

工
程
叢
書

水 力 機 械

李
一
匡
著

中 國 工 程 師 學 會 出 版

工
程
叢
書

TK72
J838

水
力
機
械

江苏工业学院图书馆
藏书章

TK72
J838
李
一
匡
著

中國工程師學會出版

目 錄

	頁
第一章 緒論	
1.1 水力機械之分類	1
水輪機 抽水機 水力控制系統	
1.2 水力學基本公式摘要	2
靜壓力 連續方程式 能量方程式 經孔及噴嘴之流	
管內之流 管路零星損失 管路總損頭及流量	
1.3 動力	9
1.4 噴流加於物面之力	10
加於固定曲面之力 加於固定平面之力 加於動面之力	
1.5 管內液體加於管之力	14
1.6 曲路之流動	16
1.7 強迫渦流	16
圓柱渦流 螺旋渦流	
1.8 自由渦流	19
圓柱渦流 螺旋渦流	
1.9 噴流之反動	22
固定容器所受之反動 迴轉體所受之反動	
1.10 慣性壓力	24
慣性壓力之發生 非可壓縮液體及彈性壁之情形 可壓	
縮液體及彈性壁之情形	
1.11 旋渦真空	30
旋渦真空之發生 旋渦真空之影響及其防止	
1.12 迴轉機械之轉矩	31
轉距 流動方向	
1.13 迴轉機械之水頭	33
理論水頭 能量方程式	

1.14 效率	35
水輪機 抽水機	
1.15 相似法則	37
水輪機 抽水機	
1.16 比速	39
水輪機 抽水機	
1.17 漏洩之防止	41
水力封閉 接觸封閉	
第二章 衝動水輪機	
2.1 柏耳頓水輪之構造	43
噴嘴 轉輪 屨	
2.2 柏耳頓水輪之調速機構	47
2.3 落差	48
2.4 馬力及效率	49
2.5 柏耳頓水輪變速之性能	53
理論情形 實際情形	
2.6 柏耳頓水輪定速之性能	56
2.7 柏耳頓水輪設計摘要	58
噴嘴 轉輪 屨 比速	
第三章 反動水輪機	
3.1 反動水輪機之演變	64
種類 比速	
3.2 佛朗西水輪機之構造	65
導葉 轉輪 尾管	
3.3 佛朗西水輪機之調速機構	67
3.4 馬力及效率	70
3.5 落差	72
實際落差 能之變化	
3.6 佛朗西水輪機之性能	74
變速之運轉 定速之運轉	

3.7	反動水輪機之效率	76
	流量對效率之影響 大小對效率之影響 比速對效率之影響	
3.8	反動水輪機之各種損失	79
	震動損失與入口葉角 流出損失與流出角	
3.9	旋渦真空	82
3.10	螺槳水輪機	84
	演進及構造 葉及速度 廻轉力及效率	
3.11	克布蘭水輪機	87
3.12	設計摘要	88
	基本決定 轉輪或螺槳	
第四章	水輪機之比較及裝設	
4.1	各種水輪機之比較	94
	形體及比速 效率 落差及馬力	
4.2	水輪機之平行使用	95
4.3	附屬設備	96
	水輪機之裝設 平壓塔	
4.4	水力發電地形之利用	99
	高落差之利用 中落差之利用 低落差之利用 地下發電廠	
第五章	離心抽水機 (及軸流抽水機)	
5.1	概說	102
	作用原理 構造 種類 大小及規範 用途及優點	
5.2	多級抽水機	104
	優點 構造	
5.3	軸向推力	107
5.4	升程及容量	108
	實際升程 理論升程 能量之變化 容量	
5.5	性能	112
	定速性能 變速性能 關閉水頭	
5.6	葉	118
	流量對流速之影響 葉角 葉數 葉間液體之流動	

葉之畫法	123
5.7 殼	123
導葉 蝸形殼	125
5.8 能量之損失及效率	125
能量之損失 漏洩損失 水力損失 總括效率	130
5.9 旋渦真空	133
旋渦真空參數 吸引比速	133
5.10 黏性影響	133
5.11 設計摘要	133
基本決定 葉輪	136
5.12 螺槳抽水機	139
構造 性能 優點及應用	139
5.13 變節螺槳抽水機	139
5.14 抽水機之裝設及其管理	139
一般事項 灌溉抽水機站 循環抽水機站 抽給水機站	
第六章 往復抽水機	
6.1 概說	145
一般動作 種類 用途及特點	146
6.2 構造	146
往復運動部分 缸 閥 貯氣器及真空器	150
6.3 容量	151
6.4 輸出管及吸引管之慣性壓力	153
6.5 設計摘要	156
基本決定 缸徑及衝程 吸引升程 閥	156
6.6 蒸汽抽水機	157
直動蒸汽抽水機 廻轉蒸汽抽水機	
6.7 他種往復抽水機	
小單缸抽水機 高速高壓抽水機	

第七章 特殊抽水機	3.8
7.1 簡單汲水裝置	160
桔槔 汲水車 阿幾默德螺旋	7.8
7.2 手動抽水機	161
7.3 水動抽水機	162
水力唧子 噴射抽水機	3.8
7.4 氣動抽水機	166
氣升抽水機 噴射器	3.8
7.5 鑽孔抽水機	167
往復式鑽孔抽水機 離心式鑽孔抽水機	3.8
7.6 確動迴轉抽水機	168
齒輪抽水機 輻射缸抽水機 平行缸抽水機	3.8
葉式抽水機 變量輸出抽水機	3.8
7.7 自起動抽水機	172
水環抽水機 噴水抽水機	3.8
第八章 水力控制系統	
8.1 總說	174
水及水力控制系統之特質 水力控制系統之要素	
水力控制系統之佈置	
8.2 水力蓄積器及水力增強器	176
水力蓄積器 水力增強器	
8.3 非閉流之水力機械	178
水力提升器 水力起重器及起重機 水壓機	
水力鍛壓機 水壓鉚釘機	
8.4 閉流之水力機械	181
推動機 水力伺服機構 水力操縱之工具機 水壓機	
水力制動器	
8.5 水力聯結器	185
構造及作用 性能 控制裝置 與發動機之合併	

第一章 緒論

1.1 水力機械之分類

機械運動部分與流經其間之液體，作能之交換者為水力機械 (Hydraulic machinery)。就其轉變方向及情形而言，水力機械可分為三大類。

A. 水輪機

水輪機 (Water turbine) 係水力原動機 (Hydraulic prime mover)，將天然之水力能 (Hydraulic energy) 變為機械能 (Mechanical energy)。水輪機之利用水力能，有利用其位能 (Potential energy)、速能 (Velocity energy) 及壓能 (Pressure energy) 等之別。以利用位能為主者，水之速度與壓力變化甚小，效率極低，今已罕用。利用壓能者，水之壓力變化甚大，位能與速能之變化較小，如反動水輪機 (Reaction water turbine) 是。利用速能者，係由高速水之衝擊作用，使原動機轉動，如衝動水輪機 (Impulse water turbine) 是。

水於水輪機迴轉部分之流動方向：係沿徑向者，稱輻流 (Radial flow)；沿軸向者，稱軸流 (Axial flow)；不沿徑向與軸向者，稱混流 (Mixed flow)。輻流之反動水輪機，以佛朗西水輪機 (Francis water turbine) 最為著名；軸流之反動水輪機，又稱螺旋水輪機 (Propeller water turbine)。衝動水輪機，以柏耳頓水輪 (Pelton wheel) 最負盛名。以後所述，即係此三種。

B. 抽水機

抽水機 (Pump) 係將機械能變為水力能，種類繁多，可作下列分類。

(a) 依抽水機作用言 有迴轉抽水機 (Rotary pump)、往復抽水機 (Reciprocating pump) 及其他特殊抽水機等。迴轉抽水機水係輻流者稱離心抽水機 (Centrifugal pump)，軸流者稱螺旋抽水機 (Propeller pump)。以後所述，依此分類。

(b) 依使用原動力言 有蒸汽抽水機 (Steam pump)、電動抽水機 (Electric pump)、壓氣抽水機 (Compressed air pump)、水動抽水機 (Hydraulically driven pump) 及手動抽水機 (Hand pump) 等。

(c) 依抽水機用途言 有普通抽水機 (General pump)、抽給水機 (Feed pump)、抽油機 (Oil pump)、抽真空機 (Vacuum pump)、消防抽水機 (Fire pump) 及抽泥水機 (Sludge pump) 等。

C. 水力控制系統

水力控制系統 (Hydraulic control system) 將能作水力之傳達及貯存，如水壓機 (Hydraulic press)、水力蓄積器 (Hydraulic accumulator) 及水力增強器 (Hydraulic intensifier) 等是。

1.2 水力學基本公式摘要

與水力機械有密切關係之水力學公式，摘要錄下，藉供參考。

A. 靜壓力

設液體之重率 (Specific weight) 或每單位體積之重量為 γ ，與空氣接觸液面下 h 處之靜壓力 (Static pressure)

$$p = \gamma h \quad (1.1)$$

在 76 cm 水銀柱或 1.03 kg/cm^2 大氣壓力及攝氏 4° 之溫度，清水 $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，海水 $\gamma = 1025 \text{ kg/m}^3$ 。水中某點至水面之垂直距離，為該點之水頭 (Head)。

加於浸在液體中板面一側之垂直總壓力 F ，等於液體重率 γ 、板面形心 (Centroid) 至液面高度 $\bar{h}$ 與板面積 A 之乘積，即

$$F = \gamma \bar{h} A \quad (1.2)$$

B. 連續方程式

穩流 (Steady flow) 之液體在通路內，當流量 (Discharge) Q 不變，等於流至某處液體橫斷面積 A 與平均流速 v 之乘積，即

$$Q = Av \quad (1.3)$$

是為連續方程式 (Equation of continuity)。

C. 能量方程式

容器如管等，其中某處壓力、平均流速及在一基準面上之高度，

分別爲 p 、 v 及 z ，則壓頭 (Pressure head) $\frac{p}{\gamma}$ 、速頭 (Velocity head) $\frac{v^2}{2g}$ 及位頭 (Elevation) z 之和，於不計摩擦及渦流 (Eddy) 損失之穩流，爲一定量。即

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z = H \quad (1.4)$$

是爲能量方程式 (Energy equation) 或柏努利定理 (Bernoulli's theorem)。式中 H 稱總水頭 (Total head)。各項之度 (Dimension) 爲長，亦爲單位重量之能。

如由①處向②處流動，其間之摩擦頭 (Friction head) 或損頭 (Loss head) 爲 h_f ，前式 (1.4) 可改書爲

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f \quad (1.5)$$

D. 經孔及噴嘴之流

具水頭 h 之小孔及噴嘴 (Nozzle)，水之實際平均流速

$$v = C_v \sqrt{2gh} \quad (1.6)$$

而 C_v 爲流速係數 (Coefficient of velocity)。流量

$$Q = C_d A \sqrt{2gh} \quad (1.7)$$

而 C_d 爲流量係數 (Coefficient of discharge)， A 爲噴流 (Jet) 出口之面積。

E. 管內之流

液體以平均速度 v ，流經內徑 d 、長 L 之管，其損頭

$$h_f = f \frac{L}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1.8)$$

f 爲摩擦係數 (Coefficient of friction)，決定於雷諾數 (Reynolds' number) 及管壁情況。

實際決定 f 之公式甚多，水於鑄鐵管內之摩擦係數，依達西公式 (Darcy' formula)，

$$\left. \begin{array}{l} \text{新管} \quad f = 0.02 + \frac{0.0005}{d} \\ \text{舊管} \quad f = 0.04 + \frac{0.001}{d} \end{array} \right\} \quad (1.9)$$

管徑 d 在 0.5 公尺以下，此等公式最為適當。

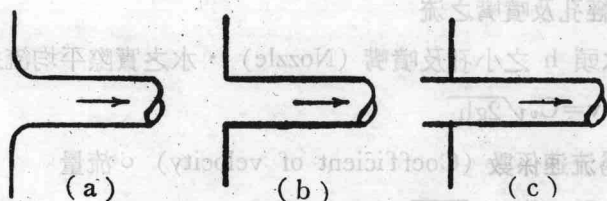
F. 管路零星損失

當管斷面與方向變化，有配件 (Fittings) 與閥 (Valve) 等加於管路，亦發生能之損失，或壓力降落。此種損失，稱為零星損失 (Minor loss)；其損頭仍可以與管摩擦損失相似之公式表示之，即

$$h_f' = k \frac{v^2}{2g} \quad (1.10)$$

式中 k 為零星損失係數，分述於下：

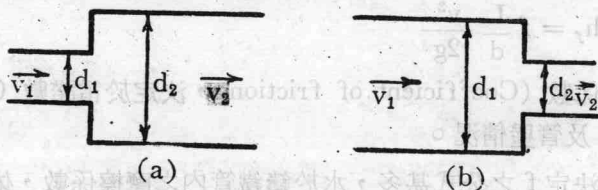
(a) 入口 由水箱等流入管路，如第 1.1 圖所示：圓角入口如 (a)， $k_i = 0.05$ ；直角入口如 (b)， $k_i = 0.5$ ；突出入口如 (c)， $k_i = 1.0$ 。



第 1.1 圖 管之入口

(b) 管徑變化 如管徑變化，於一定之流量，流速因之變化，遂生損失。於用 (1.10) 式， v 係管徑變化前，即以下各式管徑 d_1 處之流速。

(1) 突然擴大，如第 1.2 圖 (a)



第 1.2 圖 管徑突變

$$k_t = \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \right]^2 \quad (1.11)$$

(2) 突然縮小，如 (b)， k_e 之值如第 1.1 表所示。突然擴大較相似形之突然縮小，易生亂流，故前者之損失係數較後者為大。

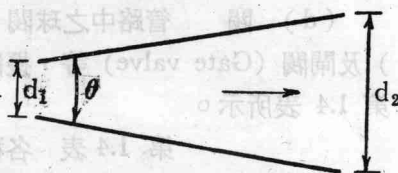
第 1.1 表 突然縮小之損失係數 k_e

d_2/d_1	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
k_e	0.45	0.39	0.33	0.22	0.06

(3) 錐形管 (Taper pipe) 如第 1.3 圖所示。

$$k_t = K \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \right]^2$$

..... (1.12)

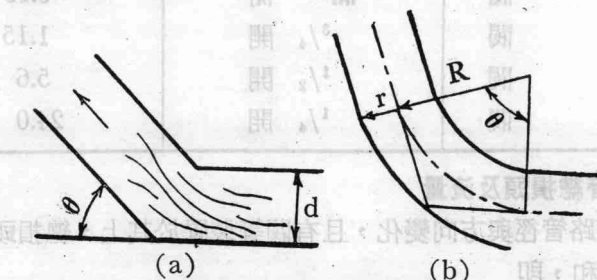


第 1.3 圖 錐形管

頂角 $\theta = 5^\circ 30'$ ， $K = 0.135$ 時， k_t 最小。

(c) 管向變化 管向變化，流速分佈亦變，損失因之發生。

(1) 肘管 (Elbow) 如第 1.4 圖 (a) 所示， k_e 見第 1.2 表。



第 1.4 圖 管向變化

第 1.2 表 肘管之損失係數 k_e

θ	20°	40°	60°	80°	90°	180°
k_e	0.05	0.14	0.36	0.74	0.98	2.20

(2) 彎管 (Bend) 如第 1.4 圖 (b) 所示，其損失係數如下式所示。

$$k_b = \frac{K\theta}{180^\circ} \quad (1.13)$$

θ 為彎曲部份之圓心角，度， K 值如第 1.3 表所示，決定於 $\frac{r}{R}$

第 1.3 表 (1.13) 式 K 之值

r/R	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0
K	0.131	0.158	0.294	0.660	1.410	1.980

(d) 閥 管路中之球閥 (Globe valve)、角閥 (Angle valve) 及閘閥 (Gate valve) 等，擾亂液體流動頗鉅，損失係數甚大，如第 1.4 表所示。

第 1.4 表 各種閥之損失係數 k_v

閥 之 種 類	開 啓 情 形	k_v
球 閥	滿 開	10
角 閥	滿 開	5
閘 閥	滿 開	0.19
閘 閥	$3/4$ 開	1.15
閘 閥	$1/2$ 開	5.6
閘 閥	$1/4$ 開	24.0

G. 管總損頭及流量

當管路管徑與方向變化，且有閥等裝置於其上，總損頭為前述各種損頭之和，即

$$H_f = \left(f \frac{L}{d} + k_s + k_t + k_e + k_v + k_b + k_v + \dots \right) \frac{v^2}{2g}$$

$$\text{或} \quad H_f = \left(f \frac{L}{d} + \Sigma k \right) \frac{v^2}{2g} \quad (1.14)$$

管內流量

$$Q = \frac{\pi}{4} d^2 v = \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2gH_f}{f L/d + \Sigma k}} \quad (1.15)$$

H_f 亦為管入口與出口水面之落差。當管甚長， Σk 之影響較小，可略而不計，且以 h_f 代替 H_f ，則

$$Q = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{2g}{f}} \cdot \sqrt{\frac{h_f d^5}{L}} \quad (1.16)$$

設計管之通例，於一定之流量 Q ，先選定平均流速之適當值。流速過大，管徑較小，有減少設備費之益，但損頭較大，有增加管理費之弊。流速過小，利弊相反，亦非所宜。普通鋼管及鑄鐵水管，設計水速約 2~3 m/s，發電用引水管約為 3~4 m/s。流速既經決定，於一定流量，可求得管徑。

〔例題 1.1〕一管斷面不同，①②③三斷面之面積分別為 9.2、25.8 及 6.5 平方公分，在基準面上之高分別為 92、65 及 21 公分。管端①接於水箱，而水箱水面距基準面高 2 公尺，管另一端③放水於空氣中。如不計一切損失，試計算 (a) 經此系統之流量，(b) 在①②兩斷面之速頭及壓頭。

〔解〕(a) 水箱水面與管端③之壓力皆等於大氣壓力，但前者流速為零，後者流速為 v_3 。由兩處總水頭相等，得

$$200 = 21 + \frac{v_3^2}{2g}$$

即

$$v_3 = 591 \text{ cm/s}$$

由是流量

$$Q = A_3 v_3 = 6.5 \times 591 = 3850 \text{ cm}^3/\text{s} = 3.85 \text{ lit/s}$$

$$(b) \quad v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{3850}{9.2} = 418 \text{ cm/s}$$

在①之速頭

$$\frac{v_1^2}{2g} = \frac{(418)^2}{2g} = 89.2 \text{ cm}$$

①之壓頭

$$\frac{P_1}{\gamma} = 200 - 92 - 89.2 = 18.8 \text{ cm}$$

在②之速頭 $\frac{v_2^2}{2g} = 11.3 \text{ cm}$ ，壓頭 $\frac{P_2}{\gamma} = 123.7 \text{ cm}$

〔例題 1.2〕長 1200 公尺之鑄鐵直管，兩端水頭之差為 18 公尺，每秒有 0.5 立方公尺流量之水通過，管之內徑及流速如何？

〔解〕由題 $L=1200$ m， $h_f=18$ m， $Q=0.5$ m³/s，設摩擦係數 $f=0.02$ ，內徑為 d ，平均流速為 v 。

由 $Q = \frac{\pi}{4} d^2 v$

得 $v = \frac{4Q}{\pi d^2}$

代入 (1.8) 式，得

$$d = \sqrt[5]{\frac{4^2 f L Q^2}{\pi^2 \times 2 g h_f}} = \sqrt[5]{\frac{4^2 \times 0.02 \times 1200 \times (0.5)^2}{\pi^2 \times 2 g \times 18}}$$

$$= \sqrt[5]{0.0276} = 0.488 \text{ m}$$

$$v = \frac{4 \times 0.5}{\pi \times (0.488)^2} = 2.68 \text{ m/s}$$

依 (1.9) 式新鑄鐵管

$$f = 0.02 + \frac{0.0005}{0.488} = 0.021$$

假設之值，與此極為接近，可認為適當，故 $d=0.488$ m， $v=2.68$ m/s。

〔例題 1.3〕內徑 30 公分之水管，其中一小段易以內徑為 15 公分之管，接頭處管徑突然變化。此段管上裝一球閥，管內水之流量為 57 公升每秒。試求此段管之損頭，當球閥在滿開時。

〔解〕15 cm 管內平均流速

$$v_{15} = \frac{0.057}{\pi/4(0.15)^2} = 3.23 \text{ m/s}$$

30 cm 管內平均流速

$$v_{30} = 3.23 \times \left(\frac{15}{30}\right)^2 = 0.808 \text{ m/s}$$

突然縮小之損失係數，以 $\frac{d_2}{d_1} = \frac{15}{30} = 0.5$ ， $k_c = 0.33$ 。損頭

$$h_f' = k_c \frac{v^2}{2g} = 0.33 \times \frac{(0.808)^2}{2g} = 0.011 \text{ m}$$

突然擴大之損失係數

$$k_t = \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{15}{30} \right)^2 \right]^2 = 0.56$$

損頭 $h_f' = k_t \frac{v^2}{2g} = 0.56 \times \frac{(3.23)^2}{2g} = 0.297 \text{ m}$

滿開球閥之損失係數 $k_v = 10$ ，損頭

$$h_f' = k_v \frac{v^2}{2g} = 10 \times \frac{(3.23)^2}{2g} = 5.32 \text{ m}$$

三種損頭總計為 $0.011 + 0.297 + 5.32 = 5.63 \text{ m}$

1.3 動力

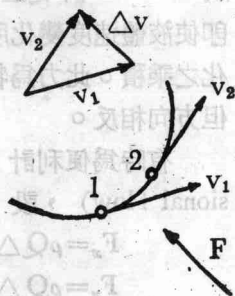
擬使液體流速之大小或方向變化，須加力。由作用 (Action) 與反作用 (Reaction) 相等之法則，液體對使其發生變化之物體，發生相等而相反之力。此等由流速變化所生之力，稱為動力 (Dynamic force)，以與由靜水壓力所生之靜力區別。

加於具質量 M 之液體之動力 F ，與所發生之加速度 a 之關係為

$$F = Ma = M \frac{dv}{dt} = \frac{d(Mv)}{dt}$$

即加於液體之動力，等於單位時間動量 (Momentum) 之變化。

在第 1.5 圖，質點在①點之速度為 v_1 ，時間 Δt 以後，質點在②點之速度為 v_2 。使速度變化 Δv 之力 F ，係沿 Δv 之方向。



在第 1.6 圖，一噴流沿物體面 B 流過。取一極小段之長為 Δl ，其斷面面積為 A ，則質量為 $\frac{\gamma}{g} A \Delta l$ 。液體質點之速度，因地位及時間而變。於穩流，加速度 dv/dt 可書為

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta l} \times \frac{\Delta l}{\Delta t} = v \frac{\Delta v}{\Delta l}$$

發生變速 dv ，加於液體之力