



普通高等教育“十二五”规划教材配套辅导书

水力学学习题解析 (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

TU13-40

1
:2

刻
画



普通高等教育“十二五”规划教材配套辅导书

水力学习题解析 (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

内 容 提 要

《水力学习题解析》分为上册和下册,共16章。本书为下册。上册内容包括:绪论、水静力学、水动力学基础、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。

各章分为知识要点、习题解析和练习题与答案三部分,知识要点归纳和提炼出了各章的基本概念、基本公式;习题解析中的题型有基本计算类型和提高类型,涵盖了各章的知识要点;练习题与答案具有广泛性、典型性和代表性。

本书可作为高等工科大学水利类、热动力类、土建类、机械工程系、环境工程类的学习指导书,还可作为研究生入学考试和相关专业教师、学生和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

水力学习题解析. 下册 / 张志昌主编. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2012. 8
普通高等教育“十二五”规划教材配套辅导书
ISBN 978-7-5084-9877-5

I. ①水… II. ①张… III. ①水力学—高等学校—题解 IV. ①TV13-44

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第127948号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材配套辅导书 水力学习题解析(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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 18.5印张 438千字
版 次	2012年8月第1版 2012年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

编写《水力学学习题解析》(上册)、(下册)的目的是使学生熟练掌握水力学的基本概念、基本原理,拓宽学生的解题思路、解题方法、掌握解题技巧,结合工程实际培养学生理论联系实际的方法、分析问题和解决工程问题的能力。

《水力学学习题解析》(上册)、(下册):上册内容包括绪论、水静力学、水动力学基础、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、渗流基础和动床水力学基础。各章分为知识要点、习题解析和练习题与答案。

本书可作为高等学校本科生学习水力学或工程流体力学的指导书,硕士学位研究生入学考试复习和相关专业教师、学生以及工程技术人员设计的参考书。

全书共有 1113 道习题,其中习题解析 621 题,练习题与答案 492 题。这些习题主要来自书后参考文献中的习题,例题以及作者自编的习题。

本书由西安理工大学张志昌主编。参加编写的还有西安理工大学的魏炳乾、李国栋,太原理工大学的李治勤、郝瑞霞。其中张志昌编写了上册的第 1~4 章、第 6 章、下册的第 1 章、第 3~5 章,魏炳乾编写了下册的第 2 章、第 8 章,李国栋编写了上册的第 5 章、第 7 章,李治勤编写了上册第 8 章、下册的第 6 章,郝瑞霞编写了下册的第 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、陕西省国家重点学科建设专项基金和西安理工大学教材建设基金的资助。

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

2012 年 8 月

目 录

前言

第 1 章 明渠恒定非均匀流	1
1.1 知识要点	1
1.2 习题解析	12
1.3 练习题与答案	38
第 2 章 明渠恒定急变流—水跃和水跌	47
2.1 知识要点	47
2.2 习题解析	51
2.3 练习题与答案	65
第 3 章 边界层理论基础	68
3.1 知识要点	68
3.2 习题解析	76
3.3 练习题与答案	94
第 4 章 堰顶溢流和孔流	98
4.1 知识要点	98
4.2 习题解析	121
4.3 练习题与答案	157
第 5 章 泄水建筑物下游的水流衔接与消能	165
5.1 知识要点	165
5.2 习题解析	177
5.3 练习题与答案	207
第 6 章 明渠非恒定流简介	212
6.1 知识要点	212
6.2 习题解析	213
第 7 章 渗流基础	219
7.1 知识要点	219
7.2 习题解析	228
7.3 练习题与答案	247

第 8 章 动床水力学基础.....	252
8.1 知识要点	252
8.2 习题解析	264
8.3 练习题与答案	284
参考文献	287

第1章 明渠恒定非均匀流

1.1 知 识 要 点

1.1.1 明渠恒定非均匀流产生的条件及特点

当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。

研究明渠恒定非均匀流的主要任务是：①定性分析水面线；②定量计算水面线。

1.1.2 明渠水流的三种流态

一般明渠水流有三种流态，即缓流、临界流和急流。

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。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。

缓流和急流的判断方法：

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。

当 $v < v_w$ 时，水流为缓流，干扰波能向上游传播。

当 $v = v_w$ 时，水流为临界流，干扰波不能向上游传播。

当 $v > v_w$ 时，水流为急流，干扰波不能向上游传播。

明渠中波速的计算公式为

$$\text{矩形渠道} \quad v_w = \sqrt{gh} \quad (1.1)$$

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

在断面平均流速为 v 的水流中，微波传播的绝对速度 $v_{w\text{绝}}$ 应是静水中的相对波速 v_w 与水流速度的代数和，即

$$v_{w\text{绝}} = v \pm v_w = v \pm \sqrt{g\bar{h}} \quad (1.3)$$

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。

2. 弗劳德数法

水力学中把流速与波速的比值称为弗劳德数，以 Fr 表示，即

$$Fr = \frac{v}{v_w} = \frac{v}{\sqrt{gA/B}} = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad (1.4)$$

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

$$Fr < 1, \text{ 水流为缓流}$$

$$Fr = 1, \text{ 水流为临界流}$$

$$Fr > 1, \text{ 水流为急流}$$

3. 断面比能法

以过明渠断面最低点的水平面为基准面，该断面上单位重量水体具有的总能量定义为断面比能，用 E_s 表示，即

$$E_s = h \cos \alpha + \alpha v^2 / (2g) = h \cos \alpha + \alpha Q^2 / (2gA^2) \quad (1.5)$$

对于坡度较小的渠道，当 $\alpha < 6^\circ$ 时， $\cos \alpha \approx 1$ ，则式 (1.5) 变为

$$E_s = h + \alpha v^2 / (2g) = h + \alpha Q^2 / (2gA^2) \quad (1.6)$$

由上式可知，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 $E_s = h + \alpha Q^2 / (2gA^2)$ 为断面比能函数，由此函数画出的曲线称为断面比能曲线。

用断面比能判别流动类型的标准为

$$dE_s/dh > 0, \text{ 水流为缓流}$$

$$dE_s/dh = 0, \text{ 水流为临界流}$$

$$dE_s/dh < 0, \text{ 水流为急流}$$

4. 临界水深法

相应于断面单位能量最小值的水深称为临界水深，以 h_k 表示，其计算公式为

$$\alpha Q^2 / g = A_k^3 / B_k \quad (1.7)$$

式中： A_k 及 B_k 是相应于临界水深 h_k 时的过水断面面积和水面宽度，对于矩形断面，临界水深为

$$h_k = \sqrt[3]{\alpha Q^2 / g} \quad (1.8)$$

式中： $q=Q/b$ 称为单宽流量。

因为临界水深对应于临界流，当流量和过水断面形状及尺寸给定时，由此得用临界水深法判别流动类型的标准为

$$h > h_k, \text{ 水流为缓流}$$

$$h = h_k, \text{ 水流为临界流}$$

$$h < h_k, \text{ 水流为急流}$$

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 ，其公式为

$$i_k = \frac{gA_k}{\alpha C_k^2 B_k R_k} = \frac{g\chi_k}{\alpha C_k^2 B_k} \quad (1.9)$$

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

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：

$i < i_k$ ，水流为缓流

$i = i_k$ ，水流为临界流

$i > i_k$ ，水流为急流

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，对于非均匀流就不一定了。

1.1.3 明渠恒定非均匀流的微分方程

明渠恒定非均匀流的基本方程为

$$i ds = \cos\alpha dh + (\alpha + \xi) d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \frac{Q^2}{K^2} ds \quad (1.10)$$

如果渠道的底坡 i 值小于 0.1，在实用上一般都采用 $\cos\alpha \approx 1$ ，常用铅直水深代替垂直于槽底的水深，则上式可以写成

$$i ds = dh + (\alpha + \xi) d\left(\frac{v^2}{2g}\right) + \frac{Q^2}{K^2} ds = 0 \quad (1.11)$$

1. 水深沿流程变化的微分方程式

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为

$$\frac{dh}{ds} = \left[i - \frac{Q^2}{K^2} + (\alpha + \xi) \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial s} \right] / \left[1 - (\alpha + \xi) \frac{Q^2 B}{gA^3} \right] \quad (1.12)$$

对于棱柱体渠道的恒定渐变流，因为 $\partial A / \partial s = 0$ ，式 (1.12) 简化为

$$\frac{dh}{ds} = (i - Q^2/K^2) / \left[1 - (\alpha + \xi) \frac{Q^2 B}{gA^3} \right] \quad (1.13)$$

对于明渠恒定均匀流，因为 $dh/ds = 0$ ，有

$$i - Q^2/K^2 = 0 \quad (1.14)$$

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 (1.13) 可写成

$$\frac{dh}{ds} = (i - Q^2/K^2) / \left(1 - \frac{Q^2 B}{gA^3} \right) = (i - J_f) / (1 - Fr^2) \quad (1.15)$$

式 (1.15) 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

$$dh/ds = -J_f / (1 - Fr^2) \quad (1.16)$$

对于逆坡渠道, $i < 0$, 以渠底坡度的绝对值 $|i| = i'$ 代入式 (1.15) 得

$$dh/ds = (-i' - J_f)/(1 - Fr^2) \quad (1.17)$$

2. 水位沿流程变化的微分方程式

对于天然河道内的非均匀流, 常用水位 z 代替水深变化来进行分析, 其微分方程为

$$-\frac{dz}{ds} = (\alpha + \xi) \frac{d}{ds} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \frac{Q^2}{K^2} = 0 \quad (1.18)$$

式 (1.18) 对棱柱体和非棱柱体渠道都是适用的。

1.1.4 棱柱体明渠中恒定非均匀渐变流水面曲线分析

棱柱体明渠渐变流水面曲线分析与计算的基本微分方程式为 (1.15)。分析式 (1.15) 可得 12 种不同类型的水面曲线。

1. 缓坡 $i < i_k$

对于缓坡渠道, $i < i_k$, 渠道正常水深 h_0 大于临界水深 h_k , 流动分为三个区域, 根据控制水深的不同, 可以形成三种情况的水面线, 如图 1.1 所示。

2. 陡坡 $i > i_k$

对于陡坡渠道, $i > i_k$, $h_0 < h_k$, $N-N$ 线在 $k-k$ 线之下, 其流动也分为三个区域, 如图 1.2 所示。

3. 临界坡 $i = i_k$

因为临界坡 $i = i_k$, $h_0 = h_k$, 所以 $N-N$ 线与 $k-k$ 线重合, 因此不存在 b 区, 只有 a 区和 c 区。水面曲线如图 1.3 所示。

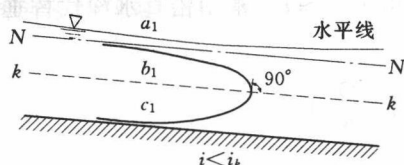


图 1.1

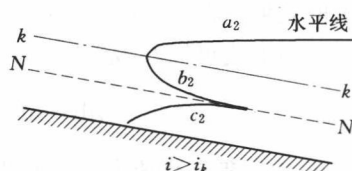


图 1.2

4. 平坡渠道 $i = 0$

由于平坡渠道 $i = 0$, 所以不会发生均匀流, 因之不存在正常水深 $N-N$ 线, 而只有临界水深 $k-k$ 线, 水面线的变化区域只有 b 区和 c 区, 如图 1.4 所示。

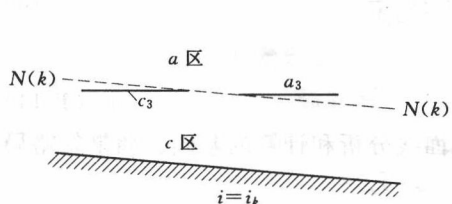


图 1.3

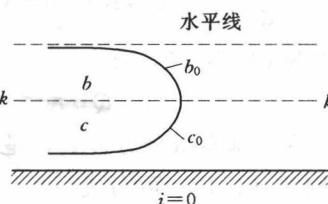


图 1.4

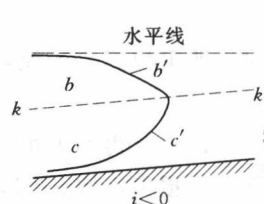


图 1.5

5. 逆坡渠道 $i < 0$

逆坡渠道不可能发生均匀流, 因此没有正常水深线, 只有临界水深 $k-k$ 线。这样, 在逆坡渠道中, 同样只有 b 区和 c 区, 如图 1.5 所示。

以上 12 种类型的水面曲线汇总如表 1.1 所示。

表 1.1 12 种类型的水面曲线

底 坡	区 域	水面曲线名称	水深范围	dh/ds			
				一般	向上游	向下游	
正坡 渠道	缓坡 $i < i_k$	a	a_1	$h > h_0 > h_k$	> 0	$\rightarrow 0$	$\rightarrow i$
		b	b_1	$h_0 > h > h_k$	< 0	$\rightarrow 0$	$\rightarrow -\infty$
		c	c_1	$h_0 > h_k > h$	> 0		$\rightarrow \infty$
	陡坡 $i > i_k$	a	a_2	$h > h_k > h_0$	> 0	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow i$
		b	b_2	$h_k > h > h_0$	< 0	$\rightarrow -\infty$	$\rightarrow 0$
		c	c_2	$h_k > h_0 > h$	> 0		$\rightarrow 0$
	临界坡 $i = i_k$	a	a_3	$h > h_k$	> 0		
		c	c_3	$h < h_k$	> 0		
	平坡 渠道	$i = 0$	b	a_0	$h > h_k$	< 0	$\rightarrow 0$
c			c_0	$h < h_k$	> 0		$\rightarrow \infty$
逆坡 渠道	$i < 0$	b	a'	$h > h_k$	< 0	$\rightarrow i$	$\rightarrow -\infty$
		c	c'	$h < h_k$	> 0		$\rightarrow \infty$

6. 水面曲线分析的一般原则和步骤

(1) 所有 a 型和 c 型水面曲线都是水深沿程增加的壅水曲线, b 型水面曲线为降水曲线。

(2) 除 a_3 型和 c_3 型水面曲线外, 其余水面曲线都遵循: 当水深 $h \rightarrow h_0$ 时, 水面曲线以 $N-N$ 线为渐近线; 当 $h \rightarrow \infty$ 时, 水面曲线以水平线为渐近线; 当 $h \rightarrow h_k$ 时, 水面曲线的连续性发生中断, 或与水跃或与水跌相连接 (水面曲线与 $k-k$ 线垂直)。

(3) 当渠道足够长时, 在非均匀流影响不到的地方, 水流将形成均匀流, 水深为正常水深 h_0 , 水面曲线为 $N-N$ 线。

(4) 水面曲线的衔接。在工程中经常会遇到几段渠道中的水面曲线衔接的问题, 其中两段渠道中水面曲线的衔接是基础。沿水流方向水面曲线的衔接遵循以下原则:

- 1) 由缓流向急流过渡时产生水跌。
- 2) 由急流向缓流过渡时产生水跃。
- 3) 由缓流向缓流过渡时只影响上游, 下游为均匀流。
- 4) 由急流向急流过渡时只影响下游, 上游为均匀流。

5) 临界底坡渠道中的流动型态取决于相邻渠道底坡的陡缓, 如果上游 (或下游) 相邻渠道的底坡是缓坡, 则为由缓流过渡到缓流, 如果上游 (或下游) 相邻的渠道底坡是陡坡, 则为由急流过渡到急流。

6) 水库中的流动可视为缓流。

(5) 水面曲线分析的步骤为:

1) 收缩断面水深, 如闸孔出流、无压涵洞进口、溢流堰下游等收缩断面水深, 均可由已知条件计算确定。

- 2) 闸、坝、桥、涵上游断面的水深，由闸孔出流公式或堰流公式确定。
- 3) 长直渠道中的正常水深由已知条件计算确定。
- 4) 根据已知条件，给出一定底坡情况下的 $N-N$ 线、 $k-k$ 线（或只有 $k-k$ 线）。
- 5) 找出控制断面位置及水深。
- 6) 由控制水深所处的区域确定水面曲线的类型，由水面曲线变换规律确定水面曲线的变化趋势。

7. 控制断面发生的位置

在水面曲线的分析中，控制断面的位置是非常重要的。工程中常见的控制断面有：

- (1) 跌坎处或缓坡向陡坡转折处的水深为临界水深 h_k 。
- (2) 渠道底坡由陡坡变为缓坡时，由于陡坡中水流为急流，缓坡中水流为缓流，水流由急流过渡到缓流时必然发生水跃。水跃自水深小于临界水深跃入大于临界水深，其间必经过临界水深。
- (3) 当水流自水库进入陡坡时，水库中水流为缓流，而陡坡中水流为急流，水流由缓流过渡到急流时，必经过临界水深。

1.1.5 明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算

明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算方法有分段试算法、水力指数法和简化计算法。

1. 分段试算法基本计算公式

$$\Delta s = \Delta E_s / (i - \bar{J}) = (E_{s2} - E_{s1}) / (i - \bar{J}) \quad (1.19)$$

式中： E_s 为断面比能； $K = AC\sqrt{R}$ ； $J = Q^2/K^2 = v^2/(C^2R)$ ； \bar{J} 是 Δs 段内的平均水力坡度

$$\bar{J} = (J_1 + J_2) / 2 \quad (1.20)$$

或
$$\bar{J} = Q^2 / \bar{K}^2 = \bar{v}^2 / (\bar{C}^2 \bar{R}) \quad (1.21)$$

式中
$$\left. \begin{aligned} \bar{v} &= (v_1 + v_2) / 2 \\ \bar{C} &= (C_1 + C_2) / 2 \\ \bar{R} &= (R_1 + R_2) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (1.22)$$

$$\bar{K} = \bar{A} \bar{C} \sqrt{\bar{R}} \quad (1.23)$$

以上各式中，下标 1 代表上游断面；下标 2 代表下游断面。

水面曲线计算方法

- (1) 定性分析水面曲线，非棱柱体渠道不用分析。
- (2) 确定控制断面水深。急流在上游找控制断面；缓流在下游找控制断面。
- (3) 假定中间各断面的水深，一般取 $\Delta h = 0.1 \sim 0.2m$ 。

2. 水力指数法计算公式

在棱柱体明渠中，由实测资料分析，发现明渠的流量模数与水深之间近似的呈某种指

数关系, 对于任意两个过水断面, 有下列关系式

$$(K_1/K_2)^2 = (h_1/h_2)^x \quad (1.24)$$

式中: K_1 和 K_2 为相应于水深 h_1 和 h_2 的流量模数。

指数 x 可用下式表示

$$x = 2(\lg K_1 - \lg K_2) / (\lg h_1 - \lg h_2) \quad (1.25)$$

(1) 正坡明渠 $i > 0$ 。

$$s_2 - s_1 = s = h_0 \{ \eta_2 - \eta_1 - (1 - \bar{j}) [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)] \} / i \quad (1.26)$$

式中: $\eta_1 = \frac{h_1}{h_0}$; $\eta_2 = \frac{h_2}{h_0}$; $\varphi(\eta) = -\int_{\eta_1}^{\eta_2} d\eta / (\eta^x - 1)$ 是一个具有参变量 x 的积分式, 对不同的 x 值制备了 $\varphi(\eta)$ 的数值, 见参考文献 [1]。

水力指数计算式为

$$x = 2(\lg \bar{K} - \lg K_0) / (\lg \bar{h} - \lg h_0)$$

$$\bar{h} = (h_1 + h_2) / 2$$

$$\bar{j} = \alpha i \bar{C}^2 \bar{B} / (g \bar{\chi})$$

(2) 对于平坡 $i = 0$ 。

$$s_2 - s_1 = s = h_k \{ \bar{j}_k (\zeta_2 - \zeta_1) - [\varphi(\zeta_2) - \varphi(\zeta_1)] \} / i_k \quad (1.27)$$

式中: $\bar{j}_k = \alpha i_k \bar{C}^2 \bar{B} / (g \bar{\chi})$; $i_k = g \chi_k / (\alpha C_k^2 B_k)$; $\varphi(\zeta) = \zeta^{x+1} / (x+1)$, 按 ζ 值和 x 值可由参考文献 [1] 查得 $\varphi(\zeta)$ 值。

(3) 负坡渠道 $i < 0$ 。

$$s_2 - s_1 = s = h'_0 \{ -(\psi_2 - \psi_1) + (1 - \bar{j}') [\varphi(\psi_2) - \varphi(\psi_1)] \} / i' \quad (1.28)$$

式中: $\bar{j}' = \alpha i' \bar{C}^2 \bar{B} / (g \bar{\chi})$; $\varphi(\psi) = \int d\psi / (1 + \psi^x)$, 按 ψ 值和 x 值可由参考文献 [1] 查得 $\varphi(\psi)$ 。

式 (1.28) 即为负坡明渠水力指数计算水面曲线的公式。

3. 简化计算法

$$\Delta s = \frac{E_{s2} - E_{s1}}{i [1 - (K_0/\bar{K})^2]} \quad (1.29)$$

根据水力指数法, $(K_0/\bar{K})^2 = (h_0/\bar{h})^x$, 代入式 (1.29) 得

$$\Delta s = \frac{E_{s2} - E_{s1}}{i [1 - (h_0/\bar{h})^x]} \quad (1.30)$$

式 (1.30) 即为正坡棱柱体渠道明渠水面线的简化计算公式。

对于缓坡渠道具有 a_1 型水面曲线的水流, 由于水流以势流为主, 动能远处于次要地位, 而且两个断面的流速变化不大, 因而可以忽略流段两断面的动能差值, 则式 (1.30) 可进一步简化为

$$\Delta s = \frac{h_2 - h_1}{i [1 - (h_0/\bar{h})^x]} \quad (1.31)$$

1.1.6 天然河道水面曲线的计算

1.1.6.1 天然河道水面曲线的计算公式

天然河道水面曲线用水位高程的沿程变化来表示,水面曲线的计算公式为

$$z_1 + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{Q^2}{K^2} \Delta s + \xi \left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (1.32)$$

式中: z_1 、 v_1 和 z_2 、 v_2 为断面 1-1 和断面 2-2 的水位和流速; Δs 为两个缓变流断面 1 和 2 之间的距离; ξ 为河段的平均局部阻力系数。

ξ 值与河道断面变化情况有关,在计算时可按下列方法取值:

顺直河段: $\xi=0$

收缩河段,水流不发生迴流: $\xi=0$

扩散河段,对逐渐扩散河道: $\xi=-(0.3\sim 0.5)$

对急剧扩散河段: $\xi=-(0.5\sim 1.0)$

式中:负号是因为扩散段 $v_2 < v_1$,而 h_j 是正值。

如果所选的河段比较顺直均匀,两断面的面积变化不大,两断面的流速水头差和局部水头损失可略去不计,则式 (1.32) 简化为

$$z_1 - z_2 = (Q^2 / \bar{K}^2) \Delta s \quad (1.33)$$

1.1.6.2 水面曲线的计算方法

1. 试算法

计算时,河道的流量 Q 、河段的粗糙系数 n 、河道的局部阻力系数 ξ 、计算河段的长度 Δs 以及下游控制断面的水位 z_2 均为已知,由下游向上游逐段推算。由于 z_2 已知,而与 z_2 有关的量也属已知,将 $v=Q/A$ 代入式 (1.32) 可得

$$z_1 + \frac{\alpha_1 + \xi}{2g} \left(\frac{Q}{A_1} \right)^2 - \frac{Q^2}{K^2} \Delta s = z_2 + \frac{(\alpha_2 + \xi)}{2g} \left(\frac{Q}{A_2} \right)^2 \quad (1.34)$$

式 (1.34) 等号右端为已知值,以 A_0 表示,左端为 z_1 的函数,以 $f(z_1)$ 表示,即

$$f(z_1) = A_0$$

计算时,假设 z_1 值,计算 $f(z_1)$,如其计算的值与 A_0 相等,则假设的 z_1 值即为所求,如不等,则重新假定 z_1 值,再计算 $f(z_1)$,直到 $f(z_1)$ 与 A_0 相等为止。

2. 图解法

河道水面曲线图解法很多,归纳起来分为两大类。一类是考虑了流速水头和局部水头损失的图解法;另一类是忽略流速水头和局部水头损失的图解法。从本质上看,后者是在前者基础上的简化。

(1) 计入流速水头和局部水头损失的图解法。

将 $\bar{K} = (K_1 + K_2) / 2$ 代入式 (1.34) 整理得

$$z_1 - z_2 = \frac{Q^2}{2} \left[\left(\frac{\Delta s}{K_1^2} - \frac{\alpha + \xi}{g A_1^2} \right) + \left(\frac{\Delta s}{K_2^2} - \frac{\alpha + \xi}{g A_2^2} \right) \right] \quad (1.35)$$

$$\text{令} \quad \left. \begin{aligned} F_1(z_1) &= \frac{\Delta s}{K_1^2} - \frac{\alpha + \xi}{g A_1^2} \\ F_2(z_2) &= \frac{\Delta s}{K_2^2} - \frac{\alpha + \xi}{g A_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

则

$$z_1 - z_2 = \frac{Q^2}{2} [F(z_1) + F(z_2)]$$

或

$$\frac{Q^2}{2} = \frac{z_1 - z_2}{F(z_1) + F(z_2)} \quad (1.37)$$

式 (1.37) 中的 α 、 ξ 、 Δs 和计算的流段都是已知的, 则函数 $F(z_1)$ 、 $F(z_2)$ 仅仅是反映断面特征的函数, 称为断面函数, 其值随着水位的变化而变化。

图解法的步骤是:

1) 事先做好各计算流段的断面函数曲线, 即 $z_1 \sim F(z_1)$ 、 $z_2 \sim F(z_2)$ 关系曲线。以水位为纵坐标, 以下游及上游断面函数为横坐标, 并分别布置在坐标的左右两侧, 如图 1.6 所示。

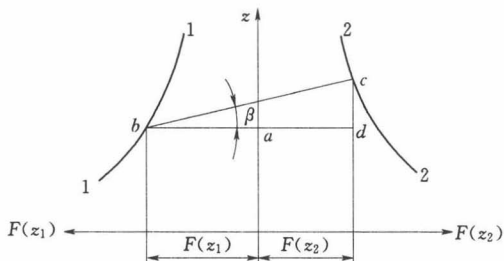


图 1.6

2) 如果已知下游断面的水位, 求流段上游断面的水位时, 首先在纵坐标上找到相应于下游断面水位的 a 点, 过 a 点作一水平线与下游断面函数曲线相交

于 b 点, b 点的坐标为 $[z_1, F(z_1)]$, 过 b 点作一斜率为 $\tan\beta = Q^2/2$ 的直线交该流段上游函数曲线于 c 点, c 点的坐标为 $[z_2, F(z_2)]$ 。在直角三角形中

$$\tan\beta = \frac{\overline{cd}}{\overline{ba} + \overline{ad}} = \frac{z_2 - z_1}{F(z_1) + F(z_2)} = \frac{Q^2}{2}$$

3) 按以上程序作图, c 点的坐标即为计算流段的上游水位。

4) 以上面计算的水位作为下一流段计算的下游水位, 按照上述程序又可推得该流段的上游水位。

5) 如此推演下去, 便可得到全河道的水面曲线。

6) 在绘制断面函数曲线时, 注意比例尺的应用。如果作图时横坐标上 $1\text{cm} = m_1 (\text{s}^2/\text{m}^5)$, 纵坐标上 $1\text{cm} = m_2 (\text{m})$, 则图上所展现的角度为

$$\tan\beta = \frac{Q^2 m_1}{2 m_2} \quad (1.38)$$

(2) 忽略流速水头和局部水头损失的图解法。由于不计流速水头和局部水头损失, 式 (1.35) 可写成

$$z_1 - z_2 = \frac{Q^2}{2} \left(\frac{1}{K_1^2} + \frac{1}{K_2^2} \right) \Delta s \quad (1.39)$$

或

$$z_1 - z_2 = \frac{(nQ)^2}{2} \left(\frac{1}{A_2^2 R_2^{4/3}} + \frac{1}{A_1^2 R_1^{4/3}} \right) \Delta s \quad (1.40)$$

当断面形式、尺寸确定以后, 式中的 K 或 $A^2 R^{4/3}$ 仅仅是水位的函数, 仍称为断面函数。

令

$$\varphi(z) = 1/(A^2 R^{4/3})$$

则式 (1.40) 可写成

$$z_1 - z_2 = (nQ)^2 [\varphi(z_2) + \varphi(z_1)] \Delta s / 2 \quad (1.41)$$

计算步骤：

1) 事先做好断面函数 $z \sim \varphi(z)$ 关系曲线。

2) 将河道的奇数断面的断面函数 $\varphi(z)$ 曲线布置在纵坐标（水平轴）的左侧，偶数断面的断面函数曲线布置在纵坐标的右侧，如图 1.7 所示。

3) 由已知断面 1 的水位 z_1 ，在纵坐标从该点引一水平线交 1 断面函数曲线于 b 点，然后过 b 点作一斜率 $\tan\beta_1 = (nQ)_1^2 \Delta s_1 / 2$ 的直线，交 2 断面函数曲线于 c 点， c 点之坐标便是断面 2 的水位 z_2 。

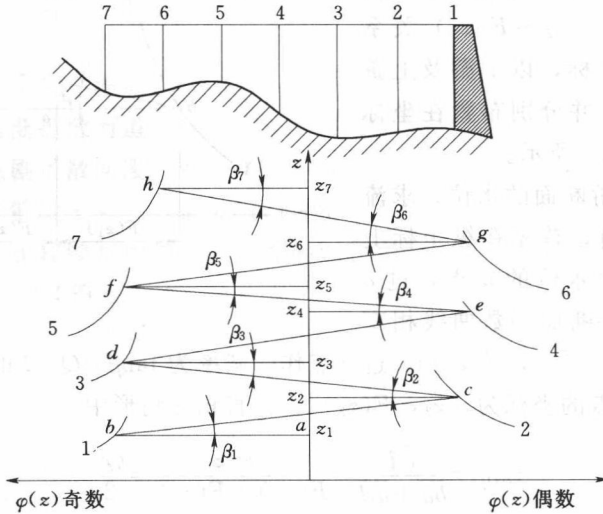


图 1.7

4) 通过 c 点作斜率为 $\tan\beta_2 = (nQ)_2^2 \Delta s_2 / 2$ 的直线，交 3 断面的函数曲线于 d 点， d 点之纵坐标便是 3 断面的水位 z_3 。

5) 按以上程序推演下去，便能获得全河道各断面的水位。

6) 如果纵横坐标所取的比例尺不同，若设横坐标 $1\text{cm} = m_1 (\text{m}^{-16/3})$ ，纵坐标上 $1\text{cm} = m_2 (\text{m})$ ，则图上所展现的角度为

$$\tan\beta = \frac{(nQ)^2 \Delta s m_1}{2 m_2} \quad (1.42)$$

1.1.6.3 复式断面河道及分叉河道的水面曲线计算

1. 复式断面河道的水面曲线计算

具有主槽和滩地的河道断面称为复式断面，如图 1.8 所示。

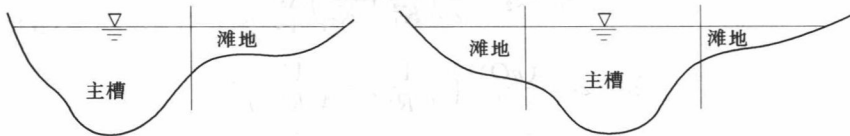


图 1.8

主槽和滩地的水面曲线公式为

$$\Delta z = (Q_1^2 / \bar{K}_1^2) \Delta s \quad \text{或} \quad Q_1 = \bar{K}_1 \sqrt{\Delta z / \Delta s} \quad (1.43)$$

$$\Delta z = (Q_2^2 / \bar{K}_2^2) \Delta s \quad \text{或} \quad Q_2 = \bar{K}_2 \sqrt{\Delta z / \Delta s} \quad (1.44)$$

主槽和滩地的粗糙系数是不同的, 在计算复式断面河道的水面曲线时, 河道的全部流量 Q 为主槽流量 Q_1 和滩地流量 Q_2 之和, 即

$$Q = \bar{K}_1 \sqrt{\Delta z / \Delta s} + \bar{K}_2 \sqrt{\Delta z / \Delta s} = (\bar{K}_1 + \bar{K}_2) \sqrt{\Delta z / \Delta s}$$

$$\text{或} \quad \Delta z = Q^2 \Delta s / (\bar{K}_1 + \bar{K}_2)^2 \quad (1.45)$$

2. 分叉河道

当河道中出现江心洲时, 就形成分叉河道。进行分叉河道水面曲线计算应满足下列两个条件:

(1) 河道的总流量 $Q = Q_1 + Q_2$ 。

(2) 两分叉河道的水位差应相等, 即 $\Delta z_1 = \Delta z_2 = \Delta z$ 。

设两分叉河段的长度分别为 Δs_1 和 Δs_2 , 对每一河叉而言, 仍可用计算一般河道水面线的公式来计算, 即

$$\Delta z_1 = \Delta z = (Q_1^2 / \bar{K}_1^2) \Delta s_1 \quad \text{或} \quad Q_1 = \bar{K}_1 \sqrt{\Delta z / \Delta s_1}$$

$$\Delta z_2 = \Delta z = (Q_2^2 / \bar{K}_2^2) \Delta s_2 \quad \text{或} \quad Q_2 = \bar{K}_2 \sqrt{\Delta z / \Delta s_2}$$

总流量为

$$Q = \bar{K}_1 \sqrt{\Delta z / \Delta s_1} + \bar{K}_2 \sqrt{\Delta z / \Delta s_2} = (\bar{K}_1 + \bar{K}_2 \sqrt{\Delta s_1 / \Delta s_2}) \sqrt{\Delta z / \Delta s_1}$$

$$\text{或} \quad \Delta z = Q^2 \Delta s_1 / (\bar{K}_1 + \bar{K}_2 \sqrt{\Delta s_1 / \Delta s_2})^2 \quad (1.46)$$

1.1.7 天然河道的粗糙系数和流量

1. 粗糙系数的计算

河床粗糙系数常常是用河道的实测水文资料来推求的, 方法如下:

设河段的长度为 Δs , 测得其首、末断面的水位 z_1 和 z_2 , 相应的流量为 Q_1 和 Q_2 , 并在实测的断面图上量得首、末过水断面面积 A_1 和 A_2 , 应用曼宁公式 $v = C \sqrt{RJ}$ 及谢才系数 $C = R^{1/6} / n$, 并代以各水力要素的平均值 \bar{v} 、 \bar{R} 、 \bar{J} , 可得

$$n = \bar{R}^{2/3} \bar{J}^{1/2} / \bar{v} \quad (1.47)$$

式中: $\bar{v} = \bar{Q} / \bar{A}$; $\bar{Q} = (Q_1 + Q_2) / 2$; $\bar{A} = (A_1 + A_2) / 2$; $\bar{R} = (R_1 + R_2) / 2$, $\bar{J} = (z_1 - z_2) / \Delta s$ 。
式 (1.47) 适用于河道比较顺直的河段。

如果河道不顺直, 过水断面沿程变化比较显著, 水流为恒定非均匀流, 则河道的粗糙系数可由式 (1.48) 计算

$$n = \frac{\bar{A} \bar{R}^{2/3}}{Q} \left[\frac{z_1 - z_2}{\Delta s} - (\alpha + \xi) \frac{Q^2}{2g \Delta s} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \right]^{1/2} \quad (1.48)$$

2. 流量的计算

若已知河道或明渠的水面线以及断面尺寸、底坡等, 可用下式估算河道中的流量, 即