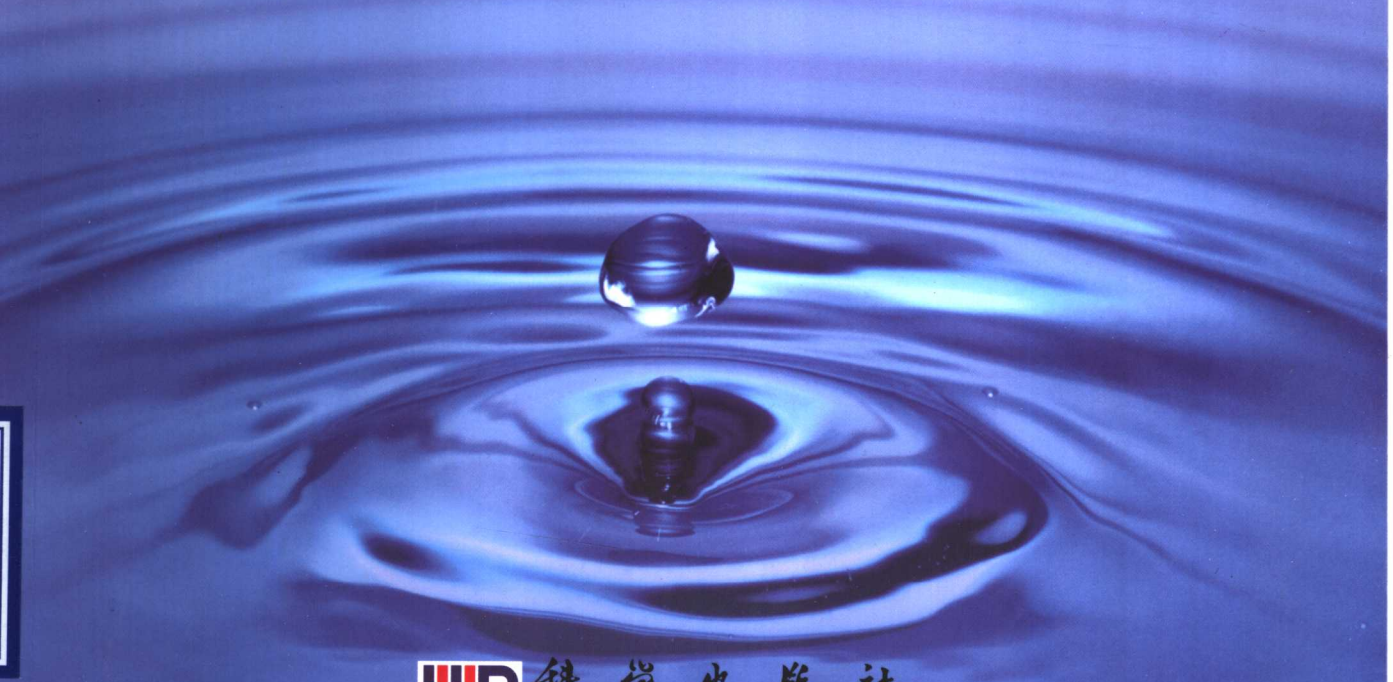




生态水力学

▶ 李大明 编著



科学出版社
www.sciencep.com

生态水力学

李大美 编著

国家自然科学基金资助项目

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了生态水力学的基本原理、流场分析计算数学模型、水域生态学基本常识,以及生态水力学原理在钉螺扩散与控制(血吸虫病流行的控制)研究中的应用实例。

本书可作为理工科院校的研究生教材,也可作为生态水力学领域的研究人员或对该领域感兴趣的读者提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

生态水力学/李大明编著. —北京:科学出版社,2006

ISBN 7-03-015863-6

I. 生… II. 李… III. 生态学:水力学 IV. Q14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 074659 号

责任编辑:李 锋 罗 吉 吴伶伶 王国华/责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年1月第一次印刷 印张:13 3/4

印数:1—2 500 字数:314 000

定价:40.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

序

随着环境问题的出现和发展,许多新兴的交叉学科研究领域如雨后春笋般应运而生。生态水力学正是这样一门新兴的、学科交叉型的边缘学科,主要研究水中生命体的扩散、输移规律及其流场控制技术。人类活动使环境、尤其是水域环境日益恶化,水域生态系统遭到严重破坏,不仅使许多物种陷于濒危,也直接威胁到人类的健康、生存与发展。因此,开展生态水力学研究具有重要意义。

生态水力学系流体力学、生物学、生态学、环境科学与工程科学的交叉学科。李大美教授曾于1988~1991年在瑞士苏黎世联邦理工大学(ETH)留学,在世界著名生态水力学专家 Vischer 教授悉心指导下学习并参加该领域的研究工作,而当时我国在生态水力学领域的研究还是一片空白。作者自1991年从瑞士回国后,在国家自然科学基金的支持下,一直致力于生态水力学领域开拓性的研究工作。经十余年的努力,在生态水力学领域取得了一批有特色的、甚至是突破性的成果,特别是在钉螺的生态水力学特性及其流场控制机理研究方面,已经走在了世界各国同类研究的前列,填补了我国在该领域的空白,受到国内外同行的广泛关注和认同。已先后有美国、德国、英国、法国、瑞士、日本等国家的专家学者前来参观访问,作者也多次应邀前往这些国家访问、讲学。

该书是我迄今见到的第一本《生态水力学》。浏览之余,觉得内容充实,图文并茂。我认为该书对开展生态水力学研究具有重要参考价值。

张蔚榛

2005年5月4日

前 言

生态水力学是近年发展起来的新兴、学科交叉型研究领域,主要研究水中生命体的扩散、输移规律及其流场控制技术。欧美一些国家开展生态水力学领域的研究,大约始于20世纪70年代。他们的成功经验,在我国开展生态水力学研究中起了重要作用。

生态水力学又是一门渗透性很强的边缘学科,旨在研究水域生态系统在人类干扰条件下,其内在变化机理和规律;研究它们对环境改变的敏感性、选择性和适应性,寻求水域生态系统的恢复、重建和保护对策。

我国开展生态水力学研究大约始于20世纪90年代初,可以说是从研究钉螺开始的。在连续三次国家自然科学基金项目的支持下,我们开展了关于钉螺的生态水力学特性及其流场控制技术研究。经过十余年的艰苦努力,取得了一批有特色的研究成果,并获得了一项发明专利。本书正是对这十余年研究成果的总结。全书共分9章:第1~7章介绍生态水力学基本原理;第8、9章是生态水力学的应用实例,主要介绍钉螺的生态水力学特性及其流场控制技术。在项目研究过程中,得到了很多合作者的参与和支持。如武汉大学水力学实验室主任詹才华高级工程师为本项目研究的实验模型设计、研制和长期试验观测做出了重要贡献;王祥三教授为研究三峡工程对下游钉螺分布面积的影响、无螺取水技术的推广应用及其工程设计做了大量工作。此外,刘艾明博士、付小莉博士、金国裕博士为钉螺的生态流场数值模拟及分析计算做了许多工作。与此同时,本项目研究还得到了海内外同行的广泛关注和支持,他们是清华大学的陈永灿教授,国务院三峡建设委员会黄真理副司长,武汉大学的许志方教授、郑邦民教授、槐文信教授,还有瑞士苏黎世联邦理工大学(ETH)的D. Vischer教授、Kinzelbach教授和W. Hagger教授,以及美国国家基金委员会(NSF)的K. Chong教授和衣阿华大学(UIOWA)的Patel教授、Odgaard教授、L. Weber教授等。在此向他们表示衷心的感谢。

作者有关生态水力学的所有试验研究都是在武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室完成的,并由该重点实验室资助本书出版,在此表示深深的谢意。

此外,武汉大学的张蔚榛院士为本书作序,特此向张院士表示诚挚的谢意。

由于作者水平所限,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者提出宝贵的意见和建议。

作 者

2005年5月

目 录

序

前言

第 1 章 导论	1
1.1 生态水力学研究任务与研究方法	1
1.2 与生态水力学有关的基本知识	2
1.3 生态水力学的基本方程	4
1.4 生命体扩散的流场控制理论	7
1.5 生态水力学的发展趋势	7
第 2 章 紊流运动基础	8
2.1 Navier-Stokes 方程对紊流的有效性	8
2.2 雷诺平均运动方程与脉动运动方程.....	10
2.3 紊流能量关系.....	12
2.4 二维均匀紊流的能量方程及能量输运过程.....	15
2.5 紊流输运方程.....	20
2.6 涡量方程.....	22
第 3 章 生态流场基本方程	23
3.1 概述.....	23
3.2 能量方程模型.....	24
3.3 $K-\epsilon$ 两方程模型	26
3.4 雷诺应力方程模型.....	29
3.5 标量通量 $\overline{u_i \gamma}$ 方程模型	33
3.6 雷诺应力和标量通量代数方程模型.....	35
3.7 深度平均计算模型.....	36
3.8 双尺度二阶紊流模型.....	39
3.9 紊流场时间效应和边界效应.....	40
第 4 章 紊流场的生命体扩散	42
4.1 两个流体质点的相对扩散.....	42
4.2 紊流输运过程.....	46
4.3 紊流的传热与对流.....	50
4.4 生命体颗粒在紊流场中的跟随性问题.....	51
4.5 切变紊流中的弥散及弥散系数.....	54
第 5 章 失控态生命体动力学模型	60
5.1 生命体作为稀疏颗粒的两相流运动.....	60
5.2 二维稳定稀疏两相流的浓度分布.....	62

5.3	单个生命体颗粒的弛豫过程·····	65
5.4	失控生命体颗粒在几种典型流场中的运动·····	71
第6章	生命体的生态数学模型 ·····	82
6.1	单种群模型·····	82
6.2	两种群模型·····	88
6.3	三个或多个种群所组成的生态系统模型·····	103
6.4	多种群生态系统模型·····	117
第7章	水生生物和水域生态系统 ·····	120
7.1	水生生物的生态类群·····	120
7.2	水中的细菌和病毒·····	124
7.3	水蚯蚓及其生活习性·····	126
7.4	水生昆虫·····	127
7.5	蚌类和螺类·····	131
7.6	水生植物·····	132
7.7	鱼类及其生活习性·····	133
7.8	食物链·····	134
7.9	水域生态系统·····	135
第8章	生态水力学的应用实例(上) ·····	146
8.1	问题的提出·····	146
8.2	钉螺的生物学特性·····	147
8.3	钉螺的生态水力学特性试验研究·····	156
8.4	环形水槽的水流特征及其数值模拟·····	170
8.5	钉螺的生态水力学特性分析·····	187
第9章	生态水力学的应用实例(下) ·····	188
9.1	钉螺扩散的流场控制技术的试验研究·····	188
9.2	压力水槽流场的数值模拟·····	190
9.3	无螺取水技术的野外试验研究·····	196
9.4	无螺取水技术主要优点·····	197
9.5	失控态钉螺的流场跟随性·····	197
9.6	生态水力学在其它领域的应用简介·····	208
主要参考文献 ·····		211

第 1 章 导 论

1.1 生态水力学研究任务与研究方法

1.1.1 生态水力学研究任务

生态水力学是近年发展起来的新兴学科,属流体力学、生物学、生态学、环境科学与工程科学的交叉学科,主要研究水中生命体的扩散输移规律及其属力学范畴的控制技术。

任何生命体都有其特定的生存环境,其中,水、氧气与食物是生命体最基本的生存条件。此外,水中生命体对水环境还有着更进一步的要求,如水温、水质、流速、水深等。这些水环境条件是在不断变化的,水中生命体须不断调整自己或其群体来适应新的环境,不能适应新环境的物种将面临灭绝。随着工农业生产不断发展,大量工业废水和居民生活污水无节制的排放,还有化肥和农药的广泛使用,全球水环境变得越来越恶劣,致使许多生物种群正濒临灭绝。

生态水力学涉及的领域包括环境保护、水产养殖和经水生物传播疾病的控制等,与国民经济发展和人类生活有着十分密切的关系,因此有着十分广阔的应用前景。

1.1.2 生态水力学研究方法

1. 理论分析方法

影响水中生命体运动的因素很多。作为一门新兴学科,目前尚无成熟的理论,主要借助于流体力学(主要为紊流)、二相流(主要为稀疏颗粒运动)以及生态数学等基本理论,对影响水中生命体运动的因素进行系统的分析研究。随着该领域研究的逐步深入,生态水力学理论也将日臻完善。

2. 系统实验方法

生态水力学实验既不同于物理实验和生物实验,也不同于一般水力学、流体力学实验。因为生态水力学的研究对象是水中生命体,实验中很难找到一种与之形体、尺寸和能力完全相似的另一种生命体,因此,水力学研究中常用的相似理论,在此已无法使用。生态水力学所采用的系统实验方法,是对所研究的目标生物进行系统的实验研究,包括目标生物的生态水力学特性实验(如水中生命体对流速场、压力场、温度场、浓度场改变的敏感性、选择性和适应性),以及相应的流场控制实验。值得庆幸的是,生命体的生态水力学特性,并不会因流场尺寸而改变。如生命体对水温改变的敏感性,与水池大小无关。关于生态水力学的实验观测,目前主要还只是以现象和过程为主。因此许多重要的量化结论,目前还只能作为实际问题的参考。

3. 现场观测方法

建立水中生命体运动方程,如果没有以实际观测资料为基础,将视为缺乏依据,可见现场观测在生态水力学研究中的重要性。生态水力学是从实际问题中提出来的,现场观测应该是所有生态水力学课题的出发点。与此同时,生态水力学的研究成果,又必须用来解决实际问题,而能否解决实际问题,也只能通过原型观测来检验。因此原型观测是生态水力学研究的基础。

4. 现代量测技术与计算机模拟技术的应用

由于生物多样性与影响因素的复杂性,现代量测技术和计算机数据、图像的采集、处理、显示技术以及仿真模拟技术都是生态水力学必不可少的研究手段。同时这些技术也为生态水力学的进一步发展提供了广阔的空间。

1.2 与生态水力学有关的基本知识

1.2.1 生态学的基本概念

生态学是一门综合性的交叉学科,主要研究生物与其周围环境的关系。现代的生态学已由原来单纯研究生物与自然环境之间的关系,转向注意人类活动影响下的生物与环境的关系。

生态学包括:

(1) 个体生态学。以生物个体为研究对象,研究某种生物与光、热、水、空气、营养等环境因素的相互关系。

(2) 种群生态学。种群是指同种生物的集合群。种群生态学研究生物种群与环境以及种群间的相互关系。

(3) 系统生态学。把生物与生物、生物与环境以及各种环境因素之间的相互联系、相互制约的关系,作为一个系统来研究。

1.2.2 生态系统

生态系统大小不一,种类繁多,如小到一滴水、一个湖泊,大到整个地球、整个宇宙等。生态系统包括自然生态系统、半人工生态系统和人工生态系统,每个生态系统的结构都必须具有实现生态系统的能量流动和物质循环的功能。

1. 能量流动

生物的代谢、生长和繁殖需要能量。一切生物所需的能量归根到底都来自太阳能。太阳能通过植物的光合作用进入生态系统,植物借助太阳能将无机物变成有机物,即把太阳能以化学能的形式储存于有机体内。这种化学能以食物链的形式在生态系统中流动。在流动过程中,一部分能量由生物的呼吸作用转化成热能耗散掉,还有一部分因不能被利用作为废物浪费(如排泄)掉。可见,生态系统中各级营养能被生物体利用的能量是逐级

减少的,即能量流动是不可逆的(单方向的)。

2. 物质循环

组成生物有机体的物质来自环境,主要包含 40 多种化学元素,这些元素都来自环境,如碳、氮、氢、氧、磷、硫。它们构成生态系统中的生物个体和生物群落,并通过生产者(主要是植物)、消费者(主要为动物)和分解者(微生物)构成营养级并依次转化:无机物→有机物→无机物。使物质如此循环。值得注意的是,物质循环不同于能量流动:前者可周而复始,形成封闭循环;后者是单向的,不可逆的。谁能把生物能变成太阳能呢?

3. 调节能力

生态系统都具有自我调节、恢复稳定状态的能力。系统的组成组分愈多样,能量流动和物质循环的途径愈复杂,这种调节能力就愈强。否则调节能力就愈弱。但任何一个生态系统的调节能力都是有限的。超过这个极限,系统便遭破坏,不再具有调节能力。致使生态系统丧失调节能力的原因主要有两类:①系统中种群成分的改变,如草原过载放牧导致草场退化、单一种植等导致虫灾等;②环境因素改变,如水体富营养化导致水生物窒息死亡等。这两种影响因素主要是人类的愚昧行为造成的。要恢复自然生态系统的调节能力,首先应规范人类的行为,制定强制性的环境管理法规。

1.2.3 水中生命体的行为与流场环境的关系

1. 水中生命体的行为

水中生命体主要是指活的生物个体(包括水生物和进入水体的非水生生物)。这些生物包括动物,也包括植物和微生物(注意:已死亡的生物不属于生命体)。每一种生命体都有其特定的生存环境,当生存环境发生改变,生命体会表现出不同的行为。从力学的观点来看,可把水中生命体的不同行为划分成三种状态:

1) 自由态

在舒适的环境中,生命体表现为自由自在,运动带随机性。促使处于自由态生命体运动的主要因素为觅食、求偶、生殖或游戏等。

2) 逃离态

当生命体所处的环境变得于其生存不利,它们将选择逃离,另寻找一种较舒适的环境。生命体的这种运动状态带有明显的方向性,其速度也比自由态时快得多。

3) 失控态

生命体具有逃离危险境地的能力,称为求生本能。但这种能力是很有限的,环境生态学中称之为生态幅。当环境快速恶化到超出生命体的极限,生命体便呈现失控状态(但不一定马上死亡)。处于失控态的生命体与无生命体(如泥沙、木头、石块等)的扩散输移方式完全相同。

水中生命体的这三种行为状态,可用两组临界参数来划分,用第一临界参数(流速 v_{c1} , 压力 p_{c1} , 温度 T_{c1} 等)划分自由态与逃离态;用第二临界参数(流速 v_{c2} , 压力 p_{c2} , 温度 T_{c2} 等)划分逃离态与失控态。尽管不同生命体的这两组临界参数存在很大差异,但任何

水中生命体都存在上述三种状态。

许多生命体会在失控状态中死亡,但也有一些生命力较强的生命体会随水流运动到较安全的地方,重新恢复自由态,并繁衍生息。

2. 水中生命体的行为与流场的关系

流场是水中生命体生存和运动的空间,主要指温度场、浓度场、速度场、压力场和涡量场等。由于各种原因,流场会不断变化,有些变化会异常剧烈,致使许多生命体无法生存、无力逃避乃至死亡。

每种生命体对其生存的流场都有特定的要求。当流场发生改变,生命体都会表现出自由、逃离和失控三种状态。即使是个体位置不能随意改变的水生植物,也能通过种子或部分枝干、根茎等随水流漂到较适宜的水环境中去生长、繁殖。

流场的改变往往不能以生命体的意愿而转移(如修建三峡工程),但人们可通过研究生命体在不同流场中的行为规律,在局部范围内人为造出一种流场,促使生命体“逃”到较为安全的地方,从而达到保护濒危物种和生态环境的目的。另外,根据各种生命体的活动能力不同,如健康的和病弱的生命体对流场改变的适应能力不相同,也可人为造出一种流场,把健康的生命体与生病的分开,达到控制疾病传播的目的。

人类有许多疾病是通过水生物传播的,如血吸虫病是通过水中的钉螺传播的。人们只需造出一种流场,控制这种水生物的扩散,就能控制血吸虫病的流行。

总之,研究水中生命体的行为与流场的关系,具有十分重要的意义,并有广泛的应用前景。

1.2.4 生命体的热力学能

生命体运动如同其它物体运动一样,需要消耗能量。所不同的是生命体体内具有热力学能(也称化学能,直接来自食物,源于太阳能),这种能量使生命体的运动具有自主性,这是生命体与其它无生命体的根本区别。不同的生命体的热力学能有很大的差异,但无论何种生命体,其热力学能总是有限的。当它们的热力学能无法抵挡外部环境改变时,其在水中的运动形式将如同无生命体一样。因此水中生命体的运动形式,主要取决于外部流场状态,无论多么力大无比的生命体,在飓风、海啸这样的灾害来临时,多选择逃避。那些无力逃走的,就不得不充当一回无生命体(但不一定死亡)。

如果想改变某种水中生命体的行为状态,改变它周围的流场环境是一种十分有效的方法。当然首先得对这种生命体的热力学能有所了解,对它的生态水力学特性,它喜好的流场环境,特别是它所能承受的极限环境等,都必须有清楚的了解,这样才能人为造出一种流场环境,让生命体按人为要求运动。

1.3 生态水力学的基本方程

流场分析计算是生态水力学的基础,它不仅能补充因试验条件不足带来的局限性,同时也是分析与控制水中生命体运动的依据。因此,与水力学有关的基本方程,都能在生态水力学中得到应用,最常用的有:

1) 连续性方程

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1-1)$$

2) 动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_x}{\partial t} + \left(u_x - 2 \frac{\partial \nu_t}{\partial x}\right) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \left(u_y - \frac{\partial \nu_t}{\partial y}\right) \frac{\partial u_x}{\partial y} + \left(u_z - \frac{\partial \nu_t}{\partial z}\right) \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \\ &+ (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} + \frac{\partial \nu_t}{\partial y} \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial \nu_t}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial x} \end{aligned} \quad (1-2)$$

其中

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_y}{\partial t} + \left(u_x - 2 \frac{\partial \nu_t}{\partial x}\right) \frac{\partial u_y}{\partial x} + \left(u_y - \frac{\partial \nu_t}{\partial y}\right) \frac{\partial u_y}{\partial y} + \left(u_z - \frac{\partial \nu_t}{\partial z}\right) \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial y} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \\ &+ \frac{\partial \nu_t}{\partial x} \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial \nu_t}{\partial z} \frac{\partial u_z}{\partial y} \end{aligned} \quad (1-3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_z}{\partial t} + \left(u_x - \frac{\partial \nu_t}{\partial x}\right) \frac{\partial u_z}{\partial x} + \left(u_y - \frac{\partial \nu_t}{\partial y}\right) \frac{\partial u_z}{\partial y} + \left(u_z - \frac{\partial \nu_t}{\partial z}\right) \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial z} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} \\ &+ (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial \nu_t}{\partial x} \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial \nu_t}{\partial y} \frac{\partial u_y}{\partial z} \end{aligned} \quad (1-4)$$

3) 湍动能 k 方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial k}{\partial t} + \left(u_x - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial \nu_t}{\partial x}\right) \frac{\partial k}{\partial x} + \left(u_y - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial \nu_t}{\partial y}\right) \frac{\partial k}{\partial y} + \left(u_z - \frac{1}{\sigma_k} \frac{\partial \nu_t}{\partial z}\right) \frac{\partial k}{\partial z} \\ &= \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right) \left(\frac{\partial^2 k}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 k}{\partial z^2}\right) + P_K - \epsilon \end{aligned} \quad (1-5)$$

其中

$$\begin{aligned} P_K = \nu_t & \left[2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

4) 湍动能耗散率 ϵ 方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \left(u_x - \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \nu_t}{\partial x}\right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \left(u_y - \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \nu_t}{\partial y}\right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} + \left(u_z - \frac{1}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \nu_t}{\partial z}\right) \frac{\partial \epsilon}{\partial z} \\ &= \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon}\right) \left(\frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2}\right) + (C_1 P_K - C_2 \epsilon) \frac{\epsilon}{k} \end{aligned} \quad (1-6)$$

5) 单种群方程

$$\frac{\dot{N}(t)}{N(t)} = b - aN(t) - d \int_{-\infty}^t N(s)K(t-s)ds \quad (1-7)$$

6) 双种群方程

$$\dot{N}_1 = N_1(\epsilon_1 - \alpha_1 N_1 - r_1 N_2) \quad (1-8a)$$

$$\dot{N}_2 = N_2[-\epsilon_2 - \alpha_2 N_2 + r_2 \int_{-\infty}^t K(t-\tau)N_1(\tau)d\tau] \quad (1-8b)$$

7) 三种群方程

$$N_{t+1} = N_t f_0(N_t)[1 - P_1(P_t)][1 - P_2(Q_t)] \quad (1-9a)$$

$$P_{t+1} = C_1 N_t P_1(P_t)[1 - P_2(Q_t)] \quad (1-9b)$$

$$Q_{t+1} = C_2 [N_t P_2(Q_t) + P_t(P_t)P_{21}(Q_t)] \quad (1-9c)$$

8) 多种群方程

$$X_i = r_i x_i \left[1 - \sum_{j=1}^m E_{ij} \left(\frac{x_j}{K_i} \right)^{\theta_j} \right] \quad (1-10)$$

9) 生命体运动方程

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{u}_B}{dt} = & \left(1 - \frac{\rho}{\rho_B}\right) \mathbf{f} + \frac{\rho}{\rho_B} \frac{D\mathbf{u}}{Dt} + C_D \frac{3\rho}{4\rho_B d_e} |\mathbf{u} - \mathbf{u}_B| (\mathbf{u} - \mathbf{u}_B) + C_m \frac{\rho}{2\rho_B} \frac{d(\mathbf{u} - \mathbf{u}_B)}{dt} \\ & + \frac{\rho}{\rho_B} \frac{C_B}{d_e} \sqrt{\frac{\pi\mu_{\text{eff}}}{\rho}} \int_0^t \frac{d(\mathbf{u} - \mathbf{u}_B)/d\tau}{\sqrt{t-\tau}} d\tau + C_{LM} \frac{3\rho}{4\rho_B d_e} |\mathbf{u} - \mathbf{u}_B| (\mathbf{u} - \mathbf{u}_B) \\ & + C_{LB} \frac{\rho K_s \mu}{\rho_B^2 \pi d_e} \left(\frac{\xi}{\nu t} \right)^{0.5} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_B) + \Phi_B \frac{\rho}{\rho_B} \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_B| (\mathbf{u} - \mathbf{u}_B)}{d_e} \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中: $\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \frac{d\mathbf{u}}{dt} + [(\mathbf{u} - \mathbf{u}_B)] \cdot \nabla \mathbf{u}$; $C_D = f(Re_B)$ 为 Stokes 阻力, $Re_B = \frac{|\mathbf{u} - \mathbf{u}_B| d_e}{\nu}$ 为生命体雷诺数; $C_m = f_1(A_e)$ 为附加质量力系数, 当 $1 < Re_B < 100$, $C_m = 2.1 + 0.132A_e^2$, $A_e = \frac{(u - u_B)/d_e}{d(u - u_B)/dt}$; $C_B = f_2(A_e)$ 为 Basset 力系数, 当 $1 < Re_B < 100$, $C_B = 1.92 + \frac{2.08}{(A_e + 1)^3}$; $\mu_{\text{eff}} = \mu \exp\left(\frac{2.5\alpha_B}{1 - S\alpha_B}\right)$ 为等效应力黏度, μ 为水的动力黏度, α_B 为生命体含量, S 为常数 ($= 1.35 \sim 1.95$); $C_{LM} = 0.2d_e\omega/(u - u_B)$ 为生命体自旋 Magnus 升力系数; C_{LB} 为 Saffman 升力系数, 当 $Re_B \leq 40$ 时, $C_{LB} = (1 - 0.3324\alpha^{0.25}) \exp\left(-\frac{Re_B}{10}\right) + 0.3314\alpha^{0.25}$, 当 $Re_B > 40$ 时, $C_{LB} = 0.0524(\alpha Re_B)^{0.25}$, $\alpha = \frac{\xi d_e |\mathbf{u} - \mathbf{u}_B|}{\nu Re_B}$; Φ_B 为生命体动能系数, $\Phi_B = f(\text{生命体能力、年龄、流速、水深、水温、水质、季节等})$, 当生命体处于失控状态时, $\Phi_B = 0$ 。式中最后一项称为生命体主动力项。

此外, 还有多相流运动方程, 紊流运动方程以及各种生态学模型都能在不同生命体运

动研究中得到应用,在此不一一列举。

1.4 生命体扩散的流场控制理论

根据生命体的生态水力学特性,即生命体对流速场、压力场、温度场、浓度场改变的敏感性、选择性和适应性,可人为造出一种对生命体生存不利,又不致失控的流场,利用生命体的求生本能,诱导它们离开某一水域,去另一水域,加以保护(或集中消灭)。如水利工程中的鱼道技术,以及血吸虫病防治措施中的无螺取水技术等,都是生命体扩散的流场控制理论的成功应用。

1.5 生态水力学的发展趋势

生态水力学是一门多学科交叉、融合的综合性边缘学科,其研究对象、任务、内容和学科体系目前尚未完全定型,还需要不断吸取各种自然科学,如力学、数学、生态学、环境科学及其它有关农、牧、渔业应用科学的有关知识,研究和探索生命体在水体中的行为规律和符合生态平衡法则的控制技术,以满足国民经济持续发展的需要。

生态水力学又是一门覆盖面很广、应用性很强的新兴学科,其研究成果可广泛应用于水利、环境、水产养殖、疾病控制以及珍稀物种保护等领域。国内外关于鱼道和水域富营养化控制的研究都是生态水力学应用的成功例子。

第 2 章 紊流运动基础

流场模拟计算是生态水力学研究的基础,也是分析水中生命体生态水力学特性的依据。因实际水流运动多属紊流,紊流的流场结构及其分析计算显得尤为重要。

紊流运动的基本方程,是以 Navier-Stokes 方程为基础,引进雷诺假定($u_i = \bar{u}_i + u'_i$, $p = \bar{p} + p'$)而推演得来的。在建立统计平均量时,需涉及如下的几个统计平均法则:

法则一

$$\overline{A+B} = \bar{A} + \bar{B}$$

法则二

$$\overline{CA} = C\bar{A} \quad (C \text{ 为常数})$$

法则三

$$\overline{AB} = \bar{A}\bar{B} = \overline{AB}$$

法则四

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = \overline{\frac{\partial A}{\partial t}}$$

法则五

$$\overline{\int A ds} = \int \bar{A} ds$$

根据法则一,可得脉动值 $\bar{A'} = 0$, 即

$$\bar{A'} = \overline{A - \bar{A}} = \bar{A} - \bar{\bar{A}} = \bar{A} - \bar{A} = 0$$

法则四证明如下

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} &= \frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} \frac{\partial A}{\partial t} dt = \frac{1}{T} [A(t_0 + T/2) - A(t_0 - T/2)] \\ &= \frac{1}{T} \frac{\partial}{\partial t} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} A dt = \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \end{aligned}$$

法则五证明如下: 若 $B = \int A ds$, 则 $\bar{A} = \frac{\partial \bar{B}}{\partial s}$, 已知 $\frac{\partial \bar{B}}{\partial s} = \frac{\partial \bar{B}}{\partial s}$, 两边对 s 积分, 得 $\bar{B} = \int \frac{\partial \bar{B}}{\partial s} ds$, 即证明 $\overline{\int A ds} = \int \bar{A} ds$ 。

以上各式中的 A 和 B 都是随机变量。

2.1 Navier-Stokes 方程对紊流的有效性

Navier-Stokes 方程是研究流体运动的最基本也是最重要的方程,此方程对紊流是否有效,需要进行论证。Navier-Stokes 方程于 1822 年由 Navier 开始研究,Stokes 于 1825~1845 年间完成。此方程的推导基于如下一些假定:①流体运动被看成是连续的;

②流速 $u_i(\rho u_i)$ 的黏性扩散, 与流速 u_i 的梯度成正比, 或与切变率成正比; ③流体是各向同性的; ④流体是均匀的; ⑤当流体处于静止时, 压力为静水压力; ⑥当流体是纯膨胀时, 平均应力等于压力; ⑦黏性流体模型的常数 (如 ρ, μ, μ_2), 要由试验确定, ρ 为流体密度, μ 为流体动力黏度, μ_2 为第二动力黏度。

对于 ρ 和 μ 是常数时, Navier-Stokes 方程 (以后简称为 N-S 方程) 可写成

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_i}$$

连续方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

由于紊流是由许多不同尺寸的涡体运动组成的, 这种流体是否会违背连续流体的假定? 下面用紊流中的极限涡体和涡旋的拉伸来论证此问题。

图 2-1 表示紊动射流, 雷诺数愈大, 涡体的尺寸愈小, 但最终有一个极限值。现在研究一个涡旋的拉伸, 如图 2-2 所示。对 N-S 方程两边取旋度, 并令 $\omega = \nabla \times \mathbf{u}$, 得

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega = (\omega \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \omega$$

试问, 当 $\frac{D\omega}{Dt} = 0$ 时, 即 $(\omega \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \omega = 0$ 时, 涡旋将发生什么变化?

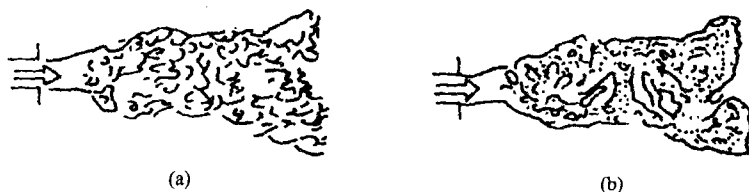


图 2-1 紊动射流 ($Re_a < Re_b$)

(a) Re_a (b) Re_b

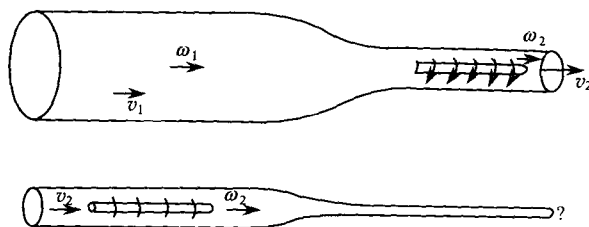


图 2-2 涡旋拉伸

对上式进行量纲分析, 可得

$$\omega \frac{u}{l} \approx \nu \frac{\omega}{l^2}$$

或

$$\frac{ul}{\nu} \approx 1$$

式中: ω 为极限涡强; u 为涡体速度; l 为涡体尺寸。由此式可看出, 当 $\frac{D\omega}{Dt} \rightarrow 0$ 时, 即当涡旋不再拉伸时, 可推出涡体雷诺数 $\left(\frac{ul}{\nu}\right)$ 是 1 的量阶, 因而最小的紊动涡体应是雷诺数 $\frac{ul}{\nu} = 1$ 的涡体。

众所周知, Kolmogorov 的涡体微尺度为

$$u = (\nu \epsilon)^{1/4}, \quad l = (\nu^3 / \epsilon)^{1/4}, \quad t = (\nu / \epsilon)^{1/2}$$

其涡体雷诺数也为 $\frac{ul}{\nu} = 1$ 。如气流, 当 $u = 10 \text{ m/s}$, $\nu = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, 则求得 $l = 10^{-6} \text{ m}$ 。已知在 $1 \text{ atm}^{\text{①}}$ 的正常情况下, 1 m^3 体积的气体, 包含有 10^{29} 个分子, 而最小的涡体体积为 $l^3 = 10^{-18} \text{ m}^3$, 它应包含的气体分子应有 10^{11} 个。具有如此多个分子所组成的涡体, 当然连续性假定对它有效, 这也就说明了 N-S 方程对紊流同样有效。

2.2 雷诺平均运动方程与脉动运动方程

雷诺平均运动方程和脉动运动方程, 是以 N-S 方程为基础, 并考虑雷诺平均而导出的紊流运动方程。

2.2.1 雷诺平均运动方程

已知不可压缩流体的 N-S 方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 u_i \quad (2-1)$$

连续方程为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-2)$$

式中: $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$ 。将 $u_i = \bar{u}_i + u'_i$, $p = \bar{p} + p'$ 代入式(2-1)和式(2-2), 并认为质量力 F_i 无脉动量, 则式(2-1)、式(2-2)为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\bar{u}_i + u'_i) + (\bar{u}_j + u'_j) \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_i + u'_i) \\ = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{p} + p') + \nu \nabla^2(\bar{u}_i + u'_i) \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_j + u'_j) = 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

对式(2-1)和式(2-2)取平均, 并考虑脉动量的平均为零, 即 $\overline{u'_i} = 0$, $\overline{p'} = 0$, 得

① atm 为非法定单位, $1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$, 下同。