

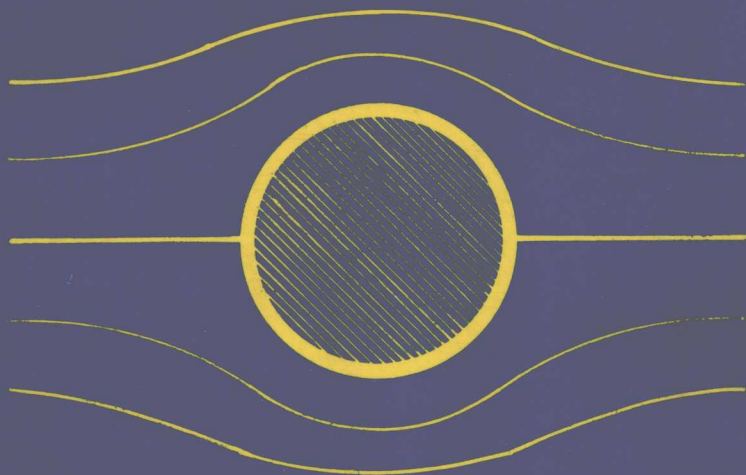
大 專 用 書

流體力學概論

—— 附歷屆高考・研究所・公費留考

及各大學期中期末考題 ——

許 源 鏞 編著
黃 和 順



文京圖書有限公司

大 專 用 書

流體力學概論

—— 附歷屆高考・研究所・公費留考

及各大學期中期末考題

許 源 鏞 編著
黃 和 順



文京圖書有限公司

有著作權 不准翻印

流體力學概論

(平裝)基本定價：**6元6角7分整**

中華民國 75 年 6 月 15 日 印刷
中華民國 75 年 6 月 20 日 發行
中華民國 76 年 7 月 15 日 修正二版

編著者：許 源 鏞、黃 和 順
出版者：文 京 圖 書 有 限 公 司
台北市延平南路 216 巷 6 號 2 樓
TEL：(02)3813457・3813141

郵撥：0018007-0 郵區：107

本公司登記證字號：行政院
新聞局局版台業字第 0929 號
發行人：陳 炳 煌

台北市延平南路 216 巷 6 號 2 樓

TEL：(02)3813457・3813141

.....
本書著作權執照：台內著字第 號
.....

印刷者：東雅印製廠有限公司

台北市西藏路 5 2 8 號

TEL：(02) 3 0 8 4 8 8 6

※本書如有缺頁、亂釘、破損請以掛號寄回本公司更換。

序

本書係遵照教育部民國七十二年元月公佈五年制及二年制工業專科學校流體力學概論課程標準編輯而成。

全書共分六章，包括概論、流體靜力學、流體動力學、管流、物體之受力與流體測量等，理論與實務並重，敘述力求精簡，其目的在使初學者了解並熟悉流體力學之基本定義與概念，進而應用於流體機械、水力工程、氣體動力學及潤滑學等相關課程，適合大專機械、輪機、土木等相關科系教學及工程界人士參考之用。

資訊時代來臨，帶給各行各業無比之震撼，本書利用時下流行之 Apple II 個人電腦，解決甚多繁複之計算，並藉以使學生明瞭電腦之應用。

全文採用國際單位制（S I）制，專門名詞以教育部七十一年四月公佈機械工程名詞為準，每章之後附有習題，有些需以電子計算機求解，希能使讀者在研習之餘，更能收融會貫通之效。書末並附有歷屆高普考、研究所入學考試、公費留考及名大專期中考與期末考題，期使讀者能應付各類考試，為坊間最完整之考古圖書。

完稿之際，承多位先進提供寶貴意見及不辭辛勞的校稿與繪圖，使本書得更盡善盡美，不勝感激。筆者才疏學淺，疏漏錯誤之處，尚祈專家學者不吝指正，俾再版時得以更正，不勝感荷。

許源鏞、黃和順 謹識

七十五年五月於台北

目 錄

第一章 概 論	1
1.1 流體之特性	1
1.1.1 流體的定義	1
1.1.2 牛頓黏性定律	2
1.1.3 流體的分類	3
1.1.4 力量、質量與長度單位	5
1.1.5 黏 度	6
1.1.6 密度、比容、比重量、比重與壓力	9
1.1.7 壓縮性與容積彈性模數	11
1.1.8 蒸氣壓力	13
1.1.9 表面張力與毛細現象	13
1.2 流體力學與工程	18
1.3 電子計算機在流體力學之應用	19
習題一	23
第二章 流體靜力學	31
2.1 相對壓力與絕對壓力	31
2.1.1 壓力強度	31
2.1.2 絕對壓力與錶壓力	31
2.2 巴斯噶定律及其應用	35
2.2.1 一點之壓力	35
2.2.2 靜止流體壓力之變化	37

2 流體力學概論

2.2.3 可壓縮流體中壓力之變化	39
2.2.4 液體壓力計	40
2.2.5 沉體平面壁之受力	46
2.3 浮力	56
2.3.1 浮力與浮力中心	56
2.3.2 比重計	57
2.4 浮體穩定	59
2.5 相對平衡	61
2.5.1 等線加速度	61
2.5.2 繞垂直軸等速旋轉	65
習題二	69

第三章 流體動力學

81

3.1 穩流與非穩流	81
3.1.1 描述流體運動之方法	81
3.1.2 流動特性與定義	82
3.2 路線、流線與流脈	85
3.3 連續性原理	87
3.3.1 系統與控制體積之觀念	87
3.3.2 系統與控制體積之關係	88
3.3.3 連續方程式	91
3.4 柏努利定理	98
3.4.1 沿一流線之歐拉運動方程式	98
3.4.2 柏努利方程式	100
3.4.3 柏努利方程式之修正與應用	104
3.4.4 不穩定流之柏努利方程式	108

3.5 動量方程式	110
3.5.1 動量方程式	110
3.5.2 動量方程式之運用	115
3.6 自由旋渦與強制渦動	123
3.6.1 橫過流線間柏努利常數的變化	123
3.6.2 自由旋渦	124
3.6.3 強制渦動	125
3.7 孔蝕現象	125
習題三	127
第四章 管 流	137
4.1 雷諾數	137
4.2 層流與紊流	141
4.2.1 層 流	141
4.2.2 紊 流	142
4.2.3 有固體為界面的流動	147
4.3 管路摩擦及管路損失	149
4.3.1 基本方程式——不可壓縮流體	149
4.3.2 圓管摩擦問題的因次分析——不可壓縮流體 ...	153
4.3.3 圓管摩擦實驗的結果	154
4.3.4 圓管中的層流分析	162
4.3.5 圓管中的紊流分析	165
4.3.6 非圓管的管摩擦	168
4.4 管路中其他各種損失計算	169
4.5 管路設計	175
4.5.1 單管管路問題	176

4 流體力學概論

4.5.2 多管管路問題	180
4.5.3 計算機程式之應用	185
習題四	211

第五章 物體之受力

219

5.1 動量與動力	220
5.1.1 擴大或收縮的彎管、通管	220
5.1.2 通道的陡擴	224
5.2 噴 流	225
5.2.1 作用於葉片上的衝擊力	226
5.2.2 噴射推進	230
5.2.3 火箭推進	232
5.3 絕對速度與相對速度	234
5.4 輪機機械之扭矩	236
5.5 物體之阻力與升力	239
5.5.1 基本原理與定義	239
5.5.2 阻力與升力的因次分析	244
5.5.3 邊界層的特性	247
5.5.4 阻 力	248
5.5.5 升 力	250
習題五	260

第六章 流體測量

267

6.1 流體性質的測量	267
6.1.1 流體密度的測量	267
6.1.2 黏度測量	269

6.2 壓力測量	271
6.2.1 靜壓測量	273
6.2.2 停滯壓力的測量	274
6.2.3 液面高度的測量	276
6.3 流速測量	277
6.3.1 皮托靜壓管	277
6.3.2 風速計與流速計	280
6.3.3 熱線與熱膜流速計	282
6.4 流量測量	284
6.4.1 總量法	284
6.4.2 文氏流量計	285
6.4.3 流量噴嘴	288
6.4.4 孔口流量計	289
6.4.5 肘管流量計	291
6.4.6 稀釋法	292
6.5 實 流	293
6.5.1 光學法	293
6.5.2 氫氣泡沫法	293
參考書目	295
習題六	298
附錄 A 習題參考答案	305
A.1 習題一參考答案	305
A.2 習題二參考答案	311
A.3 習題三參考答案	323
A.4 習題四參考答案	333

6 流體力學概論

A.5	習題五參考答案	345
A.6	習題六參考答案	355
附錄 B	基本數學運算	365
B.1	符 號	365
B.2	向量的乘積	366
B.2.1	點乘積 (或純量積)	366
B.2.2	叉乘積 (或向量積)	368
B.3	向量的微分	369
B.4	向量的運算子, ∇	370
B.4.1	∇ 之定義	370
B.4.2	梯 度	371
B.4.3	散 度	371
B.4.4	旋 度	372
B.4.5	拉氏運算子 ∇^2	373
B.5	向量恒等式	374
B.5.1	$\nabla \times \nabla \phi = 0$	374
B.5.2	$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \frac{1}{2} \nabla (\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}) - \mathbf{V} \times (\nabla \times \mathbf{V})$	375
附錄 C	流體的物理性質	377
附錄 D	符 號	381
附錄 E	轉換因子	383
附錄 F	歷屆考題	395

第一章 概 論

自古以來即存在著供水、灌溉、水力的利用與航海等問題，啓發人類追求流體所造成各相關現象的知識。在流體各相關知識尚淺陋的時代，如在西元六百年間，中國隋朝時期即已開鑿江南河、廣通渠等運河，以興水利，另外關於水輪機（Water turbine）及泵（pump）之使用，以及下水道系統之建立，亦隨農業技術之精進及城市逐漸擴大而阿基米德的浮力原理（laws of buoyancy）以外，在當今流體力學的領域中，幾無一席之地。

在二十世紀，流體相關問題皆是用日漸改良的合理方法來解決，另外則傾向於更複雜、更有挑戰性的問題，例如人口心臟或腎臟的研究，廢棄物在海洋中散佈的情形，超音速飛機產生的音爆，太空梭中燃料泵浦與廢棄物排洩問題，氣象資料的取得與預測等。因此今日的流體力學，已經發展成不同的領域，諸如醫學、氣象學、天文學、海洋學的主要部分，並且仍是傳統工程重要的一環。

1.1 流體之特性

1.1.1 流體的定義（Definition of a fluid）

所謂流體是指受到任何大小剪應力作用時，皆會產生連續變形的物質。剪應力是指切於表面之分力除此面之面積所得的應力值。

一般而言，我們可將物質分為兩大類，即固體與流體，流體則包括液體與氣體。固體與流體最大的區別在於固體可以承受某定量的拉力、壓力與剪力，在此定量的範圍內，只要外力不變，則受力不變。而流體其抗拉強度甚小，且只有在拘束的情形下才能承受壓力，靜止

2 流體力學概論

中的流體無法承受剪力，此皆與固體有很大的差別。

流體中液體與氣體最大的區別則在於其壓縮性的大小，一般而言，氣體的壓縮性較液體的壓縮性大的多多。

1.1.2 牛頓黏性定律 (Newton's law of viscosity)

在圖 1.1 中，將流體置於兩平行平板間，下板被固定，上板受到 F 力的作用。在面積 $a b c d$ 的流體至另一新位置 $a b' c' d$ ，每一流體質點的速度 u ，由固定平板的靜止狀態（速度為零），變化至上平板的速度為 U 。

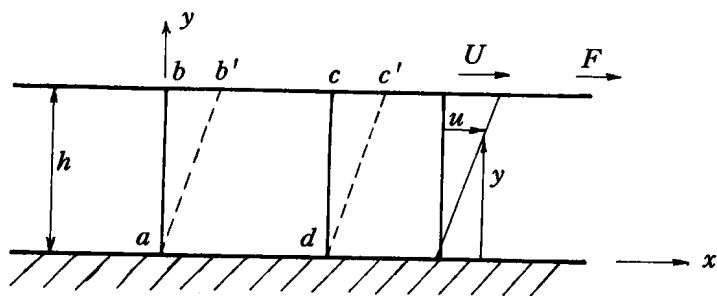


圖 1.1 平行平板間流體受剪力後之變形

由實驗得知， F 與 A 、 U 成正比，與厚度 h 成反比，因此可表為

$$\begin{aligned} F &\propto \frac{AU}{h} \\ &= \mu \frac{AU}{h} \end{aligned}$$

式中 μ 為比例常數。若由剪應力的定義

$$\tau = \frac{F}{A}$$

代入上式可得

$$\tau = \mu \frac{U}{h}$$

將上式再表示成微分型式

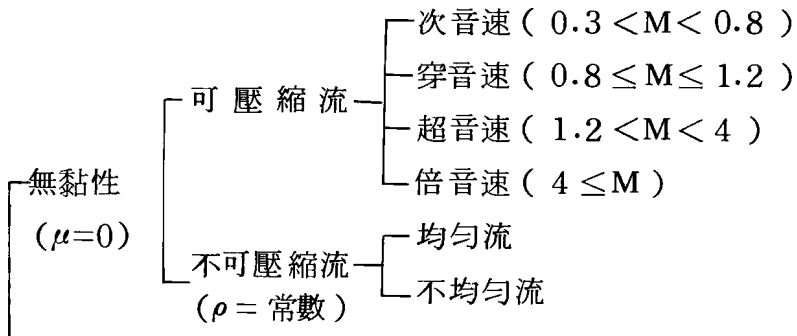
$$\tau = \mu \frac{d u}{d y} \quad (1.1)$$

式(1.1)即所謂牛頓黏性定律(Newton's law of Viscosity)，比例常數 μ 稱為流體的黏度(Viscosity)。因為一切真實流體皆具有黏性，所以流體流動時皆有磨擦現象發生。

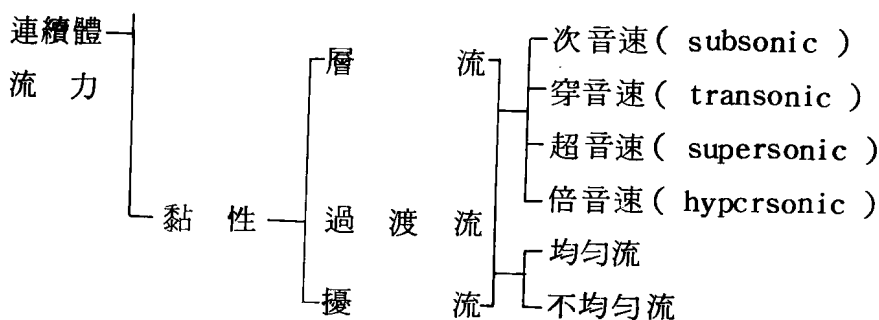
- 【討論】：
- (1)流體的黏性是因流體層間的凝聚力與分子動量轉移率，造成流體層間的剪應力而生成。
 - (2)流體黏性與固體間之運動磨擦不同，壓力項沒有出現在式(1.1)中， τ 與 μ 沒有關係。
 - (3)無論剪應力 τ 如何小，皆會使流體流動。
 - (4)無論黏度 μ 值大小如何，當 $du/dy = 0$ 時， $\tau = 0$ ，此即靜止流體內沒有剪應力。
 - (5)固體邊界上速度必須為零。

1.1.3 流體的分類

在深入探討流體力學之前，我們以流體流動之特性，將流體力學給予分類如下：



4 流體力學概論



上表中， M 為馬赫數（Mach number），將在後文中再詳加說明。

另外我們亦可將牛頓黏性定律，即式（1.1）繪製圖形，如圖 1.2 所示。圖中各種物質或流體，再詳加說明如下：

1. 固體，即圖中的垂直座標，不論 τ 值為何，其變形率 du/dy 皆為零。
2. 無黏性流體，圖中的橫座標，即 $\mu = 0$ 之流體。
3. 牛頓流體（Newtonian fluid），流體所受的剪應力與其變形率成正比關係，亦即遵循牛頓黏性定律的流體。除此之外，其他的流體則稱為非牛頓流體（Non-Newtonian fluid）。

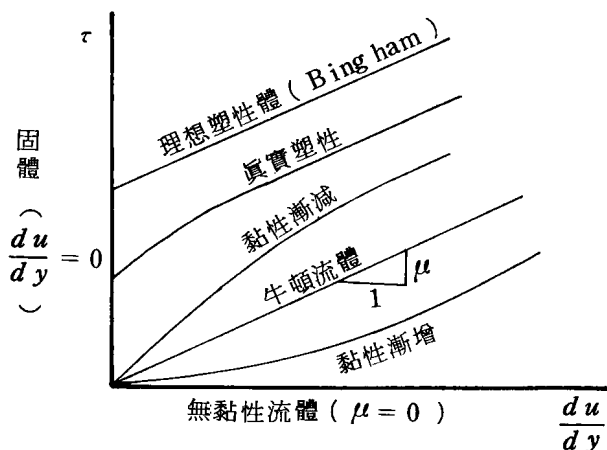


圖 1.2 剪力與變形率關係圖

4. 非牛頓流體包括懸浮液與一些高分子溶液等，其剪力與變形率之關係，可歸納如下：

$$(1) \quad \tau - \tau_1 = \mu \frac{du}{dy} \quad \tau > \tau_1 : \text{塑性體 (牙膏)}$$

$$(2) \quad \tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

$n > 1$: 黏性漸增流體
 $n < 1$: 黏性漸減流體

5. 理想流體 (Ideal fluid)，指無黏性且不可壓縮 (即 $\mu = 0$ 且 $\rho = \text{常數}$) 之流體。

1.1.4 力量、質量與長度單位

本書中將採用國際單位制 (Systeme International d'Unite's，簡稱 S I 制)。常用之基本量及導出量，在 S I 制之單位及簡寫如下所示。

<u>物理量</u>	<u>國際單位制</u>
<u>基本量</u>	
長度 (L)	米 (m)
質量 (M)	公斤 (kg)
時間 (T)	秒 (sec)
絕對溫度	凱氏溫度 (K)
常用溫度	攝氏溫度 (°C)
<u>導出量</u>	
力	牛頓 (Newton)
能量	焦耳 (Joule)
功率	瓦特 (Watt)
壓力	巴 (Pa)

6 流體力學概論

國際單位制有其優點，包括沒有含糊的定義，且皆為十進位，並且能分辨力與質量的區別。由牛頓第二運動定律

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

可知

$$1 N \equiv 1 \text{ kg m} / \text{sec}^2$$

此即一單位力施於一單位質量上可產生一單位加速度，在使用上甚為方便。

在國際單位制中，10 幕次方可以字首來表示，例如 $10^3 \text{ g} = 1 \text{ kg}$ ， $100 \text{ cm} = 1 \text{ m}$ 等。常用的字首如下表所示。

表 1.1 S I 制中的字首與縮寫

倍 數	S I 字首	縮 寫	倍 數	S I 字首	縮 寫
10^9	giga	G	10^{-3}	milli	m
10^6	mega	M	10^{-6}	micro	μ
10^3	kilo	k	10^{-9}	nano	n
10^{-2}	centi	c	10^{-12}	pico	p

1.1.5 黏度 (Viscosity)

在所有的流體性質中，黏度為研究流體流動時，最需優先考慮的項目。本節中將討論黏度的自然現象、特性、因次及絕對黏度 (absolute Viscosity) 與運動黏度 (kinematic viscosity) 等。

一般而言，物質的黏度與流體間的凝聚力和分子間的動量轉移率有關。液體分子與分子間距離較小，因此流體層間的凝聚力是造成液體黏度的主因，溫度升高時，流體層間的凝聚力減小，因此液體的黏度隨溫度增加而減少。氣體分子與分子間距離遠較液體分子間距離為大，因此流體分子間的動量轉移率為造成氣體黏度之主因，溫度升高時，流體分子運動速率加快，動量轉移率增加，因此氣體的黏度隨溫

度增加而增加。黏度與溫度關係如圖 1.3 所示。

至於壓力而言，在一般壓力下，流體的黏度與壓力無關，只與溫度有關。但在非常大的壓力下，流體的黏度大部分隨壓力而變化無常由牛頓黏性定律

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}$$

上式中各變數的單位如下：

τ ：剪應力 FL^{-2}

u ：速度 LT^{-1}

y ：距離 L

因此 μ 的因次為 $FL^{-2}T$ ，由牛頓第二定律，可將力量表為質量、長度與時間之關係，即 $F = MLT^{-3}$ ，故黏度的因此可為 $ML^{-1}T^{-1}$ 。

因此有下列二種黏度單位：

FLT 系統： $N \text{ sec} / m^2$ ($FL^{-2}T$)

MLT 系統： $kg / m \text{ sec}$ ($ML^{-1}T^{-1}$)

一般常以泊 (Poise) 或百分泊 (Centipoise) 來表示黏度，其定義為

$$1 \text{ poise} = 1 \text{ dyne sec} / \text{cm}^2$$

$$= 1 \text{ g} / \text{cm sec}$$

$$1 \text{ centipoise} = 10^{-2} \text{ poise}$$

黏度 μ 通常稱為絕對黏度 (absolute viscosity) 或動力黏度 (dynamic viscosity)。我們又另外定義運動黏度 (kinematic viscosity) ν ， ν 為黏度與密度之比

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.2)$$

運動黏度的因次為 $ML^{-1}T^{-1} / ML^{-3} = L^2T^{-1}$ ，在 S I 制中的單