

基本流體力學

(上冊)

Elementary Fluid Mechanics

(第五SI版)

原著者：John K. Vennard

Robert L. Street

譯者：任 碩 張俊威

科技圖書股份有限公司

基本流體力學

(上冊)

Elementary Fluid Mechanics

(第五 **SI** 版)

原著者：John K. Vennard
Robert L. Street

譯述者：任 碩 張俊威

科技圖書股份有限公司

基本流體力學

(下 冊)

Elementary Fluid Mechanics

(第五 **SI** 版)

原著者：John K. Vennard
Robert L. Street

譯述者：任 碩 張俊威

科技圖書股份有限公司

原 序

流體力學，是研究流體在靜態與動態下的行為。用解析與數理方法着手，而不是用實驗。其中牽涉到幾個基本原理，而這些原理，在不考慮流體的物理性質下，可用來解答許多工程方面常遇到的無數形形色色的問題。

這是一本為初學者而寫的書。需具備完整的微積分以作基礎並需修過工程靜力學與動力學課程，但可未修過工程熱力學。同時，除從基礎物理課程所獲得的以外，不需要其他流體現象的預備知識。初學者的有限知識，與流體力學的廣大領域，使我們將“初等流體力學”的範圍限定在入門課程，也是容易學習的部份。如果具備更廣博的數學與熱力學訓練，可期望習流體力學者，能網羅更多的課程內容，尤其是流場（flow field）與可壓縮流體的運動。根據我們教大學生流體力學的可觀經驗，相信困難大多在觀念，而不在數學法則。因此，這本書強調的是物理觀念而不是數學運算。

超過三十年以前，當本書第一版出版以來，自從那時起，工程教育的思潮徹底的改變了。首先傾向於更加強調基本科學，其次是基本科學的有效運用變成學習興趣的焦點。這樣吸引了比較能達到更高科學成就水準的學生。這些傾向對流體力學的影響，是數學嚴密性的要求增加了。強調更廣博的觀念，使學生對較敏捷而深遠的理解力的期望也加大了。這一版本，仍舊反應出這些趨勢與改變。如果讀者比較，會發現本書現在利用控制容積（control volume）的觀念。導出非常簡明而且有效的向量關係式，同時也多少詳細地解釋了熱力學的基本觀念，更多方面述及可壓縮流。實際流體流的討論也有了更大的深度。因此，讀者更能認識這些流動的一般特徵。最後增加了渦輪機的材料，包括渦輪機的因次分析。有關概括性的哲理，這一版本與以前數版保持一樣，也就是說，將原理應用到特別有益的問題上，是提高初習工程者對新課程學習慾望的最佳方法。

另外的改變（讀者可能意識得到）是世界性的傾向，是使用唯一的國際單位術語：國際制（the systems Internationale d' Unite's, SI）。美國的傳統制度是用英國的FSS（foot - slug - second）。

制度，但全世界很多國家已經採用 S I 制單位。爲了應順這個變遷，並讓採用公制國家的使用者易於接受這本教科書，決定將第五版本改用 S I 單位。

像其他力學課程一樣，流體力學包括訓練的外貌與實際的見聞；初學者必須循着理論的建立，伸展他的想像力，使新的物理現象清楚地呈現在心中。初學者必須藉研究理論的與應用的問題，強迫自己思索流體的行爲。在這裡，我們試用下述的方法來達到這些目的。將次要的結論省略了，鼓勵學生獨自獲得一些結論。將原理應用到特別的問題上，以建立他們的能力。藉例題的幫助以克服數字上的困難，讓學生去解答挑戰性的問題，一方面練習分析，一方面看出有效的應用。

本書是寫給初學的學生，而不是熟練的專家。希望書的本身在許可寶貴的課堂時間花在題材的同時，成爲各個主題的瞭解用入門書。我們堅信在這樣方式下使用教科書，可以爲將來的專家生活提供活潑的訓練。那時雖然沒有老師指導，也能理解新的論題。

本書首先陳述了基本的討論與流體的性質，隨後是流體靜力學。在這裡，學生第一次遇到流場與偏微分的利用。運動學一章是討論速度、加速度、環流量、旋流度與連續方程式。這裡第一次介紹控制容積的關鍵性觀念。以後幾章將論及不可壓縮流體與可壓縮理想流體流，其中包括二維流場的簡短論述，隨後在另一章建立衝量 - 動量原理，包括應用到不可壓縮流與可壓縮流。討論過磨擦過程與有了專門討論相似性與因次分析的一章，至此應用到管流、渠流與量測裝置的初步工具就完備了。然後用一章關於液體的動力學，最後一章是討論流體中浸沒物體的情形。我們也列出了著作的參考資料，指給愛追根究底的讀者作更徹底的探討。各章的後面，總共備有上千的問題。本書中，大部份涉及定量的章節，也附加了數字例題。

在固體力學的課程中，問題經過解析的處理後，常導出一個只需最少的實驗來決定數據，即有滿意精確度的工程解答。但因流體的工程問題常非如此，在獲得工程解答前，常需利用種種實驗係數。此地，我們給學生作進一步的說明：在分析問題的同時，你必需建立處理與解釋結果的能力。流體力學天生的一個困難，源於流體現象，非正式經驗的缺乏，這與簡單結構與在運動中固體的類似經驗比較起來，幾乎等於零。這種缺陷，要求我們更集中注意力在所描述的題材上，並且隨着分析的進展，需要新的術語。觀看章節後面開列的相關影片，你會發現很有助益。最後別忘了

學習工程力學，有雙重的目標：使分析的能力更敏銳與獲得新的知識；如果試圖藉死背公式以逃避第一個目標，那不但無效而且無趣。同時阻遏了你建立分析的能力，這是要比單一課程的內容更為重要。

這一篇序言的大部份仍與先前的版本一樣，並沒有多大的改變。由於 John K. Vennard 逝世過早，未能繼續發展這一本書，而這本書已屬同領域中最尖端的大作。興幸我有這樣機會能繼續這個三十年以前就開始的工作。起初吾是他的學生，後來是他的同僚，我相信我能了解他的哲理，並且欣賞他當老師與指導教授時不尋常的才能。當要補充最新資料，這是所有基本教科書都是難免的，保留原有的風格與明快作風，是我的目標，也是這些特點，使能引起本書好幾代的學生與老師們的喜愛。我深受猶他州立大學教授 Gary Z. Watters 的恩惠，由於他從頭到尾幫助校訂。他對有計畫的校訂與本書的草稿，作了簡明的、首肯的、與多半有助益的建議。在校訂初期，Bruce Larock、Peter Mangarella 與 Patrick Holmes 三位教授的觀點與意見，對我很有助益。當然我也受惠史坦福大學的同仁，Joseph B. Franzini 與 En Yun Hsu 由於他們給我幫助與鼓勵。大部份草稿是 Bruce Howe 寫的，數值計算部份是由 Theodor R. Mogel 君算的。Bruce Howe 君也幫忙解題目，並製作第五版 SI 的換算。打字員在手稿上所做的精彩表現，也深為激賞。

ROBERT L. STREET

加里福尼亞，史坦福

羅伯 L. 司屈脫

目 錄

原序

第一章 概 論

1.1 流體力學的範圍與發展	1
1.2 流體的物理性質	3
1.3 單位、密度、重量密度、比容與相對密度	6
1.4 壓縮性與彈性	11
1.5 黏滯性	14
1.6 表面張力與毛細現象	22
1.7 蒸氣壓力	25
參考書目	27
概念與歷史	27
物理性質	27
影 片	28
習 題	28

第二章 流體靜力學

2.1 壓力、密度與高度之關係	36
2.2 絕對壓力與錶壓力	42
2.3 液體壓力計測量	45
2.4 浸沒平面上的受力	48
2.5 浸沒曲面上的受力	53
2.6 浮力與浮體	56
2.7 受力流體的加速度	60
習 題	68

第三章 流體運動學

3.1 穩定與不穩定，流線與流管	97
3.2 一維流，二維流與三維流	100
3.3 速度與加速度	102
3.4 連續性方程式——一維穩流	107
3.5 連續性方程式——二維穩流	112
3.6 環流量、旋流度與旋轉	117
影 片	120
習 題	121

第四章 不可壓縮理想流體的流動

一維流	125
4.1 尤拉方程式	125
4.2 柏努利方程式	126
4.3 功 - 能方程式	127
4.4 有限截面流管的一維假設	129
4.5 柏努利方程式的應用	131
二維流	142
4.6 尤拉方程式	143
4.7 柏努利方程式	144
4.8 柏努利方程式的應用	145
影 片	159
習 題	159

第五章 可壓縮理想流體的流動

5.1 熱力學定律	193
一維流	197
5.2 尤拉方程式與能量方程式	197
5.3 尤拉方程式的積分	199
5.4 停滯點	201
5.5 一維的假定	203

5.6 次音速與超音速	203
5.7 收斂噴嘴	205
5.8 流管的收縮	207
5.9 收斂—發散噴嘴	209
二維流	212
5.10 尤拉方程式與其積分	212
5.11 方程式的應用	214
參考書目	218
影 片	218
習 題	219

第六章 衝量—動量原理

6.1 控制容積原理的推導	225
基本原理	228
6.2 彎管、通道的擴大與收縮	228
6.3 明流中的構體	231
6.4 封閉通道的陡擴	234
6.5 水壓跳昇	235
6.6 斜駐波	237
震 波	239
6.7 正震波	240
6.8 斜震波	244
流 機	246
6.9 噴射推進	247
6.10 動葉輪與風車	250
6.11 轉向裝置與輪葉—衝動式渦輪機	254
6.12 反動式渦輪機與離心泵	261
6.13 火箭推進器	269
參考書目	271
火箭與噴射推進器	271
動葉輪與風車	271
渦輪機與泵	272

習題	272
----	-----

第七章 真實流體

7.1 雷諾實驗的重要性	299
7.2 層流與紊流	302
7.3 以固體為界面的流動	308
外部流	311
7.4 界面層	311
7.5 分 流	313
7.6 二次流	316
內部流	318
7.7 速度分佈	318
7.8 能量方程式	322
7.9 阻力與能量的散失	326
7.10 流動的成形—邊界層	329
7.11 分 流	331
7.12 二次流	333
參考書目	335
影 片	335
習 題	336

第八章 相似性與因次分析

8.1 相似性與模型	342
8.2 因次分析	353
8.3 渦輪機的因次分析	360
參考書目	368
影 片	369
習 題	369

第九章 管 流

9.1 基本方程式—不可壓縮流	379
9.2 摩擦問題的因次分析—不可壓縮流	381

9.3 管摩擦實驗的結果	383
9.4 層流	390
9.5 紊流—光滑管與粗糙管	392
9.6 紊流—光滑管	395
9.7 光滑度與粗糙度的定義	398
9.8 紊流—完全粗糙管	400
9.9 紊流的七次根定律	402
9.10 非圓管的管摩擦—水力半徑	405
9.11 可壓縮流體的管摩擦	406
9.12 可壓縮管流—等溫	408
9.13 可壓縮管流—絕對有摩擦	411
9.14 管路中的微損	414
9.15 管路問題—單管	424
9.16 管路問題—多管	432
參考書目	440
習題	441

第十章 明渠液流

10.1 概論	464
10.2 常流—Chezy 方程式	467
10.3 Chezy 係數	468
10.4 常層流	471
10.5 水力半徑的考慮	473
10.6 比能、臨界深度與臨界斜度—寬矩形渠道	478
10.7 比能、臨界深度與臨界斜度—非矩形渠道	483
10.8 臨界深度的發生	486
10.9 變流	490
10.10 水力跳昇	500
參考書目	504
影片	504
習題	504

第十一章 流體量測

11.1 流體性質的量測	521
11.2 流體靜壓的量測	528
11.3 表面高度的量測	532
11.4 停滯壓力的量測	535
速度的量測	537
11.5 用皮氏靜壓管量測不可壓縮流體的速度	537
11.6 用皮氏靜壓管量測可壓縮流體的速度	540
11.7 風速計與流速計	543
11.8 熱線與熱膜流速計	544
剪力的量測	548
11.9 剪力量測	548
流率的大量測	551
11.10 總量法	551
11.11 文氏流量計	552
11.12 噴嘴	555
11.13 孔口	557
11.14 肘管流量計	563
11.15 稀釋法	564
11.16 鹽水速度法	565
11.17 堰	566
11.18 流速計量測法	574
11.19 浮標量測法	576
實流	577
11.20 光學法	577
11.21 氫氣泡沫法	577
參考書目	580
影片	581
習題	581

第十二章 液體動力學

12.1	流線函數	598
12.2	基本流場	601
12.3	用重疊法組合的流場	605
12.4	若干有用的流場	608
12.5	速度位勢	625
12.6	流線函數與速度位勢的關係	627
12.7	流網	628
12.8	在多孔介質中的流動	631
參考書目		637
影片		637
習題		638

第十三章 浸沒物體周圍的流動

13.1	基本原理與定義	645
13.2	曳力與昇力的因次分析	649
邊界層		653
13.3	邊界層的特性	653
13.4	不可壓縮流之層流邊界層	658
13.5	不可壓縮流之紊流邊界層	661
曳力與昇力—不可壓縮流		665
13.6	外形曳力	665
13.7	昇力與環境	672
13.8	有限長的機翼	674
13.9	昇力與曳力圖	678
曳力與昇力—可壓縮流		681
13.10	馬赫波	681
13.11	現象與定義	683
13.12	曳力	685
13.13	昇力	690
參考書目		693

影 片.....	694
習 題.....	694

附錄

一、符號、單位與因次.....	701
二、水的物理性質.....	705
三、波 速.....	707
四、美國標準大氣.....	709
五、基本數學運算.....	711
六、面與體的性質.....	717
七、空 穴.....	719
八、擴張因子 Y.....	726
九、若干問題中的無因次分析.....	727
十、紊流的速度剖面圖.....	729

第九章 管 流

Fluid Flow in Pipes

管路中流體的流動問題，如預測已知特性的管中的流量，計算其中能量轉換等等問題，是廣泛分佈在工程實務中的。茲將前述的許多原理，應用到比較簡單而易於控制的（主要是一維的）流動上。管流（pipes flow）所研究的對象，只包含管中完全充滿流體的問題。部份充滿流體的管路，如暗渠與下水道，則視為明渠（open channels）將在下一章中討論。

實際的管流問題，要應用能量原理，連續性方程式、流體阻力原理與方程式來求解。管中流動的阻力，並不只起因於管路的長直通（long reaches）部份，也與管路的接合配件相關，如彎管與閥，這些都會產生相對尺度較大的紊流而消耗能量。

9.1

基本方程式—不可壓縮流

對於管中的不可壓縮流體的運動，從第 7.7 節，柏努利方程式，

$$\frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g_n} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g_n} + z_2 + h_{L,1-2} \quad (9.1)$$

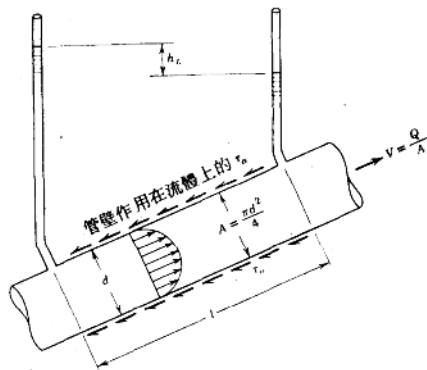


圖. 9.1

但在大部份管流問題中可將 α 項省去，有幾個原因：(1)工程上大部份管流問題含有紊流，其中 α 只略大於一，(2)層流的 α 值較大，但與其他幾個柏努利項比較，通常速度落差可以忽略，(3)與其他幾項比較，在大部份管流中，速度落差都很小，所以包含 α 與否對最後的結果僅有少許影響，(4)因方程式兩邊都有 α ，所以影響會互相抵消，(5)工程上所要求的答案其精密度較低，沒有理由將 α 包含在方程式中。所以將方程式 9.1 應用到實際問題前，主要先要了解影響落差損失的因素（在第四、五、與七章中已說明過的柏努利項），與可用來計算這些量的方法。

早期在長直圓管中所做的水流實驗（大約 1850 年左右），指出落差損失是直接隨速度落差與管的長度而變化（大略而言），但與管徑成反比。利用比例係數， f ，稱為摩擦因子（friction factor）。Darcy、Weisbach 及其他學者，曾提出如下的方程式

$$h_L = f \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g_n} \quad (9.2)$$

由實驗觀察得知，摩擦因子主要與管的粗糙度有關，但也與速度與管徑有關。近來又得知摩擦因子也與流體的黏滯度有關。這個方程式，常稱為“Darcy 方程式”。仍然是在長直的均勻管中表示確因管摩擦（不是管接頭

)所引起的落差損失的方程式。

現在可將方程式 9.2 與 7.23 合併, 得到摩擦應力, τ_0 , 與摩擦因子 (1), f 之間的基本關係為,

$$\tau_0 = \frac{f\rho V^2}{8} \quad (9.3)$$

在這將壁面剪應力與摩擦因子、密度、與平均速度連繫起來的基礎方程式中, 因為 f 為無因次, 所以 $\sqrt{\tau_0/\rho}$ 顯然必需有速度的因次, 稱為摩擦速度 (friction velocity), v_* , 表成 (從式 9.3)

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = V\sqrt{\frac{f}{8}} \quad (9.4)$$

但此代數式的定義, 未曾揭露摩擦速度的物理意義。因為這個速度只含有壁面剪應力與流體密度, 所以不論是何種流動 (層流或紊流), 不論是何種邊界組織 (平滑或粗糙) 都以相同的方程式來定義。因此, 這個有效的一般化, 在進一步發展時可廣泛應用。

【例題】

水在直徑 150 mm 的管路中, 以 4.5 mps 的平均速度流動。由實驗測量得知, 30 m 長的管有 $5\frac{1}{3}$ m 的落差損失。計算其摩擦速度。

解:

$$5.33 = f \frac{30}{0.15} \frac{(4.5)^2}{2g_n}; \quad f = 0.026 \quad (9.2)$$

$$v_* = 4.5 \sqrt{\frac{0.026}{8}} = 0.26 \text{ m/s} \quad (9.3)$$

9.2

摩擦問題的因次分析—不可壓縮流

對於管摩擦問題的介紹, 可以從相似法與因次分析的應用而獲得。這使問題可以用一般方法來處理, 並指出和摩擦因子有關的變速有那些。雖

- (1) Fanning 用另一個方法來定義摩擦因子。根據標準的電力公式 (見第 13.2 節), 方程式 9.3 寫成 $\tau_0 = f' \rho V^2/2$, 方程式 9.2 變成 $h_L = 4f'LV^2/2gd$ 。水力半徑, R_h , 代替 $d/4$, 得 $h_L = f'LV^2/2gR_h$ 。