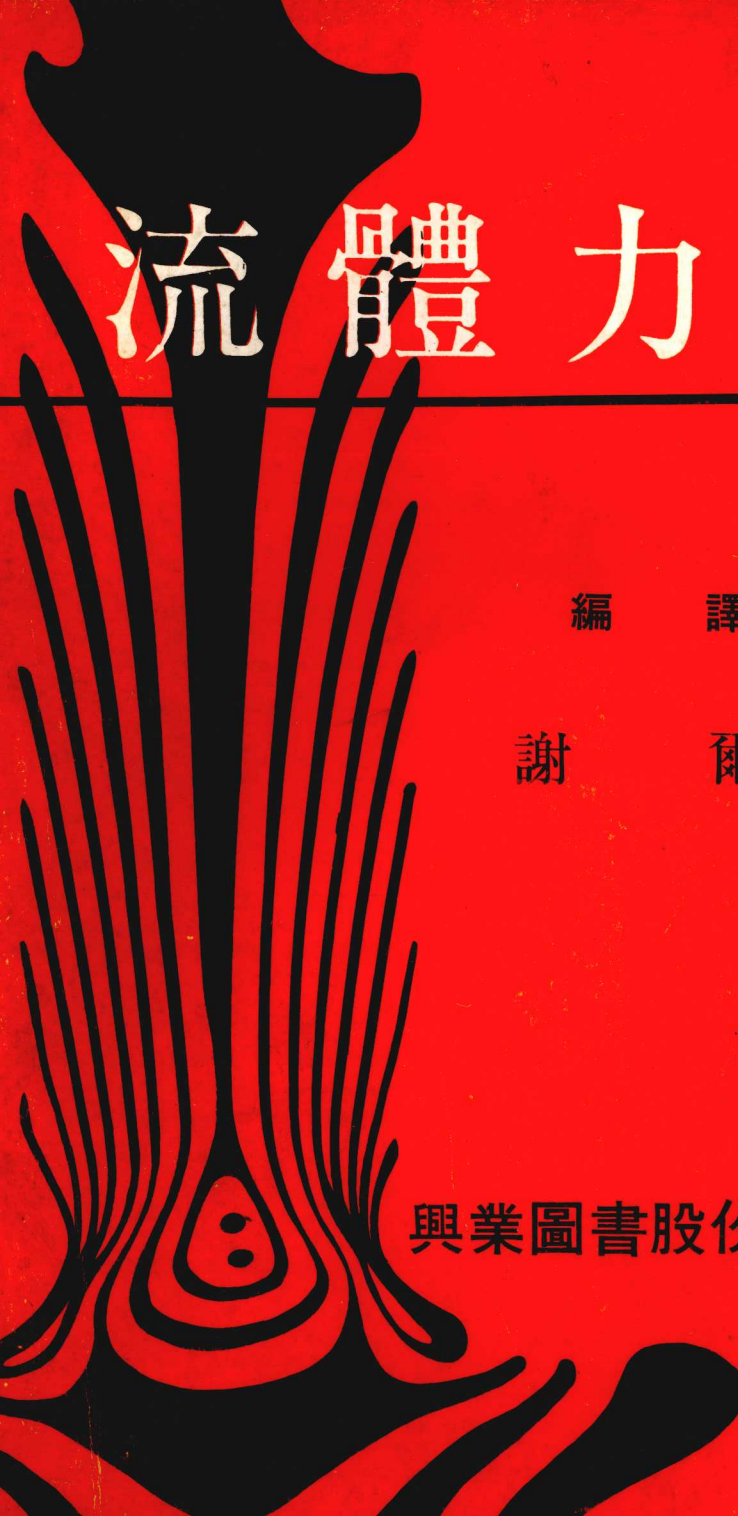




流體力學

編 譯 者

謝 爾 昌

興業圖書股份有限公司

大 專 用 書

流 體 力 學

FLUID DYNAMICS

RICHARD H. F. PAO

編 譯 者

謝 爾 昌

(國立成功大學機械系教授)

興業圖書股份有限公司

版權所有・翻印必究

中華民國六十八年三月二版

流 體 力 學

全一冊 定價 110 元

編 譯 者：謝 爾 昌

發 行 人：王 志 康

內政部登記證內版台業字第一七九四號

出 版 者：興業圖書股份有限公司

發 行 人：興業圖書股份有限公司

臺南市勝利路一一八號

電 話：三 七 三 二 五 三 號

學校團體採用購買另有優待

編輯要旨

- 一、 本書係參照Richard H. F. Pao 所著Fluid Dynamics 一書編寫而成。
- 二、 本書全一冊，可供大學工學院二、三年級或專科學校「流體力學」教學之用。
- 三、 本書計分十章，其中包括七個主題
 1. 流體的基本觀念(第1章)
 2. 流體流動的基本定律(第2章)
 3. 勢流(無旋性流動)(第3章~第5章)
 4. 黏性流動(第6章~第7章)
 5. 邊界層(第8章)
 6. 可壓縮流動(第9章)
 7. 磁性流體力學(第10章)
- 四、 本書所用之中文名詞均以教育部公佈之機械工程名詞為準，機械工程名詞中所無者或出於教育部公佈之數學名詞，或經編者自行擬定。
- 五、 本書承蒙：陸官校機械系王肇祥主任，百忙中熱心校正，至深銘感，特此誌謝。
- 六、 本書初稿由成功大學機械系吳嘉祥，劉煥南等兩位先生所協助，至表感謝，雖經編者審慎修改，其中疏誤之處在所難免，至希學界先進，隨時指正以資再版時修正之。

編者 識

六十四年二月於台南

國立成功大學機械系

流體力學 目次

第一章 序論

1-1	導 言	1
1-2	因次和單位	1
1-3	流體狀態	6
1-4	連續體的觀念	7
1-5	連續體的性質	10
1-6	連續體的數學描述	14
1-7	流體微體的運動	21
1-8	流體之性質及其對於流體運動之影響	25
1-9	流體中某一點的應力	38
1-10	流體靜力學	43
	習 題	51

第二章 流體流動的基本定律

2-1	系統，控制體積和控制表面	64
2-2	系統法與控制體積法間的相互關係	65
2-3	質量不滅定律——連續性方程式	69
2-4	連續性方程式的微分形式	72
2-5	動量不滅定律——動量方程式	74
2-6	慣性座標中的控制體積的動量方程式	75
2-7	動量方程式的微分形式	88
2-8	非慣性控制體積的動量方程式	95
2-9	動量矩不滅定律	99
2-10	非慣性控制體積的動量矩方程式	105
2-11	能量不滅——熱力學第一定律	107
2-12	單次元穩流的能量方程式	114
2-13	沿一流線的柏努利方程式	118
	習 題	131

第三章 無旋性流動原理

3-1	導 言	143
3-2	旋轉性流動與無旋性流動	145
3-3	環流	148
3-4	無旋性流動中的環流	156
3-5	速度勢	162
3-6	邊界條件	168
3-7	無旋性流動的柏努力方程式	172
3-8	無旋性流動中的動能	175
	習 題	179

第四章 不可壓縮勢流

4-1	導 言	184
-----	-----	-----

第一部：二次元平面勢流

4-2	二次元流動的流線函數	184
4-3	二次元無旋性流動的流線函數與速度勢間的關係	189
4-4	流網	195
4-5	二次元單純流動	197
4-6	均勻流動	197
4-7	二次元流源與流涵	199
4-8	二次元自由渦流	202
4-9	單純流動的疊合	203
4-10	等強度流源與流涵的合成流場	205
4-11	二次元源涵偶	210
4-12	均勻流動與源涵偶結合的流場——通過圓柱而無環流的均勻流動	212
4-13	均勻流動，源涵偶與渦流結合的流場——通過圓柱而有環流的均勻流動	219
4-14	虛像法	224

第二部：三度空間軸對稱勢流

4-15	三度空間軸對稱流動的史拓克流線函數	225
4-16	速度場與史拓克流線函數間的關係式	227
4-17	軸對稱流動的連續性方程式	231
4-18	軸對稱單純流動	234
4-19	均勻流動	234
4-20	三度空間的流源與流涵	235
4-21	等強度三度空間流源和流涵結合而成的流場	238
4-22	三度空間源涵偶	240
4-23	均勻流動與三度空間源涵偶結合而成的流場—— 流經球的均勻流動	243
習題		245

第五章 複變數及保角轉換對於二次元平面勢流之應用

5-1	導言	254
5-2	複數	254
5-3	複數的演算	256
5-4	複變函數	260
5-5	以複變函數代表二次元平面勢流	264
5-6	保角轉換及其在二次元平面勢流的應用	265
5-7	簡單轉換的例子	267
5-8	均勻流動	268
5-9	二次元流源	270
5-10	二次元渦流	272
5-11	流源、流涵結合而成的流動	273
5-12	源涵偶	274
5-13	通過圓柱無環流的均勻流動	275
5-14	通過圓柱而有環流的均勻流動	277
5-15	逐次轉換	278
5-16	通過橢圓的均勻流動	280

5-17 通過平板的均勻流動·····	282
5-18 通過圓弧的均勻流動·····	283
5-19 通過流線型桿的均勻流動·····	285
5-20 通過有曲度翼形的均勻流動·····	287
5-21 通過翼形有衝角有環流的均勻流動·····	290
5-22 翼形上之升力·····	295
5-23 卜拉修斯定理·····	296
5-24 尤柯斯基翼形上的升力·····	300
習 題·····	306

第六章 流體黏滯性和黏滯性流體的流動

6-1 黏滯性流體流動的若干特性·····	310
6-2 黏滯性流體的運動方程式·····	312
6-3 史拓克黏滯性定律·····	317
6-4 奈維耶—史拓克方程式·····	325
6-5 能量方程式·····	330
6-6 奈維耶—史拓克方程式的若干確解·····	335
6-7 流經邊界平行的直管道的不可壓縮流體的層流·····	336
6-8 圓管中不可壓縮流體的層流·····	338
6-9 固體球周圍的蠕動流·····	345
6-10 突然加速平面表面附近的層流·····	349
6-11 黏滯性流體流動的動似定律——雷諾動似定律·····	353
6-12 由無因次運動方程式所導出的動似·····	355
6-13 因次分析及白金漢 π -法·····	357
習 題·····	360

第七章 流體的擾動與不可壓縮黏滯性流體的擾流

7-1 層流與擾流之間之轉變·····	368
7-2 流體擾動·····	370
7-3 不可壓縮黏滯性流體的擾流時間平均值的連續性方程式以及運動方程式·····	371

7-4	擾流的半經驗理論	375
7-5	經平面邊界的平行擾流的時間平均速度分佈曲線	379
7-6	擾流在圓形斷面管道中的速度分佈方程式	381
7-7	圓形直管中的擾流的磨阻損失	389
7-8	管中流動的磨阻因子	391
7-9	管中擾流的經驗公式	396
7-10	明渠中的擾流	403
習題		406

第八章 邊界層理論

8-1	邊界層流動	416
8-2	邊界層厚度	419
8-3	二次元層流邊界層流動的簡化微分方程式	420
8-4	柯爾曼積分動量方程式	431
8-5	層流邊界層	435
8-6	擾流邊界層	438
8-7	邊界層流動的分離和壓差阻力	442
習題		449

第九章 可壓縮流體的流動

9-1	可壓縮流動所應考慮的熱力學問題	451
9-2	聲波的傳播速率	455
9-3	馬赫數及馬赫錐形體	457

第一部：單次元可壓縮流動

9-4	單次元可壓縮流動的基本方程式	461
9-5	完全氣體的單次元可逆絕熱流動	465
9-6	參考狀態	468
9-7	單次元次音速與超音速流動間的相異點	470
9-8	噴嘴中的可壓縮流動	471
9-9	范諾線與雷厲線	475
9-10	單次元正震波	478
9-11	斜震波	482

第二部：多次元可壓縮流動簡介

9-12	三次元可壓縮流動之基本方程式之推導	484
9-13	微擾理論——二次元可壓縮流動之勢方程式之線性化	487
9-14	微擾理論——壓力係數之線性化	491
9-15	邊界條件	493
9-16	經波形壁的二次元流動	495
9-17	經波形壁的二次元次音速流動	496
9-18	經波形壁的二次元超音速流動	499

第十章 磁性流體力學

10-1	導言	512
10-2	電磁場	514
10-3	靜電場	515
10-4	由穩定電流形成的磁場	518
10-5	法拉第感應定律	525
10-6	馬克斯威電磁方程式	526
10-7	僕因庭定理	527
10-8	磁性流體力學的基本方程式	528
10-9	電磁波及阿爾芬波	532
10-10	磁性液動力擴散方程式	537
10-11	磁性液動力平行流動	538
10-12	流動的磁性流體力學性減速	541
10-13	磁性流體力學邊界層流動	542
	習題	544
	附錄	546
	索引	549

第一章 序論

Introduction

1—1 導言 (*Introductory Remarks*)

流體力學乃是探討流體在靜止時和運動時的狀態的一門學問。凡是以流體作為介質時，從事分析，設計和綜合研判各種技術問題時，流體力學的基本原理和概念的知識是不可少的，所以瞭解流體力學的需要廣泛到幾乎普及於工程和應用科學的每一部門。

當我們分析流體流動問題時，除了使用狀態方程式以表示流體在各種不同的條件，狀態下的物理性質的變化以外，還牽涉到下列諸項原理：

1. 運動幾何與物質的變形不得發生矛盾。
2. 質量不減定律。
3. 動量不減定律。
4. 動量矩不減定律。
5. 能量不減定律 (熱力學第一定律)
6. 熵不減定律 (熱力學第二定律)
7. 電磁方程式。

代表上列各原理的方程式，在流體力學的特定題目裡面被用上來以便表示各變數之間的關係。不過，並不是上述的每一項原理，均須應用到每一個問題上，此書所探討的，乃是在不同的流體流動問題內，如何運用上述的各項原理。

1—2 因次和單位 (*Dimensions and Units*)

對流體力學的科學分析中，須介紹一部份的物理觀念諸如長度，

時間，速度，加速度，力，應力，質量，密度，動量，能量，黏度和其他各種量。此等物理量，是任意定義的，而它們之間之關係或由定義，或由物理定律而來，量與量之間的關係最好採用能以最少的獨立因次，而能完全表達出所有量之意義的一貫因次系統。

在流體力學中，所有的量可用五個基本因次—質量(M)，力(F)，長度(L)，時間(T)和溫度(θ)表達，溫度(θ)是一個獨立因次，其他的四個因次，可用牛頓第二運動定律， $F = Ma$ ，表達相互間的關係，此運動方程式，可寫成因次式如下：

$$F = M \frac{L}{T^2} \quad \text{或} \quad \frac{FT^2}{ML} = 1 \quad (1-1)$$

上述因次方程式，表示四個因次彼此間的關係。當三個因次已定義時，第四個因次可用其他三個因次予以表達。所以在牛頓系力學中，三個因次已足以表達任何的物理量了，平常都採用 M ， L ， T ，稱質量-長度-時間系統，或是採用 F ， L ， T ，稱力-長度-時間系統，兩種系統中任意選擇一種均無不可。若選擇 M 做為基本因次，則 F 成為其因次為 ML/T^2 的導出量。

任何量的因次可由定義或物理定律導出，如容積的因次為 L^3 ，速度為 L/T ，能量為 FL ，或 ML^2/T^2 。流體力學中，一般常用的量和它的因次在表 1-1 中以 MLT 和 FLT 兩系統表示。

用數學解析法去探討物理現象時，所導出的方程式中，其因次必須一致，換言之正確的物理方程式，兩邊的因次必須相同。

在不同的工程和科學應用問題上，有不同的單位系統，以量測基本的因次，而單位系統的選用，則依各人之喜好和應用上的方便而定。然而，在工程的實際應用上，有關磅質量(lbm)和磅力(lbf)這兩個基本的不同單位的正確運用，引來相當大的困擾，而對於質量和力的了解，可由牛頓第二運動定律獲得清晰的概念，不管在何種單位系統內，均須介入一換算因子於牛頓動力方程式中，使方程式的兩邊具

有相同的單位：

如

$$F = \frac{Ma}{g_o} \quad (1-2)$$

在上式中， g_o 的單位和數值，依據所使用的力，質量、長度和時間的單位而定。

流體力學常用的量及其因次

量	<i>MLT</i> 系統	<i>FLT</i> 系統
長度 (L)	L	L
面積 (A)	L^2	L^2
體積 (V)	L^3	L^3
時間 (t)	T	T
速度 (V)	LT^{-1}	LT^{-1}
加速度 (a)	LT^{-2}	LT^{-2}
力 (F)	MLT^{-2}	F
比重量 (γ)	$ML^{-2}T^{-2}$	FL^{-3}
質量 (m)	M	$FL^{-1}T^2$
密度 (ρ)	ML^{-3}	$FL^{-4}T^2$
壓力 (p) · 應力 (τ)	$ML^{-1}T^{-2}$	FL^{-2}
能 (E) · 功 (W)	ML^2T^{-2}	FL
動量 (P)	MLT^{-1}	FT
動力黏性 (μ)	$ML^{-1}T^{-1}$	$FL^{-2}T$
動黏度 (ν)	L^2T^{-1}	L^2T^{-1}
表面張力 (σ)	MT^{-2}	FL^{-1}

磅力和磅質量的單位之間，有一為 32.174 ft/sec^2 之標準重力

加速度值的關係。當一磅質量 (1 lbm) 的物質，放置於重力加速度為 32.174 ft/sec^2 的地球表面上，此物質的重量為 1 磅力 (1 lbf) 在這種單位系統下， g_c 值可決定如下：

$$F = \frac{Ma}{g_c}$$

$$1 \text{ lbf} = \frac{1 \text{ lbm} \times 32.174 \text{ ft/sec}^2}{g_c}$$

$$\text{所以} \quad g_c = 32.174 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2$$

由上知 g_c 只能視為一個換算因子，和重力加速度 g 沒有任何關連。 g_c 之數值為一常數，僅受所使用的單位系統影響，並不因某一特定地點的重力加速度之值而有所不同。

例如，若 1 磅質量的物體被搬到一重力加速度為 28.957 ft/sec^2 的地方，則作用在物體上的重力為

$$W = \frac{Ma}{g_c} = \frac{1 \text{ lbm} \times 28.957 \text{ ft/sec}^2}{32.174 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2} = 0.900 \text{ lbf}$$

所有的數值計算問題，必須包含一換算因子 g_c 在內，而插入 g_c 之後所得的答案，始具有正確的單位。

另外兩個工程上常用的單位系統為英制重力單位 (English gravitational units)，簡寫為 (Egu) 和英制質量單位 (British mass units)，簡寫為 (Bmu)。在 Egu 制中，質量單位為史拉格 (slug)，當 1 史拉格質量的物體，被 1 磅力所作用時，此物體將產生 1 ft/sec^2 的加速度，將上列數值代入 $F = Ma/g_c$ ，可得

$$1 \text{ lbf} = \frac{1 \text{ slug} \times 1 \text{ ft/sec}^2}{g_c}$$

$$\text{故得} \quad g_c = 1 \text{ slug-ft/lbf-sec}^2$$

質量爲 1 slug 之物體，其重量爲

$$W = \frac{Ma}{g_0} = \frac{1 \text{ slug} \times g \text{ ft/sec}^2}{1 \text{ slug-ft/lbf-sec}^2} = g \text{ lbf}$$

上式中 g 爲當地重力加速度的大小。

在英制質量單位中，力的單位爲磅達 (*poundal*)，1 磅達定義爲使質量 1 lbm 的物體產生 1 ft/sec^2 的加速度所需之力。

$$\text{故} \quad F = \frac{Ma}{g_0}$$

$$1 \text{ poundal} = \frac{1 \text{ lbm} \times 1 \text{ ft/sec}^2}{g_0}$$

$$g_0 = 1 \text{ lbm-ft/poundal-sec}^2$$

在重力加速度等於 $g \text{ ft/sec}^2$ 之處， 1 lbm 之物體之重量 W 爲

$$W = \frac{1 \text{ lbm} \times g \text{ ft/sec}^2}{1 \text{ lbm-ft/poundal-sec}^2} = g \text{ poundal}$$

現在我們來考慮 **MKS** 質量系的單位。**MKS** 三個字母分別代表 meter (米)，kilogram (仟克) 和 second (秒)

kilogram (kg) 乃質量的單位，力之單位爲牛頓 (newton)，1 newton 的力，可使 1 kilogram 的物體產生 1 m/sec^2 的加速度，所以

$$F = \frac{Ma}{g_0}$$

$$1 \text{ newton} = \frac{1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/sec}^2}{g_0}$$

$$g_0 = 1 \text{ kg-m/newton-sec}^2$$

我們現在把各種不同制度下的換算因子 g_0 綜合列表如下：

質量	長度	時間	力	g_c
lbm	ft	sec	lbf	$32.174 \text{ lbm-ft/lbf-sec}^2$
slug	ft	sec	lbf	$1 \text{ slug-ft/lbf-sec}^2$
lbm	ft	sec	poundal	$1 \text{ lbm-ft/poundal-sec}^2$
kg	m	sec	newton	$1 \text{ kg-m/newton-sec}^2$

只有在數值計算中，才需用到換算因子 g_c ，所以在本書中，導物理方程式時，並沒有提到 g_c ，不過凡是含有數值計算的例題裡面，我們為使所得到的答數具有正確的數值及單位起見，將要插入 g_c 。

下列的關係式，乃表示在不同的單位制度下，其間的換算關係。

$$\text{質量： } 1 \text{ slug} \equiv 32.174 \text{ lbm} \equiv 14.595 \text{ kg}$$

$$\text{力： } 1 \text{ lbf} \equiv 32.174 \text{ poundal} \equiv 4.448 \text{ newton}$$

$$\text{長度： } 1 \text{ ft} \equiv 0.3048 \text{ m}$$

1—3 流體狀態 (*Fluid State*)

根據分子觀念，物質三態為固態、液態和氣態。物質三態之差別在於分子間的平均間隔的大小，在固體中，分子間的間隔較液體中為近，分子在液體內比在固體內，有更多的空隙，而在氣體中，分子間的平均間隔有平均分子直徑的很多倍大。

液體和氣體統稱之謂流體，流體狀態的特徵在於分子可動性比較大。

雖然物質由分子所構成，然而在流體力學中，我們把流體看成一個沒有空隙的連續體，為了接受連續性流體的假設，可以不考慮分子的結構情形，然後用數學解析流體的運動情形。在流體力學中，所探討的不是每一個分子的運動，此點正合我們把流體當作一連續體的

假設，而在一般的情況下，經由此種假設所得的結果，和經由觀察流體的運動情形的結果，相當吻合。連續性流體的觀念在下幾節裡面，將有詳細的說明。

液體和氣體同樣算是連續性流體，其力學效應相似，而也因為如此，流體和氣體一併作為流體力學的探討對象。就流體力學而言，他們之間，最大的差別乃相對的可壓縮性，在改變壓力和溫度的情況下，氣體比液體要更容易壓縮。

從實用觀點來說，流體狀態和固態之間的差別在於它們所能抵抗外力的相對能力。固體可以承受某定量的拉力，壓力和剪力，而只要所施予的外力大小不變，固體所產生的變形亦維持不變，流體的抗拉強度甚小，而只有在適當的拘束下，才能承受壓力，靜止中的流體無法承受剪力。只有在流體的質點與質點間有相對運動時，才能承受剪力。所以當流體所受的是剪力時，只要是這個力作用著，流體將繼續變形。在流體力學中，我們將流體定義為在剪力的作用下，立刻而繼續變形的物質。

1—4 連續體的觀念 (*The Concept of a Continuum*)

把連續體或連續性介質的觀念應用在流體力學上，只是一種理想化的情形。物質在流體狀態，不論液體或氣體站在細察的立場 (on the microscopic level) 是分開的個體，但是在處理工程上的問題時，我們採用大觀的立場 (on the macroscopic level)。在這種觀點下，所取的容積尺寸比分子的尺寸大得多，故容積內包含有相當多的分子，而我們所研究的對象並不是每一個分子的性質和狀況，而在於全部分子的平均統計性質和狀況，既然我們所考慮的，不是單一分子，我們就可以把流體當作連續性物質，並採用連續模型，此模型就大觀立場來說，擁有適當的連續體性質，而且此模型的狀態與實際流體的狀態相吻合。