科 學 譯 叢

——理論及應用力學：第 6 種——

河渠中不穩定流動的計算

B. A. 阿爾漢蓋里斯基著

科 學 出 版 社 出 版

科學譯叢

——理論及應用力學 第6種——

河渠中不穩定流動的計算

B. A. 阿爾漢葢里斯基著
原書負責編輯 C. A. 赫里斯佳諾維奇
王承樹譯

科學出版社出版
1954年12月

內 容 提 要

本書詳盡地寫述了明渠中不穩定流動的流動形態，不穩定流動的計算方法，以解決水電站和水工建築物的設計和使用過程中所產生的這類問題。本書適宜於水利工程工作者與力學研究工作者閱讀之用。

河渠中不穩定流動的計算

Расчеты неустановившегося
движения в открытых водотоках
Издательство АН СССР
1947 г.

原著者	В. А. Архангельский
翻譯者	王　承　樹
出版者	科　學　出　版　社 北京東四區幌兒胡同2號
印刷者	藝文書局鑄字印刷廠 上海嘉善路113號
發行者	新　華　書　店

(譯) 54056　　1954年12月第一版
自然：089　　1954年12月第一次印刷
(滬) 0001－2,700　　開本：787×1092 $\frac{1}{25}$
字數：125,000　　印張：8
定價：16,000元

前　　言*

本書的內容爲明渠中不穩定流動的計算方法，以解決水電站和水工建築物的設計和使用過程中所產生的這類問題。

第一章內所述者爲河渠中不穩定流動的形態。

在第二章內推導了柱形河床中不穩定流動的聖維南（De Saint Venant）微分方程式並敍述了該方程式解法的一般性考慮。

在第三章中引述了赫里斯佳諾維奇（С. А. Христианович）對於孫弗南方程式的特性線（характеристика）的近似積分法。

第四章的內容爲將聖維南方程式加以近似積分的瞬態法（метод мгновенных режимов），至於慣性力項，則或是被略掉不計，或是被近似地計入。

第五章爲特性線法及瞬態法對於不連續波流動計算的應用。

在第六章中敍述了進行不穩定流動所需的地形和水文測驗資料的整理方法，以及邊界條件並不能從問題的內容直接引出時的確定方法。

該章中還舉了特性線法和瞬態法的算例，並提供了一些計算所得的數據和不穩定流動實際觀測資料的比較。

在第七章中簡括地分析了洪水波的形變、日調節水電站上下游的流態以及抬水建築物潰決後的流態諸問題。

---

* 原書前言尙附有英文譯文，內容幾乎毫無差別；本譯文係以俄文原文爲據，並參考英譯文而譯出者。——譯者。

目　　錄

第　一　章

不穩定流動時的流動形態

§1　不穩定流動(定義)

當沿明渠水流任何斷面的過水斷面面積及斷面中的流量分佈或流速分佈是已知時，這種流動就完全確定。對於河渠水力學中所研究的大多數應用性問題，知道了平均流速（卽按斷面而平均的流速）便就够了。

平均流速的數値等於流量被過水斷面面積除得的商；所以當任何斷面中上述三値的二者爲已知時，平均的流動卽完全確定。水力計算中的未知數在以後稱爲流動參變數（параметр режима）。

作爲一個未知數看待時，過水斷面面積可用河床的水深或水位的高程來替代。

水流的流動可以是穩定的，也可以是不穩定的。

若某流段（участок）中任何斷面的流動參變數不隨時間而變，則該流段中的這種流動稱爲是穩定流動，（установившееся движение）。將渠道或河流中的流量加以調節而使之不變時，卽生這種流動。天然河道在平水期（межень）時的流態極接近於穩定流動的狀態，通常也就把它當作穩定流動。

沿流段各點的流動參變數保持不變的穩定流動稱爲等速

流動（равномерное движение）；例如若流量不變而渠道爲柱形的形狀、且沿流段各點的水深不變，則其中的流動卽爲等速流動。若沿流段各點的流動參變數是變化着的，則其中的流動爲變速的。上例的渠道中抬水（подпор）和降水（спад）段內的流動卽爲變速流動（неравномерное движение）；天然河道中的水流亦屬於變速流動，因天然河道各點的形狀及流量是不同的。

流段中任何斷面的流動參變數隨時間而變時，流動是不穩定的。不穩定流動（неустановившееся движение）中任一時瞬的流動參變數且隨流段各點位置的不同而有變化。

沿流程（бьеф）而流的洪水波使各斷面的水位、流量及其他流動參變數產生連續的變化，故可作爲天然河道中不穩定流動的例子。

顯然，不穩定流動是流動的最普遍形態，穩定流動祇是它的特殊情況，正像等速流動是變速流動的特殊情況一樣。

流程中洪水過後，流動實際上便從不穩定的轉變爲穩定的（平水期），若河渠中有很長的、接近於柱形形狀的流段，則其中的變速流動實際上便轉變爲等速流動了。

反之，若因某種原因而流程中某斷面的流量隨時間而發生變化（水位及其他流動參變數當然亦因而隨時間而變），則原先的穩定流動就轉變爲不穩定流動。

不穩定流動計算的目的是在求不同斷面和不同時間的流動參變數。

在穩定變速流動的場合中，欲從計算而確定的流動參變數

僅和斷面的位置有關；通常在此場合中，流段中的流量是指定的，所欲求的是隨斷面的位置而變的過水斷面面積、水深或更慣常的水位高程。

最後，在等速流動的場合中，只須求得任意選擇的斷面中一個流動參變數值便足够了。

所以，不穩定流動計算的目的在於求得下列的關係式：

$$R_1 = R_1(s,t) \tag{1.1}$$

$$R_2 = R_2(s,t) \tag{1.2}$$

式中 R_1 和 R_2 爲欲求的流動參變數，S 爲從某起始斷面起算的斷面位置的坐標，而 t 則爲時間。

對於穩定流動，計算所欲求的則爲

$$R = R(s) \tag{1.3}$$

等速流動計算中所欲求的是任意選擇的斷面的 R=常數。

§2　不穩定流動的形態。波

不穩定流動的總稱爲波（волна）。赫里斯佳諾維奇（С. А. Христианович）從數學觀點給與河渠中波的概念的精確定義爲［文獻 2］：波爲某不穩定流動，該不穩定流動的方程式有解

$$R_1 = R_1(s,t), \qquad R_2 = R_2(s,t) \tag{1.4}$$

而該解在變數 S 和 t 的某域中是有定義的，並在同域中有連續的有限一階導函數。

顯然，函數（1.4）的形式，亦卽波的形態隨邊界上的條件及域中的條件的不同而不同。通常以某斷面中流量或水位隨時間而變的規律作爲一個邊界條件；以後我們稱此斷面爲起始斷面（начальный створ）。

由於流量單純地增加或單純地減少所生的不穩定流動是最簡單的不穩定流動。這種流動稱爲單向波（волна одного направления）。這種波以某種所謂波前（фронт волны）傳遞速度或擾動速度的速度沿流程而傳遞，促使流程中愈來愈長的距離進入不穩定流動的狀態。

若波隨水流而傳遞，則稱爲順波（прямая волна）；反之則稱爲逆波（обратная солна）；流量增加的波稱爲是正的（положительная），流量減少的波則稱爲是負的（отрицательная）。

正波的傳遞有兩種形態：在一種形態中，在很短的、所謂波額（лоб волны）的流段中，有劇烈的流量和水位的上漲伴隨着波前，這種波稱爲不連續波（прерывная волна）；在另一種形態中，並沒有這種劇烈的上漲，此時的波稱爲連續波（непрерывная волна）。

圖 1 所示者爲單向波（箭頭所指者卽爲流向）縱剖面的不同形態。水庫放水時上下游中所生的波卽爲單向波的例子。

若在起始斷面由於流量的變化所生的波開始時沿某一方向，而緊隨此後或隔相當的時間以後又沿相反的方向傳遞時，我們在以後稱之爲運行波（волна попуска）。洪水流動卽爲這種波的例子。

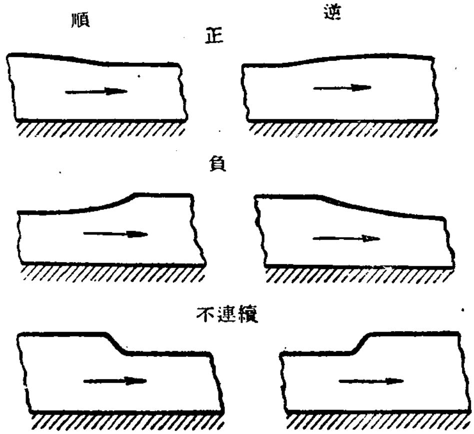


圖 1.

由於流態的一系列接續着的不同方向的變化所生的（例如日調節所生的）不穩定流動稱爲複波（сложная волна）。

若觀察一下沿流程各斷面由於波所生的流量或水位的變化，則可發現隨各該斷面離起始斷面愈遠則這種變化愈小。這種現象稱爲波的坦化或衰減（распластывание или затухание волны）。

圖 2 爲波的坦化的例子，該圖所示者爲有日調節的某水電站下游中流量過程曲線及水位過程曲線（前者爲流量隨時間的變化曲線，係用虛線所示；後者爲水位隨時間的變化曲線，係用實線所示）；通過水電站的流量則用折線（帶點虛線）表示。

圖 3 中水位、流量的變化（以起始斷面中的幅度爲一，而將變化的數值用百分數表示）和觀察斷面與起始斷面間距離的關係曲線表示了這種坦化。

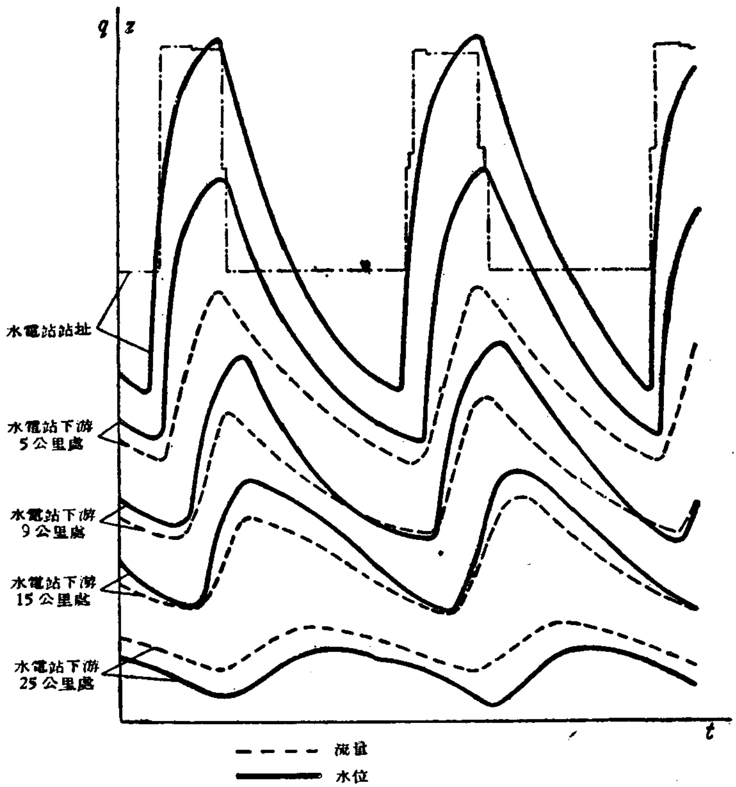
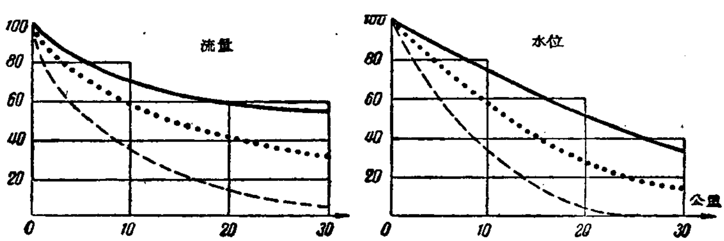


圖　2.



運行持續的時間: —— 10 小時　…… 3 小時　--- 2 小時

圖　3.

§3 不穩定流動的水文測驗特性

任何斷面中流動的基本特性爲水位 z 和流量 q 之間的關係，即

$$z = z(q)$$

這個關係得自水文測驗。其圖形表示卽爲所謂流量水位曲線。

對於不冲刷的河床，穩定流動時的 $z = z(q)$ 是個單値函數。不穩定流動時，這個關係便不同了。

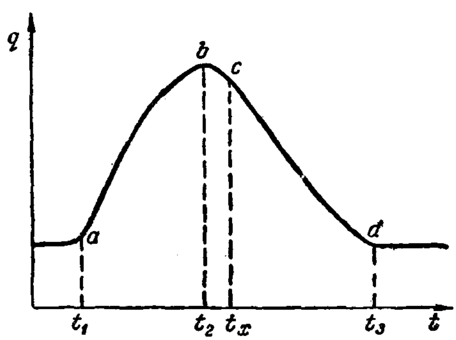


圖 4.

設 $q = q(t)$ 爲某斷面上相應於某運行波的流量過程曲線（圖 4）。

在時段 $t_1 t_2$ 間，流量漸增，水流的面坡大於穩定流動時的數値，而在時段 $t_2 t_3$ 間，流量漸減，水流的面坡則小於穩定流動時的數値。

所以，通過一定流量所需的水深，在流量漸增期間，比穩定流動的流量水位曲線所示者小，而在流量漸減期間，則較大。

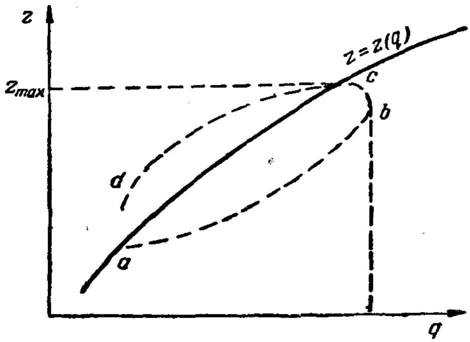


圖 5.

因此，若將這個關係在 z, q 平面上畫出，則相當於流量增加的點位於穩定流動的 $z = z(q)$ 曲線（用實線繪製者，見圖 5）的右方，相當於退水的點則位於其左方。

所得的不穩定流動的 $z = z(q)$ 曲線構成圖中虛線所示的環線。

在不穩定流動的最大流量通過該斷面的 t_2 時，該斷面的水面坡仍較穩定流動時者大；所以最大流量通過時的水位高程小於穩定流動時同樣的流量所相應的水位高程。

最大流量過後，雖然流量漸減，但在某時段 t_2 t_x 內，水位仍繼續上漲，這是因爲流量減小的速率小於面坡減小的速率之故；然而水位並不達到和最大流量相應的、穩定流動中的水位高度。上述的時段 t_2 t_x 相應於不穩定流動的 $z = z(q)$ 曲線中的 b c 段。

兩曲線的交點祇可能位於 $c\ d$ 段中，亦卽在較低的水位時。所以，經過流量過程曲線的最大值時，最初觀察到的是最大的水面坡，然後是最大的流量，最後是最高的水位。

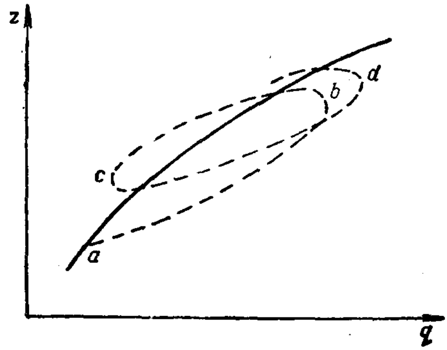


圖 6.

類似地，經過流量過程曲線的最小值時，水位不可能降低到穩定流動時的數值，且最低水位的出現略遲於最小流量。故不穩定流動中 $z=z(q)$ 曲線有如圖 6 中虛線所示的形狀;

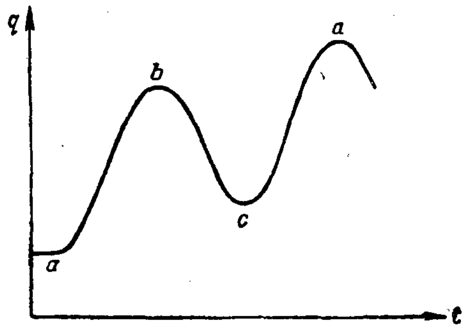


圖 7.

該圖中的實線所示者爲穩定流動時該斷面的流量水位曲線；和虛線相應的複波的流量過程曲線示於圖 7 中。

同一斷面內某一流動參變數的最大值或最小值和該斷面的另一流動參變數的最大值或最小值間，時差（сдвиг во времени）的大小及該斷面的不穩定流動時的 $z = z(q)$ 曲線和穩定流動時的流量水位曲線的差異大小，與波的流量過程曲線有關。

亦可不進行不穩定流動和穩定流動的 $z = z(q)$ 曲線的比較，而比較眞實水位曲線 $z = z(t)$ 和擬製的曲線 $z° = z°(t)$，後者的縱坐標係在穩定流動的假擬下，根據 $z=z(q)$ 的關係所求得的水位值。

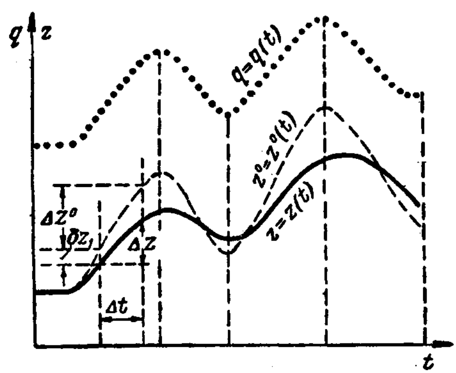


圖 8.

這種比較示於圖 8 中，根據上述，眞正的水位變化過程曲線 $z = z(t)$（實線所示者）比之擬製的 $z° = z°(t)$ 曲線（虛線所示者）有較小的變幅，並且兩者之間有一定的時差。

在時段 Δt 內由於波的流量變化，Δq，所引起的水位變化 Δz，和同時段 Δt 內擬製的曲線上縱坐標值的差 Δz° 不等。可用比值 $m = \Delta z / \Delta z^\circ$ 來估計不穩定流動接近於穩定流動的程度。這個比值的大小和流量變化的強度 $\Delta q / \Delta t$（Δt 時段內流量的變化）及水位差值 $\delta z_1 = z_1^\circ - z_1$（在時段 Δt 的初瞬時，擬製曲線的縱坐標值和水位過程曲線縱坐標值的差）有關。

m 值的最高極限值爲一；例如圖 9 所示的曲線 $q = q(t)$，當時段 $t_2 - t_1$ 充分長時，m 值幾乎等於一。

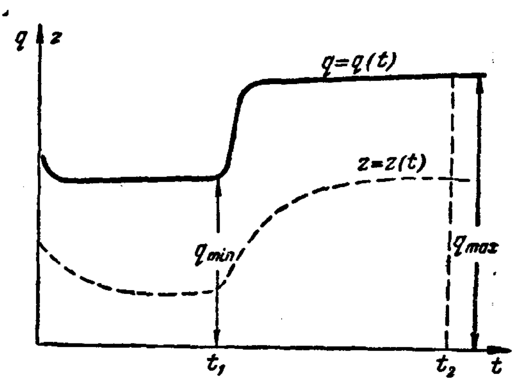


圖 9.

在求某指定斷面中相應於許多波的流量過程曲線的水位過程曲線時（例如在研究有調節的水電站處尾水的流態時），可預先計算相應於不同 $\Delta q / \Delta t$ 及 δz_1 的波的許多流量曲線的 m 值，而利用這個數值近似地計算水位。

同一個波的 $z = z(q)$ 曲線形狀，離起始斷面愈遠時，和起始斷面該曲線的形狀相差愈大。