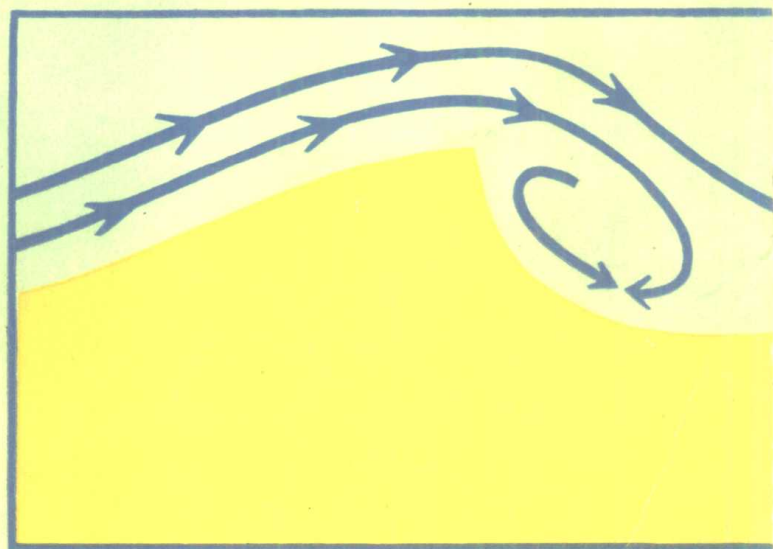


输沙力学

M. S. 雅林 著



科学出版社

输沙力学

M. S. 雅林 著

孙振东 译

吴德一 周文浩 罗福安 校

地质出版社

1983

地质出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了泥沙运动的基本课题,因次分析原理贯穿于全书内容。第一章介绍两相运动的基本概念;第二章综述水流流体力学的物理属性;第三章以前两章为基础总结了因次分析原理在泥沙运动方面的应用和著者本人的有关成果;第四章叙述不同水流流态下泥沙的受力情况及起动。五、六两章分别讨论推移质和悬移质输沙率,是泥沙力学的基本内容,并陈述了有关公式和原理。关于沙浪和摩阻因子,在最后两章中加以论述。目前尚待解决的若干基本课题,作为试验研究方案附于有关章节之末,著者还指出了其解决的途径。

本书是一本教科书,可供有关专业的研究生阅读,也可供科研人员和工程技术工作者参考。

M. S. Yalin

MECHANICS OF SEDIMENT TRANSPORT

2nd Edition, Pergamon Press, 1977

输 沙 力 学

M. S. 雅林 著

孙振东 译

吴德一 等 校

责任编辑 杨家福

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32

1983 年 8 月第一次印刷 印张: 13 7/8

印数: 0001—2,250 字数: 344,000

统一书号: 15031·518

本社书号: 3183·15—1

定价: 2.15 元

序

在各种天然和人工条件下，常常发生气流或水流输送粒状物质（如粉沙、沙、砾等）的现象，简单地说，就是泥沙的输移。这种现象决定着河床、河口三角洲和海岸线的发展，因而对地球表面的地形和层理的形成有相当大的影响。在土木工程领域中这种现象是重要的，因为很多水工建筑物与海防工程的作用和使用寿命均受其影响。所以，很多专业人员其中包括水工工程师、海岸工程师、地质学家、水文学家和地理学家等对泥沙输移感兴趣是不足为奇的。泥沙输移作为一个科研题目，其实用性和普遍性在全世界已引起了很多科学单位和技术机关的重视，并进行了研究，最近三十年尤为明显。尽管已进行了这样大量的活动，可是我们在泥沙输送力学方面的知识，亦即对流体与被输送的泥沙这两者的运动进行定量分析与普遍应用的规律方面的知识，仍然异常贫乏。到目前为止，已有的可以被认为是无可争议而有效的概念是不多的。尽管进行了多年紧张研究，其基本原理为人们所接受者仍然很少；这一情况或许可以解释：为什么在泥沙输移方面的文献中大量的是研究论文，而教科书则惊人地少。事实上，除去综合性论著中的特别章节、报告、讲义和类似的课本外，到目前为止已发表的泥沙输送力学专著，把英文、俄文和德文的都计算在内，我想其总数超不过一打。目前，获得泥沙输移知识的途径通常是首先从各种科技刊物找出有关著者发表的许许多多论文，然后做详尽的研究。

如果本书对缓和目前这种教科书短缺的情况有所帮助，

我将非常高兴。本书主要是为河流水力学的研究生和研究人員所写的。可是,对于从事泥沙输移预报与控制的外业人員,因他們必須熟悉这方面問題的定量解決方法,这本书也适合于他們閱讀。

本书特別強調,不管各种特征参数,例如輸沙率、沙浪尺寸、水流平均流速等等的力学性质如何不同,我们可以把它們都作为本书称之为“兩相运动”这样单一現象的定量指标来加以处理。所以,它們的无因次型式的数值不过是兩相运动的同样无因次組合的各种函数,不可能是什么其他的东西。这是本书的中心題目。

目前,輸沙力学能够研究的仅仅是兩相运动最简单的情况。因而本书考虑的仅限于无粘性粒状物质和可以作为二维水流(宽阔梯形渠道中心部分的水流)处理的恒定均匀流。

本书广泛应用了因次分析原理。因为决定液体相和固体相同时运动的物理参量的数目很大,而描述現象学研究所需要的可靠基本概念又很不足,这就清楚说明,因次分析原理提供的关系式对于这类题目的解决可能是最有效的。

书中某几部分曾经利用概率论和随机函数原理,因为概率论方法可以得到整体过程的定量公式,而无须深入研究各个因素的自然因果关系的细节。

本书共八章。第一章是导论性质的。第二章介绍水力学性质。第三章讨论兩相运动的无因次变量及其函数。第四章到第八章分別讨论泥沙的起动、輸沙率、悬移质分布、沙浪(沙纹,沙垄和逆行沙垄)和动床水流的摩擦阻力因子。只有弄清了輸送泥沙的水流的力学结构,才能够谈得上对泥沙輸送机制的充分理解;这是第二章列入本书的原因,熟悉这一章內容的讀者可以把它略去。那些我认为值得研究的十个題目以“試驗研究方案”形式附在某些章节之末。

对现有方法进行评论时，我力求客观并提出建设性的意见。凡是指出的缺点我都说明为什么是缺点，并随时提出建议如何改进这些缺点的方法。

本书包含很多我自己的见解，这些见解是以前尚未发表的。在第四至八章中提出的任何论述、公式或图解，凡是没有注明其参考文献的，如有错误由我一个人负责。

我诚挚地感谢 Wallingford 水力学研究站主任 R. C. H. Russell 先生，他检查了本书手稿，并提出若干有价值的建议。

我也要感谢 Alberta 大学 A. W. Peterson 教授，他是敦促我写这本书的第一个人，并在本书的准备过程中经常提出改善意见。

我还应该感谢我的同事 K. Wilson 博士和我的研究生 B. Krishnappan 先生（工程学学士），他们也给了我有益的帮助。最后，我应该谢谢我的妻子 Cherrilyn，这份困难的稿件的好几遍打字工作是她完成的。

M. S. 雅林

第 二 版 序

最近三年来在泥沙输移方面发表了很多文章。在本书这一版的准备过程中,我试图把这些新材料收编进去,因为我认为这些材料可以改善本书的质量而不致于影响原来的逻辑性和连续性。所有各章都做了修订。

当前,紊动领域中的进展引起了观念形态方面的重大改变。在第六章末尾扼要描述了紊动猝发过程。在本世纪七十年代初发现的这个过程,使得对紊动的理解达到了一个新的高度;第七章研究沙浪形成问题,对它的描述和数学背景都作了相应的修改。

我的同事 K. C. Wilson 博士, B. G. Krishnappan 博士和 C. T. Bishop 理学士给了我很多帮助,特此致谢。我还要感谢我的妻子 Cherrilyn, 本版所增加的和修改的材料是她打字的。

M. S. 雅林

1976 年 3 月

符 号 表

1. 一 般 的

g	重力加速度
t	时间
T	时段
x	均匀水流的方向
$y, \bar{y}$	垂直于 x 的方向 y 从床面最低点向上量 $\bar{y}$ 从自由面向下量
z	从 $y = 0$ 平面量起至不平整床面上一个点的距离 (如果床面是平坦的, 则 $z = 0$)
$\log$	以 10 为底的对数
$\ln$	自然对数
e	自然对数之底
f_A	决定两相运动中其一个有因次量 A 的有因次函数
φ_A	决定某一个量 A 的无因次形式 (Π_A) 的无因次函数
f	概率密度函数
σ	标准偏差
$\approx$	近似地等于, 可与相比的
$\sim$	和...成比例
角标:	
m	表示沿 y 的平均值
av	表示沿 x 的平均值

cr 表示对应于泥沙开始运动的数值(对应于“临界阶段”的)

max, min 分别表示最大与最小

2. 流体与粒状物质的性质

ρ	流体密度
$\gamma = g\rho$	流体的比重
μ	动力粘滞系数
ν	运动粘滞性系数
ρ_s	颗粒密度
$\bar{\gamma}_s = g\rho_s$	颗粒在空气中的比重
$\gamma_s = \bar{\gamma}_s - \gamma$	颗粒在流体中的比重
D	均匀物质的粒径, 混合物质的代表粒径
D_i	混合物质中对应于百分数 i 的粒径
$w_i = \frac{D_i}{D_{\max}}$	对应于百分数 i 的相对粒径
$\mathcal{D}_i$	粒径分布曲线的符号表达式
G	一个颗粒在流体中的重量
$\alpha = \frac{G}{\gamma_s D^3}$	决定 G 的形状因子
w	沉降速度

3. 均匀(或准均匀)流动

如果水流是“准均匀”的, 则以下符号代表对应于 x 的平均值.

b_f	三维水流中自由表面上的宽度
b	三维水流中床面上的宽度
b_c	三维水流中二维部分的宽度

B	矩形横断面宽度
h	水流深度
ω	横断面面积
χ	湿周
Q	流量(即流体的流率)
q	单宽流量(比流量)
J	坡度;比降
$u_m = q/h$	水流的平均速度
u	x 方向局部水流速度
τ_l	粘滞性剪应力
τ_s	紊动剪应力["表观剪应力"]
$\tau = \tau_l + \tau_s$	总剪应力
τ_0	水流和水流边界(床面)之间互相作用的总剪应力
$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$	摩阻流速
$\mathcal{P}$	产生水流之力(二维水流的每个单位面积)
k	任何床面糙率高度
k_s	(实际的或等值的)沙粒糙率之高度
$c = \frac{u_m}{v_*}$	摩阻因子(按 Chezy 的意义)
$f = \frac{8}{c^2}$	摩阻因子(按 Darcy-Weisbach 的意义)
$\bar{\delta}$	边界层厚度
δ	层流(或粘滞性)附面层的厚度
l	在高度 y 处大尺度紊动漩涡的时均尺寸(混合长度)
κ	Von Karman 常数

L	大尺度紊动漩涡沿程经过的长度
$y_{\min}$	对数流速分布有效性的下限
$\bar{t}_*$	紊流脉动的平均历时

4. 泥沙输送力学

F	作用在一个颗粒上的水动力
F	F 的数值
θ	F 的方向 (F 和 x 轴之间的夹角)
F_x, F_y	分别为 F 沿 x 和 y 的分量
α_d, α_l	分别为拖曳力和上举力系数
ε	划分推移质和悬移质区域的 y 的大小
q_{sb}	区域 $0 < y < \varepsilon$ 中推移质的输沙率
q_{ss}	区域 $\varepsilon < y < h$ 中悬移质的输沙率
$q_s = q_{sb} + q_{ss}$	总输沙率
Q_s	水流全横断面的总输沙率, 在河床单位面积上移动的粒状物质之重量
W_s, W_r	流体中单个颗粒的绝对和相对移动速度
U	W_s 在 x 方向的分量
V	W_s 在 y 方向的分量
L	跳跃长度
H	跳跃高度
λ	沙浪的长度
Δ	沙浪的高度
U_w	沙浪传播速度
C	高度 y 上悬浮颗粒以体积计的无因次浓度

设“事件 A ”为受脉动上举力 F , 作用的某一床面颗粒的

起动。“上扬一次”指的是 F_y 的一次脉动。在这种情况下,	
P_*	事件 A 在上扬一次中出现的概率
p_n	事件 A 在 N 次上扬的过程中出现 (恰恰) n 次的概率
P_n	事件 A 在 N 次上扬的过程中出现至少 n 次的概率
R	时间的稳定随机函数, 指的是作用于某一个床面颗粒上的脉动上举力与其时均值之比
r	R 的某一可能值
$f(r)$	随机函数 R 的一维密度分布函数

5. 无因次组合

$Fr = \frac{u_m}{\sqrt{gh}}$	Froude 数
$Re = \frac{u_m h}{\nu}$	以平均流速表示的水流雷诺数
$Re_* = \frac{v_* h}{\nu}$	以摩阻流速表示的水流雷诺数
$\frac{v_* k_s}{\nu}$	床面水流雷诺数
$X = \frac{v_* D}{\nu}$	沙粒雷诺数
$Y = \Psi^{-1} = \frac{\rho v_*^2}{\tau_* D}$	泥沙颗粒可动性数
$Z = \frac{h}{D}$	无因次水流深度
$W = \frac{\rho_s}{\rho}$	固体相和流体相的密度比率

$$\Xi = \frac{X^3}{Y} = \frac{\gamma_s D^3}{\rho v^2} \quad \text{流体相和固体相的无因次特征参量}$$

$$\phi = \frac{q_s \rho^{1/2}}{(\gamma_s D)^{3/2}} \quad \text{H. A. Einstein 的无因次输沙率}$$

$$Y_{cr} = \Phi(X_{cr}) \quad \text{Shields 函数}$$

$$Y_{cr} = \Phi^*(\Xi) \quad \text{修正的 Shields 函数}$$

$$\Pi_A \quad \text{两相运动中某一个数 } A \text{ 的无因次型式}$$

注：设 a 为任何一量，在紊流情况下，它随时间变动。在那些和紊流脉动无关的章节中， a 表示时均值。在讨论紊流脉动的章节中：

a 表示瞬时值

$\bar{a}$ 表示时均值

a' 表示脉动值

在最后一些章节中，“横杠”(-)和“撇”(·)不再用于其他目的，同时 y 方向上的局部水流速度用 v 表示。

目 录

序.....	v
第二版序	viii
符号表	ix
第一章 基础知识	1
1.1 两相运动	1
1.2 水流(液体相)	2
1.3 粒状物质(固体相)	10
1.4 流体的动作用力	12
1.5 颗粒运动的形式,输沙率	21
1.6 附加说明	25
参考文献	26
第二章 水流的力学性质	27
2.1 剪应力分布	27
2.2 有自由水面的二维层流中的流速分布	32
2.3 有自由水面的二维紊流中的流速分布	33
2.4 通用的流速分布公式	51
2.5 糙率	52
2.6 时均方法	58
试验研究方案 1	61
试验研究方案 2	68
试验研究方案 3	70
试验研究方案 4	71
2.7 附加说明	73
参考文献	78
第三章 两相现象的无因次表达式	79

3.1 特征参量	79
3.2 两相现象的特征参量	81
3.3 无因次变量和函数	88
3.4 两相现象的无因次变量和函数	90
3.5 无因次表达式中的“灵活性”	96
3.6 沉降速度	100
3.7 关于特征参数选择的若干说明	105
参考文献	107
第四章 泥沙的起动	109
4.1 单个颗粒的起动	109
4.2 可动河床的临界阶段	116
4.3 混合粒状物质	122
4.4 非脉动上举力(如果 $D = k_s$, $X_{cr} < \approx 5$)	126
4.5 脉动上举力(如果 $D = k_s$, $X_{cr} > \approx 5$)	130
4.6 用试验方法决定临界阶段	144
4.7 以水流平均速度表示的泥沙起动	152
试验研究方案 5	158
试验研究方案 6	159
参考文献	160
第五章 输沙率	162
5.1 引言	162
5.2 Meyer-Peter 和 Müller 推移质输沙率公式	163
5.3 Bagnold 推移质输沙率公式	169
5.4 Bagnold 总输沙率公式	178
5.5 Einstein 推移质输沙率公式	185
5.6 雅林推移质输沙率公式	207
5.7 张凤鸣等总输沙率公式	221
试验研究方案 7	232
5.8 附加说明	239
参考文献	249

第六章 悬移质分布	241
6.1 概述	241
6.2 扩散理论	242
6.3 重力理论	253
6.4 关于紊流的一些说明	259
试验研究方案 8	264
试验研究方案 9	277
6.5 附加说明	288
参考文献	298
第七章 沙浪	300
7.1 概述	300
7.2 沙浪的起因	317
7.3 不同沙浪的同时出现;存在区域	342
7.4 沙浪的陡峻度	347
7.5 沙浪长度的实验资料	353
7.6 与沙浪有关的其他课题	371
试验研究方案 10	381
7.7 附加说明	384
参考文献	388
第八章 摩阻因子	391
8.1 概述	391
8.2 现有的一些原理和试验结果	399
8.3 其他文献	423
参考文献	427

第一章 基础知识

1.1 两相运动

考虑明渠中的水流，这种明渠是由可冲刷的粒状介质构成的(图 1.1)。水流边界亦即区分液体和介质的界面，受水流

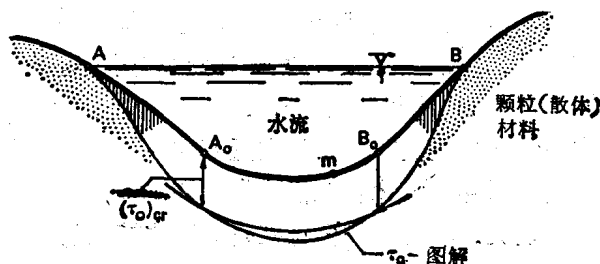


图 1.1

产生的剪应力的作用。设作用于水流边界(湿周) $\widehat{AB}$ 上点 m 的剪应力为 τ_0 。人们熟知, τ_0 值是点 m 的位置的连续函数, 它在 A 和 B 点之值为零, 而在湿周下部某一点达到最大。剪应力 τ_0 沿 $\widehat{AB}$ 的变化特征如图 1.1 中的 τ_0 分布所示。因为构成水流边界的颗粒(在流体中)具有一定的重量和一定的摩擦系数, 如果拖曳力 τ_0 的数值小于某一个称之为临界剪应力的 $(\tau_0)_{cr}$ 值, 它们就不可能被水流带动。所以, 由于水流在边界上的拖曳力作用而引起的颗粒的集体运动, 只能够发生于湿周 $\widehat{AB}$ 的底下部分 A_0B_0 , 这里不等式

$$\tau_0 > (\tau_0)_{cr}$$