

桥涵水文学

孙秀玲 于翠松 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

桥涵水文学

孙秀玲 于翠松 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共分9章,内容包括:绪论;水力学基本知识;水循环与河川径流;水文统计的基本知识;设计流量计算方法;大中桥孔径计算;桥梁墩台冲刷计算;特殊地区桥梁水文计算、桥梁调治构造物;小桥涵孔径计算。

本书可作为高等院校土木工程类专业中的公路与城市道路、桥梁、市政工程方向及其他相关专业的学生教材,也可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥涵水文学/孙秀玲,于翠松编著. —北京:中国水利水电出版社, 2007

ISBN 978-7-5084-4885-5

I. 桥… II. ①孙…②于… III. 桥涵工程—工程水文学
IV. U442.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第114983号

书 名	桥涵水文学
作 者	孙秀玲 于翠松 编著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (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	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 14印张 332千字
版 次	2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷
印 数	0001—2500册
定 价	35.00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

随着社会、经济、科学技术的发展，水文学及路桥工程不断出现新问题、新难点、新理论、新技术方法。为适应当今社会、经济、科学技术的发展及高等教育改革的需要，应对桥涵水文学的教学内容作出适时调整，以满足新形势的要求。

本书是根据“桥涵水文”课程教学大纲的要求，结合最新的技术标准、规范以及水文、公路科技进步的新要求、新理论、新技术等情况，在编著者多年从事该学科的教学、科研、编写讲义及参阅大量有关桥涵水文方面的文献的基础上编写而成的。

本教材共分9章（包括绪论），按教材内容结构可分为两大部分：第一部分主要为河川水文学的概念、理论及方法，包括绪论、第1章、第2章、第3章、第4章，其中绪论介绍了本课程的概貌、水文现象规律及研究方法，第1章讲述了与河川水文学密切相关的水力学的基本知识，第2章介绍了水循环、河川径流的形成、水文信息的采集及相关的知识，第3章讲述了水文统计的基本知识，第4章讲述了用水文统计理论求设计流量及设计水位的方法。第二部分主要为水文学在桥涵工程中的应用，包括第5章、第6章、第7章、第8章，第5章讲述了大中桥孔及桥面标高的计算，第6章讲述了桥梁墩台的冲刷计算，第7章讲述了特殊地区的桥涵水文计算、桥梁调治构造物，第8章讲述了小桥涵孔径计算。

参加编著工作的有孙秀玲（绪论、第1章、第2章、第3章、第4章、第7章第1节、第8章）、于翠松（第5章、第6章、第7章第2节）。

本书由山东大学曹升乐教授、许延生教授审阅。在本书的编写过程中，曹升乐教授、许延生教授、王有志教授提出了许多宝贵意见，同时也得到许多其他同行的支持和帮助，在此一并感谢。

因编著者水平有限，书中定会存在不当或错误之处，恳请读者批评指正。

编著者

2007年5月

目 录

前言

绪论	1
0.1 水文学及水文现象的基本规律与研究方法	1
0.2 桥涵水文学及其主要内容	2
习题	3
第1章 水力学基本知识	4
1.1 液体运动的一些基本概念	4
1.2 恒定流连续方程	7
1.3 恒定流能量方程	9
1.4 明渠恒定均匀流	13
1.5 明渠恒定非均匀流	18
习题	26
第2章 水循环与河川径流	27
2.1 水循环与水量平衡	27
2.2 河流与流域	28
2.3 降水	32
2.4 蒸发与下渗	35
2.5 径流	37
2.6 水文信息采集与处理	41
2.7 搜集水文信息的途径	50
习题	53
第3章 水文统计的基本知识	55
3.1 概述	55
3.2 概率和频率	55
3.3 频率分布	57
3.4 统计参数	61
3.5 水文频率曲线及频率计算适线法	65
3.6 相关分析	82
习题	92

第4章 设计流量的计算方法	94
4.1 利用实测流量资料推求设计流量	94
4.2 大、中河流缺乏流量观测资料时推求设计流量的方法	101
4.3 桥位处的设计水位计算	107
4.4 小流域设计流量计算	108
习题	113
第5章 大中桥孔径计算	116
5.1 桥位河段水流图式和桥孔设计的一般规定	116
5.2 桥孔长度和桥孔布设	119
5.3 桥面标高	125
习题	136
第6章 桥梁墩台冲刷计算	137
6.1 泥沙运动	137
6.2 河床演变	143
6.3 桥下断面的一般冲刷计算	149
6.4 桥墩局部冲刷	156
6.5 桥台冲刷计算	162
6.6 桥下最低冲刷线高程	163
习题	169
第7章 特殊地区桥梁水文计算、桥梁调治构造物	171
7.1 特殊地区的桥梁水文计算要求	171
7.2 桥梁调治构造物	177
习题	184
第8章 小桥涵孔径计算	185
8.1 小桥涵水文勘测	185
8.2 小桥孔径计算	186
8.3 涵洞孔径计算	197
8.4 涵洞类型的选择	202
8.5 涵洞进出口沟床的处理	204
习题	207
附表	208
参考文献	216

绪 论

桥涵水文学是一门专业基础课,属于工程水文学类,它是把水文学知识应用于跨河桥涵工程建设的一门学科。本章主要内容包括水文学及水文学的概念、水文现象的基本规律与研究方法、桥涵水文学的主要研究内容。

0.1 水文学及水文现象的基本规律与研究方法

0.1.1 水文学

水文学是研究自然界各种水体的一门学科。它研究各种水体的存在、分布和循环规律,探讨水体的物理和化学特性,以及它们对环境的作用,包括它们对生物的关系。水体是指以一定形态存在于自然界中的水的总体,如大气中的水汽,地面上的河流、湖泊、沼泽、海洋和地面下的地下水。各种水体都有自己的特性和变化规律,因此,水文学可按其研究对象分为水文气象学、河流水文学、海洋水文学、地下水文学等。一般情况下,水文学指的是河流水文学。各种天然水体中,河流与人类经济生活的关系最为密切,目前已成为内容丰富的一门科学。

0.1.2 水文现象的基本规律

水文现象同其他自然现象一样,具有必然性和偶然性两个方面。在水文学中通常称必然性为确定性,称偶然性为随机性。

1. 水文现象的确定性规律

河流每年都有洪水期和枯水期的周期性交替;冰雪水源河流具有以日为周期的水量变化。产生这些现象的基本原因是地球的公转和自转。在一条河流的流域上降落一场暴雨,这条河流就会出现一次洪水过程。如果暴雨强度大、历时长、笼罩面积大,产生的洪水就大。显然,暴雨与洪水间存在因果关系。这说明水文现象都有其客观发生的原因和具体形成的条件,它是服从确定性规律的。但是,水文现象的确定性规律并不能用严密的数理方程表达出来。

2. 水文现象的随机性规律

河流某断面每年洪水期出现的最大洪峰流量,枯水期的最小流量或年径流量的大小是变化莫测的,具有随机性的特点。但是,通过长期观测可以发现,特大洪水流量和特小枯水流量出现的机会较小,中等洪水和枯水出现的机会较大,而多年平均的年径流量却是一个趋近稳定的数值。水文现象的这种随机性规律需要由大量资料统计出来,所以通常称为统计规律。

3. 水文现象的地区性分布规律

气候、地理和流域特征,都因地区不同而各异,河流水文现象在这些因素的综合影响



下也具有随地区不同而变化的性质,这就是水文现象的地区性。例如我国南方河流比北方河流汛期早、水量大,山区河流的洪水暴涨暴落而平原河流涨落平缓,都是明显的地区性表现。处于同一地区或者流域特征相类似的河流,水文现象具有相类似的特点,这也是地区性的变化规律。

0.1.3 水文学的研究方法

根据水文现象的基本规律,按不同的要求,水文学的研究方法通常可以分为三类。

1. 成因分析法

由于水文现象与其影响因素之间存在确定性关系,通过观测资料和实验资料的分析研究,可以建立这一水文现象与其影响因素之间的关系。这样,就可以根据当前影响因素的状况,预测未来的水文现象。这种利用水文现象的确定性规律来解决水文问题的方法,称为成因分析法。这种方法能求出比较确切的成果,在水文现象基本分析和水文预报中,得到广泛的应用。

2. 数理统计法

根据水文现象的随机性,以概率论为基础,运用数理统计方法,可以求取长期水文特征值系列的概率分布,从而得出工程规划设计所需要的设计水文特征值。水文计算的主要任务,就是预估某些水文特征值的概率分布。因此,数理统计法是水文计算的主要方法。

3. 地区综合法

根据气候要素及其他地理要素的地区性规律,我们可以按地区研究受其影响的某些水文特征值的地区分布规律。这些研究成果,可以用等值线图或地区经验公式表示(如多年平均年径流量等值线图、洪水地区经验公式等)。利用这些等值线图或经验公式,可以求出观测资料短缺地区的水文特征值,这就是地区综合法。

0.2 桥涵水文学及其主要内容

0.2.1 工程水文学及桥涵水文学

工程水文学是把水文学知识应用于工程建设的一门学科。它研究与工程的规划、设计、施工和运营管理有关的水文问题。桥涵水文学属于工程水文学类,它是把水文学知识应用于桥涵工程建设的一门学科。它研究与桥涵工程的规划、设计、施工和运营管理有关的水文问题。

0.2.2 桥涵水文学的主要内容

桥涵水文学的主要研究内容如下:

1. 河川水流运动的基本规律、河川水文及水文统计知识

运动在河床中的水流有其自身的规律,运动的水流的力学特性、连续特性、运动特性及能量特性等都会直接影响跨河桥涵工程的规划、设计、施工及运营管理,借助水力学的基本知识认识、了解河床中水流的基本规律是必要的。水循环是一切水文现象的变化根源,径流是水循环的要素之一,径流的形成、运动、分布规律及水信息的采集技术是河川水文学的基础知识;应用概率论与数理统计研究水文现象的基本规律是水文统计的内容。河川水文及水文统计知识都与桥涵工程建设密切相关,本部分是桥涵水文学的基础部分。

2. 跨河桥涵设计流量的确定

在水流与河床的长期相互作用下,人们发现就某一河流过水断面而言,通过某一洪水流量所需的过水面积、达到的洪水位、水面宽度、水流流速及河床遭到的冲刷都与流量有密切关系,因此,在桥梁、涵洞等各项工程设计时,把流量作为决定桥涵等工程规模的重要参数。满足设计标准的流量称为设计流量,确定的设计流量过大,造成所建桥涵工程不经济,确定的设计流量过小,造成工程不安全,所以桥涵设计流量的确定是桥涵水文学的主要任务之一。

3. 跨河桥涵建筑物孔径的确定

跨河桥涵建筑物的设计必须保证桥下水流、泥沙及其水表面的漂浮物(流冰、流木、航船)的顺利宣泄与通过,要求跨河桥涵建筑物有一定的跨径与高度。如跨径过大或桥梁过高,则造成不经济;如跨径过小或桥梁过低,则影响桥涵的正常运用,甚至危及跨河桥涵的稳定与安全,因此,合理地确定跨河桥涵建筑物的孔径是桥涵水文学的主要内容之一。

4. 跨河桥梁建筑物基础埋置深度的确定

水流对河床有冲刷和淤积作用,河流断面上设置桥涵工程后,桥涵工程对河道水流及泥沙的运动有一定影响,而水流及泥沙的运动也对桥涵建筑物的墩台有冲刷作用,建筑物的埋置深度确定的合适与否,直接关系到工程的投资及工程的安全,因此,跨河桥涵建筑物基础埋置深度的确定是桥涵水文学的又一主要内容。

5. 桥梁调治构筑物布设

调治构筑物是桥梁工程的重要组成部分,用以调节水流,使水流均匀、顺畅地流过桥孔,防止桥下断面和上下游附近的河床发生不利变形,确保桥梁工程的安全运行。调治构筑物的布设也是桥涵水文学的主要内容之一。

习 题

- 0-1 什么是水文学?桥涵水文学与水文学有何联系?
- 0-2 水文现象有哪些基本规律和相应的研究方法?
- 0-3 桥涵水文学的任务是什么?
- 0-4 试举出水文学中关于确定性规律、随机性规律、地区分布性规律的例子。

第1章 水力学基本知识

水力学是研究水体平衡和运动规律及工程应用的科学，是桥涵水文课程中确定桥涵设计流量、孔径及基础埋深的基本理论。本章仅介绍水力学中的水动力学方面的知识。

1.1 液体运动的一些基本概念

从欧拉法的观点出发，介绍下列与液体运动有关的一些基本概念。

1.1.1 恒定流与非恒定流

按运动要素是否随时间变化，把液流分为恒定流和非恒定流。

1. 恒定流

运动要素均与时间无关，仅为坐标的函数，即

$$\left. \begin{aligned} p &= p(x, y, z) \\ u_x &= u_x(x, y, z), u_y = u_y(x, y, z), u_z = u_z(x, y, z) \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 p, u_x, u_y, u_z ——任一空间点上液体质点的动水压强，流速 u 在 x, y, z 方向的分量。

2. 非恒定流

运动要素变化与时间有关。如闸门开关和河道洪水涨落时的水流运动。

恒定流又称稳定流。恒定流的流线（某一瞬时在场中绘出的曲线，在此曲线上所有液体质点的速度矢量都和该曲线相切，所以流线表示出了瞬间的流动方向）与迹线（液体质点运动时所走过的轨迹线）重合；非恒定流的流线与迹线不重合。

1.1.2 一元流、二元流、三元流

为区别运动要素随坐标变化的情况，而进行如下分类。

1. 一元流

若液体的运动要素是一个坐标变量的函数，这种运动称为一元流。

2. 二元流

若液体的运动要素是两个坐标变量的函数时，这种运动称为二元流或平面运动，如图 1-1 所示。

3. 三元流

若液体的运动要素为三个坐标变量的函数时，称为三元流，又称三维或空间运动。

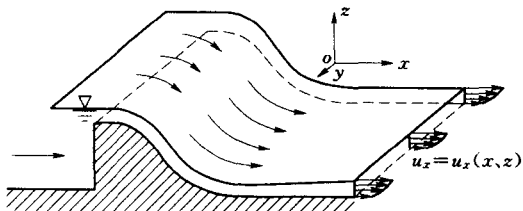


图 1-1 二元流

严格地讲,液体运动一般都是三元流。由于三元流的复杂性,求解时往往遇到数学上的困难,为了便于解决实际问题,常简化采用二元流、一元流的研究方法。

1.1.3 有压流、无压流和射流

据限制水流边界条件的不同,可分为有压、无压和射流运动三种情况。

1. 有压流

水流过水断面周界全部为固体边界所限时,称为有压流,如图 1-2 (a) 所示的自来水管道水流。

2. 无压流

水流过水断面部分被固体边界所限,并且具有自由表面,这种情况称为无压流,如图 1-2 (b) 中所示的管道水流。

3. 射流

水流过水断面周界全部与水流相接触时称为射流,如图 1-2 (c) 所示。由容器孔口中射出的水流、喷泉以及消防等水流皆为射流。

实际上水流往往是上述分类的综合,例如某水流为恒定有压一元流或非恒定无压三元流等。

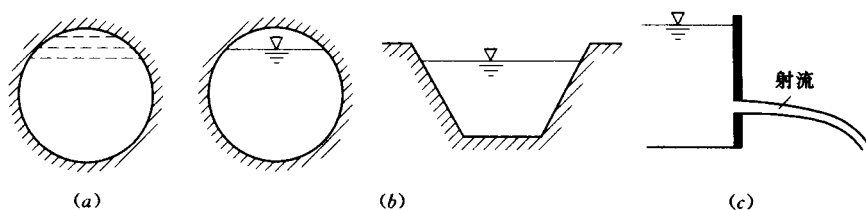


图 1-2 有压流、无压流和射流图

1.1.4 过水断面、流管、元流、总流

1. 过水断面

垂直于流线的液流横断面称为过水断面,其面积用 A 表示,单位为 m^2 。过水断面可以是平面,也可以是曲面,如图 1-3 虚线所示。

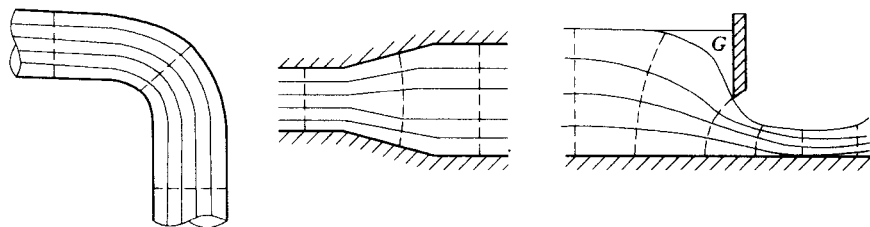


图 1-3 过水断面

2. 流管

在水流中任取一微分面积 dA , 由 dA 周边各点引出的流线形成一管状曲面,即为流管,如图 1-4 所示。

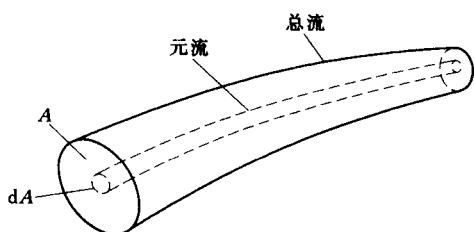


图 1-4 流管、元流、总流

3. 元流

充满流管的液流称为元流或微小流束。

4. 总流

水流的整体或全部元流的汇合称为总流。

通过总流过水断面的周边做流线，可以得出总流流管。

1.1.5 湿周、水力半径、流量及断面平均流速

1. 湿周

过水断面周界上具有内摩擦力存在的部分称为湿周。通常仅考虑水流与固体接触的周界长度为湿周，以 χ 表示，如图 1-5 中粗线所示。

2. 水力半径

过水断面面积与湿周之比称为水力半径，以 R 表示，单位为 m ，即

$$R = \frac{A}{\chi} \quad (1-2)$$

水力半径大小表示在过水断面相等条件下，湿周对水流阻力的影响程度。

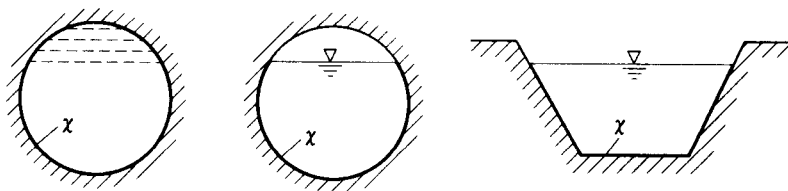


图 1-5 湿周

3. 流量及断面平均流速

单位时间内通过某一过水横断面的液体体积称为流量，用 Q 表示。流量是衡量过水断面过水能力大小的一个物理量，它的单位是 m^3/s 或 L/s 。

对于元流，由于过水断面很小，可以认为过水断面 dA 上各点的流速相等，均为 u ，方向与过水断面相垂直，则 dt 时段内通过断面 dA 的液体体积为 $u dA dt$ ，而单位时间通过 dA 的液体体积即元流流量为

$$dQ = u dA \quad (1-3)$$

对于总流，若过水断面是平面，则总流 Q 是元流流量 dQ 的积分，即

$$Q = \int dQ = \int_A u dA \quad (1-4)$$

总流过水断面上流速分布一般都较为复杂，因而式 (1-4) 难以积分，为此引入平均流速的概念，其定义为

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1-5)$$

平均流速 v 的单位是 m/s ，它是一个计算值，它能近似反映出过水断面流速的大小，故广泛应用于各种水力计算。由式 (1-5) 得出总流流量为

$$Q = vA$$

(1-6)

1.1.6 均匀流与非均匀流

根据流线分布形状或过水断面上流速沿流的变化, 可以将水流分为均匀流、渐变流和急变流, 如图 1-6 所示。

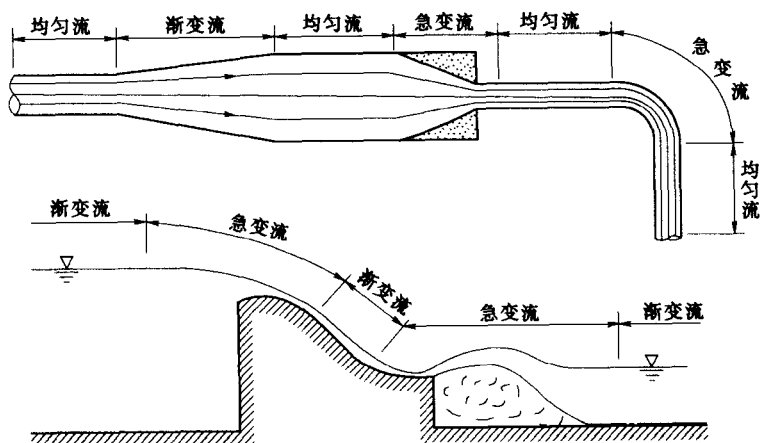


图 1-6 均匀流、渐变流和急变流

1. 均匀流

流速的大小和方向沿流线不变的流动称为均匀流。均匀流具有如下特征:

- (1) 过水断面为平面, 其大小和形状沿流不变。
- (2) 过水断面上各点流速和分布以及平均流速均沿流不变。
- (3) 过水断面上动水压强按静水压强规律分布。

2. 非均匀流

流速的大小和方向沿流线变化的流动称为非均匀流。非均匀流又可根据流速沿流线变化的缓、急程度分为渐变流和急变流。

渐变流是流速沿流线变化缓慢的流动。渐变流在水力特性上十分接近于均匀流, 水流位移加速度可以忽略不计, 过水断面近似为平面, 其上动水压强亦近似按静水压强规律分布, 故常将均匀流的理论应用于渐变流。

急变流是流速沿流线变化急剧的流动。急变流与渐变流不同, 流线间夹角大或者曲率半径小, 或两者同时兼具, 此时水流位移加速度及其所产生的惯性力不能忽略, 因而过水断面上动水压强不按静水压强规律分布。

1.2 恒定流连续方程

液体一元流动的连续性方程是水力学中的一个基本方程, 它是质量守恒原理在水力学中的具体体现。对不可压缩液体的恒定总流, 从总流中任取一束元流, 如图 1-7 所示, 根据质量守恒原理, 可分析出元流的连续性方程, 将元流的连续性方程在总流过水断面上积分可得出总流的连续性方程为:



$$\int dQ = \int_{A_1} u_1 dA_1 = \int_{A_2} u_2 dA_2 \quad \text{或} \quad Q_1 = Q_2 \quad (1-7)$$

引入断面平均流速后成为

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = Q = \text{常量} \quad (1-8)$$

式(1-7)、式(1-8)为液体总流的连续方程。它表明,不可压缩液体的恒定总流中,流量沿流不变,任意两过水断面,其平均流速与过水断面面积成反比。

连续方程是个不涉及任何作用力的运动学方程,所以,它无论对于理想(非粘性)液体或实际(粘性)液体都适用。

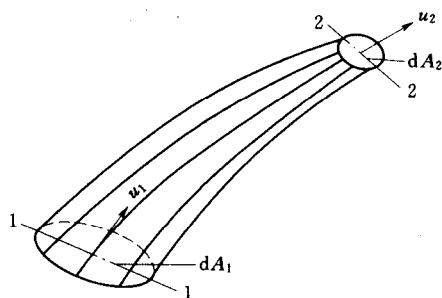


图 1-7 元流束

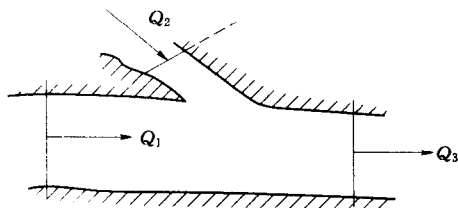


图 1-8 沿程有流量流进示意图

连续方程不仅适用于恒定流条件下,而且在边界固定的水流中,即使是非恒定流,对于同一时刻的两过水断面仍然适用。当然,非恒定管流中的流速与流量要随时间改变。

上述总流的连续方程是在流量沿程不变的条件下得出的。若沿程有流量流进或流出,则总流的连续性方程在形式上需作相应的修正,如图 1-8 所示的情况:

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (1-9)$$

【例 1-1】 已知输水管各段直径分别为 $d_1=2.5\text{cm}$, $d_2=5\text{cm}$, $d_3=10\text{cm}$, 出口流速 $v_3=0.51\text{m/s}$, 如图 1-9 所示, 求流量及其他管段的断面平均流速。

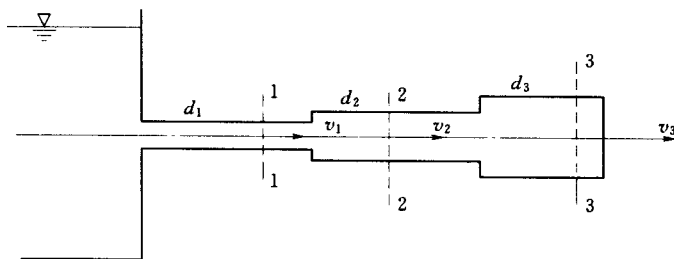


图 1-9 例 1-1 图

解: 根据连续方程可得:

$$v_1 = \frac{A_3}{A_1} v_3 = \left(\frac{d_3}{d_1} \right)^2 v_3 = \left(\frac{0.1}{0.025} \right)^2 \times 0.51 = 8.16 (\text{m/s})$$

$$v_2 = \frac{A_3}{A_2} v_3 = \left(\frac{d_3}{d_2} \right)^2 v_3 = \left(\frac{0.1}{0.05} \right)^2 \times 0.51 = 2.04 (\text{m/s})$$

$$Q = A_3 v_3 = \frac{\pi d_3^2}{4} v_3 = \frac{1}{4} \times \pi \times (0.1)^2 \times 0.51 = 0.004 (\text{m}^3/\text{s})$$

1.3 恒定流能量方程

1.3.1 恒定元流的能量方程

1. 理想（非粘性）液体恒定元流能量方程

为便于理解，我们用牛顿第二定律来推导元流能量方程式。在元流上取一微分流段 ds ，其横断面积为 dA 。为了衡量液体的位能，取一水平基准面 0—0，如图 1-10 所示。

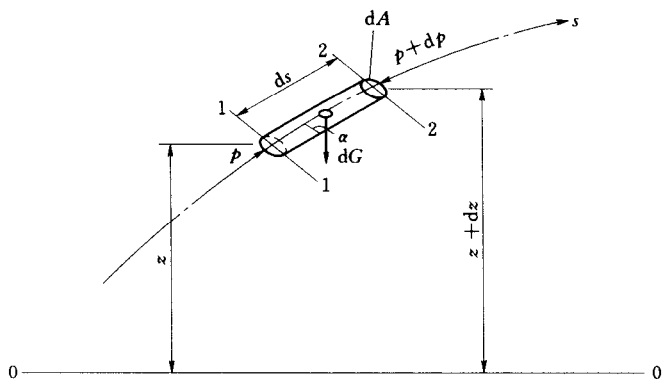


图 1-10 元流微分段受力图

根据牛顿第二定律，作用于微分流段液体的外力沿 s 方向的合力，应等于该流段质量 $\frac{\rho g}{g} dA ds$ （其中 ρ 为液体密度）与其加速度 $\frac{du}{dt}$ 的乘积，其中 u 为流段液体的流速。

作用在微分流段上沿 s 方向的外力有：过水断面 1—1 及 2—2 上的动水压力；重力沿 s 方向的分力 $dG \cos \alpha = \rho g dA ds \cos \alpha$ ，流段侧壁上的动水压力在 s 方向没有分力，由于考虑的是理想液体，侧壁上摩擦力为零。令在断面 1—1 上动水压强为 p ，其动水压力为 $p dA$ ，断面 2—2 上的动水压强为 $(p + dp)$ ，其动水压力为 $(p + dp) dA$ 。若以 0—0 为基准面，断面 1—1 及 2—2 的形心点距基准面分别为 z 及 $z + dz$ ，则 $\cos \alpha = \frac{dz}{ds}$ ，故重力沿 s 方向的分力为 $\rho g dA ds \frac{dz}{ds} = \rho g dA dz$ 。

对微分流段沿 s 方向应用牛顿第二定律，则有

$$p dA - (p + dp) dA - \rho g dA dz = \frac{\rho g}{g} dA ds \frac{du}{dt} \quad (1-10)$$

对恒定一元流， $u = u(s)$ ，故

$$\frac{du}{dt} = \frac{du}{ds} \frac{ds}{dt} = u \frac{du}{ds} = \frac{d}{ds} \left(\frac{u^2}{2} \right) \quad (1-11)$$

将式 (1-11) 代入式 (1-10) 简化后可得

$$\frac{d}{ds} \left(z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} \right) = 0 \quad (1-12)$$



将式(1-12)沿流程 s 积分,则有

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = \text{常量} \quad (1-13)$$

式(1-13)表明,不可压缩、恒定流仅有三项能量,即位能 z 、压能 $\frac{p}{\rho g}$ 和动能 $\frac{u^2}{2g}$ 。

在非粘性液体条件下,三项能量之和沿流不变,即机械能守恒。

因此,对元流上任意两个过水断面有

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (1-14)$$

式(1-14)就是不可压缩理想液体恒定元流的能量方程。该式是瑞士科学家伯努利(Bernoulli)于1738年首先提出的,故又称为伯努利方程。

2. 实际(粘性)液体恒定元流能量方程

由于实际液体存在着粘滞性,在流动的过程中,要消耗一部分能量用于克服摩擦力而做功,液体的机械能要沿流程而减少,对机械能来说即存在着能量损失。因此,对实际液体来讲,机械能并不守恒,总是沿流不断减少。令单位重量液体从断面1—1流至断面2—2所损失的能量为 h'_w ,则得出实际液体恒定元流机械能平衡方程式:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h'_w \quad (1-15)$$

式(1-15)就是不可压缩实际液体恒定元流的能量方程。

1.3.2 实际液体恒定总流能量方程

1. 实际液体恒定总流能量方程

总流是许多元流的总和,对不可压缩实际恒定元流方程积分即可得出实际液体恒定总流能量方程。由于在积分过程中引入平均流速,因而产生动能修正系数 α 。积分后得出的实际液体恒定总流能量方程为

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w \quad (1-16)$$

动能修正系数 α 的大小取决于过水断面上流速分布情况,流速分布愈均匀, α 愈接近于1;不均匀分布时, $\alpha > 1$;在渐变流时,一般 $\alpha = 1.05 \sim 1.1$ 。为计算简便起见,通常取 $\alpha \approx 1$ 。实际液体恒定总流能量方程表达了总流单位能量转化和守恒的规律,是水力学中应用最广的基本方程之一。

2. 实际液体恒定总流能量方程图示

实际液体恒定总流能量方程中,共包含了4个物理量,其中 z 代表总流过水断面上单位重量液体所具有的平均位能,一般又称为位置水头; $\frac{p}{\rho g}$ 代表过水断面上单位重量液体所具有的平均压能,它反映了过水断面上各点平均动水压强所对应的压强高度, $(z + \frac{p}{\rho g})$ 称为测压管水头; $\frac{\alpha v^2}{2g}$ 代表过水断面上单位重量液体所具有的平均动能,一般称为流速水头。 h_w 为单位重量液体从一个过水断面流到另一个过水断面克服水流阻力做功所损失的平均能量,一般称为水头损失。在水力学中,习惯上把单位重量液体所具有的总机械能(即位能、压能、动能的总和)称为总水头,并以 H 表示,即

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad (1-17)$$

在总流中任意选取两个过水断面, 该两段面上液流所具有的总水头若为 H_1 和 H_2 , 根据能量方程式:

$$H_1 = H_2 + h_w \quad (1-18)$$

对于理想液体, 由于没有水头损失, $h_w = 0$, 则 $H_1 = H_2$, 即在不计能量损失情况下, 总流中任何过水断面上总水头保持不变。

为了形象地反映总流中各种能量的变化规律, 可以把能量方程用图形描绘出来。因为单位重量液体所具有的各种机械能具有长度的量纲, 于是可用水头为纵坐标, 按一定的比例尺沿流程把过水断面的 z , $\frac{p}{\rho g}$ 及 $\frac{\alpha v^2}{2g}$ 分别绘于图 1-11 上。 z 值在总流过水断面上各点是变化的, 一般选取断面形心点的 z 值来标绘, 相应的 $\frac{p}{\rho g}$ 亦选用形心点动水压强来标绘。

把各断面的 $(z + \frac{p}{\rho g})$ 值的点子连接起来可以得到一条测压管水头线, 把各断面 $H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ 描出的点子连接起来可以得到一条总水头线, 如图 1-11 所示, 任意两断面之间的总水头线的降低值, 即为该两断面间水头损失 h_w 。

由能量方程的物理意义不难得出, 实际液体总流的总水头线必定是一条逐渐下降的线 (直线或曲线), 因为总水头总是沿程减小的, 而测压管水头线则可能是下降的线 (直线或曲线), 也可能是上升的线 (直线或曲线), 甚至可能是一条水平线, 这要看总流的几何边界变化情况而作具体分析。

总水头线沿流程的降低值与流程长度之比, 称为总水头线坡度, 也称水力坡度, 常以 J 表示。水力坡度也可以称为流经单位长度的单位体积水流的能量损失。若总水头线为直线时, 有

$$J = \frac{H_1 - H_2}{s} = \frac{h_w}{s} \quad (1-19)$$

当总水头线为曲线时, 其坡度为变值, 在某一断面处坡度可表示为

$$J = \frac{-dH}{ds} = \frac{dh_w}{ds} \quad (1-20)$$

因总水头增量 dH 始终为负值, 为使 J 为正值, 上式中加“—”号。总水头线坡度 J 是表示单位流程上的水头损失。

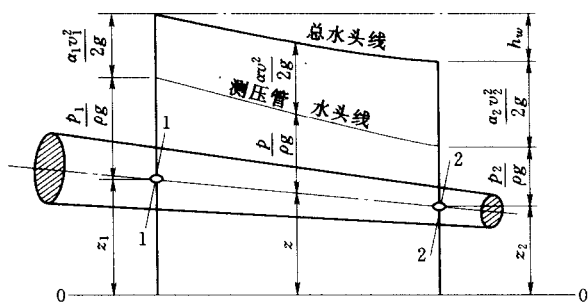


图 1-11 能量方程示意图

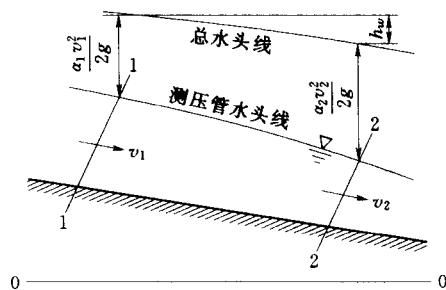


图 1-12 河渠渐变流水头线