

气液两相流型 智能识别理论及方法

周云龙 孙斌 陈飞/著



科学出版社
www.sciencep.com

气液两相流型智能识别 理论及方法

周云龙 孙 斌 陈 飞 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

作者在多年从事气液两相流型识别的理论和试验研究工作中,做出了具有创造性的成果,取得了较满意的结果,本书为其成果的总结。

全书共分 13 章,首先简要介绍了两相流的定义、分类和特点及其参数检测和研究进展,然后详细地对气液两相流型划分和判别,气液两相流动的压差信号测量,基于小波分析的压差波动信号去噪处理、流型压差信号特征提取,基于混沌理论的流型压差信号特征提取,基于希尔伯特-黄变换的流型压差信号特征提取,气液两相流动的图像信号测量、特征提取,流型的神经网络识别模型,流型的支持向量机模型,神经网络和证据理论融合的识别方法和气液两相流流型在线识别系统方面的内容进行了论述。

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人员和工程设计人员阅读,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

气液两相流型智能识别理论及方法/周云龙,孙斌,陈飞著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019943-0

I. 气… II. ①周… ②孙… ③陈… III. 气体-液体流动-研究

IV. 0359

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 140515 号

责任编辑:何舒民 / 责任校对:赵 燕

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>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 10 月 第 一 版 开本: B5(720×1000)

2007 年 10 月 第一次印刷 印张: 15

印数: 1—2 500

字数: 300 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

前 言

气液两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,在动力、化工、核能、制冷、石油和冶金等行业的许多生产设备,例如,电站的各种沸腾管、各式气液两相混合器、气液分离器以及化工行业的精馏塔等中都涉及气液两相流动工况。在气液两相流研究工作的早期,由于缺乏气液两相流流动和传热传质特性方面的知识,曾经发生过不少工业事故。两相流动介质的相界面分布状况,即流型,极大地影响着气液两相流的流动特性和传热传质特性,同时也影响着流动参数的准确测量以及两相流系统的运行特性,因此气液两相流流型识别的研究不仅具有重要的实用价值和学术意义,也为相关工业生产设备安全、经济的设计与运行提供了有力的技术支持。正因为如此,气液两相流流型识别的研究一直是气液两相流研究领域的一个重要课题。

为此,东北电力大学成立了气液两相流流型识别课题组,并先后承担了吉林省科技发展计划资助项目“石油工业多相混输管道油气水多相流型在线识别系统”(No. 20040513)和“油气水三相流动特性与流量测量”(No. 963407),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“基于多传感器融合技术的气液两相流流型识别方法”(吉教科合字[2006]24),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”(No. 2006034)。到目前为止,在气液两相流型识别方面,课题组共发表学术论文 32 篇,其中国际会议论文 3 篇,中文重要期刊 21 篇,中文核心期刊 8 篇,有 18 篇论文被 EI 收录;申请国家发明专利 5 项,国家实用新型专利 4 项。

结合上述项目,课题组深入开展了流型识别的研究工作,在流型特征提取和分类器模型方面做出了具有创造性的成果。在特征提取方面,针对气液两相流压差波动信号的非线性和非平稳特征,利用混沌理论对信号进行了特征参数的计算和分析,发现两相流的波动信号具有混沌特征,利用小波分析和经验模式分解技术提取了流型的小波包能量、信息熵和经验模式分解的能量特征,同时针对气液两相流型图像的纹理和形状特征,利用图像处理技术提取流型图像的灰度直方图统计特征、不变矩特征、灰度共生矩特征、小波能量、小波范数和小波包信息熵特征,利用这些特征都取得了较满意的识别结果。在分类器模型方面,针对传统 BP 网络的缺点,将 Elman 神经网络、RBF 神经网络、概率神经网络、Kohonen 神经网络、遗传神经网络和支持向量机分类器模型引入到流型识别中,并进行了比较分析,在此基础上利用证据理论进行了融合识别方法研究,有效地提高了流型的识别率。

本书力求理论与实际密切结合,对于流型的压差波动信号,从非线性理论的研究热点如混沌与分形、小波变换、Hilbert 变换等,来研究不同流型的非线性特征;对于流型的图像信号,从流型图像的纹理和形状等方面,来提取不同流型的图像特征;从统计模式识别的新方法如神经网络和支持向量机等来研究分类器模型。此外还完成了在线识别系统的开发,这对指导两相流相关工业设备的设计及优化运行具有实际意义。

可以说课题组在气液两相流型识别理论和试验研究方面做出了具有创新性的工作,取得了较丰硕的成果。本书就是这些成果的总结,是作者所领导的课题组的各位同仁和研究生梁强、蒋诚、陆军、程旭丽、王强等集体劳动的成果,在此向他们表示感谢!

本书具体分工为:前言、第3章、第7章、第8章、第10章、第11章、第12章、第13章由周云龙教授撰写,第4章、第5章和第6章由孙斌副教授撰写,第1章、第2章和第9章由陈飞硕士撰写,全书由周云龙教授统稿。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

周云龙 教授

孙斌 副教授

陈飞 硕士

2007年5月
于东北电力大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 两相流的定义和分类	1
1.1.1 两相流的定义	1
1.1.2 两相流的分类	1
1.2 两相流的特点	2
1.3 两相流参数检测	3
1.3.1 两相流主要检测参数	3
1.3.2 两相流参数的分类	7
1.3.3 两相流参数检测研究的重要意义	7
1.3.4 两相流参数检测技术的发展现状与趋势	8
1.4 气液两相流流型识别的研究	8
1.4.1 流型研究的工程背景及意义	9
1.4.2 国内外气液两相流流型研究的发展和现状	9
1.4.3 流型智能识别存在的问题	12
参考文献	13
第 2 章 气液两相流型的划分和判别	16
2.1 常见流型的划分方法	16
2.2 水平管道中的气液两相流型划分	18
2.3 水平管道中气液两相流型判别	20
2.3.1 基于流型图的流型判别	20
2.3.2 流型转换准则	24
2.4 气液两相流型的测量方法	26
2.4.1 目测法	26
2.4.2 高速摄影法	27
2.4.3 射线衰减法	28
2.4.4 接触式探头法	30
2.4.5 过程层析成像法	32
2.4.6 压差波动法	36
2.5 本章小结	37

参考文献	37
第3章 气液两相流型压差波动信号的测量	42
3.1 实验系统及步骤	42
3.2 实验信号与传感器的选择	43
3.2.1 实验信号的选择	43
3.2.2 差压传感器的选取	44
3.3 两相流压差信号的获取	44
3.3.1 取压距离的选取	44
3.3.2 采样频率的确定	45
3.3.3 样本数据长度的确定	45
3.4 振动对实验装置的影响	46
3.5 实验装置中的噪声分析	46
3.5.1 噪声的来源与分类	46
3.5.2 实验装置中的噪声	47
3.6 实验测得的压差波动信号及分析	47
3.7 本章小结	50
参考文献	50
第4章 基于小波分析的压差波动信号去噪处理	52
4.1 小波基本理论	52
4.1.1 离散二进小波变换	52
4.1.2 基于小波的多分辨分析	53
4.1.3 小波分解和重构的 Mallat 算法	54
4.1.4 小波包分解	55
4.2 压差波动信号中噪声的辨识	56
4.2.1 自相关函数	56
4.2.2 压差波动信号的分解	57
4.2.3 线性相关性研究	57
4.3 小波去噪理论	60
4.3.1 基于小波分解的信号去噪	60
4.3.2 小波去噪中阈值的选取	62
4.3.3 仿真实验	63
4.3.4 实测数据处理	66
4.4 本章小结	70
参考文献	70

第 5 章 基于小波分析的流型压差信号特征提取	72
5.1 压差波动信号的 Wigner 谱分析	72
5.1.1 Wigner 谱原理	72
5.1.2 压差波动信号的 Wigner 谱分析	73
5.2 基于连续小波变换的压差波动信号特征	75
5.2.1 连续小波变换	75
5.2.2 压差波动信号奇异值特征分析	75
5.2.3 压差波动信号奇异值特征提取	78
5.3 奇异性特征提取	79
5.3.1 Lipschitz 指数	79
5.3.2 小波变换与 Lipschitz 指数 α	80
5.3.3 压差波动信号的奇异性分析结果	80
5.4 流型特征提取的小波包方法	81
5.4.1 小波包变换	81
5.4.2 小波包能量和信息熵提取	81
5.5 本章小结	83
参考文献	83
第 6 章 基于混沌理论的流型压差信号特征提取	85
6.1 混沌与分形理论	85
6.1.1 动力系统	86
6.1.2 混沌吸引子	86
6.2 混沌的研究方法	88
6.2.1 分数维	89
6.2.2 Kolmogorov 熵	91
6.3 相空间重构	92
6.4 混沌特征参数的计算方法	94
6.4.1 G-P 算法及其改进	94
6.4.2 嵌入维数和延迟时间的选择	95
6.4.3 数据长度对关联维数计算的影响	98
6.5 混沌研究的辅助方法	99
6.5.1 概率密度函数	99
6.5.2 功率谱分析	99
6.5.3 R/S 分析	100
6.6 压差波动信号的混沌特征分析	101
6.6.1 功率谱分析	101

6.6.2	吸引子对各流型的表征	102
6.6.3	压差波动信号的关联维数和 Kolmogorov 熵分析	105
6.6.4	压差波动信号的 Hurst 指数分析	107
6.7	流型特征向量的构造	109
6.8	本章小结	110
	参考文献	111
第 7 章	基于 Hilbert-Huang 变换的流型特征提取	114
7.1	Hilbert-Huang 变换方法的原理	114
7.1.1	特征尺度参数	115
7.1.2	瞬时频率	115
7.1.3	固有模态函数	116
7.1.4	经验模态分解方法	117
7.2	基于 HHT 的动态压差信号波动成分	118
7.3	流型压差波动信号的经验模式分解方法	119
7.4	流型的 EMD 能量特征提取	120
7.4.1	EMD 分解的流型压差信号分析	120
7.4.2	EMD 分解的流型压差信号能量特征提取	123
7.5	本章小结	126
	参考文献	127
第 8 章	气液两相流动的图像信号测量	129
8.1	实验系统及实验步骤	129
8.2	图像采集系统的选取	130
8.2.1	高速摄影系统的选取	130
8.2.2	照明系统的选取	131
8.2.3	图像拍摄技术的选取	131
8.3	两相流图像信号的获取及分析	132
8.4	流型图像的噪声分析及处理	133
8.4.1	图像噪声的来源	133
8.4.2	图像噪声的消除	133
8.5	本章小结	135
	参考文献	135
第 9 章	气液两相流动的图像信号特征提取	137
9.1	基于灰度直方图的流型图像特征提取	137
9.1.1	流型图像的灰度直方图	137
9.1.2	灰度直方图统计特征参数	137

9.2	基于不变矩的流型图像特征提取	139
9.2.1	仿射不变矩特征提取	139
9.2.2	NMI 特征提取	140
9.3	基于灰度共生矩阵的流型图像特征提取	141
9.3.1	灰度共生矩阵的定义	141
9.3.2	灰度共生矩阵的参数特征	142
9.4	小波变换的流型图像特征提取	143
9.4.1	小波变换多分辨率分析原理	144
9.4.2	图像能量和范数特征提取	145
9.5	基于小波包变换的流型图像特征提取	146
9.5.1	图像的小波包分解	146
9.5.2	图像信息熵特征提取	147
9.5.3	特征矢量的主成分分析	149
9.6	本章小结	150
	参考文献	150
第 10 章 流型的神经网络识别模型		152
10.1	神经网络基本理论	152
10.1.1	神经元模型	152
10.1.2	神经网络的连接形式	154
10.1.3	人工神经网络的学习	155
10.2	BP 神经网络模型	156
10.2.1	BP 网络的结构	156
10.2.2	BP 神经网络的算法	157
10.2.3	BP 模型层数的选择	159
10.2.4	隐层节点数的选择	159
10.2.5	学习速率的选择	161
10.2.6	激励函数的选取	162
10.2.7	普通 BP 算法与快速算法的比较	162
10.3	Elman 神经网络模型	165
10.3.1	Elman 神经网络结构	165
10.3.2	Elman 神经网络学习过程	165
10.3.3	Elman 神经网络识别流型的实例	166
10.4	径向基函数网络模型	169
10.4.1	径向基函数网络结构	169
10.4.2	径向基函数网络学习过程	171

10.4.3	径向基神经网络识别流型的实例	172
10.5	概率神经网络模型	173
10.5.1	概率神经网络结构	173
10.5.2	概率神经网络学习过程	174
10.5.3	概率神经网络识别流型的实例	175
10.6	Kohonen 神经网络的识别模型	178
10.6.1	Kohonen 神经网络结构	178
10.6.2	Kohonen 神经网络学习过程	179
10.6.3	Kohonen 网络识别流型的实例	179
10.7	本章小结	182
	参考文献	182
第 11 章	流型的支持向量机模型	184
11.1	结构风险最小化原则	184
11.2	支持向量机分类理论	185
11.2.1	最优分类超平面	185
11.2.2	支持向量机分类算法	186
11.2.3	支持向量机核函数的选取	187
11.2.4	支持向量机参数选择	188
11.3	多类支持向量机算法	189
11.3.1	“一对多”分类方法	189
11.3.2	“一对一”分类方法	190
11.4	SVM 识别结果分析	190
11.4.1	基于压差波动信号的流型识别	190
11.4.2	基于图像信号的流型识别	191
11.5	支持向量机与神经网络识别模型的比较	193
11.5.1	压差波动信号的识别模型比较	193
11.5.2	图像信号的识别模型比较	193
11.6	本章小结	194
	参考文献	194
第 12 章	神经网络和证据理论融合的识别方法	195
12.1	信度函数	195
12.1.1	概率的解释	195
12.1.2	识别框架	196
12.1.3	基本可信度分配与信度函数	196
12.1.4	似真度函数	197

12.2 Dempster 合成法则	198
12.2.1 两个信度函数的合成	198
12.2.2 多个信度函数的合成	199
12.2.3 证据的折扣	199
12.3 基于证据理论的决策	200
12.3.1 基于信度函数的决策	200
12.3.2 基于基本可信度分配的决策	200
12.3.3 基于最小风险的决策	200
12.4 证据理论的优缺点	201
12.5 证据理论和神经网络融合的识别方法	202
12.6 实验结果分析	204
12.7 本章小结	206
参考文献	206
第 13 章 气液两相流流型在线识别系统	208
13.1 在线识别系统结构	208
13.2 硬件介绍	209
13.2.1 信号测量子系统	209
13.2.2 数据采集子系统	209
13.3 软件介绍	210
13.3.1 软件结构	210
13.3.2 软件功能实现	211
13.3.3 主要模块的设计及相关功能说明	212
13.4 实验结果验证	223
13.5 本章小结	224
参考文献	224

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、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日益重要,因此多相流研究成为国内外极为关注的前沿学科。在多相流动体系中又以两相流动体系最为普遍,而在两相流技术的应用中又以气液两相流的应用为主。

1.1 两相流的定义和分类

1.1.1 两相流的定义

谈到两相流的定义,首先要涉及相的定义。所谓相,就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,各相之间具有明显可分的界面。

从宏观观点出发,可以把自然界的物质分为三种相,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^[1]。

1.1.2 两相流的分类

工业中常见的两相流有气液两相流、气固两相流、液固两相流和液液两相流^[2]。

1. 气液两相流

石油工业中的油气混输、原子能发电站中各种沸腾管、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、蒸发器等,都普遍地存在气液两相流体的流动和传热现象。

2. 气固两相流

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以及煤的沸腾燃烧和石油的催化裂化都是气固两相流的例子。

3. 液固两相流

煤炭工业和冶金工业中煤的水力输送、矿石和矿料的水力输送以及火力发电站锅炉的水力除渣管道中流动的水渣混合物也都属于液固两相流的实例。

4. 液液两相流

处于开采中后期的陆上油田在含水剧增后的油水混输、化工中的乳浊液的流动以及萃取所需物质的过程都是液液两相流的实例。

在两相流研究中,也可以把物质分为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、液滴或两者都有;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颗粒,或其中两种、三种并存。这样定义的两相流动不仅包括了多相流动力学中所研究的流动,而且大大简化了数学模型,有利于两相流参数的计算。

1.2 两相流的特点^[3]

两相流动是一种很复杂的运动,这种复杂性表现在气液两相具有可变形的界面以及相分布状况的不均匀,同时气体的可压缩性也加大了两相流流动的复杂性,因此其物理特性和数学描述要比单相流复杂得多,其具有以下特点。

1. 流型复杂多变

在单相流中,流型划分为层流和湍流;在两相流中受各相物理性质、流速、管径、管道倾角等因素的影响流型可划分为气泡流、柱塞流、波状流、弹状流、分层流等。甚至在同一根管道中同时存在几种流型,因此对两相流的分析要比单相流复杂得多。

2. 存在相间相互作用

单相流不存在相间相互作用,但在两相流中不仅有两相间的相互作用,而且对于不连续的相来说,各相内部也存在相互作用,这些都是两相流中面临的新问题。

3. 数学描述难度大

单相流中只有体积力,数学描述较易。在两相流中,相间摩擦、传热、传质、化学反应等都发生在微元表面上,相互作用加强。因此,描述多相流的守恒方程、本构方程、边界条件不仅数量多、形式复杂,而且方程组的非线性程度和耦合程度大大增

加,这给多相流的数学描述提出了新的问题和要求。

1.3 两相流参数检测

1.3.1 两相流主要检测参数^[1,3]

对气液两相流进行描述,除了要引用单相管流的流动参数外,还要引用一些气液两相流所特有的参数以便能对气液两相流的流动规律进行讨论。

1. 流型

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. 流量

1) 质量流量

单位时间内流过管路横截面的流体质量称为质量流量。对于气液两相流管路中有

$$G = G_l + G_g \quad (1.1)$$

式中: G ——气液两相混合物的质量流量;

G_l ——液相的质量流量;

G_g ——气相的质量流量。

2) 体积流量

单位时间内流过管道横截面的流体体积称为体积流量。对于气液两相流管路中有

$$Q = Q_l + Q_g \quad (1.2)$$

式中: Q ——两相混合物的体积流量;

Q_l ——液相的体积流量;

Q_g ——气相的体积流量。

3. 速度

1) 气相和液相的平均速度

在管道中,气液相的流通面积分别为 A_g 和 A_l ,则气相和液相的平均速度分别为

$$w_g = \frac{Q_g}{A_g} \quad (1.3)$$

$$w_l = \frac{Q_l}{A_l} \quad (1.4)$$

式中: w_g ——气相的平均速度;

w_l ——液相的平均速度。

上述速度实际上是气液相在各自所占流通面积上的局部速度的平均值,常称为气液相的实际速度。

2) 气相和液相的折算(表观)速度

所谓折算速度就是假定管道全部流通面积只被两相混合物中的任一相占据时的速度,即

$$w_{sg} = \frac{Q_g}{A} \quad (1.5)$$

$$w_{sl} = \frac{Q_l}{A} \quad (1.6)$$

式中: A ——管道流通面积, $A = A_l + A_g$;

w_{sg} ——气相的折算(表观)速度;

w_{sl} ——液相的折算(表观)速度。

3) 气液相的混合速度

气液相的混合速度表示气液两相混合物总体积流量与管道流通面积之比,即

$$w = \frac{Q_l + Q_g}{A} = w_{sl} + w_{sg} \quad (1.7)$$

4. 滑差和滑动比

一般情况下,在管道中气液相速度是不等的,两者的差值称为滑差或滑脱速度 Δw ,即

$$\Delta w = w_g - w_l \quad (1.8)$$

气相速度与液相速度的比值称为滑动比 s ,即

$$s = \frac{w_g}{w_l} \quad (1.9)$$

5. 含气率和含液率

1) 质量含气率和质量含液率

质量含气率 x 表示流过管道流通面积上的气相质量流量 G_g 与气液混合物总质量 G 之比,即

$$x = \frac{G_g}{G} = \frac{G_g}{G_g + G_l} \quad (1.10)$$

类似地,质量含液率 $1-x$ 为

$$1 - x = \frac{G_l}{G} = \frac{G_l}{G_l + G_g} \quad (1.11)$$

2) 体积含气率和体积含液率

体积含气率 β 表示流过管道流通面积上的气相体积流量 Q_g 与气液混合物总体积流量 Q 之比, 即

$$\beta = \frac{Q_g}{Q} = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} \quad (1.12)$$

类似地, 体积含液率为 $1 - \beta$, 常用 R_l 表示, 即

$$R_l = 1 - \beta = \frac{Q_l}{Q} = \frac{Q_l}{Q_l + Q_g} \quad (1.13)$$

3) 截面含气率和截面含液率

截面含气率 φ 表示气相流通面积 A_g 与管道总流通面积 A 之比, 即

$$\varphi = \frac{A_g}{A} = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (1.14)$$

类似地, 截面含液率(又称为持液率)为 $1 - \varphi$, 常用 H_l 表示, 即

$$H_l = 1 - \varphi = \frac{A_l}{A} = \frac{A_l}{A_g + A_l} \quad (1.15)$$

4) 三种含气率之间的关系

为了更清楚地理解上述三种含气率的意义, 现对它们的联系和区别加以讨论。由于 $Q_g = A w_{sg}$, $Q_l = A w_{sl}$, $G_g = A w_{sg} \rho_g$, $G_l = A w_{sl} \rho_l$, 分别代入式(1.10)和式(1.12), 得

$$x = \frac{w_{sg} \rho_g}{w_{sg} \rho_g + w_{sl} \rho_l}, \quad \beta = \frac{w_{sg}}{w_{sg} + w_{sl}} \quad (1.16)$$

联立上两式, 得

$$x = \frac{\frac{\rho_g}{\rho_l}}{\frac{1}{\beta} + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} - 1 \right)} \quad \text{或} \quad \beta = \frac{\frac{\rho_l}{\rho_g}}{\frac{1}{x} + \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right)} \quad (1.17)$$

式(1.17)即为质量含气率和体积含气率之间的关系。已知气液相的密度 ρ_g 、 ρ_l 和体积含气率就可求得质量含气率, 反之亦然。

由式(1.12)和式(1.14), φ 和 β 的表达式可改写为

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_g + Q_l} = \frac{1}{1 + \frac{Q_l}{Q_g}} = \frac{1}{1 + \frac{A_l w_l}{A_g w_g}} \quad (1.18)$$

$$\varphi = \frac{A_g}{A_g + A_l} = \frac{1}{1 + \frac{A_l}{A_g}} \quad (1.19)$$

由式(1.18)和式(1.19)可见, 当气液速度相等, 即 $w_l = w_g$ 时, 截面含气率和体积含气率相等, 即 $\varphi = \beta$; 若 $w_g > w_l$, 则 $\varphi < \beta$; 相反, 若 $w_g < w_l$, 则 $\varphi > \beta$ 。联立