

两相流参数检测及应用

李海青等 编著

LIANG XIANG LIU CAN SHU JIAN CE JI YING YONG

浙江大学出版社



两相流参数检测及应用

李海青等 编著

浙江大学出版社

(浙)新登字10号

内容简介

本书介绍了两相流的定义、分类、特性参数及分析方法；重点讨论了流型、分散相浓度、两相流量，以及压降、传热、传质、液膜、颗粒特性等参数的检测方法和测量仪表；并以专题形式阐述了油田原油流量、流化床颗粒参数、含气液体的空隙率、啤酒流量、湿蒸汽干度、气力输送物料浓度及流量、浆液浓度及流量等检测装置的工业应用实例。

参加本书编写人员有：李海青（概论，第3章，5.6~5.8节）；周泽魁（第1章，5.1、5.4节）；张宏建（第2、4章，5.2、5.5节）；胡赤鹰（5.3节）。何明为本书做了部分工作。

本书可作为化工、石油、动力、冶金、核能、食品等工业部门中的仪表和计控人员参考用书，亦可作为大专院校自动化仪表类专业研究生和本科生选修教材。

两相流参数检测及应用

李海青等 编 著

责任编辑 平淳莲

浙江大学出版社出版
浙江良渚印刷厂印刷
浙江省新华书店发行

开本850×1168 1/32 11印张 字数276千字
1991年11月第1版 1991年11月第1次印刷
印数 0001—2000

ISBN 7-308-00840-1

TM·014 定价：3.60元

序

读书难，写书更难，写好书更是难上加难。若要写成一本好书，不仅要题材新颖、切合时代之需；还要立意精湛，内容丰硕，层次井然，言简意赅，并能理论指导实际，所以是难上加难之事。

多相流问题在自然界与工程界中的广泛性与重要性，早为人所共知，但由于这一极端复杂的多变量随机系统的情况很难掌握，所以只在科学技术发展到了一定水平的近时期，它的研究才获得蓬勃发展。然而要掌握它，首先要了解它，而要了解它就必先有相应的检测技术。可惜时至今日，国内、外这方面的成书还寥若晨星，这正说明了本书的新颖性和出版的迫切性。

李海青教授的科研集体致力于多相流检测的研究多年，并已成为研究生授课8届，富有经验；又广泛从事于这方面的科研工作，取得了突出成绩。她作为全国多相流检测技术研究会的秘书长，还在组织和推动我国在这一领域中的赶超作了大量工作。现在本书问世了，综观其各章内容，体系严整，包罗甚富，深入浅出，图文并茂，并有许多工业应用实测，在在都凝聚着作者们的智慧成果，闪耀着思想的光芒，相信必能与广大读者心意沟通，为本学科的发展起促进作用，达到写书的预期目的。至于本书是否确实算得上是一本好书，还是留请读者鉴评吧。

陈甘棠

1991年7月于老和山下

目 录

概 论

0.1 两相流参数检测的进展	1
0.2 两相流定义及分类	2
0.2.1 两相流定义	2
0.2.2 两相流的分类	3
0.3 两相流的分析方法及模型	4
0.3.1 两相流的分析方法	4
0.3.2 两相流模型	5
0.4 两相流主要参数及分类	6
0.4.1 主要参数	6
0.4.2 参数的分类	7
参考文献	8

1 两相流流型的识别

1.1 流型的分类	10
1.1.1 气液两相流	10
1.1.2 气固两相流	13
1.1.3 液固两相流	15
1.2 流型的理论预测	16
1.2.1 流型状态图	16
1.2.2 流型转变的模型判据	20
1.3 流型的测量方法	36
1.3.1 流型的直接测量法	37
1.3.2 流型的间接测量法	46
1.3.3 流型在线显示系统	52

参考文献	61
------------	----

2 两相流分散相浓度测量

2.1 分散相浓度的定义及表示方法	65
2.1.1 分散相浓度的各种表示方法	65
2.1.2 各参数之间的关系	67
2.1.3 两相混合流的密度	69
2.2 空隙率的模型及计算方法	70
2.2.1 空隙率的纯实验整理法	71
2.2.2 空隙率的计算法	72
2.2.3 空隙率分布规律	85
2.3 空隙率的测量方法	86
2.3.1 空隙率的直接测量技术	86
2.3.2 射线吸收法	88
2.3.3 射线散射法	93
2.3.4 电学法	97
2.3.5 光学法	107
2.3.6 空隙率的其它测量方法	112
参考文献	118

3 两相流流量的测量

3.1 节流法	123
3.1.1 应用孔板测量气液两相流量	123
3.1.2 应用双孔板测量气液两相流量	127
3.1.3 应用长喉颈文丘利管测量气固两相流量	130
3.2 速度法	133
3.2.1 力学法	133
3.2.2 相关法	142
3.2.3 光学法	148
3.2.4 声学法	161
3.2.5 热学法	168

3.2.6 电磁法	175
3.2.7 核磁共振法	177
3.2.8 示踪法	179
3.3 容积法	182
3.4 质量流量法	184
3.4.1 角动量式涡轮流量计	184
3.4.2 科里奥利式 (M-Point) 质量流量计	185
3.4.3 多传感器式间接质量流量计	186
参考文献	188

4 其它参数测量

4.1 两相流压力及压力降测量	191
4.1.1 基本测量方法及特点	191
4.1.2 引压系统	192
4.1.3 压力 (降) 的波动	196
4.2 传热系数的测量	196
4.2.1 直接电加热内流法	197
4.2.2 直接电加热外流法	198
4.2.3 间接电加热法	199
4.2.4 流体加热或冷却法	199
4.3 传质系数的测量	201
4.3.1 质量平衡法	201
4.3.2 电化学法	203
4.4 液膜特性的测量	204
4.4.1 液膜流率的测量	205
4.4.2 液膜厚度的测量	207
4.4.3 壁面剪切力的测量	212
4.5 气泡、液滴和颗粒尺寸的测量	214
4.5.1 取样测量法	214
4.5.2 非接触式测量法	218
参考文献	222

5 工业实用实例

5.1 油田原油流量的测量	224
5.1.1 基本原理	225
5.1.2 智能化多相流量计	228
5.2 流化床颗粒参数的测量	238
5.2.1 颗粒大小的测量	239
5.2.2 流化床颗粒料位的测量	249
5.3 含气液体的空隙率测量	256
5.3.1 工作原理	257
5.3.2 仪器结构	258
5.3.3 特性测试与分析	268
5.4 啤酒流量的测量	271
5.4.1 测量系统组成	272
5.4.2 工作原理	273
5.4.3 智能信号处理器	277
5.5 湿蒸汽的干度测量	282
5.5.1 全散射式光学探针	284
5.5.2 利用孔板和均速管组合测量法	293
5.6 气力输送物料浓度及流量的测量	303
5.6.1 噪声式煤粉流量计	303
5.6.2 煤粉浓度计	310
5.6.3 放射性示踪测速装置	315
5.7 浆液浓度及流量的测量	318
5.7.1 水煤浆超声波浓度计	318
5.7.2 纸浆相关流量计	322
5.8 应用流动成像系统进行两相流参数测量	330
5.8.1 流动成像系统的基本概念	330
5.8.2 超声流动层析成像系统	335
5.8.3 电容流动层析成像系统	338
参考文献	341

概 论

0.1 两相流参数检测的进展

随着科学技术的迅速发展，多相流动体系在国民经济和人类生活中的地位日益重要。多相流动体系中又以两相流动体系最为普遍。

两相流动体系在自然界和工业生产中涉及范围十分广泛。例如，自然界的大漠扬砂，江河中的泥砂俱下，以及空中烟尘弥散、雨霪交浸都是与人类生活有关的两相流现象。生物系人体中所含的流体，如血液和奶液，也都是含有多种细胞、微粒或液滴悬浮体的两相流。在化工、石油、冶金、动力及原子能等工业中，两相流动过程更是普遍存在(详见后文)。大量实例所反映的两相流涉及范围的广泛性及其应用的重要性促使了两相流领域研究工作的迅速发展。但基于两相流体系情况极其复杂，要认清现象，获得概念，建立模型并进行过程的预测、设计和控制，首先要解决的就是两相流的检测技术问题。随着工业生产过程计量、节能及控制要求的提高，对两相流参数检测的要求也就越来越迫切了。

由于两相流动或多相流动比单相流动不仅流动特性复杂得多，且相间存在着界面效应和相对速度，致使参数检测的难度较大。为此，世界各工业发达国家均做了大量研究工作^[1,2]。研究较多的测量方法多涉及新技术：如辐射线技术、激光多普勒技术、核磁共振技术、超声波技术、微波技术、光纤技术、脉冲中子活性示踪技术、相关技术、流动成像技术等等，也有很多研究工作是应用传统的单相流仪表和两相流模型进行多参数组合辨识而检测的。

这些两相流参数的检测技术和方法大都还处于实验室应用研究阶段，已商品化的工业型仪表为数还很少，如相关流量计即属于少数已商品化的仪表品种之一，但工业在线应用的也还不多。可以说，两相流参数检测在国际上尚属一个急待发展的探索研究领域。

我国从事两相流检测技术的科技工作者，分布在化工、工程热物理、动力、核能、力学以及自动化仪表等各个学科领域。在全国第一届多相流检测技术学术会议（1986年10月、杭州）、第二届学术会议（1988年10月、南京）及第三届学术会议（1990年10月、上海）上共发表的150多篇论文，说明我国在此领域也早已起步并进行了大量的研究工作^[3~5]。这些论文比较充分地反映了当前我国两相流检测技术的实际研究状况和发展水平。其中一些论文具有较高的学术水平，也有相当数量的论文反映了测试技术仪表化、实验室仪器改制推广到工业在线应用的必然发展趋势。

两相流动或多相流动是一种复杂的多变量随机过程，随着随机过程理论的逐步发展和信号处理技术的不断完善，应用统计的方法和过程辨识理论与技术，进行两相流参数的估计将成为重要的发展趋势之一。当今计算机应用技术的发展，获取多个信息量对两相流流体局部空间区域，应用流动成像技术进行微观测量也将是重要的发展方向之一。研制高灵敏度和稳定度的阵列式传感器，以达到较准确的测量离散相的浓度及其分布仍是重要的基础工作。空间滤波器法、相关法和激光多普勒法在测量两相流流速方面将获得广泛的应用。如何将成熟的单相流参数检测技术用于两相流参数检测仍将是受到普遍重视的研究方向。

0.2 两相流定义及分类

0.2.1 两相流定义

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，各相之间有明显可分的界面。

从宏观观点出发，可以把自然界的物质分成三种相，即气相、液相和固相。单相物质的流动称为单相流，如气体流或液体流。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的流动。

0.2.2 两相流的分类

工业中常见的多相流有以下几种，其中以两相流最为普遍。

1. 气液两相流

在锅炉等汽化单元，石油、天然气、低沸点液体的传输过程，以及传热传质设备大量的分离和反应过程中，气液两相流的工业实例比比皆是。

2. 气固两相流

在干燥塔等气流干燥单元，煤粉、水泥、谷物、食盐等的气流输送过程，以及煤的沸腾燃烧、石油的催化裂化、矿物的流态化培烧等流态化技术中，气固两相流的工业实例大量存在。

3. 液固两相流

在矿浆、纸浆、泥浆、胶浆等浆液流动，矿石、残渣的水力输送和污水处理排放系统中，液固两相流的工业实例普遍存在。

4. 液液两相流

在物质提取的萃取过程中，大都是液液两相流系统。

5. 气液液和气液固多相流

在油田井口的原油系统中，在油品加氢和精制中的滴流床、淤浆反应器以及化学合成和生化反应中的悬浮床，多相流工业实例也普遍存在。

在两相流动研究中，也可能把物质分成连续介质和离散介质。气体和液体属于连续介质，也称为连续相或流体相。固相颗粒、液滴和气泡属于离散介质，也称为离散相或颗粒相。流体相和颗粒相组成的流动称为两相流动。当流体相是气体时，颗粒相

可以是固体颗粒、液滴或两者均有；当流体相是液体时，颗粒相可以是固体颗粒、气泡、不溶于液体的另一种液滴，或其中两种、三种并存。这样定义和分类的两相流动不仅包含了多相流体力学中所研究的流动，而且大大地简化了数学模型，从而便于两相流参数测量应用。

0.3 两相流的分析方法及模型

为了测量两相流参数，往往需要建立两相流测量模型。建模的正确性直接影响到参数测量精度，而建模又以对两相流的分析为依据。

0.3.1 两相流的分析方法

从宏观观点分析两相流有三种方法^[6]：

1. 扩散模型法

假定相互扩散作用是连续进行的，基本论点是：

- (1) 两相流混合物中每一点都同时由两相占据；
- (2) 混合物的热力学和传递特性取决于每一相的特性和浓度；
- (3) 各相以自己的质量速度中心移动，相间相互扩散作用反映在模型中。

2. 有限容积法

假定过程处于平衡状态，可用平衡方程式进行描述，基本方法是：

- (1) 对一个有限容积写出质量、动量和能量平衡方程式；
- (2) 平衡方程式可按整个混合物或者按单独相列写；
- (3) 流动考虑成一维。

3. 平均法

假定过程处于平衡状态，以平均的平衡方程进行描述，基本

上是低通滤波的方法。

上述三种分析方法的共同点是，不考虑局部的和瞬时的特性，仅考虑相界面上流体微粒集中的相互作用，即宏观动力学。

0.3.2 两相流模型

根据上述分析方法已建立的两相流模型有：

1. 均相流模型(Homogeneous flow model)

考虑两相是作为一个整体的均匀混合物，相间没有相对速度，适用于两相间存在强耦合的场合。例如，微小气泡均匀混合在液体中的气泡流和两相流速高的雾状流。

2. 分相流模型(Separated flow model)

考虑两相是完全分离的两种流体，两相间存在不同的速度和特性；适用于两相间存在微弱耦合的场合。例如气液两相流中的分层流和环状流。

3. 漂移通量模型(Drift-flux model)

基本上是分相流模型，其重点是研究相间的相对运动。漂移通量与相间相对速度有关。适用于弹状流等。

4. 基于流型的模型(Models based on flow pattern)

对于各类两相流中的各种流型，都建立了一些半经验公式，可供工程应用。

对于同一被测参数，采用同一传感元件，基于上述不同的两相流模型建立有关两相流参数的测量公式将是不同的，其测量运算结果将存在误差。例如，对湿蒸汽（蒸汽—水混合物）管流系统，采用孔板节流装置测量流量，按均相流模型和按分相流模型分别建立的两相流量公式^[7,8]，在温度为100~240℃范围内，当干度 $x = 1.0$ 时，两式误差为零；但当干度下降为 $x = 0.95$ 时，这两公式误差达1.2%。显然，为提高测量精度，对具体的被测对象参数，必须选用适合的模型来建立测量公式。

0.4 两相流主要参数及分类

0.4.1 主要参数

两相流动中，由于存在着一个形状和分布在时间和空间里均是随机可变的相界面，而相间实际上又存在着一个不可忽略的相对速度，致使流经管道的分相流量比和分相所占的管截面比并不相等。因此，描述两相流动的参数除描述单相流动的参数，如速度、压力降、流量、温度等，在数量上要加倍外，还要增加一些新的参数^[9]。现将常用的两相流主要参数简单介绍如下：

1. 流型

又称流态，即流体流动的形式或结构。两相间存在的随机可变的相界面，致使两相流动形式多种多样，十分复杂。流型是影响两相流压力损失和传热特性的重要因素。对两相流各种参数的准确测量也往往依赖于对流型的了解。

2. 分相含率

分相含率在气液两相流中又称空隙率或含气率；在气固两相流中又称空隙度或含固率。各类两相流中的分相含率都有一些不同的习惯术语。测知分相含率就可求出各相的分相含量。分相含率可以表示一段管流按容积、截面或弦的平均分相含率；也可表示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，将可提供两相流中分散相浓度及其分布的数据，也可为判别两相流流型提供定量的依据。

3. 速度

由于两相流动中相间存在相对速度，所以除了以混合流体的平均速度描述外，还必须采用分相流速来表示。为了便于工程应用，分相流速也常采用表观流速概念进行折算，即以分相流量除以管道总截面的比来表示该相的分相流速。其物理意义是当管道

中流动的全是该分相流体时，所具有的流速。两个分相流速可以用与平均流速的差值表示相对速度，也可用两个分相流速之比表示速度滑移比。

4. 流量

根据采用单位制不同，可以用容积流量或质量流量等表示。对于各相流量，可用分相容积流量、分相质量流量描述；对于两相混合物的流量，可用平均容积流量和平均质量流量各种参数来描述。

5. 密度

在两相流动中，混合物的平均密度也是一个常用参数，可以由各相密度和分相含率计算求得。

6. 压力降

压力降也是两相流动中的基本参数之一。混合物的两相流压力降与各分相压力降间已建立了很多理论的、实验的和半经验的关联式，可提供工程应用。

另外，分散在两相流中的气泡、液滴、颗粒的尺寸及其分布；环状流中的液膜流率、液膜厚度以及壁剪切力等也都是描述两相流动的一些特征参数。温度、传热系数、传质系数、临界热通量等两相流参数，与单相流动一样，在此也就不再一一说明。

0.4.2 参数的分类

上述两相流主要参数，结合在两相流动设备和系统中的应用，通常分成以下三类^[1]：

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。例如压力降、分相含率、流量、传热系数、传质系数和临界热通量等。

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、液滴和颗粒尺寸及其分

布、膜厚度幅值分布等。

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。

本书不准备对有关两相流的各种参数的测量作全面介绍，与单相流动相比，凡是在测量方法和仪表方面，基本类似的内容全部略去。仅对两相流最基本的特征参数：流型、分相含率及两相流量的测量作重点讨论，并用较大篇幅通过几个工业应用实例介绍有关两相流参数的测量理论、测量方法、测量仪表及系统，以期达到举一反三的目的。

参 考 文 献

- 1 Hewitt G. F., 1978. Measurement of two phase flow parameters. Academic Press, London.
- 2 Reimann J., 1982. Developments in two-phase mass flow-rate instrumentation. Proceedings of the NATO, Advanced Research workshop on the advances in two phase flow and heat transfer, 339~402.
- 3 第一届全国多相流检测技术学术讨论会论文集。1986年
- 4 第二届全国多相流检测技术学术讨论会论文集。1988年
- 5 第三届全国多相流检测技术学术讨论会论文集。1990年
- 6 Ishii M., Кесамустафаогуллари G., 1983. Two phase flow models and their limitations. Advance in two phase flow and heat transfer, 1~4.
- 7 Кремлевский П.П., 1972. Измерение расхода влажного пара при помощи стандартных диафрагм. Измерительная техника, (5).
- 8 Murdock J. W. 1962. Two phase flow measurement with orifices, J. Basic Engng, 84, 419~433.
- 9 连桂森, 1989. 多相流动基础。浙江大学出版社。

两相流流型的识别

两相流动中两相介质的分布状况称为流型或两相流动结构。流型不同，不但影响两相流的流动特性和传热传质性能，而且影响对两相流参数的准确测量。因此，两相流流型是两相流的一个重要的研究方面。

两相流中两相之间存在着多变的相界面。在气液两相流中，相界面的形状及其在两相流中的分布情况是随着流动过程随时在变化的；在气固两相流和液固两相流中，虽然相界面的形状不会变化，但由于固体颗粒的分布情况在流动过程中是随时变化的，因此相界面的分布情况也是不断变化的。两相流的相界面的这种多变性，致使两相流的流型不仅是多种多样的，而且其变化带有随机性。两相流中存在这种多变的相界面也正是两相流区别于单相流的一个主要特征之一。

两相流的流型不仅与各相介质的特性有关，而且还与介质的压力、流量、质量流速和流道的几何形状、壁面特性以及管道的安装方式有关。

下面分别介绍常见的气液两相流、气固两相流和液固两相流的流型，气液两相流流型的理论预测以及测量方法。