的流态进行分类识别,识别结果如图 10 所示,发现三种流型特征向量的幅值以及相角存在较大差异,雾状流相角在 $1.35\text{--}2.07$ 之间,幅值在 0.1 左右;泡状流相角在 $4.01\text{--}4.36$ 之间,幅值在 0.2 左右;段塞流相角在 $-0.52\text{--}0$ 之间,幅值在 $0.5\text{--}0.6$ 之间.

本文在不同气相以及水相的体积流量下,对 47 种流动状态进行了辨识,识别结果如图 11 所示.结果表明不同流型的相角差异十分明显,可以清晰分辨出各种流型,识别率在 97% 以上.

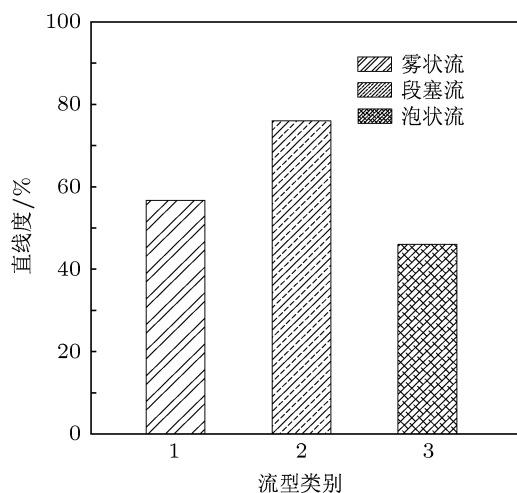


图 9 三种典型流型的稳定图直线度

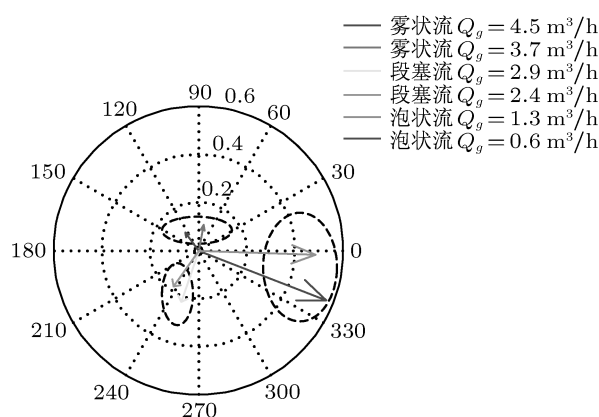


图 10 水相流量 Q_1 为 $2.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 时不同气相流量的流型分类

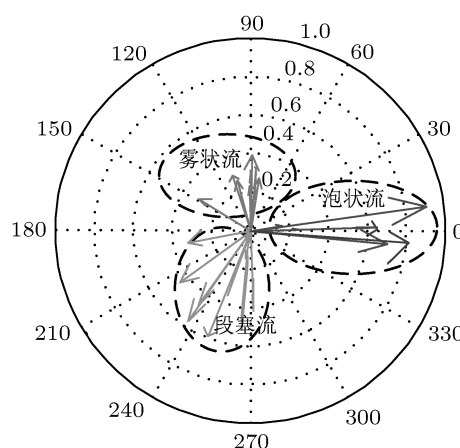


图 11 基于随机子空间的 47 种流动条件下的流型辨识

6 结论

在气液两相流图像波动信号上的应用表明稳定图可以揭示泡状流、段塞流及雾状流的动力学复杂性,从其稳定图整体特征可以看出泡状流的混乱程度最高,雾状流其次,段塞流最低.不同流型的稳定图相同频率点分布所表现出的独特变化趋势也从细节上反映了各流型的动力学复杂性间的差异,进一步证明了稳定图在分析复杂时间序列时所具有的优越性.结合直线度特征值可以对复杂时间序列进行定量表征.应用随机子空间对气液两相流三种典型流型的图像灰度波动序列进行特征向量提取,可以从幅值以及相角上对其加以区分,其中相位角特征最为可靠.雾状流相角在 $1.35\text{--}2.07$ 之间,泡状流相角在 $4.01\text{--}4.36$ 之间,段塞流相角在 $-0.52\text{--}0$ 之间,其不受实验工况的变化所影响,完全由流型内部模态结构所决定,能够准确地对流

型信号进行区分. 通过本文的研究表明: 随机子空间结合稳定图方法是一种有效的分析气液两相流型方法, 如将其应用于其他多相流流型识别领域,

以及在其他模式识别领域进行拓展, 也将是有益的探索与补充.

-
- [1] Bai B F, Guo L J, Zhao L 2001 *Adv. Mech.* **31** 437 (in Chinese) [白博峰, 郭烈锦, 赵亮 2001 力学进展 **31** 437]
 - [2] Franca F, Acikgoz M, Lahey R T 1991 *Int. J. Multiphase Flow.* **17** 545
 - [3] Gao Z K, Jin N D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6909 (in Chinese) [高忠科, 金宁德 2009 物理学报 **57** 6909]
 - [4] Zong Y B, Jin N D, Wang Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **57** 7544 (in Chinese) [宗艳波, 金宁德, 王振亚 2009 物理学报 **57** 6909]
 - [5] Do F, Jin N D, Zong Y B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6145 (in Chinese) [董芳, 金宁德, 宗艳波 2008 物理学报 **57** 6145]
 - [6] Lardies J 1998 *Mech. Sys. Sig. Proces.* **12** 432
 - [7] Yang L F, Yu K P, Pang S W 2007 *J. Vibrat. Shock* **26** 8 (in Chinese) [杨利芳, 于开平, 庞世伟 2007 振动与冲击 **26** 8]
 - [8] Gontier C 2005 *Mech. Sys. Sig. Proces.* **19** 1
 - [9] Chang J, Zhang Q W, Sun L M 2005 *Proceedings of The 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent in Frastructure*, Shenzhen, 863
 - [10] Huang N E, Shen Z, Long S R 1998 *Proceed. Roy. Soc. London* **1971** 903
 - [11] Luo W B, Xia S B, Wang L, Zou J X 1999 *J. Appl. Mech.* **16** 112 (in Chinese) [罗文波, 夏松波, 王莉, 邹经湘 1999 应用力学学报 **16** 112]
 - [12] Chang J, Sun L M, Zhang Q W 2008 *J. Earthquake Engi. Engi. Vibrat.* **28** 47 (in Chinese) [常军, 孙利民, 张启伟 2008 地震工程与工程振动 **28** 47]
 - [13] Zheng G B, Jin N D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4485 (in Chinese) [郑桂波, 金宁德 2009 物理学报 **58** 4485]

Stochastic subspace parameter identification and stability diagram of gas-liquid two-phase flow patterns*

Li Hong-Wei Zhou Yun-Long[†] Liu Xu Sun Bin

(College of Energy Resource and Mechanical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

(Received 16 May 2011; revised manuscript received 2 June 2011)

Abstract

The characteristics of stability diagram of several typical flow patterns are studied, and the signals of flow patterns under 47 kinds of flowing conditions are identified with stochastic subspace parameter identification. The results show that the characteristic of a stability diagram can reflect the internal characteristics of complex time series, the characteristics of time series can be quantified by extracted straightness characteristics and the differences of characteristics of stability diagrams of three typical flow patterns. The characteristics of stability diagrams of bubble flow are the most confused and followed by Mist flows'. Slug flows' are the most regular. The extraction and recognition for characteristics of gray fluctuation sequence of gas-liquid two-phase images and the accurate classification for flow pattern samples provide a new path for the classification of multi-phase flow patterns. At the same time, the stability diagram analysis method provides a useful exploration for the further revelation of flowing mechanism of multi-phase flows.

Keywords: stochastic subspace parameter identification, stability diagram, gas-liquid two-phase flow, dynamic characteristic

PACS: 05.45.-a, 47.54.-r, 47.55.Ca

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.50976018) and the Natural Science Foundation of Jilin Province, China (Grant No.20101562).

[†] E-mail: ylzhou@mail.nedu.edu.cn