

# 多相流参数检测 理论及其应用

周云龙 孙 斌 李洪伟/著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 多相流参数检测理论及其应用

周云龙 孙 斌 李洪伟 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书是在作者总结多年从事多相流参数检测理论和试验研究工作所取得的研究成果的基础上撰写而成。全书共 8 章, 主要内容包括相含率、压降、液膜厚度和旋涡脱落频率的测量, 基于波动信号和数字图像信号的多相流型检测, 基于数字图像处理技术气液两相容积含气率检测, 基于压差波动法与图像处理法对气固两相流型检测, 以及基于 PIV 和 PTV 法对流场及流速的测量等。

本书可供控制理论和控制工程、模式识别与智能系统、检测技术与自动化装置、测试计量技术与仪器、热能工程等相关专业工程技术人员、工程设计人员阅读, 也可作为高等院校相关专业的研究生教材、本科生选修教材或参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

多相流参数检测理论及其应用/周云龙, 孙斌, 李洪伟著. —北京: 科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027087-0

I. ①多… II. ①周… ②孙… ③李… III. ①多相流动-参数测试  
IV. ①O359

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 051043 号

责任编辑: 何舒民 童安齐/责任校对: 耿 耘  
责任印制: 吕春珉/封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010 年 4 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 4 月第一次印刷 印张: 15

印数: 1—1 500 字数: 290 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8003

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303

## 前 言

多相流动现象广泛存在于自然界和现代工业生产过程中,与人类的生活和生产密切相关。目前,在化工、石油、能源、冶金、环保和轻工等行业的许多生产设备中都涉及多相流动工况,而多相流学科是以多相流系统为研究对象,以工程热物理学为基础,与数学、力学、信息、生物、环境、材料和电子计算机等学科相互融合交叉而逐步形成和发展起来的一门新兴交叉学科。随着科学技术的迅速发展,多相流在科学研究、工业生产、环境保护以及人类生活中显得日益重要,多相流研究已成为国内外极为关注的前沿学科。

多相流动极其复杂,多相流被称为“难测流体”,也成为国内外科技工作者争相探索的热点课题。多相流测量的对象主要包括各相流体的速度、各相浓度、流型和流量等生产过程参数,这些参数的在线测量对生产过程的计量管理、控制和运行可靠性具有重大意义。

作者所领导的东北电力大学课题组在上述研究领域承担了各类基金项目 10 余项,其中包括国家自然科学基金项目“气液两相横向冲刷管束的绕流特性”(编号:50676017)、“气液两相流流型特征评价、选择及融合识别方法研究”(编号:50706006)和“基于数字图像处理技术的气液两相流型智能识别及其演化规律”(编号:50906178)三项;教育部科学技术研究重点项目“气液两相绕钝体旋涡脱落特性数值及试验研究”(编号:206037)一项;吉林省科技发展计划项目“非圆截面微通道内气液两相流动特性”(编号:20060704)和“油气水三相流动特性与流量测量”(编号:963407)两项;吉林省教育厅项目“石油工业油气水混输管道内三相流型智能识别方法”(吉教科合字[2004]13)和“管束间气液两相缝隙流动特性研究”(吉教科合字[2006]25)两项;吉林市杰出青年基金项目“多特征融合的油气水多相流型识别方法研究”(编号:2006034)和“管壳式换热器内气液两相流体诱导管束振动的研究”(编号:2007027)两项。到目前为止,在多相流体参数检测方面发表学术论文百余篇,其中被 SCI 收录 1 篇, EI 收录 42 篇。授予国家发明专利三项,授予国家实用新型专利两项,授权计算机软件著作权一项。

本书是作者多年来在多相流参数测量理论及应用方面所做的开创性工作的总结,对丰富和发展多相流参数测量等有重要的理论意义,同时对指导相关设备的设计及安全、稳定和高效运行可提供技术指导,因此也具有现实意义。此外,本书还可以作为同行开展此类方面研究工作的参考。

作者所领导的课题组的各位同仁和研究生陈飞、王强、陆军、尚秋华、张学清、

徐驰、范振儒、何强勇、何小斌、袁俊文、钟金山等为本书付出了辛勤劳动,在此向他们表示衷心感谢!从这个意义上讲,本书也是作者所领导的课题组集体劳动的结晶。

本书的前言、第4章、第5章、第7章、第8章由周云龙教授撰写,第1~3章由孙斌副教授撰写,第6章由李洪伟博士撰写。全书由周云龙教授统稿。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和不足,恳请读者批评指正。

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多相流概述	1
1.1.1 多相流体的定义	1
1.1.2 多相流体的分类	2
1.2 多相流主要测量参数及分类	3
1.2.1 主要测量参数	3
1.2.2 测量参数分类	7
1.3 多相流研究方法与研究模型	7
1.3.1 多相流研究方法	7
1.3.2 多相流研究模型	8
1.4 多相流参数检测	8
1.4.1 多相流参数检测的研究意义	8
1.4.2 多相流参数检测的研究现状	9
1.4.3 气液两相流检测的发展趋势	12
参考文献	12
第 2 章 多相流相含率、压降、液膜厚度和旋涡脱落频率的测量	16
2.1 多相流分相含率的测量	16
2.1.1 基于双能射线法对油气水多相流分相含率的测量	16
2.1.2 基于电阻层析成像技术对气液两相流分相含率的测量	17
2.1.3 基于光纤探针法对气液两相流含气率的测量	19
2.1.4 基于电导探针法对含气率的测量	20
2.1.5 小结	21
2.2 多相流压降的测量	21
2.3 液膜厚度的测量	23
2.3.1 X 射线衰减法	23
2.3.2 定电流法	24
2.4 气液两相绕流柱体旋涡脱落频率的检测	25
2.4.1 表面摩擦法	25
2.4.2 管壁压差法	26

2.5 结语 .....	28
参考文献 .....	29
<b>第3章 基于波动信号识别气液两相流流型理论及应用</b> .....	<b>30</b>
3.1 基于压差波动法识别气液两相流流型 .....	30
3.1.1 压差法原理 .....	30
3.1.2 系统结构 .....	31
3.1.3 信号获取 .....	32
3.1.4 实验噪声分析 .....	34
3.1.5 实验测得的压差波动信号及分析 .....	35
3.1.6 压差波动信号中噪声的辨识 .....	37
3.1.7 基于小波分析方法的噪声处理 .....	42
3.2 基于电导波动法识别气液两相流流型 .....	47
3.2.1 实验系统 .....	47
3.2.2 实验测得的压差波动信号及分析 .....	49
3.3 基于压力波动法识别气液两相流 .....	50
3.3.1 实验系统 .....	50
3.3.2 实验测得的压力波动信号及分析 .....	50
3.3.3 基于小波消噪阈值方法对信号的处理 .....	51
3.4 气液两相流波动信号的特征提取 .....	54
3.4.1 基于小波包变换的流型特征提取 .....	54
3.4.2 基于混沌分析技术的流型特征提取 .....	56
3.4.3 基于希尔伯特-黄变换的流型特征提取 .....	62
3.4.4 基于 WVD 变换的流型特征分析 .....	70
3.4.5 基于功率谱的流型特征分析 .....	72
3.4.6 基于功率谱密度函数(PSD)的特征提取 .....	77
3.5 流型的识别模型 .....	82
3.5.1 Elman 神经网络模型 .....	82
3.5.2 径向基函数网络模型 .....	85
3.5.3 概率神经网络模型 .....	89
3.5.4 Kohonen 神经网络的识别模型 .....	91
3.5.5 基于支持向量机模型的流型识别 .....	94
3.5.6 基于隐马尔可夫模型的流型识别 .....	98
3.6 压力与压差信号对比分析 .....	102
3.6.1 高阶统计量的定义 .....	102
3.6.2 四种典型流型压差信号的双谱变换 .....	103

3.6.3	四种典型流型压力信号的双谱变换 .....	105
3.7	结语 .....	107
	参考文献 .....	107
<b>第4章</b>	<b>基于数字图像处理技术识别气液两相流流型理论及应用 .....</b>	<b>112</b>
4.1	气液两相流流型图像信号的获取 .....	112
4.1.1	实验系统及步骤 .....	112
4.1.2	图像采集系统的选取 .....	113
4.1.3	两相流图像信号的获取及分析 .....	115
4.1.4	流型图像的噪声分析及处理 .....	116
4.2	气液两相流流型图像信号的特征提取 .....	118
4.2.1	基于灰度直方图的流型图像特征提取 .....	118
4.2.2	基于不变矩的流型图像特征提取 .....	120
4.2.3	基于灰度共生矩阵的流型图像特征提取 .....	122
4.2.4	小波变换的流型图像特征提取 .....	124
4.2.5	基于小波包变换的流型图像特征提取 .....	126
4.3	流型的神经网络识别模型 .....	129
4.3.1	基于 BP 神经网络的流型识别 .....	130
4.3.2	基于 Elman 神经网络的流型识别 .....	132
4.3.3	基于概率神经网络的流型识别 .....	134
4.4	结语 .....	136
	参考文献 .....	136
<b>第5章</b>	<b>基于数字图像处理技术的气液两相容积含气率检测理论及应用 .....</b>	<b>139</b>
5.1	垂直上升管内气液两相泡状流的图像信号的获取 .....	139
5.1.1	实验系统及步骤 .....	139
5.1.2	图像采集系统 .....	140
5.1.3	试验噪声分析 .....	141
5.1.4	泡状流图像的获取 .....	142
5.2	泡状流图像处理方法 .....	142
5.2.1	图像预处理 .....	143
5.2.2	图像分割 .....	144
5.2.3	气泡区域填充 .....	150
5.2.4	气泡区域标定 .....	152
5.3	容积含气率的计算 .....	153
5.3.1	气泡尺寸 .....	153
5.3.2	容积含气率 .....	153



5.3.3	实验结果与分析 .....	154
5.4	结语 .....	158
	参考文献 .....	159
<b>第6章</b>	<b>基于连续图像灰度时间序列的油气水三相流流型检测理论及应用</b> .....	<b>160</b>
6.1	油气水三相流流型图像信号的获取 .....	160
6.1.1	实验系统及步骤 .....	160
6.1.2	图像采集系统的选取 .....	161
6.1.3	三相流图像信号的获取及分析 .....	162
6.1.4	流型图像的噪声分析及处理 .....	163
6.1.5	灰度时间序列的构成 .....	163
6.2	油气水三相流流型时间序列的特性分析及特征提取 .....	164
6.2.1	延迟时间的计算 .....	164
6.2.2	基于 HURST 指数的特性分析 .....	166
6.2.3	基于关联维的特性分析 .....	168
6.2.4	基于混沌吸引子的特性分析 .....	170
6.2.5	时频域特征分析 .....	171
6.2.6	混沌特征的提取 .....	174
6.3	流型的识别模型 .....	176
6.3.1	基于粒子群优化神经网络的流型识别 .....	176
6.3.2	基于改进支持向量机的流型识别 .....	178
6.4	结语 .....	181
	参考文献 .....	181
<b>第7章</b>	<b>流化床气固两相流流型检测理论及应用</b> .....	<b>184</b>
7.1	气固两相流图像信号及压力波动信号的获取 .....	184
7.1.1	图像获取的实验系统及步骤 .....	184
7.1.2	流型图像的预处理 .....	185
7.1.3	压力信号获取的实验系统及步骤 .....	186
7.2	流型图像的特征提取 .....	187
7.2.1	灰度直方图统计特征的提取 .....	187
7.2.2	图像的傅里叶变换纹理特征的提取 .....	189
7.2.3	图像的小波纹理特征的提取 .....	192
7.2.4	图像的多重分形特征的提取 .....	196
7.3	压力波动信号的特征提取 .....	201
7.3.1	EMD 能量特征的提取 .....	201
7.3.2	基于混沌理论特征的提取 .....	204

---

7.3.3 统计参数特征的提取 .....	209
7.4 流型的神经网络识别模型 .....	210
7.4.1 基于概率神经网络(PNN)的流型识别 .....	211
7.4.2 基于 Elman 神经网络的流型识别 .....	211
7.4.3 基于遗传神经网络的流型识别 .....	212
7.4.4 基于人工鱼群算法的 BP 神经网络 .....	214
7.5 结语 .....	217
参考文献 .....	217
<b>第 8 章 基于 DPIV 和 DPTV 法对流场及流速的测量 .....</b>	<b>219</b>
8.1 DPIV 测速法测量流速 .....	219
8.1.1 基本相关算法 .....	219
8.1.2 FFT 快速相关法 .....	221
8.2 PTV 测速法测量流速 .....	223
8.2.1 PTV 算法的基本原理 .....	223
8.2.2 PTV 法测量的结果 .....	225
8.2.3 PTV 法与 DPIV 法测量结果的对比 .....	226
8.3 含气率的计算 .....	227
8.4 结语 .....	227
参考文献 .....	227

# 第 1 章 绪 论

多相流系统广泛存在于化工、石油、能源、冶金、环保和轻工等各个工业领域，而多相流学科是以多相流系统为研究对象，以工程热物理学为基础，与数学、力学、信息、生物、环境、材料和电子计算机等学科相互融合交叉而逐步形成和发展起来的一门新型交叉学科。随着科学技术的迅速发展，多相流在科学研究、工业生产和环境保护以及人类生活中显得日益重要，多相流研究已成为国内外极为关注的前沿学科。

## 1.1 多相流概述<sup>[1~4]</sup>

### 1.1.1 多相流体的定义

在自然界中，物体的形态是多种多样的，最常见的有固态、液态和气态，处于固态的物体称为固体，处于液态的物体称为液体，处于气态的物体称为气体。

相的概念通常是指某一系统中具有相同成分及相同物理、化学性质的均匀物质部分，各相之间有明显的可分界面。因此，各部分均匀的固体、液体和气体分别称为固相物体、液相物体和气相物体，或统称为单相物体。

由于液体和气体具有流动的特性，两者一般统称为流体。因此，各部分均匀的气体或液体的单相物质的流动称为单相流。所谓两相流或多相流，是指同时存在两种或多种不同相的物质流动，例如气体和液体的混合流动、气体和固体的混合流动、液体和固体的混合流动以及油气水混合流动。

要属于两相或多相流动必须满足以下两个条件：一是必须存在相的界面；二是相界面必须是运动的。例如，气体在管道内流动，气体是气相，管道是固相，它们也存在相界面，但相界面是不动的，故它们不是两相流；气体和固体颗粒的混合流动也存在相界面，当相界面随固体颗粒的运动而运动时，这种气体和固体颗粒混合流动就是气固两相流。又如，水夹带着气泡在管子中流动，水和每个气泡之间都存在分界面，但是在流动过程中，每个气泡在水中的形状和位置随时在变化，小气泡有时还会合并成较大气泡，因而水和气泡的分界面随着流动是在不断变化的，属于气液两相流。所以，一般可将多相流定义为存在变动分界面的多种独立物质组成的流动。

固体、液体和气体的性质明显不同。固体具有一定的形状和体积；液体没有一定的形状，但有一定的体积且具有流动性；气体总是均匀充满全部容器，其形

状和体积是由容器的形状和容积决定的，同时具有流动性。由上述可见，固体是无法与气体或液体混合成均匀的单相流体的，因此固体颗粒和气体或液体的混合流动均属多相流。各种液体混合在一起，有时可成为一种单相流体，如水与酒精的混合物；有时则不能，如水与水银的混合。因此，各种液体的混合流动可能是单相流，也可能是多相流。各种气体混合时都能混合均匀，成为一种单相气体，因此各种气体的混合流动均属单相流。

### 1.1.2 多相流体的分类

多相流根据参与流动各相的数目一般可分为两相流和三相流两类，其中尤以两相流最为常见。两相流可以分为四种：气体和液体一起流动称为气液两相流；气体和固体颗粒一起流动称为气固两相流；液体和固体颗粒一起流动称为液固两相流；两种不能均匀混合的液体一起流动称为液液两相流。三相流可分为三种：气体、液体和固体颗粒一起流动称为气液固三相流；两种不能均匀混合的液体和固体颗粒一起流动称为液液固三相流；石油、天然气和水一起流动称为油气水三相流。当然，也存在气体、多种不能均匀混合的液体和固体颗粒一起流动的情况，这种流动可以根据参与流动各相的数目另行命名。

另外，还可以根据参加流动的各组份对多相流进行分类。以气液两相流为例，可分为单组分气液两相流和双组分气液两相流。例如，水蒸气和水组成的组分是相同的，所以气水混合物的流动属于单组分气液两相流；空气和水的组分是不同的，所以空气和水混合物的流动属于双组分气液两相流。单组分气液两相流在流动时根据压强的变化的不同会发生相变，即部分液体汽化为蒸气或部分蒸气凝结为液体；双组分气液两相流则一般在流动时不会发生相变。

根据换热情况的不同，多相流还可分为与外界无加热或冷却等热量交换过程的绝热多相流和有热量交换的多相流。在有热交换的多相流中，伴随着流动过程常会发生组分工质的相变（即液体气化成蒸气或蒸气凝结成液体）。

多相流在自然界、工程设备乃至日常生活中都是广泛存在的。自然界中常见的夹着灰粒、尘埃或雨滴的风、夹着泥沙奔流的河水以及湖面或海面上带雾的上升气流等均为多相流的实例。在日常生活中常见的烟雾、啤酒夹着气泡从瓶中注入杯子的流动过程以及沸腾的水壶中水的循环也都属于多相流的范畴。

严格地说，即使在一般认为是单相流体的液体和气体中也往往含有另一相的成分在内。例如，当温度降低时，含于气体中的水蒸气就会凝结，使气体带有微量水分，又如在水流中几乎也总含有少量空气。但是在这些情况下，气体或液体中所含有另一相数量微小，仍可看作单相流体。

在工程设备中，多相流工况也是经常遇到的，如在动力、核能、化工、石油、制冷和冶金等工业中就存在各种气液两相流工况。又例如，在核电站、火力

发电站中的各种沸腾管、各式气液混合器、气液分离器、各种热交换设备、精馏塔、化学反应设备、各式冷凝器及蒸发器等都广泛存在气液两相流体的流动和传热现象。

气固两相流工况在工程中也是常见的，如在动力、水泥、冶金、粮食加工和化工等工业中广泛应用的管道气力输送就是一种气固两相流。气力输送中应用气体输送的固体颗粒是多种多样的，有煤粉、水泥、矿石、盐类、谷类以及面粉等。虽然气力输送的固体颗粒品种和颗粒尺寸不同，但从本质上看都属于气固两相流的范畴。此外，在采用流化床燃烧的锅炉中，炉膛空气和燃料颗粒的流动工况以及煤粉锅炉炉膛中的流动工况也都是气固两相流工况。

液固两相流在工程中的典型例子为水力输送。水力输送广泛用于动力、化工、造纸以及建筑等工业。在这些工业中，用水力沿着管道输送的有各种固体颗粒，如烟煤、泥煤、矿料和盐类等；也有用水和各种细颗粒混合成浆状输送物进行输送的，如水煤浆、纸浆及建筑材料浆等。其他，像火力发电厂锅炉的水力除灰管道中流动的水灰混合物也属液固两相流的范畴。

至于液液两相流，可用化工中的乳浊液流动工况及石油工业中的油水混合物为其工程实例。

在工程中还存在不少三相流的工况，例如在浆状流体中，除存在固相和液相外，有时还含有气相（空气）。化学工程中采用的各种气液固三相流化床工况中有气体、液体和固体颗粒一起流动。在油田开采出来的原油中，除去原油和天然气外还带有水。这些流体的流动工况都属于三相流的范畴。在油田开采出来的流体中，有时除原油、气体和水外还夹有沙粒，这种流体的流动就属于四相流。

## 1.2 多相流主要测量参数及分类<sup>[1, 2, 4~7]</sup>

多相流动极其复杂，多相流被称为“难测流体”，同时多相流测量在国际上还没有得到满意解决，也成为国内外科技工作者争相探索的热点课题。

多相流测量的对象主要包括各相流体的速度、各相浓度、流型和流量等生产过程参数，这些参数的在线测量对生产过程的计量管理、控制和运行可靠性具有重大意义。如果多相流可以形成统一的理论，就能够促进全球能源与环境经济的进步和发展。

### 1.2.1 主要测量参数

在多相流系统中，由于各相间的相互作用，存在时间和空间上均随机可变的相界面，致使多相流系统具有远比单相流动复杂的流动特性。因此，描述多相流动的参数除描述单相流动的参数，还要增加一些新的参数。下面对这些参数进行

简要说明。

### 1. 流型

流型又称流态，即流体流动的形式和结构。多相流相界面随机可变，使多相流动形式十分复杂。流型这一参数是多相流动特有的，对多相流其他参数的准确测量往往依赖于对流型的了解。以气液管流为例，图 1-1 和图 1-2 分别给出气液两相流在垂直上升管道及水平流动管道中的流型。

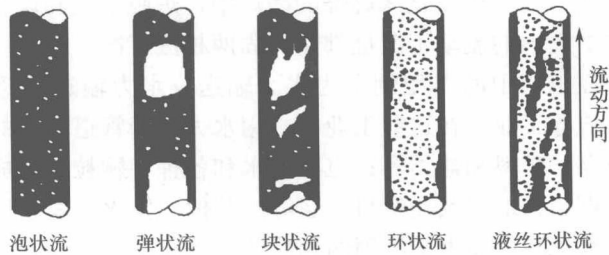


图 1-1 垂直上升管中的流型

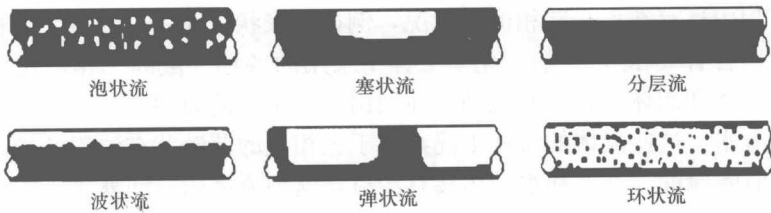


图 1-2 水平流动管道中的流型

### 2. 流量

流量表示在一定时间内流体流过一定截面的总数量。根据采用的单位制不同，可分别用体积流量或质量流量表示。对于各相流体，可用分相体积流量和分相质量流量表示。对于两相混合流体，可用平均体积流量和平均质量流量来表示。以气液两相流为例。

(1) 气液两相流的质量流量可以表示为

$$G = G_g + G_l \tag{1-1}$$

式中， $G$  为总质量流量； $G_g$ 、 $G_l$  分别为气相质量流量和液相质量流量。

(2) 气液两相流的体积流量可以表示为

$$Q = Q_g + Q_l \tag{1-2}$$

式中， $Q$  为总体积流量； $Q_g$ 、 $Q_l$  分别为气相体积流量和液相体积流量。

### 3. 速度

在多相流系统中，各相速度不同，所以除表征多相流混合体整体流动的速度外，还有表征各个分相的分相速度和表征各分相速度差异的相对速度和速度比。

在多相流动中，相间存在相对滑移，多相流速既可以用混合流体的平均速度表示，也可以用分相速度表示。多相界面在时间和空间上存在复杂变化，因此分相流速难以获取，为了表征分相流速，引入了表观速度的概念。表观速度是指分相流体的体积流量与管道流通截面积的比值，表示了当分相流体在管道中单独流动时的流速。以气液两相流为例。

(1) 气液分相速度分别为

$$w_g = \frac{Q_g}{A_g} \quad (1-3)$$

$$w_l = \frac{Q_l}{A_l} \quad (1-4)$$

式中， $w_g$ 、 $w_l$  分别为气相分速度和液相分速度； $A_g$ 、 $A_l$  分别为液相流体通过的截面积和气相流体通过的截面积。

(2) 气液表观速度分别为

$$w_{sg} = \frac{Q_g}{A} \quad (1-5)$$

$$w_{sl} = \frac{Q_l}{A} \quad (1-6)$$

式中， $w_{sg}$ 、 $w_{sl}$  分别为气相表观速度和液相表观速度；流通截面积  $A$  可以表示为

$$A = A_g + A_l \quad (1-7)$$

### 4. 滑移比

滑移比在多相流当中是一个比较重要的参数。以气液两相流为例，在两相流动中，气液两相间的流动速度不相同，有时气相流体比液相流体的速度大很多，因此需要使用滑移比来表示两相间的速度滑移。滑移比指两相流动中气相流速与液相流速的比值，可以表示为

$$s = \frac{w_g}{w_l} \quad (1-8)$$

### 5. 密度

在多相流动中，各相流体有各自的密度，但由于多相流动中多相流体相含率随时间变化，多相流体的混合密度会随分相含率变化。混合密度可以用各相密度

和分相含率计算得到。

以气液两相流为例，两相流的平均密度包括流动密度和真实密度。流动密度是表示单位时间内流过截面的两相混合物的总质量与总体积的比，即

$$\rho_l = \frac{G}{Q} \quad (1-9)$$

真实密度是在一个给定体积内两相流体总质量与总体积的比，即

$$\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l \quad (1-10)$$

式中， $\alpha$  为两相流空隙率； $\rho_g$ 、 $\rho_l$  分别为气相流体密度和液相流体密度。

## 6. 分相含率

各类多相流中的分相含率都有一些不同的习惯用语。分相含率可以表示为一段管流按容积、截面或平均分相含率；也可表示为局部区域的局部分相含率。如果对局部分相含率的分布进行统计测量，将可提供多相流中分散相浓度及其分布的数据，也可为判别多相流型提供定量依据。

以气液两相流为例，分相含率包括截面含气率、容积流量含气率、质量流量含气率等三种形式。

截面含气率，又称空隙率，表示在管道的某一流动截面上，气相所占截面积与总流通面积的比值，即

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (1-11)$$

容积流量含气率，表示气相体积流量占气液两相混合物总体积流量的比值，即

$$\beta = \frac{Q_g}{Q} \quad (1-12)$$

由于在两相流动过程中滑移比一般不等于 1，空隙率与容积含气率通常是不相等的。

质量流量含气率，又称干度，表示在两相混合流体中气相质量流量与两相总质量流量的比值，即

$$\chi = \frac{\beta \rho_g}{\beta \rho_g + (1 - \beta) \rho_l} \quad (1-13)$$

## 7. 压力降

压力降是多相流系统的一个基本参数，多相流混合体流动产生的压力降是多相流系统工程应用必须考虑的因素，它的理论计算和在线测量对多相流系统的应用和参数检测有重要作用。

此外，温度、传热系数、传质系数、液膜厚度和流率、剪切力、气泡、液



滴、颗粒的大小尺寸等也是描述多相流系统的参数。

多相流动过程是复杂的多变量随机过程。多相流检测是一个难度较大、在国内外都属亟待研究和探索的领域。

### 1.2.2 测量参数分类<sup>[6]</sup>

上述多相流主要参数，结合在多相流动设备和系统中的应用，通常分成以下三类：

(1) 直接与设计有关的参数。用以提供稳态或事故状态下设计的极限数据，如压力降、分相含率、流量、传热系数、传质系数和临界热通量等参数。

(2) 与系统研究有关的参数。这类参数是时间或空间的平均参数，是为了改进设计并对系统进行研究所需了解的参数，如流型、相浓度分布（局部分相含率）、速度分布、质量流量分布、气泡、液滴、颗粒尺寸及其分布、液膜厚度幅值分布等参数。

(3) 脉动参数。这类参数是随时间变化的波动参数，如速度波动、压力波动、温度波动、相浓度波动等。

## 1.3 多相流研究方法与研究模型<sup>[3,5,8,9]</sup>

### 1.3.1 多相流研究方法

还是以气液两相流为例，气液两相流动复杂多变，管道内的气液两相流存在各种不同的流型。两相流研究不仅要考虑各相的守恒方程，还要考虑相间的相互作用。因此，描述气液两相流的流体力学方程组要比单相流的复杂，但是气液两相流的处理方法与单相流的处理方法存在共同之处，可以部分借鉴单相流的研究方法。目前通常使用一些经验公式，但是在研究新的或复杂热工设备的性能时，仅靠经验公式是不够的，并且气液两相流机理还不是很清楚，对于许多现象的解释还存在分歧。当前处理气液两相流问题通常有以下三种方式<sup>[4]</sup>：

(1) 类似于单相流，从物理概念出发，或利用量纲分析法，或从微分方程中得到描述某一特定两相流过程的一些无因次参数，然后根据实验数据得出经验关系式。

(2) 根据所研究的两相流动过程的特点，采用适当简化假设，再从两相流的基本方程求得描述该两相流过程的函数形式，然后用实验方法确定出方程中的经验系数，即所谓的半经验方法。

(3) 首先分清两相流的流型，再根据各种流型的特点，分析两相流动特性，并建立各种关系式，可以称为两相流的流体力学方法。