

苏联 M. A. 莫斯特柯夫等著

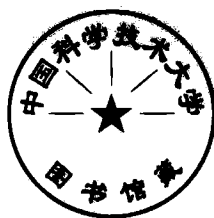
水錘計算

燃料工業出版社

水 錘 計 算

苏联 斯大林獎金獲得者、工學博士 M. A. 莫斯特柯夫 合著
工 學 候 補 博 士 A. A. 巴什基洛夫

王 世 澤 譯



燃 料 工 業 出 版 社

內 容 提 要

本書爲具有水管及有壓引水道的水力發電廠在設計及運行中的參考書籍。本書分爲上下兩篇：上篇爲工學博士 M. A. 莫斯特柯夫教授所著，其中說明了水錘理論的基礎，列舉了計算公式，並引出了決定水錘波傳播速度的參考資料；根據設計的階段與任務，採用了分析法、圖解法及數解法；下篇爲工學候補博士 A. A. 巴什基洛夫所著，其內容爲水錘計算示例，各例都是應用莫斯特柯夫教授以特性所表示的水錘方程式而擬定的數解法所解出。某些基本計算示例也採用了其他方法以比較計算的過程。在計算的示例中有簡單管與複雜管，包括了具有分叉管、調壓室、尾水管，衝擊式及反擊式水輪機等複雜情況。此外，還研究了某些特殊情況。例如水管破裂，抽水蓄能電廠的情況等。示例中列有各種簡圖、說明及表示計算結果的圖表資料。

本書可供工程師及大學生閱讀。

水 錘 計 算

РАСЧЕТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА

根據蘇聯國立動力出版社(ГОСЭНЕРГОИЗДАТ)

1952年莫斯科俄文第一版翻譯

蘇聯 M. A. МОСТКОВ A. A. БАШКИРОВ 著

王 世 澤 譯

燃料工業出版社出版

廠址：北京東長安街燃料工業部
北京市書刊出版營業許可證出字第012號

北京市印刷一廠排印 新華書店發行

編輯：孟慶沐 校對：唐寶珊

書號543 電 233

787×1092 $\frac{1}{2}$ 開本 * 54印張 * 130千字 * 定價(9)一元二角三分
一九五五年九月北京第一版第一次印刷(1—1,100冊)

序 言

水錘是有壓水力系統中某點的需水量發生相當快的改變的結果。這時所產生的慣性力的影響表現為縱向的移動波，這些波造成一個接一個的當地的跳動（錘擊），它對建築物或機構的某些部分的強度發生重大的影響，有時是決定性的影響。

在本書中將研究水力發電廠上的水錘現象。在水力發電廠上，由於水流流量大，流速快，而且情況的改變也比較快，因而水錘的影響也最為顯著。我們將只研究下列的水錘現象：水錘本身（即水力發電廠有壓建築物中流速及壓力的迅速改變）及水力發電廠有壓過水系統中所含水流全部質量的局部波動，這些波動基本上在一個接一個的迅速跳動（錘擊）完成後才顯示出來（§ 13）。

至於水力發電廠上其他的不穩定情況，尤其是上下游部波浪移動的現象以及水輪機運行的暫時不均勻性的問題，我們將不加以研究。因為前者與水錘沒有直接的關係，而後者則屬於與原動機的調速和系統的穩定問題有關的特殊研究範圍之內。這裏敘述了某些與暫時不均勻性的計算有聯繫的一些結果，但也只限於敘述到這樣的程度，以能滿足於進行反擊式水輪機水錘計算的要求（§ 10, 18）。

本書的直接目的，是敘述在水力發電設計機關的要求範圍之內的水錘計算的方法和實例。根據上述實用的目的，我們完全省略了廣泛敘述理論的部分，而只挑選了能最迅速地達到既定目的的方法及實例，即它們對水力發電廠有壓水力系統中任一點在開始改變後的任一時刻的流速和壓力值的問題，給予技術上精確的，明顯的而且完全有根據的答案。

關於我們挑選各種方法的問題上，應該注意：關於所謂簡單管的水錘理論可以認為在 H. E. 儒柯夫斯基(1901 年)年代裏就已確定了。以後所進行的工作，例如在 M. A. 莫斯特柯夫的著作中所敘述的，以及在蘇聯所進行的一系列新的研究：И. А. 恰爾奈，B. A. 布拉特尼柯夫，A. A. 蘇林，H. A. 卡爾特維里什維里，Г. И. 克里夫琴柯等等，都對於當水管中的現象不受機械的影響而水管彈性沿管長不發生變化的情況下，以及在複雜管的某些情況下進行單向不穩定流動的技術計算提供詳盡的資料。綜合研究水管及其相連的水力機械中的現象的嘗試，即使是對於簡單管的情況，也遭遇到非常大的困難，因為需要解 6—8 個聯立微分方程，而且邊界條件也由於反射彈性波造成的間斷因而不是固定的。我國在這方面進行研究的有 H. A. 卡爾特維里什維里，B. B. 索洛多夫尼柯夫等人。計及調速機的影響來進行水錘計算既繁複而且不明顯，同時需要引用大量的計算常數，因之促使產生了以電磁相似為基礎的試驗方法(電積分儀型，E. Л. 西羅青斯基電子型)及在較小比例的模型上研究全部現象的方法(莫斯科莫洛托夫動力學院水力試驗室，格魯吉亞蘇維埃社會主義共和國科學院的水力發電廠模型設計)。計及調速機及引水管路中的現象以進行水力發電廠運行穩定性的計算方法是比較成功的(A. A. 索科洛夫及 И. П. 卡巴柯夫，Г. В. 阿龍諾維奇，Ю. И. 聶馬爾克，M. A. 莫斯特柯夫，H. A. 卡爾特維里什維里等人)。

由於對水錘綜合計算(即綜合考慮引水管路、原動機及系統的問題)在科學研究中還沒有得到成功，所以我們認為將其列入本書是不合理的；我們採用一般由工廠所供給的水輪機開度的某種變化規則來做為計算的依據。按目前計算技術的情況來看，這種處理是唯一正確的。當然，必需依靠積累現場的研

究(在建造好的水力發電廠上)以及工廠及試驗室的試驗來肯定在調速機作用下水輪機開度變化的規律,以不斷地提高計算的精確性。應該注意,按蘇羅姆水力發電廠的經驗,不考慮調速機的影響(即依所給的開度變化規則)所得的計算結果與觀察的情況相當符合,計算相當可靠。

在很多的水錘計算方法之中(考慮上述的條件),我們將研究以下幾種:

為了方案比較及選擇某些有壓建築物的尺寸等簡單計算情況而進行初步計算時,建議採用分析法(H. E. 儒柯夫斯基—П. 阿爾里也維法,它設水輪機開關時水管斷面面積依直線規律變化,而且不考慮摩阻力的影響)。簡單的相互關係使此法在應用時非常方便,而所得到的精確度即使對於特性沿管長變化的水管來說,如閘門操作時間較長,也是常常足夠的。

如開度變化不依直線規律,以及當研究簡單管中的特殊情況,如負荷的規律波動及水頭不足等情況時,建議採用圖解法(B. 昂古斯—H. T. 密列新柯的型式)。

當為了最後確定引水建築物的尺寸及校驗其強度,或為了水管及設備的定貨而進行簡單管及複雜管的技術設計時,建議採用莫斯特柯夫的數解法。這種方法是完全有根據的,而且不論對於簡單管以及對於複雜管都是通用的;它可以考慮摩阻力,可以分析有反擊式水輪機時在分叉管(尤其是環狀管)中的現象等等。在 A. A. 巴什基洛夫的技術指導之下(1945 年),在設計機構中應用此方法的經驗,以及 Ю. C. 捷夫達里阿尼 A. A. 巴什基洛夫 H. X. 列文布克及 E. H. 卡非也娃等人的候補博士學位論文的研究,都擬定了最簡便而明顯的格式,不論是進行校核計算都只需要比較省事而且完全簡便的工作。

著 者

目 錄

序 言

採用的符号	6
上 篇 水錘理論基礎	11
§ 1. 計算的任務	11
§ 2. 現象的敘述, 基本微分方程的推演	12
§ 3. 水錘波傳播速度	18
§ 4. 一般形式的積分及其解釋	37
§ 5. 不計及摩擦的水錘共軛方程式的推演, 直接水錘	46
§ 6. 簡單管中的水錘, 分析法的原理	49
§ 7. 一般數解法的原理, 簡單管	61
§ 8. 摩擦力及局部摩擦阻	78
§ 9. 複雜管——集管段	82
§ 10. 反擊式水輪機的水錘	88
§ 11. 尾水管中的水錘	92
§ 12. 抽水蓄能電廠的抽水設備中的水錘	97
§ 13. 調壓室中水位振幅的決定, 水錘跳越	101
§ 14. 圖解計算法基礎	107
下 篇 水錘計算示例	118
§ 15. 丟棄全出力($\eta_e=1$)至空轉($\eta_K=0.12$)時簡單管中 的水錘	118
§ 16. 突增出力由 $\eta_0=0.4$ 至 $\eta_K=1.0$ 時簡單管中 的水錘	123
§ 17. 丟棄全出力同時考慮摩擦阻力時簡單管中的水錘	127
§ 18. 考慮水輪機的通用特性時簡單管中的水錘; 丟 棄全出力	129

§ 19. 特性變化的單根水管中的水錘，突增出力由 $\eta_0=0.4$ 至全出力($\eta_K=1$)	134
§ 20. 已知極限壓力升高時求空放閥的特性，特性變 化的水管	141
§ 21. 丟棄負荷時分叉（下端封閉）水管中壓力昇高的決定	146
§ 22. 考慮摩阻力時環形水管中的水錘計算；突增出 力由 $\eta_0=0.5$ 至 $\eta_K=1.0$	151
§ 23. 水管——調壓室——有壓隧洞系統中的水錘，突 增負荷	156
§ 24. 考慮尾水管時的水錘	165
§ 25. 水管破裂時的水錘	169
§ 26. 抽水蓄能電廠突然停止供電時壓力水管中的水錘	172
§ 27. 抽水蓄能電廠壓力水管中水柱中斷時的水錘	176
中俄名詞對照表	184
技術名詞	184
專有名詞	187

採用的符 号

符 号	因 次	意 義
a	公尺/秒	水管中水錘波傳播速度 $\sqrt{\frac{K}{\rho}}$; 換言之, 爲 $\frac{a_1}{\sqrt{1 + \frac{E_B}{E} \times \frac{D}{\delta}}}$, 其中 $a_1 = \sqrt{\frac{E_B}{\rho}}$ 爲水錘 波在水中的傳播速度
C	噸 公尺	等温過程中的狀態常數
d	公尺, 公分	木質水管鋼箍的直徑
D	公尺	水輪機轉輪的直徑, 水管的內徑 $D=2r_0$, 慣性直徑
GD^2	公尺 噸 ²	機組旋轉部分的飛輪力矩
e	公分, 公尺	水管鋼箍的間距
E	噸/公尺 ² , 公斤/公分 ²	水管材料的彈性係數; 下標見後
E_0	噸/公尺 ² , 公斤/公分 ²	水的體積彈性係數
f	公分 ² , 公尺 ²	鋼箍斷面, 調壓室中昇筒的斷面, 閘門的閉啓斷面
F	公尺 ²	調壓室該高程處的內部斷面
h	—	$\frac{H-H_0}{H_0}$ ——水头的相對變化
H	公尺	$\frac{p}{\gamma}$ ——計及水錘後水管該點的水头, T_{s0} ——水 輪機計算水头, 0 ——由压力池至尾水渠的總水头, $x-x$ 斷面的, v ——相應於該斷面的真空, c —— 磨阻, $\Delta H = H - H_0$ 水管中水头的變化
i		相或半相符号, $i_f = \frac{v^2}{2g} \frac{\lambda}{D}$ ——摩阻局部斜度
k	噸/公尺 ³ , 公斤/公分 ³	$\frac{E_c}{r_n(1+\mu_c)}$ ——岩石彈性抗力係數, $k_n = -\exp 2\bar{\rho} Q_0 \tau / T$ (無因次的)——決定抽水機轉 數時的乘數, $k_\eta = -\exp \tau / 2\bar{\rho} H_0 F$ (無因次的)—— 決定調壓室中水位變化時的乘數

續上表

K	噸/公尺 ² , 公斤/公分 ²	充滿水之水管的引用彈性係數; $\frac{1}{K} = \frac{1}{E_0} + \frac{D}{\delta E}$
l	公尺	水管段之部分或總長度
m	—	計算水錘時的輔助數值
M	噸公尺, 公斤公尺	軸上的力矩, M_T ——水輪機的, M_H ——抽水機的, M_C ——系統所消費掉的(水力發電廠)或由系統所引來的(抽水蓄能電廠)
r	公尺	水管半徑, r_1 ——內鋼筋圈的半徑, r_2 ——外鋼筋圈的半徑
R	公尺	$\frac{Q_0 H_0}{H_0}$ ——該段摩阻的度量, 氣體常數
t	公尺, 公分, 秒	加箍水管的管壁厚度, 時間
T	秒	歷時: 無下標時為閘門操作的歷時, T_s ——由 $\eta=0$ 至 $\eta=1.0$ 或反向操作的歷時, T_0 ——空放閘開啓, T_3 ——空放閘關閉, $T_a = GD^2 \times n^2 / 355 N_0$ ——機組逸轉時間, T ——絕對溫度
Q	公尺 ³ /秒	水管該斷面上的平均瞬間流量, Q_p ——破裂時的出流量, 水輪機所消費的或抽水機所供給的流量
Q_I	公尺/秒	$\frac{Q}{\sqrt{H} \times D^2}$ ——水輪機的流量率
n	—	彈性係數的比值, 反擊式水輪機出流公式中的方冪數
n	1/分	每分鐘的轉數
n_I	公尺 ^{1/2} /分	$\frac{nD}{\sqrt{H}}$ ——水輪機的轉數率
x_p	—	$\frac{Z}{H_0}$ ——調壓室中水位的相對變化, x ——由水管閘門端起算的橫座標值(公尺)
y	公尺	橫座標值為 x 之點的計示壓力高程
Y	公尺	空氣室中的水位
z	—	尾水管中的壓力相對昇高, 高程(公尺)
Z	公尺	調壓室中由靜水位起算的水位昇高
α	—	與水平所成之傾斜角, 鋼筋體積含量 α_1 ——內鋼

續上表

符号	因次	意 義
		筋, α_2 ——外鋼筋, 導葉的相對開度; 附有 1, 2, 3 等下標的係數
β	—	$\frac{Q'_I}{Q'_{I(0)}} \times \frac{n'_{I(0)}}{n'_I} \times \epsilon$ ——係數
γ	公尺 ³	$Q'_I \sqrt{H_0} D^2$ ——計算數值, 重率(噸/公尺 ³)
δ	公尺, 公分	$r_n - r_0$ ——管壁厚度
ϵ	—	η/η_0 ——相對效率
Δ	公尺	單位長度, 混凝土及鋼筋混凝土水管中的鋼板襯砌厚度, Δ_m ——隧洞鋼筋網噴漿層的厚度
λ	—	$i_f = \frac{\lambda}{D} \times \frac{v^2}{2g}$ 公式中的摩阻係數
ν	—	$\frac{N}{N_0}$ ——相對出力, 0 ——穩定值
η	—	$\frac{f}{f_0}$ ——閘門的相對開度, η_0 ——全開度, η_x ——空放閘開度, 水輪机的效率
π	公尺 ³ /秒	$\frac{h}{2\rho} - C$ ——直接波函數, 或為 $\frac{h}{2\rho} - u$ (無因次)
Ω	公尺 ³ /秒	$\frac{h}{2\rho} + C$ ——反射波函數, 或為 $\frac{h}{2\rho} + u$ (無因次)
ϕ	公尺	$(H - \frac{av}{g}) - \phi_0$ ——直接波
φ	公尺	$(H + \frac{av}{g}) - \varphi_0$ ——反射波
θ	(噸公尺·秒) ²	$\frac{GD^2}{4g}$ ——機組旋轉部分的慣性力矩, $\frac{T_s}{\mu}$ ——閘門操作相對歷時(無因次)
ξ	—	閘門翻門收縮斷面的摩阻係數, $\frac{\xi}{i}$
κ	—	$\frac{\omega}{f}$ ——閘門閉度係數

ω	公尺 ²	水管斷面，等於 πr_0^2
$\sim$ ω	1/秒	$\frac{\pi n}{30}$ ——角頻率
ρ	—	$\frac{av_0}{2gH_0}$ ——水管特性， $\bar{\rho} = \frac{\rho}{Q_0}$ (秒/公尺 ³) 或 $\bar{\rho} = \frac{1}{2gH_0} \times \frac{a}{\omega} = 0.055 \frac{a}{H_0 D^2}$
ρ	噸·秒 ² /公尺 ⁴	水的密度
λ	—	$\frac{M_c}{M_0}$ ——系統消費力矩之比值
τ	秒	$\frac{l}{a}$ ——水錘半相的歷時，計算時段
μ	秒	$\frac{2l}{a} = 2\tau$ ——水錘相的歷時，波桑係數(無因次)
σ	—	$\frac{\rho}{\theta} = \frac{lv_0}{2gH_0 T_s}$ ——係數，管壁中的拉应力(公斤/公分 ²)
φ	—	水管的引用厚度係數， φ_0 ——用於計算兩端固定時， φ_1 ——用於計算管壁厚， φ_2 ——用於計算鋼筋， φ_3 ——用於計算岩石抗力；公式 $v = q \sqrt{2gH}$ 中的速度係數，轉子的角位移
ψ	—	簕管引用厚度係數

下 標

- n ——外面的，抽水機的，起始的
 n ——終了
 θ ——內
 c ——岩石的
 M ——鋼的
 ϕ ——木質的，引水的
 m, T ——噴漿的，水輪機的
 κ, ϕ ——鋼筋混凝土的(決定彈性係數之比值時)

κ, m ——鋼筋網噴漿(同上)

c, b ——岩石-混凝土(同上)

m, b ——噴漿-混凝土(同上)

κ, a ——鋼-木(同上)

np ——引用的

m ——極限水錘的

o ——起始的, 根據的, 水流正流時的穩定的

o, o ——同上但水流為倒流時

i ——半相或相的符号(預先加以說明的)

如表示為 π_{aC_2} , Ω_{bK_4} 等, 則 a, b ——表示水管段, C ——表示點, 而 2——半相的符号, 有時為以秒計的時間。

上篇 水錘理論基礎

§ 1. 計算的任務

設計水力發電廠時進行水錘計算的目的爲：1)決定有壓引水建築及壓力水管中的最大動壓力，以進行這些結構的靜力計算；2)決定反擊式水輪機導葉、衝擊式水輪機針閥孔及空放閥的許可開關規律；3)計算水管破裂時的最小動壓力，以決定可能產生真空的範圍，尤其是計算尾水管中的極限真空；計算當斷開水柱重新接合時所產生的水錘；4)決定水錘對水力發電廠水輪機及水力蓄能電廠抽水機運行暫時不均勻性的影響程度。

水錘計算必需滿足下列動力任務：

1) 當全部機組運行時由於水力發電廠母綫發生短路而丟棄全部負荷，丟棄負荷前以全部設計出力或以設計所許可的過負荷運行。調速機關閉的歷時採用工廠所給的資料，同時考慮反擊式水輪機空放閥的工作情況。

2) 因事故而使系統中負荷重新分配時所引起的水力發電廠最大可能突增負荷(由空轉起)。應該分析負荷分配的情況及考慮可能發生事故的地點，以決定突增負荷值。這時，突增値不應該大於本水力發電廠一個機組的出力(包括爲設計所許可的過負荷在內)。

3) 在正常運行情況下所未考慮到的在繼電器保護作用下運行機器的部分停工，它是由於運行上的毛病，例如位軸承過熱等所引起的。這時，運行機組之一停止工作。

4) 丟棄負荷時(按第1項)水力發電廠上反擊式水輪機之一的空放閥同時發生事故。

5) 水力發電廠上衝擊式水輪機之一的針閥拉斷。

丟棄負荷時，應該依調壓室中最高運行水位（相當於水庫最高水位及最小引水道的摩阻係數）來進行水錘計算；突增負荷時，應該依引水道的摩阻係數最大時的最低運行水位來計算。當水管特別長時，以及當決定管綫曲折點的压力綫高程時（一般是當水管由調壓室通至地面時），必需考慮摩阻以進行水管中的水錘計算。在特別重要的情況下，應該校核管綫曲折點上當負荷發生週期性跳動時的動压力綫的位置。

當已知機組飛輪質量時，按丟棄及突增出力的情況（第 1，2 項）進行調節暫時不均勻性的計算。至於按水錘法來計算調壓室的問題（即考慮水及引水建築物的彈性），則只在引水隧洞特別長的時候才進行。對於引水木管來說，則不論引水管路的長度如何，在進行調壓室計算時都要考慮水及管壁的彈性。

§ 2. 現象的敘述。基本微分方程的推演

研究某一水管（圖 1），它引水至某種水力機械，例如至水輪機，或引水流經位於管端的閘門而洩入大氣中。設在長為 x 的一段管路上斷面積及管壁厚度為常值，即它具有相同的彈性性質。這樣的水管我們將稱之為特性不變的水管，或稱為簡單管以區別於複雜管；複雜管或是管徑及管壁厚度有變化（所謂特性沿管長而變化的水管），或是具有分叉管及環狀管（分枝管路）。相當於橫座標 x 的計示压力高程（由下管端起算）在不穩定流動情況下為變值，以 y 表示之。忽略摩阻力並令 x 軸與管長方向相同，由水動力學方程式可得：

$$X - \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{dv}{dt} = 0;$$

以 $p = \gamma(y - z)$ 代入，並計及 $X = -g \times \sin \alpha$ ，式中 $\sin \alpha = \frac{dz}{dx}$ ，

得：

$$g \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{dv}{dt} = 0.$$

由於 $\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + v \times \frac{\partial v}{\partial x}$ ，故上列方程式可改寫為：

$$g \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \times \frac{\partial v}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

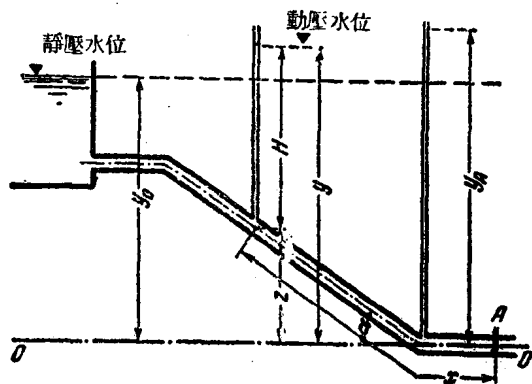


圖1 壓力水管圖。測壓管是只為說明用的；事實上如設有這樣的管子，水錘現象將發生變化

如果不忽略摩阻力，則應該增加坡度 $i_f = \frac{\lambda v^2}{2gD}$ ，式中 λ 為摩阻係數^①。計及 $\frac{\partial p}{\partial x} = \gamma \frac{\partial y}{\partial x} - \gamma \frac{\partial z}{\partial x}$ ，又以 $\frac{\partial z}{\partial x} = -i_0$ 代入，即得第一水錘動力方程式：

$$-\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\lambda v^2}{2D} - g i_0 = 0. \quad (2)$$

若取水管及其中的液体(目前是水)的剛性為無限大，即設

① 平常採用和穩定流動相同的 λ 值。但是這種情況並不明顯，因為水錘試驗表明，當雷諾數較小時波動的衰減較快，與可以按穩定流動同樣考慮摩阻力的設想情況不同。

$\frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$ ，則對長度為 l 而斷面 ω 為常值的管段可得

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{y - y_0}{l}.$$

因此，以全導數代替偏導數後，方程式(1)變為剛性水錘方程式：

$$y - y_0 = \frac{l}{g} \times \frac{dv}{dt}. \quad (3)$$

如已知管端流速隨時間變化的情況，則可以直接應用此公式以求解。如出流速度依壓力而定，即 $v = v(y)$ ，則只有當函數 $v(y)$ 本身也是以分析的方法給出時，才可能以分析法求解；出流孔面積依時間而變的直線規律，及出流速度與出流端水頭之平方根成正比的規律都是這種情況的例子。我們不詳細研究上述的情況，因為對於水力發電廠上所發生的現象來說這種剛性水錘的型式是不能滿足的，水力發電廠上的現象一般發生在很短的時段之內。當不穩定流動的現象歷時較長時，水錘現象轉而成為水力系統中全部水流質量的波動，這時應用加以損頭的校正後的方程式(3)，一般就可以滿足了(除去 § 13 中的情況)。

事實上，正如儒柯夫斯基所首先指出的，水錘現象可以解釋為彈性波的累積，在變化發源地所發生的為直接波，由自由面及壓力水管彈性性質發生變化的地段(所謂間斷點)所反射而成的為反射波。如上所述，水錘現象發生在較小的時段之中，只在極個別的情況下才能認為水錘現象對每一管段都無差別。在大多數實際情況下，現象的起始條件和邊界條件都是由整個水力系統的運行情況來決定，而且也由水力系統的彈性性質所形成，因而有時水錘計算變得很複雜。