

河道水力学

许念曾 著



中国建材工业出版社

河道水力学

许念曾 著

中国建材工业出版社

2172/330P

(京)新登字 177 号

内 容 提 要

本书对河道水力学的基本理论和计算方法作了较全面的论述,其中包括:河道水流特性、河道恒定流水力学问题、河道非恒定流、河道的流场计算、河流弯道水流的运动、河道挟沙水流运动规律、河工建筑物的水力学问题、河道水力模型试验等。可供从事水利工程、航运工程、取水工程、桥梁工程的广大规划、设计、科研人员以及高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

河道水力学/许念曾著. —北京:中国建材工业出版社, 1994. 3

ISBN 7-80090-246-3

I. 河… II. 许… III. 河川水力学—概论 IV. TV133

河道水力学

许念曾 著

责任编辑 青杉 刘捷

中国建材工业出版社出版(北京海淀区三里河路11号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

黄河水利委员会印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/32 印张: 9.25 字数: 200 千字

1994年3月第1版 1994年3月第1次印刷

印数: 1—2000 册 定价: 6.00 元

ISBN 7-80090-246-3/TK·3

序

人类为了生存，远古时期就已不断同河流作斗争，随之积累了丰富的知识，目前已形成了《河流动力学》和《水力学》等有关学科。这些学科互相渗透，共同发展，例如研究河流必须具备水力学的知识，研究水力学也必然涉及河道的知识。显然，两学科结合，即是河道水力学，换言之，河道水力学应该属于河流动力学及水力学的边缘学科。这个学科有着独特的研究范畴，又有显著的工程使用价值。应该承认；尽管这一边缘学科已引起广泛重视，但迄今国内外这类专门论著极为少见。本书作者在长期教学和科研实践的基础上撰写的《河道水力学》，恰好弥补了这个薄弱环节。本书较全面系统地介绍了这一学科，并讨论其理论和应用问题，在学术上和工程实用上的意义都是深远的。

本书内容系统、广泛、新颖，选用了大量的最新研究成果，理论与实际结合得较好。其中很多观点有独到之处，虽然不乏有争议之点，但从活跃学术气氛的角度看，则是允许的。我们相信，本书的问世将对更多同行掌握这一学科的基本理论并将有关知识用于水利建设事业和教学中有很大帮助，对我国水利科学的发展也有积极作用。

李保如

1993年9月1日于郑州

前 言

河道水力学是水力学与河流动力学相结合并紧密联系河道工程实际问题的一门学科。它运用水力学及河流动力学的基本理论，阐述河道水流（包括挟沙水流）运动规律，讨论修建河道工程建筑物对河道水流及河床变形的影响，涉及到水利、航运、取水以及桥渡工程等，因而也是一门实用性很强的学科。

本书力求简明扼要地对河道水力学问题作出较全面地介绍，书中包括：河道水流特性、河道恒定流水力学问题、河道非恒定流、河道的流场计算、河流弯道的水流运动、河道挟沙水流运动规律、河工建筑物的水力学问题、河道水力模型试验等八章内容。

本书蒙请李保如教授和张红武高级工程师审阅，李保如教授并作了序，张桂芳同志在整理书稿、绘图、描图中付出了大量地艰辛劳动，中国建材工业出版社为本书的出版给予了大力支持，谨致谢意。

由于水平所限，而且撰写该书以反映河道水力学的内容本身，就是一个探索的过程，因此在材料取舍、内容阐述等方面的缺点和错误一定不少，热忱地欢迎读者批评指正。

目 次

序	I
前言	I
第一章 河道水流特性	(1)
§ 1-1 天然河道水流的紊流特性	(1)
§ 1-2 河道水流中的缓流、急流、临界流	(3)
§ 1-3 河道中的主流和副流	(8)
§ 1-4 河道平面形态及河段分类	(12)
§ 1-5 河道水流阻力	(16)
§ 1-6 河道演变及衡量演变性质的指标	(21)
第二章 河道恒定流水力学问题	(38)
§ 2-1 概述	(38)
§ 2-2 棱柱形渠道渐变流水面线型式的分析	(39)
§ 2-3 河道恒定非均匀渐变流基本方程	(43)
§ 2-4 河道水面曲线的计算	(47)
§ 2-5 河道中的急变流	(55)
§ 2-6 影响河道水面变化的其它因素	(63)
第三章 河道非恒定流	(69)
§ 3-1 概述	(69)
§ 3-2 非恒定渐变流基本方程式	(71)
§ 3-3 瞬态法	(77)
§ 3-4 洪水波的波速与流量传播	(84)
§ 3-5 非恒定急变流基本方程式	(89)

§ 3-6 溃坝水流计算	(93)
第四章 河道的流场计算	(99)
§ 4-1 二维均匀紊流及其半经验理论	(99)
§ 4-2 时均流速的垂线分布	(102)
§ 4-3 紊流强度的分布	(110)
§ 4-4 河道平面流场计算	(112)
第五章 河流弯道的水流运动	(116)
§ 5-1 弯道水面形态	(116)
§ 5-2 弯道中纵向流速分布	(120)
§ 5-3 环流流速分布	(123)
§ 5-4 弯道环流输沙计算	(133)
第六章 河道挟沙水流运动规律	(140)
§ 6-1 泥沙的特性	(140)
§ 6-2 推移质运动	(155)
§ 6-3 悬移质运动	(163)
第七章 河工建筑物的水力学问题	(184)
§ 7-1 概述	(184)
§ 7-2 丁坝的水力计算	(188)
§ 7-3 透水建筑物的水力计算	(198)
§ 7-4 裁弯工程的计算	(203)
§ 7-5 桥渡工程的水力计算	(210)
第八章 河道水力模型试验	(224)
§ 8-1 基本原理	(224)
§ 8-2 定床河道模型	(239)
§ 8-3 动床河道模型	(261)

第一章 河道水流特性

§ 1-1 天然河道水流的紊流特性

天然河道中的水流一般都是紊流。在紊流中，充满着大大小小的尺度涡体。这些涡体，是由于高流速层与低流速层交界面处的不稳定性波动而生成(图 1-1)。涡体生成后，由于这些涡体两侧流速不等(涡体旋转方向与水流方向一致的一侧流速大，方向相反的一侧流速小)，形成速度差，速度差引起压力差，该压力差就是促使涡体克服粘滞阻力脱离原流层的作用力。涡体进入邻近流层，又使邻层受到扰动，进一步产生新的漩涡。这种在流动中产生涡体，涡体的运动又使流体质点发生混掺的流动，就是紊流。

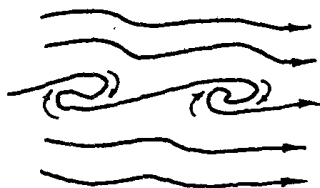


图 1-1 流动中出现的小尺度涡体

紊流运动的基本特性是流动中质点的混掺现象，由此使得流场中任一点的流速和压力等物理量都随时间呈不规则的脉动。例如，设 u_x 为紊流中某点在 x 方向的瞬时流速， u_x 随

时间的变化如图 1-2。严格地讲，紊流总是非恒定流，只有在时间平均的意义上才有紊流的恒定流动。 u_x 的时均值 $\bar{u}_x$ 为

$$\bar{u}_x = \frac{1}{T} \int_0^T u_x dt \quad (1-1)$$

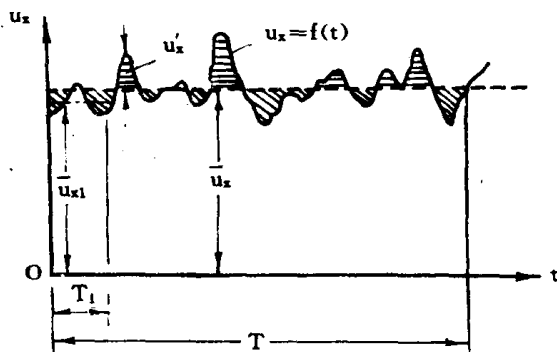


图 1-2 紊流速度的脉动

有了时均值的概念后，可以把 u_x 看作由两部分组成，即

$$u_x = \bar{u}_x + u'_x \quad (1-2)$$

式中， u'_x 为流速的脉动值。

将式 (1-2) 代入式 (1-1)，可得

$$\frac{1}{T} \int_0^T u'_x dt = 0 \quad (1-3)$$

即脉动流速的时均值 $\bar{u}'_x = 0$ 。

同样，可以写出 y 、 z 方向瞬时流速 (u_y 、 u_z)、时均流速 ($\bar{u}_y$ 、 $\bar{u}_z$) 及脉动流速 (u'_y 、 u'_z) 的上述关系，也可以写出其它物理量沿三个坐标方向的关系。

河道水流是河流泥沙起动、悬浮和输送的动力，为了搞

清泥沙运动的机理，必须首先了解输送泥沙的水流特性，也就是河道紊流特性，即时均流速分布和脉动流速分布规律，这方面的问题将在第四章中专门介绍。

§ 1-2 河道水流中的缓流、急流、临界流

河道水流，由于河段所处的地形环境及地质条件的不同，河槽形态各异，而表现出迥然不同的流态。如山涧溪流及河流峡谷段，多半坡陡流，遇障碍物常激起浪花，这种水流挟带泥沙及切割河槽能力极强；而平原地区河流，一般地势平坦，水流平缓，若河道水流带来的泥沙较多，则易落淤。在明渠水力学中，为了说明水流的这类特性，提出断面单位能量的概念。

一、断面单位能量

在明渠过水断面中（图 1-3），单位重量液体对任一基准面 $o-o$ 的总机械能

$$E = z + h + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (1-4)$$

式中， z 、 h 、 g 、 V 、 α 分别为断面最低点的位置高度、水深、重力加速度、断面平均流速、动能修正系数。

若将基准面取在断面的最低点，则单位重量液体对该基准面 o_1-o_1 的机械能

$$e = h + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (1-5)$$

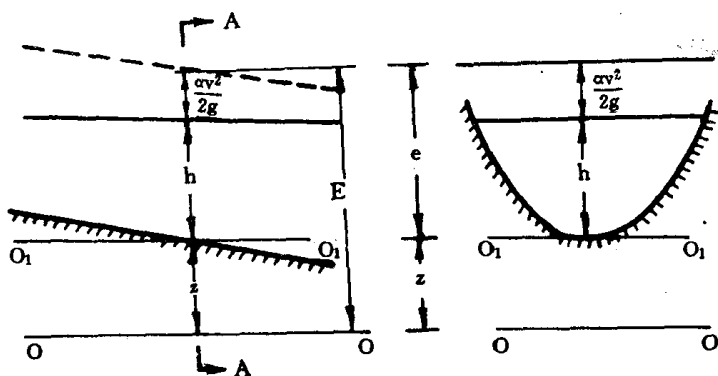


图 1-3 河道水流断面单位能量

为了区别河段水流对统一基准面 $o-o$ 的单位能量 E ，通常将对所研究断面最低点取作基准面 o_1-o_1 的单位能量 e 称为断面单位能量。 e 和 E 虽然都是水流单位能量，但它们的概念并不相同。由于水流沿程克服阻力要消耗能量，因此，单位能量 E 沿水流方向总是减少的，即 $dE/dl < 0$ (l 为流程)；而断面单位能量 e 却不一样，由于它们的基准面不固定，且水流速度及水深沿程变化，所以 e 沿水流方向可能增大 ($de/dl > 0$)、可能减少 ($de/dl < 0$)、也可能不变 ($de/dl = 0$)。这就给水流要素（特别是水深）沿程变化的分析与计算提供了一个有效的工具。因为，当明渠断面形状、尺寸和流量一定时，断面单位能量 e 仅是水深 h 的函数

$$e = h + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} = f(h) \quad (1-6)$$

式中， A 、 Q 分别为过水断面面积和流量。

绘出 $e=f(h)$ 曲线于图 1-4, 称为断面单位能量曲线。该曲线以 45° 线及 e 轴为渐近线, 并有一个极小值 e_{min} , 对应的水深 h_k 为临界水深, 断面单位能量曲线被这个极值点分为上下二支:

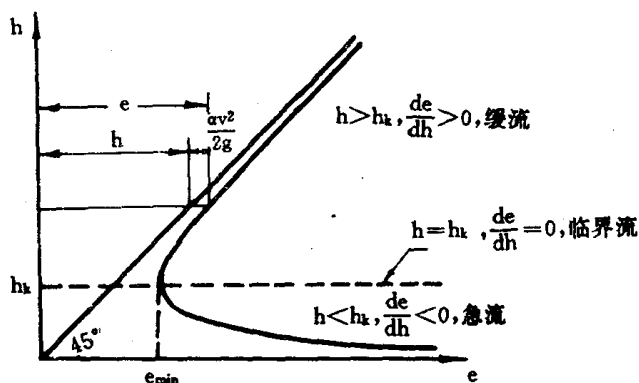


图 1-4 断面单位能量曲线

曲线上支, $h > h_k$, $\frac{de}{dh} > 0$, 能量的增加依靠水深的增大, 水流势缓, 为缓流;

曲线下支, $h < h_k$, $\frac{de}{dh} < 0$, 能量的增加依靠流速的增大, 水流势急, 为急流;

极值点处, $h = h_k$, $\frac{de}{dh} = 0$, 介于缓流与急流之间的临界状态, 为临界流。

二、流态的判别

按照上述由断面单位能量曲线区分水流流态的关系, 将

式 (1-6) 的 e 对 h 求导数

$$\frac{de}{dh} = \frac{d}{dh} \left(h + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \right) = 1 - \frac{\alpha Q^2 B}{gA^3} \quad (1-7)$$

令
$$Fr = \frac{\alpha Q^2 B}{gA^3} = \frac{\alpha V^2}{g\bar{h}} \quad (1-8)$$

式中, Fr 称为弗汝德数(Froude number); V 为断面平均流速; $\bar{h}$ 为断面平均水深。

则
$$\frac{de}{dh} = 1 - Fr \quad (1-9)$$

于是
$$\left. \begin{aligned} \frac{de}{dh} > 0, Fr < 1 & \text{ 为缓流} \\ \frac{de}{dh} < 0, Fr > 1 & \text{ 为急流} \\ \frac{de}{dh} = 0, Fr = 1 & \text{ 为临界流} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

可见, 弗汝德数可作为流态判别数。它的物理意义:

(1) 弗汝德数为水流中单位重量液体的动能对其平均势能比值的二倍, 即

$$Fr = \frac{\alpha V^2}{g\bar{h}} = 2 \left(\frac{\alpha V^2}{2g} / \bar{h} \right)$$

(2) 弗汝德数是无量纲数, 它是水流的惯性力与重力的比值, 即

$$[Fr] = \left[\frac{\alpha V^2}{g\bar{h}} \right] = \left[\frac{mV(V/L)}{mg} \right] = \left[\frac{\text{惯性力}}{\text{重力}} \right]$$

(3) 弗汝德数是水流流速 V 与微波波速 $\sqrt{g\bar{h}}$ 的比值, 于是, 也常常把 Fr 写成如下表达式

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g\bar{h}}} \quad (1-11)$$

由于弗汝德数能够反映水流运动中动能与势能、惯性力与重力、流速与波速的矛盾统一关系，所以它被广泛应用于各种流动条件(特别在重力场中)的水流分析当中。

三、临界水深

临界水深是当 $\frac{de}{dh} = 0$ 时的水深。于是，由式 (1-7) 可得

$$1 - \frac{\alpha Q^2 B_k}{g A_k^3} = 0$$

即

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A_k^3}{B_k} \quad (1-12)$$

式中， A_k 、 B_k 分别为对应于临界水深 h_k 的过水断面面积和水面宽度。这就是求临界水深的普遍式。

对于矩形断面，用 $B_k = b$ 及 $A_k = b h_k$ 代入式 (1-12)，得

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}} \quad (1-13)$$

式中， b 为矩形断面底宽。

四、临界坡度

临界坡度是指水流正常水深 h_0 恰等于临界水深 h_k 时的渠底坡度，可以用明渠均匀流输水能力的基本关系式求出，即

$$Q = AC \sqrt{Ri} \quad (1-14)$$

得

$$i_k = \frac{Q^2}{A_k^2 C_k^2 R_k} \quad (1-15)$$

也可以将临界水深的普遍式 (1-12) 代入式 (1-15)，写成

$$i_k = \frac{gX_k}{\alpha C_k^2 B_k} \quad (1-16)$$

式中, C_k 、 X_k 、 B_k 分别为对应于临界水深的谢才系数 ($\sqrt{m/s}$)、湿周 (m)、水面宽度 (m)。

$$C_k = \frac{1}{n} R_k^{1/6} \quad (1-17)$$

式中, n 为糙率; R_k 为对应于临界水深的水力半径 (m), $R_k = A_k / X_k$ 。

对于某一给定的渠道形式、尺寸和流量, 可以按式(1-15)或式(1-16)求出相应的临界坡度 i_k 。若实际渠底坡度 $i < i_k$ ($h_0 > h_k$), 此时渠底坡度称为缓坡; 若 $i > i_k$ ($h_0 < h_k$), 此时渠底坡度称为陡坡; 若 $i = i_k$ ($h_0 = h_k$), 此时渠底坡度称为临界坡。

§ 1-3 河道中的主流和副流

河道中的水流, 沿总的流动趋势运动的水体, 称为主流。除此之外, 还有伴随主流运动的副流, 副流是由于过水断面形状的改变或河湾的影响, 在水流内部形成的一种规模较大的旋转运动 (不包括紊流内部尺度较小的漩涡运动)。根据水流旋转轴的方向不同, 可以分为顺轴副流、横轴副流、立轴副流, 这些副流与主流组合成河道中极其复杂的水流现象。

一、顺轴副流

顺轴副流指绕河流纵向水平轴线运动的闭合水流。它可

以由弯道离心力的作用产生，也可以由地转作用产生，或者还可以因河流涨水、落水以及河床地形变化等因素产生。

1. 弯道环流

水流经过弯道的时候，作曲线运动，因而产生离心力（沿水深方向上大下小），与两侧水平压力合成后，形成沿水深具有方向改变的横向流速分布，因而出现断面上面流向与底流向相反的横向环流。环流方向，面流指向凹岸、底流指向凸岸，与主流合起来，就构成了整个弯曲河段的螺旋流运动（图 1—5）。*

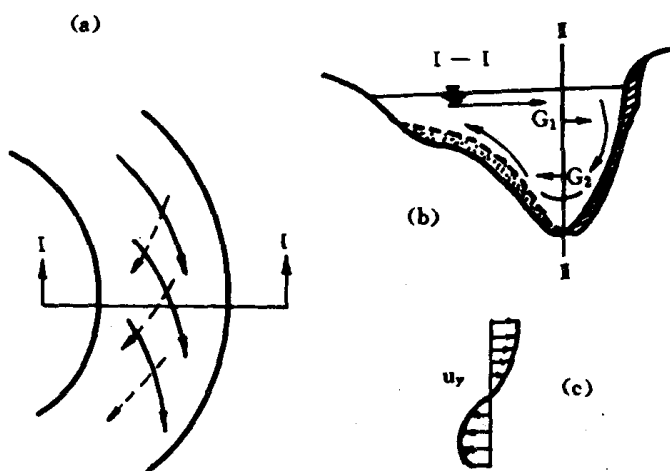


图 1—5 河流中的弯道环流

弯道环流是河道横向演变赖以实现的一个极其重要的直接因素。因为，表层较清的水体流向凹岸，使凹岸受到冲刷；从凹岸转向河底的水流，携带大量的泥沙，按螺旋流底流方

向到偏下游的凸岸落淤。可见，由于弯道环流的作用，会使河流弯曲段向更加弯曲的趋势演变。此外，弯道环流还对岸边引水口的淤积产生直接的影响。然而，认识了弯道环流的规律，就可以有效地加以利用，如做适当的工程，使生成的弯道环流实现良好的岸边取水、河流整治以及航道的浚深等等。关于河流弯道水流的运动规律，将在第五章专门论述。

2. 地转环流

河道中的水流，同其它处于地球表面运动的物体一样，会受到因地球自转而产生的柯里奥利斯力的作用。柯氏力属于质量力，受其作用，北半球河道水流偏向运动的右方，使靠右岸的水面增高（位于南半球的河道则相反），从而产生环流。

因柯氏力而产生的环流，在一般情况下，强度很小，可以忽略不计。但在它的长久持续地作用下，北半球的一些深水大河，右岸较左岸的冲刷现象更为严重，可能与柯氏力引起的环流有关。

3. 涨落水环流

在天然河道中，当出现洪水传播引起水位剧烈变化时，尽管是顺直河段，也会出现断面上水流的横比降。这是因为，河心水流受到的阻力小于岸边和滩地水流阻力。因此，河段水位上涨时，河心涨水快，水位高，出现河心水位高于两岸的横比降，从而形成表面水流由河心流向两岸、底层水流由两岸汇向河心的一对环流，与主流结合成一对冲刷两岸、淤积河底的螺旋流（图 1—6a）。与之相反，水位下落时，河心退水快，水位低，出现与涨水时相反的横比降和环流（图 1—6b），这对环流与主流合成的螺旋流使河底受冲、两岸淤积。