

水 力 学

下 册

(1965 年修订本)

唐山铁道学院水力学教研组编

高等学校教材



水 力 学

下 册

(1965 年修订本)

唐山铁道学院水力学教研组编

高等教育出版社

本书系由唐山铁道学院水力学教研组编写。初版于1961年1月由人民铁道出版社出版，同年7月略加修订后改由人民教育出版社出版，1962年2月曾重新修订再版。1965年根据1962年5月审订的高等工业学校本科五年制给水排水、铁道建筑、公路与城市道路、桥梁与隧道等专业适用的“水力学教学大纲(试行草案)”的要求并结合编者在教学实践中的经验和当前教学改革的精神重新进行了编写，在内容和全书的按排上都作了很多的变动，篇幅也作了较大的压缩，每章均附有一定数量的例题和习题。

本书分上、下两册出版，上册除绪论外还包括水静力学，水动力学理论基础，水流阻力和水头损失，管流，孔口和管嘴出流，明渠均匀流等各章；下册包括明渠非均匀流，堰闸出流及水流衔接，渗流等三章。

本书可作为高等工业学校土建、地质等类专业水力学课程的试用教科书，也可供有关工程技术人员参考。

水 力 学

下 册

(1965年修订本)

唐山铁道学院水力学教研组编

北京市书刊出版业营业许可证出字第119号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号K15010·1027 开本 850×1168 1/32 印张 5 5/16 插页 1

字数 133,000 印数 10,301--12,300 定价(7)¥0.70

1961年7月第1版 1965年7月第2版

1965年7月北京第6次印刷

字 符 表

(汉语拼音字母为下标)

字符	代 表 内 容	拼 音 字	备注
F_z	质量力	zhi liang li(质量力)	緒論
F_b	表面力	biao mian li(表面力)	緒論
p_k	真空压强	zhen kong(真空)	第一章
h_k	真空水头	zhen kong(真空)	第一章
J_n	总能坡度	neng po(能坡)	第二章
h_{zs}	总水头损失	zong sun(总损)	第二章
ω_y	原型面积	yuan xing	第二章
ω_m	模型面积	mu xing	第二章
v_y	原型流速	yuan xing	第二章
v_m	模型流速	mu xing	第二章
P_y	原型总压力	yuan xing	第二章
P_m	模型总压力	mu xing	第二章
h_{ss}	拦污栅水头损失	shan sun(栅损)	第三章
h_{cs}	沿程损失	cheng sun(程损)	第三章
h_{bs}	局部损失	bu sun(部损)	第三章
h_{ts}	突然缩小损失	tu suo sun(突缩损)	第三章
h_{jd}	渐大管损失	jian da sun(渐大损)	第三章
ζ_w	弯管阻力系数	wan guan(弯管)	第三章
ζ_{js}	明渠逐渐收缩系数	jian shōu(渐收)	第三章
ζ_{td}	管路突然扩大损失系数	tu da(突大)	第三章
ζ'_{td}	明渠土壤扩大系数	tu da(突大)	第三章
Re_{lj}	临界雷诺数	lin jie(临界)	第三章
Re_{lj}	下临界雷诺数	lin jie(临界)	第三章
h_z	自由水头	zi you(自由)	第四章
ζ_{gx}	管系阻力系数	guan xi(管系)	第四章
v_j	经济流速	jing ji(经济)	第四章
H_t	水塔高度	tá(塔)	第四章
Π_g	管段数	guan(管)	第四章
Π_h	环数	huan(环)	第四章
Π_j	节点数	jie(节)	第四章
ζ_k	孔口局部水头损失	kōng kou(孔口)	第五章
h_{lj}	临界水深	lin jie(临界)	第七章

字符	代表内容	拼音字	备注
\bar{h}_{lj}	平均临界水深	lin jie(临界)	第七章
i_{lj}	渠道临界底坡	lin jie(临界)	第七章
i_s	摩擦损失坡度	sun pō(损坡)	第七章
i_{s_0}	均匀流的摩擦损失坡度	sun pō(损坡)	第七章
l_y	水跃段长度	yue chang(跃长)	第七章
h_s	收缩水深	shōu suo(收缩)	第七章
v_{lj}	临界流速	lin jie(临界)	第七章
Fr_{lj}	临界水深佛汝德数	lin jie(临界)	第七章
E_y	水跃能量损失	yué(跃)	第七章
l_{lj}	从 l_c 到 l_k 的C型曲线临界长度	lin jie(临界)	第八章
h_y	淹没水深	yan mo(淹没)	第八章
m_s	具有侧向收缩的堰流	shōu suo(收缩)	第八章
b_s	堰流收缩宽度	shōu suo(收缩)	第八章
E_b	能量损失	sun shī(损失)	第八章
v_k	孔隙流速	kong xi(孔隙)	第九章
ω_k	孔隙面积	kong xi mian(孔隙面)	第九章
ω_t	土壤颗粒所占过水断面面积	tu(土)	第九章

下册目录

字符表(汉语拼音字母为下标).....	v
第七章 明渠非均匀流	219
§ 7-1. 概述.....	219
§ 7-2. 断面单位能量·临界水深.....	221
§ 7-3. 缓流、急流与临界流·临界坡度.....	226
§ 7-4. 水跃现象与结构.....	230
§ 7-5. 棱柱形平底渠道中的完整水跃.....	233
§ 7-6. 明渠恒定非均匀渐变流的基本微分方程.....	238
§ 7-7. 棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的分析.....	240
§ 7-8. 渠道底坡变化时水面曲线的联接.....	249
§ 7-9. 棱柱形渠道中恒定非均匀渐变流水面曲线的计算和绘制.....	251
§ 7-10. 天然河道中水面曲线之绘制.....	263
第八章 堰、闸出流及水流衔接	269
§ 8-1. 堰流定义和分类.....	269
§ 8-2. 宽顶堰.....	270
§ 8-3. 宽顶堰理论在水工建筑物水力计算上的应用.....	276
§ 8-4. 薄壁堰.....	282
§ 8-5. 实用断面堰.....	286
§ 8-6. 侧堰.....	288
§ 8-7. 闸下出流.....	289
§ 8-8. 水工建筑物下游的底流衔接和消能.....	291
§ 8-9. 面流、挑流衔接和消能简介.....	305
§ 8-10. 跌水和陡槽水力计算原理.....	306
第九章 渗流	309
§ 9-1. 概述.....	309
§ 9-2. 渗流基本定律.....	310
§ 9-3. 渗水堤的水力计算.....	316
§ 9-4. 恒定渐变渗流的微分方程·浸润曲线的型式和积分.....	318
§ 9-5. 集水廊道·井和井群.....	325
§ 9-6. 土壤(土堤)渗流.....	335
§ 9-7. 流网法原理及其在渗流中的应用.....	337
§ 9-8. 电拟法.....	341

附录 7-2. 函数 $\varphi(\eta)$ 的数值表	347
附录 7-3. 函数 $\varphi(\xi)$ 的数值表	375
附录 7-4. 函数 $\varphi(\zeta)$ 的数值表	381
附录 7-5. 天然河道中粗糙系数 n 及 γ 数值表	387

第七章 明渠非均匀流

§ 7-1. 概述

明渠非均匀流的产生 在河渠水流的恒定流中，如果沿流綫各点的流速不等，便称为非均匀流(图 7-1)。非均匀流的断面平均流速是沿程改变的。

明渠非均匀流，在水工实践中经常见到：一类是兴建在渠道中的水工建筑物使原有的均匀流态受到扰动，而成为非均匀流，例如水壩阻水(图 7-2)、陡坎跌水

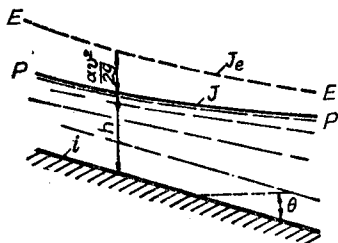


图 7-1. 明渠非均匀流

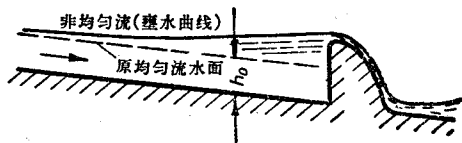


图 7-2. 水壩阻水

(图 7-3)和桥墩阻水(图 7-4)等；另一类是渠道本身没有发生均匀流的条件，而只能是非均匀流，如连接渠道的过渡段(图 7-5)、平坡及逆坡渠段和天然河道等。本章讲述河渠恒定非均匀渐变流与水跃。

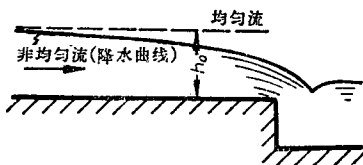


图 7-3. 陡坎跌水

明渠非均匀流的水力特征 明渠非均匀流的流速和水深是沿

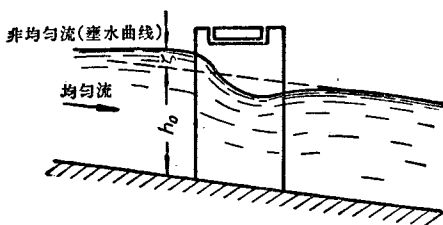


图 7-4. 桥墩阻水

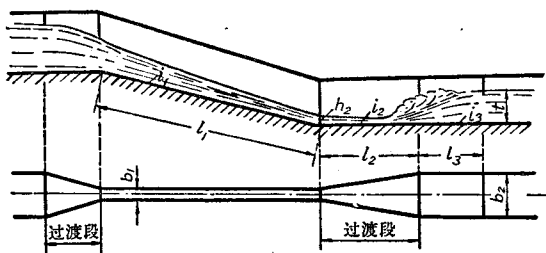


图 7-5. 连接渠道的过渡段

程改变的, 故其总能坡度 $J_n \neq$ 水面坡度 $J \neq$ 渠道底坡 i 如图 7-1。

平均流速沿程增加的非均匀流称为加速流, 其水深沿程减小, 水面呈降水曲线(图 7-3); 反之为减速流, 水深沿程增加, 呈壅水曲线(图 7-2)。

非均匀流摩擦损失的计算问题 这个问题迄今仍在研讨中。通常假定: 在非均匀渐变流中, 水深 h 处的沿程摩擦坡度 i_s ($= \frac{dh_{cs}}{ds} = -\frac{dE}{ds} = J_n$) 与在同一流量、同一深度, 从而同一平均流速时的均匀流的摩擦坡度相等。这样便有

$$i_s = \frac{Q^2}{K^2}, \quad (7-1)$$

式中: K ——流量模数, 是水深 h 的函数。

显然, 非均匀流的渐变性愈高, 以上的假定就愈是接近实际。

§ 7-2. 断面单位能量 · 临界水深

1. 断面单位能量

在明渠渐变流的任一过水断面中，单位重量水流对某一基准面 $O-O$ 之总能 E (图 7-6) 为

$$E = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g} = z + \xi + \frac{\alpha v^2}{2g},$$

式中： z, ξ ——断面中任一点 A 的位高和水深。

如果把基准面 $O-O$ 提高 z_1 使其经过断面的最低点，则单位重量水流对新基准面 O_1-O_1 的总能 ϑ 为

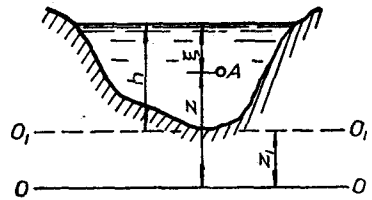


图 7-6. 断面单位能量与总能量

$$\vartheta = E - z_1 = z + \xi + \frac{\alpha v^2}{2g} - z_1 = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}. \quad (7-2)$$

我们称 ϑ 为断面单位能量，它是基准面选在断面最低点的总能量，是断面水流势能 h 与动能 $\frac{\alpha v^2}{2g}$ 之和。

引入断面单位能量这一概念，在于能对明渠非均匀流的水流能量，撇开其来自渠底标高的这一部分位能，进行更为具体的分析，如下述：

(1) ϑ 的沿程变化 $\frac{d\vartheta}{ds}$ 水流总能 E 的沿程变化必然是 $\frac{dE}{ds} < 0$,

不可能有例外。但 $\frac{d\vartheta}{ds}$ 则不然，说明如下：

从 $\vartheta = E - z_1$ ，取微分，得

$$d\vartheta = dE - dz_1 = -dh_{cs} - dz_1,$$

从而
$$\frac{d\vartheta}{ds} = -\frac{dh_{cs}}{ds} - \frac{dz_1}{ds}$$

但
$$\frac{dh_{cs}}{ds} = i_s, \quad -\frac{dz_1}{ds} = i,$$

因此
$$\frac{d\vartheta}{ds} = i - i_s. \quad (7-3)$$

式中： i ——非均匀流问题的渠道底坡，等于同一渠道在同一流量下作均匀流时的摩擦坡度 i_{s_0} ，因此

$$\frac{d\vartheta}{ds} = i_{s_0} - i_s. \quad (7-4)$$

从式(7-4)看出：

水深大于均匀流的非均匀流 ($h > h_0$)： $v < v_0$ ，故 $i_s < i_{s_0}$ ， $\frac{d\vartheta}{ds} > 0$ ， ϑ 沿流程增加。

均匀流 ($h = h_0$)： $v = v_0$ ，故 $i_s = i_{s_0}$ ， $\frac{d\vartheta}{ds} = 0$ ， ϑ 沿流程不变 (图

7-7)。

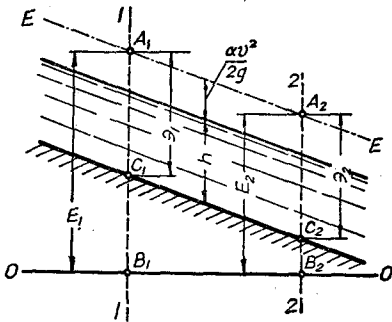


图 7-7. 断面单位能量

水深小于均匀流的非均匀流 ($h < h_0$)： $v > v_0$ ，故 $i_s > i_{s_0}$ ， $\frac{d\vartheta}{ds} < 0$ ， ϑ 沿流程减少。

(2) ϑ 随水深的变化 $\frac{d\vartheta}{dh}$

在一定尺寸的断面中，要通过一定的流量，可由无穷多的水深来完成，而且对其

中的每一种，又各有其相应的断面单位能量。事实上，对任一假定的水深 h ，可求得 ω ， $v = \frac{Q}{\omega}$ ， $\frac{\alpha v^2}{2g}$ 和 $\vartheta = h + \frac{\alpha v^2}{2g}$ 。仿此，假定许多 h 并算出 ϑ 的相应值，便可作出断面单位能量曲线 $\vartheta = f(h)$ ，

如图 7-8。

由图看出，这曲线有上下两枝。相应于任一可能的 ϑ 值，可以有两个水深 h_1 和 h_2 。 ϑ 值愈减，则 h_1 愈增而 h_2 愈减，直至 ϑ 值减到其可能的最小值 ϑ_{\min} 时， h_1 与 h_2 彼此相等，特以临界水深 h_{lj} 称之。由此可见(图 7-8)：

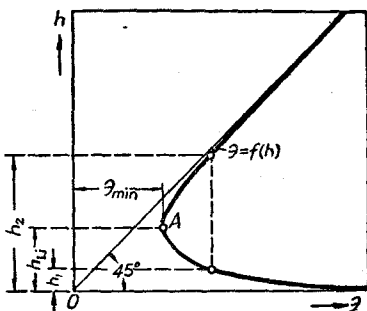


图 7-8. 断面单位能量 ϑ 与水深 h 的关系曲线

当 $h > h_{lj}$ (上枝): ϑ 随 h 俱增, $\frac{d\vartheta}{dh} > 0$;

当 $h = h_{lj}$ (点 A): $\vartheta = \vartheta_{\min}$, $\frac{d\vartheta}{dh} = 0$;

当 $h < h_{lj}$ (下枝): ϑ 增加, h 减小, $\frac{d\vartheta}{dh} < 0$ 。

因水深沿流程的变化可写作

$$\frac{dh}{ds} = \frac{\frac{d\vartheta}{ds} \text{ (式 7-4)}}{\frac{d\vartheta}{dh} \text{ (图 7-8)}}, \quad (7-5)$$

可见 $\frac{d\vartheta}{ds}$ 和 $\frac{d\vartheta}{dh}$ 同号时, 水深沿流程增加; 异号时减少。

2. 临界水深

从以上(1)直接得出, 临界水深是在断面尺寸和流量给定的条件下, 相应于最小断面单位能量的水深。亦即 $\vartheta = \vartheta_{\min}$ 时, $h = h_{lj}$ 。

可见 h_{lj} 只与断面尺寸和 Q 有关; 而正常水深 h_0 , 则除此两者之外, 尚与 n 和 i 有关(式 6-2)。这是临界水深 h_{lj} 的一个特点。

临界水深的确定方法有:

(1) 图解法 绘出 $\vartheta = f(h)$ 曲线(图 7-8), 并从而确定 $\vartheta = \vartheta_{\min}$

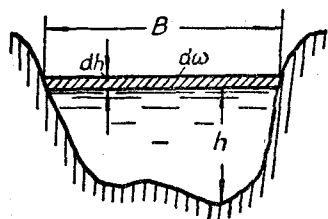


图 7-9. 断面要素增量

的水深, 即 h_{lj} 。

(2) 解析法 就式(7-2)求 ϑ 对 h 的导数, 并注意到水面宽度 (图 7-9)

$$B = \frac{d\omega}{dh}, \quad (7-6)$$

可得

$$\frac{d\vartheta}{dh} = 1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{B}{\omega^3}. \quad (7-7)$$

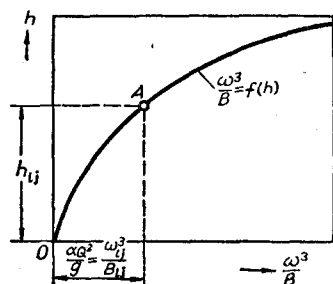
令

$$\frac{d\vartheta}{dh} = 0,$$

以求 $\vartheta = \vartheta_{\min}$ 时之水深 h_{lj} , 得

$$\frac{\alpha Q^2}{g} = \frac{\omega_{lj}^3}{B_{lj}}. \quad (7-8)$$

此式等号右边是已知, 左边则仅是 h_{lj} 的函数, 故可用以确定 h_{lj} 。在具体求解上, 常采用以下的辅助办法, 以利计算。

图 7-10. $\frac{\omega^3}{B} = f(h)$ 曲线

对于给定的断面, 设各种 h 值, 依次算出其相应的 ω , B 和 $\Delta = \frac{\omega^3}{B}$ 值。以 $\frac{\omega^3}{B}$ 对 h 作图 7-10。

从式(7-8), 知图中对应于 $\frac{\omega^3}{B}$ 恰好等于 $\frac{\alpha Q^2}{g}$ 的水深 h , 便是 h_{lj} 。

对于矩形断面有 $\omega_{lj} = bh_{lj}$,

$$B_{lj} = b, Q = bq.$$

把这些代入式(7-8), 解得

$$h_{lj} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (7-9)$$

式中： q ——单宽流量。

题 7-1. 平坡和逆坡渠道的断面单位能量，有无可能沿流程增加？

题 7-2. 一明渠渐变流段，长 1 公里，全段平均摩擦坡度 $\bar{i}_s = 0.001$ 。若把基准面取在下端底部以下 0.5 米，则水流在上端断面的总能 $E_1 = 3$ 米。求下端的断面单位能量 \mathcal{E}_2 。

答： $\mathcal{E}_2 = 1.5$ 米。

例 7-1. 一平坡梯形渠道，底宽 $b = 4$ 米，边坡系数 $m = 1.5$ ，粗糙系数 $n = 0.030$ ，流量 $Q = 4.6$ 米³/秒。求水深 $h = 1$ 米处的总能坡度 J_n 与 $\frac{d\mathcal{E}}{ds}$ 。

解 根据已给的 m, n, b, h 和 Q 的数据，以均匀流公式或用巴甫洛夫斯基的诺谟图(图 6-3d) 求出 $i = 0.001$ 。这是与水深 1 米处同 Q 同 h 的均匀流的底坡或摩擦坡度。按以前所作假设，这就是非均匀流在水深 1 米处的摩擦坡度 i_s 。

$$\text{从式(7-3), } \frac{d\mathcal{E}}{ds} = i - i_s = 0 - 0.001 = -0.001.$$

$$\text{在平坡渠道中, } E = \mathcal{E} + z_1 = \mathcal{E} + \text{常数},$$

于是总能坡度

$$J_n = -\frac{dE}{ds} = -\frac{d(\mathcal{E} + \text{常数})}{ds} = -\frac{d\mathcal{E}}{ds} = 0.001.$$

题 7-3. 设例 7-1 中之渠道为逆坡 $i = -0.0005$ ，其他数据不变，求在水深 1 米处的 $\frac{d\mathcal{E}}{ds}$ 和总能坡度 J_n 。

$$\text{答: } \frac{d\mathcal{E}}{ds} = -0.0015; J_n = 0.001.$$

题 7-4. 某梯形渠道，底宽 4 米，边坡系数 1.5，流量 30 米³/秒。设 $\alpha = 1$ ，试用解析法求临界水深 h_{lj} 。

答： $h_{lj} = 1.48$ 米。

题 7-5. 一矩形渠道，底宽 10 米，流量 5 米³/秒， $\alpha = 1.1$ 。求作 $\mathcal{E} = f(h)$ 曲线，并确定临界水深 h_{lj} ：①从 $\mathcal{E} = f(h)$ 曲线，②从式(7-9)。

答： $h_{lj} = 1.41$ 米。

题 7-6. 一顺坡渠流的某过水断面，其水深 h 小于 h_0 而大于 h_{lj} 。问水流在该处是加深还是减深？

答：是减深。

§ 7-3. 缓流、急流与临界流 · 临界坡度

1. 缓流、急流与临界流 水流在临界水深时之流速称为临界流速 v_{lj} ，这样的水流称为临界流。水流流速小于临界流速的，称为缓流。大于临界流速的，称为急流。可见在：

缓流 ($v < v_{lj}$) 时: $h > h_{lj}$, 处在 $\vartheta = f(h)$ 曲线的上枝, $\frac{d\vartheta}{dh} > 0$;

急流 ($v > v_{lj}$) 时: $h < h_{lj}$, 处在 $\vartheta = f(h)$ 曲线的下枝, $\frac{d\vartheta}{dh} < 0$;

临界流速 ($v = v_{lj}$) 时: $h = h_{lj}$, 处在 $\vartheta = f(h)$ 曲线上的 ϑ_{\min} 点, $\frac{d\vartheta}{dh} = 0$ 。

缓流、急流与临界流的判别在明渠非均匀流的分析和计算上, 具有重要意义, 应当寻求一个便于判别的标准。

从式(7-7), 并以 $\frac{\omega}{B}$ 为式(2-47)中的特征长度 l , 则有

$$\frac{d\vartheta}{dh} = 1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{B}{\omega^3} = 1 - \frac{\alpha v^2}{gl} = 1 - Fr. \quad (7-10)$$

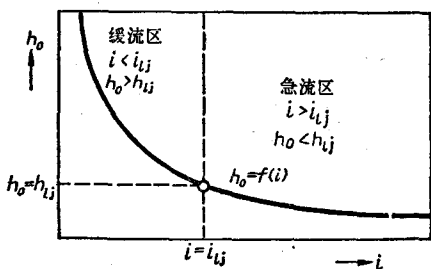
现以缓流为例。缓流位于 $\vartheta = f(h)$ 曲线的上枝, $\frac{d\vartheta}{dh} > 0$, 故 $Fr < 1$ 。仿此得: 对急流, $Fr > 1$; 对临界流, $Fr = Fr_{lj} = 1$ 。可见佛汝德数 Fr 是判别缓、急和临界流的标准。

附带指出, 佛汝德数还可写成(式 7-10)

$$Fr = \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{B}{\omega^3} = 2 \frac{\frac{\alpha v^2}{2g}}{\frac{\omega}{B}},$$

这就是说, Fr 是断面单位动能对其平均势能比值的二倍。流态愈急, Fr 亦愈大。

2. 临界坡度 i_{lj} 是在渠道断面尺寸、粗糙系数和流量给定的渠道中，能使其正常水深 h_0 恰好等于其临界水深 h_{lj} 的一种想象的底坡。亦即当 $h_0 = h_{lj}$ 时， $i = i_{lj}$ (图 7-11)。该图示渠道断面尺寸、 n 和 Q 给定的情形下，正常水深与底坡间的关系曲线。从图看出：

图 7-11. $h_0 = f(i)$ 的图示

如果渠道的底坡是缓坡 ($i < i_{lj}$)，则 $h_0 > h_{lj}$ ，从而 $v_0 < v_{lj}$ ，均匀流是缓流；如果是急坡 ($i > i_{lj}$)，则均匀流是急流；如果是临界坡 ($i = i_{lj}$)，则均匀流是临界流。

由此可见，底坡的缓、急或临界与均匀流的缓、急或临界是完全一一对应的。

附带指出，当均匀流在水工建筑物的控制或影响下而成为非均匀流时，则完全没有这种限制，在急坡中可出现一段缓流，缓坡中可能有急流，如此等等 (表 7-1)。

临界坡度 i_{lj} 的计算公式可按临界流的定义——当 $i = i_{lj}$ 时， $h_0 = h_{lj}$ 来推导。这是个处在临界状态下的均匀流。换言之，临界深度时之各有关要素，应能适合均匀流方程。因此有

$$Q = K_{lj} \sqrt{i_{lj}} \quad \text{或} \quad Q = \omega_{lj} C_{lj} \sqrt{R_{lj} i_{lj}}.$$

$$\text{从前一等式出发，得 } i_{lj} = \frac{Q^2}{K_{lj}^2}, \quad (a)$$

就后一等式与式 (7-8) 联立，解得

$$i_{lj} = \frac{g \cdot \chi_{lj}}{\alpha C_{lj}^2 B_{lj}}, \quad (b) \quad (7-11)$$

对于宽而浅的断面

$$i_{lj} \approx \frac{g}{\alpha C_{lj}^2}. \quad (c)$$

从定义知 i_{lj} 与 Q 有关, 对于宽浅矩形断面则是 i_{lj} 随 Q 之增大而减小(题 7-8)。因此, 就某一给定的渠道底坡 i 而言, 如果在 Q 小时为缓坡, 随着 Q 的增加, 便可能成为临界坡或急坡。可见渠道底坡的缓、临界或急, 视所输流量 Q 的大小而定, 其本身不具有绝对意义。

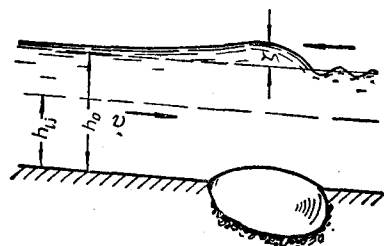
附带考查临界流速 v_{lj} , 除作为缓流和急流的判别标准外, 有无更为明显的物理意义。

从式(7-8), 并注意到 $Q = \omega_{lj} v_{lj}$, 有

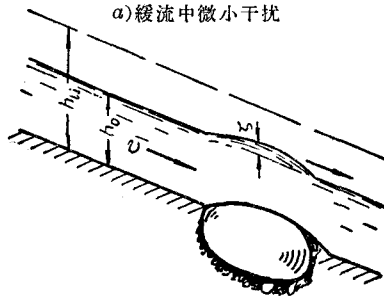
$$v_{lj} = \sqrt{\frac{g \omega_{lj}}{\alpha B_{lj}}} = \sqrt{\frac{g}{\alpha} \bar{h}_{lj}} \approx \sqrt{g \bar{h}_{lj}}, \quad (7-12)$$

式中: \bar{h}_{lj} ——临界流速之平均水深。

另一方面, 从波浪理论, 知由于微小干扰所引起的微幅波的波速 $c \approx v_{lj}$ 。因此: 在缓流中 ($v < v_{lj} = c$), 干扰的影响可以逆流上传, 如图 7-12a, 在急流中 ($v > v_{lj} = c$), 干扰的影响, 不仅不能逆流上传, 而且是被冲向下游, 如图 7-12b。



a) 缓流中微小干扰



b) 急流中微小扰动

图 7-12. 缓、急流与干扰

在结束本节时, 将所讲要点归纳在以下两表中。