

CN9301202

CNIC-00676

TSHUNE-0054

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

用差压信号空间特征频率 S_r 鉴别两相流流型

IDENTIFICATION OF TWO-PHASE FLOW PATTERN
BY USING SPECIFIC SPATIAL FREQUENCY
OF DIFFERENTIAL PRESSURE SIGNAL

(In Chinese)



原子能出版社

中國核情报中心

China Nuclear Information Centre



韩兵：清华大学核能技术设计研究院助理研究员。1984年毕业于清华大学自动化系，1989年获反应堆工程与安全硕士学位。

Han Bing; Researcher of Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University. Graduated from Automation Department of Tsinghua University in 1984 and got a master degree in reactor engineering and safety in 1989.

CNIC-00676

TSHUNE-0054

用差压信号空间特征频率 Sr 鉴别两相流流型

韩兵 佟允亮 吴少融

(清华大学核能技术设计研究院)

摘 要

压差脉动分析方法是两相流流型识别的常用方法,通过频域特征峰辨识流型会受到气泡速度的影响,而混淆泡状流和间歇流。从两相流流型的空间几何意义出发,利用差压计作传感器,提出用标准空间特征频率斯特罗哈尔数 Sr 作流型识别的定量依据,斯特罗哈尔数 Sr 识别流型具有明确的物理意义。给出了这一空间处理技术辨识流型的实验结果。

**IDENTIFICATION OF TWO-PHASE FLOW PATTERN
BY USING SPECIFIC SPATIAL FREQUENCY
OF DIFFERENTIAL PRESSURE SIGNAL**

(In Chinese)

Han Bin Tong Yunxian Wu Shaorong
(INSTITUTE OF NUCLEAR ENERGY TECHNOLOGY,
TSINGHUA UNIVERSITY, BEIJING)

ABSTRACT

It is a classical method by using analysis of differential pressure fluctuation signal to identify two-phase flow pattern. The method which uses trait peak in the frequency-domain will result confusion between bubble flow and intermittent flow due to the influence of gas speed. Considering the spatial geometric significance of two-phase flow patterns and using the differential pressure gauge as a sensor, the Strouhal number Sr is taken as the basis for distinguishing flow patterns. Using Strouhal number Sr to identify flow pattern has clear physical meaning. The experimental results using the spatial analytical technique to measure the flow pattern are also given.

引言

两相流动的流型影响两相流的水动力特性和传热特性,因此,流型的研究是两相流研究的重要基础之一^[1]。流型的分类是建立在直接目测观察的经验基础之上,但在恶劣的流动环境下,如高温、高压和有放射性的条件下,直观观察将很困难。为此,人们发展了多种流型鉴别的测量方法。Bergles 和 Flori 提出根据探针的时域波形鉴别流型的方法^[2],Jones-Zubber 用射线探测分析局部体积含汽率的概率密度分布,并用于流型识别^[3],Hubbard 和 Dukler 应用压差信号脉动的时间-频率分析鉴别流型^[4]。近年来,人们试图发展计算机辅助截面成像(CT)技术^[5,6]来研究流型。其中,噪音信号(探针或压差)的分析方法简单易行,得到了较为广泛的应用。但传统的时间-频率域分析^[2,4]识别流型的方法易受气泡流速的影响而发生混淆。本文作者及其同事发展了探针和压差噪音信号的空间域分析方法用于流型识别^[7,8],其优越之处在于使流型鉴别方法具有更为明确的物理意义并不受流速影响。作为该研究的继续 本文研究了用差压信号标准化空间特征频率 Sr 鉴别流型。

1 两相流流型的空间结构及传统差压脉动法流型识别

1.1 流型空间结构

对于垂直上升管中流型的观察研究,科学家们已经作了大量工作,积累了许多经验和方法。公认的垂直上升管流型分类有以下几种^[1,9]。它们直接建立在直观的几何意义上:

(1) 泡状流(Bubble flow):液相为连续相,汽相以气泡的形式弥散在液相中,该流型的空间结构特征为:气泡尺寸远小于通道的水力学直径,气泡大小集中在某一特征尺寸周围近似呈高斯分布。

(2) 间歇状流(Intermittent flow):汽相以较大的汽弹或块状从流动中经过,两汽弹或汽块之间由液相分开,液相中夹带少量小气泡。这种流型的空间结构特征为:汽弹尺寸与通道水力学直径相当,汽相与液相相间通过流道。管壁压力随机扰动的主要能量来自汽弹。

(3) 环状流(Annular flow):在这种流型中,液相在管壁上形成一个环形的连续流,液相环中弥散着气泡,在汽相中央带着液滴。这种流型出现在饱和沸腾高含汽量区。空间结构特征为:汽相尺寸远大于通道当量直径。

(4) 雾状流(Mist flow):通道中的液体变为许多细小的液滴悬浮在蒸汽主流中随蒸汽流动。

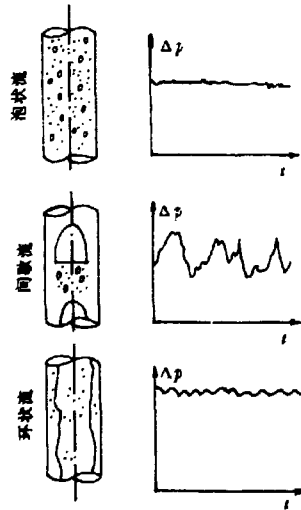


图1 典型流型的空间结构及其压差脉动特性

前三种典型流型的空间结构见图 1。

1.2 差压脉动法流型识别

本文引言中简述了流型识别方法,其中 Hubbard 和 Dukler^[4]提出的传统压差脉动法,从管壁压力跌落的时间-频率谱分析来确定流型,能用于高温高压条件,是一种简单实用的方法。

两相流各种流型,以不同方式影响局部压差信号。压差信号的随机脉动其主要能量来自具有特征尺寸的汽泡。对压差信号作功率谱,可以发现信号能量将主要分布在某特征频率周围。通过对局部压差信号作频域分析可鉴别不同流型。典型的泡状流和间歇流的压差信号功率谱见图 2、图 3。

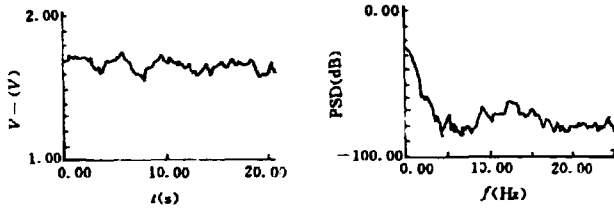


图 2 泡状流压差信号典型特征

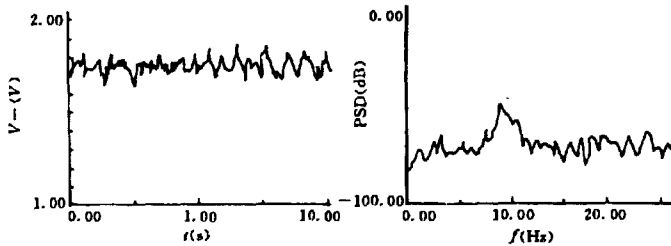


图 3 间歇流压差信号特性

用压差脉动法识别流型有个弱点,即汽泡的特征频率与汽泡的速度密切相关,仅靠特征峰值的频率大小来辨识流型会带来一些混淆。因为同一特征频率值既可以对应少量汽泡大流速情况,亦可以对应大量汽泡小流速情况,从而造成特征频率峰值的多重映射,混淆泡状流和间歇流。

本文从流型的空间结构出发,提出利用差压信号标准化特征空间频率——斯特罗哈尔数 Sr 作为鉴别流型的定量依据,较好地解决了上述问题。

2 斯特罗哈尔数 Sr 识别流型

2.1 基本原理

汽泡沿管道垂直向上运动,呈一定分布,取观察段长度为 l ,在观察段内,汽泡出现的次数为 N ,则汽泡分布的空间特征频率为 $\lambda = N/l$ 。所谓空间频率是指某一具有一定空间分布

的信息源在单位空间长度内波动的次数。这里 λ 反映了单位长度内气泡的个数。考虑到流型取决于以通道水力当量直径 D 为尺度的气泡大小,构造如下的无量纲数:

$$\lambda \cdot D = N / (l/D) \quad (1)$$

这里 D 为通道当量直径, l/D 表示以当量直径度量的通道长度。将(1)式分子分母同除以时间 t , 得:

$$\frac{(N/t) \cdot D}{(l/t)} = \frac{f \cdot D}{v} = Sr \quad (2)$$

即得斯特罗哈尔数。在这里, Sr 的物理意义为以水力当量直径为空间尺度单位的标准化空间频率,即以通道当量直径为度量的单位长度内气泡的个数。

(2)式中, f 为气泡特征频率(Hz); v 为气泡速度(m/s); D 为通道水力当量直径(m)。

很显然,泡状流时,气泡直径远小于通道当量直径,即 $Sr > 1.0$ 。随着气泡空间尺寸减小, Sr 值大于且远离 1.0。

间歇流时,气泡直径接近通道水力当量直径。故单位长度内气泡个数小于或接近于 1。随着气泡尺寸和气泡间距增大,单位长度内气泡个数小于且远离 1.0。

环状流时, Sr 值接近 0。

斯特罗哈尔数与流型的关系如图 4 所示。

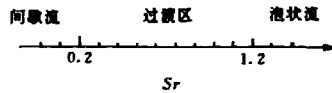


图 4 Sr 数与流型的关系

2.2 传感器空间滤波特征的影响

2.2.1 压差信号的功率谱分析

通过压差方法测量气泡信号,设气泡的物理量分布为 $f(x, t)$,以速度 v 沿管流动,则输出信号为 $g(t)$ 如图 5 所示。

$$g(t) = \int_0^L f(x, t) h(x) dx \quad (3)$$

这里 $h(x)$ 为取压段的空间权函数。

设气泡在 t 时间内沿管道方向运动了 ζ 距离, $\zeta = vt$, 则

$$g(\zeta) = \int_0^L f(x - \zeta) h(x) dx \quad (4)$$

其空间功率谱为

$$G(\lambda) = |H(\lambda)|^2 F(\lambda) \quad (5)$$

这里 $G(\lambda)$ 为 $g(\zeta)$ 的空间功率谱; $H(\lambda)$ 为 $h(x)$ 的空间谱; $F(\lambda)$ 为 $f(x - \zeta)$ 的空间功率谱; λ 为空间频率。

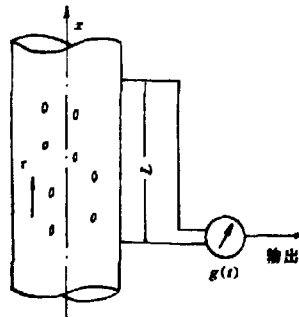


图 5 空间信号测量示意图

假定流动中两相流的空间结构具有“凝固态”，则其时间频谱 $P(f)$ 与信号空间频谱和传感器空间频率特性 $H(\lambda)$ 具有如下关系。

$$P(f) = \frac{1}{v} |H(\frac{f}{v})|^2 F(f/v) \quad (6)$$

2.2.2 传感器的空间滤波特性

当使用快速差压变送器测量两相流噪音信号时，传感器的空间频率特性主要取决于取压段的空间传递特性。

取压段理想化空间权函数的数学表达式为：

$$h(x) = \begin{cases} 1 & 0 \leq x \leq L \\ 0 & x = \text{其他} \end{cases}$$

对 $h(x)$ 作傅立叶变换：

$$H(\lambda) = \frac{1}{2\pi\lambda} \{ \sin(2\pi\lambda L) + j[\cos(2\pi\lambda L) - 1] \}$$

$$|H(\lambda)|^2 = \frac{1}{\pi^2 \lambda^2} \sin^2(\pi\lambda L) \quad (7)$$

其图形示于图 6。

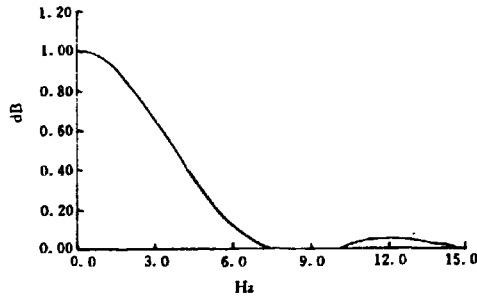


图 6 差压传感器空间滤波特性

从图 6 可以看出，取压段实际上是一个空间低通滤波器，取压段越长，其空间频率带宽越窄。因此，取压段与当量直径之比不能过大，否则，信号高频成分过分衰减，将丧失流型鉴别能力。

2.2.3 气泡速度

本文论述的空间分析方法需已知气泡速度，在两相流量和含汽率已知的情况下，可以通过理论计算估计气泡速度，在流量未知的情况下，可以用两个相邻取压段差压信号的互相关估计流速。

3 实验系统与实验方法

3.1 实验回路

全部实验在 5MW 低温供热堆热工水力学模拟实验台架 HRTL-5 上进行，实验回路原理图见图 7。实验回路由 1 回路和 2 回路组成。1 回路是实验系统主回路，由加热段、上升段、汽水分离器、冷凝器、下降管和节流阀组成。加热段内有 16 根电加热元件，模拟反应堆内元

件束。1 回路系统采用自然循环，驱动头由冷热段流体密度差提供。

为了能够直接观察实验本体内的流型变化，在加热段出口，上升段入口处安装了可视化窗口，直接进行可视化观察。

3.2 实验方法

实验时，调节冷凝器的换热能力以调节和保持一定的系统压力不变。给出一定的加热功率，调节 2 回路通往换热器的冷却水流量得到 1 回路一定的进口过冷度，以确定实验工况。当实验工况稳定后，进行信号测量。除了温度、功率、流量、压力测量外，气泡空间频率噪声信号通过安装在实验本体上的若干差压变送器进行测量。差压变送器采用美国罗斯蒙特公司的 1151 电容式差压变送器和上海福克斯波罗公司的扩散硅式差压变送器，测量精度为 0.2 级，时间常数为 0.2 s，所有信号经过 MS-1215, 12 位 A/D 接口板由 GW0520CH 计算机进行采样记录，利用周期图法求压信号的功率谱，摄像方法作为直观参照。

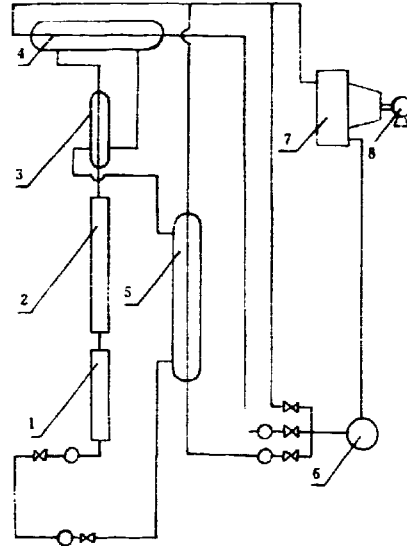


图 7 实验回路原理图

- O——流量计；∞——节流阀；———管道。
 1——加热段；2——上升段；3——汽水分离器；
 4——冷凝器；5——换热器；6——循环泵；
 7——空冷器；8——风机。

表 1 斯特罗哈尔数与流型关系

序号	数据文件名	压力 (MPa)	功率 (kW)	空泡份额	频率 (Hz)	汽相速度 (m/s)	Sr 值	可视化观察
1	AS1005	0.115	16.5	0.01	15.5	0.25	3.71	泡状流
2	AS419	1.57	60.0	0.005	13.0	0.27	2.94	泡状流
3	AS424	0.263	45.0	0.005	5.75	0.25	1.4	泡状流
4	ES423	0.245	45.0	0.02	5.70	0.25	1.34	泡状流
5	IS419	1.56	60.5	0.15	12.2	0.57	1.28	泡状流
6	IS415	1.52	74.0	0.15	13.0	0.61	1.27	泡状流
7	GS419	1.54	60.0	0.12	10.5	0.50	1.26	泡状流
8	GS415	1.54	74.5	0.28	17.0	0.93	1.09	大泡状流
9	HS415	1.393	72.0	0.35	21.0	1.18	1.07	大泡状流
10	AS510	0.244	45.0	0.32	20.6	1.42	0.85	剧烈泡状流
11	DS1005	1.584	62.0	0.19	9.0	0.64	0.84	剧烈泡状流
12	CS1005	1.602	78.0	0.233	7.6	0.76	0.56	泡-间过渡区
13	IS418	0.154	28.0	0.35	17.5	1.39	0.76	泡-间过渡区
14	JS418	0.141	46.0	0.33	15.8	1.55	0.61	泡-间过渡区
15	KB509	0.138	96.0	0.4		1.90	0.29	间歇流
16	JS509	0.129	99.0	0.42		1.83	0.21	间歇流

4 实验结果与讨论

利用斯特罗哈尔数鉴别流型的结果列在表 1 中,表中给出了对应不同系统压力,不同加热功率稳定工况下的空泡份额、汽相速度,PSD 特征频率值, Sr 值,及可视化窗口观察结果。表 1 中清楚地表明了斯特罗哈尔数与流型的关系,与可视化观察结果十分吻合。泡状流时, Sr 值 >1.2 ;间歇流时, Sr 值 <0.3 ;泡状流和间歇流之间的过渡区, Sr 值介于 0.3 至 1.2 之间。实验结果可以看出利用斯特罗哈尔数鉴别流型具有良好的定量关系。

表 1 表明,由于流速变化范围很大,用差压信号的特征时间频率不能良好鉴别流型,这显示了空间特征频率 Sr 分析方法具有明显的优越性。

5 结论

利用斯特罗哈尔数 Sr 鉴别流型,实质上是一种随机噪声的空间分析方法。斯特罗哈尔数 Sr 能够很好地判断泡状流和间歇流,特别是对于处在两种流型过渡区的工况, Sr 能够给出该工况偏离标准流型的程度。 Sr 数判别流型具有十分明确的物理意义,弥补了传统时间频率域分析方法易受流速混淆的不足。

参 考 文 献

- [1] 陈学俊. 两相流与传热. 原子能出版社, 1991, 6
- [2] Berales A E, Lopins R F et al. Critical heat flux and flow pattern observations for low pressure water flowing in tubes. Trans. ASME J. Heat Transfer, Vol. 89, 1967, 67~74
- [3] Jones O C, Euber N. Statistical methods for measurement and analysis in two-phase flow. Proc. 5th Int. Heat Transfer Conf. 1974, Tokyo
- [4] Hubbard M G, Dukler A E. The characterization of flow regimes for horizontal two-phase flow, Proc. the Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, Stanford University Press, 1966, 100~121
- [5] 黄佐明, 徐等安. 两相流测量技术的现状和发展趋势. 第二届全国多相流检测技术会议论文集, 1988, 10, 南京, 9~26
- [6] 徐等安. 超声层析成像技术在气/液两相流检测中的应用. 第三届全国多相流检测技术会议论文集, 1990, 11, 上海, 90~99
- [7] 佟允亮, 刘明. 用气泡直径概率密度分布和气泡空间频率分析方法识别不可视通道内两相流流型. 中国核科技报告, CNIC-00406, 1990
- [8] 张佑杰, 佟允亮等. 用局部体积含气率概率密度分布识别流型. 第三届全国多相流检测技术会议论文集, 1990, 11, 上海, 176~190

用差压信号空间特征频率 S_r 鉴别两相流流型

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

☆

开本 787×1092 1/16 · 印张 1/2 · 字数 7 千字

1992 年 11 月北京第一版 · 1992 年 11 月北京第一次印刷

ISBN 7-5022-0765-1

TL · 488

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-0765-1
TL · 488

P.O.Box 2103
Beijing, China