

11-20-2019

## Recognition Method on Two-phase Flow Regime Based on Cross Recursive Analysis

Yongbo He

*School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

Yushan Dong

*School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

Rongrong Xue

*School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Recognition Method on Two-phase Flow Regime Based on Cross Recursive Analysis

## Abstract

**Abstract:** Aiming at the problems that the two-phase flow regime recognition speed is slow and the recognition accuracy is low, a flow regime recognition method is proposed *based on cross recursive analysis (CRA) without imaging*. The false nearest neighbors are used to analyze flow regime capacitance values measured by capacitance sensor to obtain an optimal embedding dimension; and the embedding dimension of cross recursive plot is established for several typical flow patterns. The capacitance values of the simulation flow regimes and the reference flow regimes are analyzed using cross recursion to get a set of cross recursive plots. The similarity of two flow regimes is determined by comparing the ratio of black recursive dots on the main diagonal of cross recursive plot. The simulation experiments of typical oil-gas two-phase flow regime identification are conducted. The simulation result shows that the method can accurately identify different flow regimes of two-phase flow; and the recognition rate is fast.

## Keywords

two-phase flow, cross recursive analysis, false nearest neighbors, average mutual information method, state recognition, recurrence plot

## Recommended Citation

He Yongbo, Dong Yushan, Xue Rongrong. Recognition Method on Two-phase Flow Regime Based on Cross Recursive Analysis[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 720-726.

# 基于交互式递归分析的两相流流型识别方法

何永勃, 董玉珊, 薛荣荣

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

**摘要:** 针对存在两相流流型识别速度慢且识别准确度不高的问题, 提出了一种基于交互式递归分析无须成像的流型识别方法。利用邻域误差法对电容传感器测得的流型电容值进行分析得到最优嵌入维数, 对几种典型流型建立交互式递归图的嵌入维数; 再利用交互式递归对仿真流型及参考流型的电容值进行分析, 得到一组交互式递归图; 通过比较交互式递归图主对角线递归黑点的比例来确定流型的相似度。对典型油气两相流流型识别做了仿真实验, 结果表明, 该方法可准确识别两相流流型, 且识别速度快。

**关键词:** 两相流; 交互式递归分析; 邻域误差法; 平均互信息法; 状态识别; 递归图

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 04-0720-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0145

## Recognition Method on Two-phase Flow Regime Based on Cross Recursive Analysis

He Yongbo, Dong Yushan, Xue Rongrong

(School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that the two-phase flow regime recognition speed is slow and the recognition accuracy is low, a flow regime recognition method is proposed *based on cross recursive analysis (CRA) without imaging*. The false nearest neighbors are used to analyze flow regime capacitance values measured by capacitance sensor to obtain an optimal embedding dimension; and the embedding dimension of cross recursive plot is established for several typical flow patterns. The capacitance values of the simulation flow regimes and the reference flow regimes are analyzed using cross recursion to get a set of cross recursive plots. The similarity of two flow regimes is determined by comparing the ratio of black recursive dots on the main diagonal of cross recursive plot. The simulation experiments of typical oil-gas two-phase flow regime identification are conducted. The simulation result shows that the method can accurately identify different flow regimes of two-phase flow; and the recognition rate is fast.

**Keywords:** two-phase flow; cross recursive analysis; false nearest neighbors; average mutual information method; state recognition; recurrence plot

## 引言

在石油、化工、电力等工业部门及多种加工工

业的换热设备(如蒸发器、锅炉、冷凝器及油气输送等)中存在大量的两相流系统。两相流体流型的在线识别是实现两相流在线监控的基础,也是两相流测量中的重要研究方向。

目前, 油气两相流流型的识别方法<sup>[1]</sup>主要有两种: 一种是人为观察的方法; 另一种是用现场的流动参数根据流型转变准则或流型图判断流型。以上两种方法只能够大概的预测流型并且受主观影响



收稿日期: 2017-03-27 修回日期: 2017-08-04;  
基金项目: “973” 计划基金(2012CB720100), 民航科技项目基金(MHRD20150220);  
作者简介: 何永勃(1971-), 男, 陕西蒲城, 博士, 副教授, 研究方向为航空检测技术及智能化仪表。

<http://www.china-simulation.com>

• 720 •

较大, 在工程用中不能实时的获取流体的流动状态, 限制了其应用范围。

在气液两相流的测量方法上目前主要有间接测量法和直接测量法, 其中直接测量法根据流动图像来确定流型, 常见的直接测量方法有目测法、高速摄影法、过程层析成像技术、射线衰减法等; 而间接测量法主要是通过流型信号进行分析来间接确定流型, 常见的间接测量方法有经验模态分解法、功率密度分析法、混沌分形法、模糊数学判别法和小波分析法等<sup>[2]</sup>。电容层析成像技术(Electrical Capacitance Tomography, ECT)是一种电学过程层析成像技术, 它的理论基础是电磁场的似稳场理论, 由于其具有干扰流场、成本低、响应快、可视化等优点在两相流检测中成为了研究的热点<sup>[3-4]</sup>, 其缺点是流型对非线性和软场特性影响较大, 并且系统较为复杂, 这些缺点制约了它在工业生产中的广泛应用; 高速摄影法能够在气液两相流中得到广泛应用是由于它能直接拍摄流体的流动图像并获得分布状态, 为流体的流动特性提高可靠的分析数据, 其不足是采用高速摄影技术获得的数据量大, 给数据的处理和分析带来了困难, 同时在摄影过程中, 图像会受到光线, 摄像位置等因素的影响, 这也为图像的处理增加了难度<sup>[5]</sup>。

近年来人工神经网络被广泛应用到两相流或者多相流的流型识别中。周云龙等对水平流动管内的气液两相流采用支持向量机神经网络模型进行流型识别, 其特征输入是经图像处理技术获得的灰度直方图特征, 结果表明灰度直方图特征能较好的反映不同流型, 支持向量机神经网络模型基于提取的特征能够准确的识别各种流型<sup>[6]</sup>; 唐雪琴等<sup>[7-8]</sup>利用小波包分解对流型的动态压力差波动信号分析提取特征, 再与小波包能量特征与 BP 神经网络结合, 利用小波与希尔伯特-黄变换结合等方法进行流型识别。这些方法简单, 容易拟合, 但算法存在局部最优问题, 收敛性慢, 训练时间较长。上述这些方法都无法满足快速流体流型的识别要求。

近代发展起来的多传感器数据融合技术是一门工程应用科学, 将它应用于流型辨识可以避免单一辨识方法的不足, 提高流型识别的准确率, 但它在两相流检测中的应用还不够广泛, 如何更好的将数据融合技术应用到两相流的流型识别问题中是一个新的研究方向<sup>[9]</sup>。

为解决上述问题, 本文提出了一种基于交互式递归分析的两相流流型识别方法, 无须依赖重建图像。交互式递归分析<sup>[10]</sup>是一种新的非线性分析手段, 能够显示信号的特征结构, 分析两个不同的时间序列相似程度。系统的递归状态是系统状态在特定时间具有相似的特性, 它是非线性和混沌系统的固有特性, 两相流系统作为一个非线性系统同样具有递归特性。因此, 本文将该方法应用于流型识别, 以水平管道空气-油两相流为例, 将电容传感器测得流体的电容值与参考流型的电容值进行交互式递归分析, 再通过交互式递归图主对角线递归黑点的比例确定流型的相似度。该方法具有算法简单、识别速度快和准确度高的特点。

## 1 交互式递归分析

通过二维交互式递归图观察不同时间段测得的两相流电容值的递归现象, 使用递归量化参数揭示电容值变化的递归特征。由于不同的流型电容值变化不同, 通过交互式递归图特殊的主对角线结构揭示出电容值变化的同步性和相似程度。

### 1.1 相空间

相空间(状态空间)重构是交互式递归分析的基础, 一般采用延时坐标(亦称时滞坐标)的方法对其进行重构, 具体方法如下<sup>[11-12]</sup>: 设观测到的时间序列为  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 其中  $x_i = x(t_i)$ ,  $t = t_0 + i\Delta t$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。  $\Delta t$  是两次相邻采样的时间间隔,  $\Delta t$  等于常数, 即等间距采样。选取适当的延迟时间  $\tau$  ( $\tau = k\Delta t$ ,  $k$  是整数), 通过如下方法构造出  $N$  个  $m$  维矢量  $X_i$ :

$$X_1 = (x_1, x_{1+\tau}, x_{1+2\tau}, \dots, x_{1+(m-1)\tau})$$

$$\begin{aligned} X_2 &= (x_2, x_{2+\tau}, x_{2+2\tau}, \dots, x_{2+(m-1)\tau}) \dots\dots \\ X_i &= (x_i, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}) \dots\dots \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, N$ ,  $N=n-(m-1)\tau$  是相空间中的总点数;  $m$  为嵌入维数, 这  $N$  个矢量在  $m$  维相空间描述出的轨迹。

## 1.2 交互式递归图

交互式递归图(Cross Recurrence Plot, CRP)是观察二维图形上状态  $X_i$  递归性的工具, 可以在一个二维空间的递归表示图上对  $m$  维相空间上的轨道进行观测和研究。在 CRP 中, 吸引子内轨道 1 在时刻的状态关于轨道 2 在  $j$  时刻的递归现象可以通过一个二维方阵的黑点或白点表示, 其中, 黑点表示递归, 即逼近, 白点表示远离。CRP 表示的是在同一个相空间中二条轨迹所有采样点之间的递归关系, 本文用来分析两个流型电容值时间序列的动态特征, 其关系式<sup>[13]</sup>为

$$\begin{aligned} CR_{i,j} &= \Theta(\varepsilon - \|x_i - y_j\|) \\ x_i, y_j &\in R^m \quad i=1, \dots, N_x \quad j=1, \dots, N_y \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $x_i$  和  $y_j$  分别为相空间中轨道 1 第  $i$  采样点和轨道 2 第  $j$  采样点;  $N_x$  和  $N_y$  分别为轨道 1 的采样点数和轨道 2 的采样点数;  $\varepsilon$  为预先设定的临界距离;  $R^m$  为  $m$  维实数空间;  $\|\bullet\|$  表示范数(Euclidean 距离);  $\Theta(\bullet)$  是 Heaviside 函数; 当  $CR_{i,j}$  的值为 1, 在 CRP 中位置  $(i,j)$  上表示一个黑点; 当其值为 0,  $(i,j)$  位置上表示一个白点。

## 1.3 交互式递归图参数选择

构造两相流电容值的交互式递归图, 首先要选择适合的构造参数, 主要包括相空间重构所需的嵌入维数  $m$  和延迟时间  $\tau$ , 它们直接关系到构造递归图显示信号特性的准确度, 因此本文采用特定方法对 CRP 参数进行选择。

### 1.3.1 嵌入维数 $m$

针对不同流型电容值的复杂特性, 本文采用邻域误差法(false nearest neighbors)<sup>[14]</sup>来获得每个流型相空间重构的嵌入维数<sup>[15]</sup>。邻域误差法的主要

思想: 当重构相空间的嵌入维数  $m$  低于系统吸引子完全展开所需的嵌入维数  $d$  时, 重构的吸引子在相空间中必然有重叠, 从而导致假的邻域点出现, 即出现邻域误差; 随着相空间维数不断增加, 假邻域点不断减少, 当嵌入维数  $m$  大于或等于吸引子所需的维数  $d$  时, 系统吸引子的轨迹不再交叉。但随着嵌入维数  $m$  的增加, 计算时间变长, 数据分析难度增加, 所以一般选择假邻域点趋于零的维数作为嵌入维数。以双泡状流为例, 其邻域误差如图 1 所示。

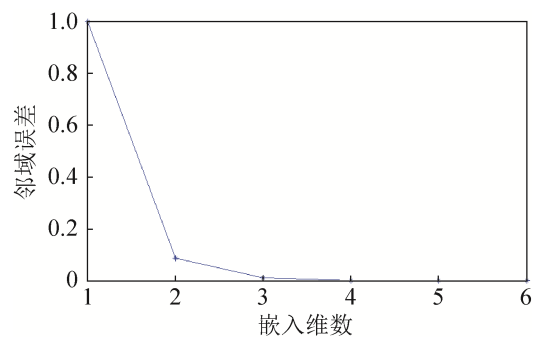


图 1 双泡状流电容值的邻域误差图  
Fig. 1 False nearest neighbors of double bubble flow capacitance

从图 1 中可以看出, 当嵌入维数为 4 时, 邻域误差接近零, 系统吸引子不再交叉, 即双泡状流的嵌入维数为 4; 应用此方法, 逐一得到典型流体可能流型的嵌入维数, 经统计嵌入维数为 4 的流型最多, 故定交互式递归分析的嵌入维数为 4。

### 1.3.2 延迟时间 $\tau$

采用平均互信息法(average mutual information method)来获得每个流型电容值重构相空间的延迟时间<sup>[16]</sup>, 使电容值之间的相关性最弱。平均互信息法是对经过不同延迟的数据分析来观测数据之间的相关性, 从而找到合适的延迟时间。由香农信息理论, 可以从事件  $b_j$  中得到  $a_i$  的信息量:

$$I_{AB}(a_i, b_j) = \log \left[ \frac{P_{AB}(a_i, b_j)}{P_A(a_i)P_B(b_j)} \right] \quad (3)$$

则  $a_i, b_j$  之间的关系可以用互信息熵  $I_{AB}$  来表示:

$$I_{AB} = \sum_{i,j} P_{AB}(a_i, b_j) \log \left[ \frac{P_{AB}(a_i, b_j)}{P_A(a_i)P_B(b_j)} \right] \quad (4)$$

应用上述理论, 可以将  $A$  看成是由  $x(t_0 + i\tau_s)$  组成的集合,  $B$  是由  $x(t_0 + i\tau_s + \tau)$  组成的集合, 则式(4)变为:

$$I(\tau) = \sum_i P(x(t_0 + i\tau_s), x(t_0 + i\tau_s + \tau)) \log \left[ \frac{P_{AB}(x(t_0 + i\tau_s), x(t_0 + i\tau_s + \tau))}{P_A(x(t_0 + i\tau_s))P_B(x(t_0 + i\tau_s + \tau))} \right] \quad (5)$$

由(5)式可知, 当  $\tau \rightarrow \infty$  时,  $I(\tau) \rightarrow 0$ ; 一般取互信息函数第一个极小值作为重构延迟时间。以核心流为例, 其平均互信息函数如图 2 所示。

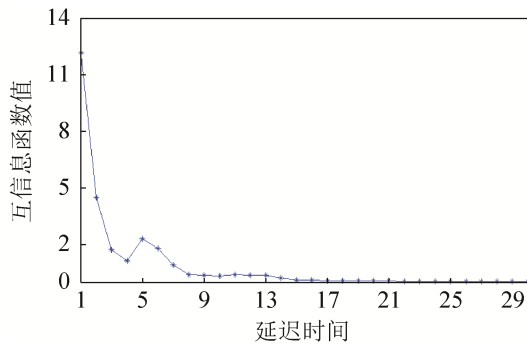


图 2 核心流电容值的平均互信息函数图

Fig. 2 Average mutual information function graph of core flow capacitance

由图 2 可知, 延迟时间的选择不同, 核心流电容值的平均互信息量也不同, 当其数值第一次达到极小值时, 对应的延迟时间  $\tau=4$ , 故在重构核心流的相空间时, 选择延迟时间为 4。按照此方法, 分别对典型流体流型的电容值进行分析, 得出各自的延迟时间, 经过统计  $\tau=4$  的流型最多, 所以选定交互式递归图的延迟时间为 4。

#### 1.4 交互式递归定量分析

在交互式递归图中主对角线直接反映两个流型电容值时间序列变化的同步性与相似程度, 当两个时间序列相似程度高时, CRP 中会出现由递归黑点组成的较长主对角线<sup>[17]</sup>; 当两个时间序列有很大区别时, 将不会出现足够长的对角线段, 甚至没有任何对角线段。不同流型的两个核心流的交

交互式递归图如图 3 所示, 核心流和双泡状流的交互式递归图如图 4 所示。

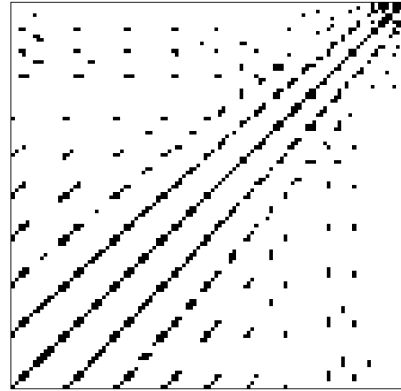


图 3 两个不同核心流电容值的递归图

Fig. 3 Recursive plot of two different core capacitance values

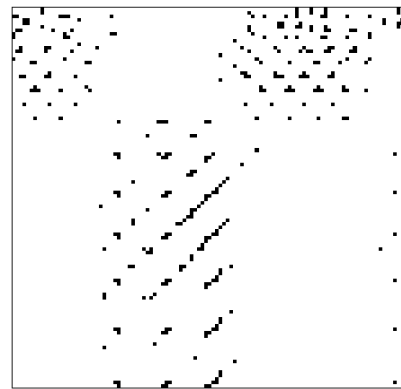


图 4 核心流和双泡状流电容值的递归图

Fig. 4 Recursive plot of core and double bubble flow capacitance values

本文利用主对角线上递归黑点占递归图中点的比例来定量分析它们的相似程度, 关系式如下:

$$H = \frac{D}{N_1 \cdot N_2} \quad (6)$$

式中:  $D$  为主对角线上递归黑点数;  $N_1$  和  $N_2$  分别为相空间中两个流型电容值的总点数。

## 2 仿真实验与结果分析

### 2.1 实验系统

实验系统由 3 个部分组成: 16 电极的电容传



传感器模块、数据采集模块和计算机识别模块。不同流型的介质分布不同，电容传感器电极之间测得的电容值也不同，通过数据采集模块测得 120 个有效电容值<sup>[18]</sup>，然后，采用交互式递归分析法对测得的电容值和流体可能流型的电容值进行分析，得出交互式递归图，最后，利用主对角线递归黑点的比例确定测量流型。

### 2.2 仿真实验

为验证交互式递归分析对两相流状态识别的有效性，本文利用电磁场有限元仿真软件 COMSOL 5.0 和 MATLAB 2014 a 进行仿真实验，计算机配置为 Intel (R) Core (TM) i5-4590 CPU @ 3.30 GHz, RAM 4.00 GB, 仿真实验选用 10 个不同流型，如图 5 所示。参考流型为中心流、泡状流、塞状流、环流和层流，如图 6 所示（白色代表空气，黑色代表油）。利用 COMSOL 5.0 和 MATLAB 2014 a 得到 5

种参考流体流型的电容值和 10 个验证流型的电容值，再将 10 个验证流型的电容值分别与参考流型的电容值重构出交互式递归图，最后利用公式(6)计算出主对角线递归黑点的比例，仿真实验运行时间为 0.251 760 s，比例结果如表 1 所示。

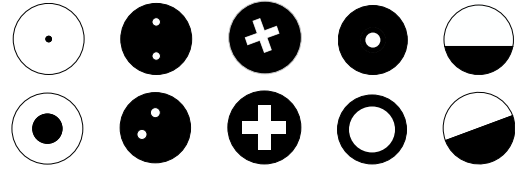


图 5 实验流型

Fig. 5 Experimental flow regime



图 6 参考流型

Fig. 6 Reference flow regime

表 1 交互式递归图主对角线递归点的比例

Tab. 1 Proportion of the recursive points of the cross recursive plots

参考流型	实验流型									
	<b>0.017 2</b>	<b>0.017 4</b>	0.005 1	0.005 7	0.010 2	0.014 7	0.008 2	0.002 7	0	0
	0.004 1	0.003 3	<b>0.012 6</b>	<b>0.010 5</b>	0.003 9	0.002 1	0.001 5	0	0.005 1	0.003 2
	0.015 5	0.015 1	0.004 7	0.003 5	<b>0.018 2</b>	<b>0.017 0</b>	0.011 7	0.002 7	0	0
	0.003 8	0.005 2	0	0.001 0	0.003 0	0.012 0	<b>0.017 5</b>	<b>0.016 3</b>	0	0
	0	0	0.004 8	0.001 6	0	0	0	0	<b>0.054 0</b>	<b>0.048 9</b>

### 2.3 结果分析

由表 1 可知，加粗的数值是同种流型主对角线递归黑点的比例，且是每列的最大值，即同种流型的相似程度最高；一般的流型识别方法对中心流和塞状流很难区分，而本文采取的交互式递归分析方法，尽管这两种流型的黑点比例较其他流型的比例高，但是仍然能准确地将两种流型分开，由此证明，此方法对于流型辨识的正确率很高。传统的 ECT 方法，首先需要重建图像之后，再进行流型识别，

这样不仅耗时长，且重建之后的图像分辨率不高，影响流型识别的准确性，而本文采取的交互式递归图主对角线递归黑点的比例方法，不需要重建图像，进而节省了大量时间，辨识速度大幅度提升。

由此可见，利用交互式递归图主对角线递归黑点的比例对流体流型进行识别是十分有效的。

### 3 结论

本文针对现有油气两相流存在流型识别速度

慢且识别准确度不高的问题, 提出了一种基于交互式递归分析的无须成像的流型识别方法。这里采用交互式递归分析对 10 种实验流型进行识别的方法, 根据不同流型电容值具有不同时列的特点, 利用交互式递归分析对不同流型进行动态时序分析, 最后通过主对角线递归黑点的比例来确定流型的相似度。仿真结果表明: 交互式递归分析方法可准确的对两相流型进行识别, 由于无须进行图像重建, 进而缩短大量时间, 加快识别速度, 为快速流体的状态识别提供了一种新的手段。

### 参考文献:

- [1] 李孝禄, 王文越, 张远辉, 等. 液压制动管路中气液两相流型聚类分析识别[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 377-383.  
Li Xiaolu, Wang Wenyue, Zhang Yuanhui, et al. Identification of gas-liquid two-phase flow patterns in hydraulic braking pipeline based on cluster analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 377-383.
- [2] 祁丽. 管内气液两相流型的智能识别[D]. 厦门: 集美大学, 2014: 7-13.  
Qi Li. Intelligent Recognition of Flow Pattern of Gas-liquid Two Phase Flow in Horizontal Pipe[D]. Xiamen: JiMei University, 2014: 7-13.
- [3] 何雪. 面向管道多相流检测的电容层析成像研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014: 23-30.  
He Xue. Research on Electrical Capacitance Tomography to Multiphase Pipeline Detection[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2014: 23-30.
- [4] 宋蕾. 基于神经网络的电容层析成像系统流型识别研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015: 15-26.  
Song Lei. Study on Identification of Flow Regimes Based on Neural Networks for Electrical Capacitance Tomography System[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015: 15-26.
- [5] 陈飞, 周云龙, 窦华容. 基于图像小波变换的气液两相流型识别[J]. 工程热物理学报, 2007, 22(5): 752-756.  
Chen Fei, Zhou Yunlong, Dou Huarong. Identification of gas-liquid two-phase flow pattern based on image wavelet transform[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 22(5): 752-756.
- [6] 周云龙, 李洪伟, 袁俊文. 一种识别气液两相流型的新方法[J]. 热能动力工程, 2009, 24(1): 68-72.  
Zhou Yunlong, Li Hongwei, Yuan Junwen. A new method for identification of gas-liquid two-phase flow pattern[J]. Thermal Power Engineering, 2009, 24(1): 68-72.
- [7] 唐雪琴, 王侃, 徐宗昌, 等. 基于 MAPSO 算法的小波神经网络训练方法研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3): 104-108.  
Tang Xueqin, Wang Kan, Xu Zongchang, et al. Research on WNN Training Algorithm Based on MAPSO Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(3): 104-108.
- [8] 周云龙, 顾杨杨. 基于独立分量分析和 RBF 神经网络的气液两相流型识别[J]. 化工学报, 2012, 63(3): 796-799.  
Zhou Yunlong, Gu Yangyang. Flow regime identification of gas / liquid two-phase flow based ICA and RBF neural network[J]. CIESC Journal, 2012, 63(3): 796-799.
- [9] 龙军. 基于传感器数据融合的小通道气液两相流参数测量新方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 31-44.  
Long Jun. Study on new measurement methods of gas-liquid two-phase flow in small channels based on sensor data fusion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 31-44.
- [10] 闫润强, 朱贻盛. 基于信号递归度分析的语音端点检测方法[J]. 通信学报, 2007, 28(1): 35-39.  
Yan Runqiang, Zhu Yisheng. Speech endpoint detection based on recurrence rate analysis[J]. Journal on Communications, 2007, 28(1): 35-39.
- [11] WANG C H, ZHONG ZH P, E J Q. Flow Regime Recognition in Spouted Bed Based on Recurrence Plot Method[J]. Powder Technology (S0032-5910), 2012, 219: 20-28.
- [12] 董芳, 金宁德, 宗艳波, 等. 两相流型动力学特征多尺度递归定量分析[J]. 物理学报, 2008, 57(10): 6145-6154.  
Dong Fang, Jin Ningde, Zong Yanbo, et al. Multi-Scale Recurrence Quantification Analysis of the Dynamic Characteristics of Two Phase Flow Pattern[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(10): 6145-6154.
- [13] 蒲晓川. 基于递归分析方法的齿轮故障诊断[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014: 16-28.  
Pu Xiaochuan. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master in Engineering[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014: 16-28.



- [14] AGUILA J J, MARIN I, ARIAS E, et al. High Performance Computing Applied to the False Nearest Neighbors Method: Box-assisted and kd-tree approaches[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering (S1876-1110), 2011, 90(7): 323-336.
- [15] AMIRA Z, JAMAL CH, JEAN M G. Reducing Sojourn Points from Recurrence Plots to Improve Transition Detection: Application to Fetal Heart Rate Transitions[J]. Computers in Biology and Medicine (S0010-4825), 2015, 63(1): 251-260.
- [16] MIQUEL F L, NARCIS G, FRANCESC X L. Recurrence Plots to Characterize Gas-Solid Fluidization Regimes[J]. International Journal of Multiphase Flow (S0301-9322), 2015, 72(3): 43-56.
- [17] 成卫青, 唐旋. 一种基于改进互信息和信息熵的文本特征选择方法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2013, 33(5): 63-68.  
Cheng Weiqing, Tang Xuan. A Text Feature Selection Method Using the Improved Mutual Information and Information Entropy[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science), 2013, 33(5): 63-68.
- [18] 徐大露, 薛倩, 马敏, 等. 基于小尺度 ECT 传感器的滑油在线监测研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(11): 34-37.  
Xu Dalu, Xue Qian, Ma Min, et al. Research on Online Lubrication Oil Monitoring Based on Small Scale ECT Sensor[J]. 2015(11): 34-37.