

普通流體力學

增訂本

王石安編著

臺灣中華書局印行

普通流體力學序言

流體力學遠在禹王治水時代已見端倪，他用疏導方法，將洪水治平，歷代稱頌他的文章雖多，然以孟子的話最爲中肯，他說：「……禹之行水也，行其所無事也，……」，這種「行其所無事」的境界，若對於某種學問或某種技術無徹底的瞭解與豐富的經驗，決無法達到的，所以孟子說這句話的意思，是等於明白告訴我們，禹王懂得流體運動的原理，且積有豐富的經驗，才得到成功。

戰國時代的莊周、白圭，大概亦懂得流體力學的原理，白圭曾向孟子自詡治水本領比之禹王更要高明。秦昭王時李冰爲蜀守，將灌縣西南約里許臨長江處的灌口山，鑿「離堆」分江水東北流以避水患，並築都江堰調節水流，灌溉田畝，使鬧水災的成都盆地變爲沃壤。現在遺跡尚存，在兩千三百年後的今日，仍爲世界水利專家所讚譽，這個工程，雖無現代技術之名，然確有完全符合流體力學原理之實，所以我常說我國古代技術，着實高明，倘能不斷研究繼續發揚，則一脈相承下來，今日的我國何嘗不是一個科學先進國家。

流體力學是處理流體運動的一種有系統的學問。關於處理流體的各種機械無往而不是應用流體力學的理論所收到莫大的成效。如泵、水輪機、船舶、飛機、鼓風機、壓縮機、內燃機、氣輪機、噴射推進裝置、空氣調節裝置以及處理流動的液體與氣體的化學機械、電氣機械等等不勝枚舉。

流體力學是一種理論的學科，通常採用數學方法以解決問題，攻讀此門學科的人，須具有較高深的數學程度，然對於剛入大專不久，初讀流體力學的青年，要求他們有較高的數學水準，未免過苛。因此本書敘述的範圍，僅止於入門程度，並定名爲「普通流體力學」。

本書原爲本人在海洋學院所編的講義改編而成，初無意於付梓，嗣

因目前書局關於此類書籍除有數種翻印本及拙著的「應用流體力學」一書外。適當著作，堪充大專院校教材者，尚未多觀，其能減免初學者對於文字上及數學上之雙重困擾，且又能深入淺出，使青年學子易於閱讀領會，並作進一步攻讀較高深理論之流體力學的書籍，更是鳳毛麟角。故不揣譾陋，毅然公諸大眾。

本書內容，共分八章，用意重點，不外（一）為定律的解說與取材比較新穎同時視野亦較廣。（二）為期讀者易於把握理論，故對於說明恆以具體及詳切方式出之。（三）為加強單位觀念，依政府規定採用公制。（四）為培養讀者進一步攻讀較高深的流體力學的能力。

在大專院校，缺乏適當教材之今日，本書亦可作為有關科系教本之用。

匆忙脫稿，疏漏舛誤在所難免，敬祈海內碩彥不吝賜教是幸。

己酉仲秋石安識於
臺北永和醉曉石軒

普通流體力學目次

第一章 流體的物理性質

第一節	流體與固體	1
第二節	力與質量	2
第三節	比重量與密度	5
第四節	流體壓力與壓縮性	6
(4-1)	靜止流體中壓力的強度	6
(4-2)	大氣壓	7
(4-3)	靜止流體中任意點的壓力	8
(4-4)	巴斯葛耳定律	9
(4-5)	波義耳定理	10
(4-6)	流體的體積彈性係數	10
(4-7)	布萊瑪水壓機	13
第五節	氣體的狀態式	13

第二章 流體的靜力學

第一節	流體靜力學的基本式	17
第二節	在非壓縮性流體中壓力與高度的關係	18
第三節	絕對壓力與表壓力	20
第四節	壓力的測定	22
第五節	作用於平面壁的全壓力	31
第六節	壓力中心	33
第七節	作用於曲面的全壓力	36
第八節	浮力	40

第九節	浮體的安定	43
第十節	在相對平衡時的加速運動	48
第十一節	在相對平衡時的迴轉運動(強制渦)	51

第三章 流的基礎式

第一節	作用於流的流體之力	55
第二節	流學上的術語	55
第三節	連續式	61
第四節	流體粒子的加速度	63
第五節	沿流綫的運動方程式	66
第六節	沿流綫的能量式	68
第七節	伯努利定理的運用	73
(1)	托里則利定律	73
(2)	文德利管	74
(3)	皮托管	76
(4)	皮托靜壓管	78
第八節	伯努利式的擴張	82
第九節	無漩渦的圓運動	84
第十節	動量公式	89
(1)	作用於剖面變化管之力	92
(2)	作用於彎曲管路之力	93
(3)	波連接口管	95
(4)	紊流的內部摩擦及渦黏性	96
(5)	噴氣推進	98

第四章 層 流

第一節	黏 性	100
第二節	黏性的定義	101

第三節	黏性單位	105
第四節	動黏性	107
第五節	黏性的數值	107
第六節	圓管內的層流	112
第七節	平行壁間的層流	118
第八節	球的層流阻力(司徒克斯定律)	120
第九節	潤滑理論	123
(1)	滑的軸承內壓力分布	123
(2)	軸承載荷	130
(3)	軸承的摩擦力	131
(4)	泊脫爾夫式	133

第五章 管內的紊流

第一節	因次解析	135
第二節	關於流體的實驗式	136
第三節	π -定理	144
第四節	相似律	146
第五節	紊流	152
(1)	層流與紊流	152
(2)	紊流之強與其大小	156
(3)	管內紊流的摩擦應力	159
第六節	光滑管與粗糙管的摩擦係數	164
第七節	圓管內流的摩擦損失	168
第八節	圓管內的速度分布	176
(1)	層流底層之厚	181
第九節	變速度	182
(1)	剖面積作急激擴大時	185
(2)	剖面積作急激縮小時	187

(3) 擴大管.....	190
(4) 彎曲流.....	196
第十節 水力梯度綫與能量梯度綫.....	199

第六章 流量計測

第一節 壓力的測定.....	204
(1) 測壓孔的特性.....	204
(2) 液體壓力計與壓力計.....	206
第二節 速度的測定.....	207
(1) 皮托管.....	207
(2) 圓筒形皮托管.....	211
(3) 苛布拉型皮托管.....	213
(4) 球形皮托管.....	214
第三節 流量的測定.....	219
(1) 皮托管法.....	219
(2) 水槽小孔.....	222
(3) 管內小孔.....	225
(4) 噴管.....	231
(5) 文德利計.....	235
(6) 壓縮性流體的流量測定.....	236
(7) 堰.....	242

第七章 阻力

第一節 瓊朗特的提示.....	255
(1) 附面層之流.....	256
(2) 勢流.....	256
第二節 附面層的厚度.....	257
第三節 附面層的動量方程式.....	259

第 四 節	沿平板的二因次流	262
(1)	層流附面層的性質	262
(2)	紊流附面層的性質	265
第 五 節	附面層的剝離	273
第 六 節	壓力阻力	276
第 七 節	阻力係數	281
(1)	球、圓板以及其他迴轉體的阻力係數	283
(2)	圓柱與平板的阻力係數	285

第八章 壓縮性流體之流

第 一 節	壓力波的傳播速度	289
第 二 節	壓縮性流體之流相似定理(瑪哈數)	292
第 三 節	對於水平管路之流的基礎式	293
第 四 節	管內的等溫流	295
第 五 節	等溫流的臨界壓力	298
第 六 節	等溫流與非壓縮性之流的比較	301
第 七 節	在傾斜管路中的等溫流	303
第 八 節	水平管內的絕熱流	307
第 九 節	水 鎚	308
(1)	壓力波的基礎式	310
(2)	壓力上昇	314

第九章 明 水 道

第 一 節	明水道的等速流	320
(一)	明水道的定義及分類	320
(1)	明水道的定義	320
(2)	分 類	320
(a)	固定床	320

(b) 移動床	320
(二) 固定床明水道的流速	321
(1) 平均流速公式的種類	321
(a) 蔡西公式型	321
(b) 指數公式型	321
(2) 蔡西公式型	321
(a) 巴清公式	321
(b) 庫特公式	322
(3) 指數公式型	324
(a) 馬林公式	325
(b) 弗西哈伊麥公式	325
(三) 移動床明水道的流速	326
(1) 移動床	326
(2) 移動床小型水道的流速	327
(3) 移動床河川的流速	327
(a) 永井式	327
(b) 馬達克維茲式	328
(四) 流速分布	329
(1) 橫剖面的流速分布	329
(2) 鉛直方向的流速分布	329
(a) 理論式	329
(b) 實驗式	331
第 二 節 明水道的不等速流	332
(一) 關於不等速流的基礎式	332
(1) 運動方程式	332
(2) 連續方程式	334
(二) 常流與射流	335
(1) 臨界水深與臨界流速	335
(2) 常流與射流的特性	339

(3) 弗勞德數.....	339
(三) 背 水.....	340
(1) 堰上背水與低下背水.....	340
(2) 不等速流各種的水面形.....	341
(a) 廣濶的矩形剖面水道.....	342
(b) 廣濶的拋物綫形剖面水道.....	343
(i) 等速流爲常流時.....	343
(ii) 等速流爲射流時.....	344
(3) 廣濶矩形剖面水道中堰上的背水公式.....	345
(4) 廣濶的拋物綫形剖面水道中的堰上背水公式.....	348
(5) 對於一般剖面形水道的堰上背水公式.....	349
(6) 在廣濶矩形剖面水道上的低下背水公式.....	351
(7) 在廣濶的拋物綫形剖面水道上的低下背水公式.....	351
(四) 依剖面變化的不等速流.....	352
(1) 水道之寬徐徐變化時.....	352
(2) 在水道床上有結構物時.....	356

第十章 機 翼

第一節 翼的名稱.....	358
第二節 二因次翼與翼列.....	359
第三節 有限翼展之翼.....	365
第四節 螺旋槳的理論.....	369
(一) 動量理論.....	370
(二) 翼素理論.....	371
(三) 螺旋槳的諸係數.....	374
(四) 希拉伊德螺旋槳.....	375

普通流體力學

第一章 流體的物理性質

力學係研究作用於物體之力與運動關係的學問。物體在靜止狀態時，雖亦可視為運動的特殊情況，然普通力學恒分此為靜力學 (Statics) 與動力學 (Dynamics) 兩部分。前者係指作用於物體之力而能保持平衡狀態，後者則指物體不能保持平衡而作加速運動的狀態。

第一節 流體與固體

流體 (Fluid) 與固體 (Solid) 恆隨其構成的分子相互間的距離與分子運動而予以區別。即流體內分子間的距離比之固體內分子間的距離為大，又流體分子運動的範圍亦比之固體為大。例如，鐵塊加熱，則鐵分子的振幅大，其凝集力弱，遂至熔解而為流體的狀態。

流體與固體，若作適宜而確實的區別時，可用加力於其上時的動作而能表現，即流體在其靜止的狀態時不能支持剪力 (Shear force)，亦即流體裝入於容器內，對於容器的表面，若加以切綫力不問切綫力如何小，亦不能抵抗而發生永久形變。固體則不然，一直至其彈性界限為止，力與形變恒成比例，若將外力取去，比即恢復原狀。然流體僅在運動狀態時能支持剪力，此係基於流體的黏性原故。

流體普通可分為液體與氣體。液體放入於容器內，不問容器的大小，而有一定的體積。又液體如湖水的表面，恒有自由表面 (Free surface)，而氣體則常充滿於所有的空間，體積恒無一定。

氣體為易於壓縮的流體，而液體則為不能壓縮的流體。由此性質吾人亦可分之為氣體與液體。然嚴格言之，一切的流體，至某程度止，均有壓縮的可能。

空氣普通多視為壓縮性流體，然依其運動狀態，當其壓力與密度的變化極為微小時，無妨視為非壓縮性流體。例如，建築物的通風，汽車及低速度飛機周圍空氣的運動。如水與油的液體，均可視為非壓縮性流體，然如水壓鐵管中的水錘作用，狄賽爾發動機的燃料輸送管內的衝擊波，恒與液體彈性的性質有關，勢又不得不作為壓縮性流體。流體若隨其性質，可分為兩大類，如次表所示：

流體	{ 非壓縮性流體 (密度一樣時之流體) (Imcompressible fluid)	{ 非黏性流體 = 理想流體 黏性流體 (Imcompressible Viscous fluid)
	{ 壓縮性流體 (密度不一樣之流體) (Compressible fluid)	{ 非黏性流體 黏性流體 (Compressible Viscous fluid)

實際流體多少帶一些黏性，流體的運動作理論上的處理時，若考慮到黏性，即非常複雜，不考慮黏性，即非常簡單。

流體係由分子所構成，而分子則又由原子所構成。因之流體的性質及其現象恒與其分子的運動有密切關係。然於工業上的諸問題中，此流體分子的平均自由經路 (Mean free path) 比流體全體運動之大遙為微小^①，故可省略不計，而僅視流體為連續的等方性 (Isotropic) 物質。

第二節 力與質量

在力學上，有大小 (Magnitude) 與方向 (Direction) 之量，謂之有向量 (Vector quantity)，然僅有大小之量而無方向之量，謂之無向量 (Scalar quantity)。物體上某點的質點，對於時間位置的變化，謂之綫位移 (Linear displacement)。此位移因係在某一定方向的距離，故為有向量。質點對於時間位置變化的比率，即單位時間的位移，謂之綫速度

註① 例如，空氣分子的平均自由經路為 $2 \times 10^{-6} \text{cm}$ ，而管內氣流的層流底層之厚則約為 $5 \times 10^{-3} \text{cm}$ 。

(Linear velocity)。因之速度爲有大小有方向的有向量。速度中僅示其大小，則稱之爲速 (Speed)。在速中無方向之別。速度可用每秒幾公尺 (m/s) 或每時幾公里 (km/h) 的單位表之。綫速度對於時間的變化率而爲綫加速度 (Linear acceleration)。此加速度亦爲有向量。其單位爲每秒每秒幾公尺 (m/s^2)。

質點的綫速度若有變化，則其變化恒基於外力的作用。例如，在某直線上行駛之車，其速度的大小於運動之方向逐漸增加時，是即其車加速，此時於加速度的方向，係因有某力的作用。又在曲線上運動的物體，若就其速即速度之大爲一定時而察之，因此時物體速度的方向時時刻刻發生變化，故雖爲一定速的曲綫運動，亦爲加速運動。因之對此必須有外力的作用，方能使其速度發生變化。此理就流體而言，亦可應用。運動的物質，不問固體或液體，對於牛頓 (Newton) 第二定律

$$f = m a$$

〔力〕 〔質量〕 〔加速度〕

的運動基本定律恒不變。上式係表示與質點的加速度有相同的方向，且與其大小成比例之力的作用。當力爲一定時，又可表示其所生的加速度係與其質量成反比例。所謂質量者係對於使運動的狀態發生變化 (加速或減速) 的外力而加以抵抗之量。

在工學上，力的單位恒以作用於 1 kg * 質量的重力 (物體的重量) 爲重力單位。吾人稱此爲 1 kg 之力，或稱爲 1 重量公斤 (kilogram weight, kgw ，即 kilopond)^①，吾人應避免與質量的 kg * 混合。所謂 1 kg 之力者係於 1 kg * 的質量而生 9.8 m/s^2 的加速度之力。亦即於 1 kg * 質量而生 1 m/s^2 的加速度之力。其絕對單位的名稱謂之 1 牛頓。在公制中，其表示力之單位如次表所示：

① 在普通工學上，僅書爲 1 kg ，而對於質量的 kilogram 則書之爲 kg * 或爲 $\text{kg}(w)$ 。德國特將 1 kgw 書之爲 1 kilopond 。即 kp 。 $1\text{ kp} = 9.80\text{ newton}$ 。
 $1\text{ slug} = 32.17\text{ 質量 lb}$ 。

第 2-1 表

		力	質 量	加 速 度
物 理	絕對單位	1 dyne	= 1 gr	$\times 1 \text{ cm/s}^2$
	重力單位	1 grw	= 1 gr	$\times 980 \text{ cm/s}^2$
工 學	絕對單位	1 Newton	= 1 kg	$\times 1 \text{ m/s}^2$
	重力單位	1 kgw(kp)	= 1 kg	$\times 9.8 \text{ m/s}^2$

在英制系統 ft, lb, s 制中, 表示力之單位有如下表:

第 2-2 表

	力	質 量	力 速 度
絕 對 單 位	1 Poundal	= 1 lb	$\times 1 \text{ ft/s}^2$
工 學 單 位	1 lbw	= 1 lb	$\times 32.17 \text{ ft/s}^2$
	1 lbw	= 1 slug	$\times 1 \text{ ft/s}^2$

$$1 \text{ kgw} = 1000 \text{ grw} \\ = 980000 \text{ dynes.}$$

$$1 \text{ lbw} = 32.2 \text{ poundal(Pdl).}$$

運動基本定律

$$f = ma. \quad (1-1)$$

若用重力單位表示, 當重量為 W , 重力加速度為 g 時, 則為

$$m = \frac{W}{g}.$$

故上式為

$$f = \frac{W}{g} a. \quad (1-2)$$

若將單位記入之, 則為

$$f(\text{kgw 之力}) = \frac{W(\text{kg 的重量})}{g(m/s^2)} \times a(m/s^2 \text{ 的加速度}). \quad (1-2')$$

在工學上，殆全部使用此形式，此係以〔力〕為基本單位。然在物理學上，則以〔質量〕為基本單位，此無他完全為便利上的打算。

第三節 比重與密度

流體單位體積的重量 γ 謂之比重 (Specific weight)。反之，單位重量所佔的體積 v 謂之比體積 (Specific volume)。因之，前者與後者有逆數的關係，即

$$v = \frac{1}{\gamma},$$

又流體的單位體積所有的質量 ρ ，謂之質量密度 (Mass density) 或簡稱為密度，與前述 $f = ma$ 同樣

$$\gamma = \rho g, \quad (1-3)$$

$$\text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g}. \quad (1-4)$$

例如，水的重量為 $1000 \text{ kp/m}^3 (0^\circ \sim 10^\circ \text{C})$ ，重力加速度為 9.8 m/s^2 ，此時水的質量密度 ρ 為

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1000}{9.8} = 102 \text{ kp s}^2/\text{m}^3$$

或水的比重在常溫時為 62.4 lbs/ft^3 ，重力加速度為 32.2 ft/s^2 。此時水的質量密度為

$$\rho = \frac{62.4}{32.2} = 1.94 \text{ lbs s}^2/\text{ft}^3 \text{ or slugs/ft}^3.$$

流體的比重 (Specific gravity) s 為

$$\text{比重}(s) = \frac{\text{流體的比重}(\gamma)}{4^\circ \text{C 水的比重}(\gamma_w)}$$

若 $\gamma_w = 1000 \text{ kp/m}^3$ ，則任意流體的比重 γ ，若其比重 s 為給定，則由

$\gamma = 1000 \text{ s}$ 即可求得。

各種液體的比重如下表所示：

第 1-3 表 各種液體的比重(在 4°C 的水時)

液 體	比 重	溫度 $^\circ\text{C}$
乙醇 (Ethyl alcohol)	0.807	0
苯 (Benzene)	0.899	0
汽油 (gasoline)	0.66~0.69	
甘油 (glycerine)	1.260	0
水銀	13.546	20
蓖麻子油 (Castor oil)	0.969	15
亞麻仁油	0.942	15
松節油 (Oleum terebinthinae)	0.873	16

【例題 1-1】 水銀比重 s 在常溫時為 13.55，此時比重量 γ 為

【解】 $\gamma = 1000 \times 13.55 = 13550 \text{ kp/m}^3$ ，

或 $\gamma = 62.4 \times 13.55 = 845.5 \text{ lb/ft}^3$ 。

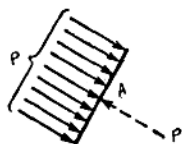
第四節 流體壓力與壓縮性

(1-4-1) 靜止流體中壓力的強度

在靜止的液體中有面積 A 平面，在此面上有垂直之力作用時，則面 A 的另一側應加以 P 之力，使之保持平衡狀態。故作用於面積 A 的壓力應為 P 。因之作用於面 A 的平均壓力的強度 p 可用

$$p = \frac{P}{A}$$

表之。



第 1-1 圖

作用於平面 A 的壓力，若面 A 的全體為一樣時，則作用於面 A 上任何小單位面積的壓力恒為一定。若不一樣時，可於面 A 中取小面積

ΔA , 而作用於此小面積的壓力為 ΔP 時, 則以

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = p$$

為其點壓力之強 (Pressure intensity)。

(1-4-2) 大氣壓

作用於物體之力, 可分為剪斷、拉長及壓縮三種, 流體對於剪力及切線力而作連續的滑移運動。對於拉長, 雖然能支持至流體分子間**凝聚**力 (Cohesive force) 的程度。然此力極為微小, 故在工學上不妨假定流體為不堪承受拉伸應力的物質。然對於壓縮應力始能表示有抵抗作用, 普通稱之為**壓力** (Pressure)。

壓力乃指每單位面積所受之力, 因之亦可稱為**壓力的強度**, 然普通均簡稱為壓力。

所謂大氣壓者係指地球表面上空氣的重量, 而用每單位面積所承受之力, 此力係與 760 mm 水銀柱底面的水銀所發生的壓力相等。大氣壓恒隨地球表面上的場所高低及時間的不同而變化, 通常以在緯度 45° 的海面上, 溫度 0°C 與高 760 mm 水銀柱保持平衡的大氣壓力為標準, 此謂之一氣壓。

今置此水銀柱的重量為 W , 體積為 V , 柱的剖面為 A , 高為 H , 密度為 ρ 時, 則

$$\begin{aligned} 1 \text{ 氣壓} &= \frac{W}{A} = \rho g H \\ &= 13.596 \times 980.665 \times 76 \text{ dyne/cm}^2 \\ &= 1.0133 \times 10^6 \text{ dyne/cm}^2 \\ &= 1.0133 \text{ megadyne/cm}^2. \end{aligned}$$

通常稱 1 megadyne 為 1 bar, 若用此單位, 則

$$\begin{aligned} 1 \text{ 氣壓} &= 1.0133 \text{ bar} \\ &= 1013.3 \text{ mb (millibar)}. \end{aligned}$$

又一氣壓用重量單位表示時, 則為