

HYDRAULIQUE FLUVIALE

河川水力学

格拉夫 阿廷拉卡 著 赵文谦 万兆惠 译



成都科技大学出版社

河川水力学

格 拉 夫 教 授 著
阿 廷 拉 卡 博 士

赵文谦 万兆惠 译

成都科技大学出版社

责任编辑 宗 年
封面设计 罗 光

河川水力学

格拉夫 阿廷拉卡 著 赵文谦 万兆惠 译

成都科技大学出版社出版发行

成都科技大学出版社激光照排部排版

成都市郫县税务师事务所印刷厂印刷

787×1092 1/16

印张:31.25

1997年12月第一版

1997年12月第一次印刷

印数:1—1100册

字数:728千字

ISBN7-5616-3624-5/TV·39 定价: 精 80.00 元
平 60.0 元

作者简介

本书作者系瑞士洛桑联邦工学院格拉夫(Walter Hans Graf)教授和他的
高级助手阿廷拉卡(M. S. Altinakar)博士。格拉夫教授
1936 年出生于奥地利,大学毕业后又就学于美国,1963
年在伯克利加州大学获得博士学位。先后在伯克利加州
大学、康乃尔大学和里海大学历任讲师、副教授和教授。
1973 年起至今一直在瑞士洛桑联邦工学院任教授兼水
力学实验室主任。阿廷拉卡博士作为主要助手长期工作
在格拉夫教授领导的水力学实验室,此外,他还是洛桑一家顾问公司的水力工
程部的主任工程师,主持过各种大型水利、水电和市政工程。



格拉夫教授是国际知名水力学专家,在水力学研究上卓有建树。他曾主编
过四部巨著,分别在美、法、荷等国出版:泥沙输移水力学(1971),湖泊水动力
学(1979),湖泊与水库水力学(1987),水动力学(1991)。1993 年和 1996 年与
阿廷拉卡博士合作先后编著出版了“河川水力学”的第 1 卷和第 2 卷。本书乃
是该两卷著作的合译本。

格拉夫教授在国际学术交流方面也卓有贡献,先后被中国的清华大学,台
湾大学,原苏联列宁格勒工学院,以及奥地利、意大利、日本、印尼、南非等国家
的大学聘为客座教授。曾多次获得国际水力研究协会(IAHR)、美国土木工程
师协会等学术团体的学术奖。1987 年在洛桑,他成功地主持承办了第 22 届国
际水力研究会大会。他的学术交流活动遍及世界许多国家。

格拉夫教授曾数次访问过中国,是我国同行学者熟知的老朋友。为了学术
交流和支持中国的教育,他慷慨同意无偿将这本两卷著作译为中文,并争取了
出版基金来支持译著的出版。

EAB04/08

译者前言

本书是格拉夫教授著作中一部很有特色的书,是作者数十年教学和研究积累的结晶。书中述及了河川水力学(亦可称做明渠水力学)中的最重要之点。内容既包含基本概念、基本理论和基本分析方法,也涉及实际工程应用的一些重要方面。在题材上包括了愈被人们关注的泥沙输移水力学以及物质在河渠中的混合扩散输移问题。尤为突出的是书中列有大量的计算实例和习题。

本书在论述和编排方式上也别具风格,论述带有讨论对话的气氛,重点突出而不是平铺直叙或面面俱到。

翻译本书的动因,是1995年秋赵文谦教授访问洛桑时,看到格拉夫教授正在准备1996年将出版的河川水力学的第2卷,当即对第2卷手稿和已出版的第1卷作了粗读,感到这是一本适合作水利学科研究生教材又对水利工程师们也很有用的好书。为了不使书的使用范围太窄,宜于译成中文出版。在格拉夫教授欣然答应之下,就作出了翻译此书的决定。特别值得提到的是,格拉夫教授不仅当即慷慨赠送版权,还答应大力争取出版基金来支持中译本的出版。这本书的中译本较快问世,正是有赖于格拉夫教授的支持。这里我们要对格拉夫教授表示由衷的感谢。

本书由赵文谦教授和万兆惠教授合译,其中第4、5、8章及附录由赵文谦译,第1、2、3、6、7章由万兆惠译。全书由赵文谦负责统稿。

感谢四川联合大学高速水力学国家重点实验室李克锋副教授协助赵文谦教授整理译稿。在出版付印过程中,李克锋副教授、黄勤生和邓云讲师以及郑永红博士、李崇明博士、王烜硕士为打字、贴图、校对都付出了辛勤的劳动,在此,向他们致衷心的感谢。

但愿这本书对广大青年学者有很好的帮助。

译者 于1997年5月

目 录

第一章 引 言	(1)
1.1 河槽	(1)
1.1.1 河槽的类型	(1)
1.1.2 河槽的几何形态	(2)
1.2 河槽中的水流	(3)
1.2.1 水流的类型	(3)
1.2.1 流区	(5)
1.3 流速分布	(6)
1.4 压力分布	(8)
1.4.1 均匀流	(9)
1.4.1 曲线流	(10)
第二章 水动力学基础	(11)
2.1 连续方程	(11)
2.2 能量方程	(12)
2.3 比能	(15)
2.3.1 比能曲线	(15)
2.3.2 流量曲线	(16)
2.3.3 临界水深	(17)
2.4 重力波	(19)
2.4.1 波速	(19)
2.4.2 波方程	(21)
2.4.3 具有波的流动	(22)
2.5 水动力学方程	(22)
2.5.1 运动方程	(22)

2.5.2	均匀流	(25)
2.5.3	非均匀流	(28)
2.6	流速分布	(31)
2.6.1	层流	(32)
2.6.2	紊流,光滑边壁	(32)
2.6.3	紊流,粗糙边壁	(33)
2.6.4	紊动特性	(38)
第三章	均匀流	(44)
3.1	水动力学方程	(44)
3.1.1	均匀流的概念	(44)
3.1.2	连续方程	(44)
3.1.3	运动方程	(45)
3.2	阻力系数	(46)
3.2.1	韦斯巴赫—达西系数	(47)
3.2.2	谢才系数	(49)
3.2.3	曼宁系数	(50)
3.2.4	综合糙率	(51)
3.2.5	床面形态	(52)
3.2.6	动床阻力系数	(53)
3.3	定床流量计算	(55)
3.3.1	输水能力	(55)
3.3.2	正常水深	(57)
3.3.3	复式断面	(57)
3.3.4	最大流量断面	(58)
3.4	动床流量计算	(59)
3.4.1	不淤流速	(59)
3.4.2	临界流速	(60)
3.4.3	切应力分布	(62)
3.4.4	稳定断面	(63)
3.5	弯道水流	(65)

3.5.1	超高	(65)
3.5.2	急流	(66)
3.5.3	水头损失	(67)
3.6	水面的不稳定性	(68)
3.6.1	滚波	(68)
3.6.2	掺气	(69)
3.7	例题与习题	(70)
3.7.1	例题	(70)
3.7.2	习题	(84)
第四章	非均匀流	(88)
4.1	渐变流	(88)
4.1.1	简化的圣维南方程	(88)
4.1.2	水面方程	(89)
4.1.3	临界底坡	(91)
4.2	水面线型式	(92)
4.2.1	缓坡明渠	(93)
4.2.2	陡坡明渠	(93)
4.2.3	临界底坡明渠	(96)
4.2.4	平底明渠	(96)
4.2.5	逆坡明渠	(96)
4.3	水面线计算	(97)
4.3.1	逐步近似法	(97)
4.3.2	直接积分法	(99)
4.3.3	图解积分法	(104)
4.4	急变流	(106)
4.4.1	堰及溢洪道	(106)
4.4.2	跌水	(110)
4.4.3	闸下出流	(112)
4.4.4	水跃	(113)
4.5	过渡段水流	(117)

4.5.1	渠底变化的明渠·····	(117)
4.5.2	变宽明渠·····	(118)
4.5.3	斜水跃·····	(121)
4.6	侧向入流 ·····	(124)
4.7	例题与习题 ·····	(127)
4.7.1	例题·····	(127)
4.7.2	习题·····	(168)
第五章	非恒定流·····	(172)
5.1	水动力学方程 ·····	(172)
5.1.1	圣维南方程·····	(172)
5.1.2	简化的圣维南方程·····	(175)
5.2	求解方法 ·····	(175)
5.2.1	特征线·····	(176)
5.2.2	特征线法·····	(177)
5.2.3	显式法·····	(180)
5.2.4	隐式法·····	(181)
5.3	运动波 ·····	(184)
5.3.1	水动力学方程·····	(184)
5.3.2	波的传播速度·····	(185)
5.4	扩散波 ·····	(187)
3.4.1	水动力学方程·····	(187)
3.4.2	衰减·····	(189)
5.5	洪水波 ·····	(190)
5.6	推进波 ·····	(191)
5.6.1	概念及实例·····	(191)
5.6.2	水动力学方程·····	(194)
5.6.3	波的传播速度·····	(195)
5.6.4	负波·····	(197)
5.7	例题与习题 ·····	(199)
5.7.1	例题·····	(200)

5.7.2	习题	(256)
第六章	泥沙输移	(258)
6.1	概论	(258)
6.1.1	概念	(258)
6.1.2	混合物的流动	(259)
6.1.3	泥沙输移的形式	(259)
6.1.4	问题的类型	(261)
6.2	水动力学方程	(261)
6.2.1	圣维南—爱克斯纳尔(Saint-Venant-Exnel)方程	(262)
6.2.2	扰动的传播	(263)
6.2.3	解析解	(265)
6.2.4	侵蚀与堆积	(266)
6.2.5	数值解	(270)
6.3	推移质运动	(271)
6.3.1	概念	(271)
6.3.2	理论基础	(271)
6.3.3	推移质输沙率关系式	(273)
6.3.4	颗粒级配,粗化	(278)
6.4	悬移质运动	(279)
6.4.1	概念	(279)
6.4.2	理论基础	(280)
6.4.3	悬移质输沙率关系式	(282)
6.5	总输沙率	(285)
6.5.1	概念	(285)
6.5.2	总输沙率关系式	(285)
6.5.3	关系式的应用	(287)
6.5.4	冲泻质	(289)
6.6	例题与习题	(290)
6.6.1	例题	(290)
6.6.2	习题	(366)

第七章 异重流	(368)
7.1 概念	(368)
7.1.1 异重流的描述	(368)
7.1.2 潜入点	(371)
7.2 水动力学方程	(372)
7.3 交界面曲线	(375)
7.4 掺入系数	(376)
7.5 异重流的头部	(379)
7.6 流速分布和含沙量分布	(381)
7.7 例题与习题	(383)
7.7.1 例题	(383)
7.7.2 习题	(397)
第八章 物质的传输与混合	(417)
8.1 理论基础	(417)
8.1.1 扩散	(417)
8.1.2 对流扩散	(420)
8.1.3 紊流对流扩散	(422)
8.1.4 扩散系数	(424)
8.2 扩散	(425)
8.2.1 瞬时源	(426)
8.2.2 连续源	(428)
8.3 层流中的对流扩散	(429)
8.3.1 瞬时源	(430)
8.3.2 连续源	(430)
8.4 紊流中的对流扩散	(431)
8.4.1 扩散系数	(432)
8.4.2 横向扩散	(437)
8.4.3 离散系数	(439)
8.4.4 纵向离散	(441)

8.4.5	有反应存在的离散.....	(443)
8.4.6	包含反应的物质传输.....	(446)
8.5	例题与习题	(450)
8.5.1	例题.....	(451)
8.5.2	习题.....	(474)
	符号表	(475)
	参考文献	(481)

第 1 章 引言

在这本河川水力学书中,我们将讨论在人工和天然河槽中具有受大气压力作用的自由表面的水流及其有关现象。在这里,我们把河川水力学看成是明渠水力学的同义语。在本章中,将首先讨论不同类型的河槽,以及与之相应的流区。随后,阐述流速分布和压力分布的概念。

本书最后几页列出了参考文献以及符号一览表。

1.1 河槽

1° 河槽是水在其中流动的一个输送系统,该水流的自由表面受到大气压力的作用。

2° 工程师常常遇到如下两类水力学问题:

对于一给定纵比降的明渠,输送一定的流量;

明渠的形状和尺寸有待确定。

1.1.1 河槽的类型(见图 1.1)

1° 要区分如下两类河槽:

i) 天然河槽,

ii) 人工明渠。

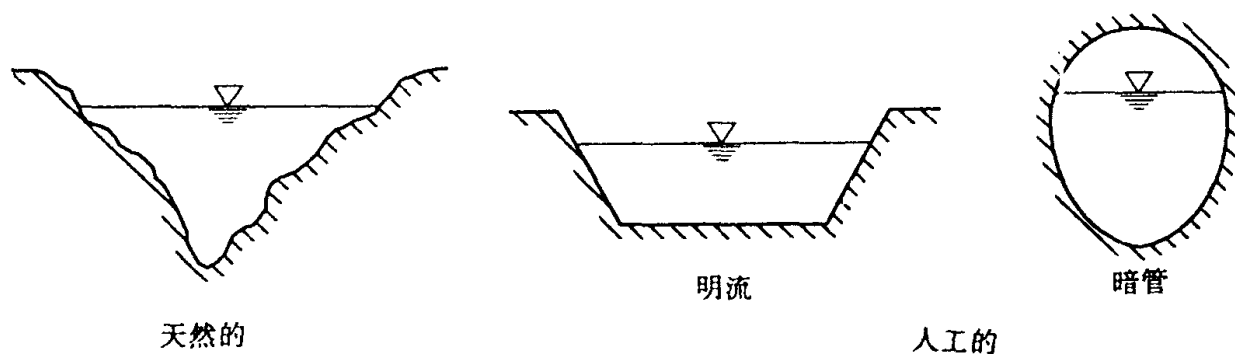


图 1.1 河槽的类型

2° 天然河槽是指在地球上(或在地下)天然存在的水道,诸如沟壑、溪流、急流、大小河流和河口。

这些河槽的几何形态和水力特性常常是相当不规则的。水力学理论中必须作出许多假定,因而,应用水力学理论只能给出近似的结果。

3° 人工明渠是人们在地面或地下修建的水道,诸如明渠(通航运河、电站引水渠、灌排水渠道)或水流没有充满全断面的暗沟(水力隧洞、流槽、排水沟、排污沟)。

这些渠槽的几何形状和水力特性一般是相当规则的。应用水力学理论可以得出相当符合实际的结果。

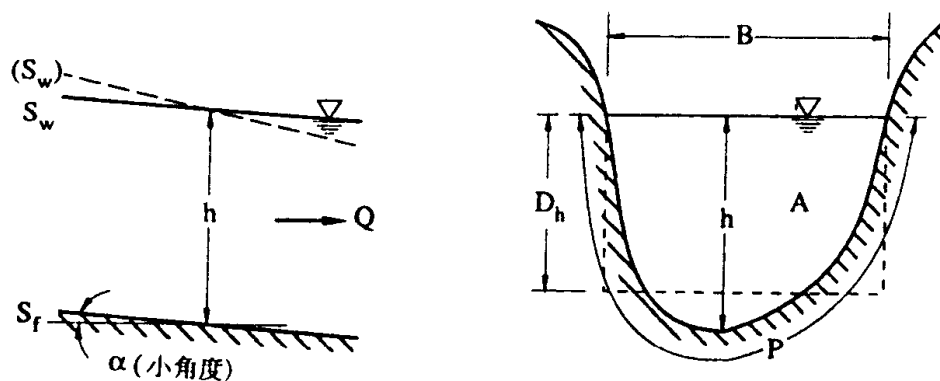


图 1.2 河槽断面的几何要素

1.1.2 河槽的几何形态(见图 1.2)

1° 河槽的横断面是指在垂直于水流方向的平面内河槽的断面。

断面面积,或更适当地称之为过水面积 A 是指为液体所占据的这部分断面面积。

2° 横断面、纵比降和糙率保持不变的河槽称之为棱柱形河槽;不然则称之为非棱柱形河槽。在棱柱形河槽中水深可以变化。

3° 过水面积 A 的几何要素如下:

i) 河槽的湿周 P ,是由水体与河床和边壁的接触线的长度所组成,但不包括自由表面。

ii) 水力半径 R_h ,是过水面积 A 与湿周 P 之比:

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (1.1)$$

湿周常被作为一个参考长度。

iii) 河槽的宽度 B 也就是水面的宽度。

iv) 河槽的水力深度 D_h 定义为:

$$D_h = \frac{A}{B} \quad (1.2)$$

v) 水深 h 若不另加定义,便被认为是最大水深。

4° 五种不同的河槽断面的几何因素计算公式见表 1.1(Chow, 1959, 21 页)。天然水道可以有相当不规则的几何形状,但它常可以相当接近地用梯形或抛物线形的断面来近似表达。

5° 除了几何因素以外,纵比降也是要考虑的,也即:

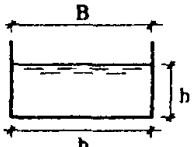
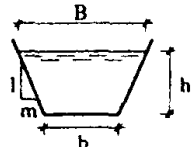
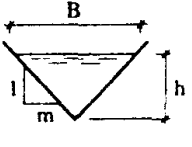
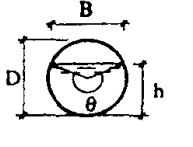
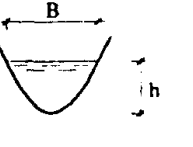
i) 河床(即河底)比降 S_f ,

ii) 水面(即测压管)比降 S_w 。

河床比降主要取决于河道的地形,一般比降很小,因而可以写成: $S_f = \tan \alpha \cong \sin \alpha$ 。

6° 湿周 P 可以由固定不能运动的河床(混凝土的,石的)组成,也可以由动床(泥沙颗粒)组成。

表 1.1 不同河槽断面的几何因素

					
	矩形	梯形	三角形	圆形	抛物线形
断面 A	$b h$	$(b + mh)h$	mh^2	$\frac{1}{8}(\theta - \sin \theta) D^2$	$\frac{2}{3} B h$
湿周 P	$b + 2h$	$b + 2h\sqrt{1+m^2}$	$2h\sqrt{1+m^2}$	$\frac{1}{2} \theta D$	$B + \frac{8}{3} \frac{h^2}{B}^*$
水力半径 R_h	$\frac{b h}{b + 2h}$	$\frac{(b + mh) h}{b + 2h\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{mh}{2\sqrt{1+m^2}}$	$\frac{1}{4} \left[1 - \frac{\sin \theta}{\theta} \right] D$	$\frac{2B^2 h}{3B^2 + 8h^2}^*$
宽度 B	b	$b + 2mh$	$2mh$	$\frac{(\sin \theta/2) D}{2 \sqrt{h(D-h)}}$	$\frac{3}{2} \frac{A}{h}$
水深 D_h	h	$\frac{(b + mh) h}{b + 2mh}$	$\frac{1}{2} h$	$\left[\frac{\theta - \sin \theta}{\sin \theta/2} \right] \frac{D}{8}$	$\frac{2}{3} h$

* 适用于 $0 < \xi \leq 1$, $\xi = 4h/B$; 若 $\xi > 1$, $P = \frac{B}{2} \left[\sqrt{1 + \xi^2} + \frac{1}{\xi} \ln(\xi + \sqrt{1 + \xi^2}) \right]$

1.2 河槽中的水流

- 1° 天然或人工河槽中的水流是具有自由表面的水流。自由表面是空气与水的界面，界面上的压力等于大气压力。
- 2° 明渠水流主要是由于河床的坡度（比降）所引起的，而封闭管路内的流动（Graf & Altinakar, 1991, 1 章）则是由于断面之间的压力差所引起的。

1.2.1 水流的类型

- 1° 可以根据水深 h 或 D_h 随时间和距离变化的情况对明渠水流进行分类：

$$D_h = f(t, x)$$

- 2° 随时间的变化（见图 1.3）

如果水流的平均流速 U ，点流速 u ，以及水深 h 或 D_h ，在方向和大小上均不随时间而变，则水流是恒定的，称之为恒定流或定常流。因而，设若沿程没有旁侧入流和出流的话，河槽不同断面处的流量也保持恒定：

$$US = Q \quad (1.3)$$

如果水深 $D_h(t)$ 以及其它因子随时间而变，则水流是不恒定的。因而，流量也不再是定

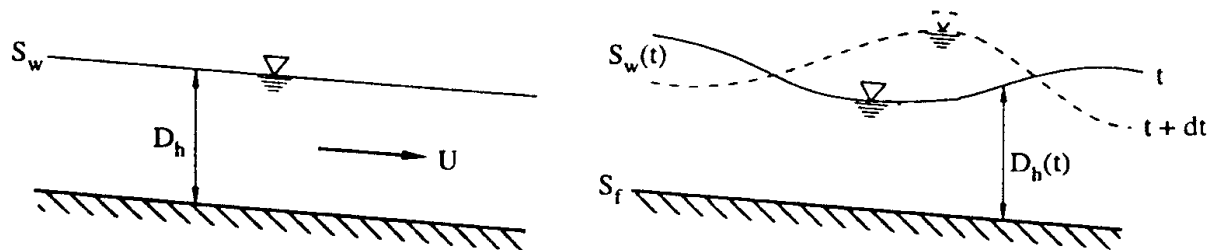


图 1.3 恒定流和非恒定流的示意图

常的了(见 2.1 节及式 2.6)。

严格说来,明渠水流很少是恒定的。但水流随时间的变化常常很缓慢,以致可以假定水流是恒定的,至少在相对较短的时间间隔内可以假定水流是恒定的。

3° 随空间的变化(见图 1.4)

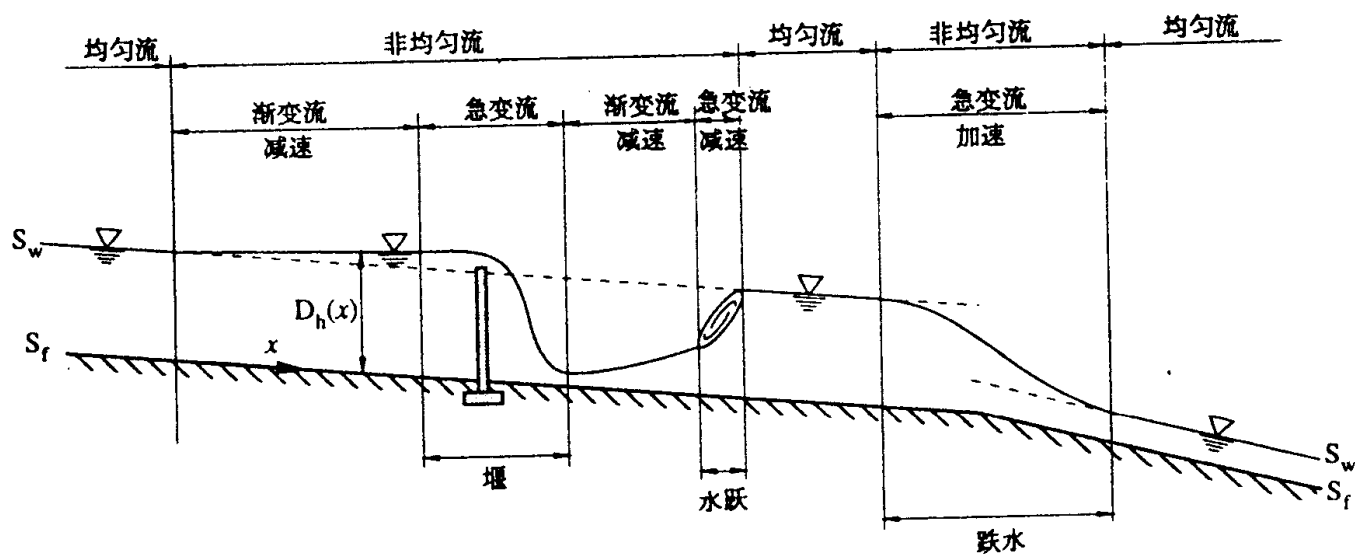


图 1.4 恒定均匀流和恒定非均匀流的示意图

如果水深 D_h 以及其它要素在河槽的各个断面都保持不变,则水流便是均匀的。于是底坡线便与自由水面平行,或 $S_f = S_w$ 。如果水深 $D_h(x)$ 及其它参数沿程变化,则水流是不均匀的。因而,底坡便不同于水面坡, $S_f \neq S_w$ 。

不均匀流可以是恒定的,也可以是不恒定的。

取决于流速沿水流方向的变化情况,不均匀流可以是加速流, $\frac{dU}{dx} > 0$, 也可以是减速流, $\frac{dU}{dx} < 0$ 。

如果水流是渐变流,则水深 $D_h(x) \cong D_h$ 及其它参数沿程缓慢变化。在一小段河槽内,

可以假定水流是准均匀的,流速 U 保持基本不变。

如果水流是急变的,则水深 $D_h(x)$ 及其它参数在一个相对较短的距离内有突然变化,有时还不连续,这一般发生在一个奇点附近,如经过一个堰,在河宽变化处,再如在水跃或跌水处。

4° 在河川水力学中可能遇到的水流的种类(见图 1.3 和图 1.4)可以归纳如下:

- 均匀的
- i) 恒定流
 - 非均匀的
 - 渐变流
 - 急变流
- ii) 非恒定流
 - 均匀的(很少)
 - 非均匀的
 - 渐变流
 - 急变流

1.2.2 流区

1° 明渠水流的物理过程基本上由以下几项力的相互作用所控制:

惯性力,

重力,

摩阻力(粘性及糙率)。

2° 其(简化的)运动方程(Graf & Altinakar, 1991, FR. 2 节)涉及如下几个无因次数:

i) 弗汝德数,即重力与惯性力的比值:

$$\frac{\rho g}{\rho U_c^2 / L_c} = \frac{gL_c}{U_c^2} = F_r^{-2} \quad \text{和} \quad F_r = \frac{U_c}{\sqrt{gL_c}} \quad (1.4)$$

ii) 雷诺数,即摩阻力与惯性力的比值:

$$\frac{\mu(U_c/L_c)}{\rho U_c^2 / L_c} = \frac{\nu}{U_c L_c} = R_c^{-1} \quad \text{和} \quad R_c = \frac{U_c L_c}{\nu} \quad (1.5)$$

除了以上二个无因次数以外,还有:

iii) 相对糙度,即粗糙突起高度 K_s 与一个特征长度之比:

$$\frac{K_s}{L_c} \quad (1.6)$$

U_c 和 L_c 是特征流速和特征长度;一般常取

$$U_c = U \quad \text{和} \quad L_c = R_h \quad \text{或} \quad L_c = D_h.$$

在明渠水力学中,一般定义如下无因次数:

$$F_r = \frac{U}{\sqrt{gD_h}}; \quad R_c = \frac{4R_h U}{\nu} \quad \text{或} \quad R_c = \frac{R_h U}{\nu}; \quad \frac{K_s}{D_h} \quad (1.7)$$

3° 雷诺数是用来将水流划分为(Graf & Altinakar, 1991, FR. 3 章):

层流 $R_c < 500$

紊流 $R_c > 2000$

过渡区 $500 < R_c < 2000$

各种人工渠道的无数试验结果(Chow, 1959, 10 页)表明:如果雷诺数 R_c 达到 2000, 水流便是紊流。

一般情况下明渠水流是紊流,并常常是粗糙边壁。