

水工建築物下游的 水力計算

Л. С. БАШКИРОВА 原著

黃 駿 毛善培 合譯

中國科學圖書儀器公司

出 版

水工建築物下游的水力計算

Л. С. БАШКИРОВА 原著

黃 駿 毛 善 培 合譯

中國科學圖書儀器公司

出 版

內 容 介 紹

本書主要介紹了原著者所建議的水工建築物上下游聯接部分水力計算的新方法,可供水力發電的設計工程師作參攷之用。

原書本有四個附錄,專備計算時檢查之用,茲由譯者另增附錄五為閘壩下游消能設備計算用曲綫圖,並附用法說明。

水工建築物下游的水力計算

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НИЖНЕГО ВЪЕФА
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

原 著 者	Л. С. БАШКИРОВА
原出版者	ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
譯 者	黃 駿 毛 善 培
出 版 者	中國科學圖書儀器公司
印 刷	上海延安中路 537 號 電話 64545
總 經 售	中國圖書發行公司
	★ 有 版 權 ★

CE. 59—0.12 25開 98面及插頁一張66千字每千冊用紙4.00令

新定價 ¥ 7,500 1954年3月初版 0001—3000

上海市書刊出版業營業許可證出零貳柒號

序

這本書主要介紹了原著者所建議的水工建築物上下游聯接部分的水力計算之新方法，可供水電工程師及設計者們的參考。唯譯者因受技術及俄文水平的限制，很可能原文的精華，沒有能充分地表達，甚至於發生了偏差，請讀者們隨時指正。

在翻譯過程中，承南京水利實驗處毛昶熙工程師啓發良多，謹此致謝。

一九五三年十月於南京

目 錄

緒論	1
第一章 上下游連接部分	5-14
1. 水流之形態	5
2. 收縮斷面處之水深及特殊共軛水深之確定	8
3. 判斷上下游連接部分水流情況之新標準	10
第二章 消能建築物之高度	15-32
4. 消力塘	15
5. 消力檻	22
6. 複式消力塘	31
第三章 沉溺式消力檻之實驗研究	33-40
第四章 設計水工建築物下游時的設計流量 及水工建築物閘門運用方式的組合	41-53
第五章 梯形斷面渠道中建築物下游的水力計算	54-62
7. 收縮斷面處水深之決定	54
8. 水躍共軛水深之決定	56
9. 梯形渠道中上下游連接部分之情況	60
10. 消力塘深度之決定	61
附錄	63-90
I 矩形渠道中建築物下游之水力計算的關係值	63
II 計算消力檻高度時之 $\beta = f(\eta')$ 值 (沉溺係數, 係根據著者的實驗資料)	66
III 計算消力檻高度時之 $\beta = f(\eta')$ 值 (沉溺係數, 係根據巴夫洛夫斯基院士之資料)	67
IV 引渠爲梯形斷面時, 水工建築物下游的水力計算表	68
V 閘壩下游消能設備用圖計算說明 (根據第二章及附錄之資料繪成)	86

緒 論

由於偉大的斯大林共產主義建設計劃在伏爾加河，頓河，德涅泊爾河，阿姆河上的實現，水工建築物的建設，在蘇聯得到了長足的發展。因此，水力學面臨着許多日新月異的問題；可是也都為我們蘇聯的學者及工程師們很成功地解決了。引起水力學者所注意的問題之一，就是上下游聯接部分的問題，水流對建築物下游附近河床的作用，以及建築物本身對水流的影響。

因為在下游水流中多餘能量的必須消滅，以及消能建築物設計的必要，故而產生了消能設備水力計算方法的改進問題。

在現有的計算方法中，有許多情況下，是需要應用麻煩的試算法，以謀取方程式之解答；或者要求利用很多的輔助圖表。

當設計灌溉系統渠道中的建築物時（如跌水，陡坡，水閘等），同時發生了許多消能設備的數字計算，這些水力計算方法的改進和簡化，可以節省大量的時間。

改進後的計算方法，應當比較全面地照顧到使用消能設備時所發生的各種水力現象，同時還要求計算簡單，應用最少量的圖表，得到足夠的精度。

本書因限於篇幅，不可能對現有的有關下游的水力計算方法，均加以討論；僅僅說明在上世紀之末，由於水工結構理論的需要，而引起學者們注意的問題。

我國（指蘇聯——譯者註）的水力科學，已經論證了先進的上下

游聯接的理論，並且也已創立了整套的計算方法。

在斯大林第一個五年計劃實施的過程中，由於大規模水利技術建設的實現，以及為配合解決日益增多的實際問題之水力學的發展，上述理論方法，已經得到非常出色的成就。

有關下游問題計算的許多新建議，接連不斷地被蘇聯學者們如：Н. Н. 巴夫洛夫斯基(Павловский)，М. Д. 契爾杜索夫(Чертоусов)，А. Н. 拉哈曼諾夫(Рахманов)，А. А. 烏根邱斯(Угинчус)，И. И. 阿格洛斯基(Агрошкин)，В. А. 蘇曼(Шаумян)等提出。

本書論及了矩形斷面及梯形斷面的渠道中，水工建築物下游水力計算的合理化方法。

本書所討論的內容有：1. 上下游聯接部分(第一章)。2. 消能設備的尺寸(第二章)。3. 消力檻之實驗研究(第三章)。4. 設計建築物下游時之設計流量及水工建築物閘門運用方式的組合(第四章)。5. 梯形渠道中水工建築物下游的水力計算(第五章)。

在進行有關下游的水力計算時，吾人利用兩個著名的方程式：計算收縮斷面處的水深用

$$\vartheta_0 = h_c + \frac{\alpha Q^2}{2g\varphi^2\omega_c^3} \quad (1)$$

計算稜柱體渠道中之共軛水深用

$$\frac{\alpha' Q^2}{g\omega_2} + y_2\omega_2 = \frac{\alpha' Q^2}{g\omega_1} + y_1\omega_1 \quad (2)$$

圖一所採用之符號如下：

ϑ_0 ——以下游渠底為基準的上游水流之比能，亦即計及行近流速後之全水頭。

H_0 ——計及行近流速後的堰上水頭。

P_0 ——消力檻之高度。

d_0 ——消力塘之深度。

h_c ——收縮断面處之水深。

$h_{\text{pass}} = h'_c$ ——特殊共軛水深——與收縮断面處水深 h_c 相應的共軛水深。

t ——下游水深。

t'' ——與下游水深 t 相應的共軛水深。

h_κ ——臨界水深。

h_1 ——水躍前之共軛水深。

h_2 ——水躍後之共軛水深。

φ ——流速係數。

ω ——水流過水断面之面積。

y ——自水流断面之壓力中心至水面之距離。

H —— H ——正常水位線。

κ —— κ ——臨界水位線。

α ——由於水流過水断面中流速分佈之不均勻，所需要的流速水頭校正數。

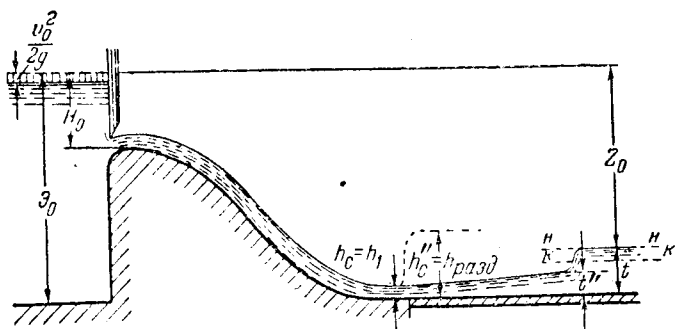


圖 1

α' ——稜柱體渠道中,水躍方程式(2)之係數。
方程式(1)及(2)為計算公式之基礎。

第一章

上下游聯接部分

1. 水流之形態

上下游聯接部分是水工建築物最重要的區域，因為就是在這裏，消減了自上游到下游之水流中多餘的能量。

爲了有效地解決消能問題，首先必須了解上下游聯接部分的水流情況。而聯接部分的水流情況決定於下游水深，下游底坡以及水流的特性。

最常用的水工建築物中上下游聯接部分之各種水流情況，歸納於表一中⁽¹⁾。

於建築物之後，下跌的水舌具有最小之收縮斷面，該處之水深 h_c ，往往小於臨界水深，因此，這裏的水流處於急流的狀態。

假如下游的水流處於緩流的狀態，($t > h_c$) 那麼從收縮斷面水深 h_c 過渡到下游水深 t 時，將發生水躍（如表一中，類型 I, II, III）⁽²⁾。

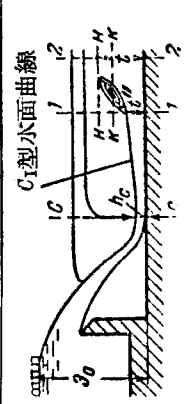
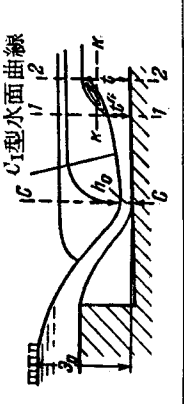
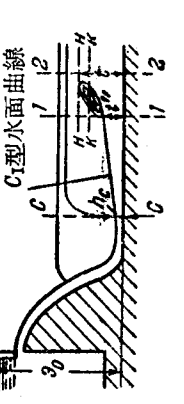
同時根據水深的關係， $h_{pasd} \geq t$ ⁽³⁾，水躍可能是遠驅式 ($h_{pasd} > t$) 或者是沉溺式 ($h_{pasd} < t$)，也可能處於臨界狀態 ($h_{pasd} = t$)。

(1) 此處未考慮表面流（表面水流具有最大的流速）情況下之上下游聯接部分的形態。關於表面水躍的理論及表面流情況下建築物的計算問題，在研究下游問題的水力學中具有特殊的地位。且已被蘇聯科學家們：A. A. 沙巴尼夫，H. H. 列威，M. Л. 契爾杜索夫，B. Ф. 列爾託夫，及 Л. Н. 古明等研究。

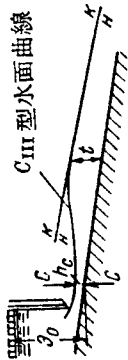
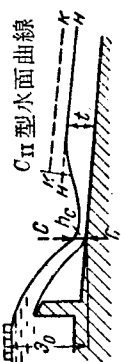
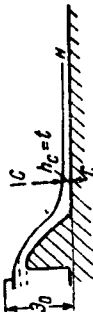
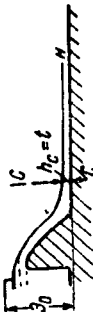
(2) 如下游水流處於臨界的或者急流的狀態，則上下游聯接部分非常平滑，不發生水躍。（表 1 中 IV, V 類型）。

(3) h_{pasd} ——特殊共軛水深；爲 B. Л. 朱林教授所引用的術語，其意義爲水躍之第二共軛水深，如第一共軛水深位於收縮斷面處。（譯者）

表一 最普通形式之水工建築物上下游聯接部分的水流情況

下游的水流狀況	比 降	類 型	水深之關係	建 築 物 之 形 式	水 躍 之 形 式
I	$i < 0$	a	$h_{pas0} > t$		遠驅式水躍
		b	$h_{pas0} = t$		臨界狀態下之水躍
		c	$h_{pas0} < t$		沉溺式水躍
II	$i = 0$	a	$h_{pas0} > t$		遠驅式水躍
		b	$h_{pas0} = t$		臨界狀態下之水躍
		c	$h_{pas0} < t$		沉溺式水躍
III	$i < i_k$	a	$h_{pas0} > t$		遠驅式水躍
		b	$h_{pas0} = t$		臨界狀態下之水躍
		c	$h_{pas0} < t$		沉溺式水躍

(2) $h_k < t$ 之水流 (臨界狀態下之水躍)

躍 流 ($t < h_K$)	IV	$i = i_K$	a	$h_K = t$	
					
					
					
					
躍 水	V	$i > i_K$	b	$h_c = t$	
					
					
					
					
無					
					
					
					
					

2. 收縮斷面處的水深及特殊共軛水深之確定

決定收縮斷面處的水深 h_c ，可採用方程式(1)；用於矩形引渠，又可寫做較簡單的形式：

$$\mathcal{D}_0 = h_c + \frac{\alpha q^2}{2g\varphi^2 h_c^3} \quad (3)$$

q ——單位流量。

相應於收縮斷面處水深 h_c 的特殊共軛水深 h_{pasd} ，在矩形渠道中，可由方程式(4)決定之。

$$h_{pasd} = \frac{h_c}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8\alpha q^2}{g h_c^3}} - 1 \right] \quad (4)$$

根據方程式(3)來決定 h_c ，因為需要逐次試算，故要化費很多的時間。

因此，蘇聯學者們(A. H. 拉哈曼諾夫, A. A. 烏根邱斯, M. Д. 契爾杜索夫, Н. Н. 巴夫洛夫斯基, И. И. 阿格洛斯金, B. A. 蘇曼等)提示了整套的圖表，用以簡化下游共軛水深之計算。

這許多下游聯接部分的水力計算方法是建築在一些方程式上，而這些方程式又都是水力要素對於建築物前的總能頭 $\mathcal{D}_0$ 或者對於臨界水深 h_k 的比值之函數。

但是，當採用上述數值對單位流量 q 的比值，對於下游的水力計算來講，可以得到較方便的數學式。

為達到這個目的，將方程式(3)除以 $q^{\frac{2}{3}}$ ：

$$\frac{\mathcal{D}_0}{q^{\frac{2}{3}}} = \frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}} + \frac{\alpha q^2}{2g\varphi^2 h_c^3 q^{\frac{2}{3}}},$$

由上可得

$$\frac{\mathcal{D}_0}{q^{\frac{2}{3}}} = \frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}} + \frac{\alpha}{2g\varphi^2 \left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3} = f_1 \left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}} \right) \quad (5)$$

如以 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\beta_0}$ 表示以上之關係，則

$$\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\beta_0} = \frac{2g\varphi^2\left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3}{\alpha + 2g\varphi^2\left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3} = f_2\left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right). \quad (6)$$

方程式(6)可適用於任何形式之建築物(圖二)。

$\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}$ [方程式(4)]也可用 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{h_{pas\partial}}$ 之函數表示之：

$$\begin{aligned} \frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}} &= 0.5 \frac{h_{pas\partial}}{q^{\frac{2}{3}}} \left[\sqrt{1 + \frac{8\alpha}{g} \cdot \frac{1}{\left(\frac{h_{pas\partial}}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3}} - 1 \right] \\ &= 0.5 \frac{1}{\left(\frac{q^{\frac{2}{3}}}{h_{pas\partial}}\right)} \left[\sqrt{1 + \frac{8\alpha}{g} \left(\frac{q^{\frac{2}{3}}}{h_{pas\partial}}\right)^3} - 1 \right] = f_3\left(\frac{q^{\frac{2}{3}}}{h_{pas\partial}}\right) \quad (7) \end{aligned}$$

視 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{h_{pas\partial}}$ 為自變數，用方程式(7)，可計算 $\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}$ ；而利用方程式(6)，對於各種不同的係數值 φ (0.8, 0.85, 0.90, 0.95, 1.0)，可求出 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\beta_0}$ ，係數 α 採取 1。

在附錄 I 中載有 64 個自變數的數值，以及對應於它們的 $\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}$, $\frac{h_{pas\partial}}{q^{\frac{2}{3}}}$, $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\beta_0}$ 。

表中的變數，一直算到下游為臨界情況時為止。

亦即 $h_c = h_{pas\partial} = h_{\kappa}$ 。

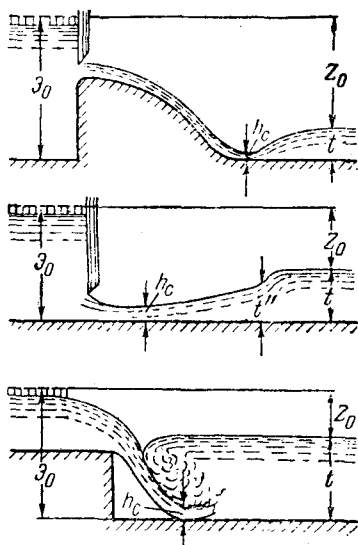


圖 2

此時自變數 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0}$ 之比值對於不同之 φ 值可得到：

φ	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00
$\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0}$	1.201	1.265	1.323	1.377	1.426

變數 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0}$ 在表中的變化範圍很小，當 $\varphi = 1.00$ 時，其最大變幅等於：

$$0.051 < \frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0} < 1.426.$$

茲舉一例題，應用附錄中的圖表，計算建築物下游水深 h_c 及 $h_{pas\partial}$ 。

例一 當 $\vartheta_0 = 20$ 公尺，流速係數 $\varphi = 0.95$ ，單位流量等於每公尺寬為 4 公尺³/秒時，決定滾水壩下游收縮断面處之水深及特殊共軛水深。

解 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0} = \frac{2.519}{20.0} = 0.126$ ， $\varphi = 0.95$ 時，自附錄 I 得到：

$$\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}} = 0.085 \quad \text{及} \quad \frac{h_{pas\partial}}{q^{\frac{2}{3}}} = 1.509.$$

所求之水深為：

$$h_c = 0.085 \times 2.519 = 0.21 \text{ 公尺};$$

$$h_{pas\partial} = 1.509 \times 2.519 = 3.80 \text{ 公尺}.$$

3. 判斷聯接部分水流情況之新標準

吾人無需決定深度 $h_{pas\partial}$ ，即能很快地判斷下游水流的聯接形式是非常重要的。爲了達到這個目的，我們建議採用函數 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0}$ 表示臨界相對水位差之值。臨界相對水位差之值，同時也可用 A. A. 烏

根邱斯所採取的形式，即 $\left(\frac{z_0}{\vartheta_0}\right)_0$ ，其時下游水流呈臨界狀態。

根據“臨界相對水位差”的基本概念，可寫成下列的等式，

$$\left(\frac{z_0}{\vartheta_0}\right)_0 = \frac{\vartheta_0 - h_{pas\vartheta}}{\vartheta_0}$$

因為在下游的水流臨界聯接形式下， $h_{pas\vartheta} = t$ ，故

$$\left(\frac{z_0}{\vartheta_0}\right)_0 = \frac{\vartheta_0 - h_{pas\vartheta}}{\vartheta_0} = 1 - \frac{h_{pas\vartheta} q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0 q^{\frac{2}{3}}} = 1 - \frac{h_{pas\vartheta} q^{\frac{2}{3}}}{q^{\frac{2}{3}} \vartheta_0}. \quad (8)$$

關於方程式(6)與(7) $\frac{h_{pas\vartheta}}{q^{\frac{2}{3}}}$ 也可用函數值 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0}$ 表示之。

實際上；

$$\begin{aligned} \frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0} &= \frac{2g\varphi^2 \left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^2}{\alpha + 2g\varphi^2 \left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3} \\ &= \frac{2g\varphi^2 \left(\frac{h_{pas\vartheta}}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^2 \left[\sqrt{1 + \frac{8\alpha}{g} \cdot \frac{1}{\left(\frac{h_{pas\vartheta}}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3} - 1} \right]^2}{4\alpha + g\varphi^2 \left(\frac{h_{pas\vartheta}}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3 \left[\sqrt{1 + \frac{8\alpha}{g} \cdot \frac{1}{\left(\frac{h_{pas\vartheta}}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3} - 1} \right]^3} \\ &= \varphi \left(\frac{h_{pas\vartheta}}{q^{\frac{2}{3}}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

或

$$\frac{h_{pas\vartheta}}{q^{\frac{2}{3}}} = \varphi \left(\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0} \right). \quad (10)$$

因而，

$$\left(\frac{z_0}{\vartheta_0}\right)_0 = 1 - \frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0} \varphi \left(\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0} \right) = \varphi' \left(\frac{q^{\frac{2}{3}}}{\vartheta_0} \right). \quad (11)$$

方程式(8)中 $\left(\frac{z_0}{g_0}\right)_0$ 之值載於附錄 I 中。

根據函數式(11)，可以很容易地得到建築物下游水流的聯接形式。

茲以例題說明之：

例二 已知 $g_0 = 30$ 公尺， $q = 4.5$ 秒公方/公尺， $\varphi = 0.95$ ， $t = 3.0$ 公尺；試求滾水壩下游水流之聯接形式。

解 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{g_0} = 0.091$ ，自附錄 I 中可查得相應的臨界相對水位差 $\left(\frac{z_0}{g_0}\right)_0 = 0.850$ 。實際之相對水位差為 $\frac{27}{30} = 0.90$ 。因而， $\left(\frac{z_0}{g_0}\right)_{\text{факт}} > \left(\frac{z_0}{g_0}\right)_0$ ，下游發生遠驅式水躍。

再回到方程式(11)，必須注意， $\left(\frac{z_0}{g_0}\right)_0$ 在某些 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{g_0}$ 數值時，具有極小值。視 $\frac{q^{\frac{2}{3}}}{g_0}$ 為自變數，欲求函數之極小值非常複雜，因此，吾人令 $\left(\frac{z_0}{g_0}\right)_0 = f\left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right)$ ，利用方程式(7)，(8)，(9)：

$$\begin{aligned} \left(\frac{z_0}{g_0}\right)_0 &= 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right) \left[\sqrt{1 + \frac{8\alpha}{g} \frac{1}{\left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3}} - 1 \right] \times \\ &\times \frac{2g\varphi^2 \left(\frac{h_c^2}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^2}{1 + 2g\varphi^2 \left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right)^3} = f\left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right). \end{aligned} \quad (12)$$

取第一次導來式 $\frac{\partial \left(\frac{z_0}{g_0}\right)_0}{\partial \left(\frac{h_c}{q^{\frac{2}{3}}}\right)}$ 並令其等於零，則：