

水库的放空时间和充水时间

技术科学博士 B. И. 德沃廖辛教授 著



水利出版社

水庫的放空時間和充水時間

技術科學博士 В. И. 德沃廖辛教授 著

徐一心 譯

水利出版社

1957年4月

本書中所推導的公式，可借以決定：

1. 水庫的充水時間和放空時間；
2. 水庫放水或充水後所達到的水位；
3. 能使泄水建築物較為經濟的水庫儲存能力。

本書的計算圖表能夠極為迅速地解決各種實際問題，所推導的公式均未計算摩擦阻力。

本書可供水利工程技術人員設計水庫充水時間和放空時間參考之用。

水庫的放空時間和充水時間

原 書 名	ВРЕМЯ ОПОРОЖНЕНИЯ И ПОПОЛНЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ
原 著 者	В. И. ДВОРИШИН
原 出 版 處	ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
原出版年份	1953
譯 者	徐一心
出 版 者	水利出版社(北京和平門內北新華街35號) 北京市書刊出版業營業許可証出字第080號
印 刷 者	水利出版社印刷廠(北京西城成方街13號)
發 行 者	新華書店

41千字 787×1092 1/32 1 15/16印張

1957年4月第一版 北京第一次印刷 印數1~3,100

統一書號：15047 49 定價：(10)0.30元

目 錄

前 言	1
§1. 水庫容積曲綫	2
§2. 水力樞紐中溢流堰的檻位于河底时, 水庫的放空与充水	5
1. 一般的計算情况	5
2. 水庫的放空時間	7
甲、具有入流时的放空時間	7
乙、沒有入流时的放空時間	12
3. 水庫的充水時間	19
甲、具有出流时的充水時間	19
乙、沒有出流时的充水時間	27
4. 水庫儲蓄能力的計算	27
§3. 水力樞紐中溢流堰的檻高出河底时, 水庫的放空与充水	32
1. 一般的計算情况	32
2. 放空時間	34
甲、具有入流时的放空時間	34
乙、沒有入流时的放空時間	38
3. 充水時間	43
甲、具有出流时的充水時間	43
乙、沒有出流时的充水時間	44
§4. 具有压力孔口时水庫的放水与充水	45
1. 一般的計算情况	45
2. 放空時間	46
甲、具有入流时的放空時間	46
乙、沒有入流时的放空時間	50
3. 充水時間	54
甲、具有出流时的充水時間	54
乙、沒有出流时的充水時間	55
§5. 結 論	58

前 言

根据約·維·斯大林同志的創議以及苏联部長會議与苏联共产党第十九次党代表大会的决定，以史無前例的規模在我國進行着的水利工程建設，將要建成大量的各种类型的水庫——从伏尔加河、頓河与第聶泊河上的巨型水庫一直到集体農庄的小型塘壩。这就需要在水庫設計和运用时進行較為准确的水利計算。

在一些水利計算中需要計及水庫的放空時間或充水時間。在闡明水庫的儲蓄能力时也要有类似的計算。

水庫的放空時間和充水時間取決于：進入水庫的流量，从泄水、引水以及其他設備流出水庫的流量，泄水的性質，泄水建築物的类型和水庫的特征。溢流堰或其他水庫泄水或引水設備的类型具有重要的意义。但是在各种情况下水庫出流的規律并不一致，要使計算公式具有最为通用的形式是有困难的。

不过仍然可以指出，在实用时最常遇到的是低檻开敞式溢流堰、高檻式溢流堰以及建于建築物樞紐水压面上或它一旁的底孔口或深孔口三种类型。为了簡化起見，針對上述三种情况分別拟定計算公式。

推導公式时假定：閘門瞬時即被开启，溢流堰与孔口不是潛沒的，流速水头很小可以忽略。还假定，閘門开启后整个上游段的水位沿着水平面同时降低。

§ 1. 水庫容積曲綫

水庫的特征對於分析水庫的放空時間或充水時間是十分必需的。我們可以採用水庫的面積曲綫來代表水庫的特征。但是水庫的面積曲綫往往具有双向曲率。例如，在我們所掌握的 102 條水庫面積曲綫中，就有 39 條曲綫具有双向曲率，這就使問題的分析趨於複雜。而水庫的容積曲綫則始終凸向一個方向，即凸向高程坐標軸，因此可以足夠準確地替水庫容積曲綫選定較為簡單的方程式。我們知道離開坐標原點愈遠，水庫容積曲綫的曲率愈小。這種曲綫的特性以指數函數的方程式最為符合。根據這種理由水庫容積曲綫的方程式可給予如下的形式：

$$W_z = k z^n, \quad (1)$$

式中 W_z ——水庫的容積；

k ——系數；

z ——水庫的深度。

當 $z = H$ 而 $W_z = W$ 時，系數 k 可由公式

$$k = \frac{W}{H^n}, \quad (2)$$

決定，式中 H 系相當於正常庫水位時水庫的深度。

將此 k 值代入方程式 (1)，可得

$$W_z = \frac{W}{H^n} z^n. \quad (3)$$

已知曲綫方程式的兩點，就可由下式求得指數值 n ：

$$n = \frac{\lg W_2 - \lg W_1}{\lg z_2 - \lg z_1}. \quad (4)$$

現在我們再來確定，指數函數方程式對於實際的水庫容積曲線究竟符合到什麼程度。為此我們應用方程式（1），並以下式表之：

$$\frac{W_i}{W} = \left(\frac{z}{H} \right)^n. \quad (5)$$

給定不同的比值 $\frac{z}{H}$ 與不同的數值 n ，求出相應的 $\frac{W_i}{W}$ 值。根據求得的數值，繪制 $n = 1, 3/2, 2, 5/2, 3$ 與 4 時方程式（5）的函數圖（圖1）。

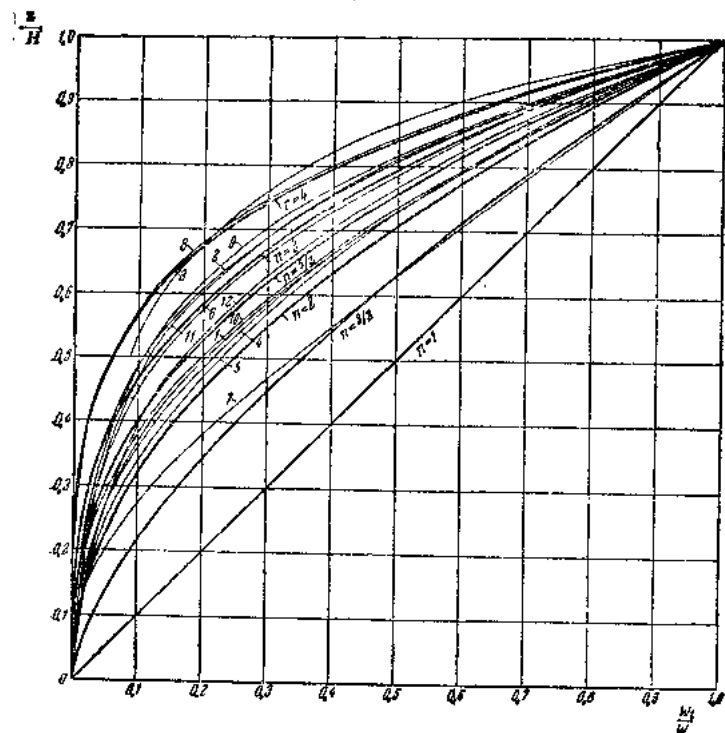


圖1.粗綫表示當 $n=1, 3/2, 2, 5/2, 3, 4$ 時按方程式 $\frac{W_i}{W} = \left(\frac{z}{H} \right)^n$ 繪制的水庫容積曲綫，細綫表示按實際資料繪制的水庫容積曲綫。

就在同一圖中我們再繪上 12 條現有的或已設計好的水庫的容積比值曲綫。在選擇水庫時，盡我們所掌握的資料，在圖上畫出最小與最大的水庫；其中之一，6 號水庫，面積為 50,200 平方公尺，容積 55,260 立方公尺，最大深度為 3.2 公尺，平均深度 1.1 公尺；其二，9 號水庫，面積為 5.03 億平方公尺，容積 77.8 億立方公尺，最大深度 50 公尺，平均深度 15.4 公尺。

其次，我們在圖中力求繪上與一般情況不同的水庫資料，即筑有圍堤的水庫的資料。屬於這一類的有：10 號水庫，水邊綫的周緣的一部分筑有堤防；1 號水庫總長約 8 公里，在最深部分計 6.5 公里筑有堤防；而 7 號水庫，庫容約 4.5 億立方公尺，系一周圍全部筑有堤防的巨大水塘。其餘 7 個水庫都是一般的沒有堤防的水庫，其中 3 號水庫的數據不全。因此圖中資料所包括的範圍是相當廣闊的。

但是儘管如此，理論曲綫與實際曲綫的差別仍然不大。特別是當比值 $\frac{z}{H}$ 較大時，即在曲綫的上部，差別更小；而水庫的上部又恰好集中了最大的庫容。因此，鑒於上述的情況，以後計算時即採用以方程式 (3) 表示的容積曲綫。現在需要討論指數值 n 。根據 85 個水庫的概略估算，表明平原河流的指數值 n 的變化在 1.4~5 之間。因 $n > 4$ 極少遇見，而 $n = 1$ 則相當於水庫面積等於常數的情況，所以在此後的一切推論中採用 n 值變化在 1~4 間。

現在可以進而推導下面三種情況，不計摩擦阻力與損失的相應公式：

1. 建築物樞紐中檻位於河底的溢流堰；
2. 高檻溢流堰；
3. 壩體中的孔口。

§ 2. 水力樞紐中溢流堰的檻位于河底时， 水庫的放空与充水

1. 一般的計算情况

假定進入水庫的流量为 $Q_{\text{入}}$ ，流出的为 $Q_{\text{出}}$ 。

我們采用流經溢流堰的流量公式來表示这两个流量，并假定溢流堰是非潛沒式的。同时还認定堰檻的高程正好与水庫容積曲綫的坐标原点相重合（圖 2）。

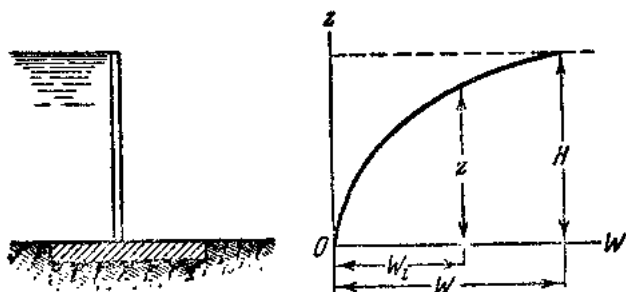


圖 2.

如果設想水庫是空的，且只有流量 $Q_{\text{入}}$ 流經溢流堰，則溢流堰檻上所保持的水头 z_0 值可由下式求得：

$$Q_{\text{入}} = mb_c \sqrt{2g} z_0^{\frac{3}{2}}. \quad (6)$$

用这种方式表示入庫流量系 H. H. 巴甫洛夫斯基建議的。至于 $Q_{\text{出}}$ 也可类似地寫为：

$$Q_{\text{出}} = mb_c \sqrt{2g} z^{\frac{3}{2}}. \quad (7)$$

式中 z 值隨着水庫的逐漸放空而自 H 減小至零。

流量系數 m 與收縮寬度 b_c 通常是已知的。

$$\text{令} \quad mb_c \sqrt{2g} = a, \quad (8)$$

并假定在一定的時段間隔內 a 值等於常數。

顯然，當閘門開啓了 dt 時間，且經溢流堰泄出的流量為 $Q_{\text{出}}$ 時，水庫容積變化值應為：

$$dW_i = Q_{\text{出}} dt - Q_{\text{入}} dt = a(z^{\frac{3}{2}} - z_0^{\frac{3}{2}}) dt. \quad (9)$$

當 $Q_{\text{出}} > Q_{\text{入}}$ ，水庫逐漸放空；而 $Q_{\text{出}} < Q_{\text{入}}$ 時，水庫逐漸充水。

將 (3) 式微分後代入 (9) 式可得：

$$dt = n \frac{W}{aH^n} \frac{z^{n-1} dz}{z^{\frac{3}{2}} - z_0^{\frac{3}{2}}}. \quad (10)$$

入庫流量 $Q_{\text{入}}$ 在一定的時段間隔之內可以作為常數，且在上式積分時可將 $z_0^{\frac{3}{2}}$ 值括在積分號的外面。

$$\text{引用符號} \quad \xi = \frac{z}{z_0} \quad (11)$$

將方程式 (10) 右邊的分子分母均乘以 $z_0^{n-\frac{3}{2}}$ ，并以 $d\xi$ 代替 dz ，即可求得：

$$t = n \frac{W z_0^{n-\frac{3}{2}}}{aH^n} \int_{\xi_2}^{\xi_1} \frac{\xi^{n-1} d\xi}{\xi^{\frac{3}{2}} - 1}. \quad (12)$$

當 W ， a ， z_0 ， H 與 n 均為已知時，可從方程式 (12) 求出水庫的放空時間。此時 $z > z_0$ ， $\xi > 1$ ， $\xi_1 = \frac{z_1}{z_0}$ ， $\xi_2 = \frac{z_2}{z_0}$ 與 $\xi_1 > \xi_2$ （見圖 6， a ）。

同理，求水庫的充水時間時， $z < z_0$ ， $\xi < 1$ 與 $\xi_1 < \xi_2$ （見圖 8， a ），可得

$$t = n \frac{W z_0^{n-\frac{3}{2}}}{aH^n} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{\xi^{n-1} d\xi}{1 - \xi^{\frac{3}{2}}}. \quad (13)$$

2. 水庫的放空時間

甲、具有入流時的放空時間

假定 $n = 1, 3/2, 2, 5/2, 3$ 与 4 , 解方程式 (12)。茲不列举公式推導的过程, 僅將最后結果列入表 1。

表 1

n	公 式	函 数 值
1	$t = \frac{W}{aH z_0^{1/2}} [A_1(\xi_1) - A_1(\xi_2)], \quad (14)$	$A_1(\xi) = \frac{2}{3} \ln(\xi^{1/2} - 1) - \frac{1}{3} \ln(\xi + \xi^{1/2} + 1) + \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2\xi^{1/2} + 1}{\sqrt{3}} \quad (20)$
3/2	$t = \frac{W}{aH} [B_1(\xi_1) - B_1(\xi_2)], \quad (15)$	$B_1(\xi) = \ln(\xi^{3/2} - 1), \quad (21)$
2	$t = \frac{W z_0^{1/2}}{aH^2} [C_1(\xi_1) - C_1(\xi_2)], \quad (16)$	$C_1(\xi) = 2 \left[2\xi^{1/2} + \frac{2}{3} \ln(\xi^{1/2} - 1) - \frac{1}{3} \ln(\xi + \xi^{1/2} + 1) - \frac{2}{\sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2\xi^{1/2} + 1}{\sqrt{3}} \right], \quad (22)$
5/2	$t = \frac{W z_0}{aH^{5/2}} [D_1(\xi_1) - D_1(\xi_2)], \quad (17)$	$D_1(\xi) = 2.5(\xi + A_1(\xi)), \quad (23)$
3	$t = \frac{W z_0^{3/2}}{aH^3} [E_1(\xi_1) - E_1(\xi_2)], \quad (18)$	$E_1(\xi) = 2[\xi^{3/2} + B_1(\xi)], \quad (24)$
4	$t = \frac{W z_0^{5/2}}{aH^4} [F_1(\xi_1) - F_1(\xi_2)], \quad (19)$	$F_1(\xi) = 4 \left[\frac{2}{5} \xi^{5/2} + \xi + A_1(\xi) \right], \quad (25)$

公式(14)~(19)根据已給的边界条件可用以决定水庫的放空時間,或者根据其他的假定条件也可求得水庫宣泄所达的水位。为了便于計算,特將函数 $A_1(\xi)$, $B_1(\xi)$, $C_1(\xi)$, $D_1(\xi)$, $E_1(\xi)$ 与 $F_1(\xi)$ 按不同的 $\xi = \frac{z}{z_0}$ 算出結果,列于表2*并繪成曲綫圖(圖3~圖6)。在推求各类数值时,必要处計算准确到小数点后15~18位。

根据上述公式計算水庫放空時間的步驟如下:

首先應該求得該水庫容積曲綫的指数 n 值。为此將庫容曲綫划分成 $z=H$; $z=0.9H$; $z=0.8H$ 等等若干段,求出各个 z 值相应的庫容。再將这些庫容除以总庫容,求出相应于 $\frac{z}{H}=1$, $\frac{z}{H}=0.9$ 等等的 $\frac{1}{W}$ 值。利用这些数据繪制該水庫的容積曲綫。假如該曲綫介于指数 n 值分別等于5/2与2的兩根曲綫之間,則可以利用上述公式以及表2或圖3~

表2

ξ	$A_1(\xi)$	$B_1(\xi)$	$C_1(\xi)$	$D_1(\xi)$	$E_1(\xi)$	$F_1(\xi)$
36	1.480	5.371	20.317	93.700	442.741	12591.521
25	1.413	4.820	16.292	65.037	259.641	5105.451
16	1.312	4.143	12.247	43.279	136.235	1707.647
9	1.111	3.258	8.147	25.352	60.516	429.363
4	0.720	1.946	3.846	11.950	19.892	70.319
3	0.600	1.434	2.576	8.991	13.261	39.329
2	0.241	0.603	0.846	5.605	6.864	18.013
1.6	-0.049	0.024	-0.187	3.877	4.095	11.384
1.4	-0.292	0.121	-0.960	2.773	2.372	8.145
1.2	-0.724	-1.157	-2.074	1.139	0.316	4.427
1.1	-1.171	-1.873	-3.046	-0.177	-1.433	1.748
1.03	-1.316	-2.101	-3.363	-0.500	-1.957	0.995
1.06	-1.505	-2.393	-3.707	-1.132	-2.604	0.072
1.04	-1.772	-2.804	-4.323	-1.819	-3.486	-1.162
1.02	-2.230	-3.502	-5.271	-3.070	-4.913	-3.161
1.01	-2.691	-4.197	-6.205	-4.261	-6.346	-5.082

* O. K. 伏龍斯卡婭帮助作者編制表2、9、14和表21与25的一部分,特此致謝。

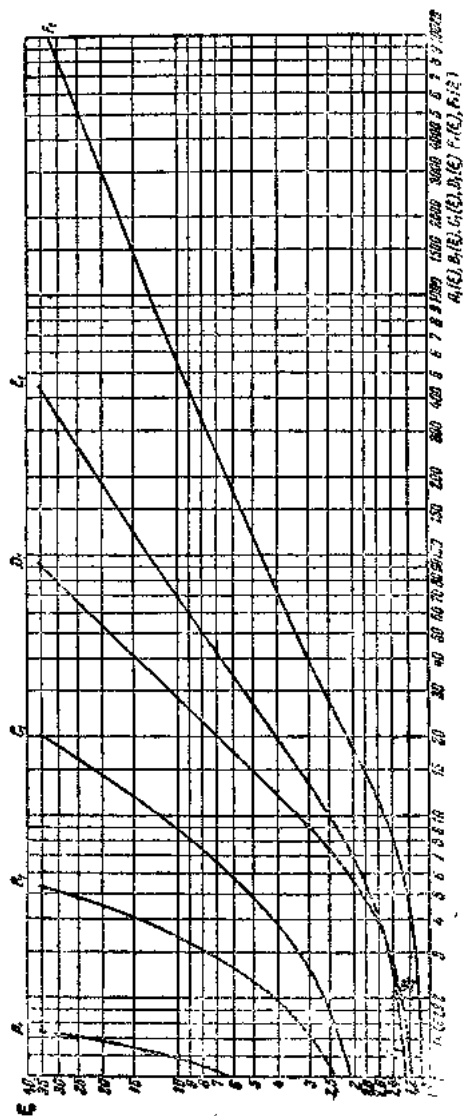


圖3. 水庫具有入流時計算放空時間的函數 $A_1(\xi)$, $B_1(\xi)$, $C_1(\xi)$, $D_1(\xi)$, $E_1(\xi)$, $F_1(\xi)$ 圖

6, 分別計算 $n=5/2$ 与 $n=2$ 的时间。而所求的水庫放空時間用內插法即可求出。如所求水庫的容積曲綫与理論曲綫相交, 則庫容曲綫的指数按段分別采用平均值。

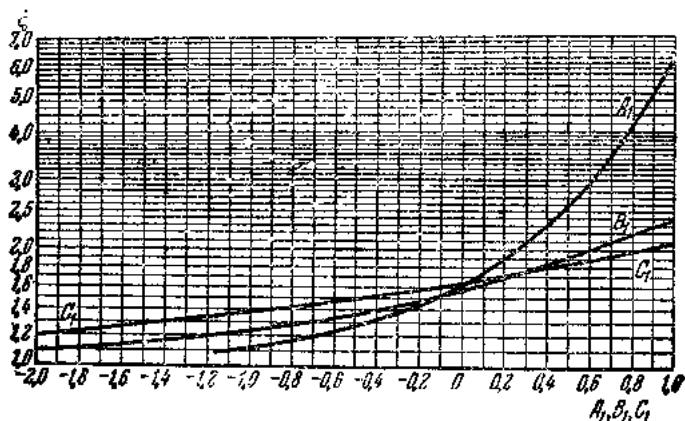


圖4. 函数 $A_1(\xi)$, $B_1(\xi)$, $C_1(\xi)$ 圖

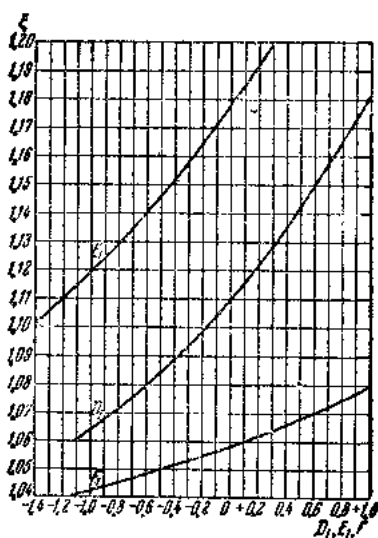


圖5. 函数 $D_1(\xi)$, $E_1(\xi)$, $F_1(\xi)$ 圖

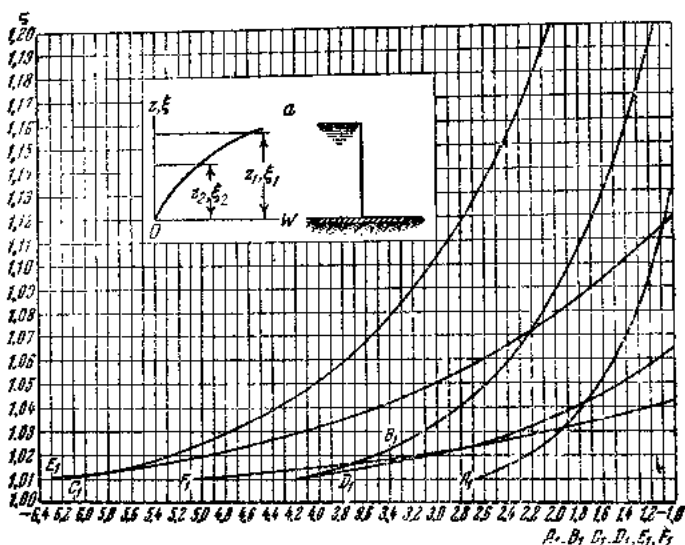


圖6. 函数 $A_1(\xi)$, $B_1(\xi)$, $C_1(\xi)$, $D_1(\xi)$, $E_1(\xi)$, $F_1(\xi)$ 圖

例 1. 已知 $W=5 \times 10^6$ 立方公尺, $m=0.32$, $b_c=15$ 公尺, $H=4$ 公尺, $Q_{\lambda}=2.66$ 秒公方。

根据上述数据, $a=21.25$, $z_0 = \frac{Q_{\lambda}}{a} = 0.125$, $z_0 = 0.25$ 公尺。

令水庫自 $z_1=H=4$ 公尺, 即自 $\xi_1 = \frac{z_1}{z_0} = \frac{H}{0.25} = 16$,

$Q_{\text{出}} = Q_{\text{最大值}} = 170$ 秒公方开始, 宣泄到 $\xi_2 = 1.04$, 即水位 $z_2 = 1.04 \times 0.25 = 0.26$ 公尺。

我們利用前述公式以不同的 n 值計算水庫的放空時間, 并計算結果列于表 3。

表3

n	公 式 (14)~(19) 括 弧 前 的 乘 項	A ₁ , B ₁ 等 函 数 值			放空時間	
		当 $\xi_1 = 16$	$\xi_2 = 1.04$	兩者之差	秒	小 时
1	$\frac{5 \cdot 10^6}{21.25 \cdot 4 \cdot 0.25^{\frac{1}{2}}} = 117.6 \cdot 10^3$	1.31	-1.77	3.08	362,500	100.6
3/2	$\frac{5 \cdot 10^6}{21.25 \cdot 4^{\frac{3}{2}}} = 29.45 \cdot 10^3$	4.143	-2.804	6.997	204,500	56.8
2	$\frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0.25^{\frac{1}{2}}}{21.25 \cdot 4^2} = 7.36 \cdot 10^3$	12.246	-4.328	16.574	121,800	33.9
5/2	$\frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0.25}{21.25 \cdot 4^{\frac{5}{2}}} = 1.838 \cdot 10^3$	43.28	-1.83	45.11	83,000	23.1
3	$\frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0.25^{\frac{3}{2}}}{21.25 \cdot 4^3} = 460$	136.29	-3.49	139.78	64,300	17.9
4	$\frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0.25^{\frac{5}{2}}}{21.25 \cdot 4^4} = 28.75$	1707.65	-1.16	1708.8	49,100	13.6

对公式(14)~(19)的分析表明, 取决于容積曲綫 方程式的指数的水庫放空時間具有相当大的变化范围。可以指出, 指数 n 值愈大, 即容積曲綫弯曲愈甚, 則水庫放空需要的時間愈短。因为庫容曲綫的起始部分愈陡, 庫容的大部分就愈集中于水庫的上部, 水庫重心的位置也就愈高。由此可見庫容曲綫較弯曲时, 溢流堰上的水头在开始的一定時間內变化較少, 也就是經過溢流堰的最大流量在相当長的時間內变化較少。当水庫容積曲綫不很弯曲时就沒有这种現象。

乙、沒有入流时的放空時間

当水庫中沒有入流, 或入流与出流相比很小时, 則入庫流量 $Q_{入}$ 可以忽略不計。在这种情况下, 当 $z_0 = 0$ 时, 自方程式(10)可得

$$t = n \frac{W}{aH^n} \int_{z_2}^{z_1} z^{n-\frac{3}{2}} dz. \quad (26)$$

將 $n = 1, 3/2$ 等等代入上式，并当 $z_1 > z_2$ 予以積分，可得

$$n = 1 \quad t = 2 \frac{W}{aH} \left(\frac{1}{\sqrt{z_2}} - \frac{1}{\sqrt{z_1}} \right); \quad (27)$$

$$n = 3/2 \quad t = 1.5 \frac{W}{aH^{\frac{3}{2}}} \ln \frac{z_1}{z_2}; \quad (28)$$

$$n = 2 \quad t = 4 \frac{W}{aH^2} (\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}); \quad (29)$$

$$n = 5/2 \quad t = 2.5 \frac{W}{aH^{\frac{5}{2}}} (z_1 - z_2); \quad (30)$$

$$n = 3 \quad t = 2 \frac{W}{aH^3} \left(z_1^{\frac{3}{2}} - z_2^{\frac{3}{2}} \right); \quad (31)$$

$$n = 4 \quad t = 1.6 \frac{W}{aH^4} \left(z_1^{\frac{5}{2}} - z_2^{\frac{5}{2}} \right). \quad (32)$$

如起始水头 $z_1 = H$ ，則公式 (27)~(32) 可如表 4 所列的形式，其中

$$Q_{\text{出}} = aH^{\frac{3}{2}} \quad (33)$$

$$\text{与} \quad \xi = \frac{z_2}{H}. \quad (34)$$

函数 $A_1(\xi)$, $B_1(\xi)$ 等等已經計算并列入表 5 与圖 7。

公式 (35) 曾在实验室的条件下經過檢驗[●]。試驗用一個長 17.74 公尺，寬 1.7 公尺的混凝土水槽進行的。水經過

● 3. 別茨羅柯達輔助作者進行所有这些試驗。