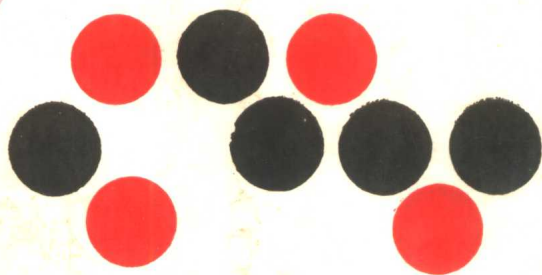


流體力學

王叔厚 著

科學技術叢書 / 三民書局印行



流 體 力 學

王 叔 厚 著

學歷：國立同濟大學畢業

經歷：成大水利工程系教授

三 民 書 局 印 行

中華民國六十一年三月初版
中華民國七十二年八月四版

流體力學

基本定價陸元貳角貳分

著者 王叔厚

發行人 劉振強

出版者 三民書局股份有限公司

印刷所 三民書局股份有限公司

臺北市重慶南路一段六十一號
郵政劃撥九九九八號

行政院新聞局登記證 版業字第〇二〇〇號

序

流體力學一門學科，爲研究氣體及液體靜止及運動之學問。近多年來已視爲工科學生所必需瞭解之知識。吾人固不可一時無空氣，亦不能一日無水，於生活之重要性固不待言，卽於吾人生存之地球而言，包蓋地球者爲空氣，其厚難以勝計，而水域佔地球之三分之二，苟於二者茫然，則何能謂之現代國民？工科學生獻身於科學之應用，尤不能不具備該門基本知識。惟足憾者，如氣體固無形態，難以捉摸，而水亦流無定質，隨境而遷，故初學者多視爲畏途。外文書籍固不乏佳作，對初學者不免有語言隔閡，常難掌握其正確觀念。

作者執教流體力學與水力學已十數年，深感徒賴西書傳授，不免事倍而功半，茲應三民書局之請，撰寫適合於大專工科學生程度，尤留意於五年專科之土木科，機械科及工業工程科學生，作爲編寫之對象，因乃輯成該書，供爲教科書本之用。

全書計十二章，分爲上下兩冊，於流體力學基本學理及應用，大致俱已羅列。惟教師可視所授學生對象，而對教材作適度取捨。例如土木科學生可不讀水力機械及壓縮性流體二章，而機械科可不讀明渠流，又倘如講授時間不足，則不穩定流一章亦可從略。

作者才淺，疏誤之處或所難免，尚祈海內外方家不吝指正爲禱。

虞山 王叔厚 謹識

於成功大學

民國六十年秋

流體力學 目錄

序

第一章 流體特性

1-1 諸論	1
1-2 因次及單位	2
1-3 固體與流體之區別	4
1-4 液體與氣體之區別	5
1-5 流體之一般特性	6

第二章 流體靜力學

2-1 流體靜壓力	21
2-2 壓力與高度之關係	23
2-3 壓力之傳達	29
2-4 虹吸作用	31
2-5 流體壓力之計量	31
2-6 作用於平面之靜壓力	44
2-7 作用於曲面之靜壓力	51
2-8 水管或圓筒殼內之圈張力	54
2-9 浮力	56
2-10 潛體與浮體之穩定	58

第三章 流體運動學

3-1 流體之運動·····	77
3-2 流體運動之種類·····	79
3-3 穩定流與不穩定流·····	80
3-4 流線，路線與流管·····	81
3-5 均勻流一元流二元流與三元流·····	83
3-6 連續性原理·····	84
3-7 二元平面流之連續方程式·····	86
3-8 流函數·····	89
3-9 漩性流與非漩性流·····	93
3-10 速度勢函數·····	95
3-11 流體運動之加速度·····	97
3-12 流網分析·····	99

第四章 流體動力學

4-1 流體之無摩擦運動·····	109
4-2 流體運動之動力方程式·····	110
4-3 伯努利方程式·····	112
4-4 能量方程式·····	113
4-5 全断面流道之能量方程式與伯努利方程式·····	120
4-6 伯努利方程式之應用·····	125
4-7 衡量—動量方程式·····	138
4-8 動量方程式之應用·····	141
4-9 受束液體之動力學·····	157
4-10 曲線中之流體·····	161

4-11 水力機械之功率	167
--------------	-----

第五章 流體之粘性

5-1 實際流體之特性	185
5-2 粘性之測定	186
5-3 層流，亂流，及雷諾數	187
5-4 層流之不穩定性	191
5-5 流體之層流運動	192
5-6 剪應力與壓力梯度之關係及二平行邊界間之層流	197
5-7 庫蒂流	200
5-8 波西爾與史脫克方程式	206
5-9 流體流經非水平管時之情況	210
5-10 亂流及統計理論在亂流問題之應用	213
5-11 亂流之半徑驗理論	214

第六章 因次分析及模型相似性

6-1 因次分析在流體力學上之重要性	223
6-2 因次及因次齊次性	224
6-3 因次分析	226
6-4 因次分析在實驗資料表達上之應用	238
6-5 模型相似性	239

第七章 不可壓縮之流體在圓管 及非圓管內之流動

7-1 管流摩擦損失之基本方程式	251
------------------	-----

4 流 體 力 學

7-2 管流摩擦係數.....	258
7-3 圓管內之層流運動.....	260
7-4 光滑管內亂流之實驗結果.....	263
7-5 圓管內亂流速度分佈之一般定律.....	275
7-6 光滑管內亂流之速度分佈.....	280
7-7 在粗糙管內亂流之速度分佈.....	287
7-8 光滑管及粗糙管可同樣適用之亂流速度分佈方程式.....	292
7-9 管內亂流阻力之一般定律.....	297
7-10 商用管之阻力圖表.....	300
7-11 在非圓形斷面封閉管內之亂流.....	305
7-12 管路內之次要損頭.....	311
7-13 流體力學對工程上管流問題之應用.....	322

第八章 熱力學概述

8-1 熱力學第一定律.....	343
8-2 熱力學第二定律.....	345
8-3 完全氣體.....	346
8-4 流體型態改變過程.....	349

第九章 可壓縮氣體之流動

9-1 音速.....	356
9-2 馬赫數及馬赫錐.....	358
9-3 完全氣體之等熵流.....	362
9-4 完全氣體無摩擦之非絕熱流.....	378
9-5 正震波.....	382
9-6 管內有摩擦之可壓縮氣體流.....	390

9-7 凡諾線，雷萊線及正震波·····	406
----------------------	-----

第十章 明渠道中之流

10-1 明渠流之基本概念·····	419
10-2 明渠流之分類·····	420
10-3 均勻流·····	422
10-4 明渠斷面之速度分佈·····	429
10-5 明渠流之比能量與臨界水深·····	431
10-6 經濟斷面之設計·····	435
10-7 漸變流·····	437
10-8 水躍現象·····	439
10-9 明渠流之計量·····	443

第十一章 邊界層

11-1 邊界層之行綫·····	454
11-2 邊界層之動量方程式·····	458
11-3 在等速自由流內無壓力梯度之平板·····	463

第十二章 電力與升力

12-1 潛體阻力之概念·····	483
12-2 曳力·····	485
12-3 曳力係數·····	495
12-4 興波曳力·····	503
12-5 流體壓縮性對曳力之影響·····	504
12-6 升力之現象·····	508
12-7 環流·····	510

12-8 升力之環流理論及麥格納氏效應·····	513
12-9 圍繞飛機之環流·····	519
12-10 機翼之升力係數·····	522
12-11 有限長度機翼之誘導曳力·····	524
12-12 流體壓縮性對升力之影響·····	529

第十三章 流體之測定

13-1 流體性質之測定·····	537
13-2 靜壓力之測定·····	542
13-3 流體表面高程之測定·····	545
13-4 停滯點壓力之測定·····	547
13-5 非壓縮性流體之流速測定·····	548
13-6 風速儀與流速儀·····	551
13-7 總水量之測定·····	553
13-8 文德利表·····	554
13-9 噴口流量計·····	556
13-10 孔口式流量計·····	558
13-11 畢托管法計算流量·····	563
13-12 鹽速法·····	564
13-13 堰·····	565
13-14 流速儀·····	570

第十四章 渦輪機與抽水機

14-1 渦輪機之種類·····	575
14-2 反力式渦輪機·····	576
14-3 衝擊式渦輪機·····	582

14-4 渦輪機之型式·····	584
14-5 渦輪機之比速·····	589
14-6 渦輪機之特性曲線·····	592
14-7 離心式抽水機·····	594
14-8 離心式抽水機之作功與效率·····	597
14-9 離心式抽水機之最小起動轉速·····	599
14-10 離心式抽水機之比速·····	600
14-11 離心式抽水機之特性曲線·····	602
14-12 旋葉之最小直徑·····	603
14-13 多級抽水機·····	604

第十五章 不穩定流

15-1 蓄水庫進水狀況之討論·····	609
15-2 管路中之不穩定流·····	614

第一章 流體特性

1-1 緒 論

流體力學 (*Fluid Mechanics*) 爲討論流體在靜止及運動時之現象，性能及定律以及其作用於物體上之力等之學問，可分爲三部份：研究流體之靜止者爲流體靜力學 (*Hydrostatics*)；研究流體之流動者，爲流體運動學 (*Hydrokinematics*)；其研究流體運動時所生之力等之情形者，則謂之流體動力學 (*Hydrodynamics*)。

近代流體力學爲由水力學 (*Hydraulics*) 及古典流體動力學 (*Classical Hydrodynamics*) 二者演變而成人們因須解決許多實際問題如給水、灌溉、航運、水力發電等而水力學自古卽與工業發生密切關係，但水力學大半爲根據經驗而得，工程師們根據現場觀察及實驗室之試驗，得到許多經驗公式，經驗曲線，經驗係數等，應用時全視個別問題之情形而定，故應用範圍被限制，且須加以判斷，又此等經驗公式內所用之因次在公式內各項常不相同。

與實用之水力學相反者爲所謂古典流體動力學，早年之一些數學家及理論物理學家專門注重在理論方面研究流體之運動，爲使複雜之算式簡單化，將流體加以許多假設最主要者爲假設流體爲無粘性及不可壓縮等而處理之，並不考慮流體之真正特性，由此導出之結果，往往與事實不符，故實用水力學與古典流體動力學二者都有缺點，後來因數學方面逐漸進步及航空方面之發展及需要，將理想流體之研究推廣至有粘性及有壓縮性之流體，又因水力學原來大部偏重於水之研究，後來化學工程，石油工程及航空工程等逐漸發展，以致原來之水力學

亦不够滿足需要而引至將古典流體動力學與實用水力學二者逐漸合併而成爲近代之流體力學，此流體力學用基本理論導出較合理之方程式，在此等方程式內引入實驗所得之係數，而發展成許多公式，此等公式可應用於遠超過實驗資料之限度，且亦可用於與在實驗內所用者性質不同之流體，故其應用可遠較實用水力學廣泛。

近代流體力學爲由德人 *Ludwig Prandtl* (1875-1953) 所始創，其邊界層理論 (*Theory of Boundary Layer*) 使對研究流體力學之了解有非常大之幫助。

輓近流體力學發展進步甚速，公式之推進，理論之發展，日新月異，但尚有許多問題，以目前之理論尚不能解決，更待作進一步之研究。

1-2 因次及單位

流體有各種特性，包括流體本身固有之特性（如密度，粘性等）及流動特性（如流速，加速度，能量，衝量等），此種特性，（或表示此種特性之物理量），通常均可用因次表示之，如速度爲長度及時間之比，故可用長度及時間之因次之比，即 $\frac{L}{T}$ 表示之，此 $\frac{L}{T}$ 即速度之因次，又能量之因次則爲 ML^2T^{-2} （其中 M 爲質量之因次），餘類推。

流體力學可用質量 (M)，力 (F)，長度 (L) 及時間 (T) 等四種所謂基本因次及其各種組合（除溫度不計在內外）以表示流體各種特性或物理量，其中僅用三種獨立之基本因次（如 FLT 或 MLT 等）即可足夠完全敘述任何流體運動。

任何物理量之因次，可由其定義或定律表示之，如前面所述之流速 = $\frac{\text{長度}}{\text{時間}} = \frac{L}{T}$ ，密度 = $\frac{\text{質量}}{\text{容積}} = \frac{M}{L^3}$ 等，在表示各種物理量關係之方程式

內各項之因次均須相同，否則此方程式即不能正確。

因各種因次可用不同單位計量之，如長度 (L) 可用英尺 (ft)，英寸 (in)，公尺 (m) 及公分 (cm) 等，力可用公斤 (kg)，重量公斤 (kgw)，重量公分 (grw) 等，時間可用秒 (sec)，分 (min) 及小時 (hr) 等表示之，故有各種不同之單位制。

常用之基本單位列於表1-1及1-2，均用牛頓第二定律 力 = 質量 × 加速度 之單位表示之

表 1-1

公制				
		力	質 量	加 速 度
物 單	絕 對 單 位	1 <i>dyne</i>	= 1 <i>gr</i>	× 1 <i>cm/sec</i> ²
理 位	重 力 單 位	1 <i>grw</i>	= 1 <i>gr</i>	× 980 <i>cm/sec</i> ²
工 單	絕 對 單 位	1 <i>Newton</i>	= 1 <i>kg</i>	× 1 <i>m/sec</i> ²
程 位	重 力 單 位	1 <i>kgw(kp)</i>	= 1 <i>kg</i>	× 9.8 <i>m/sec</i> ²

$$1 \text{ kp} = 9.80 \text{ newton}$$

$$1 \text{ grw} = 980 \text{ dynes}$$

表 1-2

英制				
		力	質量	力速度
絕 對 單 位		1 <i>poundal</i>	= 1 <i>lb</i>	× 1 <i>ft/sec</i> ²
工 程 單 位		1 <i>lbw</i>	= 1 <i>lb</i>	× 32.17 <i>ft/sec</i> ²
	(或 1 <i>lbf</i>)	= 1 <i>lbm</i>	× 32.17 <i>ft/sec</i> ²	
	1 <i>lbw</i>	= 1 <i>slug</i>	× 1 <i>ft/sec</i> ²	
	(或 1 <i>lbf</i>)	= 1 <i>slug</i>	× 1 <i>ft/sec</i> ²	

$$1 \text{ lbw} = 32.17 \text{ poundal}$$

$$1 \text{ slug} = 32.17 \text{ lbm}$$

上表內 *lbw* (*pound weight*) 或 *lbf* (*pound force*) 為重量磅或力磅，為力之單位，此為使 1 *lb* 或 1 *lbm* 之質量生 32.17 *ft/sec*² 之加

速度之力之單位。

lbm (*poundmass*) 或 lb (*pound*) 爲質量磅或磅，爲質量之單位。

[註]: 工程單位用 lbf (或 lbw) 及 lbm 以區別力及質量

$slug$ 則爲另一質量單位，爲由一重量磅之力生 1 ft/sec^2 之加速度而導出之質量單位。

又表 1-1 內 kgw (即 *kilogram weight*) 爲重量公斤 (普通常寫爲 kg)，近來德國將 kgw 寫爲 kp (即 *Kilopound*)，故 kp 可譯爲重量公斤，或簡譯爲公斤亦可。

在本書內除特別指定者外，爲使初學者不受覆雜單位之困擾起見，在流體靜力學及流體動力學內均以磅 (lb) 爲力之單位，而質量則在流體動力學內以 $slug$ 爲單位而計算之。

讀者對單位方面如欲徹底了解，於讀完流體力學後，可再參考其他有關討論單位較詳細之流體力學書籍，作進一步之研究。

1-3 固體與流體之區別

在通常之溫度及大氣壓力下，物體狀態可分爲固體 (*Solids*) 與流體 (*Fluids*) 兩種。

一般言之，固體各質點間之內聚力頗大，除用相當之力外，不易使之變形，而流體則與固體不同，雖加極小之力，即可使其形狀改變，但粘性頗高之流體 (如膠質液體等) 流動甚慢，易與塑性固體 (此種固體加熱後將溶解) 相混雜。

流體與固體可由其受剪力後之不同反應狀況而區別之，即固體受剪力後，設其變形在彈性範圍內，則應力與應變 (即單位變形量) 成正比，其比例常數爲切變彈性係數，設應力超過彈性極限，則材料即生永久變形，但流體受剪力時，不論其值之如何微小，流體將連續不

斷而變形，當剪力移去後，雖流動停止，但流體不再回復其原來形狀。此即流體之切變彈性係數等於零，又流體受剪力後其剪應力與剪應變率或形變速率成正比，其比例常數為流體之粘性，此為其與固體不同之點。

1-4 液體與氣體之區別

流體本身又可分為液體 (*Liquids*) 及氣體 (*Gases*) 兩種。茲就液體與氣體不同之特性分述如下：

(一) 液體有一定之體積，氣體則無固定之容積。

液體放入於容器內，不問容器之大小，有一定之體積。而一定量之氣體，則不論其容器之大小為何，恒充滿於容器之所有空間，故其體積恒無一定。

(二) 氣體為可壓縮，液體則可視為不可壓縮。

氣體之內聚力甚小，其分子間之距離及分子運動之範圍甚大，其體積受壓力及溫度之影響甚大，故氣體為易以壓縮之流體，而液體則其體積受壓力而變更之影響甚微，故通常可假設為不可壓縮之流體，

(雖然實際上如水在壓力小於70氣壓時，每增加一氣壓，約減縮原體積之 $\frac{1}{20,000}$) 但亦有例外情形，如水管中之水鎚作用，狄賽爾發動機

(*Diesel motor*) 之燃料輸送管內之衝擊波等，恒與液體彈性之性質有關，此時之液體不得不作為可壓縮之流體，又氣體設在運動時，其壓力與密度之變化極為微小，則亦無妨視為非壓縮性流體而計算之。

(三) 液體有自由面，氣體則無自由面

液體可有一自由面，嚴格言之，自由面上除液體本身之汽壓外，應無其他壓力，但通常自由面可視為不與容器面接觸之面，此面可受

或不受大氣壓力，氣體則無自由面，此不待言而知之。

1-5 流體之一般特性

單位體積重量 (γ)，或稱**比重量** (*Specific weight*)，或簡稱**單位重量**，即流體單位體積質量之重量。

$$\gamma = \frac{W}{V} \dots\dots\dots (1-1)$$

其中 W = 流體某體積之重量， V = 流體體積

其單位為 lb/ft^3 ， kg/m^3 等

設流體在運動時其高度有變化，則計算問題時流體之單位重量 γ 即變為重要。

質量 (M) (*Mass*) 所有流體均有質量，其基本特性為其慣性或流體運動變更時之阻力。

$$M = \frac{W}{g} \dots\dots\dots (1-2)$$

其中 W = 流體某體積之重量

g = 重力加速度

質量密度或密度 (ρ) (*Mass density* 或 *density*) 或稱**比質量** (*Specific mass*) 即單位體積之質量 $\rho = \frac{\gamma}{g} \dots (1-3)$ 又 $\rho = \frac{M}{V} \dots (1-4)$

單位為 $\frac{slugs}{ft^3}$ 或 $\frac{lbsec^2}{ft^4}$ 或 $\frac{gr}{cm^3}$ 等。

當流體運動變更時則流體密度即變為重要。

比重 (S) (*Specific gravity*)，為一流體與水在 $4^\circ C (39^\circ .2F)$ 時之單位體積重量 γ 之比，即

$$S = \frac{\gamma \text{ (流體)}}{\gamma \text{ (水在 } 4^\circ C \text{ 時)}} \dots\dots\dots (1-5)$$