

高速水力学丛书

明渠水气二相流

吴持恭 著



成都科技大学出版社

高速水力学丛书

明渠水气二相流

吴持恭 著

成都科技大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍著名水力学家吴持恭长期研究明渠水气二相流运动的研究成果,也介绍一些国内外研究概况,尤其是不同学派的观点和方法。内容包括绪论、基础知识、掺气水流的一些基本概念、明渠自掺气水流的水深、掺气条件、掺气浓度分布、强迫掺气及掺气对消能的影响等。

本书可供水利水电科技工作者参考,也可供高等院校土建类专业选作研究生教学用书。

高速水力学丛书

明渠水气二相流

吴持恭 著

成都科技大学出版社出版、发行

四川省新华书店经销

成都科技大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 插页2 印张: 3.875

1989年6月第一版 1989年6月第一次印刷

字数: 84千字 印数: 1—1000册

ISBN 7-5616-0313-4/TV·5

定价: 3.10元

序

高水头泄水建筑物中的水流，由于水头高、流速大，在一定条件下，常会掺入大量空气，形成水气二相流。到目前为止，对水气二相流的计算，都是一些经验公式，因其缺乏理论依据，都有一定局限性，远远不能满足实用上的要求。

作者对明渠水气二相流的运动规律曾进行过长期探索研究。自1986年以来又得到国家教委科技基金的资助，使研究取得了较大进展。作者从紊流内部结构出发来研究掺气机理，根据涡体模式进行理论分析，推导出掺气水流水深及掺气条件的理论公式；并根据扩散理论推导出掺气浓度分布的理论公式；提出了一套比较系统的理论体系，为明渠水气二相流开辟了一条理论研究的途径，为高水头泄水建筑物设计提供了计算水气二相流的方法。

本书主要是介绍作者的研究成果，同时也介绍一些国内外的研究概况，尤其是不同学派的观点和方法。主要内容包括：绪论，基础知识，掺气水流的一些基本概念，明渠自掺气水流的水深、掺气条

VAK 15/84

件、掺气浓度分布，强迫掺气及掺气对消能的影响等。

本书可供水利水电科技工作者进行科学研究和工程设计参考，也可供高等院校土建类专业选作研究生教学用书。

著者

1988年10月4日

目 录

绪论	(1)
第一章 基础知识	(4)
1-1 随机过程的基本概念	(4)
1-2 统计特征值	(5)
1-3 扩散方程	(10)
1-4 边界层	(15)
第二章 明渠自掺气水流的一些基本概念	(19)
2-1 水流掺气的成因	(19)
2-2 掺气浓度	(20)
2-3 自掺气水流交界面的位置及其掺气浓度	(23)
第三章 明渠自掺气水流的水深	(26)
3-1 经验公式	(26)
3-2 掺气机理	(30)
3-3 明渠自掺气水流的基本方程式	(33)
3-4 明渠自掺气水流水深的理论公式	(36)
3-5 系数 A、B 的确定	(37)
3-6 计算实例及验证	(40)
第四章 水流开始掺气的条件	(43)
4-1 经验公式	(43)

4-2	根据表面波破碎理论求掺气条件判别式.....	(44)
4-3	根据紊流边界层发展理论求掺气发生点.....	(46)
4-4	根据紊动强度理论推导掺气条件判别式.....	(58)
4-5	验证.....	(60)
第五章	明渠自掺气水流的掺气浓度分布.....	(63)
5-1	斯特劳勃和安德森方法.....	(63)
5-2	肖天铎方法.....	(67)
5-3	莱克西曼·劳方法.....	(68)
5-4	特罗依茨基方法.....	(69)
5-5	作者方法.....	(79)
5-6	作者方法的计算实例和验证.....	(93)
第六章	强迫掺气及掺气对消能的影响.....	(106)
6-1	强迫掺气.....	(106)
6-2	掺气对消能的影响.....	(111)
	参考文献.....	(114)
	附表1	(116)

绪 论

随着水利水电事业的发展，目前世界上修建高坝日益增多。高水头泄水建筑物中的水流，由于水头高、流速大，在一定条件下，常会掺入大量空气，形成水气二相流。

由于掺气过程的不同，水气二相流又可分为自掺气和强迫掺气两种。当水流通过泄水建筑物如溢流坝、陡槽、明流隧洞等流速达到一定程度时，大量空气自水面掺入水流中，以气泡形式随流带走，形成乳白色水气混合物，这种掺气过程称为自掺气，这种水流称为自掺气水流。当高速水流受到某种干扰，如固体边界有突然变化（例如通气槽、闸门槽），或水流表面有突变（例如水跃），或两水流相碰击（例如水舌自由跌落、中墩末端两水流相会合），均将从水面卷入大量空气，这种掺气称为强迫掺气。强迫掺气在离开干扰区一定距离后，气泡就会很快释放掉。

水气二相流的运动规律与不掺气水流不同，它对水工建筑物的影响也不同。例如水流掺气后，体积膨胀，使水深增加，若设计时估计不足，会造成水流漫溢边墙，影响泄洪道的安全运行；尤其是对明流泄洪隧洞，若空间余幅估计不足，可能造成明满流交替，水流不断击拍洞壁，威胁隧洞安全。另一方面，当水流掺气后，由于水气混合物具有可压缩性，可缓冲空蚀的冲击作用，减免空蚀破坏^{[1] [2] [3]}。据彼得卡 (J. A. Peterka) 等试验结果：当水中掺气 1.5~2.5%

时，混凝土试件的空蚀破坏显著减少，而掺气量达 7~8% 时，则空蚀现象基本消失；泄水建筑物中的水流掺气后还可增加消能效果，减轻水流对下游河床冲刷^{[4] [5]}；水流掺气后，流速分布发生了很大变化，气泡悬移区的平均流速大于不掺气水流的平均流速，使自掺气水流的鼻坎挑流的挑距增大^[6]。所以水流掺气对水工建筑物的作用是利也有弊，只要我们认识了这些规律，就可充分利用它的有利一面，主动考虑不利一面，就可设计出既安全又经济的泄水建筑物。此外，泄水建筑物中水流掺气对河流复氧也有明显效果，可改善水环境的质量^[7]，所以明渠水气三相流的研究对解决生产上的问题，有重要的实际意义和经济价值。

对明渠水气三相流最早进行室内试验的是奥地利的依伦伯格 (R. Ehrenbrger) (1926 年)^[8]，最早进行野外观测的是美国的霍尔 (L. S. Hall) (1942 年)^[9]。以后意大利、法国、南斯拉夫、美国、苏联、印度等国学者通过室内试验和野外观测，对明渠水气三相流的掺气发生条件、掺气水流水深、平均掺气浓度等提出了许多不同的计算公式。我国到五十年代后期才开始这方面的研究，并进行了野外观测，取得了不少成果。到目前为止，有关明渠水气三相流的计算公式，都是半经验或纯经验公式，缺乏理论依据，由于各人测验方法不同，试验范围及条件也不一样，这些经验公式都有一定的局限性，计算结果往往相差很大，远远不能满足实用上要求。由于影响水流掺气过程的因素非常复杂，与水流的脉动流速、表面张力、水的运动粘滞系数、水的密度、槽壁糙率及槽底坡度等均有密切关系，所以对掺气水流的研究还不能像非掺气水流一样可通过模型试验来重演原型

水流的现象，这就对解决生产上问题带来很大困难。明渠水气二相流的研究虽有五六十年历史，但进展非常缓慢，关键是在理论上没有取得突破性进展。

作者对明渠水气二相流的运动规律曾进行过长期探索研究，取得了一些成果。本书主要是介绍作者的研究成果，同时也介绍一些国外研究概况，尤其是不同学派的观点和方法，为水利科技工作者进行科学研究和工程设计提供参考。

第一章 基础知识

1-1 随机过程的基本概念

物理现象一般可分为确定性现象和随机性现象。若某一物理现象的变化过程可以精确地用明确的数学关系式来表达的，这种现象称为确定现象。另一类物理现象是不能精确地用明确的数学关系式来表达的，也无法预测任意时刻的精确数值，这种物理现象称为随机性现象。在以后要研究的明渠水气二相流所涉及的流速、压强等都是随机性的。例如瞬时流速在测量条件不变的情况下，在某一定点上进行多次重复测量，每次测量时间相同，记录下许多瞬时流速的过程线，但无论有多少记录曲线，都不可能找到完全相同的两根瞬时流速的过程线，所以它的变化过程是无法用明确的数学关系式来表达的。

表示随机现象的单个时间历程称为样本函数。在有限时段内观测的单个时间历程称为样本记录。随机现象可能发生的全部样本函数的总体称为随机过程。因此，随机现象的一个样本记录可以理解为随机过程的一个物理现实

随机过程看起来好像杂乱无章，实际上仍存在着一定的规律性，通常常用统计方法来描述，如常用均值、方差、相关函数、概率密度函数等统计特征值来描述其特征。

所谓统计方法，就是从大量实测资料中寻求规律性。资

料愈多，统计结果愈可靠。根据随机过程的概念，要了解水槽中某一点上瞬时流速的特性，就要求我们有非常多的同样水槽和同样的水流条件，在这些水槽的相同位置同时进行量测，以求其统计特征值。很显然，进行这样的量测，实际上是不可能的。但是假设瞬时流速这一随机过程是平稳的、各态历经的，那么就可节省大量观测和分析的工作量。

什么叫平稳随机过程和各态历经随机过程呢？

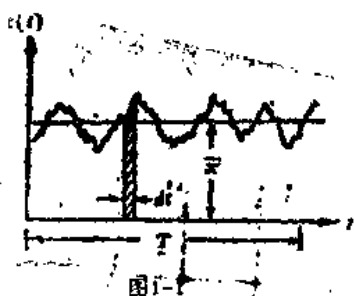
当随机过程的统计特征值与选取的起始时间无关，只要量测条件不变，就不会影响最终结果，这样的随机过程，称为平稳随机过程。例如在水槽中水流的某一定点上测得瞬时流速为一波形图，只要选取时段足够长，不管起始时间从那里算起，其最终的统计特征值不变，这就是平稳随机过程。用一个样本记录就可代替整个随机过程总体的就叫各态历经的随机过程。高速水流的流速、压强等都是各态历经的平稳随机过程，要研究它的总体的统计特征值，只要分析一个历时足够长的样本记录就可以了。许多研究结果已经表明，这种假设与实际情况并没有发生任何矛盾，只是在数学上尚难作出严格的证明，现都把它作为客观事实予以承认。所以研究水流的流速、压强等随机过程的统计特征值时，只要对一个样本记录进行分析就可以了。

1-2 统计特征值

如果一个物理过程是以时间 t 为参数的随机过程，通常可用统计特征值来描述其特征。对各态历经的平稳随机过程来说，只要分析一个样本记录。研究明渠水气二相流时常用

的统计特征值有均值、方差、相关函数及概率密度函数等，现分述如下：

假设图 1-1 为一各态历经的平稳随机过程 $x(t)$ 的一个样本记录。记录历时为 T ，则各特征值可用下列公式表示：



一、均值——均值即随机变量的时间平均值

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

因为随机变量 $x(t)$ 是不能用明确的数学关系式来表示的， $x(t)$ 与 t 的关系只是一个波形图，所以上式无法积分，可用数值计算式表示

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N x(t_i) \Delta t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i) \quad (1-1)$$

式中 Δt 为采样时间间隔； $N = \frac{T}{\Delta t}$ ，称为样本容量。

均值表征随机过程的平均特性。

二、方差——方差就是脉动值的平方的时间平均值

$$D_x = \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \bar{x}]^2 dt$$

它的数值计算式为

$$D_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(t_i) - \bar{x}]^2 \quad (1-2)$$

数据愈接近均值线，方差愈小；反之，方差愈大，所以方差是表征数据的分散程度的。

因为方差的量纲与数据的量纲不一致，实用上常把方差开方得均方根，也叫标准差，用 σ 表示

$$\sigma = \sqrt{D_x} \quad (1-3)$$

标准差表征脉动强度特性。

三、相关函数——两组随机变量之间的相互依赖关系的特性可用互相关函数来表征。如用 $x(t)$ 和 $y(t)$ 表示一对随时间而变的随机变量，则它们的互相关函数定义为

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t) \cdot y(t+\tau) dt$$

式中 T 为记录历时， τ 为滞后时间。

当 $x(t)$ 与 $y(t)$ 为同一组随机变量时，则其相关函数叫自相关函数。自相关函数定义为

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t) \cdot x(t+\tau) dt$$

其数值计算式为

$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x(t) \cdot x(t+\tau) \quad (1-4)$$

式中 $\tau = k\Delta t$ ， $k=0, 1, 2, 3, \dots, M$ ， k 叫滞后数， M 叫

最大滞后数。

四、概率密度函数——一事件发生的概率是指其发生可能性的大小，常用百分数表示。如图 1-2 为某物理量的样本

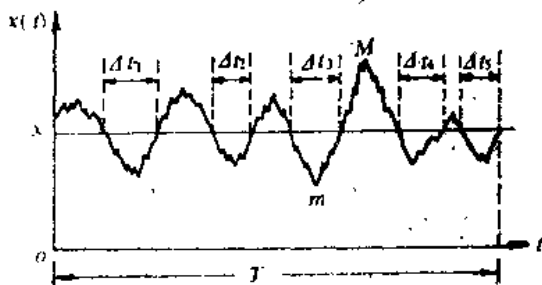


图 1-2

记录 $x(t)$ ，总历时为 T ，则 $x(t) < x_i$ 的历时为 $\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n$ 与总历时 T 的比值称为出现 $x(t) < x_i$ 的概率（当为离散序列时，则为 $x(t) < x_i$ 的数据个数与样本容量的比值），即

$$P(x < x_i) = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \dots + \Delta t_n}{T}$$

如果在时段 T 内， $x(t)$ 的最大值为 M ，最小值为 m ，显然

$$P(x < M) = 1$$

$$P(x < m) = 0$$

概率 $P(x)$ 随 x 而变化的曲线，称为概率分布函数，如

图 1-3 所示。令 $\alpha(t)$ 在 x 与 $x+\Delta x$ 之间的概率为 ΔP ，则

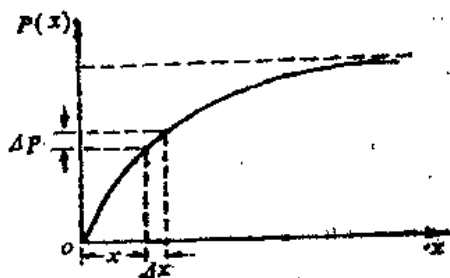


图 1-3

ΔP 与 Δx 之比的极限称为 x 处的概率密度。

$$\varphi(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{dP}{dx}$$

概率密度 $\varphi(x)$ 随 x 而变化的曲线称为概率密度函数，也称为概率密度分布曲线如图 1-4 所示。为了方便起见，有时将纵坐标轴 $\varphi(x)$ 移到概率密度分布曲线的极大值处，此处 $x = \bar{x}$ ，如图 1-5 所示。

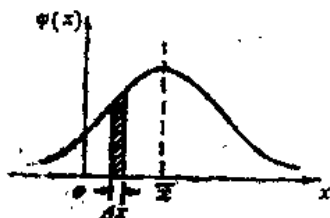


图 1-4

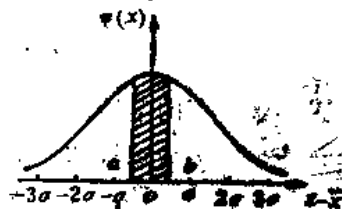


图 1-5

在一般条件下，高速水流的水力要素如流速、压强等的概率密度接近于正态分布，图 1-5 为正态分布曲线。

概率密度正态分布可用下式表示

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (1-5)$$

式中 \bar{x} 为均值， σ 为标准差。

任何正态分布，它的样本落入任意区间 (a, b) 的概率记作 $P(a < x < b)$ ，等于曲线 $\varphi(x)$ 下在 (a, b) 范围内所夹的面积(图中阴影部分)，即为

$$P(a < x < b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_a^b e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx \quad (1-6)$$

对正态分布：

在区间 $(-\sigma, +\sigma)$ 之间的概率为 68.3%

在区间 $(-2\sigma, +2\sigma)$ 之间的概率为 95.4%

在区间 $(-3\sigma, +3\sigma)$ 之间的概率为 99.7%。

1-3 扩散方程

流体中含有的溶质，由于分子运动和质点的紊动，从一定位置输移到另一位置的现象，称为扩散。流体扩散可分为分子扩散和紊动扩散。由于紊动扩散的分析处理可以类比于分子扩散来进行，所以本节对分子扩散与紊动扩散的基本规律一并作一简单介绍。