

流體力學

(1986年第二版)

原著者 Frank M. White

譯著者 陳 建 宏

曉園出版社

世界圖書出版公司

F.M.White
Fluid Mechanics
1986 2nd-ed
McGraw-Hill

流体力学

F.M.怀特 著

陈建宏 译

晓园出版社 出版

世界图书出版公司北京分公司重印

(北京朝阳门内大街137号)

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1992年4月重印 开本 850×1168 1/32
1992年4月第一次印刷 印张 40.2

印数: 0,001—1,700

ISBN: 7-5062-1163·7/O·21

定价: 34.30元

世界图书出版公司通过中华版权代理公司

购得重印权 限国内发行

譯 序

現代流體力學是由理論流體力學、實驗流體力學及計算流體力學三部分所交織而成的自然科學。此三者俱為探討流體力學的重要工具，其間的關係自是互補不足，彼此相輔相成，缺一不可。

本書特別重視理論與實驗結果的配合，對經驗式子及真實流場的介紹，更是不遺餘力；我們可說學理與實用兼具。至於計算流體力學部分，雖只點到為止（這多半是因計算流體力學的研究，須先具備基本的流體力學、數值方法及數學基礎，自不宜在入門書中多加討論），但作者屢在書中提及其重要性，並舉基本的例子加以說明，這種觀念恐怕是其他入門流體力學的書中所不易見的。

本書除有兼顧此三者的優點外，其中所探討的題材也相當的廣泛，而基本觀念的闡釋及物理現象的解說大致上淺顯易懂，很適合作為欲窺流體力學堂奧者的入門書籍。在此介紹給大家。

陳 建 宏

1987年9月于美國賓州

原 序

本書的第二版只有內容的增刪，而無觀點上的改變。十一章及五個附錄的基本架構仍然相同，微分、積分及實驗三種解析法也保留不動。在本版中，我們增加了許多的練習題及例題，另也增錄一些新的照片及附圖。

本版將練習題以各節的主題來區分，依序排列，期使課堂作業的指派變得較容易，這是本版明顯改進的地方。在第一版中，共有 1089 題練習題；在第二版中，我們刪掉其中的 410 題，另補上 490 題全新的題目，故總共有 1169 題。在這些新的題目中，有許多是較具挑戰性的，且其本質也較具分析性。作者很感謝許多朋友提供新的題目。

雖然本書各章都有所改訂，但其中以第二、五、八、十及十一章最明顯。在第二章中，有關在非旋性之任意黏性流場的壓力分佈的討論，我們已刪除。這些討論是非常有意義的，但似嫌過早；現在本章的探討只限於靜流體及剛體的情況。

在第五章中，我們刪掉冪乘積法，而完全只討論 π 定理。作者本人很喜歡冪乘積法，但在入門課程中，同時介紹兩種互具競爭性的方法，似乎易引起混淆。

在第八章中，我們加入一節勢流的數值差分法。現在有不可勝數的數值分析例題可用以說明如何設定電算機的流動問題，及如何和其他方法（如邊界層理論）合併使用。雖然許多現代的勢流電算機有限差分法是較易了解的。

在第十章中，我們已不再強調 Moody 圖，而只探討 Manning 粗糙度關係式；我們還是覺得：在第一門流體力學的課程中，不宜介紹互相抗衡的方法，而無疑的，Manning 方法在明渠流動中是最受歡迎的。另我們也加了一些材料，以討論堰堤或阻礙物後方的回水計算，這在水力計畫的準備中，是會經常遇到的。

最後，我們在第十一章中，加入軸流唧筒及風力渦輪機的新教材，這使本章所涵蓋的範圍加大，但對於像渦輪機械這樣大的主題，我們仍很難在一章中，作完整的概論。

在無數個校訂者及讀者的要求下，我們已把附錄的內容加以擴充。附錄 A 中的圖表現在採用公制單位；在附錄 B 中，可壓縮流表的 Mach 數增量為 0.02，另增列兩個斜激波的屬性變化表；在附錄 C 中，我們也增列了一些新的影片；另在附錄 E 中，我們加入角速度分量。

McGraw-Hill 圖書公司現在提供流體力學的 IBM 相容軟體，作為本書的補充教材；這些程式是由加州大學 San Diego 分校的 Daniel Olfe 教授設計的。

由於有太多的人協助過我，以致無法逐一列出。我特別感謝下列的校訂者，他們閱

讀了這些修訂的章節，並提供許多有裨益的建議：Edward C. Chiang (Michigan Technological University)、Rod W. Douglass (University of Nebraska, Lincoln分校)、Charles L. Menkle (The Pennsylvania State University)、Ted Okiishi (Iowa State University)、Philip J. Pritchard (Manhattan College)及 James K. Strozier (United States Military Academy)。最後，我一直分享家人對我著書的支持。

Frank M. White

目 錄

第一章 緒 論 1

1.1 緒 言	1
1.2 流體的觀念	2
1.3 連續流體	4
1.4 因次與單位	5
1.5 速度場的屬性	12
1.6 流體的熱力學屬性	21
1.7 黏滯性及其他次要屬性	27
1.8 基本的流動分析技巧	39
1.9 流動結構：流線、煙線與跡線	41
1.10 流體力學的回顧與範圍	45
參考文獻	47
習 題	48

第二章 流體的壓力分佈 57

2.1 壓力與壓力梯度	57
2.2 流體元素的平衡	59
2.3 靜流體之壓力分佈	62
2.4 壓力計的應用	69
2.5 表面上的靜流體力量	72
2.6 曲面上的靜流體力量	78
2.7 多層流體中的靜流體力量	81
2.8 浮力及穩定性	84
2.9 剛體運動的壓力分佈	89
2.10 壓力的測量	97
本章節要	101

參考文獻	101
習題	102
第三章 控制體積的積分關係式 123	
3.1 流體力學的基本物理定律	123
3.2 Reynolds 傳輸定理	127
3.3 質量守恒律	136
3.4 線動量守恒	144
3.5 Bernoulli 方程式	160
3.6 角動量定理	171
3.7 能量方程式	177
本章節要	190
參考文獻	191
習題	191
第四章 流體質點的微分關係式 217	
4.1 微分體系與控制體積之對比	217
4.2 質量守恒的微分方程式	217
4.3 線性動量的微分方程式	225
4.4 角動量的微分方程式	232
4.5 能量微分方程式	233
4.6 基本方程式的邊界條件	237
4.7 流線函數	243
4.8 渦度與非旋性	251
4.9 非黏性之非旋流	253
本章節要	260
參考文獻	260
習題	261
第五章 因次分析與相似性 269	
5.1 續論	269
5.2 因次齊次性原理	272

5.3 π 定理	277
5.4 基本方程式的無因次化	285
5.5 模擬及其陷阱	296
5.6 數據的創新使用	303
本章節要	306
參考文獻	307
習題	308

第六章 黏滯管流 317

6.1 Reynolds 數分區	317
6.2 內黏滯流與外黏滯流	323
6.3 半經驗紊剪流的相關式	326
6.4 圓管中的流動	333
6.5 Moody 圖的其他形式	349
6.6 非圓形導管內的流動	355
6.7 管系中的次要損耗	367
6.8 複線管路系統	375
6.9 實驗管流；擴散性能	381
6.10 流體測量表	387
本章節要	406
參考文獻	407
習題	408

第七章 邊界層流動 425

7.1 緒論	425
7.2 動量積分估計法	428
7.3 邊界層方程式	433
7.4 平板邊界層	436
7.5 有壓力梯度的邊界層	446
7.6 實驗外流	453
本章節要	472
參考文獻	473

習 題	474
-----	-----

第八章 非黏性不可壓縮流 485

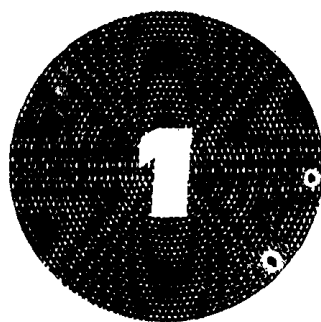
8.1 緒 論	485
8.2 平面流的基本解	489
8.3 平面流之解的疊加	493
8.4 通過封閉物體形狀的平面流	504
8.5 其他平面勢流	513
8.6 鏡 像	520
8.7 機翼理論	522
8.8 軸對稱勢流	534
8.9 數值分析	541
本章節要	548
參考文獻	548
習 題	549

第九章 可壓縮流 559

9.1 緒 論	559
9.2 音 速	563
9.3 絕熱穩流與等熵穩流	567
9.4 具截面變化的等熵流	573
9.5 正激波	581
9.6 收斂型噴嘴與擴散型噴嘴的作用	590
9.7 計及摩擦的可壓縮導管流	596
9.8 有熱傳的無摩擦管流	608
9.9 二維超音速流	614
9.10 Prandtl-Meyer 膨脹波	625
本章節要	638
參考文獻	638
習 題	639

第十章 明渠流動 653

10.1 緒論	653
10.2 均流；Chézy公式	658
10.3 有效的均流渠道	664
10.4 比能；臨界深度	666
10.5 水力躍升	671
10.6 漸近變動流	675
10.7 堰堤流動測量	681
本章節要	686
參考文獻	687
習題	688
第十一章 渦輪機械 697	
11.1 緒言及分類	697
11.2 離心泵	700
11.3 唧筒性能曲線及相似性規則	707
11.4 混流泵及軸流泵：比速	717
11.5 唧筒與系統特性的配合	723
11.6 渦輪機	730
本章節要	743
參考文獻	744
習題	745
附錄 A 流體的物理性質 753	
附錄 B 可壓縮流表 759	
附錄 C 流力影片 781	
附錄 D 單位轉換係數 783	
附錄 E 圓柱座標下的運動方程式 785	
索引 787	



緒 論

1.1 緒 言

在流體力學中，我們所要討論的對象是運動、或靜止之流體、以及邊界上（可能是堅固的壁面，也可能是其他流體）之流體所造成之效應；其本質是理論與實驗的相互適切妥協與配合。由於流體的流動是力學的一支，其運動必滿足一套基本的守恒定律，因此我們可作許多的理論探討；然而，由於這些理論只適用於某些理想化的情況，而且諸理想化的條件在實際流場中，可能是無效的，致使理論的探討往往令人受挫。造成理論討論之阻礙因素主要有兩個，一是幾何形狀，另一則是黏滯性。一般性的流體運動理論（第四章）太過於複雜，我們無法用理論來解析一般幾何形狀的流場，以致在大部份的教科書中，只討論平板、圓管及其他簡單形狀的流場；我們可用數值方法來解任意形狀的流場，目前已有專門的書籍探討計算機的數值近式解析法 [1, 19]¹。但在本書中，我們將只作理論方面的探究。

造成理論討論的第二層阻礙是黏滯性，這個特性只有在某些理想化的情形下才能忽略不計（第八章）。雖然 Ludwig Prandtl 在 1904 年創出邊界層的近似觀念，使黏滯流的分析大加簡化，但黏滯性的存在仍使基本方程式變得更加複雜、難解。除此之外，黏滯性對所有的流體皆具有破壞穩定性的作用，使流場產生極微小的速度量，而造成流場變得紊亂，此種雜亂無章的現象稱為紊流（turbulence）。紊流的理論是相當粗略的，而且十分倚重實驗數據的支持（第六章），但雖如門，從工

¹ 參考文獻列於各章的最末。

程估量的觀點而言，這些理論仍是十分可行的。現在已有教科書討論紊流的數值解析法[2]，但這些方法完全以紊流應力場之時間平均法經驗假設為基礎。

因此，我們可說：流體力學的問題有理論可供解析，但在任何情形下，皆需有實驗的支持。實驗數據經常是特定流場的主要資訊來源，如浸沒物體之阻力與升力（見第七章）即是一例。還好，流體力學是一門高度可見的學問，採用精良的儀器，我們可把流動的情形呈現於眼前[3, 4]；而且，因次分析與模擬觀念的使用也相當普遍。所以，實驗是理論的自然，而又方便的輔助工具。附錄C列了許多有趣的影片，可用以觀看流體流動的現象。我們必須牢記的是：在所有流體力學的探討中，理論與實驗應該攜手共進。

1.2 流體的觀念

從流體力學的觀點來看，所有的物質只有兩種狀態：流態及固態。其間的差別，即使對門外漢而言，仍是顯而易見的，而且「教外行人以文字來表現」兩者的差別也是一個很有意思的練習題。從學術的觀點而言，兩者的差別在於對一切剪應力的反應，固體可作靜變形以抵抗剪應力，但流體則沒辦法。不論在流體上施一個多小的剪應力，都會造成流體的運動；只要施一個剪應力在流體上，流體就會連續不斷地運動、變形。以此推論，若一流體靜止不動，則其所受的剪應力必等於零，此種狀態在結構分析中稱為靜流體應力狀態。在此情況下，應力的Mohr圓縮為一點，而且在通過受力小質點的任何平面上，剪應力都等於零。

根據上面對流體的定義，即使外行人也知道流體可分為兩類：液體與氣體。其間的分別在於內聚力的效應。液體是由具有強內聚力的緊密結合分子所構成，會傾向於保固原有的體積，而且當其上方沒有受限制時，在重力場的作用下，會有一個自由液面形成。自由液面流場主要由重力效應控制，將在第五、十章中討論。由於氣體分子彼此相距很遠，且內聚力幾可不計，氣體可自由地膨脹，直至碰到障礙面為止。氣體沒有固定的體積，而聽任其本身形成一個氣層（其本質上是屬靜流體的）。液體與氣體的靜流體行為將在第二章研討，氣體沒辦法形成一個自由液面，因而在討論氣流時，除提及浮力外，我們很少提到重力的效應。

圖 1.1 繪示一個靜置於剛性平面上的固體方塊，此方塊受壓於本身的重量之下，而下陷形成靜撓曲（如圖中極度誇張的虛線），以抵抗剪應力，但並沒有流動產生。若將方塊邊側上的小元素A取出，傾斜 θ 角橫切而過，由其自由體圖可知，在此斜平面上有一剪應力；而由於方塊

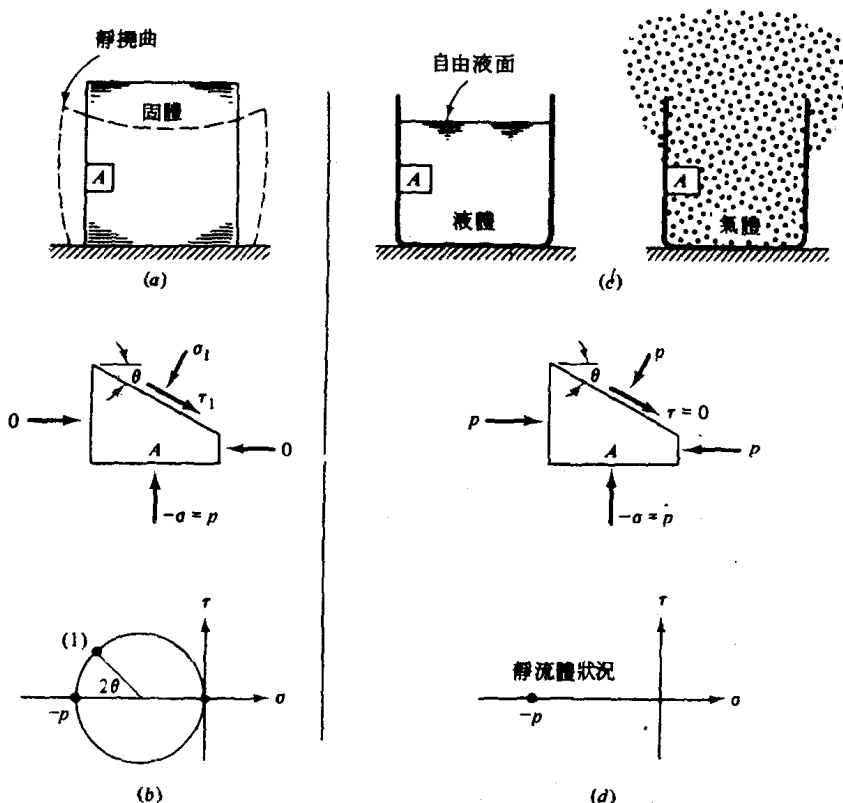


圖 1.1
 靜止的固體可抵抗剪應力，(a)固體的靜撓曲；(b)固體元素 A 的平衡與 Mohr 圓。流體不能抵抗剪應力；(c)容器壁是必須有的；(d)流體元素 A 的平衡與 Mohr 圓。

的側面並沒有受到任何支撐，故元素 A 的左、右兩側的應力等於零，而上、下兩面則受壓縮應力 $\sigma = -p$ 的作用，在此種情形下，Mohr 圓並沒有縮為一點，而且方塊上的剪應力並不等於零。

相反的，圖 1.1 中的靜止流體與氣體需有支撐壁以抵消剪應力，壁面產生一壓縮應力 $-p$ ，並使 Mohr 圓縮成一點，剪應力在各點上皆等於零（即靜流體狀態）。液體保有原有的體積，而形成一個自由液面；若將壁面移除，液體內會產生剪力，整個流體就崩垮下來。若將壁面傾側一個角度，那也會有剪力產生，造成波浪，自由表面覓求另一個水平的位形，而且必要時，部份流體會自壁的上端溢出。至於氣體，則無限制地往容器外擴張，佔據所有可能的空間。在氣體中，元素 A 也是屬靜流體的，對壁面作用一壓縮應力 $-p$ 。

在上面的討論中，我們可清楚地分辨固體、液體及氣體，大部份工程流體力學問題所處理的物質狀態也都十分清楚，如常見的液體：水、油、汞、汽油及酒精；常見的氣體：在常見溫度及壓力範圍下之空氣、氮氣、氫氣、蒸氣。但是，我們也應該知道許多介於兩種狀態下的物質，

有些似乎是「固態」的物質（如瀝青、鉛）可短期地抵抗剪應力，但時間一長，就會慢慢變形，表現出流體的行為。其他物質（特別是膠體及黏土混合物）可抵抗小剪應力，但當應力增大時，就會「屈伏」，而像流體一樣地流動。此種較廣義的變形與流動之探討稱為流變學(rheology)，有專書專門討論此類的問題[5]。而在二相混合物中，液體及氣體也可共存，如蒸氣與水，或水與水中的氣泡。這種二相流(two-phase flow)的分析也有專書[6]。最後，在有些情形下，液體與氣體的區別會變得很模糊，當溫度與壓力超過該物質的臨界點(critical point)時，這種情況就會發生。此時只有單相存在，主要和氣體相似；而當壓力遠大於臨界值時，氣體狀的物質變得非常稠密，以致有點像液體，而且平時所用的熱力學近似關係式（如理想氣體定律）也變得不準確。水的臨界溫度與壓力分別為 $T_c = 647 \text{ K}$ ， $p_c = 219 \text{ atm}^1$ ，所以有關水與蒸氣的典型問題皆在臨界點之下；空氣是由許多氣體組成，並沒有清楚的臨界點，但其主要成份（氮）之 $T_c = 126 \text{ K}$ ， $p_c = 34 \text{ atm}$ 。因此，典型的空氣問題必在高溫、低壓的範圍內，此情形下的空氣必是氣體。本書將只討論可清晰分辨的氣體的液體，上述的不確定情形不在本書探討的範圍之列。

1.3 連體流體

我們在上面已採用了一些術語，如流體的壓力、密度，但卻沒有嚴格地討論其定義；就目前我們所知道的，流體乃是分子的累積體，在氣體中，分子間的距離大，而在液體中，則緊聚在一起。和分子的直徑相比，分子間的距離是很大的；分子並非固定在一個晶格上，而是可隨意地作相對運動；因此，流體的密度（單位體積的質量）並沒有精確的意義，因某一體積內的分子數目隨時在改變。但若這個體積很大（例如，在與分子間距的三次方相比之下），則雖有許多分子從邊界進進出出，總分子數目却維持近乎一個常數，上述的效應就沒有那麼重要了。然而，如果體積選得太大，那體積內的分子分佈情形可能有不均的現象。如圖 1.2 所示，我們將「密度」（根據所給定之體積 δV 內之質量 δm 而得）對體積作圖，可發現一個極限體積 δV^* ，在此體積之下，分子的變化可能很重要；而在此之上，分子積聚的變化效應可能不可忽略。密度 ρ 的最佳定義是

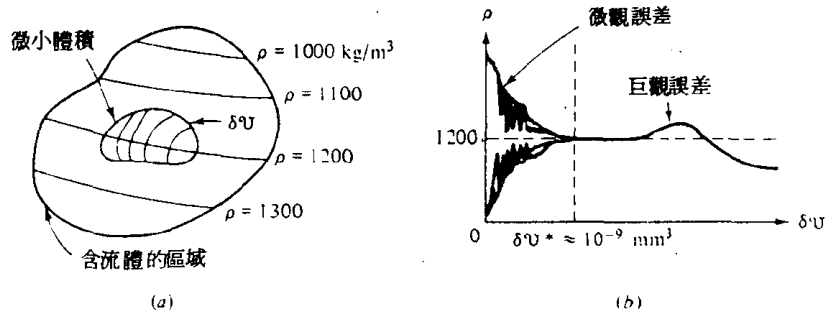
¹ $1 \text{ atm} = 2116 \text{ lbf/ft}^2 = 101,300 \text{ Pa}$ 。

31-11

1

圖 1.2

連體流體密度的極限定義：
(a) 變動連體密度之流體區域內的微小體積；
(b) 所求得之密度對微小體積之圖。



$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow \delta V^*} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1.1)$$

對所有的液體及大氣壓下的氣體，極限體積 δV^* 大等等於 10^{-9} mm^3 。例如，在標準狀況下， 10^{-9} mm^3 的空氣大約含有 3×10^7 個分子，這個數目足以定義一個幾近定值的密度 (1.1) 式，大部分工程問題所牽涉到的物理尺寸都遠大於此極限體積，故在本質上，密度是個點函數，而流體的屬性可視成在空間中作連續性的變動，如圖 1.2(a) 所示。此種流體稱為連體 (continuum)，這個名詞所代表的意義是：流體屬性的變化非常的平順，我們可用微積分來分析這個物質。在本書的所有分析中，我們將假設連體微積分是成立的。氣體也有不確定的情形，如在低壓下，分子的間距和平均自由碰撞間距 (mean free path)¹ 是同一階次，或分子的間距比系統的物理尺寸還大，在這些情形下，我們須捨棄連體理論，而採用稀薄氣流的分子理論 [7]。原理上，所有的流體力學問題都可以分子的觀點來解析，但我們在此不打算如此討論。注意，連體微積分並不排除流體屬性作不連續跳動的可能性，如通過自由液面、流體界面，可壓縮流的激波 (第九章) 等所造成的屬性不連續性。在第四章中，我們的微積分必須具有相當的彈性，才能處理不連續的邊界條件。

1.4 因次與單位

因次 (dimension) 乃物理變數賴以作數量表達的標準，而單位 (unit) 把一數字附加在一計量因次的方法。因此，長度是與距離、位移、寬度、撓度、高度等變數有關的因次，而厘米與吋則是用以表示長度的數字單位。因次是一個有力的觀念，由此可發展出一套因次分析 (dimensional analysis) 的解析工具 (第五章)，而單位則是表明一個數

¹ 平均自由碰撞間距表分子在前後碰撞間所走的距離。

目字的意義的核心。

各國所採用的單位系統一直都有相當大的差異，即使在達成國際協定之後，也沒有多大的改善。工程師須作數字運算，也就免不了單位系統的需求，而且這些數值必須是正確無誤的，因公衆的安全就在這中間作賭注。工程師不能用直徑是 D ，長度是 L 的代數法來設計、建造管路系統，我們必須給予適當的數值數據。長久以來，美國工程師一直依附英國的單位系統，但這一套系統太容易教人出錯了，同學們可能因忘了一個 12、144、32.2、60 或 1.8 之類的轉換因子，而換來不及格的考試成績；即使實習工程師也會造成相同的錯誤，就作者本身的經驗，就有人在飛機的初步設計中，忘了將質量的磅單位換成 slug 單位的 32.2 轉換係數，而造成嚴重的設計錯誤。

在 1872 年，一個在法國召開的國際會議提議一個稱爲公制公約 (Metric Convention) 的協定，而於 1875 年，17 個國家代表簽署這項協定，這是一個十進位的系統，比英制系統進步很多。但即使如此，採用公制體系的國家仍有其差異性存在，如以千磅取代達因 (dyne) 或牛頓 (newton)，以千克 (kilogram) 取代克 (gram)，以卡 (calorie) 取代焦耳 (joule) 等等。爲使公制標準化起見，國際間在 1960 年開了一個度量衡會議 (General Conference of Weights and Measures)，與會的四十餘國代表建議一套國際單位系統 (International system of Unit, SI)。目前美國正進入使用 SI 系統的痛苦轉型期，其調整的時間可能得延續到本世紀結束爲止；許多學會已將單位系統導入此方向，自 1974 年 6 月 1 日起，美國機械工程師學會 (American Society of Mechanical Engineers) 規定所發表的論文須用 SI 單位，此學會也印製了一份說明 SI 單位的小冊子 [8]；在本書中，我們混合使用 SI 單位及英制重力單位 (簡稱 BG)。

在流體力學中，只有四個原始因次 (primary dimensions)，所有的因次皆可由此導出。這四個因次是：質量、長度、時間及溫度¹，其因次與單位列於表 1.1 中。注意：kelvin 單位並沒有度 (°) 的符號，而大括弧內的符號，如 { M }，代表質量「的因次」，流體力學的所有其他變故皆可以 { M }、{ L }、{ T } 及 { Θ } 表示，如加速度的因次爲 { LT^{-2} }。而在這些導出因次 (secondary dimension) 中，最重要的是力的因次，由牛頓第二定律

¹ 若電磁效應很重要，那必須再加入第五個原始因次，即電流 { I }，其 SI 單位爲安培 (A)。