

计算水力学

〔荷〕 M. B. 阿包特 著

海洋出版社

计 算 水 力 学

[荷] M.B.阿包特 著

王绍文 魏启宇 译

海 洋 出 版 社

1985年·北京

内 容 提 要

本书主要论述自由表面流的理论和计算,应用对象主要是大型海洋工程,包括近海平台、海岸工程和港湾工程等,全书内容不同于过去沿用的经典水力学,不再把流体视为连续体,而是采用离散法进行计算。这样,就可通过差分格式,应用电子计算技术进行快速运算,从而满足海洋工程规模巨大,情况复杂,而要求很急的需要。按这种方法进行计算的水力学就叫做计算水力学。本书共分六章,第一章为守恒律的离散式,第二章为守恒律的连续式,第三章为特性线法,第四章为数值计算法,第五章为计算水力学的基础,第六章为工程应用。内容有理论,有例题,还有实际工程的运算结果,可供从事海洋工程、港湾工程和水利工程的科研、设计和施工人员参考,也可供大专院校师生参考。

责任编辑:吴宜侗

责任校对:刘兴昌

计 算 水 力 学

[荷] M. B. 阿包特 著

王绍文 魏启宇 译

海 洋 出 版 社 出 版 (北京市复兴门外大街)

新华书店北京发行所发行 海洋出版社印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 13 1/8 字数: 250千字

1985年1月第一版

1985年1月第一次印刷

印数: 1—3200

统一书号: 13193·0321 定价: 2.60 元

版权所有·不得翻印

书 中 符 号

- a** 加速度 (米/秒²) ; x 方向上距离 (米) ; $C \cdot \sin \alpha$
- A** 总流面积 (米²) ; 在守恒式 $g = g(f)$ 中对 f 的导数
- b** 均匀渠道宽度 (米)
- B** 渠道浸水面总宽度 (米)
- c** 传播速度, 或波速 (米/秒) ; 浓度 (ppm)
- C** 传播速度, 或波速的替换数 (米/秒) ; 谢才表达式中摩阻系数 (米^{1/2}/秒)
- Cr** 库朗特 (Courant) 数, 按动力的为 $\dot{x} \frac{\Delta t}{\Delta x} = \lambda \frac{\Delta t}{\Delta x}$,
或按运动的如 $c \frac{\Delta t}{\Delta x}$, 或 $u \frac{\Delta t}{\Delta x}$
- D** 欧拉式全微商; 放大因子; 扩散系数 (米²/秒)
- e** 方向或单位向量, 写为 **e**; 能量流密度 (千克米/秒³)
- E** 短波运动的能量级 (千克/秒²)
- f** 力 (可用 N , 也可用千克米/秒²) ; 广义级向量; 摩阻系数; “...的函数”
- F** 力的交换数 (可用 N , 也可用 kgms^{-2})
- F** 弗洛德数 ($= |u/(gh)^{\frac{1}{2}}|$)
- g** 重力加速度 (可取 9.8米/秒^2) ; 广义流密度; 放大矩阵特征值
- G** 放大矩阵
- h** 水深 (米)
- H** 相对于某一水平基准面 (米) 的底部高程; 控制函

数；海维沙德梯阶函数

i 底部梯度

$\text{Im}(x)$ x 的虚数部分

I 瞬时单位水文线， $I = I(t)$ (米³/秒)；单位矩阵

j 在 x 上的编址

jj j 的最大值

J 近似水平流的黎曼不变量 (米/秒)； jj 交换数

k 在 y 上的编址；单位宽度上的容积流量，这里称为“容积流密度” (米²/秒)；粗糙度系数 (米)；波数；一般常数

kk 编址 k 的最大值

K 波数 k 的交换数

l 水流系统的长度 (或延长度) (米)；数字算子在 j 或 k 上的范围

L 信息损失平均率

m 动量流密度 (千克/秒²)；逆格式中第 j 个增量的机会

n 时间编址

p 沿 x 方向每单位宽度上的质量流量，这里称为 x 方向的质量流密度，它等于 $\rho u h$ (千克/米·秒)； x 向动量级 (千克/米·秒)

P 复传播因数

q 沿 y 方向每单位宽度上的质量流量，或称 y 方向的质量流密度 (千克/米·秒)； y 向动量级 (千克/米·秒)；加权因数

Q 总截面上的流量容积 (米³/秒)；波速比

- r 用于运动库朗特数 $u \frac{\Delta t}{\Delta x}$ 对 C_r 的交换数
- R 水力半径 (米)
- $\text{Re}(x)$ x 的实(数)部(分)
- s 随意用于 x 和 y 的数
- t 时间 (秒)
- T 周期 (秒) ; 固定时间增量 (秒)
- u 沿 x 方向的速度 (米/秒)
- U 沿 x 方向速度的交换数 (米/秒), 特别是用于有两个 u 分量的列向量
- v 沿 y 方向的速度 (米/秒)
- V 沿 y 方向速度的交换数 (米/秒)
- w 沿 z 方向的速度 (米/秒) ; 功 (千克米²/秒²) ; 试探函数
- x 水平面上的坐标 (米)
- $\dot{x}$ $x-t$ 平面上的特征方向
- X 放大矩阵的特征值
- y 水平面上正交于 x 的坐标 (米)
- z 垂直坐标, 正交于 x 和 y , 有时可读为“在一给定基准面以上的高度”
- α 速度分布系数; α 算法中的耗散度
- β 运动波中的 c/u 数
- γ 柯里奥利系数 (秒⁻¹) ; 幅角 $i2\pi k\Delta x/2l$ 或 $i2\pi k\Delta x/l$
- δ, Δ 变数的增量; 计算波速(复数) ; 狄拉克 δ -分布
- ϵ 一种分布, 在方程 (1.5.1) 中由 x 上的支承数加以定义

- ① 展开角；沿 t 的加权因数
- λ 波长 (米)；特征波速， $= \dot{x}$ ，用于近似水平流理论 (米/秒)
- ξ 傅里叶系数，因变数向量
- ρ 密度 (千克/米³)；放大因子， $= e^{\omega \Delta t}$
- σ 密度比； $\sigma_1 = 2\pi K_i \Delta x / 2l$ ， $\sigma_2 = 2\pi K_h \Delta y / 2l$
- τ 剪应力 (牛顿/米²或千克/米·秒²)； $t(s)$ 的交换数
- ψ 线性化的流域宽度；沿 x 的加权因数
- ω 频率 (秒⁻¹)

目 录

书中符号.....	1
原书序言.....	1
第一章 守恒定律的离散式	9
1-1 基本定律.....	9
1-2 守恒定律和方程式 质量、动量和能量.....	10
1-3 伽利略构架.....	22
1-4 质量、动量和能量位级与质量、动量和能通量密度的关系.....	26
1-5 若干实例.....	27
第二章 守恒定律的连续式	46
2-1 垂向为均匀流体的一维基本式.....	46
2-2 侧流、底坡、摩阻和驱动应力的介入.....	52
2-3 一维流中的扩散和收缩.....	56
2-4 均匀流体的二维守恒式.....	61
2-5 层流中的一维流.....	64
2-6 欧拉式和算法式.....	68
2-7 布辛列斯克方程的欧拉式.....	74
第三章 特性线法	80
3-1 特性线法在计算水力学中的作用.....	80
3-2 特性线和不变量.....	80
3-3 流态区域.....	92
3-4 水跃的形式和计算	104
3-5 特性线法的不定性条件	106

3-6 实例	115
3-7 单向波的传播	124
3-8 特征值的线性化方法: 单向波	136
3-9 特征值的线性化方法: 周期波	139
3-10 二维近似水平流的特性线簇	150
第四章 数值法	156
4-1 说明的问题: 第一点	156
4-2 特性线的三点法	157
4-3 特性线的四点法	161
4-4 说明的问题: 第二点	174
4-5 用标量波方程为例介绍直接差分法	176
4-6 一维近似水平流的显式差分法	196
4-7 一维近似水平流的隐式差分法	217
4-8 一维近似水平流的逆差分法	247
4-9 非均匀流体的一维流差分法	255
4-10 线性化的二维近似水平流的差分法	264
4-11 一般二维近似水平流的差分法	277
4-12 布辛列斯克方程的隐式差分法	286
第五章 计算水力学的基础	291
5-1 引言	291
5-2 历史背景	291
5-3 守恒律系统的弱解	296
5-4 耗散差分格式	301
5-5 守恒律的广义差分式	302
5-6 泛函分析的若干原理	306
5-7 用筛选法建立弱解	314

5-8 能量范数的应用	318
5-9 说明的问题：第三点	330
第六章 计算水力学的应用	333
6-1 概述	333
6-2 试验台试验和现场试验	334
6-3 试验台的实例	336
6-4 现场试验实例	351
6-5 生产模型	400
参考文献	403

原 书 序 言

与工业革命时期蒸汽机曾经成为主要的实用机械一样，数字计算机已成为现代信息革命的一项主要实用工具。数字计算机变换语义信息的能力迅速，可靠且又价廉，它可以改变所有工艺技术的面貌，即使是有长期历史传统的水力学也是如此。作为欧洲启蒙时代的最初学科之一，水力学（首先由文西、伽利略、牛顿和欧拉等人加以研究）曾通过工业革命使之在生产上发生效益。现代工业革命（也可叫做后期工业革命），与复杂的、精密平衡的、高级的信息机械和建筑物的投资方向有关，可以保持信息破坏时的最好信息水平，从而再次改造了水力学，使之适合于现代社会的新要求。

摆在水力学面前的新要求，第一是与水力工程的规模和复杂性不断增加的情况密切相关的。在建设阶段，情况是非常紧张的——许多用于疏浚、基础预埋、重型工程和控制工程等复杂设备需要迅速集中和迅速疏散。这些工程比过去任何时期要求更急而且不可逆转。由于建设规模不断扩大，大多数现代化工程都更为严重地直接影响到周围的环境，同时又由于建设速度加快及其不可逆性，使之一旦出现不良后果，再要改变这些工程就显得太晚而且太困难了。因此，我们必须事前对这些工程在将来的使用以及将来周围环境受到的影响给予充分的注意。

第二，对水力学的新要求还要与工业生产的精密性相结合。这些工业生产通常对机械设备、建筑物和反应堆容器等有着新的和非常严格的要求。最好的一个例子可举原子核反

应堆，特别是增殖反应堆来说明。此时需要解决的问题是在广阔的运转范围内以及在发生事故的情况下，即在高温交换的情况下，进行紊流场和相应温度场的计算。与此同时，还要对反应堆、其他容器以及阀门和管线系统等在压力骤然改变时发生的效应进行计算。对于工业设施，另一个明显不同的应用领域是关于近海石油勘探和生产运转方面。这里要研究的问题是从石油流动中温度发生骤变的水力学问题直到平台、码头和船舶锚定等。

第三，对水力学产生的新要求还来自非工业化国家对社会经济的改造方面，在这些地方，太阳能是充足的，但矿物能源却很贫乏，而生活主要依靠农业，利用太阳能，通过植物根部和非饱和土壤区的物理性质为媒介，克服重力把水吸引上来，然后再利用植物的某些部分作为食物、饲料、燃料和商品粮。现在，由于革新思想正在传入这些国家（用信息论的语言来说，就是：“利用信息传输的文化渠道抽出生态渠道中不断增加的信息流”），从而引起人们对地面以上，地面以下和在土壤层中的水流运动进行控制性研究，并进一步研究开发的可能性，促使植物生理学用于生产控制方面，此时，需要注意的重要问题是在进行控制时，不能消耗矿物能源过多，并且不会引起，诸如盐碱化问题和吸血虫病问题等副作用。

最近已把解决这些问题，并满足人类不断增长的新要求的希望放在电子计算机上。在大多数情况下，计算机可以把各种事物通过数字模型取得数量上的结果，从而显示出它的效用。此外，这些数学模型可以运用数字计算机得出世界事物实际情况的预演。作为一种手段，它可使这些建设和将来

的运转取得预料的发展，并提供所希望的效果。当一个数学模型可以依据数值的分析处理描述事物情况时，我们就称之为“数值模型”。

数值模拟的过程主要是用一些数字的集合描述一个物理系统，并用这些数字的运算集合来模拟作用在这个系统上的若干定律；在水力学中，我们采用的这些数字主要是指以下一些对象的大小：水深和表面高程，流速和流量，底部和水面的坡度，可能还有内部应力和模型内部各个分量之间的质量交换以及模型与周围环境，如含盐度、温度等之间的交换。在许多情况中，所谓运算的集合是指对一个系统在某一时刻的描述变换到在后一个时刻的描述。这样，数值模型就能随着描述一个物理系统的数值集合的情况来跟踪演变过程，因而对应于各种计划兴建的工程以及将来的运转情况就能预知其物理演变。

在水力工程、海岸工程和近海工程中，如能正确应用数值模拟法，则工程的初建投资和将来的运转费用就可大大减少，因此，发展实用的数值模拟法就具有很大经济上的和商业上的意义。这一发展就很自然地要求彻底改造水力学，使之能够适应数字计算机所要求的离散的、顺序的和递归的程序和条件。这种经过改造的能够适应数字计算机的水力学，我们就称之为计算水力学。

由于计算水力学对模拟现实情况有了新的可能性，这就需要拥有更多更好的数据以备校准和验证这些模型——随后就产生有关理论和程序，采用新型的现场调查方法在经济上是需要的，也是合理的，现在的规模，只要和上一年代相比，就大不相同了，这里需要有最新的仪器设备来支持它

们，要有数据解释、数据储存和数据回收等设备。由于数字模型的良好程度不能超过用于校准和验证的数据所具有的精确程度，因而模型的经济利用要配合现场调查的经济利用和改进的仪器设备进行。

同样、数值模型还可开创物理模型可能发生的新情况，例如它可提供更为局部的边界条件，以及在实验室内对这些条件采用联机的计算控制。

因为计算水力学受到这些实际需要的强烈推动，所以它就自然地要从现已广泛应用的计算方法中取其最实用部分开始进行工作，这一部分就是“自由表面流”。从广义上说，它也包括若干有压流。这种型式的水流经常包括下列一些系统：航道、运河、河流、湖泊、海岸带和近海等。自由表面流常常与海滩和人工建筑物上的短周期波，海湾和港口的假潮作用，潮汐和风暴引起的涌浪，咸水入侵，洪水波，污水系统的流动，以及许多其他形式的水流现象联系在一起。

自由表面流的领域显然非常广阔。要在一本书中以适当的篇幅加以详尽论述是不能包括全面的。而且它又包括如此多类的专题，因而在此情况下，任何一位读者可能只关心论述的某些部分。为此，最好的办法似乎是编写一套丛书，而本书则是丛书的第一册。它概述了理论的若干原理，其他理论的特殊应用部分将在以后陆续出版。

现在要讨论这样一个问题，既如何选择和编入那些被认为是与本课题的基本理论有关的材料。这些材料应当从读者现已掌握的水力学知识入手，再引入必须应用的部分。对于这些在动力方面不断深入的课题，应当推测读者将需要多少

时间（例如三年甚至十年）来掌握这方面知识以便真正能够领会运用。

在本课题的发展阶段，这种选择与编辑工作主要是依靠作者的判断。本序言就是提供机会来阐明作者是怎样判断的。在本书中，要确立的第一个基本概念是守恒问题，作者将以守恒律为基础列出系统的公式。因为数字计算机的计算步骤是按离散的；或者可数的程序进行的，所以作者首先依据最简单、最常见的非连续形式，即驻立式水跃，按守恒律列出离散式。这样，我们就可通过水跃的能量损失，或者叫做能量亏损的概念（这里要满足质量和动量的守恒律）来介绍离散的、可数的系统中关于守恒律的非等价性概念——这种概念对计算水力学来说确实是一个基本概念。关于能量可能损失而动量仍然守恒问题（不能反过来），在此时表现为热力学第二定律的一个结果。它是计算水力学的另一个基本概念。然后，通过介绍伽利略的相对性原理，就很自然地可以介绍“位级”的二重性和“通量流密度”问题。

在举出若干实例以后（这些实例有助于树立一些有关的概念），再转入研究微分方程式就比较容易了。这些微分式应当是大家所熟悉的，但涉及到守恒律后，可能就不那么熟悉。然后说明无限向量中成对度量的等价性问题（质量、动量、能量和功、伯努利公式等）。在本书的许多说明中把这个问题作为典型部分，而在一般的用数学式表示的流体动力学书籍中它可能是多余的，但在计算水力学书籍中却是一个重要部分。用于计算水力学的离散格式很少能够表现这种等价性。以后我们会看到，当我们对一个微分式采用分部微分法或其他解析算法时，它确实能够表现等价性（这就是不损

失信息，或者不产生熵），而当应用对应的离散法运算分部微分和其他的数值运算法时却一般不能表现等价性（这里，它们损失了信息，或者产生了熵）。

在探讨这些基本性质时，作者只能扼要论述有关的内容，而把其余一些部分略去了。略去的重要部分可能是关于漩涡公式和漩涡对流定律，以及其他守恒定律的等价性问题。这些问题将留待今后介绍二维流和三维流的论著中再阐述。

计算水力学的计算过程不仅是离散的，而且是顺序的。顺序计算概念是本书的基本部分，在第三章中将通过特性线法的说明对它作出介绍。可以把这种方法加以扩展，并用于描述运动波和线性化的、可以迭加的波的运动，即调和运动。这里引进了一些概念，特别是傅里叶分解法，它是第四章中非常重要的内容。

在第四章中读者才真正接触到数值计算的“最严重任务”。即使如此，作者还是通过特性线法的一定顺序或编码加以介绍。对差分格式的主要概念，诸如相容性、收敛性和稳定性等的介绍只是依据运动波传播的最简单情形开始，然后再扩展到完全为动力的情况。首先介绍最简单的显格式，这里可以理解为所有格式可按任何次序排列。最后再进一步介绍最简单的隐格式，这里就应理解必须按特性线法所指示的次序进行。

本书中对数值求解法的介绍仅仅采用了“差分法”，而没有把“有限元法”放在显著地位加以描述。这是因为，第一，关于有限元法的应用已经出版了两本很好的书；第二，有限元法在水力工程实践中目前还应用得很少。

然而，书中所介绍的材料大多数也可适用于有限元法。

实际上，从算法的理论观点来说，差分法和有限元法在本质上并无多大区别。

第五章是以前面几章为基础论述了计算水力学的更为基本的部分。关于离散的不连续性，如第一章所述的水跃，在这章将叙述得更为详尽，其目的是说明当离散尺度趋近于零时，一个差分方程的序列解如何收敛于一个解。而且尽管该差分方程在名义上与微分方程强烈地相容，这个解在本质上不同于微分方程的解。因为差分方程的解在物理意义上更为现实，这就导致计算水力学中“分解佯谬”现象。然后再将分解佯谬（即似非而是）现象与Richtmyer所说的“稳定性佯谬”联系起来。最后可以看出，这两种佯谬现象都与康脱的著名定理，即可数集合和连续势集合的非等价性相互有关系。实际上，正是集论的这一重要定理打下了计算水力学描述非等价性的基础。当然，这种非等价性在经典动水力学的描述中是几乎没有地位的。然而，作者也注意到，应当说明这种“新的水力学”已经如何隐含在现代力学和数学分析的创始人，诸如伽利略和牛顿的某些立式之中。确实，读者可能会发现，全书是在美学的水准上企图继承水力学，并按万物的离散观点编写的。其内容从伽利略的关于运动的集论观点和牛顿的运动第二定律优先采用离散式开始，通过拉克斯（Lax）的弱解理论一直深入到康脱的数论展开式。这里还贯穿于水力学把线索一直追溯到康脱定理的第二热力学定律。

如果计算水力学仅仅是一个高等院校的课题，那么，从美学讲到展开式似乎就够了，本书也就可以写到第五章为止。但是，计算水力学又是工程上的一种工具，要在现实世