

普通高等教育“十三五”规划教材

水力学 (下册)

(第二版)

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“十三五”规划教材

水力学 (下册)

(第二版)

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

本书是在第一版的基础上修订完成的。全书分为上、下两册，共 17 章，其中上册 8 章，下册 9 章。

全书在整体安排上与第一版相比做了较大的调整。其中上册主要为水力学的基本理论和管流水力学问题，内容包括绪论，水静力学，水动力学的基本原理，液流形态和水头损失，有压管道恒定流，有压管道非恒定流，液体三元流动基本理论和边界层理论基础。下册主要为明渠水力学和工程水力学问题，内容包括明渠恒定均匀流，明渠恒定非均匀流，明渠恒定急变流——水跃和水跌，明渠非恒定流简介，堰顶溢流和孔流，泄水建筑物下游水流衔接与消能，渗流基础和动床水力学基础，并增加了计算水力学基础的内容，使学生在掌握水力学基本理论的同时，对水力学数值计算方法有一定的了解。

本书可作为高等学校水利类、热动力类、土建类及环境工程类专业本科生的教材，也可供高等职业大学和成人教育学院师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

水力学. 下册 / 张志昌主编. — 2版. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2016. 1
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-5170-4033-0

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(2016)第017709号

书 名	普通高等教育“十三五”规划教材 水力学 (下册) (第二版)
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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 22.25印张 528千字
版 次	2011年7月第1版 2011年7月第1次印刷 2016年1月第2版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	46.00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

第二版前言

2011年《水力学》(上、下册)出版了第一版。通过4年的教学实践以及对水力学教材中一些问题的深入研究,对本教材进行了以下方面的修订:

(1) 对原教材中的章节顺序做了调整,新增加了计算水力学基础。修订后的内容顺序上册为:第1章绪论,第2章水静力学,第3章水动力学的基本原理,第4章液流形态和水头损失,第5章有压管道恒定流,第6章有压管道非恒定流,第7章液体三元流动基本理论,第8章边界层理论。下册为:第1章明渠恒定均匀流,第2章明渠恒定非均匀流,第3章明渠恒定急变流——水跃和水跌,第4章明渠非恒定流简介,第5章堰顶溢流和孔流,第6章泄水建筑物下游水流衔接与消能,第7章渗流基础,第8章动床水力学基础,第9章计算水力学基础。

(2) 对部分内容进行了修订。主要包括:上册第1章对第1.3.1.7小节中的汽化、空化和空蚀重新做了改写,以使概念更加清楚;第2章将第2.6.1小节中的静水压强分布图放在第2.4.4小节,使得内容更加紧凑,增加了例题2.26;第3章在第3.13.6小节中增加了紊动阻力相似准则。下册第2章第2.7.3小节中的水力指数法计算公式部分由于查表计算繁琐而全部删除;第3章的第3.4.2小节中的梯形断面水跃共轭水深的计算、第3.6节中棱柱体水平明渠中水跃的长度计算、第3.9节中非棱柱体明渠水跃共轭水深的计算均应用了最新的简化计算公式;第6章的第6.3.1小节中的降低护坦高程所形成的消力池、第6.3.2小节中的在护坦末端修建消力坎形成的消力池、第6.3.3小节中的综合式消力池的水力计算均应用了最新的研究成果。

(3) 对原文中的部分文字、公式、图表、例题、习题进行了校核和修正,新增参考文献12篇。

《水力学》(上、下册)(第二版)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章、第3~5章和第8章、下册第2章、第5~6章和第9章,李国栋编写上册第6~7章,

魏炳乾编下册第3章和第8章，李治勤编写下册第1章和第4章，郝瑞霞编写下册第7章。

本次修订内容由张志昌、魏炳乾、李国栋、李治勤、郝瑞霞等提出，由张志昌执笔。新增加的计算水力学基础由张志昌编写、李国栋和左娟莉审核。

本书的出版得到了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

2015年7月

第一版前言

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

第二版前言

第一版前言

第 1 章 明渠恒定均匀流	1
1.1 概述.....	1
1.2 明渠的底坡和横断面.....	1
1.3 明渠均匀流的水流特性.....	3
1.4 明渠均匀流的水力计算.....	4
1.5 水力最佳断面和允许流速.....	10
1.6 复式断面明渠均匀流的水力计算.....	15
1.7 断面周界上粗糙系数不同的水力计算.....	17
习题.....	19
第 2 章 明渠恒定非均匀流	23
2.1 概述.....	23
2.2 明渠水流的三种流态.....	23
2.3 明渠恒定非均匀流的微分方程.....	30
2.4 棱柱体明渠恒定非均匀渐变流的水面曲线分析.....	33
2.5 水面曲线分析的一般原则和步骤.....	40
2.6 控制断面发生的位置.....	41
2.7 明渠恒定非均匀渐变流水面曲线的计算.....	43
2.8 天然河道水面曲线的计算.....	47
2.9 弯道水流.....	56
习题.....	62
第 3 章 明渠恒定急变流——水跃和水跌	70
3.1 概述.....	70
3.2 水跃——急流到缓流的过渡.....	70
3.3 棱柱体水平明渠的水跃方程.....	72
3.4 棱柱体水平明渠中水跃共轭水深的计算.....	73
3.5 棱柱体水平明渠中水跃方程的验证.....	79

3.6	棱柱体水平明渠中水跃的长度	79
3.7	棱柱体水平明渠中水跃的能量损失	81
3.8	斜坡上的水跃	84
3.9	非棱柱体明渠中的水跃	85
3.10	水跌——缓流到急流的过渡	88
	习题	89
第4章	明渠非恒定流简介	93
4.1	概述	93
4.2	波速和波流量	95
4.3	明渠非恒定渐变流的基本方程	98
4.4	明渠非恒定渐变流的特征线法	101
	习题	107
第5章	堰顶溢流和孔流	109
5.1	概述	109
5.2	薄壁堰的水力计算	112
5.3	实用溢流堰	117
5.4	宽顶堰	128
5.5	流线型宽顶堰流量的计算	137
5.6	孔口出流	141
5.7	管嘴出流	149
5.8	闸孔出流	152
	习题	162
第6章	泄水建筑物下游水流衔接与消能	171
6.1	概述	171
6.2	底流消能的水力条件	173
6.3	消力池的水力计算	177
6.4	挑流消能	196
6.5	面流消能	202
6.6	消力戽消能	207
	习题	213
第7章	渗流基础	221
7.1	渗流的基本概念	221
7.2	渗流的基本定律——达西定律	223
7.3	渗流运动的微分方程	228
7.4	地下河槽中恒定均匀渗流和非均匀渐变渗流	230
7.5	承压含水层中渗流的稳定运动	236

7.6	地下水向集水建筑物——井的运动	238
7.7	均质土坝的渗流	243
7.8	利用流网法求解平面渗流	247
7.9	渗流的实验方法	249
7.10	岩体渗流	251
	习题	252
第 8 章	动床水力学基础	259
8.1	泥沙和浑水的主要特性	259
8.2	河渠泥沙的基本运动方式	269
8.3	推移质运动	270
8.4	悬移质运动	293
	习题	303
第 9 章	计算水力学基础	307
9.1	概述	307
9.2	计算水力学的基本方程	307
9.3	偏微分方程的分类及其定解条件	313
9.4	数值计算方法	318
9.5	紊流基本方程与紊流模型简介	337
	参考文献	347

第 1 章 明渠恒定均匀流

1.1 概 述

天然河道和人工渠道统称为明渠。明渠的显著特点是水流显露在大气中具有自由水面，水面上各点的压强均为大气压强，即相对压强为零，因此，明渠水流又称为无压流动。根据明渠水流的特点，在涵洞和隧洞中，当水流未充满整个断面时，水面压强亦为大气压强，这种水流亦称为明渠水流。

明渠水流运动是在重力作用下形成的。水流在流动过程中要克服阻力而消耗能量。明渠水流多属于粗糙区的紊流，其沿程水头损失与断面平均流速的平方成正比。

明渠水流是在渠床边界约束范围内运动的，但其水面不受固体边界的约束。渠床边界条件如渠道的底坡、横断面形状尺寸以及表面粗糙程度等对明渠水流的状态有很大影响。例如，在一定的流量下，由于上、下游控制条件的不同，同一明渠中的水流可以形成各种不同形式的水面线。正是因为明渠水流的上边界不固定，故无压流动比有压流动复杂得多。

明渠流动与有压管流的区别是：前者具有自由液面，作用在自由液面上的相对压强为零，自由液面位置可以随时间和空间变化，因而过水断面的几何形状及各水力要素也将相应地随时间和空间改变；而管流没有自由液面，过水断面不随时间而变化；其次，明渠的横断面形状及粗糙系数变化很大，而管道的断面形式较少且内表面的粗糙程度较均匀。

明渠水流根据其空间点上运动要素是否随时间变化，可分为恒定流与非恒定流；根据其运动要素是否随流程变化，也可分为均匀流与非均匀流，非均匀流又有渐变流与急变流之分。

当明渠中水流的运动要素不随时间而变化，称为明渠恒定流；否则称为明渠非恒定流。明渠恒定流中，如果流线是一簇平行直线，则水深、断面平均流速均沿程不变，称为明渠恒定均匀流；如果流线不是平行直线，则称为明渠恒定非均匀流。本章主要研究明渠恒定均匀流。

1.2 明渠的底坡和横断面

明渠渠底与水平面夹角的正弦称为明渠的底坡，用 i 表示，如图 1.1 所示。即

$$i = \sin\theta = \frac{z_1 - z_2}{\Delta L'} = \frac{\Delta z}{\Delta L'} \quad (1.1)$$

式中： θ 为渠底与水平面的夹角； Δz 为横断面 1 和 2 的渠底高差； $\Delta L'$ 为断面 1 和 2 之间

的渠长。

一般土渠的底坡很小，即 θ 角很小，常取 $\sin\theta = \tan\theta$ ，因此可用 1、2 两断面之间的水平距离 ΔL 代替 $\Delta L'$ ，水深 h' 也可以用铅垂线的水深 h 代替，这种代替在 $\theta \leq 6^\circ$ ($i \leq 0.1$) 的情况下是可以的，因为由此引起的误差小于 1.0%。

明渠的底坡有 3 种，即正坡、平坡和负坡。明渠的底坡沿程降低 ($i > 0$)，称为正坡或顺坡；明渠底坡沿程不变 ($i = 0$)，称为平坡；明渠底坡沿程升高 ($i < 0$)，称为负坡或逆坡，如图 1.2 所示。

天然河道的底坡起伏不平，底坡 i 沿流程是变化的，计算时采用的是一定河段上的平均底坡。

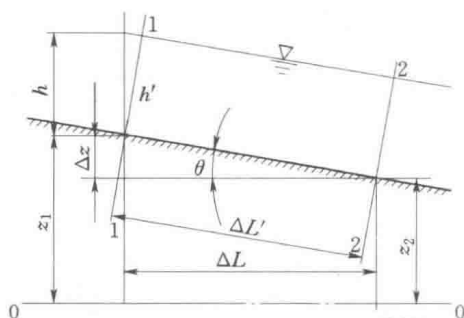


图 1.1

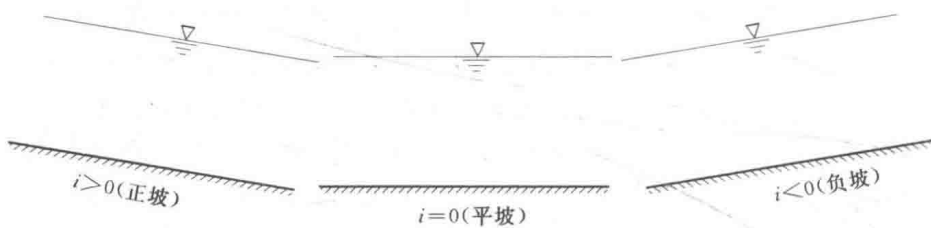


图 1.2

明渠的横断面有各种形状，如图 1.3 所示。人工明渠的横断面常见的有梯形、矩形、圆形、U 形、马蹄形等；天然河道的横断面则常呈不规则的形状。

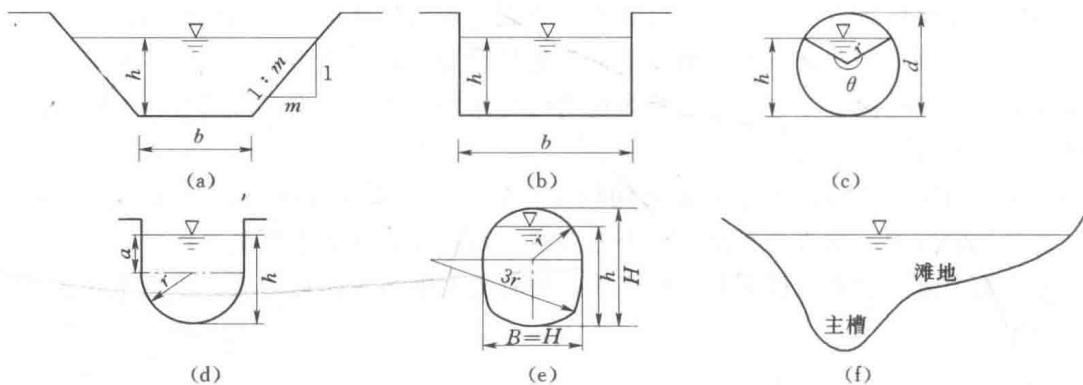


图 1.3

明渠的横断面形状和尺寸沿程不变的长直明渠称为棱柱体明渠。棱柱体明渠中水流过水断面面积 A 的大小只随水深而变化，轴线顺直，断面规则的人工渠槽、涵洞、隧洞均属棱柱体明渠。非棱柱体明渠中水流过水断面既随水深变化，又因位置不同而不同，取水建筑物的渐变段就是典型的非棱柱体明渠，天然河道的断面不规则，主流弯曲多变，也是非棱柱体明渠。

1.3 明渠均匀流的水流特性

前面已经提到,明渠均匀流是指运动要素沿程不变的流动,也就是明渠中的水深、断面

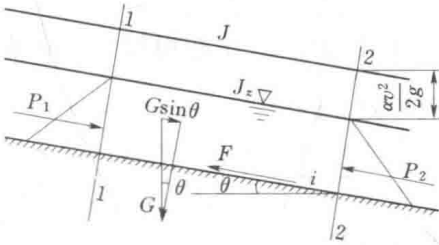


图 1.4

面平均流速、流速分布等均保持沿程不变的流动,其流线为一组与渠底平行的直线。由于水深沿程不变,总水头线与水面线平行,如图 1.4 所示。可以看出,明渠均匀流动的水面坡度 J_z (即测压管水头线坡度)、水力坡度 J (即总水头线坡度)和底坡 i 都相等,即

$$J_z = J = i \quad (1.2)$$

明渠均匀流既然是一种等速直线运动,没有加速度,则作用在水体上沿流动方向的力必然是平衡的。在图 1.4 中取出断面 1—1 和断面 2—2 之间的水体进行分析。作用在水体上的力有重力 G 、阻力 F 、两端断面上的动水压力 P_1 和 P_2 ,沿流动方向写平衡方程得

$$P_1 + G \sin \theta - F - P_2 = 0 \quad (1.3)$$

因为是均匀流,其压强符合静水压强分布规律,水深又不变,所以 P_1 和 P_2 大小相等,方向相反,互相抵消,因而 $G \sin \theta = F$,也就是说,在明渠均匀流动中,阻碍水流运动的阻力 F 与促使水流运动的重力分量 $G \sin \theta$ 相平衡。

从能量的观点看,在明渠均匀流中,对于单位重量的液体,重力所做的功正好等于阻力所做的功。所以,式 (1.3) 的物理意义是:在一定的距离上,水流因高程降低所引起的势能减小正好等于克服水流阻力所消耗的能量,而水流的动能维持不变。

为了区别均匀流动与非均匀流动,通常称明渠中均匀流动的水深为正常水深,用 h_0 表示。

由于明渠均匀流动具有上述特性,它的形成就需要一定的条件:

(1) 明渠水流必须是恒定流,流量沿程保持不变。

(2) 必须是底坡不变的正坡明渠,即 $i > 0$ 。由式 (1.3) 可以得 $G \sin \theta = F$,即在正坡明渠中重力沿水流方向的分量与阻力相平衡。可以看出,平坡渠道中重力沿水流方向没有分量,负坡渠道重力分量的方向与阻力方向一致,两者不可能平衡。所以在平坡和负坡明渠中均不可能形成均匀流。

(3) 渠道必须是长直的棱柱体明渠,明渠表面的粗糙程度沿程不变。如果是非棱柱体明渠,则其流速和水深沿程改变,阻力也随之沿程改变,这样就不能保持重力分量与阻力的平衡。

(4) 明渠中没有任何阻碍水流运动的建筑物(障碍物),如闸、坝、跌水等建筑物会造成水流的局部干扰,使得水流阻力发生变化,重力分量和阻力就不能保持平衡。

由以上分析可知,只有在满足上述四个条件的明渠中才能形成均匀流,实际工程中要完全满足上述四个条件是困难的。严格地讲,真正的明渠均匀流极为少见,但对于顺直的正底坡棱柱体明渠,只要有足够的长度,总是有形成均匀流动的趋势,基本上满足上述条

件，都可以近似地按照均匀流来分析和计算。因此，大致符合上述条件的人工渠道和某些顺直整齐的天然河道，均可按明渠均匀流来计算。

1.4 明渠均匀流的水力计算

明渠均匀流水力计算的主要任务是计算流量（即过水能力）、过水断面尺寸、底坡和流速等。

明渠均匀流水力计算的基本公式是连续方程，即

$$Q = Av \quad (1.4)$$

式中流速 v 的计算方法有谢才公式或对数律公式，谢才公式为

$$v = C\sqrt{RJ} \quad (1.5)$$

在紊流粗糙区，流速对数律公式为

$$v = \left(2.5 \ln \frac{R}{\Delta} + 6.0\right) \sqrt{gRJ} \quad (1.6)$$

式中： R 为水力半径； Δ 为当量粗糙高度。

在明渠均匀流中，水力坡降等于渠底纵坡 i ，水深为正常水深 h_0 ，相应的过水断面面积为 A_0 ，水力半径为 R_0 ，则明渠均匀流的流量公式为

$$Q = A_0 C_0 \sqrt{R_0 i} \quad (1.7)$$

$$\text{或} \quad Q = A_0 \left(2.5 \ln \frac{R_0}{\Delta} + 6.0\right) \sqrt{gR_0 i} \quad (1.8)$$

均匀流公式中的谢才系数 C_0 通常用曼宁公式或巴甫洛夫公式计算。

曼宁公式为

$$C_0 = \frac{1}{n} R_0^{1/6} \quad (1.9)$$

巴甫洛夫公式为

$$C_0 = \frac{1}{n} R_0^y \quad (1.10)$$

其中 $y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R_0}(\sqrt{n} - 0.10)$

将式 (1.9) 代入式 (1.7)，并令式 (1.7) 和式 (1.8) 相等，可得当量粗糙度 Δ 与粗糙系数 n 以及水力半径 R_0 的关系为

$$\Delta = \frac{R_0}{\exp\left[\frac{0.18692}{n} \left(\frac{R_0}{g}\right)^{1/6} - 2.4\right]} \quad (1.11)$$

斯处克勒研究了 $v/\sqrt{gR_0 i}$ 与 $n\sqrt{g}/\Delta^{1/6}$ 的关系，研究表明， $v/\sqrt{gR_0 i}$ 的值一般为 8~25，在此之间若将 $n\sqrt{g}/\Delta^{1/6}$ 近似地看作常数就相当于曼宁公式。若取 $n\sqrt{g}/\Delta^{1/6} = 0.130 = 1/7.66$ ，则得粗糙系数和当量粗糙度的另一公式为

$$n = \Delta^{1/6} / (7.66\sqrt{g}) \quad (1.12)$$

式 (1.12) 称为曼宁-斯处克勒公式。

由式 (1.7)~式 (1.10) 可以看出, 粗糙系数 n 或当量粗糙度 Δ 是影响明渠均匀流量的主要因素, 正确选择粗糙系数 n 或当量粗糙度 Δ 是明渠均匀流计算中的一个关键问题。以选择粗糙系数 n 为例, 如果选择的 n 值与实际相比偏大, 则势必增大断面尺寸, 增加工程量, 而且渠中实际流速大于设计值, 还可能引起土渠的冲刷; 反之, 如果选择的 n 值偏小, 渠道建成后实际流速达不到设计值, 影响渠道的过水能力, 造成渠道漫溢或淤积。

对于人工渠道, 在长期实践中积累了丰富的资料, 实际应用时可参照表 1.1 选择粗糙系数 n 值; 对于天然河道, 由于河床的不规则, 粗糙系数的确定更为复杂, 有条件时需通过对实际河流的量测来确定, 初步设计时也可参照表 1.2 进行选择。

表 1.1 各种材料明渠的粗糙系数 n 值

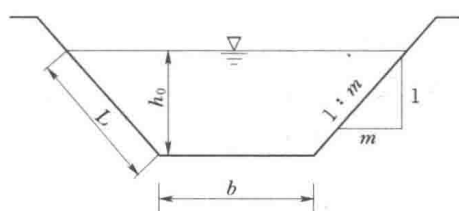
明渠断面材料情况及描述	表面粗糙情况		
	较好	中等	较差
1. 土渠			
清洁、形状正常	0.020	0.0225	0.025
不通畅并有杂草	0.027	0.030	0.035
曲线略有弯曲, 有杂草	0.025	0.030	0.033
挖泥机挖成的土渠	0.0275	0.030	0.033
砂砾渠道	0.025	0.027	0.030
细砾石渠道	0.027	0.030	0.033
土底、石砌坡的岸渠	0.030	0.033	0.035
不光滑的石底、有杂草的土坡渠	0.030	0.035	0.040
2. 石渠			
清洁的、形状正常的凿石渠	0.030	0.033	0.035
粗糙的断面不规则的凿石渠	0.040	0.045	
光滑而均匀的石渠	0.025	0.035	0.040
精细开凿的石渠		0.02~0.025	
3. 各种材料护面的渠道			
三合土(石灰、砂、煤灰)护面	0.014	0.016	
浆砌石护面	0.012	0.015	0.017
条石砌面	0.013	0.015	0.017
浆砌块石砌面	0.017	0.0225	0.030
干砌块石护面	0.023	0.032	0.035
4. 混凝土渠道			
抹灰的混凝土或钢筋混凝土护面	0.011	0.012	0.013
无抹灰的混凝土或钢筋混凝土护面	0.013	0.014~0.015	0.017
喷浆护面	0.016	0.018	0.021
5. 木质渠道			
抛光木板	0.012	0.013	0.014
未抛光的板	0.013	0.014	0.015

注 此表来自许荫椿、胡德保、薛朝阳主编的《水力学》(第三版), 科学出版社, 1990年8月。

表 1.2 天然河道的粗糙系数 n 值

河道类型及情况	最小值	正常值	最大值
一、小河（洪水期的水面宽度小于 30m）			
1. 平原河流			
(1) 清洁、顺直、无浅滩深潭；	0.025	0.030	0.032
(2) 石块多、杂草多；	0.030	0.035	0.040
(3) 清洁、弯曲、有浅滩深潭；	0.033	0.040	0.045
(4) 有石块杂草；	0.035	0.045	0.050
(5) 水深较浅，河底坡度多变、平面上回流区较多；	0.040	0.048	0.055
(6) 石块多；	0.045	0.050	0.060
(7) 多杂草、有深潭、流动缓慢的河段；	0.050	0.070	0.080
(8) 多杂草的河段、深潭多或林木滩地上的过洪。	0.075	0.100	0.150
2. 山区河流（河滩无草树、河岸较陡、岸坡树丛过洪时淹没）			
(1) 河底为砾石、卵石、间有孤石；	0.030	0.040	0.050
(2) 河底为砾石和大孤石	0.040	0.050	0.070
二、大河（洪水期的水面宽度大于 30m）			
相应与上述小河的各种情况，由于河岸阻力相对较小， n 值略小。			
(1) 断面比较规则整齐、无孤石或丛木；	0.025		0.060
(2) 断面不规则整齐、床面粗糙	0.035		0.100
三、洪水时期滩地漫流			
1. 草地、无树丛	0.025	0.030	0.035
(1) 短草；	0.030	0.035	0.050
(2) 长草			
2. 耕地			
(1) 未熟庄稼；	0.020	0.030	0.040
(2) 已熟成行庄稼；	0.025	0.035	0.045
(3) 已熟密植庄稼	0.030	0.040	0.050
3. 矮树丛			
(1) 稀疏、多杂草；	0.035	0.050	0.070
(2) 不密、夏季情况；	0.040	0.060	0.080
(3) 茂密、夏季情况	0.070	0.100	0.160
4. 树木			
(1) 平整田地、干树无枝；	0.030	0.040	0.050
(2) 干树多新枝；	0.050	0.060	0.080
(3) 密林、树下植物多、洪水位在枝下；	0.080	0.100	0.120
(4) 洪水位淹没树枝	0.100	0.120	0.160

注 此表来自清华大学水力学教研组编写的《水力学》（下册）（1980年修订版），高等教育出版社，1984年8月。



例题 1.1 图

明渠均匀流的水力计算一般有 3 类问题，现举例说明如下：

(1) 已知渠道的断面形状尺寸、渠中水深 h_0 、底坡 i 、粗糙系数 n ，求流量 Q 。

【例题 1.1】 某梯形渠道底宽 $b=6.0\text{m}$ ，正常水深 $h_0=2.0\text{m}$ ，边坡系数 $m=2$ ，底坡 $i=3.0\times$

10^{-4} , $n=0.024$, 求渠中通过的流量。

解:

用谢才公式计算流量:

梯形断面面积为

$$A_0 = (b + mh_0)h_0 = (6 + 2 \times 2) \times 2 = 20 (\text{m}^2)$$

湿周为 $\chi_0 = b + 2L = b + 2\sqrt{1+m^2}h_0 = 6 + 2\sqrt{1+2^2} \times 2 = 14.944 (\text{m})$

水力半径为 $R_0 = A_0/\chi_0 = 20/14.944 = 1.338 (\text{m})$

谢才系数为 $C_0 = \frac{1}{n}R_0^{1/6} = \frac{1}{0.024} \times 1.338^{1/6} = 43.739 (\text{m}^{0.5}/\text{s})$

流量为 $Q = A_0 C_0 \sqrt{R_0 i} = 20 \times 43.739 \times \sqrt{1.338 \times 3 \times 10^{-4}} = 17.526 (\text{m}^3/\text{s})$

用对数律公式计算流量: 由式 (1.12) 得

$$\Delta = (7.66n\sqrt{g})^6 = (7.66 \times 0.024 \times \sqrt{9.8})^6 = 0.0363 (\text{m})$$

$$Q = A_0 (2.5 \ln \frac{R_0}{\Delta} + 6.0) \sqrt{g R_0 i}$$

$$= 20 \times (2.5 \ln \frac{1.338}{0.0363} + 6.0) \sqrt{9.8 \times 1.338 \times 3 \times 10^{-4}}$$

$$= 18.838 (\text{m}^3/\text{s})$$

(2) 已知渠道的设计流量 Q 、底坡 i 、断面形状和粗糙系数 n , 渠道的边坡系数 m , 求正常水深 h_0 。

【例题 1.2】 某电站引水渠的断面为梯形, 并用浆砌石衬砌, 渠道的边坡系数 $m=1$, 底坡 $i=1/800$, 渠道底宽 $b=6\text{m}$, 设计流量 $Q=70\text{m}^3/\text{s}$, 试计算渠堤高度 (要求超高 0.5m)。

解:

由表 1.1 查的浆砌块石护面的粗糙系数 $n=0.0225$ 。

$$A_0 = (b + mh_0)h_0$$

$$\chi_0 = b + 2\sqrt{1+m^2}h_0$$

$$R_0 = \frac{A_0}{\chi_0} = \frac{(b + mh_0)h_0}{b + 2\sqrt{1+m^2}h_0}$$

$$C_0 = \frac{1}{n}R_0^{1/6}$$

$$Q = A_0 C_0 \sqrt{R_0 i} = A_0 \frac{1}{n} R_0^{2/3} \sqrt{i}$$

$$\frac{nQ}{\sqrt{i}} = A_0 R_0^{2/3} = \frac{[(b + mh_0)h_0]^{5/3}}{(b + 2\sqrt{1+m^2}h_0)^{2/3}}$$

写成迭代式得

$$h_0 = \frac{\left[\frac{nQ}{\sqrt{i}} (b + 2\sqrt{1+m^2}h_0)^{2/3} \right]^{3/5}}{b + mh_0}$$

将 $m=1$, 底坡 $i=1/800$, $b=6\text{m}$, $Q=70\text{m}^3/\text{s}$, $n=0.0225$ 代入上式得

$$h_0 = \frac{[44.548(6+2\sqrt{2}h_0)^{2/3}]^{3/5}}{6+h_0}$$

求解上式得 $h_0 = 3.143\text{m}$ 。渠堤高度为

$$\text{渠堤高度} = \text{正常水深} + \text{超高} = 3.143 + 0.5 = 3.643(\text{m})$$

(3) 已知渠道的设计流量 Q 、底坡 i 、正常水深 h_0 、粗糙系数 n 和渠道的边坡系数 m ，求渠道的底宽。

【例题 1.3】 某梯形渠道的电站引水渠，在中等密实黏土中开挖，使用期中岸坡已生杂草，已知梯形断面渠道的边坡系数 $m=1.5$ ，粗糙系数 $n=0.03$ ，底坡 $i=1/7000$ ，渠底到堤顶高差为 3.2m ，电站引用流量 $Q=73.4\text{m}^3/\text{s}$ ，现要求渠道在保证超高为 0.5m 的条件下设计渠底宽度。

解：

由例题 1.2 已得

$$\frac{nQ}{\sqrt{i}} = \frac{[(b+mh_0)h_0]^{5/3}}{(b+2\sqrt{1+m^2}h_0)^{2/3}}$$

将上式变形为

$$b = \frac{[(b+2\sqrt{1+m^2}h_0)^{2/3} nQ/\sqrt{i}]^{3/5}}{h_0} - mh_0$$

将 $m=1.5$ ， $n=0.03$ ， $i=1/7000$ ， $Q=73.4\text{m}^3/\text{s}$ ， $h_0=3.2-0.5=2.7(\text{m})$ 代入上式得

$$b = \frac{[(b+9.735)^{2/3} \times 184.233]^{3/5}}{2.7} - 4.05$$

解上式得 $b=34.52\text{m}$ 。

(4) 已知渠道的设计流量 Q 、断面形状及几何尺寸和粗糙系数 n ，求底坡 i 。

【例题 1.4】 某灌溉渠道，断面形状为 U 形，底部直径 $d=2.5\text{m}$ ，渠道倾角 $\alpha=14^\circ$ ，渠深 2.05m ，要求超高 0.3m ，设计流量 $Q=5.5\text{m}^3/\text{s}$ ，粗糙系数 $n=0.013$ ，试设计渠道底坡 i 。

解：

U 形渠道的断面如图所示。当水深 $h_0 > r(1-\cos\theta)$ 时，水面处于梯形断面内，这时 θ 为一常数，过水断面面积 A_0 、湿周 χ 和水力半径 R_0 计算如下：

$$A_0 = r^2\theta + \frac{(h_0^2 + 2r^2 - 2rh_0)}{\tan\theta} + \frac{2r(h_0 - r)}{\sin\theta}$$

将 $r=1.25\text{m}$ 、 $\theta=(180^\circ-2\alpha)/2=(180^\circ-2\times 14^\circ)/2=76^\circ$ 、 $h_0=2.05-0.3=1.75(\text{m})$ 代入上式得

$$A_0 = 3.813(\text{m}^2)$$

$$\chi_0 = 2r\theta + \frac{2(h_0 - r + r\cos\theta)}{\sin\theta} = 5.485(\text{m})$$

$$R_0 = \frac{A_0}{\chi_0} = \frac{3.813}{5.485} = 0.695(\text{m})$$