

大專用書

水力學

黃騰鋒 編著

科教圖書出版社印行

總經銷 科技圖書股份有限公司

序言

水力學乃研究液體運動的學科，它亦是流體力學中的一大部門。事實上；水力學和流體力學兩者是無法分隔的，只是水力學較側重於有關液體尤其是水在靜止及運動時一切現象的闡述。

本書內容主要依照教育部最新頒訂之大專院校課程標準為大綱而編撰，適合大專院校土木、建築、水利等科系同學研習之用。亦可提供業者參考之用。

書中對於各種流體的現象儘量以簡捷的方式表達，對於各重要原理及公式亦深入淺出地詳細導證，同時儘量舉示例題配合書中所述之原理及公式，使讀者能更進一步了解及熟悉應用的方法。

本書共計十章，其內容包括探討流體的靜力學、動力學及運動學等基本理論部份，以及管流、渠流、流體機械等應用部份。按此順序編撰之目的在使讀者由最基本的理論至進一步的實證應用能一氣呵成，對水力學有全盤性及清晰的了解。

由於倉促附梓，錯誤及遺漏之處，尚祈各位教、學者惠予指正，俾再版時予以修正，謹此致謝。

本書承經濟部水資會洪銘堅先生協助校對，於此特向洪君致謝忱。

黃騰鋒謹序

民國68年十月

水力學

目錄

第一章	流體之物理性質與流體運動	1
1-1	流體力學在工程學科中之重要性	1
1-2	流體與固體	1
1-3	流體之物理性質	2
1-4	影響流體運動之因素	6
第二章	靜態水力學	9
2-1	靜壓強度	9
2-2	靜壓強度與高度之關係	10
2-3	液體壓力計(<i>Barometer</i>)	12
2-4	作用於平面上之水壓力	18
2-5	作用於曲面上之水壓力	22
2-6	浮力(<i>Buoyancy</i>)與浮體之穩定(<i>Stability of floating bodies</i>)	26
2-7	表面張力 (<i>Surface tension</i>)	30
第三章	流體運動學	38

3-1	位移、速度與加速度	38
3-2	流線、徑線、煙線與流管	44
3-3	流體運動之分類	45

第四章 流體運動之基本方程式

52

4-1	流體運動之基本觀念	52
4-2	連續方程式 (<i>Continuity equation</i>)	53
4-3	能量方程式	56
4-4	動量方程式	75

第五章 理想流體之運動與受重力影響之流體運動

91

5-1	理想流體之運動及伯努利方程式	91
5-2	一維性理想流體運動	91
5-3	一維性理想流體運動之實例	98
5-4	堰流	109
5-5	流體加速運動之相對平衡	116

第六章 因次分析

131

6-1	因次分析在流體力學上之重要性	131
6-2	因次分析之齊次性	132
6-3	因次分析	134

第七章 管流

140

7-1	管流通論	140
7-2	管流之表面阻抗	141
7-3	管流之形狀阻抗	165
7-4	管單之管流	173
7-5	複雜之管流	178
第八章 渠流		193
8-1	渠流通論	193
8-2	臨界渠流	217
8-3	等速渠流	218
8-4	定量漸變渠流	232
8-5	定量急變渠流	237
第九章 流體之衝擊與流體機械		243
9-1	流體之衝擊	243
9-2	管流之衝擊力	244
9-3	流體對葉板之衝擊	246
9-4	流體機械通論	248
9-5	流體中之固體	261
第十章 水工模型試驗		278
10-1	概說	278
10-2	流體運動之相似原理	279
10-3	相似定律之意義及應用	284

第一章

流體之物理性質與流體運動

1-1 流體力學在工程學科中之重要性

流體力學 (Fluid mechanics) 為工程學科中重要之一門，乃研究液體與氣體在靜止狀態與運動狀態下之一切物理現象，以應各種與流體有關之工程彈析及設計的學科。

流體力學在工程上應用甚廣，舉凡造船、機械、航空、化工、土木、水利等工程學科，都與流體力學發生實際關係。造船與航空工程師在船舶與航空器設計，化工工程師在化學工程之管路設計，土木、水利工程師在渠道、涵管之水利設施設計時，沒有一項不是藉助流體力學之力者。所謂水力學，乃較着重液態流體之流體力學，自然地；它屬於流體力學之範疇中。故流體力學在工程學上之重要性實不可言喻。

然而；流體力學在工程學科中並非處於孤立的地位，流體力學的研究有賴於其他說明固體粒子和固體元素運動及變形的基本原理之輔助，此外在現代的流體力學亦使用質量不減原理，能量不減原理及動量不減原理來說明並分析流體運動之問題。

1-2 流體與固體

就 就外在形能及內在的物理性質而言，流體與固體有很明顯的區別。固態、液態、氣態三者為物質三態，液態與氣態物質統稱為流體。在固態時，體積與形態不易改變。液態下，體積不易改變，但形狀却易

2 水 力 學

隨容器而改變。氣態時，不論體積或形狀皆易隨容器而變化。

又同一物質之固態狀態下，其分子間的內聚力最大，液態次之，氣態最小。

從物理性質而言，流體受壓力時都有彈性作用，當壓力消失後它便可回復原來的體積。至於流體在受到拉力時，也具有極弱的彈性行為，此種抗拉力強度只限於分子間具有之內聚力。當流體承受剪應力作用時，其受剪應力部份立即發生連續且永久之變形，此點為流體與固體最大的區別。

1-3 流體之物理性質

所謂流體的物理性質乃指流體與物理現象有關之性質，包括容積、質量、重量、溫度、壓力強度、質量密度、滯度、表面張力……等。本書中用MKS質量單位以度量流體物理性質。所謂MKS制即以(N)牛頓表示力的單位，(m)公尺表示長度，(kg)公斤表示重量，(S)秒表示時間單位，其關係如下式：

$$1\text{ N} = 1\text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$$

茲將有關流體之各項物理性質附於(1-1)本書附錄中。至於各物理性質的導源詳述於此後各節中。

(一)質量 (mass) 與質量密度 (mass density)

由力學觀點而言，質量簡寫(M)，是衡量物體所具有的慣性效應之量。由牛頓第二定律得知：

$$\text{質量}(M) = \text{力}(F) / \text{加速度}(a), \text{其單位為 kg} \quad (1-2)$$

每單位容積所含之物體質量稱為質量密度(ρ)，質量密度又稱密度，其單位為 kg / m^3 。〔在公制， 4°C 時水的密度是 $1\text{g} / \text{cm}^3 = 1000\text{ kg} / \text{m}^3$ 〕

(二)重量 (Weight) 與單位重量 (specific weight; unit weight)

質量(M)之物體受地球引力作用，該物體便發生向地心之重力加

速度 (g)，所造成之力便稱為重量 (W)，可用數學式表示：

$$W(N) = M(kg) \cdot g(m/s^2) \quad (1-3)$$

每一單位體積之物體所含有之重量即為該物體之單位重量 (γ)，其單位為 N/m^3 且； $\gamma = \rho \cdot g$ ，水在 $4^\circ C$ 時單位重量為 $9810 N/m^3$ 。

所謂比重乃指某物質之單位重量或質量密度與一標準物質之單位重量或質量密度之比值，一般以 1 大氣壓下 $4^\circ C$ 時純水為此標準物質。可用下式表示：

$$\text{某物質比重}(s) = \frac{\text{某物質單位重量}(\gamma)}{\text{水之單位重量}(\gamma_w)} = \frac{\text{某物質之質量密度}(\rho)}{\text{水之質量密度}(\rho_w)} \quad (1-4)$$

(二) 壓力強度 (Pressure intensity)

流體壓力是以同等強度傳達於四面八方而作用於任何平面之正交應力。在同一水平面上，液體之壓力強度必相等，壓力強度單位以 N/m^2 表之。流體之壓力強度量有絕對壓力 (absolute pressure) 及錶示壓力或稱相對壓力 (gauge pressure) 兩種方法。

絕對壓力乃以壓力之絕對零值為基準而加以度量者。

錶示壓力乃以當地之大氣壓作為相對零值為基準而加以度量者。

絕對壓力與錶示壓力之關係可參考圖 (1-1)

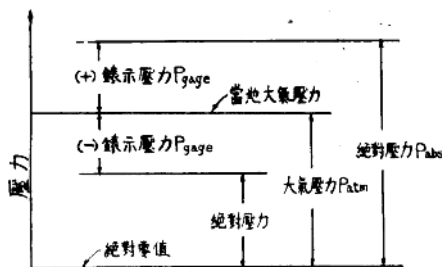


圖 1-1 絕對壓力與錶示壓力

4. 水 力 學

兩者之相關式：絕對壓力 (P_{abs}) = 大氣壓力 (P_{atm})

$$+ \text{錶示壓力} (P_{gage}) \quad (1-5)$$

錶示壓力之值可爲正或負，當計量之壓力大於大氣壓時爲正，若於真空時，則錶示壓力爲負值。

常用之各種壓力單位可參考下式 (1-6)：

$$1 \text{ 標準大氣壓 (atm)} = 1031.21 \text{ 毫巴 (mb)}$$

$$= 101321 \text{ (N/m}^2 \text{)}$$

$$= 14.7 \text{ (psi)}$$

$$= 760 \text{ (mmHg)} \quad (1-6)$$

動動力滯度 (Dynamic viscosity) 與運動滯度 (Kinematic viscosity)

流體滯性 (viscosity) 的產生主要是由於流體分子間相互的作用，且此種特性必須在流體之相鄰質點有相對運動，亦即受剪刀時，滯性才能顯示出來。

圖 (1-2)，爲兩片很大的平行板，而兩平行板間之小距離爲 y ，且兩板之間充滿流體，設流體以力 F 加於上板，則上板以等速度 u 移動。相對地，與上板相接的流體亦以速度 u 移動。然而；與下板相接的流體速度則爲零。若距離 y 與速度 u 皆不大，則速度的變動將成直線。經實驗結果得知，力 F 與板面積 A 及速度 u 成正比，與距離 y 成反比。由三角形相似定理：

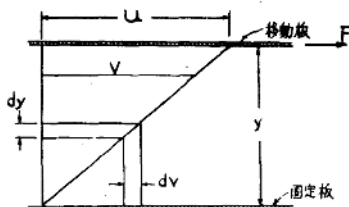


圖 1-2 兩平行板間流體之滯性作用

$$\frac{u}{y} = \frac{dv}{dy}$$

$$\text{故 } F \propto \frac{Au}{y} = A \frac{dv}{dy}$$

$$\text{令 } \frac{F}{A} = \tau$$

$$\text{則 } \tau \propto \frac{dv}{dy} \quad (1-7)$$

上式 $\tau = \frac{F}{A}$ 即為剪應力。設比例常數為 μ ，此 μ 通常稱為動力滯度，其單位為 N-sec/m^2 又稱 poise。

至於運動滯度則為：

$$\text{運動滯度 } (\nu) = \frac{\text{動力滯度 } (\mu)}{\text{質量密度 } (\rho)} \quad (1-8)$$

其單位為 m^2/sec 或謂 stoke。

(四)容積彈性模數 (Bulk modulus of elasticity) 與氣體之壓縮

流體之容積彈性模數 (E) 表示流體之可壓縮性，為單位壓力之變化與每單位體積之體積變化之比率，即

$$E = - \frac{dp}{\left(\frac{dv}{v}\right)} \quad (1-9)$$

其單位為 N/m^2

氣體的壓力是根據各種熱力學定律求得的。

在兩種不同條件之下，同樣質量的氣體有下之性質

$$pv = \text{定值} \quad (1-10)$$

將 (1-10) 微分， $p dv + v dp = 0$ ，亦即 $-\frac{v}{dv} = \frac{p}{dp}$ 代入 (1-9)

得在定溫過程中：

$$E = p \quad (1-11)$$

6 水 力 學

在無熱交換過程中，氣體壓力強度與單位容量之關係可用定熱過程方程式表示 $Pv^K = \text{定值}$

式中 K 為等壓比熱 C_p 與等容比熱 C_v 之比值。又稱絕熱指數，將上式微分 $KPv^{K-1}dv + v^K dp = 0$

即 $-\frac{dv}{v} = \frac{dp}{Kp}$ 代入 (1-9) 得

在定熱過程中 $E = Kp$ (1-13)

(v) 蒸氣壓力 (Vapor pressure)

在密封空間中，由於蒸發產生蒸汽分子，此等蒸汽分子所產生的分壓力便稱為蒸汽壓力。蒸汽壓力隨溫度增高而增大。

(vi) 表面張力 (Surface tension)

當互不相溶之液體與液體或液體與氣體或液體與固體相接觸時，接觸表面有儘量縮小之現象，使得表面之分子距離接近，此種現象稱為表面張力現象，該收縮力稱為表面張力。表面張力與溫度及互相接觸的介質有密切關聯。

1-4 影響流體運動之因素

影響流體運動之因素甚多，茲扼要分述如下：

- (一) 滯性 (viscosity) 及壓縮性 (compressibility)：若流體流動時既無滯性又非壓縮性則稱為理想流體 (ideal fluid)，一般流體均有滯性且可壓縮，稱為真實流體 (real fluid)。若滯性流體之動力滯度為定值，則稱牛頓式流體 (Newtonian fluid)，反之則為非牛頓式流體 (non-Newtonian fluid)。
- (二) 邊界條件 (boundary condition)：如界面之粗糙或光滑情況或溫度情況等，皆對流體運動有所影響。
- (三) 流動特性 (flow characteristics)：如流體如何運動，流體質點之速度及加速度之方向，大小等因素。

四 流體之物理性質：如前節所述之流體質量，表面張力，蒸氣壓力等物理性質。

總之任何流體之運動必同時受許多種物理性質影響，但影響之輕重則不一，有時某影響因素甚至可以忽略不計，如蒸氣壓力對渠流之影響可不計。欲了解各種物理性質對流體運動之影響，必須借助各種實驗分析才能收效。

第一章作業

- [1-1] 試述流體之定義？
- [1-2] 固體與流體之差別為何？
- [1-3] 分別說明質量密度、單位重量、比重、動力滯度、運動滯度、壓縮率、容積彈性模數、表面張力及蒸氣壓力之定義及其單位為何？
- [1-4] 何謂絕對壓力？相對壓力？兩者有何相互關係？
- [1-5] 何謂壓縮性流體？非壓縮性流體？滯性流體？非滯性流體？理想流體？非理想流體？
- [1-6] 流體之物理性質如何影響流體運動？

第二章

靜態水力學

2-1 靜壓強度

當流體被限制於固定邊界中，而流體層次間無相對運動，流體便成為靜態流體。流體對邊界單位面積所施的正交壓力即為流體壓力。流體之層次間無相對運動時，便沒有剪力作用產生。因此流體壓力乃垂直於接觸面之壓力。

若正交壓力 ΔF 作用於面積 ΔA 上，則 $\Delta F/\Delta A$ 稱為該面積所受之平均壓力強度。由極限觀念得知，若此面積 ΔA 趨近於零，則稱 $\Delta F/\Delta A$ 為點之壓力強度，點之壓力強度 P 可以下式表示：

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2-1)$$

靜態流體上任何一點在各方向的壓力強度必相等，此觀念之證明如下述：

圖 2-1 為靜態流體的一極小元體，由於無剪力作用，故作用於各面上的力僅有重力及各面上的正交壓力。圖中 dw 為流體元體的重。當元體體積趨於極小時， dw 可以視為零。

$$\sum F_x = 0 \quad p_z ds \sin \theta - p_x dy dz = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad p_z ds \cos \theta - p_y dx dz = 0$$

$$\text{又} \quad ds \sin \theta = dy$$

$$ds \cos \theta = dx$$

$$\text{故} \quad p_z dy - p_x dy dz = 0, \quad p_z dx - p_y dx dz = 0$$

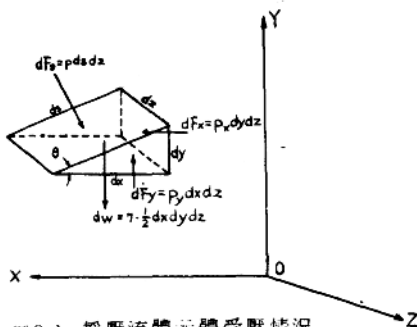


圖 2-1 靜壓流體元體受壓情況

由上二式得

$$p = p_x = p_y \quad (2-2)$$

由於元體之斜角 θ 為任取者，故知靜態流體上任何一點在各方向的壓力強度均相等。

2-2 靜壓強度與高度之關係

靜態流體中各點之壓力變化可以下述方法決定。如圖(2-2)為靜態流體之垂直柱形元體，橫斷面積 ΔA ，高度 Δz ，柱底靜壓強度 p_A ，柱頂靜壓強度 p_B ，柱底與柱頂壓力差 Δp 沿垂直方向以 $\frac{dp}{dz}$ 為變化率。

$$p_B = p_A + \Delta p = p_A + \frac{dp}{dz} \Delta z$$

$$\sum F_z = 0 \quad p_A \Delta A - p_B \Delta A - dw = 0$$

$$\text{即 } p_A \Delta A - \left(p_A + \frac{dp}{dz} \Delta z \right) \Delta A - \gamma \Delta A \Delta z = 0$$

$$\text{化簡後 } -\frac{dp}{dz} = \gamma \quad (2-3)$$

$$\text{或 } -\frac{dp}{\gamma} = dz \quad (2-4)$$

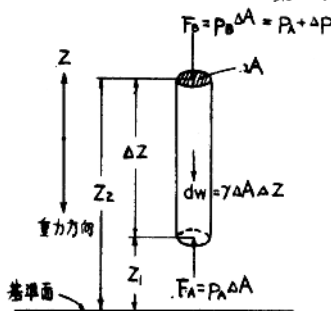


圖 2-2 靜壓流體垂直元體受力情況

(2-4) 式很明白地顯示靜態流體壓力強度，高度及重量之關係。靜態流體內任何兩點間之壓力變化更可由此流體靜力學基本方程式求得。其方法乃將 (2-4) 式積分，則

$$\int_{p_1}^{p_2} -\frac{dp}{\gamma} = \int_{z_1}^{z_2} dz$$

$$\text{得 } p_2 - p_1 = \gamma(z_2 - z_1) \quad (2-5)$$

$$\text{令 } \Delta p = p_2 - p_1, \Delta h = z_2 - z_1 \text{ 代入上式}$$

$$\text{則 } \Delta p = \gamma \Delta h \quad (2-6)$$

[例 2-1] 一容器中盛油高 0.5m，水高 1m，容器不加蓋，如圖 (2-3)。水之質量密度為 1000 kg/m^3 ，油比重 0.8，試求 (1) 油、水接觸面 p_A 之壓力強度。(2) 容器底部 p_C 之壓力強度 (若大氣壓力之絕對值為 10^5 N/m^2)。

解：壓力計所測定之壓力多以當地大氣壓力為基準，故在液體之表面壓力為零，即各點之錶示壓力：

$$p_A = 0$$

由 (2-6) 式

$$p_B = \gamma \Delta h_1 = (0.8 \times 1000 \times 9.81)(0.5) = 3920 \text{ N/m}^2$$

$$p_C = p_B + \gamma \Delta h_2 = 3920 + (1000 \times 9.81)(1) = 13730 \text{ N/m}^2$$

上述諸值皆以當地大氣壓力為基準，若以絕對壓力為絕對零值為基準，則油面之壓力 p_A 即為當地大氣壓力，即各點之絕對壓力：

$$p_A = 10^5 \text{ N/m}^2$$

$$p_B = 10^5 + 3920 = 103920 \text{ N/m}^2$$

$$p_C = 10^5 + 13730 = 113730 \text{ N/m}^2$$

此題之圖解法可參考圖(2-3)之右半部

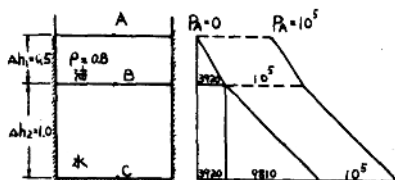


圖 2-3 例 2-1

2-3 液體壓力計 (Barometer)

液體壓力計之原理乃利用前述 2-2 節中，靜壓強度與高度之關係而得者，茲分別說明水銀氣壓計，靜壓管計及液體壓力管計等壓力計如下：

(一) 水銀氣壓計 (mercury barometer)

水銀氣壓計用以測量當地之大氣絕對壓力。將一長 1 m 之直玻璃管一端封閉（此玻璃管之直徑需大於 1 cm，且內徑均勻），水銀由開口端灌入，當灌滿管後，將開口端壓入盛水銀容器中，如圖(2-4)示：

A 點之壓力 p_A 為當地大氣壓力

p_v 為管內之水銀蒸氣壓力

h 為玻璃管中水銀柱高