

實用
水力工程學

黃 柏 松 編著

科技圖書股份有限公司

實用
水力工程學

黃 柏 松 編著

科技圖書股份有限公司

本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：實用水力工程學

編著者：黃柏松

發行人：趙國華

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市復興南路一段360號

電話：7073230・7566781

郵政劃撥帳號 156697

六十八年八月初版
七十三年一月三版

特價新台幣130元

序

我國學制，久襲美國，教學用書亦皆以英制單位爲主體，且多偏重理論，而吾國係屬勵行公制國家，致初步出校門學子，常感無所適從，不知所措，坊間類此參考書籍，尙未多見。

筆者赴日研修水力發電，返國之後，仍蒐集個人讀書心得及工作經驗，編集撰成「實用水力工程學」一書，供有關工程人員參考之用。

本書承內人江悅鼓勵及課內同仁朱壽君製圖，得以順利完成，並此對引用國外參考資料之原著者，謹致謝忱。

本書倉促出版，疏漏之處必多，尙祈學者先進，賜予指正。

黃 柏 松 謹識

目 錄

第一章 總 論

1-1 水力單位·····	1
1-2 理論水力·····	2
1-3 發電力·····	2
1-4 發電量·····	3
1-5 貯水庫之能量·····	3
1-6 發電方式·····	6
1-6-1 水路式發電廠·····	6
1-6-2 壩式發電廠·····	6
1-6-3 壩水路式發電廠·····	8

第二章 發電計劃

2-1 水力調查·····	10
2-1-1 水力發電工程規劃步驟·····	10
2-1-2 流量曲線方程式之求法·····	10
2-1-3 流量延時曲線·····	13
2-2 發電計劃·····	13
2-2-1 使用水量與發電廠發電量·····	13
2-2-2 負荷率，利用率，損失率·····	15
2-2-3 年可能發電量求法·····	18
2-2-4 月可能發電量估算法·····	19
2-3 水庫式發電廠·····	24
2-3-1 水庫，調整池及逆調整池·····	24
2-3-2 累積曲線·····	25
2-3-3 由水庫所增加發電量之計算·····	26
2-4 調整池容量·····	31

2 實用水力工程學

2-4-1 調整池式發電廠可能發電量之求法	21
2-5 水力發電工程數量概算	34
2-5-1 引水堰	34
2-5-2 混凝土重力壩	35
2-5-3 取水口	35
2-5-4 沉砂池	36
2-5-5 導水路	36
2-5-6 水槽(水路式之頭水水槽)及溢水水路	37
2-5-7 平壓塔	38
2-5-8 壓力鋼管及鋼管基礎	38
2-5-9 發電廠廠房	39
2-5-10 機電設備	40
2-5-11 尾水水路	40

第三章 有效落差

3-1 總落差、靜落差、有效落差	45
3-1-1 總落差	45
3-1-2 靜落差	45
3-1-3 有效落差	45
3-2 損失水頭與損失落差計算	47
3-2-1 損失水頭之基本計算式	49
3-2-2 取水口之水面下降量	62
3-2-3 明渠水面下降量	75
3-2-4 沉砂池之水面下降量	81
3-2-5 頭水水槽之水面下降量	82
3-2-6 壓力隧道損失水頭	83
3-2-7 壓力鋼管路之損失水頭	85
3-2-8 尾水水路損失水頭及水面下降量	95
3-2-9 有效落差及發電廠出力之計算	105

第四章 水路設計

4-1 水路之種類	118
-----------	-----

4-2 導水路之型式與選定	118
4-3 導水路之斷面形狀及坡度	119
4-3-1 無壓水路之斷面形狀及坡度	119
4-3-2 壓力水路之斷面形狀及坡度	121
4-4 通水量計算	121
4-4-1 通水量計算之基本公式	121
4-4-2 水路之粗糙係數	122
4-4-3 馬蹄形斷面之基本計算式	123
4-4-4 各種水路斷面計算法	126
4-4-5 通水量計算圖表	164
4-4-6 等流渠道水深直接計算法	173

第五章 水路結構物之設計

5-1 引水壩	186
5-1-1 壩之種類	186
5-1-2 混凝土重力壩	186
5-1-3 斷面設計	191
5-1-4 壩頂寬度及斷面修正	195
5-1-5 計劃洪水量之決定	196
5-1-6 Ogee 式溢流斷面及溢流量	198
5-1-7 潛堰之溢流量	204
5-1-8 閘門排水量	206
5-1-9 溢流壩安定分析之作用力	209
5-2 沉砂池	217
5-3 頭水水槽或前池	220
5-4 溢洪道	223
5-4-1 牽牛花式溢洪道	223
5-4-2 溢流水路	232
5-4-3 靜水池	234
5-5 溪流取水結構物	238
5-5-1 溪流取水用取水口	238
5-5-2 匯流結構物混入空氣防除方法	238

4 實用水力工程學

5-6 尾水路	243
5-6-1 尾水水池	243
5-6-2 尾水路	244
5-6-3 尾水路出口	244

第六章 平壓塔之設計

6-1 平壓塔之功用	245
6-2 平壓塔之種類	245
6-3 各型平壓塔之特性	246
6-4 平壓塔之設計條件	248
6-5 單動式平壓塔	251
6-6 差動式平壓塔	256
6-7 制孔式平壓塔	261
6-8 水室式平壓塔	266
6-9 考慮湧浪衰減率及安定影响等因素之平壓塔斷面計算	304
6-10 複式平壓塔水路	311
6-11 尾水路之平壓塔	320

第七章 壓力鋼管之設計

7-1 壓力鋼管之設計	336
7-1-1 設計荷重	336
7-1-2 壓力鋼管之厚度	345
7-1-3 壓力鋼管之附屬設備	348
7-2 錨碇之設計	349
7-2-1 作用於錨碇之外力	349
7-2-2 錨碇之安定分析	353
7-2-3 埋設式壓力鋼管之優劣	357
7-2-4 暴露式壓力鋼管之優劣	358

第八章 水輪機及吸出管

8-1 水輪機型式	359
8-2 水輪機運轉之基本原理	359

8-3 水輪機一般構造·····	363
8-3-1 Francis 式水輪機·····	363
8-3-2 旋葉式水輪機·····	368
8-3-3 Deriaz 式水輪機·····	371
8-3-4 Pelton 式水輪機·····	371
8-4 水輪機比速·····	375
8-5 變水頭下水輪機之運轉·····	384
8-6 吸出管·····	388

第九章 水工結構物之維護

9-1 概說·····	394
9-2 水路結構物之維護運用要點·····	394
9-2-1 水路維護之目的·····	394
9-2-2 水路結構物之運用及巡視·····	394
9-2-3 檢查結果之紀錄與處理·····	395
9-2-4 水文資料及流域狀況之調查紀錄·····	395
9-2-5 降雨量，水位與流量觀測·····	395
9-2-6 水路之通水與斷水·····	395
9-2-7 設備之有關資料·····	395
9-2-8 壩之運用·····	396
9-2-9 壩及取水口之調查報告·····	396
9-2-10 壩取水口之檢查補修·····	396
9-2-11 平時進水口之取水方法·····	396
9-2-12 洪水期進水口之取水方法·····	397
9-2-13 枯水期之取水方法·····	397
9-2-14 導水路之運用巡視·····	396
9-2-15 導水路之維護檢查補修·····	398
9-2-16 貯水庫與調整池之運用巡視·····	398
9-2-17 貯水庫及調整池之檢查補修·····	398
9-2-18 沉砂池之運用巡視·····	398
9-2-19 沉砂池之補修·····	399
9-2-20 水槽及溢水道之運用巡視·····	399

6 實用水力工程學

9-2-21 水槽及水路之全盤檢查補修與壓力鋼管之運用巡視·····	400
9-2-22 壓力鋼管之檢查補修·····	400
9-2-23 閘門及吊門機之運用巡視·····	400
9-2-24 閘門及吊門機之檢查方法·····	401
9-2-25 一般檢查標準·····	401
9-2-26 定期檢查報告標準·····	402

第十章 水理計算常用幂次表

第一章 總 論

1.1 水力單位

着手作河川能量估算之前，先說明水力發電上常用之能量單位，俾便對電力單位有所認識。

在水力發電，功率與能量（發電廠之出力）常以瓩-時（kilowatt-hours）〔kwh〕表示。

電力單位（如發電廠之容量）常以瓩（kilowatts）〔kw〕表示之，至於水力機械之製造廠則常以馬力（horsepower）表示水力機械之動力。

馬力單位有二，一為公制馬力，另一為英制馬力。

(1)公制馬力：一秒間重量 75〔kg〕之物體移動 1〔m〕所作之功，以 Hp 或 HP 表示之。

(2)英制馬力：一秒間重量 550〔lb〕之物體移動 1〔ft〕所作之功，以 ps 表示之。

$$1 \text{ [HP]} = 0.9863 \text{ [ps]}$$

$$1 \text{ [ps]} = 1.014 \text{ [HP]}$$

電力之大量單位為千瓩（megawatt）〔mw〕， $1 \text{ [mw]} = 1000 \text{ [kw]}$ ，亦即功率與能量之大量單位常以千瓩-時（megawatt-hours）〔mwh〕表示。

$$1 \text{ [mwh]} = 1000 \text{ [kwh]}$$

瓩時與公制單位換算如下：

$$1 \text{ [HP]} = 75 \text{ [kg} \cdot \text{m/sec]} = 736 \text{ [watts]} = 0.736 \text{ [kw]}$$

$$1 \text{ [kw]} = 1.36 \text{ [HP]}$$

$$1 \text{ [kw]} = \frac{75}{0.736} \text{ [kg} \cdot \text{m/sec]} = 102 \text{ [kg} \cdot \text{m/sec]}$$

由上列各式

2 實用水力工程學

$$1 \text{ [HP} \cdot \text{hr]} = 0.736 \text{ [kwh]}$$

$$\therefore \text{故 } 1 \text{ [HP} \cdot \text{hr]} = 75 \text{ [kg} \cdot \text{m/sec]} \times 3600 \text{ [sec]} = 270000 \text{ [kg} \cdot \text{m]}$$

$$1 \text{ [kwh]} = \frac{270000}{0.736} \text{ [kg} \cdot \text{m]} = 367000 \text{ [kg} \cdot \text{m]} = 367 \text{ [t} \cdot \text{m]}$$

1.2 理論水力

水路中，任一點落差 H [m]，流量 Q [cms]，其理論水力 P_t ，

$$P_t = \gamma QH = 1000 QH \text{ [kg} \cdot \text{m/sec]} \quad (1.1)$$

式中， γ 為水在溫度 4°C ，一標準氣壓下，單位體積之重量，等於 $1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

$$\text{以馬力為單位， } P_t = \frac{1000 QH}{75} = 13.33 QH \text{ [HP]} \quad (1.2)$$

$$= 13.16 QH \text{ [ps]} \quad (1.3)$$

$$\text{以瓩為單位， } P_t = 13.33 \times 0.736 QH = 9.8 QH \text{ [kw]} \quad (1.4)$$

1.3 發電力

水流以其所蘊藏之能量（理論水力）推動水輪發電機，而產生電力，其過程為水之能量變為機械能再變成電能。由於能量之變化，致發生能量之損失，實際所能產生之電力較理論水力為小。

水輪機 (turbine) 之出力為理論水力與水輪機效率之乘積，發電機之出力為水輪機之出力與發電機效率之乘積，亦即發電力。

設水輪機之效率為 η_t ，發電機之效率 η_g ，總效率 $\eta = \eta_t \eta_g$ ，則

$$\text{水輪機之出力 } P = 9.8 \eta_t QH_e \text{ [kw]} \quad (1.5)$$

$$\text{發電機之出力 (發電力) } P = 9.8 \eta_t \eta_g QH_e = 9.8 \eta QH_e \text{ [kw]} \quad (1.6)$$

上式中， Q ：使用水量 [cms]

H_e ：有效落差 [m]，係等於總落差減去損失落差

水輪機及發電機之效率 η_t 及 η_g 與機電設計有關，其正確數值須俟實際運轉發電，經作效率試驗之後始能定出，於水力發電計劃，作發電力概算時，可採用表 (1.1) 之標準數值計算之。

表(1.1) 水輪機及發電機之標準效率〔%〕

每一水輪發電機之發電力〔kW〕	水輪機效率	發電機效率	綜合效率
100 以下	79	91	72
100 ~ 300	81	93	75
300 ~ 1,000	83	94	78
1,000 ~ 2,500	84	95	80
2,500 ~ 5,000	85	96	82
5,000 ~ 10,000	86	96	83
10,000 ~ 20,000	87	97	84
20,000 以上	88	97	85

1.4 發電量

$P = 9.8 \eta_i \eta_g Q H_e$ 〔kW〕為表示一秒間所產生之電力，以此電力在T時間內連續產生之電力量為PT稱為發電量，其單位多用瓩時〔kWh〕。

1〔kWh〕為1〔kW〕之電力，使用一小時可獲得之總能量。發電廠於一年中所發出之發電量稱為年發電量。

1.5 貯水庫之能量

河川水力可能產生之能量，可由水庫蓄水容量及落差估算之，其勢能所選用之基線(datum)為水輪機標高或尾水水位，落差為貯水庫有效蓄水量重心至基線之垂距 H_c ，如圖(1.1)。

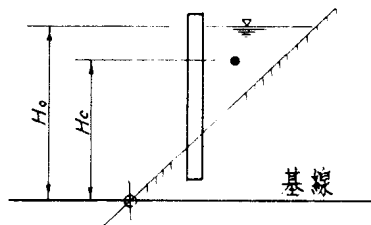


圖 1.1

4 實用水力工程學

由於 $1 \text{ [HP} \cdot \text{hr]} = 0.736 \text{ [kwh]}$

$$1 \text{ [HP} \cdot \text{hr]} = 75 \text{ [kg} \cdot \text{m/sec]} \times 3600 \text{ [sec]} = 270,000 \text{ [kg} \cdot \text{m]}$$

$$\therefore 1 \text{ [kwh]} = \frac{270,000}{0.736} \text{ [kg} \cdot \text{m]} = 367,000 \text{ [kg} \cdot \text{m]} = 367 \text{ [t} \cdot \text{m]}$$

$$\text{理論能量 } E_t = \frac{\gamma V_e H_c}{367} \text{ [kwh]} \quad (1.7)$$

式中, γ : 水單位體積之重量, 等於 $1 \text{ [t/m}^3\text{]}$

V_e : 貯水庫有效容量 $\text{[m}^3\text{]}$

$$\text{實際能量 } E = \eta \frac{\gamma V_e H_c}{367} \text{ [kwh]} \quad (1.8)$$

η 為綜合效率, 等於 $\eta_t \eta_g$, 此值通常在水庫式發電廠約為 $80 \text{ [\%]}$, 川流式發電廠約為 $75 \text{ [\%]}$ 。

【例 1.1】一發電廠, 其有效落差 130 [m] , 最大使用量 45 [cms] , 求該發電廠之最大出力。

【解】設水輪機與發電機之綜合效率 η 為 $80 \text{ [\%]}$

$$P = 9.8 \eta Q H_e = 9.8 \times 0.80 \times 45 \times 130 = 45864 \text{ [kw]}$$

由表(1.1), 水輪機及發電機之綜合效率標準值, 出力 $20,000 \text{ [kw]}$ 以上時, 其綜合效率為 $85 \text{ [\%]}$, 故再以 $\eta = 0.85$ 求最大出力 P ,

$$P = 9.8 \times 0.85 \times 45 \times 130 = 48730 \text{ [kw]}$$

【例 1.2】某發電廠有效落差 180 [m] , 最大使用水量 60 [cms] , 裝置水輪發電機二台, 求水輪機, 發電機之容量及該發電廠之最大出力各為若干。

【解】理論水力 $P_t = 9.8 Q H = 9.8 \times 60 \times 180 = 105840 \text{ [kw]}$

$$\text{水輪機每台之入力 (input) 爲 } \frac{P_t}{2} = \frac{105840}{2} = 52920 \text{ [kw]}$$

由表(1.1), 得水輪機效率之標準值 $\eta_t = 88 \text{ [\%]}$

$$\text{即水輪機之容量} = 52920 \times 0.88 = 46570 \text{ [kw]}$$

由表(1.1)得發電機效率之標準值 $\eta_g = 97 \text{ [\%]}$

$$\text{即發電機容量} = 52920 \times 0.88 \times 0.97 = 45170 \text{ [kw]}$$

$$\text{該發電廠之最大出力} = 45170 \times 2 = 90340 \text{ [kw]}$$

【例 1.3】設水輪機之出力 6000 [kw] , 有效落差 40 [m] , 若有效落差

減少 2 [m]，求該水輪機之出力為若干？設水輪機之導葉 (guide vane) 開度為一定，且水輪機效率之變化不予考慮。

【解】因水輪機導葉之開度一定，而流量大小與 $\sqrt{H}$ 成正比例，故出力依 $QH = \sqrt{H} \cdot H = H^{3/2}$ 之比例變化。

有效落差 $40 - 2 = 38$ [m] 時，水輪機之出力為

$$P = 6000 \times \left(\frac{38}{40} \right)^{3/2} = 5556 \text{ [kw]}$$

【例 1.4】最大出力 22000 [kw]，有效落差 80 [m] 之水力發電廠，若水輪機效率 $\eta_t = 88$ [%]，發電機效率 $\eta_g = 97$ [%]，求該發電廠最大使用水量。

【解】 $P = 9.8 \eta_t \eta_g Q H_e$

$$Q = \frac{P}{9.8 \eta_t \eta_g H_e} = \frac{22000}{9.8 \times 0.88 \times 0.97 \times 80} = 32.90 \text{ [cms]}$$

【例 1.5】一貯水庫有效水量 5×10^7 [m³]，有效水量重心與發電廠水輪機標高或尾水水位之垂距為 200 [m]，設綜合效率為 77 [%]，求發電量。

【解】由 (1.8) 式， $E = 0.77 \times \frac{1 \times 5 \times 10^7 \times 200}{367} = 21 \times 10^6$ [kwh]

【例 1.6】一攔河水庫，容許水位變化為 1.50 [m]，容許變化水量為 12×10^6 [m³]，最高頭水水位比尾水水位高 8.00 [m]，若綜合效率 $\eta = 80$ [%]，試求在每日尖峯負荷時，將頭水水位降低一次所得之發電量為若干？

【解】 $H_e = 8 - \frac{1.50}{2} = 7.25$ [m]

$$\text{由 (1.8) 式, } E = 0.8 \times \frac{12 \times 10^6 \times 7.25}{367} = 189600 \text{ [kwh]}$$

【例 1.7】一貯水庫需要發電量 500,000 [kwh]，計劃壩址地形條件可獲得貯水量重心位於水輪機標高或尾水水位之上 250 [m]，若綜合效率 $\eta = 0.80$ ，試求所需可用之貯水量為若干？

【解】 $V_e = \frac{367 E}{\eta r H_e} = \frac{367 \times 500000}{0.80 \times 1 \times 250} = 918000 \text{ [m}^3\text{]}$

1.6 發電方式

水力發電廠之形成，依獲得落差之方法及發電廠運用上之特性加以分類之。

(1)依獲得落差之方法：可分水路式發電廠，壩式發電廠及壩水路式發電廠。

(2)依發電廠運用上之特性：可分自流式（即川流式）發電廠，貯水庫發電廠及調整池式發電廠。

(3)依利用天然流量或為抽蓄而分者。

(4)依供電系統分獨立發電廠與聯營發電廠：獨立發電廠其輸電線不與其他發電廠相聯接，而單獨供電者。聯營發電廠之輸電線與其他發電廠（如火力或水力發電廠）相聯，目前所採用者多為此方式。

(5)依所發電力為基本負荷（base load）或為尖峯負荷（peak load）而分為基本負荷發電廠或尖峯負荷發電廠。

(6)依發電容量分為低容量發電廠，中容量發電廠及高容量發電廠。

低容量發電廠 100 [kw] ~ 999 [kw]

中容量發電廠 1000 [kw] ~ 9999 [kw]

高容量發電廠 10000 [kw] 以上者屬之

(7)依落差高低分為高落差發電廠，中落差發電廠及低落差發電廠

低落差發電廠 $H < 15$ [m]

中落差發電廠 $H = 15 \sim 50$ [m]

高落差發電廠 $H > 50$ [m]

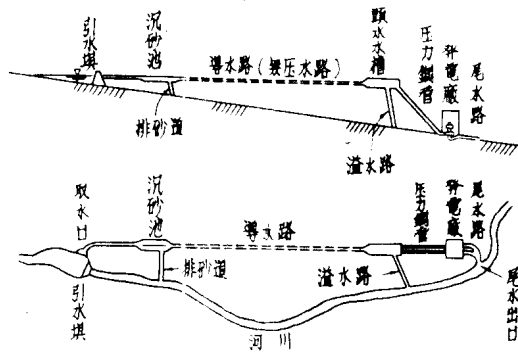
1.6.1 水路式發電廠：

坡度較陡之河川，在其上游或中游地帶建置低引水堰，再由此藉坡度較平緩之導水路將水流引至頭水水槽，而獲得落差之發電廠，結構物配置順序為，如圖（1.2）

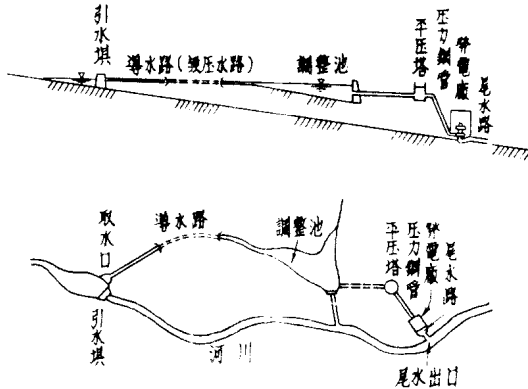
引水堰→取水口→沉砂池→導水路→頭水水槽→壓力鋼管路→發電廠（水輪機）→尾水路→尾水出口。

1.6.2 壩式發電廠

橫跨河川興建高壩貯水，而獲得落差，壩上游所攔蓄之水量可利用以調整負荷變化，發電廠多設於壩之下游近處，結構物配置順序為，如圖



(a) 川流式



(b) 有調整池川流式

圖 1.2 水路式發電廠

(1.3)。

壩→取水口→壓力鋼管路→發電廠（水輪機）→尾水路→尾水出口。

依壩上游所形成之淹沒區，有效貯水量之大小而分為貯水庫式與調整池式發電廠。貯水庫式為貯水庫之容量足夠供作整年性或季節性用水量調