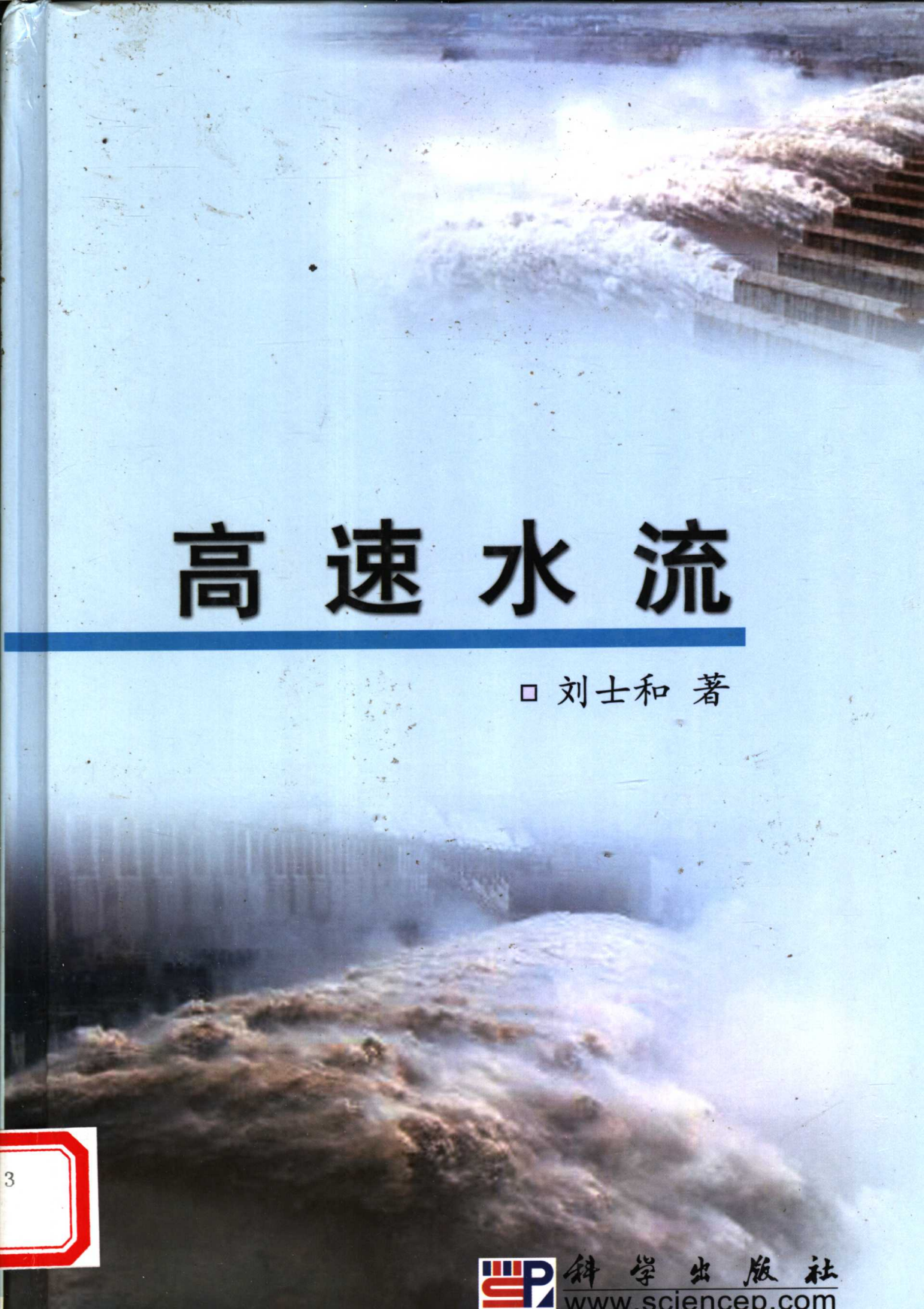




高速水流

□ 刘士和 著

高 速 水 流

刘士和 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书重点阐述高速水流的基本概念、基本特点、主要的水力特性及分析研究问题的基本方法,并对水利水电工程中的高速水流问题,如消能、空化空蚀、雾化、流激振动及急流冲击波与滚波进行了系统介绍,其特点在于力求以紊流理论与多相流理论为基础,较深入地探讨高速水流的紊动结构与掺气特性。

本书可作为水利、土建类有关学科的研究生教材,也可供从事水利水电工程设计、施工和科学研究的工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速水流/刘士和著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015473-8

I. 高… II. 刘… III. 高速度-水动力学 IV. TV131.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 044601 号

责任编辑: 鄂德平 田士勇 于宏丽/责任校对: 鲁 素

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 王 浩

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

*

2005年7月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005年7月第一次印刷 印张: 13 1/4

印数: 1—2 000 字数: 246 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

序

随着我国水利水电建设事业的高速发展，高速水流的研究也就成为我国较为重视的一门学科。早在 20 世纪 60 年代，我国就已全面开展了高速水流的研究，当时将高速水流的特征概括为“两动两气”，即“脉动压力”、“振动”、“掺气”和“气蚀”。为了推动学科的发展，成立了高速水流情报网，在东北勘测设计院水科所的主持下，做了大量的工作。经过几十年的努力，高速水流学科的内容日益深化和完善，基本上可以满足大型水利水电工程建设的需要。可以说，高速水流学科的形成和发展，是我国对世界的一大贡献。

将高速水流的研究内容进行全面总结和系统化是学科发展和工程建设的需要，可惜很长的时间内未有人完成。刘士和教授从事高速水流，特别是高速泄流雾化的研究已十余年，具有较丰富的理论和实践经验。他勇于承担了将高速水流理论系统化的任务，勤奋努力，广泛地搜集材料，深化分析，写出了《高速水流》这本专著。此书具有以下三大特点：一是内容丰富、系统，包括了高速水流各方面的内容；二是由于高速水流是高雷诺数充分发展的紊流，它的水流特征都与紊流结构有紧密关系，因而书中以紊流理论为指导理论；三是概念清晰，实用性强，有利于学习和应用。

我认为这是一本好书，愿意在此推荐给广大读者。

梁在湖

2005 年 2 月

前 言

我国是一个水力资源丰富的国家，在水力资源的开发与利用中，尤其是高水头水工建筑物的设计、施工与科研中经常会遇到高速水流问题。

本书对高速水流进行了系统介绍，共分为八章。第1章至第3章分别介绍高速水流的基本概念、高速水流的紊动及高速水流的掺气，第4章至第8章分别介绍高速水流的消能、空化空蚀、高速水流的雾化、高速水流的流激振动、急流冲击波与滚波。

在撰写本书过程中，除借鉴国内、外已有高速水流的一些研究成果外，还加入了作者的部分研究成果，并试图使本书具有如下特点：①力求清晰、并尽可能严谨地阐明高速水流的基本概念、基本特点、主要的水力特性及分析研究问题的基本方法；②力求以紊流理论与多相流理论为基础，较深入地探讨高速水流的紊动结构与掺气特性，使读者对高速水流的机理有比较深刻的认识；③对水利水电工程中的高速水流问题，如消能、空化空蚀、雾化、流激振动及急流冲击波与滚波尽可能进行系统介绍。

本书可作为水利、土建类相关学科的研究生教材，也可作为与高速水流有关的设计与科研工作者的参考书。限于作者水平和现阶段对高速水流的认识，书中在资料引用上难免挂一漏万，衷心希望读者批评指正。

作 者

2005年1月

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
参考文献	2
第 2 章 高速水流的紊动	4
2.1 概述	4
2.2 高速水流的紊动特征及紊流运动分类	4
2.3 高速水流运动的数学模型	5
2.3.1 高速水流运动基本方程	5
2.3.2 紊流模型	7
2.4 紊流特征量及其计算	15
2.4.1 离散数据的采样	16
2.4.2 紊动特征量的计算	17
2.5 脉动壁压	18
2.5.1 脉动壁压的形成机理	19
2.5.2 高速水流单点脉动壁压统计特性	25
2.5.3 高速水流脉动壁压的空时相关及波数频率谱特性	34
2.5.4 压力传感器形状与尺寸对脉动壁压实测特征值的影响	38
参考文献	41
第 3 章 高速水流的掺气	43
3.1 概述	43
3.1.1 掺气现象及其影响	43
3.1.2 高速水流掺气机理	43
3.2 气泡在流场中的运动形态	47
3.2.1 流场中的气泡运动形态	47
3.2.2 气泡上升终速	47
3.3 高速水流的自然掺气	49
3.3.1 明渠中的掺气水流	49
3.3.2 高速挑射水流的掺气	54
3.4 高速水流的强迫掺气	56
3.4.1 跌落水流的掺气	56
3.4.2 水跃的掺气	58

3.4.3 掺气设施强迫掺气	60
参考文献	60
第4章 高速水流的消能	62
4.1 概述	62
4.2 挑流消能	62
4.2.1 挑流消能原理与适用条件	62
4.2.2 挑流消能工	63
4.2.3 挑流消能水流运动计算	69
4.2.4 挑流冲刷计算与下游防冲措施	78
4.3 底流消能	79
4.3.1 底流消能原理与适用条件	79
4.3.2 底流消能的水力计算	80
4.3.3 底流消能中的辅助消能工与水跃控制	89
4.3.4 底流消能的下游局部冲刷与防冲措施	91
4.4 面流消能	91
4.4.1 面流消能原理与适用条件	91
4.4.2 跌坎面流消能	92
4.4.3 面流消能的下游局部冲刷与防冲措施	96
4.5 宽尾墩出流消能	97
4.5.1 宽尾墩出流消能原理	97
4.5.2 宽尾墩的体型参数	98
4.5.3 宽尾墩与挑流联合消能	99
4.6 其他类型的消能	101
4.6.1 自由跌落消能	101
4.6.2 水股空中碰撞消能	102
4.6.3 孔板消能	104
4.6.4 台阶消能	106
参考文献	109
第5章 空化空蚀	110
5.1 概述	110
5.1.1 有关空化空蚀的概念	110
5.1.2 泄水建筑物空蚀实例	111
5.1.3 空化的分类	111
5.1.4 空化的影响	112
5.2 空泡动力学基础	113
5.2.1 气核形成理论	113
5.2.2 空泡的发育	114
5.2.3 球形空泡的稳定性	117

5.2.4	空泡的溃灭	120
5.3	空蚀破坏程度的度量与空蚀破坏机理	122
5.3.1	空蚀破坏程度的度量	122
5.3.2	空蚀破坏的机理	123
5.3.3	紊流相干结构与空蚀的关系	125
5.3.4	泄水建筑物易受空蚀破坏的部位	125
5.4	空化与空蚀的物理模拟与原型观测	128
5.4.1	空化与空蚀的几个无量纲数	129
5.4.2	空化与空蚀的物理模拟	130
5.4.3	空化与空蚀的原型观测	133
5.5	水工建筑物减免空蚀措施	134
5.5.1	选用合理的过流边壁体型	134
5.5.2	改进施工工艺, 提高过流边壁的平整度	141
5.5.3	选用抗蚀性能较强的材料	145
5.5.4	掺气减蚀	148
	参考文献	156
第 6 章	高速水流的雾化	157
6.1	概述	157
6.2	挑流消能雾化水流	158
6.2.1	挑流消能雾化水流的特征	158
6.2.2	挑流消能雾化水流的流动机理	158
6.2.3	挑流消能雾化水流的数值模拟	159
6.2.4	挑流消能雾化水流的模型试验与原型观测	167
6.3	底流消能雾化水流	169
6.3.1	坝面溢流自然掺气形成的雾源	169
6.3.2	水跃区生成的雾源	170
6.4	雾化水流的危害与防范	171
6.4.1	雾化水流对发电与电器设备的影响	171
6.4.2	雾化水流对航运的影响	171
6.4.3	雾化水流对两岸边坡稳定和交通的影响	172
6.4.4	雾化水流对附近居民生活的影响	172
	参考文献	172
第 7 章	高速水流的流激振动	174
7.1	概述	174
7.2	流激振动的物理模拟	174
7.3	流激振动的数值模拟	176
7.4	水工结构的流激振动	179
7.4.1	导墙振动	180

7.4.2 坝体振动	181
7.4.3 溢流厂房与泄水陡槽的振动	181
7.4.4 闸门的振动	181
参考文献	181
第8章 急流冲击波与滚波	183
8.1 概述	183
8.2 急流冲击波的形成及数学描述	183
8.2.1 急流冲击波的形成	183
8.2.2 小波高急流冲击波的计算	184
8.2.3 大波高急流冲击波的计算	186
8.2.4 冲击波的反射与干扰	187
8.3 急流收缩段冲击波计算	188
8.3.1 急流收缩段的合理曲线	188
8.3.2 直线收缩段冲击波的计算	188
8.3.3 窄缝消能工收缩段冲击波的计算	189
8.4 急流扩散段冲击波计算	190
8.4.1 平底明渠扩散段	190
8.4.2 陡坡明渠扩散段	193
8.4.3 反弧(凹)曲面上的急流扩散	193
8.5 急流弯道段冲击波计算	194
8.5.1 弯道上急流冲击波形态	194
8.5.2 较大半径情况下急流冲击波计算	194
8.5.3 较小半径情况下急流冲击波计算	196
8.5.4 弯道上急流冲击波的控制	196
8.6 滚波的形成条件及特征	198
8.6.1 滚波形成的条件	198
8.6.2 滚波的特征	200
参考文献	201

第1章 概 述

水流可处于层流与紊流两种运动状态,层流中流体质点沿其轨迹层次分明地向前运动,其轨迹是一些平滑的随时间变化较慢的曲线;紊流中流体质点的轨迹杂乱无章,相互交错,且变化迅速。层流与紊流之间的本质区别在于:①紊流运动是由大小不等的涡体所组成的无规则的随机运动,其物理量(如流速、压强及温度等)存在脉动,即对时间和空间而言的不规则变化;②紊流的输运能力(用紊动黏性系数来表示)要比分子的输运能力大几个数量级;③紊流常在高雷诺数下发生,可将其视为层流的非稳定性发展,且紊流中通过小涡体的掺混运动造成很大的能量耗损。如果水流运动的速度不高,即使水流处于紊流运动状态,用常规的水力学方法或工程流体力学方法即可对其统计特性进行描述。但如水流运动速度足够高,以至于水流紊动强烈和剧烈掺气,并可能导致空蚀破坏、结构振动、局部区域雾流强降雨、急流冲击波及滚波等现象的单独或综合出现,此时的水流称为高速水流。与处于中、低速运动的水流相比,高速水流在流动特性上有新的变化,主要反映在:

(1) 高速水流通常为复杂边界条件下的多相体系紊流。如掺气水流为水-气两相流;雾化水流的雾流扩散段为气-水两相流等。

(2) 高速水流与过流边界之间的相互作用更加突出。如流激振动中存在水流与固体边界的流固耦合;渠道中边墙的偏转可导致急流冲击波的形成;雾化水流中的雾流降雨在很大程度上依赖于下游地形等。此外,由高速水流形成的空蚀破坏甚至还将导致水流边界的改变。

(3) 高速水流中惯性力的作用更加突出。由于高速水流具有如上特点,如在设计或施工中不加以注意,其有可能导致结构物或水力机械工作条件的恶化,甚至破坏。研究高速水流的目的正在于防范其可能导致的危害。

虽然明渠中一般当水流流速达到 $6\sim 7\text{m/s}$ 时其自由表面即出现掺气现象,但习惯上常将流速达到 $15\sim 20\text{m/s}$ 以上的水流称为高速水流^[1]。高速水流存在如下的特殊水力学问题:

1) 高速水流的紊动与流激振动

研究高速水流紊动的基础仍然是紊流理论。高速水流中存在着多种尺度的运动,由文献[2]~[5]可知,在三维紊流中其含能涡与耗散涡的尺度之比近似与雷诺数的 $9/4$ 次方成正比。由于高速水流的雷诺数很大,其内各种紊动尺度共存,水流紊动强烈,并有可能导致处于其中或构成其边界的结构物的振动甚至破坏。因此,应研究高速水流的紊动特征,尤其是要弄清高速水流作用于其过流边界上的脉动荷载。

2) 高速水流的掺气

高速水流内高强度紊动的存在是导致其内维持一定含气浓度的必要与充分条件。高速水流掺气后,水体的连续性被破坏,其原有的水力特性也相应改变。因此,应弄清高速水流的掺气条件及水流掺气后水力要素的计算,以此来判别水流掺气后对结构可能造成的影响。

3) 高速水流的消能

高水头泄水建筑物上的高速水流具有巨大的动能,如何将其进行有效的转化,使上、下游水流以适当的形式相衔接是水利水电工程中的重要问题之一。因此,应研究适合具体工程特点的消能形式。

4) 空化空蚀

高速水流通过泄水建筑物某些部位时,固壁常出现剥蚀甚至破坏现象。因此,应研究高速水流空化与空蚀破坏的机理以及采用何种措施来防止或减轻空蚀的破坏作用。

5) 高速水流的雾化

高速水流的雾化对水利水电工程的安全运行具有潜在威胁,并有可能导致山体滑坡、中断交通及闪络跳闸等事故的发生。因此,应研究雾化水流的特性,采用适当的措施防范其危害。

6) 急流冲击波与滚波

急流冲击波是渠槽中因侧墙几何条件的变化而在水面形成的一种波。在一定条件下,即使侧墙几何形状与尺寸不变,在槽宽水浅的陡槽中也可产生波,称为滚波。急流冲击波与滚波的出现改变了水流原有的运动特征,增加了下游消能的困难。因此,应研究急流冲击波与滚波的形成条件以及急流冲击波与滚波的计算方法。

研究高速水流可采用以下四种方法^[6~8],即理论分析、试验研究、数值计算、原型观测。影响高速水流的因素很多,单纯的理论分析只能把握其主要影响因素。试验研究与原型观测目前乃至今后相当一段时间仍然是高速水流研究的主要方法,但模型试验费时费工,且从技术上来看也有可能存在缩尺效应,而原型观测亦受场地及泄流条件等的限制较大。数值计算在高速水流中的应用已有不少成果,但仍有待于进一步深入、系统与完善。

参 考 文 献

- 1 杨振怀等. 中国水利百科全书. 北京:水利电力出版社, 1991
- 2 Reynolds W C. Whither Turbulence. Cornell University, 1989
- 3 梁在潮. 紊流力学. 郑州:河南科技出版社, 1988
- 4 梁在潮, 刘士和等. 多相流与紊流相干结构. 武汉:华中理工大学出版社, 1994
- 5 梁在潮. 工程湍流. 武汉:华中理工大学出版社, 2000
- 6 李建中, 宁利中. 高速水力学. 西安:西北工业大学出版社, 1994

- 7 成都科学技术大学水力学教研室. 水力学. 北京:人民教育出版社, 1980
- 8 夏毓常, 张黎明. 水工水力学原型观测与模型试验. 北京:中国电力出版社, 1999

第2章 高速水流的紊动

2.1 概 述

紊流是自然界和工程技术中广泛存在的一种流体运动现象^[1,2], 水利工程中的高速水流因速度高, 尺度大, 其流态不仅是紊流, 而且一般是水-气两相流紊流。然因实际工程问题十分复杂, 而目前对两相流紊流的研究又不十分深入, 所以在研究高速水流的紊动特征时多数情况将其简化为单相紊流来处理。

2.2 高速水流的紊动特征及紊流运动分类

高速水流的紊动既具有一般紊流运动的特征, 如随机性、大雷诺数, 同时在能量耗损与扩散性等方面也有其自身的特点, 具体反映在如下几个方面:

1) 能量耗损

水流运动必然要消耗能量。对高速水流, 其能量耗损是由其内的小尺度涡体通过黏性作用而造成的。目前, 流体力学中有关流动控制问题的研究正方兴未艾, 在高速水流中也有类似的水流能量耗损控制问题, 如水工建筑物的消能问题等。

2) 动水荷载

泄水建筑物泄流时, 作用于其边壁上的动水荷载是导致建筑物振动的激振力, 这种动水荷载实际上是边壁上的脉动压强与脉动切应力沿过流面综合作用的结果。目前对壁面脉动切应力的研究尚不多见, 而对壁面脉动压强则研究甚多, 这一方面是因测试手段所限, 另一方面也是从工程实际考虑。例如, 如果忽略泄流面曲率的影响, 则脉动压强就成为动水荷载的主要组成部分。我国水利界一般将作用于建筑物表面的脉动压强称为脉动压力, 本文则将其称为脉动壁压。

在水利工程中, 脉动壁压的研究甚为重要。如果泄水建筑物上的水流为高速水流, 动水荷载将大大增加, 由此提高了对建筑物强度方面的要求, 尤其是当动水荷载的主频率与建筑物的自振频率相近时, 还有可能引起建筑物特别是轻型建筑物的共振。在分离水流内部, 由于脉动压强的作用可能形成瞬态空化水流, 有时虽然某些部位的时均压强不是很低, 然因水流内部脉动压强的作用导致瞬时压强大大降低, 由此增加了空蚀的可能性。此外, 在研究岩石冲刷机理时, 也常常会研究脉动压强对岩块的作用及沿岩石节理的传播。

3) 两相紊流

高速水流或多或少地挟带有气泡, 基本上属水-气两相紊流。高速水流中之所

以能携带气泡,主要是水流的紊动扩散作用将气泡从浓度高的地方向浓度低的地方输送,以此抑制气泡的上浮作用,从而形成水-气两相紊流。因此,高速水流中的掺气浓度分布在很大程度上决定于水流的紊动强度及紊动扩散系数的分布。

从水流紊动特征的空间变化出发,可将紊流分为均匀紊流与非均匀紊流,非均匀紊流又可细分为自由切变紊流及边壁切变紊流。均匀紊流要求所有紊动特征量不随空间位置而变,也即任何紊动特征量的平均值及其空间导数在坐标作任何平移变换时不变。实际工程中的高速水流大都具有十分复杂的几何边界,因此高速水流很难出现均匀紊流。

自由切变紊流指的是固体边壁对紊动特性不发生直接影响的紊流,如射流、尾流及混合层等。在高速水流中,从溢流坝挑射出的水流可视为掺气散裂射流,其介绍见第3.3节。高速水流中因一般存在水-气交界面,因此也涉及混合层问题。此外,如闸墩下游足够长,闸墩下游的绕流也属于尾流问题。迄今为止有关高速水流中的混合层及尾流问题研究成果甚少。

边壁切变紊流指的是固体边壁对紊动特性有直接影响的紊流,包括流体绕固体边界的流动及流体在固体边界之间的流动两种,前者称为外流,如绕平板的流动,其特点是紊流存在的区域沿物体向下游方向增加;后者称为内流,如明渠流、管流,其特点是紊流存在的区域限制在固体边界内。水利水电工程中的高速水流大多属于明渠流,如溢流坝面上的流动、泄洪槽内的水流运动均属明渠流。

2.3 高速水流运动的数学模型

2.3.1 高速水流运动基本方程

高速水流的运动速度虽然相对较高,其仍是流体的宏观运动,水流仍可视作连续介质,如其含气浓度不高,将其视为不可压缩流体,则运动控制方程仍为Navier-Stokes方程,引入雷诺假设,可得其时均运动的控制方程为

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) \quad (2.3.1a)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3.1b)$$

而脉动运动的控制方程则为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) \quad (2.3.2a)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.3.2b)$$

式中 $\bar{u}_i$ 与 u_i 分别表示时均流速与脉动流速, $\bar{p}$ 与 p 分别表示时均压强与脉动压强。

时均运动的能量方程为

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\bar{u}_i^2}{2} \right) &+ \bar{u}_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{\bar{u}_i^2}{2} \right) = \overline{g_i u_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\overline{u_i u_j u_i} \right) + \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \\
 (1) \quad & \quad (2) \quad (3) \quad (4) \quad (5) \\
 &+ \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \bar{u}_i \right] \\
 & \quad (6) \\
 &- \nu \left[\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] \quad (2.3.3) \\
 & \quad (7)
 \end{aligned}$$

式中各项意义如下:

- (1) 项: 单位时间单位质量水体时均运动动能的当地变化;
- (2) 项: 单位时间单位质量水体时均运动总动水压强所做的功;
- (3) 项: 单位时间单位质量水体时均运动质量力所做的功;
- (4) 项: 单位时间单位质量水体时均运动紊动切应力所做的功;
- (5) 项: 单位时间单位质量水体时均运动紊动切应力所做的变形功;
- (6) 项: 单位时间单位质量水体时均运动黏性切应力所做的功;
- (7) 项: 单位时间单位质量水体时均运动能量耗损率。

如以 $k = \frac{u_i u_i}{2}$ 表示脉动运动的能量, 则得其控制方程为

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= - \overline{u_j \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{p}{\rho} + k \right)} - \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \\
 (1) \quad & \quad (2) \quad (3) \\
 &+ \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) u_i \right] - \nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.3.4) \\
 & \quad (4) \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中各项意义如下:

- (1) 项: 单位时间单位质量水体脉动运动动能的变化;
- (2) 项: 单位时间单位质量水体脉动运动总动水压强所做的功;
- (3) 项: 单位时间单位质量水体脉动运动紊动切应力所做的变形功;
- (4) 项: 单位时间单位质量水体脉动运动黏性切应力所做的功;
- (5) 项: 单位时间单位质量水体脉动运动能量耗损率。

比较平均运动和脉动运动的能量方程可知, 两方程中都有紊动切应力所做的变形功项, 但两者之间相差一符号, 也即如变形功为正, 则通过该项从平均运动中抽取能量传递至脉动运动; 反之, 如变形功为负, 则通过该项从脉动运动中抽取能量传递至平均运动, 所以变形功项只起能量传递作用而不消耗能量。

2.3.2 紊流模型

紊流运动是一种非常复杂的随机运动,由于对其分布函数还缺乏认识,目前要想对其进行精确描述不大可能。作为近似,人们转而寻求其低阶统计量的表达式。然因 N-S 方程的非线性性,有关紊流任一阶统计量的控制方程中总包含有比其更高一阶的统计量存在,也即低阶统计量的控制方程是不封闭的。为使低阶统计量的控制方程封闭,人们不得不采用各种假定,并进行相应的处理,以构成各种紊流模式,来逼近紊流运动统计量的真实行为。目前用得较多的有雷诺应力模式(RSM)、代数应力模式(ASM)、 $K-\epsilon$ 两方程模式和紊流半经验理论。此外,在紊流的直接数值模拟(DNS)和大涡模拟(LES)方面人们也做了不少工作,但因目前将 DNS 和 LES 运用到高速水流运动的模拟方面还存在一定的困难,本文对此两种模式不予介绍。从以下的介绍中我们将会看到,从复杂的雷诺应力输运模式(RSM)到相对比较简单的 $K-\epsilon$ 模型是相互联系的,低阶模型是高阶模型在一定条件下的简化形式^[1~3]。

1. 雷诺应力输运模式(RSM)

紊流场中某一点的雷诺应力并不完全取决于该点上的流动状态(时均速度场的当地变形率),还应与周围的流动状态及过去的流动状态有关,尤其是与上游的历史条件有关,也即具有记忆效应或松弛效应,这是 $K-\epsilon$ 模式不能很好反映的。周培源先生早在 1945 年就对雷诺应力模式进行过研究,以后人们陆续将其深化。1975 年 Launder, Reece 和 Rodi 提出了具有很大影响的 LRR 模式,下面对其进行介绍。

由脉动运动的控制方程式(2.3.2)出发可得雷诺应力项的控制方程为

$$\frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial t} + \overline{u_k} \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_k} = G_{ij} + \Phi_{ij} + D_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (2.3.5)$$

式(2.3.5)右边第一项表示雷诺应力的产生项,第二项为压力应变项,第三项为扩散项,第四项则为耗散项,以上各项的表达式及其模拟如下。

1) 产生项

$$G_{ij} = - \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_k} \right) \quad (2.3.6)$$

在雷诺应力模式中产生项不需模拟。

2) 压力应变项

压力应变项的表达式为

$$\Phi_{ij} = \frac{p}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (2.3.7)$$

压力应变项的模拟思路为先求出脉动压强 p , 再研究压力应变项的重要影响

因素,并对其进行相应模化。

对脉动运动的控制方程式(2.3.2)两端取散度运算,即可得到脉动压强的控制方程,其通解为

$$\frac{p}{\rho} = \frac{1}{4\pi} \int_{\tau} \left[-\frac{\partial^2}{\partial x_l \partial x_m} (u_l u_m - \overline{u_l u_m}) - 2 \frac{\partial \overline{u_m}}{\partial x_l} \frac{\partial u_l}{\partial x_m} \right] \frac{d\tau}{r} \quad (2.3.8)$$

根据式(2.3.7)中压力应变项的定义,得到

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij1} + \Phi_{ij2} + \Phi_{ij1w} + \Phi_{ij2w} \quad (2.3.9)$$

式(2.3.9)中 Φ_{ij1} 相应于式(2.3.8)中右边第一项,所表示的是紊流脉动流速场对压力应变项的贡献; Φ_{ij2} 含有时均速度梯度,所表示的是时均流场与紊流脉动场相互作用对压力应变项的贡献;在受限流动中,存在边界影响,其反映在 Φ_{ij1w} 与 Φ_{ij2w} 中。

Rotta(1951)基于线性回归各向同性假设提出

$$\Phi_{ij1} = -C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \quad (2.3.10)$$

并建议取 C_1 为 1~5。目前人们常取 C_1 为 1.5~3.0。此外,如为简化起见,在 Φ_{ij} 的表达式中约去 Φ_{ij2} ,则 C_1 的取值应大于 3.0。

基于 Φ_{ij1} 的模拟思想,Naot 等(1970)建议取 Φ_{ij2} 为

$$\Phi_{ij2} = -C_2 \frac{\varepsilon}{k} \left(G_{ij} - \frac{2}{3} G_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (2.3.11)$$

以上模型也称为 IPM 模型,其中 C_2 取为常数,其值不大于 2。

利用以上模拟式进行计算,在数值模拟成果与实验成果吻合较好的条件下,人们观察到 C_1 与 C_2 的取值存在如下关系

$$0.23C_1 + C_2 = 1 \quad (2.3.12a)$$

Launder 建议采用 Younis(1984)所取的一组常数进行模拟,其值为

$$C_1 = 3.0 \quad C_2 = 0.3 \quad (2.3.12b)$$

计算经验表明,随着所研究流动各向异性性的增强,所选用的 C_1 值应适当增加,而 C_2 值则需相应减小。

以上介绍的是自由切变紊流中压力应变项的模拟,如果流动中存在固壁或自由表面,则边界对脉动压强会产生影响,并由此对雷诺应力产生如下影响:① 紊动强度在三个方向上重新分配,具体来讲垂直于壁面方向的紊动强度减小,沿主流方向的紊动强度增加,而在横向上紊动强度则几乎不变;② 无量纲雷诺应力有所下降。在此情况下,需对固壁对压力应变项的影响进行修正。目前,人们采用的修正方法为:类似自由切变紊流中压力应变项的模拟方式进行修正,认为边壁切变紊流中的压力应变项可视为自由切变紊流中的压力应变项与固壁修正项的线性叠加;固壁的影响与其到固壁的距离有关。

Shir(1973)建议固壁对 Φ_{ij1w} 的修正为