



普通高等教育“十二五”规划教材

水力学 (下册)

主 编 张志昌

副主编 魏炳乾 郝瑞霞



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

水力学 (下册)

主 编 张志昌

副主编 魏炳乾 郝瑞霞

内 容 提 要

《水力学》(上、下册)是为高等工科大学水利类、热动力类、土建类、环境工程类编写的水力学教材,上册内容包括:绪论,水静力学,水动力学的基本概念,液流形态和水头损失,液体三元流动基本理论,有压管道恒定流,有压管道非恒定流,明渠恒定均匀流。下册内容包括:明渠恒定非均匀流,明渠恒定急变流——水跃和水跌,边界层理论基础,堰顶溢流和孔流,泄水建筑物下游的水流衔接与消能,明渠非恒定流简介,渗流基础,动床水力学基础。全书附有例题、习题和应用图表。

本书不仅全面系统地介绍了水力学的基本理论,同时还包含了近几年该学科相关知识的最新研究成果。本书可作为水利水电工程及其他相关专业教师、学生和工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水力学. 下册 / 张志昌主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.7
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-8781-6

I. ①水… II. ①张… III. ①水力学—高等学校—教材 IV. ①TV13

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第132631号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 水力学 (下册)
作 者	主编 张志昌 副主编 魏炳乾 郝瑞霞
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 22印张 522千字
版 次	2011年7月第1版 2011年7月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

水力学是以水为主要对象研究液体运动规律以及应用这些规律解决实际工程问题的科学，是水利水电工程、热能动力工程、给排水工程、环境工程、航运海港工程的基础理论，同时也是土建工程、机械工程、化学工程的必修课程。

在教材编写中，注重应用国内外最新科研成果。例如在有压管道的非恒定流、明渠恒定急变流、边界层理论基础、泄水建筑物下游水流的衔接与消能中应用了国内的最新研究成果，在堰顶溢流和孔流中应用了国际标准和我国测流规范的成果，并首次详细地把边界层理论应用于明渠测流中。这也是本教材的一个显著特点。

《水力学》（上、下册）主要内容包括：绪论，水静力学，水动力学的基本概念、液流形态和水头损失，液体三元流动基本理论，有压管道恒定流，有压管道非恒定流，明渠恒定均匀流，明渠恒定非均匀流，明渠恒定急变流——水跃和水跌，边界层理论基础，堰顶溢流和孔流，泄水建筑物下游的水流衔接与消能，明渠非恒定流简介，渗流基础，动床水力学基础，同时，附有例题、习题和应用图表。

《水力学》（上、下册）由张志昌主编，李国栋、李治勤为上册副主编，魏炳乾、郝瑞霞为下册副主编。其中张志昌编写上册第1~4章、第6章、下册第1章、第3~5章，魏炳乾编写下册第2章和第8章，李国栋编写上册第5章和第7章，李治勤编写上册第8章和下册第6章，郝瑞霞编写下册第7章。

本书的出版得到了水力学课程国家教学团队建设资金、西安理工大学教材建设基金及陕西省国家重点学科建设专项基金的资助。

由于时间和水平所限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2011年3月

目录

前言

第 1 章 明渠恒定非均匀流	1
1.1 概述	1
1.2 明渠水流的三种流态	1
1.3 明渠恒定非均匀流的微分方程	8
1.4 棱柱体明渠恒定非均匀渐变流的水面曲线分析	11
1.5 水面曲线分析的一般原则和步骤	18
1.6 控制断面发生的位置	19
1.7 明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算	21
1.8 天然河道水面曲线的计算	46
1.9 弯道水流	55
习题	61
第 2 章 明渠恒定急变流——水跃和水跌	69
2.1 概述	69
2.2 水跃——急流到缓流的过渡	69
2.3 棱柱体水平明渠的水跃方程	71
2.4 棱柱体水平明渠中水跃共轭水深的计算	72
2.5 棱柱体水平明渠中水跃方程的验证	77
2.6 棱柱体水平明渠中水跃的长度	78
2.7 棱柱体水平明渠中水跃的能量损失	79
2.8 斜坡上的水跃	83
2.9 非棱柱体明渠中的水跃	84
2.10 水跌——缓流到急流的过渡	86
习题	87
第 3 章 边界层理论基础	91
3.1 边界层的概念	91
3.2 边界层几种厚度的定义	93
3.3 边界层微分方程	96

3.4	边界层的动量积分方程式	98
3.5	平板层流边界层的解法	101
3.6	平板紊流边界层	107
3.7	明流边界层	117
3.8	边界层的分离现象及绕流阻力	120
	习题	125
第4章	堰顶溢流和孔流	131
4.1	概述	131
4.2	薄壁堰的水力计算	134
4.3	实用溢流堰	139
4.4	宽顶堰	150
4.5	流线型宽顶堰流量的计算	159
4.6	孔口出流	163
4.7	管嘴出流	170
4.8	闸孔出流	173
	习题	184
第5章	泄水建筑物下游的水流衔接与消能	192
5.1	概述	192
5.2	底流消能的水力条件	194
5.3	消力池的水力计算	198
5.4	挑流消能	214
5.5	面流消能	220
5.6	消力戽消能	225
	习题	232
第6章	明渠非恒定流简介	240
6.1	概述	240
6.2	波速和波流量	242
6.3	明渠非恒定渐变流的基本方程	245
6.4	明渠非恒定渐变流的特征线法	249
	习题	254
第7章	渗流基础	256
7.1	渗流的基本概念	256
7.2	渗流的基本定律——达西定律	258
7.3	渗流运动的微分方程	263
7.4	地下河槽中恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	265
7.5	承压含水层中渗流的稳定运动	271
7.6	地下水向集水建筑物——井的运动	273

7.7 均质土坝的渗流	278
7.8 利用流网法求解平面渗流	282
7.9 渗流的实验方法	284
7.10 岩体渗流	286
习题	287
第 8 章 动床水力学基础	294
8.1 泥沙和浑水的主要特性	294
8.2 河渠泥沙的基本运动方式	304
8.3 推移质运动	305
8.4 悬移质运动	327
习题	337
参考文献	342

第 1 章 明渠恒定非均匀流

1.1 概 述

《水力学》(上册)第 8 章讲了明渠恒定均匀流动,实际上,人工渠道或天然河道中的水流大多数是非均匀流。这是因为工程中常会遇到明渠底坡或粗糙系数沿程变化,或渠道的横断面形状(或尺寸)沿程变化,或在明渠中修建水工建筑物(闸、桥梁、涵洞等)使明渠中的流速和水深发生变化,这些均会在明渠中形成非均匀流。

非均匀流的特点是明渠的底坡、水面线、总水头线彼此互不平行。也就是说,水深和断面平均流速 v 沿程变化,流线间互不平行,水力坡度线、测压管水头线和底坡线彼此间不平行,如图 1.1 所示。

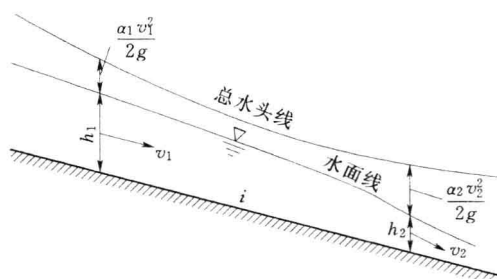


图 1.1

明渠非均匀流又分为非均匀渐变流和非均匀急变流两种情况。在明渠非均匀流中,若流线是接近互相平行的直线,或流线间夹角很小,流线的曲率半径很大,这种水流称为非均匀渐变流或缓变流,非均匀渐变流的测压管水头线与水面线重合,所以测压管坡度即为水面坡度。如果流线间互不平行,或流线间的夹角很大,流线的曲率半径很小,这种水流称为明渠非均匀急变流。

在明渠均匀流中,流量 $Q=AC\sqrt{Ri}$,当 $i=0$ 或 $i<0$ 时,该式失去物理意义,正常水深也不复存在。这就是说在平坡和逆坡渠道中,实际上不可能产生均匀流,但非均匀流则在顺坡、平坡和逆坡的渠道中都能够发生。

研究明渠非均匀流的主要任务包括以下内容。

- (1) 定性分析水面线。
- (2) 定量计算水面线。

分析和计算水面线的目的就是确定明渠的边墙高度,以及回水淹没的范围等。

1.2 明渠水流的三种流态

明渠水流由于具有自由水面而与有压流不同,具有独特的水流流态。一般明渠水流有三种流态,即缓流、临界流和急流。

观察一种水流现象,如果在静止的水中沿铅垂方向丢下一块石子,水面将产生一个微小的波动,这个波动以石子的着落点为中心,以一定的速度 v_w 向四周传播,平面上的波

形将是一连串的同心圆，如图 1.2 (a) 所示。这种在静止水中传播的微波速度 v_w 称为相对波速。

如果把石子投入流动的明渠均匀流中，则波传播的速度应是水流的速度与相对波速的向量和。当水流断面的平均流速 v 小于相对波速 v_w 时，微波将以绝对速度 $v'_w = v - v_w$ 向上游传播，同时又以绝对速度 $v'_w = v + v_w$ 向下游传播，这种水流称为缓流，如图 1.2 (b) 所示。当水流断面的平均流速 v 等于相对波速 v_w 时，微波向上游传播的绝对速度 $v'_w = 0$ ，而向下游传播的绝对速度 $v'_w = 2v_w$ ，如图 1.2 (c) 所示，这种水流称为临界流。当水流断面平均流速 v 大于相对波速 v_w 时，微波只以绝对速度 $v'_w = v + v_w$ 向下游传播，而对上游水流不发生任何影响，这种水流称为急流，如图 1.2 (d) 所示。

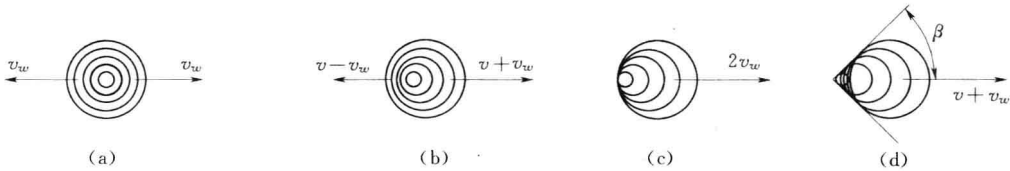


图 1.2

在日常生活中，大家凭感性认识也知道水流有缓流和急流之分。一般缓流中水深较大，流速较小，当在缓流渠道中有障碍物时将会产生干扰波，这时干扰波既能向上游传播也能向下游传播。急流中水深较浅，流速较大，当在急流渠道中遇障碍物时，同样也产生干扰波，但这种干扰波只能向下游传播。可以想象，在缓流和急流之间还存在另一种流动，那就是临界流，但临界流的流动形态不稳定。

下面介绍判别流态的几种方法。

1.2.1 波速法

波速法是只要比较水流的断面平均流速 v 与微波的相对速度 v_w 的大小，就可以判断干扰波是否会向上游传播，也可以判断水流是属于哪一种流态。

$v < v_w$ 时，水流为缓流，干扰波能向上游传播；

$v = v_w$ 时，水流为临界流，干扰波不能向上游传播；

$v > v_w$ 时，水流为急流，干扰波不能向上游传播。

下面推导微波的相对速度的计算公式。

设有一任意形状的平底棱柱形明渠，渠内为静水，水深为 h ，水面宽度为 B ，断面面积为 A 。用一竖直平板依一定的速度向左拨动一下，则在平板的左侧将激起一个干扰的微波。微波的波高 Δh ，以波速 v_w 向左移动，如图 1.3 所示。观察微波的传播，波形所到之处将带动槽内的水流运动，这时某一点的水流流速将是随时间而变化的。这本是一个非恒定流问题，但如果将参照系取在波上，即观察者处于波的位置上，这时，相对于这个动坐标系，波是静止的，而水流则以波速 v_w 向右运动。这就像人们坐在火车上观察到车厢是不动的，而窗外铁路沿线的树木则以车速向后运动一样，这样流动变成了恒定流，而水深沿程变化，是非均匀流动。

以槽底为基准面，取相距很近的断面 1—1 和断面 2—2 建立连续方程和能量方程，则

$$Av_w = (A + \Delta A)v_2$$

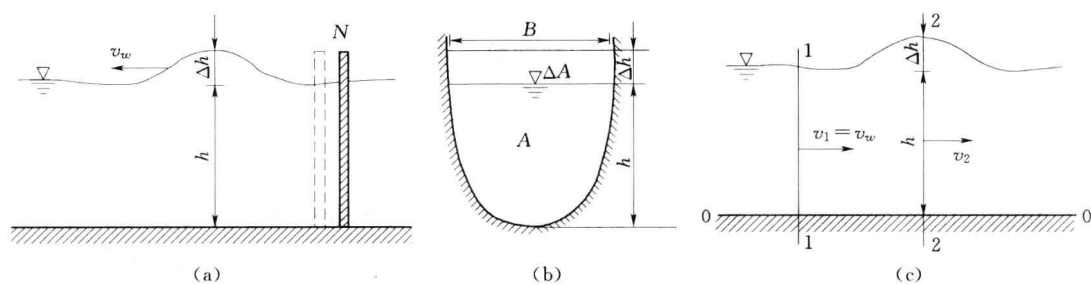


图 1.3

$$v_2 = \frac{A}{A + \Delta A} v_w$$

忽略摩阻力，写断面 1—1 和断面 2—2 的能量方程，取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ ，则

$$h + \frac{v_w^2}{2g} = (h + \Delta h) + \frac{v_2^2}{2g} = (h + \Delta h) + \left(\frac{A}{A + \Delta A}\right)^2 \frac{v_w^2}{2g}$$

将 $\Delta A = B\Delta h$ 代入上式解出

$$v_w = \sqrt{\frac{2g(A/B + \Delta h)^2}{2A/B + \Delta h}} \quad (1.1)$$

对于微波，波高 $\Delta h \ll A/B$ （即断面平均水深），则上式可简化为

$$v_w = \sqrt{gA/B} = \sqrt{g\bar{h}} \quad (1.2)$$

式中： $\bar{h} = A/B$ 。

对于矩形断面， $A = Bh$ ，则

$$v_w = \sqrt{gh} \quad (1.3)$$

在断面平均流速为 v 的水流中，微波传播的绝对速度 v'_w 应是静水中的相对波速 v_w 与水流速度的代数和，即

$$v'_w = v \pm v_w = v \pm \sqrt{g\bar{h}} \quad (1.4)$$

式中：微波顺水流方向传播的绝对速度用“+”号，微波逆水流方向传播的绝对速度用“-”号。

1.2.2 弗劳德数法

水力学中常用无量纲数作为判别流动特性的标准。由于缓流和急流取决于流速和波速的相对大小，所以用流速 v 与波速 v_w 的比值作为判别缓流和急流的标准，把流速与波速的比值称为弗劳德数，以 Fr 表示，即

$$Fr = \frac{v}{v_w} = \frac{v}{\sqrt{gA/B}} = \frac{v}{\sqrt{g\bar{h}}} \quad (1.5)$$

显然，对临界流来说， $v = v_w$ ，弗劳德数恰好等于 1，因此可以用弗劳德数来判别明渠水流的流态，即

$Fr < 1$ ，水流为缓流

$Fr = 1$ ，水流为临界流

$Fr > 1$, 水流为急流

弗劳德数在水力学中是一个极其重要的判别数, 将 Fr 改写为

$$Fr = \sqrt{\frac{2 \frac{v^2}{2g}}{h}} \quad (1.6)$$

由式 (1.6) 可以看出, 弗劳德数是表示过水断面单位重量液体平均动能与平均势能之比的二倍开平方, 随着这个比值大小的不同, 反映了水流流态的不同, 当水流的平均势能等于平均动能的二倍时, 弗劳德数 $Fr=1$, 水流为临界流。弗劳德数愈大, 意味着水流的平均动能所占的比例愈大。

弗劳德数的力学意义为水流的惯性力与重力两种作用力的对比关系, 这可以由量纲分析得到。设水流中某点的质量为 dm , 流速为 u , 则它所受的惯性力 F 的量纲为

$$[F] = [dm \frac{du}{dt}] = [dm \frac{du}{dx} \frac{dx}{dt}] = [\rho l^3 \frac{v}{l} v] = [\rho l^2 v^2]$$

重力的量纲为

$$[G] = [gdm] = [\rho g l^3]$$

而惯性力与重力之比开平方的量纲式为

$$\left[\frac{F}{G}\right]^{1/2} = \left[\frac{\rho l^2 v^2}{\rho g l^3}\right]^{1/2} = \left[\frac{v}{\sqrt{gl}}\right]$$

这个比值的量纲式与弗劳德数相同, 当这个比值等于 1 时, 恰好说明惯性力与重力作用相等, 水流是临界流。当 $Fr > 1$ 时, 说明惯性力作用大于重力的作用, 惯性力对水流起主导作用, 这时水流处于急流状态。当 $Fr < 1$ 时, 惯性力作用小于重力的作用, 这时重力对水流起主导作用, 水流处于缓流状态。

综上所述可以看出, 综合反映水流流速和水深大小的弗劳德数 Fr , 其数值是小于 1 还是大于 1, 可以作为判别明渠水流是缓流还是急流的标准, 故弗劳德数 Fr 又称流态判别数。

1.2.3 断面比能法

明渠中水流的流态也可以从能量的角度来分析。如图 1.4 所示为一明渠渐变流, 若以 $0-0$ 为基准面, 则过水断面上单位重量液体所具有的总能量为

$$E = z_0 + h \cos \theta + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (1.7)$$

式中: θ 为明渠底面对水平面的夹角。

若以某断面的最低点 $0'-0'$ 为基准面, 所计算得到的单位能量称为断面比能, 用 E_s 表示, 即

$$E_s = h \cos \theta + \frac{\alpha v^2}{2g} = h \cos \theta + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \quad (1.8)$$

不难看出, 断面比能 E_s 与单位液体总能量 E 的区别是:

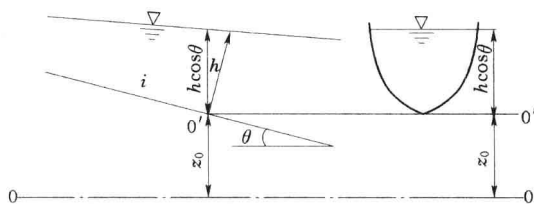


图 1.4

(1) 断面比能 E_s 是总水头 E 中的一部分, 两者相差的数值乃是两个基准面之间的高差 z_0 。

(2) 由于有能量损失, E 总是沿流程减小的, 即 $dE/ds < 0$, 但 E_s 却不同, 可以沿流程减小, 不变甚至增加。

证明如下:

如图 1.5 所示, 断面比能沿流程 s 的变化可写成

$$\frac{dE_s}{ds} = \frac{dE}{ds} - \frac{dz_0}{ds}$$

因为 $dz_0/ds = -i$, $dE/ds = -dh_w/ds = -J$, 故

$$\frac{dE_s}{ds} = i - J$$

在明渠均匀流中, 水力坡度 J 等于渠底坡线, 即 $i = J$, $dE_s/ds = 0$, 说明断面比能 E_s 沿程不变; 在明渠非均匀流中, 对于底坡 $i = 0$ 和 $i < 0$, 则 $dE_s/ds < 0$, 说明断面比能沿程减小。在顺坡渠道中, $i > 0$, 因为是非均匀流, $i \neq J$, 这时要看能坡 $J = -dE/ds$ 与底坡 i 的相对大小来决定。如果水流的能量损失强度 (坡度) $J < i$, 则 $dE_s/ds > 0$, 这时断面比能沿程增加, 反之, 如果 $J > i$, 则 $dE_s/ds < 0$, 断面比能沿程减小。由此可见, 断面比能沿程变化表示着明渠水流的不均匀程度。

对于坡度较小的渠道, 当 $\theta < 6^\circ$ 时, $\cos\theta \approx 1$, 则式 (1.8) 变为

$$E_s = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \quad (1.9)$$

由式 (1.9) 可知, 当流量 Q 、断面形状及尺寸一定时, 断面比能 E_s 只是水深 h 的函数, 即 $E_s = f(h)$, 称 $E_s = h + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2}$ 为断面比能函数, 由此函数画出的曲线称为断面比能曲线。

如果以纵坐标表示水深 h , 以横坐标表示比能 E_s , 则一定流量下所论断面的比能随水深的变化规律可以用 $h-E_s$ 比能曲线表示出来。从式 (1.9) 可以看出, 当 $h \rightarrow 0$ 时, $v \rightarrow \infty$, $v^2/2g \rightarrow \infty$, 则 $E_s \rightarrow \infty$, 比能曲线必以横坐标为渐近线; 当 $h \rightarrow \infty$ 时, $v \rightarrow 0$, $v^2/2g \rightarrow 0$, 而 $E_s \rightarrow \infty$, 比能曲线必以 45° 直线 oN 为渐近线。在给定流量下计算不同水深的比能, 可以点绘出 $h-E_s$ 曲线, 如图 1.6 所示。

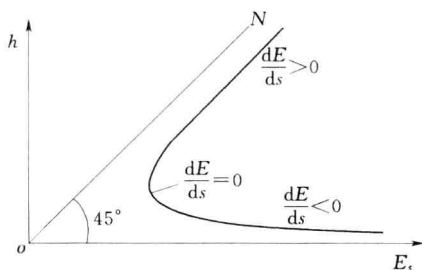


图 1.6

在水深从 0 增加到 ∞ 时, 比能 E_s 值从 ∞ 减小再增加到 ∞ , 则必有一个 E_s 的最小值, 此值可以由 $dE_s/dh = 0$ 求得, 对式 (1.9) 求得

$$\frac{dE_s}{dh} = \frac{d}{dh} \left(h + \frac{\alpha Q^2}{2gA^2} \right) = 1 - \frac{\alpha Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dh}$$

因为过水断面上 $dA/dh = B$, B 为过水断面的水面宽度, 代入上式得

$$\frac{dE_s}{dh} = 1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g A^3} = 1 - \frac{\alpha v^2}{gA/B}$$

若取 $\alpha=1$ ，上式可写成

$$\frac{dE_s}{dh} = 1 - Fr^2 \quad (1.10)$$

式 (1.10) 说明，明渠水流的断面比能随水深的变化规律取决于断面上的弗劳德数。对于缓流， $Fr < 1$ ，则 $dE_s/dh > 0$ ，相当于比能曲线的上支，断面比能随水深的增加而增加；对于急流， $Fr > 1$ ，则 $dE_s/dh < 0$ ，相当于比能曲线的下支，断面比能随水深的增加而减小；对于临界流， $Fr = 1$ ，则 $dE_s/dh = 0$ ，相当于比能曲线上、下支的分界点，断面比能为最小。于是用断面比能判别流动类型的标准为

$$\frac{dE_s}{dh} > 0, \text{ 水流为缓流}$$

$$\frac{dE_s}{dh} = 0, \text{ 水流为临界流}$$

$$\frac{dE_s}{dh} < 0, \text{ 水流为急流}$$

1.2.4 临界水深法

相应于断面比能最小值的水深称为临界水深，以 h_k 表示。将式 (1.9) 对水深求导数，并令其等于零，即可求得临界水深所应满足的条件

$$\frac{dE_s}{dh} = 1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g A^3} = 0 \quad (1.11)$$

整理上式得

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{A_k^3}{B_k} \quad (1.12)$$

式中：下标 k 表示相应于临界水深时的水力要素。

当流量和过水断面形状及尺寸给定时，利用式 (1.12) 即可求得临界水深。由此得用临界水深法判别流动类型的标准为

$$h > h_k, \text{ 水流为缓流}$$

$$h = h_k, \text{ 水流为临界流}$$

$$h < h_k, \text{ 水流为急流}$$

下面介绍矩形断面和梯形断面临界水深的求法。

1. 矩形断面

设矩形断面宽度为 b ，则 $B_k = b$ ， $A_k = bh_k$ ，代入式 (1.12) 后可解出临界水深公式为

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}} \quad (1.13)$$

或

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}} \quad (1.14)$$

式中： $q = Q/b$ 称为单宽流量。

对上式进一步分析得出

$$h_k^3 = \frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\alpha (h_k v_k)^2}{g}$$

其中, $q = h_k v_k$, 由上式得 $h_k = \frac{\alpha v_k^2}{g}$, 或

$$\frac{\alpha v_k^2}{2g} = \frac{h_k}{2} \quad (1.15)$$

即在临界流时, 断面比能为

$$E_{smin} = h_k + \frac{\alpha v_k^2}{2g} = h_k + \frac{h_k}{2} = \frac{3h_k}{2} \quad (1.16)$$

2. 梯形断面

对于等腰梯形断面, 断面面积和水面宽度为

$$A_k = (b + mh_k)h_k$$

$$B_k = b + 2mh_k$$

取 $\alpha = 1$, 则由式 (1.12) 得

$$\frac{(b + mh_k)^3 h_k^3}{b + 2mh_k} = \frac{Q^2}{g} \quad (1.17)$$

由式 (1.17) 得 h_k 的迭代式为

$$h_k = \left(\frac{Q^2}{g} \right)^{1/3} \frac{(b + 2mh_k)^{1/3}}{b + mh_k} \quad (1.18)$$

1.2.5 底坡法

在流量、断面形状及尺寸一定的棱柱体渠道中, 均匀流水深 h_0 恰好等于临界水深 h_k 时的坡度定义为临界坡度, 记为 i_k 。由均匀流公式

$$Q = C_k A_k \sqrt{R_k i_k}$$

将上式与式 (1.12) 联立得

$$i_k = \frac{g A_k}{\alpha C_k^2 B_k R_k} = \frac{g \chi_k}{\alpha C_k^2 B_k} \quad (1.19)$$

式中: R_k 、 χ_k 、 C_k 是渠中水深为临界水深时所对应的水力半径、湿周和谢才系数。

由式 (1.19) 可以看出, 明渠的临界底坡 i_k 与断面形状尺寸、流量及渠道的粗糙系数有关, 而与渠道的实际坡度无关。因此, 临界底坡 i_k 并不是实际存在的渠道底坡, 它只是为便于分析非均匀流而引入的一个概念。

一个底坡为 i 的明渠, 在同流量、同断面尺寸和同粗糙系数的情况下, 与其相应的临界底坡相比较, 可能有三种情况, 即 $i < i_k$, $i = i_k$ 和 $i > i_k$, 根据可能出现的不同情况, 可将明渠的底坡分为三类:

$i < i_k$, 为缓坡

$i = i_k$, 为临界坡

$i > i_k$, 为陡坡

在明渠均匀流中, 若 $i < i_k$, 则正常水深 $h_0 > h_k$, 若 $i > i_k$, 则 $h_0 < h_k$, 若 $i = i_k$, 则 $h_0 = h_k$ 。所以在明渠均匀流中, 也可以用正常水深与临界水深相比较判别流态, 即

$h_0 > h_k$, 水流为缓流

$h_0 = h_k$, 水流为临界流

$h_0 < h_k$, 水流为急流

必须再一次强调, 这种判别只适应于明渠均匀流动, 对于非均匀流动就不一定了。

【例题 1.1】 有一浆砌石护面的梯形渠道, 边坡系数 $m=1.5$, 粗糙系数 $n=0.025$, 底坡 $i=0.0004$, 底宽 $b=5\text{m}$, 当通过流量 $Q=8\text{m}^3/\text{s}$ 时, 渠中正常水深 $h_0=1.4\text{m}$, 试用所学的方法判别渠中的流动类型。

解:

(1) 波速法

$$A = (b + mh_0)h_0 = (5 + 1.5 \times 1.4) \times 1.4 = 9.94 (\text{m}^2)$$

$$B = b + 2mh_0 = 5 + 2 \times 1.5 \times 1.4 = 9.2 (\text{m})$$

渠中流速为 $v = Q/A = 8/9.94 = 0.805 (\text{m/s})$

渠中波速为 $v_w = \sqrt{gA/B} = \sqrt{9.8 \times 9.94/9.2} = 3.254 (\text{m/s})$

因为 $v < v_w$, 所以水流是缓流。

(2) 弗劳德数法

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gA/B}} = \frac{0.805}{3.254} = 0.247 < 1$$

水流为缓流。

(3) 断面比能法

$$\frac{dE_s}{dh} = 1 - Fr^2 = 1 - 0.247^2 = 0.939 > 0$$

水流为缓流。

(4) 临界水深法

$$h_k = \left(\frac{Q^2}{g}\right)^{1/3} \frac{(b + 2mh_k)^{1/3}}{b + mh_k} = \left(\frac{8^2}{9.8}\right)^{1/3} \frac{(5 + 2 \times 1.5h_k)^{1/3}}{5 + 1.5h_k} = 1.8692 \times \frac{(5 + 3h_k)^{1/3}}{5 + 1.5h_k}$$

迭代求得 $h_k = 0.6\text{m}$ 。因为 $h_0 = 1.4\text{m} > h_k = 0.6\text{m}$, 水流为缓流。

(5) 底坡法。由临界水深法已求得 $h_k = 0.6\text{m}$, 则

$$A_k = (b + mh_k)h_k = (5 + 1.5 \times 0.6) \times 0.6 = 3.54 (\text{m}^2)$$

$$B_k = b + 2mh_k = 5 + 2 \times 1.5 \times 0.6 = 6.8 (\text{m})$$

$$\chi_k = b + 2\sqrt{1 + m^2}h_k = 5 + 2\sqrt{1 + 1.5^2} \times 0.6 = 7.163 (\text{m})$$

$$R_k = A_k/\chi_k = 3.54/7.163 = 0.4942 (\text{m})$$

$$C_k = \frac{1}{n}R_k^{1/6} = \frac{1}{0.025} \times 0.4942^{1/6} = 35.567$$

$$i_k = \frac{g\chi_k}{\alpha C_k^2 B_k} = \frac{9.8 \times 7.163}{1 \times 35.567^2 \times 6.8} = 0.00816$$

因为 $i = 0.0004 < i_k$, 水流为缓流。

1.3 明渠恒定非均匀流的微分方程

如图 1.7 所示底坡为 i 的明渠渐变流中, 沿水流方向任取一微分流段 ds , 设上游断面

水深为 h ，水位为 z ，断面平均流速为 v ，河底高程为 z_0 ；由于非均匀流中各种水力要素沿流程变化，所以下游断面 2—2 的水深为 $h+dh$ ，水位为 $z+dz$ ，流速为 $v+dv$ ，河底高程为 z_0+dz_0 ，对断面 1—1 和断面 2—2 写能量方程

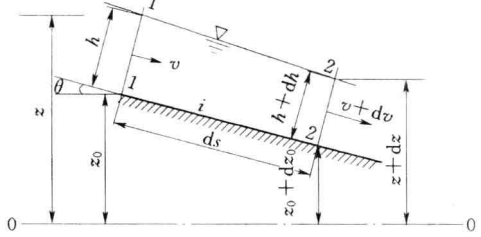


图 1.7

$$\begin{aligned} z_0 + h \cos\theta + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v^2}{2g} \\ = (z_0 + dz_0) \\ + (h + dh) \cos\theta + \frac{p_a}{\gamma} + \frac{\alpha_2 (v + dv)^2}{2g} \\ + dh_f + dh_j \end{aligned} \quad (1.20)$$

令 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ ， $\frac{\alpha(v+dv)^2}{2g} = \frac{\alpha}{2g} [v^2 + 2vdv + (dv)^2]$ ，代入上式，忽略高阶微量得

$$dz_0 + \cos\theta dh + d\left(\frac{\alpha v^2}{2g}\right) + dh_f + dh_j = 0 \quad (1.21)$$

式 (1.21) 即为明渠恒定非均匀流的基本方程。

式中： $d\left(\frac{\alpha v^2}{2g}\right)$ 表示微分流段内流速水头的增量； dh_f 表示微分流段内沿程水头损失； dh_j 表示微分流段内局部水头损失。

对于非均匀流的沿程水头损失，目前仍采用均匀流公式计算，即令 $dh_f = \frac{Q^2}{K^2} ds$ 或 $dh_f = \frac{v^2}{C^2 R} ds$ ，其中 K 、 v 、 C 、 R 等值一般采用流段上、下游断面的平均值。对于局部水头损失，一般令 $dh_j = \zeta d\left(\frac{v^2}{2g}\right)$ ，这样式 (1.21) 变为

$$dz_0 + \cos\theta dh + (\alpha + \zeta) d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \frac{Q^2}{K^2} ds = 0$$

由图 1.7 可以看出， $dz_0 = -ids$ ，代入上式得

$$ids = \cos\theta dh + (\alpha + \zeta) d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \frac{Q^2}{K^2} ds \quad (1.22)$$

如果渠底坡 i 值小于 0.1，在实用上一般都采用 $\cos\theta \approx 1$ ，常用铅直水深代替垂直于槽底的水深，则式 (1.22) 可以写成

$$ids = dh + (\alpha + \zeta) d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \frac{Q^2}{K^2} ds \quad (1.23)$$

1.3.1 水深沿流程变化的微分方程式

研究明渠非均匀恒定流的重要目的是要探求明渠中水深沿流程的变化规律，也就是确定流动是水深沿流程增加的壅水形式，还是水深沿流程减小的降水形式。为了研究方便，需将基本微分方程转化为水深沿流程变化关系的形式。

因一般明渠的底坡较小，现仅讨论 $i < 0.1$ ， $\cos\theta \approx 1$ 的情况。将式 (1.23) 各项除以 ds 移项得

$$i - \frac{Q^2}{K^2} = \frac{dh}{ds} + (\alpha + \zeta) \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (1.24)$$

其中
$$\frac{d}{ds}\left(\frac{v^2}{2g}\right) = \frac{d}{ds}\left(\frac{Q^2}{2gA^2}\right) = -\frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{ds} \quad (1.25)$$

非棱柱体明渠过水断面面积 A 是水深 h 和流程 s 的函数, 即 $A=f(h,s)$, 故

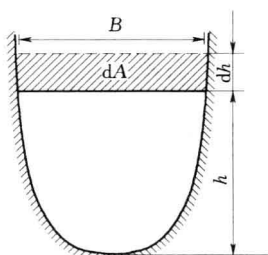


图 1.8

$$\frac{dA}{ds} = \frac{\partial A}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial s} + \frac{\partial A}{\partial s} \quad (1.26)$$

如图 1.8 所示, 当过水断面水深 h 有一微分增量 dh 时, 过水断面面积的增量为 $Bdh = \frac{\partial A}{\partial h} dh$, 由此得

$$\partial A / \partial h = B \quad (1.27)$$

将式 (1.27)、式 (1.26) 和式 (1.25) 代入式 (1.24) 得

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2} + (\alpha + \zeta) \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial s}}{1 - (\alpha + \zeta) \frac{Q^2 B}{gA^3}} \quad (1.28)$$

式 (1.28) 即为非棱柱体明渠非均匀渐变流水深沿流程变化的微分方程式。

特例 1: 对于棱柱体渠道的恒定渐变流, 因为 $\partial A / \partial s = 0$, 式 (1.28) 简化为

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - (\alpha + \zeta) \frac{Q^2 B}{gA^3}} \quad (1.29)$$

特例 2: 对于明渠恒定均匀流, 因为 $dh/ds = 0$, 有

$$i - \frac{Q^2}{K^2} = 0 \quad (1.30)$$

即 $Q^2 = K^2 i = A^2 C^2 R i$, $Q = AC \sqrt{Ri}$, 这就是明渠均匀流的基本公式。

以上所得明渠恒定渐变流基本微分方程式, 是水面线分析和计算的基础。如果忽略局部水头损失, 取 $\alpha = 1$, 则式 (1.29) 可写成

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - \frac{Q^2 B}{gA^3}} = \frac{i - J_f}{1 - Fr^2} \quad (1.31)$$

式 (1.31) 是在正坡渠道 $i > 0$ 的情况下得出的, 但对其他底坡渠道也同样适用, 对于平底渠道, $i = 0$, 则有

$$\frac{dh}{ds} = \frac{-J_f}{1 - Fr^2} \quad (1.32)$$

对于逆坡渠道, $i < 0$, 以渠底坡度的绝对值 $|i| = i'$ 代入式 (1.31) 得

$$\frac{dh}{ds} = \frac{-i' - J_f}{1 - Fr^2} \quad (1.33)$$

1.3.2 水位沿流程变化的微分方程式

对天然河道内的非均匀流, 因河底高低不平, 坡降陡坦不一, 常用水位代替水深变化来进行分析。由图 1.7 可知, $z = z_0 + h \cos \theta$, 于是有