

964684

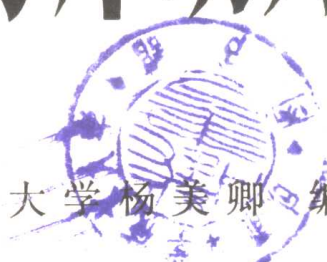
TV143
4787

清华大学出版社
1997

高等学校教材

河流与海岸动力学引论

清华大学杨美卿编



143
37



TV143
4787

964684

TV143
4787

高等学校教材

河流与海岸动力学引论

清华大学 杨美卿 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

高等学校教材

河流与海岸动力学引论

清华大学 杨美卿 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京师范大学印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 8.75印张 191千字

1993年6月第一版 1993年6月北京第一次印刷

印数0001—1090册

ISBN 7-120-01785-3/TV·640

定价2.35元

内 容 提 要

全书共八章，论述了河流与海岸动力学的基本原理，包括河流与河道水流，泥沙和浑水的性质，床面形态与动床水流阻力，河流泥沙的运动和输移，河流的河床演变，海岸与河口的动力条件，海岸泥沙运动与岸滩演变，河口泥沙运动与河床演变等。本书密切结合我国实际情况，引用大量国内外的资料，努力博取众家之长，力图反映最新成果，叙述深入浅出，简明扼要。本书是为水资源专业和水工建筑专业而编写的本科生教材，其他相近专业，如港口航道专业、环境工程专业等亦可选用，并可供这些专业的工程技术人员参考。

前 言

本教材是根据水利部1990~1995年水利水电类专业本科、研究生教材的选题和编审出版规划,适应水工建筑专业和水资源专业的选修课教学需要而编写的。作为非治河泥沙专业的选修课,要在30~40学时内讲授《河流与海岸动力学引论》,不仅要求教材基本概念阐述准确,有充分的系统性和完整性,而且要求内容精炼,使学生掌握这门学科最基本的知识,了解其现状和将来的发展,为今后的深入研究和实际应用奠定基础。在本书的编写过程中,作者是按此要求而努力的。

这本教材的初稿是清华大学讲义《河流与海岸动力学》,它的体系设计和章节、内容安排等曾得到夏震寰教授、惠遇甲教授的指教,在清华大学水工建筑专业和水资源专业多年的教学过程中几经修改和补充,杨铁笙同志参加了教学工作并提供了修改建议。

本书由武汉水利电力学院丁君松教授担任主审,丁教授逐章逐节提出了修改意见。清华大学水电系泥沙研究室的同志们一直关心、支持和鼓励这本教材的编写和出版。在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者理论水平、生产实践和教学经验的限制,书中定有不少缺点和错误,敬请读者批评指正。

杨美卿 于清华园

1992.6.1

3905/03

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 河流与河道水流	3
第一节 流域、水系与河流	3
第二节 河流泥沙的来源	5
第三节 河道水流的特点	5
第四节 明槽水流的紊动	6
第五节 河道水流的流速和阻力	8
第六节 弯道水流	12
第二章 泥沙和浑水的基本性质	14
第一节 泥沙的粒径、级配和形状	14
第二节 泥沙的重度	17
第三节 细泥沙的物理性质	18
第四节 含沙浑水的性质	19
第五节 泥沙的沉速	20
第三章 床面形态和动床阻力	26
第一节 泥沙的起动	26
第二节 沙波运动	31
第三节 动床水流阻力	36
第四章 河流泥沙的运动和输移	41
第一节 河流泥沙的基本运动形式	41
第二节 推移质运动的特点	42
第三节 推移质输沙率	43
第四节 悬移质运动及其扩散理论	47
第五节 悬移质输沙率和水流挟沙力	52
第六节 输沙的沿程变化与河床冲淤	56
第五章 河流的河床演变	59
第一节 平原河流概况	59
第二节 弯曲型河流的河床演变	60
第三节 游荡型河流的河床演变	66
第四节 分汊型和顺直型河流的河床演变	68
第五节 山区河流的河床演变	71
第六节 河流自动调节作用与河相关系	74
第六章 海岸与河口的动力条件	80

第一节	海洋力场	80
第二节	海流	82
第三节	波浪	83
第四节	潮汐	95
第七章	海岸泥沙运动与岸滩演变	99
第一节	海岸带地貌与泥沙运动的形式	99
第二节	波浪作用下的泥沙运动	100
第三节	推移质输沙率	102
第四节	悬移质运动	104
第五节	沿岸流输沙和海岸冲淤	106
第六节	海滩横向输沙和海滩剖面	109
第八章	河口泥沙运动与河床演变	114
第一节	河口的潮波	114
第二节	河口盐水楔与盐淡水混合	116
第三节	河口的泥沙运动	118
第四节	河口的分类与河床演变	121
第五节	工程设施对河口河床演变的影响	127
	参考文献	131

绪 论

我国幅员辽阔，960万平方公里土地上分布着众多的江河，东临太平洋，有绵延万里的海岸线和数千个岛礁。江河两岸和沿海地区多是国土的精华，是富饶的工农业基地，许多大中城市、金融和贸易中心也集中在这里。丰富的水利资源提供了廉价而清洁的能源、工农业用水和生活用水，以及交通运输之利。但是，我国又是一个水旱灾害十分频繁的国家，至今仍有大片的国土和上亿的人民经常遭受洪水的威胁。水利工作者的任务就在于修建和运用工程设施，除害兴利，造福人民。进行工程建设需要了解河流与海岸的现状，了解其历史和将来的发展趋势，预报工程设施可能引起的问题。河流与海岸的变化取决于水体的动力作用，“河流与海岸动力学”就是研究河流与海岸在各种动力作用下的泥沙运动规律和它们所造成的河床与海岸的演变。所以，水利科技人员学习和掌握河流与海岸动力学的基本原理具有重要的意义。

河流与海岸动力学涉及到广阔的领域，需要水力学、水文学、海洋学和地质地貌学等多方面的基础知识，其中很重要的是泥沙运动的规律。课程将讨论河流及其水流的特点，泥沙和浑水的性质，泥沙起动条件及床面形态与动床阻力，河流泥沙的运动和输移，河流的河床演变。然后再讨论河口与海岸的主要动力作用，海岸泥沙运动与岸滩演变，河口的泥沙运动与河床演变等内容。

对河流与海岸变化规律的探索已有悠久的历史。据说春秋战国时期已有含沙量的概念。汉代贾让已用“游荡”来描述黄河下游河道摆动多变的特性，宋代欧阳修已认识到泥沙淤积与堤防决口的关系。明代潘季驯根据水沙运动规律提出“坚固堤防，稳定河道，束水攻沙”的治理黄河的策略。一些古代的水利工程、河海港口工程、海塘与海岸防护工程中，已经比较成功地应用了河流与海岸动力学的某些原理。例如都江堰引水灌溉工程，设置鱼嘴分水分沙，飞沙堰泄流排沙，宝瓶口取水防沙。工程布置符合水沙运动的规律，加上合理的管理维修制度，使之两千年来一直能发挥巨大的效益。成都平原因此成为“水旱从人，不知饥馑，沃野千里”的天府之国。虽然我国劳动人民在江河海岸治理方面积累了丰富的经验，但由于历史的局限性，这些经验未能得到进一步提高而形成系统的科学理论。

新中国建立以后，随着社会主义建设的发展，我国进行了大规模的水利工程和港口航道工程建设。生产实践迫切要求回答河流海岸有什么特性，将如何发展与演变，对工程建设有何反应，将产生什么影响等问题。强烈的社会需求推动着学科的发展。在学习国外和前辈研究成果的同时，依靠社会主义制度提供的优越条件，集中各方面的力量结合国家建设进行大量深入的工作，使河流与海岸动力学的研究内容日益丰富，日益系统化。从60年代起，陆续有专著和教材出版，逐渐形成一门新兴的学科。我国许多著名的学者积极提倡、努力实践，为此作出了卓越的贡献。近十余年来，这个领域的发展更为迅速。但是，

这门学科毕竟还很年轻，体系尚不够完整、严格。它所涉及的客观现象十分复杂，进行测量和收集资料又很困难，所以有的问题尚无定论，甚至有相互矛盾的情况，这是不足为奇的。这也表明河流与海岸动力学具有广阔的发展前景。

研究河流与海岸动力学需要多种方法结合进行。根据现象的物理性质建立各要素之间的力学关系是基本的研究方法。同时还需要进行现场调查测量，进行室内外的试验研究，为分析提供依据，获得实用的经验关系。近年来数学模型方法有很大的进展，成为重要的研究手段。只有几种研究方法结合起来，取长补短，才能得到比较符合实际的结果，才能解决实际问题。在学习河流与海岸动力学时，也应注意这些研究方法的特点。

第一章 河流与河道水流

第一节 流域、水系与河流

河流的特性是由流域的自然地理条件所决定的。要了解河流就必须了解它所在的流域及其地形、地质、气候和植被等因素。河流和它的支流组成水系。水系的平面形状多种多样，有的如树枝，有的似羽毛，有的呈放射状。这与流域的地形起伏、地质构造和岩性变化有密切关系。河流的分布与走向多是沿着地势比较低洼或地质构造比较软弱的地带。地壳的升降，河流的侵蚀与堆积，气候变迁，火山地震，以及人类活动等，都可能造成河流水系的变化。

描述流域和水系的特性常常用到如流域面积、河网密度、河流高差等概念和参数。河流与其相邻河流的分水岭所包围的面积称为这条河流的流域面积，它是反映流域特性的重要参数。流域面积内形成的径流最后都汇集到这条河流中，由它送入大海、湖泊或其它河流。河网密度指单位流域面积上河流的总长度。各地区的河网密度差别很大，一般说来，干旱地区的河网密度较大，雨量丰富地区则相对较小。流域最高点与河口的高程差称为流域的高差，它与流域长度或河流干流长度的比值称为流域的平均坡度。流域高差和平均坡度可以反映流域内水流势能和水流侵蚀作用的大小。

流域的这些参数对河流特性有重要影响。许多资料表明，河流流量与流域面积 A 之间有良好的关系。例如频率为 P 的洪峰流量 Q_p 可以表示为： $Q_p = C \cdot A^m$ ，其中 C 为系数， m 为指数，均因地区而异。如在山西晋中地区，十年一遇的洪水可取 $m = 0.67$ ，视地形、土壤和植被取 $c = 5 \sim 20$ 。河网密度反映了水系输送水沙的效率。河流所输送的径流总是与其河网系统相适应的，所以河流流量与河网密度之间常有较好的相关关系。此外，流域的地形、岩性和土质的分布，森林、草场和植被，作物和土壤利用情况，以及人类活动与工程设施等，对河流的径流特性也有明显的影响。

河流可划分为山区河流与平原河流。有的可能上段属于山区河流，下段则属于平原河流。河流流经的谷地称为河谷。平原河流的河谷较为宽阔，常覆盖着深厚的冲积层，河流在冲积层上发展和演变。河流岸线之间的水流边界称为河床。岸线随水位涨落而变化，中水位下的河床称为河流的主槽。大洪水时，水位上涨漫溢主槽，岸线向岸推移，水面宽度骤增。靠近主槽，在大洪水时被水流淹没的河边滩地称为河漫滩。河床与河漫滩总称为河谷的谷底，其两边至山麓则为谷坡。有时谷坡上还存在着一级或多级的河流阶地。河床、河漫滩与河流阶地是构成河流河谷的基本要素。

除基岩河床外，河床上大多覆盖着松散的泥沙。河床泥沙的颗粒组成与河谷冲积层的物质组成有关，并随河流来水来沙情况与河床的冲刷和淤积而变化。一般说来河床泥沙有向下游逐渐变细的趋势。平原河流的河床比较宽浅，河床物质多为中细沙或粉土、粘土。

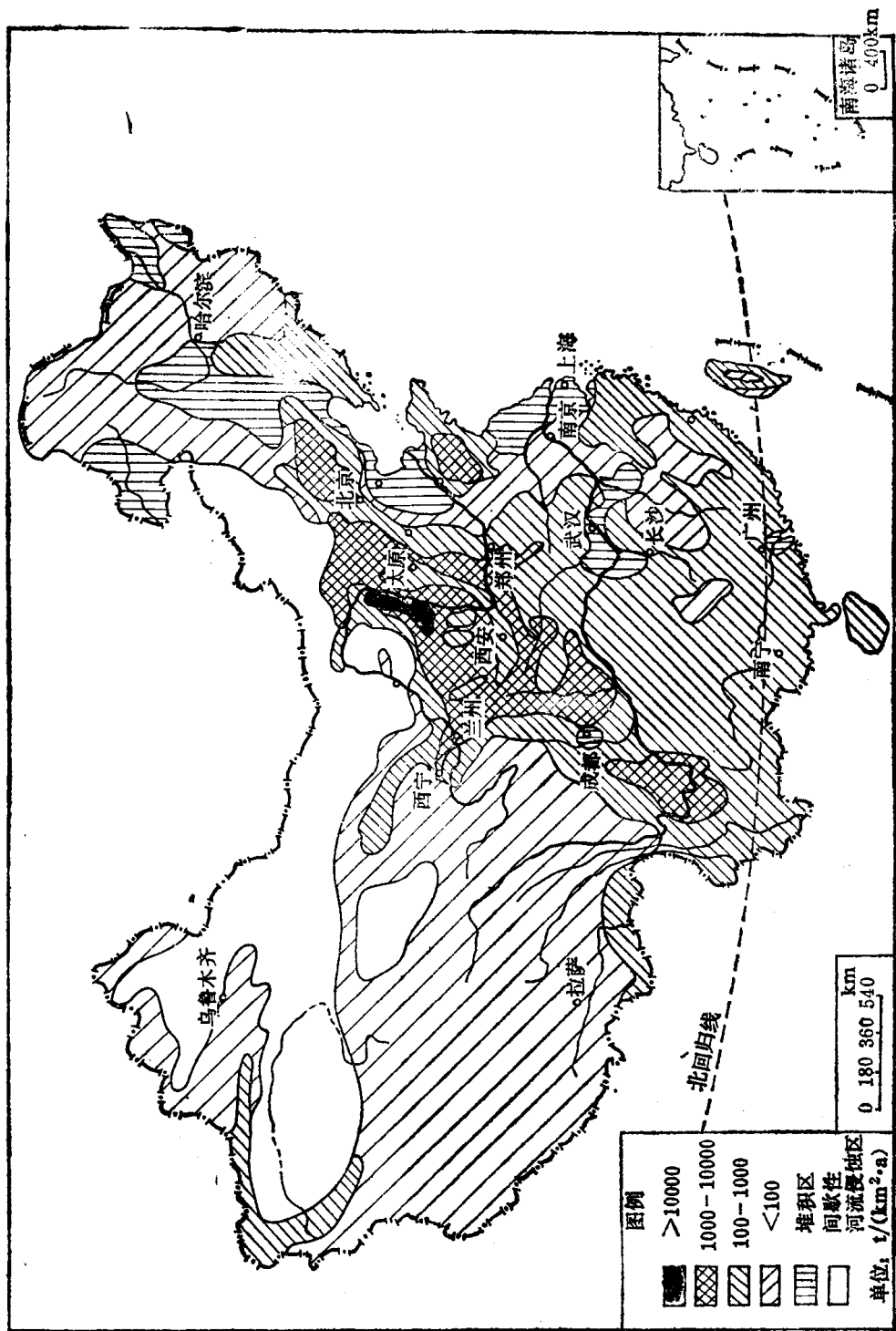


图 1-1 全国河流输沙模数分布图

山区河流的河床两岸常较陡峻，河谷冲积层浅薄，河漫滩不甚发育，河床泥沙颗粒较粗，多有卵砾石覆盖，有的还存在岩盘，甚至完全为基岩。河床纵剖面多不光滑，沿程起伏，深浅相间。有的山区河流的河床还出现陡坡和跌坎。

第二节 河流泥沙的来源

河流泥沙包括由水流挟带或推动而沿河运动的泥沙和组成河床边界的静止泥沙。其矿物成分主要是氧化硅、氧化铝、氧化铁和氧化镁等，其中以二氧化硅为最多。河流泥沙来自于上游河道或流域，从根本上说，来自流域地表岩石的风化和土壤的侵蚀。此外，生物残骸、火山灰渣等也可以形成泥沙。

降雨和径流对地表的侵蚀分为面蚀和沟蚀两类。面蚀指降雨和径流在坡面上造成的侵蚀，如雨滴激溅和面流对地面的冲刷。沟蚀则是沟道内水流在溯源方向、侧向和垂直方向切割所造成的冲刷。通常用侵蚀模数 M 来表示土壤的侵蚀强度，它为流域面积上每年被侵蚀的泥沙数量，即 $M=W/A$ 。其中 W 为泥沙的年侵蚀量， A 为计算区域的面积。 M 的单位为 $t/(km^2 \cdot a)$ 。侵蚀模数 M 越大，流域产沙越多，可能进入河流的泥沙也越多。在典型区域内进行径流试验可以测量得到侵蚀模数的数值，但是要在较大范围内测定 M 值是十分困难的。

地表冲蚀下来的部分泥沙由径流挟带进入河流。河流中通过某断面的年输沙量 W_r 可以由水文测验得到，若该断面以上的流域面积为 A ，则 $M_r=W_r/A$ 称为该流域的输沙模数，单位亦为 $t/(km^2 \cdot a)$ 。流域的输沙模数 M_r 和土壤的侵蚀模数 M 在物理意义上是不相同的，其比值 $B(M_r/M)$ 称为流域的泥沙传递比。一般传递比 B 小于1.0，且与流域面积呈反变关系。这是因为流域所产泥沙中，一部分会在洼地或上游沟道、河道内沉积下来，河流所输送的仅是其中的一部分。流域面积越大，进入河流中的泥沙所占的比例越小。尽管如此，河流输沙模数 M_r 在一定程度上仍可反映流域侵蚀和产沙的情况。

图1-1为我国河流输沙模数分布的等值线图。黄河中游、永定河与西辽河的上游、嘉陵江和汉口上游、金沙江部分河段的输沙模数大于 $1000t/(km^2 \cdot a)$ 。其中陕北部分地区高达 $10000t/(km^2 \cdot a)$ 以上，相当于平均每年冲刷地表厚度6mm以上。北方河流输沙模数较高，主要是由于广泛分布着深厚的黄土层，土质疏松，植被很差，又往往暴雨集中，造成严重的水土流失。南方河流输沙模数相对较小，与南方气候湿润、植被良好、土壤结构密实、抗冲刷力强等因素有关。

第三节 河道水流的特点

我国的河流径流多是由暴雨形成的，流量随时间变化剧烈。河流的流速、水位、能坡等水力要素也随时间而变化。河道水流一般属于非恒定流动。河流平面弯弯曲曲，沿程时有收缩和放宽，断面不断变化，河床纵剖面也高低起伏。所以河道水流也是非均匀流动的。但是，在较短时段和较短距离的情况下，可将河道水流概化为恒定均匀流动来处理。

河道水流几乎都是紊流。判断水流流态的参数是水流雷诺数 $Re=U \cdot L/\nu$ 。其中 U 为平均流速， L 为特征长度，可取为水深 h 或水力半径 R ， ν 为水的运动粘性系数。天然河流中的流速和水深都很大，水流雷诺数 Re 一般是很大的。同时，河床与岸壁多很粗糙，断面与河槽形状沿程多变，容易激发紊动。所以水流常处于紊流流态，存在着各种尺度的漩涡，流速呈现出不规则的脉动。

存在着各种形式的环流结构是河道水流的又一显著特点。河流中弯道环流极为普遍，使水流在表层流向凹岸，底层流向凸岸，呈螺旋状向下游运动（图1-2）。由于边滩等因素存在，顺直河道上也存在着各种次生环流。河道断面的突然变化，陡坡或跌坎附近，都可能有环流发生。由于地球自转产生的科氏力的作用，有的地方也能产生类似于弯道环流那样的微弱环流。

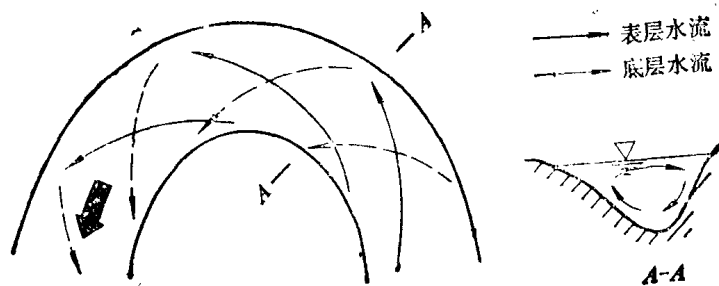


图 1-2 弯道水流示意图

第四节 明槽水流的紊动

明槽紊动水流中，任何一点所记录的流速随时间的变化都是不规则的。长时间 T 内流速的平均值称为水流的时均流速 U ，计算公式为：

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad (1-1)$$

这里 u 为瞬时流速，它可表示为 $u=U+u'$ ， u' 为脉动流速。很容易证明，脉动流速 u' 在长时段内的平均值 $\overline{u'}$ 为零。脉动流速 u' 的概率分布接近于正态分布，其概率密度 $p(u')$ 为：

$$p(u') = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(u')^2}{2\sigma^2}} \quad (1-2)$$

其中

$$\sigma = \sqrt{\overline{u'^2}} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T (u')^2 dt \right]^{1/2} \quad (1-3)$$

σ 称为脉动流速的均方差，是其重要的分布参数。 σ 也可以表示水流的紊动强度，如相对紊动强度可以表示为 $\sqrt{\overline{u'^2}}/U$ 或 $\sqrt{\overline{u'^2}}/u_*$ 。其中 u_* 为摩阻流速，是表征水流床面切应

力 τ_0 的速度参考量： $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ ， ρ 为水的密度。水槽中测量的纵向（ x 方向）和垂向（ y 方向）的紊动强度沿水深的分布如图1-3所示。可见纵向紊动强度比横向的大，床面粗糙度不同的影响主要在床面附近。

水流脉动会产生附加紊动切应力： $-\rho \overline{u'_x u'_y}$ 。根据普朗特（L. Prandtl）混掺长度理论，紊动切应力 τ_t 可以表示为：

$$\tau_t = \rho l^2 \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 \quad (1-4)$$

其中 dU/dy 为时均流速梯度， l 为混掺长度。上式亦可写为：

$$\tau_t = \varepsilon_m \frac{d(\rho U)}{dy}, \quad \varepsilon_m = l^2 \frac{dU}{dy} \quad (1-5)$$

因为 ρU 有单位体积流体动量的意义，上式表示的紊动切应力与动量变化有关，是动量交换的产物， ε_m 称为动量交换系数。

紊动切应力还可以表示为：

$$\tau_t = \eta \frac{dU}{dy}, \quad \eta = \rho \varepsilon_m \quad (1-6)$$

这与流体粘性切应力 $\tau_v = \mu dU/dy$ 的形式相同， μ 为流体的动力粘性系数， η 为紊动粘性系数。可见， η 与 μ 相当， ε_m 与流体运动粘性系数 $\nu = \mu/\rho$ 相当，单位也各自相同。但是，其物理本质是不一样的， μ 和 ν 决定于流体性质，而 η 和 ε_m 则决定于流场的紊动，在流场各处可能不同。

水流中的总切应力 τ 沿水深呈直线分布。若水流能坡为 J ，由沿流动方向力的平衡条件可得：

$$\tau = \gamma(h-y)J \quad (1-7)$$

其中 γ 为水容重， y 自河底算起。另一方面水流切应力 τ 又是由粘性切应力 τ_v 和紊动切应力 τ_t 两部分组成：

$$\tau = \mu \frac{dU}{dy} - \rho \overline{u'_x u'_y} \quad (1-8)$$

但是在各流层中，两者的相对重要性是不一样的。在主流区，紊动切应力起着主要作用；当床面光滑时，在近床面的范围内，粘性切应力才相对较为重要，见图1-4。

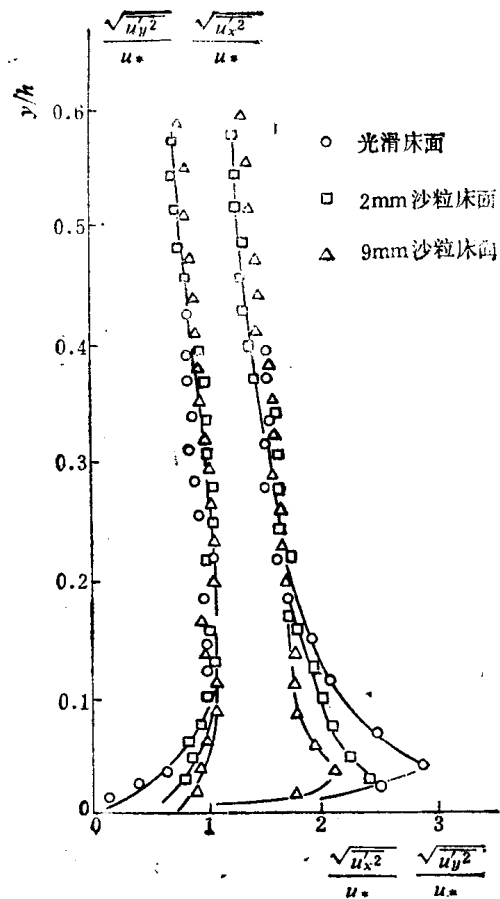


图 1-3 紊动强度沿水深分布

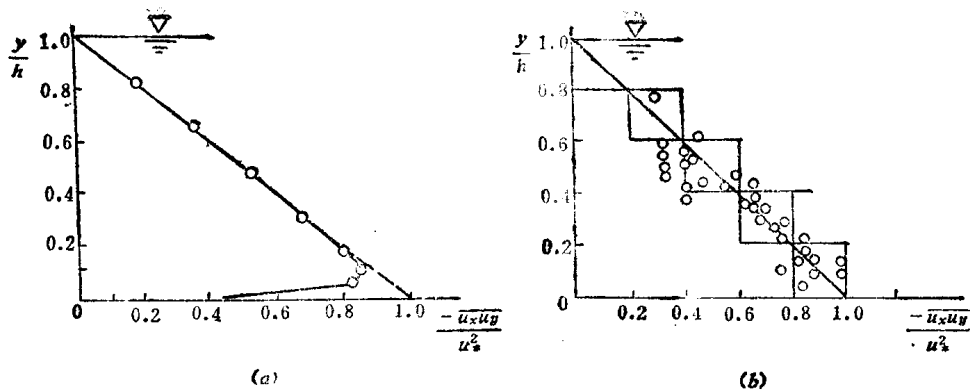


图 1-4 紊动切应力沿水深的分布
(a)光滑床面; (b)粗糙床面

第五节 河道水流的流速和阻力

一、明槽流动的流速分布

恒定均匀明槽流动中,沿深度可划分为粘性底层、惯性层和外层,如图1-5(a)所示。若用 $y^+ = u_* y / \nu$ 表示无量纲坐标,粘性底层的上界面为 $y^+ = 11.6$,其厚度 $\delta = 11.6\nu / u_*$ 。惯性层的范围可能达到 $y^+ = 600 \sim 1000$,大约相当于水深的0.1~0.2倍。当床面粗糙时,

表 1-1 床面类型的划分

k_s/δ	$u_* k_s/\nu$	床面类型
<0.4	<5	光滑床面
0.4~6	5~70	过渡床面
>6	>70	粗糙床面

粘性底层会遭破坏。若 k_s 为床面的粗糙高度,它与粘性底层厚度 δ 的相对大小可以表征床面的粗糙程度。通常以此来划分床面的类型,见表1-1。

粘性底层中紊动微弱,紊动切应力常可忽略,粘性切应力起控制作用。其中的流速 u 与离开床面的距离 y 成比例,为直线分布。

在图1-5(b)中因为半对数坐标,相当于曲线abc部分,表示为:

$$\frac{u}{u_*} = y^+ \quad (1-9)$$

惯性层也很靠近床面。根据普朗特理论,同时假定其水流切应力仍为 $\tau_0 = \rho u_*^2, l = \kappa y$, κ 为卡门(Th. von Karman)常数,清水时取 $\kappa = 0.4$,则可导得其流速分布服从对数规律:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C \quad (1-10)$$

积分常数 C 由试验资料确定,在图1-5(b)中为cde部分。坎利根(G.H. Keulegan)根据巴青(H.E. Bazin)的试验资料得到如下的流速分布公式:

光滑床面:

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \lg \frac{u_* y}{\nu} + 5.5 \quad (1-11)$$

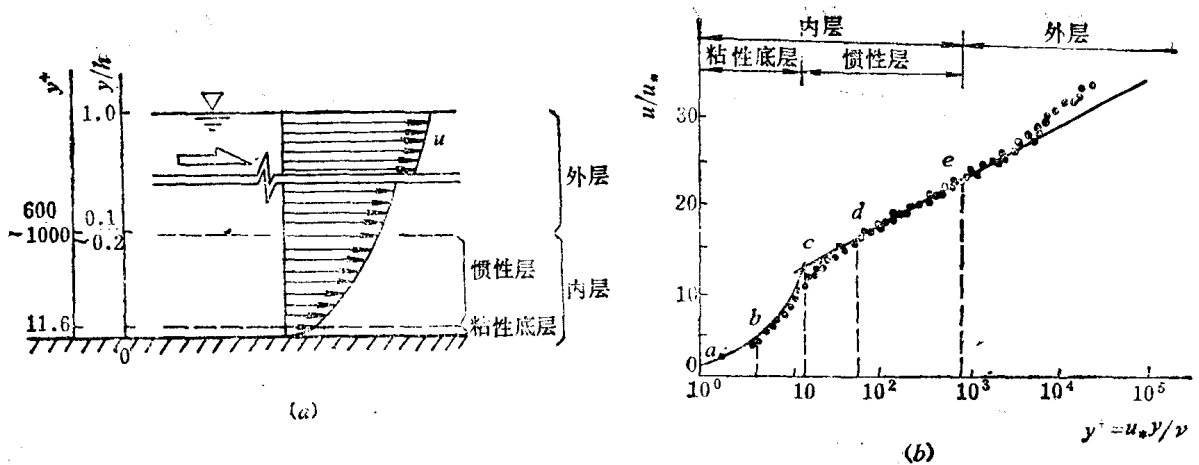


图 1-5 明槽流动的分层和流速分布

(a) 流动分层; (b) 流速分布

粗糙床面:

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \lg \frac{y}{k_s} + 8.5 \quad (1-12)$$

爱因斯坦 (H.A.Einstein) 将其综合成统一的流速分布公式, 适用于各种类型的床面情况:

$$\frac{u}{u_*} = 5.75 \lg \left(30.2 \frac{y\alpha}{k_s} \right) \quad (1-13)$$

其中 α 为修正系数, 它是 k_s/δ 的函数, 见图 1-6。

从图 1-5(b) 可以看出, 外层流层的流速分布常偏离对数规律。虽已有不少描述其流速分布的表达式, 但实际工程应用中, 常将对数流速公式推广应用于整个水深范围。

二、天然河流的流速

天然河流的情况远较明槽流动复杂, 但大多数情况下仍可以用对数流速公式来描述流速的垂

线分布, 如用坎利根公式或爱因斯坦公式。将其在断面上积分可得到断面平均流速 U ,

$$\frac{U}{u_*} = 5.75 \lg \left(12.27 \frac{R\alpha}{k_s} \right) \quad (1-14)$$

这里 R 为断面水力半径。

计算天然河流的流速分布也可以用指数型的流速分布公式, 例如,

$$u = (1+m) \cdot U \cdot \left(\frac{y}{h} \right)^m \quad (1-15)$$

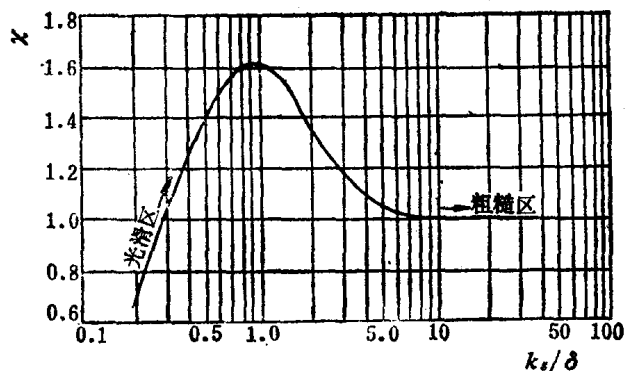


图 1-6 α 与 k_s/δ 的关系

其中 U 为垂线平均流速, h 为水深, m 为指数。 m 值与河道水流特性有关, 一般可取 $m=1/5\sim 1/9$ 。指数流速分布公式结构简单, 计算方便, 工程上也广泛应用。指数 m 的选取主要凭经验, 水流紊动强度大者宜取较小的 m 值。只是计算时需要知道垂线或断面的平均流速 U 。

估计天然河流的断面平均流速常用谢才 (Chezy) 公式和满宁 (Manning) 公式:

$$U = C \sqrt{RJ} \quad (1-16)$$

$$U = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} \quad (1-17)$$

公式为米、秒制单位, J 为水流能坡, R 为水力半径, C 为谢才系数, n 为满宁糙率系数, 均为根据河道情况确定的经验系数, 可参考水力学教科书或手册选取。对于粗糙紊流, 可以认为 n 值与水深无关, 只决定于床面的粗糙程度。例如用斯特里克勒 (K. Strickler) 公式表示, n 值仅是床沙粒径 d (以m计) 的函数:

$$n = \frac{d^{1/6}}{21.1} \quad (1-18)$$

而谢才系数 C , 一般说来是随水深而变化的。

三、阻力公式和阻力系数

水流要克服河床阻力做功, 消耗河流能量, 引起沿程水位降落。通常认为水流恒定时河床对水流的阻力等于水流对床面的切应力。恒定均匀流动时水流的平均床面切应力 τ_0 可表示为:

$$\tau_0 = \gamma RJ \quad (1-19)$$

另一种表示水流阻力的公式是达西-韦斯巴赫 (Darcy-Weisbach) 公式。试验表明表面对水流的阻力 F 与其面积 A_0 和水流动能 $\rho U^2/2$ 成比例: $F = f_0 \cdot A_0 \cdot \rho U^2/2$, f_0 为阻力系数。对于明槽流动, 令 $f_0 = f/4$, 则床面的平均切应力 τ_0 为:

$$\tau_0 = \frac{f}{4} \cdot \frac{\rho U^2}{2} \quad (1-20)$$

其中 f 称为达西-韦斯巴赫阻力系数。若 l 为河段长度, 由上式还可以得到用水头损失 h_f 表示的水流阻力公式:

$$h_f = \frac{f}{4} \cdot \frac{l}{R} \cdot \frac{U^2}{2g} \quad (1-21)$$

表征床面切应力的摩阻流速为 $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho} = \sqrt{gRJ}$ 。由达西-韦斯巴赫阻力公式可得到:

$$U = \sqrt{\frac{8g}{f}} \cdot \sqrt{RJ} \quad (1-22)$$

对比谢才公式和满宁公式, 可见

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (1-23)$$