

苏联 Г.И. 克里夫琴科著

水力發電廠的水錘及 水輪機合理調節程序

張昌齡譯 沈坤卿校

電力工業出版社

內 容 提 要

本書係根據蘇聯科學成就，考慮到水輪機的特性，提供水力發電廠壓力水管的水錘計算方法。提出新的、較準確的以及較簡單的求定水錘壓力數值的公式，並指出外國文獻中所介紹的公式的錯誤。作者簡單地敘述了水錘的原理，並說明所研究的水輪機調節的推求方法，這個程序可使水錘壓力大為降低，也提出了一些如何使其在水力發電廠中實現的辦法等意見。

本書可供水力發電廠設計、安裝和運行領導工作的工程師之用，並可作為水力發電廠專業學生的參考。

Г. И. КИМЕНКО

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ УДАР И РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТУРБИН ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

根據蘇聯國立動力出版社1951年莫斯科版翻譯



書 號 291

水力發電廠的水錘及水輪機合理調節程序

張昌齡譯 沈增魁校

電力工業出版社出版 (北京右安門外26號)

北京市書刊出版營業登記證出字第082號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：孟慶沐 校對：李珍如 趙桂芬

787 × 1092 1/32 開本 * 6 1/4 印張 * 121 千字 * 印1—1,500冊

1955年2月北京第1版第1次印刷

定價 (第9類) 1.26元

原 序

在我國內大規模的水力發電廠建設，黨和政府關於興建古比雪夫、斯大林格勒、卡霍夫卡水力發電廠及土庫曼大運河歷史性的決定，要求我們對水力發電廠建築物及設備的設計和計算方法作深入的研究，以便降低造價及增高在運行時的安全程度和效率。在水力發電廠設計和運行上，具有重要技術及經濟方面意義的問題之一，即水力發電廠壓力水管內水錘的正確計算。

自 1898 年 H. E. 儒柯夫斯基的著作刊行以後，在這個著作內首先給出水管內水錘現象全部理論及實驗的研究，這個問題引起學者及工程師們極大的重視。水錘理論以後的發展，基本上都走這樣的路綫，即找尋 H. E. 儒柯夫斯基所給的通用算解的運用方法，應用於水力發電廠、給水工程及其他的個別具體建造問題上。

在水力發電廠水輪機水管的設計，在機器設備的選定及在運行的過程中，水錘現象的計算是十分重要的。同時在某些情形下，水力發電廠工作的事務消除依靠着水錘壓力數值正確的求定。十分明白，這引起人們特別注意到適用於水力發電廠內所發生的情況的水錘理論之發展。

雖然在這個問題上已有很多的著作，所有這些著作都根源於同樣的原理，即在所有情形下都按照同一的預先規定的水輪機開度變化規律以計算水錘壓力；同時，幾乎所

有的著作，从阿利也夫起，都根源於 H. E. 儒柯夫斯基的通用算解，並採用与閘門或管嘴相同的水輪机流量压力及開度的關係。直到現在，在簡單無分叉水管的实际計算工作中廣泛应用阿利也夫公式，它是由这个假定推演的，即水輪机放出的流量与導水翼的開度數值成直綫關係，此外並与水头數值的平方根比例变化。同時水輪机導水翼開度數值与時間的变化假定为直綫的。

如不考慮德斯伯尔的近似公式，在以後就沒有其他公式作簡單無分叉水管內水錘压力的計算，在實質上可以認為阿利也夫已給出這個問題的詳盡的算解。

1938年莫斯特柯夫(参考文献 6)指出，通过反擊式水輪机的流量与压力变化關係有更準確計算的必要。1947年著者首先進行這項問題的具体數值的研究(参考文献 5)。以後這個問題的確定是与 H. A. 卡特威利許維里的工作有關的(参考文献 3)。

關於導水翼的開度及压力的变化对水輪机流量數值的影响，著者曾進行詳細的研究(参考文献 2)。同時揭露阿利也夫所假定的公式与实际的水輪机流量特性有顯著的差異，指出应用於裝置反擊式水輪机的水力發電廠計算時这个公式是不準確並且是不能允許的。在第三章及第五章說明，如反擊式水輪机在实际上作到直綫關閉，所得水錘压力，將較阿利也夫公式所給的高出 30—70%。因此，这个公式与裝有反擊式水輪机的水力發電廠中所見到的情况不相適應是很顯明的。这个結論就歸結到，正確地考慮反擊式水輪机性能新的計算公式所研究的必要性。用下列方

法之一是能作到的：

(1) 定出水輪机流量与压力及開度數值關係的近似數學公式；

(2) 直接利用水輪机流量与压力及開度數值關係曲綫。

第一种方法便於一般的現象分析及基本計算公式的推演，第二种方法比較準確，但僅適用於水錘压力圖解或數字列表計算。

在第三章討論水管中水錘压力數值，假定在調節時水輪机过水能力与時間依直綫变化，並計算到水輪机流量与压力的实际關係。同時得出計算公式，並顯示一系列補充的因素(尾水管，蝸形管)对水錘压力數值的影响，給出繪製沿水管綫水錘压力曲綫的方法。

在本書第四章及以下各章展開在理論上另一种新的說明水錘問題的方法。因为在同一調節時間，水輪机開度变化程序对最高水錘压力數值有顯著的影响，著者於1947年曾經提出並在理論上詳加闡述(参考文献5)，在這本書內保證水管中最低水錘压力數值的調節程序問題的研究得到更進一步的發展。同時定出兩種調節程序方式：理想的調節程序方式，給出絕對最低的水管末端断面水錘压力，但实际情况上是做不到的；正確的調節程序方式，可使水錘压力數值較直綫水輪机關閉程序为低，並且是現代的水輪机調速器所能做到的。

联系着这幾點，就可指明新的水錘計算方法是可能的，用这种方法不但水管中水錘压力數值可以求得，並可

定出最合理的水輪機調節程序，這是應該以水輪機調速器的校準為基礎的。

新的水錘壓力計算方法的路徑在於：不作那些脫離實際的，抽象的，本質上不是真實的水輪機流量變化情況下所能有的水錘壓力數值的論證，著者所建議的計算方法，不僅給出壓力數值，並且是研究在水力發電廠運行中所能做到的合理的水輪機調節程序的方法。

第五章所敘述的水錘壓力計算圖解方法是很適用的，方便的，並可求得任何複雜水管佈置的水錘壓力曲綫。在這一章中所提出的水輪機過水能力率曲綫計算法，以及連串方程式的一般形式，更加提高了這個方法的優越性，並使其適當的廣泛的應用在實際設計及運行工作上。

在第六章作出有調壓井的壓力水管的水錘壓力計算。這是由於調壓井對水錘壓力數值的影響，舊有的計算方法在某些情形下是不能令人滿意的以及給出不正確的結果（例如有阻力的調壓井及其他）。著者所研究出的新的計算方法可計算到調壓井接管阻力的影響及調壓井內水的慣性影響，這些可使水輪機水管中水錘壓力大為增高，在引水管中也是這樣。後者對於具有增加阻力裝置的調壓井特別重要。

在第七章給出水錘能量的分析，這使我們可以正確地算出壓力水管對於機組調節及臨時性的機組運行變差率的影響。

為了說明新的公式及圖解法的應用方式，以及所得結果的分析，所有各節均附有數字及圖解實例。此外，為了

便於所提出水錘計算方法在實際上的應用起見，在第八章給出水輪機水管內水錘計算基本法則的簡單總結。

新的計算方法，除了上面已提到的優點，並可使水錘壓力數值計算大為簡化。如舊有的方法在計算無分叉水管水錘時須將公式列成表格處理，例見參考文獻 2，而所建議的新方法則可以用一個比較簡單公式表明全部水錘情況。

建議的計算方法可計算到反擊式水輪機實際的特性並可能定出水輪機合理的調節程序，計算上也很簡單，這些優點使得這個方法適宜於廣泛地運用到水力發電廠及機組設備的實際設計工作中。這可使我們完全不再應用阿利也夫公式。

為了便於這個著作的應用，在第一章給出水錘基本原理的簡單說明，同時並指出，根據儒柯夫斯基的通用算解，不難得到所有實際水錘問題的解答，這對於俄國及蘇聯在科學上所創造的水錘理論的優越性，是一個強有力的證明。

著 者

目 錄

原 序	
符 号	7
第一章 水錘的基本原理	11
第二章 水力發電廠水輪机压力水管水錘計算的 週界条件	39
第三章 水輪机过水能力依直綫变化規律的 水錘压力	51
第 1 節 第一週期水錘及末週水錘	51
第 2 節 尾水管對於水錘压力的影响	68
第 3 節 水錘压力計算中水輪机蝸形管的問題	76
第 4 節 沿水管綫水錘压力曲綫的繪製	78
第 5 節 直徑和管壁厚度沿軸綫变化的水管	83
第 6 節 反擊式水輪机依直綫規律關閉的水錘	84
第四章 水輪机正確的調節程序	86
第 7 節 水輪机的理想關閉程序	86
第 8 節 正確的關閉程序	98
第 9 節 部分負荷变化	108
第 10 節 理想的及正確的水輪机開啓程序	117
第 11 節 水輪机啓閉終止後水管內水錘的平衡	121
第 12 節 水輪机開度变化做到近乎正確規律的 可能性及一些試驗資料	124
第五章 水錘計算的圖解法	128
第六章 有調压井的压力水管中的水錘	153
第七章 水錘能量的分析	171
第八章 水力發電廠的水管水錘压力計算方法的 簡單總結	188
参考文献	193

符 号

在進行水力發電廠压力水管中不穩定水流現象的研究以前，必須定出統一的符号系統。在以後所有的文字中絕對數值（速度，流量，水頭等等），除了那些一般多用小寫字母表示的數值（例如：水輪機開度）以外，都用大寫的拉丁字母表示。說明這些同樣參變數數量的無因次比值則以同樣的但是小寫的拉丁字母表示。如絕對值以小寫的拉丁字母表示，其比值以相應的希臘字母表示。

在不穩定水流的條件下有些數值（速度，流量，水頭及其他）係地點及時間兩個參變數的函數。這可用數值上標明的指標顯示，上面的指數表明數值的地點，下面的指數表明從假定開始讀數時刻起算的時間。例如 H_t^B ——從起始計算起經過七秒的時刻在水管斷面 B 量得的水頭公尺數。

在本書中，採用下列字母的數值符号：

Q ——流量公方/秒；

F ——斷面面積，平方公尺；

V ——經過水管的水流平均速度，公尺/秒；

γ ——水的容重，噸/公方；

H ——從尾水位量起的水管中壓力計水位高度，為簡短起見這個數值稱為「水頭」，公尺；

H_0 ——靜水頭，等於明渠式水力發電廠壓力前池與尾水渠的水位差或有調壓井的水力發電廠調壓井與尾水渠的水位差，公尺；

- L ——長度，公尺；
 L^{AB} ——断面 A 到 B 中間的一段長度；
 t ——時間，从假定的開始時刻算起，通常採用改变的時刻为時間讀數的開始，秒；
 α ——反擊式水輪机導水翼開度的數值，公厘（或衝擊式水輪机管嘴開度的面積，平方公分）；
 ΔV ——水管断面中速度的变化，公尺/秒；
 ΔH ——水錘压力， $\Delta H = H - H_0$ ，公尺；
 T ——水輪机開度变化的時間；
 T_s 及 T_o ——从開始到最後位置導水翼關閉及開啓的時間；
 T_p ——水管中水的加速時間，秒；
 M ——水輪机的旋轉力矩 (M_m) 及發電机的力矩 (抗矩) (M_c)，公斤公尺；
 ω ——旋轉角速，1/秒；
 n ——水輪机每分鐘轉數；
 c ——彈力波沿水管綫傳佈速度；
 c_{AB} ——断面 A 及 B 間一段水管的彈力波速度，公尺/秒；
 b ——求定水輪机过水能力的係數；對於正水錘按公式(45)求定，負水錘按公式(46)求定；
 h^0 ——水輪机流量为零時的水头比值 [按公式(43)求定]；
 μ ——水管断面係數： $\mu = \frac{cV_{\max}}{2gH_0}$ 。對於断

面A及B間一段水管，數值 $\mu_{AB} = \frac{c_{AB} V_{max}^{AB}}{2gH_0}$;

ρ ——断面係數，按(82)求定;

σ ——水管係數： $\sigma = \frac{L\Delta V}{gH_0T}$ ，這裏 $\Delta V = [V_n$

$-V_n]$ ——水管中加速的絕對數值，下
標 n ——[開始]，下標 n ——[終了]，

$\Delta V = V_{max}\Delta q$;

τ ——週期持續時間； $\tau = \frac{2L}{c}$ ，秒；

p 及 p_1 ——考慮到水輪機尾水管及蝸形管影响的係
數，按公式(62)及(62')求定；

k_1 及 k_2 ——係數，用以計算具有調壓井的水管中的
水錘，根據公式(86)；

θ ——水錘波經過兩断面間的時間： $\theta = \frac{L}{c}$ ；

W ——在不穩定水流的情況下水管中水的能
量，公斤公尺；

$h = \frac{H}{H_0} = \frac{H_0 + \Delta H}{H_0}$ ——水頭比值；

$\Delta h = \frac{H - H_0}{H_0} = \frac{\Delta H}{H_0}$ ——水錘壓力比值；

$v = \frac{V}{V_{max}}$ ——速度比值，這裏：

V_{max} ——在正常水頭及轉速時相當於水輪機開度
全開的速度；

$\alpha = \frac{a}{a_{max}}$ ——水輪機開度比值，這裏 a_{max} ——水輪
機開度的最大數值；

$q = \frac{Q}{Q_{max}}$ ——水輪機流量比值；

Δq ——水輪機流量变化比值:

$\Delta q = |q_n - q_k|$, 這裏下标 n ——[開始], k ——[終了], [在方程式 (86^{III})及 (86^{IV})]; Δq 在一週期時間內流量的比值变化。

第一章 水錘的基本原理

在每一个水力發電廠中進水和放水都是經由压力水管系統的。各个水力發電廠的压力系統的形式和尺寸，很不相同；例如：僅僅用於開敞式水輪機室的小型機組的尾水管；低水頭河床式水力發電廠的短压力水管、蝸形管和尾水管；中水頭和高水頭水力發電廠的有压力的水輪機水管、蝸形管和尾水管；最後，還要加上在具有压力引水道的水力發電廠中的压力水管及調压井。

水力發電廠的压力水管很顯著地影响着機組的調節过程，同样地，由改变水輪機開度亦即其过水能力以調節機組的出力，也可使压力系統內的情况發生变化。開度变化時压力水管內發生情况的基本特徵，就是从穩定水流轉變到不穩定水流(过渡的)。穩定水流的特性是：决定水流運動的所有數值(速度，压力及其他)在水流的任何一點是不隨時間变化的，它們僅可由這一點變到那一點，由这一断面變到另一断面。因此，在穩定水流中， $V = V(r)$ ， $H = H(r)$ * 及其他等等，這裏 r 为這一點在空間的座标。

在不穩定水流中，决定液体運動的數值在任何一點与任一水流的断面上，都隨時間变化的。因此，在这种情形下：

$$V = V(r, t); H = H(r, t) \text{ 及其他}$$

* 採用 $V = V(r)$ 的形式表示函數關係，並稱 V 是 r 的函數。

从液体运动的力能方面看，不稳定水流的现象与稳定水流不同，惯性力的影响比较特别显著。其实，惯性力与速度的微分值有关。在稳定水流中 $dV = \frac{dV}{dr} dr$ ，在不稳定水流 $dV = \frac{\partial V}{\partial r} dr + \frac{\partial V}{\partial t} dt$ ，同时，第二项愈大，即是说水流随时间变化愈快愈大，惯性力增高的数量也愈大。

为了说明压力水管中不稳定水流各项因素，先看最简单的典型：仅是一个圆形压力水管，长度 L ，直径 D ，末端有一管嘴（衝擊式水轮机），（圖 1）。管嘴放水孔的变化

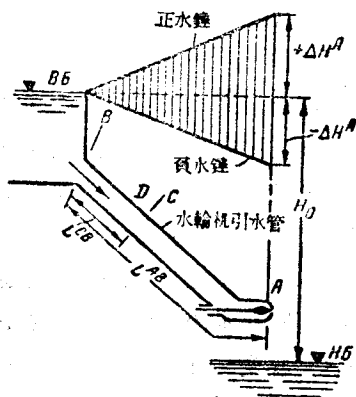


圖 1 衝擊式水輪機的裝置

可使水流改变（水輪机的出力隨着改变）。水头損失可略去不計，假定在穩定水流時水管中任一斷面的压力，从尾水位計算等於 H_0 。設發電机的負荷降低，調速器開始關閉水輪机，水管中的流量減少。在 T' 秒內，因管嘴關閉使流量由 $Q = Q_n$ （開始流量）变到 $Q = Q_k$ （最後的流量）。

为簡單起見，假定流量由 Q_n 到 Q_k 是与時間成直綫变化。同时，在 $t=0$ （去負荷或加負荷的時刻）到 $t=T'$ （管嘴停止動作時刻），流量可由下列公式計算：

$$Q = Q_n - \frac{Q_n - Q_k}{T'} t.$$

現在我們要認為水和水管是絕對剛性的不變形的。根據動量變化原理 $d(mV) = P(dt)$ 可以計算；當水輪機關閉時，水管中斷面 A 的壓力增加若干。

水管中水的質量

$$m = \frac{\gamma}{g} \frac{\pi D^2}{4} L^{AB}.$$

$$\text{速度 } V = Q \div \frac{\pi D^2}{4} = \left(Q_n - \frac{Q_n - Q_k}{T} t \right) \div \frac{\pi D^2}{4}.$$

由於水管中 A 點的壓力由 H_0 增加到 H^A ，設 $D =$ 常數， B 處的壓力常等於 $H^B = H_0$ ，故 P 力就可從下列公式計算：

$P = \gamma (H^A - H_0) \frac{\pi D^2}{4}$ 。嚴格地說，計算 P 應取 A 點和 B 點壓力之差並加上重力的分力，但就液體說，如不計水頭損失，水的重力的分力等於 AB 兩處高度之差，乘以 γ ，也就是說，重力的分力是與水管中心綫的形狀無關。這樣就可讓我們運用比較一般化的數量——水頭來代替壓力。

將求得的各個數量代入動量變化公式，就得到：

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\pi D^2}{4} L^{AB} \frac{Q_n - \frac{Q_n - Q_k}{T} t}{\frac{\pi D^2}{4}} \right] = \gamma (H^A - H_0) \frac{\pi D^2}{4}$$

最後，

$$H^A - H_0 = \Delta H^A = \frac{L^{AB} (Q_n - Q_k)}{gT \frac{\pi D^2}{4}} = \frac{L^{AB} (V_k - V_n)}{gT}. \quad (1)$$

从公式(1)可做出下列關於水錘現象結論:

(1)如水輪機關閉,即減少 $Q(Q_N > Q_K)$,則水管中水头比穩定水流時增高。

在水輪機關閉時水錘壓力 $\Delta H^A > 0$,叫做正水錘。

如水輪機開啓(發電機負荷增加)流量增高($Q_N < Q_K$)水管中壓力降落到較靜壓力為低。水錘壓力 $\Delta H^A < 0$,這叫做負水錘。

(2)水錘壓力的數值與水管長度和流量變化值成正比,與水輪機開度變化所需的時間及水管斷面面積成反比。這說明在一定的水管長度和流量時減低水輪機開度變化的速度,就是說增加 T 或增加水管的直徑 D ,可以減低水錘壓力。

(3)研究水管中間任一斷面(例如 C)的現象,其水錘壓力可以用與(1)相似的公式來表示,但要用 L^{CB} 代替 L^{AB} 。這是說沿水管綫水錘壓力依直綫比例減少,水錘壓力曲綫具有如圖1所示的形狀。

由已得到的簡單公式1就可以了解水錘與水輪機調節的關係。大家都知道,水輪機的自動調速器是管制着機組運行的轉數,其運行的公式具有下列形式:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_c. \quad (2)$$

公式(2)中 J (噸·公尺·秒²)是機組轉動質量的慣性矩, ω (1/秒)是轉軸的[角速]等於 $\omega = \frac{2\pi n}{60}$,這裏 n = 水輪機每分鐘轉數, M_m 和 M_c 是水輪機軸扭矩和發電機軸抗矩。

机組运行的公式(2)指出：当 $M_m = M_c$, $\frac{d\omega}{dt} = 0$, 又 $\omega = \text{常數}$, 就是机組以常速运行。同時調速器保持水輪机開度不变。如負荷改变, 就是說假使扭矩和抗矩的均衡受了破坏: $M_m \neq M_c$; 則 $\frac{d\omega}{dt} \neq 0$ 机組轉速開始增高($M_m > M_c$)或減低($M_m < M_c$)。在这些情形下, 調速器遭受到已發生的轉速改变, 相应地改变水輪机開度, 恢復均衡, $M_m = M_c$ 。一般轉速的变化愈大, 就是說 $\frac{d\omega}{dt}$ 愈大, 調速器改变水輪机開度的速度也愈大。在一定的轉速時水輪机軸的扭矩与開度值及压力有關, 就是 $M_m = M_m(a, H^A)$ 。因此, 如压力水管很短, 水輪机開度变化時作用到水輪机的压力 H^A 幾乎沒有改变, 減小開度 a 就相应地減少 M_m 。但如水管較長, 当開度 a 減小, 压力 H^A 增高, 扭矩的低減就很緩慢, 有時还增高。因此, 水錘延緩了力矩均衡的恢復, 使 $\frac{d\omega}{dt}$ 增高, 水輪机的開度变化速度也受調速器的作用而增高。總之調速器所操縱的水輪机門孔变化情况顯然与压力水管中水錘現象有密切關連。

計算水錘的公式(1)还可設法加以確定, 例如: 可引用流量隨時变化的非直綫規律及其他等。这种公式是有好些的(参考文献 16)。但如 H. E. 儒柯夫斯基所首先指出的, 这些公式是假定水和水管为絕對剛体所得到的, 在理論上是錯誤的, 只有在水管很短和開度变化緩慢(T' 值大)的情况下作水錘压力的近似計算時才可以应用。

設在公式(1)中, 減小 T' , 水錘压力就要相应地增高, 在極限內当 $\lim T' \rightarrow 0$, $\lim \Delta H \rightarrow \infty$ 。由此可作結論: