

3670
初等流體力學教程

Hunter Rouse 原著

錢家歡 潘家錚 合譯

中國科學圖書儀器公司

出版

初等流體力學教程

ELEMENTARY MECHANICS OF FLUIDS

Hunter Rouse 原著

錢家歡 潘家錚 合譯

中國科學圖書儀器公司

出版

內 容 介 紹

原書是一本採取新穎編排方式的流體力學，與普通水力學教本不同，說理詳謹嚴正，且富有啓發性，使初學者不致感覺困難，並為學習更高深的流高力學及作模型試驗者準備良好的基本知識。

譯者除把原書中不合國情的部分刪去外，並將度量衡單位改成公制，使能符合教學的需要，而作為工科大學或專科學校中流體力學課程的教本。在水利工程機關中，如以本書為業務學習的資料也頗相宜，書中有很多討論問題可適合新的學習方式之用。

初 等 流 體 力 學 教 程

ELEMENTARY MECHANICS OF FLUIDS

原 著 者	Huntley Rouse
原出版者	John Wiley & Sons, Inc., New York
譯 者	錢 家 歡 潘 家 鎔
出版 版 刷 者	中國科學圖書儀器公司 上海延安中路 537 號 電話 64545
總 經 售	中國圖書發行公司

版權所有 ★ 不可翻印

CF.52-0.12 25開 418面及插頁1張 288千字 每千冊用紙17.22令

新定價 ¥ 32,500 1953年8月初版 0001—2000

上海市書刊出版業營業許可證出 027 號

序

本書是一本詳盡的流體力學教程，藍本是勞斯博士所著的初等流體力學。勞氏早年曾留學於德國，所以他的著作頗有歐洲大陸的作風，說理詳謹嚴正，圖照豐富實用，例題習題更具有啓發性。本書就是他的一本典型著作。

普通的水力學教本，往往把靜水力學列在第一章，然後敘述動水力學的理論，以後則分章論述孔口洩水，堰上過水，管中水流及明渠水流等現象。這種編排方式，初看似亦適當，其實存在着一個很大的缺點，就是將受同一原理控制的流動現象，硬行割裂開來，結果很容易使學生在修完整個課程後，祇得到一套零碎的公式，對於流動的基本原理，影響流動的各項變數，以及其在每種場合下所起的作用，却茫然無知。因此，過去常有一些學生或工程人員，會記住一個繁複的經驗公式，去應用在一個特殊的問題上；而對一個簡單的，涉及原理性的問題倒無從索解或發生不應有的錯誤，這是由於尚未徹底掌握流體運動原理之故。

針對着這一點，本書原著的編排方式和所取材料，是非常新穎的。除第一章緒論外，第二章討論流體的運動學，以及如何應用流網來解決它，而不牽涉到力的觀念，以後則逐章討論每一種力量在流體運動中的任務，包括第三章中的壓力，第四章中的重力，第六章中的粘滯切力，第十章中的表面張力及第十一章中的壓縮性影響。在研究過壓力及重力後插入一章實用的近似分析法（第五章、單向分

析法)；在研究過粘滯力後，插入三章近代流體力學上的主要課題：表面阻力，形狀阻力及上升和推進。這樣差不多已包括了流體力學的全貌。各種實際問題都按其流動基本性質隸入各章。我們深信這種編排方式，不僅比較合乎邏輯，而且更替學習高等流體力學和模型試驗準備了一個良好的基礎。

原書中有許多不合國情的地方，都經悉數刪去，度量衡亦改為公制。經過這樣改寫後，本書可適於作為工程學院各系流體力學一學期的教本。如果時間不敷，可將第 8, 23, 25, 37, 45, 46 和 47 諸節及最後二章略去，無損全書的連續性。本書原本不但曾在許多大學中用作教本，也有不少工程機關作為業務學習的資料，所以也極適宜作為工程人員自修之用。此外尚有百餘個討論問題，都是非常新穎和帶有啓發性的，尤其適用於新學習方式下，作為小組討論之用，或可作教員口試的題目。

我們接受了中國科學公司編審處顧世楫先生的建議，把原書中的英制度量衡一律改換成公制，因此使本書出版稍為延遲。本書承浙江大學同學張振強，龔淮義，莊洪泉，陳如齡，經緯良，裘劍懷及華東水力發電工程局陶家駿諸君代為抄寫原稿，應致感謝之意。本書首頁的圍壩模型試驗照片，係攝於浙大水力試驗室。

最後，我們謹以感謝的心情，來接受對本書的任何建議，批評和指正。

錢家歡

南京華東水利學院

潘家鋒

杭州華東水力發電工程局

一九五三年二月

目 錄

第一章 緒論.....	1-8
1. 流體力學是一種工程科學.....1	
2. 流動的基本特性.....3	
3. 流體的性質.....5	
第二章 流體的速度和加速度.....	9-48
4. 速度和流線.....9	
5. 連續方程式.....14	
6. 流網的意義.....23	
7. 定常流的速度.....33	
8. 變量流的速度.....41	
第三章 加速流中的壓力變化.....	49-75
9. 質量加速原理.....49	
10. 由於壓差的加速度.....51	
11. 定常、無旋轉流中的壓力分佈.....59	
12. 壓力方程式的應用——射流問題.....64	
13. 歐勒氏(1)數的意義.....72	
第四章 重力對流體運動的影響.....	76-127
14. 質量與重量.....76	
15. 由於壓差及流體重量的加速 度.....77	
16. 靜水力學原理.....83	
17. 柏努利(2)定理的導演及其 意義.....95	
18. 有自由面的曲線流動.....103	
19. 液體射流的幾何形狀.....116	
20. 夫魯德氏(3)數的意義.....121	
第五章 流體運動的單向分析法.....	128-173
21. 動量及能量原理.....128	
22. 液體在封閉管路中的定常流.....141	
23. 液體在封閉管路中的變量流.....146	
24. 明渠中的定常流.....155	
25. 明渠中的波動和湧浪.....164	
第六章 粘滯性對流體運動的影響.....	174-212

(1) Euler

(2) Bernoulli

(3) Froude

26. 流體變形時的粘滯抵抗.....174
 27. 定量、等速、粘滯流中的壓
 坡.....179
 28. 粘滯切力所消耗的能量.....186

29. 雷諾氏(1)數的意義.....192
 30. 粘滯流的不穩定性.....198
 31. 流體紊動的特性.....204

✓第七章 表面阻力.....213-267

32. 邊界層原理.....213
 33. 接近光滑和粗糙邊界處的流
 速分佈.....223
 34. 光滑及人工加糙水管的阻力234

35. 市場水管的阻力.....243
 36. 非圓形截面的均勻管路.....249
 37. 明渠中的漸變流.....257

第八章 形狀阻力.....268-309

38. 邊界層分離.....268
 39. 潛體上流體壓力的分佈.....271
 40. 潛體的拖曳力.....280

41. 管路轉彎段上測壓管頭的分
 佈.....289
 42. 管路轉彎段的能頭損失.....302

第九章 上升和推進.....310-355

43. 循環與馬格那斯氏(2)影響.....310
 44. 機翼的升力和拖力.....318
 45. 推進器的特性.....329

46. 軸向流和輻射流的機械.....340
 47. 流體的動力傳輸.....351

✓第十章 表面張力.....356-371

48. 分子吸引和表面能.....356
 49. 表面‘張力’和毛細現象.....360

50. 韋伯氏(3)數的意義.....365

第十一章 可壓縮性在流體運動中的任務.....372-396

51. 彈性波的傳遞.....372
 52. 可壓縮性對氣體定量流的影

- 響.....380
 53. 馬克氏(4)數的意義.....388

附錄 流體的物理性質.....397-411

54. 向度原理的應用.....379

55. 各種普通流體的性質.....403

(1) Reynolds

(2) Magnus

(3) Weber

(4) Mach

第一章

緒論

1. 流體力學是一種工程科學

歷史的發展 大約在幾百年以前，人類對水流的經驗開始結合成一種科學的形式。這門科學在發展中逐漸的形成了二種不同的方向：一方面是數學物理家把水視為一種理想的流體而推導出一種理論科學，稱為“古典的水動力學”⁽¹⁾；另一方面，一般工程師認為理想的理論如不加以實驗的校正係數，便沒有實用的價值，於是藉實驗為助而發展成一種應用科學，稱為“水力學”⁽²⁾，應用於特殊的場合，如給水，灌溉，防洪，和水力工程諸方面。

當其他工程師遇到油類或氣體流動的問題時，水力學的公式便漸漸擴展以應付這幾方面的需要。可是近代飛機機體的設計，需要的準確程度，恆較其他各種工程為高。不僅是水力學中現有的原理應用在航空學上，常嫌太不準確，而且這些原理尚不足以敘述流體的普遍運動情形，自難應用於物體在空氣中的運動。於是物理學家和工程師不再純靠實驗的方法，而開始擴大流體運動的基本觀念，成爲一種科學，它的主要部份包括了空氣動力學和水力學，此外更有許多其他的應用場合。

這一科學就成爲“流體力學”⁽³⁾，是與固體力學和材料力學並行的

(1) classical hydrodynamics (2) hydraulics

(3) fluid mechanics

科目，建築在同樣的基本運動定律上。因為它主要是從基本的物理學原理出發的，所以和純粹實驗的水力學不同；反過來說，它也不像古典水動力學，以純粹數學為依據，而是與實驗研究密切相關，這些實驗研究可以補助和充實基本分析的不足。換言之，流體力學避免了前述兩種科學的缺點，而儘量吸收兩者的優點，形成了一門新的科學。

今日的範圍 這門相當新穎科學的範圍，現在已非常廣泛，它形成了多種學問的基礎，例如氣象學，海洋學，彈道學，潤滑作用，航海工程，或甚至地質學的某幾部份，當然不用說，水利和航空工程更應包括在內。事實上一個簡單的例子，如紊動⁽¹⁾的現象已足夠表示出流體運動對於今日文明的重要性了。在流體運動中有紊動和渦流存在，便產生了雙重影響：那就是流體透徹的拌和以及能量的消耗。像固體摩擦一樣，流體的紊動有時造福於人類，有時却又有害。例如若無渦流所產生的混和，鍋爐管中的水和大地四周的空氣便成為不良導熱體，蒸汽機的開動就將太昂貴，而空氣亦將不能維持生命。另一方面，如無渦流，風沙就不會發生，河水也不會挾帶大量泥砂自山脚流入海中。再如在推進的過程中倘不能產生渦流，一個游泳者——或一艘海輪——便不能前進一步，正像倘無摩擦以致不產生牽引力時，車輛便維持靜止一樣。然而說起來似乎是矛盾的，如果物體在流體中運動不產生渦流，物體也不需要做成流線型了。即使是呼吸的動作也得靠紊動，如在呼吸時，沒有劇烈的混和，新鮮空氣便不能跟着吸進，除非這個人移動到一個新位置去。僅僅一種流體運動就這樣的重要，可見流體運動的一切原理

(1) turbulence

顯然聯繫到人類活動的廣泛範圍，所以現代科學家和工程師非清楚了解這些原理不可。

2. 流動的基本特性

量度的單位 流體運動，像力學的其他部份一樣，可以用長度，時間和力三種單位來表示。例如，一個氣球的形狀及其離地面的高度僅以長度單位來表示已足。長度和時間的單位合起來可表示上升的速率以及在各種高度時所遇到的風速；氣球的上升力和氣球與纜索的拖力可用力的單位來表示，於是這一個運動的實際狀況就全部表達出來了。同樣，潤滑的軸和軸承的形狀可以幾何的量度來代表，轉速用時間表示，潤滑劑的切力和壓力用長度和力表示。一旦已知這種流動的特性，任何流體運動的實用問題都可完全解決。

不論在實驗室中，工廠裏，及工地上，長度時間和力三者都能用相當簡單的方法量定，故實用上任何流體運動的特性都可以直接或間接決定，邊界形狀的量度不論是軸承淨空小到幾分之一公厘，或者是大氣擾動範圍大到幾千公尺，祇需用量角器和直尺已足。時間通常以秒為基本單位，這是一個較小的單位，如潛水艇上潛望鏡的搖動現象，是用這樣短的單位量度。反之河流中洪水的移動，就以日數來計算要方便得多，而潮流有每天，每月或甚至每季的週期。力通常可以刻度的彈簧秤量之，但其大小懸殊，隨各種流動現象而異，例如塵埃在空氣中落下所遇到的阻力僅是幾分之一克，而海輪的螺旋推進器上的推力，却有幾公噸之多。

流體速度的量度同時包括長度和時間，略較複雜。例如我們量

浮標移動一已知距離所需的時間，或者計數流速儀每分鐘的轉數，以測定速度。經過許多浮標和流速儀的同時使用，我們並可得到在一大塊區域內流動速率和方向分佈的概念，像地圖中所指出的季候風和海流的情形。長度和時間兩單位的另一種合併使用，是流動的容積率，簡稱為流量，如滴管中每秒鐘流出的滴數，或如一個大都市的給水總管每天所經過的幾十萬立方公尺數便是。

在我們量度一物體所受到流體作用的力時，常決定此力作用在某處的單位壓力。例如空氣作用於物體上的單位壓力，常以每平方公分的公斤數來表示。在海面下甚深處，或在高壓的儀器中，單位壓力甚大時，則以若干大氣壓力表示之。與單位壓力度量相同的有單位切力，如潤滑液體作用在被潤滑的軸承或管壁上的單位切向應力是。

流動情況的推斷 上述流動特性的正確量度，對於研究已存在的流體運動當然是非常重要的。例如校對水輪機的效率，或試驗一種新的流體傳輸的情況，便需要精確的量度。然而，單位的量度並不是近代流體力學的最終目的，僅是一個需要的工具，因為今日的科學和工程憑已知或假設的情況去預測一種或他種運動的特性，比量度更為需要。例如設計一幢大廈的水管系統，並不是在完成後去知道頂層可得到的水量，而是在不浪費材料和動力的原則下，設計這一給水系統，使在建造以前就保證可得所需的流量。同樣，模型飛機的拖力和上升力極易在風洞中量得，但除非可將結果回算至原型的尺度，這些試驗就毫無意義。在風暴時記錄大氣壓力和風速也是容易的，但氣象人員如不能在幾天前預先知道這種情況，那麼也沒有什麼價值。河流的大規模控制，高速飛機機體的

流線型化，潛水艇的信號和偵查——事實上，包括以運動流體為媒介的任何問題——顯然都需要瞭解這種運動的主要原理，以期有把握推斷在任何已知條件中流動的特性。

3. 流體的性質

流體的力學性質 如果各種不同流體的運動情況完全不相關，流動的分析自將頻於無望，幸而各種流體，具有相同的力學性質，僅程度不同而已。例如水的密度不及水銀，但較空氣要大得多，因之，水的慣性也不及水銀而較勝於空氣——換言之，以水作比較，使空氣運動較為簡易，但使水銀產生同樣的運動速率就相當困難。可是在這三種物質中，質量抵抗加速的基本性質是相同的，故包括在流體力學的同一般原理中。

又如水因重量或地心吸力而沿斜坡下流，為大家所熟知，但很少有人瞭解在大氣或海洋中，因局部溫度的不同而形成流體重量的些微差異，亦會使較冷的部份在較熱的部份中向下流動。所以河渠水力學中的重力定律，同樣可用在氣象及海洋學中，這僅不過在許多事實中述及兩個例子而已。

同樣，顯然潤滑油粘滯性比酒精要高得多，但根據今日的知識，由油類在管中的流動試驗，可以準確推斷酒精的相當流動性——蒸汽或天然氣也一樣——因為一切流體粘性阻力的定律是相同的。摩天樓或懸索橋對於風的阻力，也正可以將模型在水中拖動，或將模型置在流動的空氣中去研究。

氣體是容易被壓縮的，液體則雖在極大的壓力下，其密度仍可視為常數，然而水的彈性係數較鋼為低，這一事實，表示水也是可壓

縮的，雖然它的可壓縮程度遠較空氣為低，於是海水中彈性波的傳佈與大氣中聲音的傳佈遵循同一基本定律，雖然兩者實在的傳佈速度可能大不相同。的確，這種相似性並擴展到其他的流體性質，模型橋墩前的毛細波，船舷邊的重力波，射體尖端的音波，都可用流體力學中的同一定律來分析。

本書的範圍——流體性質對於流動特性的影響 在進行研究每一流體性質以前，讀者應熟悉如何觀察流態的各種方法。所謂流態是指流動中的狀態，例如汽車在公路上疾駛，或水流在溢道中奔騰引起的狀態。流體運動的形態，最近似的方法，可根據流動邊界的幾何形式而求得，而在第二章中就有流速和加速度的詳細敘述，但在這一章中並不研究流體中力的存在。緊跟着的一章開始介紹流體的密度，但所討論到唯一的力是與加速度相伴的壓力變化。

倘使除密度以外並無其他流體性質存在（正同古典的水動力學中所假定的），就不需要作進一步的研究。事實上，本書中開首幾章所推導的定律確已足夠解決許多實際的流動問題，但為了瞭解並有效地解決這範圍以外的許多問題，我們必須仔細研究基本流動狀態中加入了其他流體性質後的影響。

所以第四章中在同樣的基本邊界形式下，敘述了流體重量或地心吸力對於壓力和速度分佈的影響，跟着就利用簡化方法分析管路和明渠中的水流。其次介紹流體的粘滯性，於是講到流體紊動，邊界阻力，升力和推進等理論，這些在近代分析中負了十分重要的任務。表面張力的影響，也許是流體性質中最不重要的一種，僅簡略的加以討論。最後，講到可壓縮性對於流態的影響，特別注意於超音速的運動；因為這一部份的流體力學是接近於熱力學的領域，

所以講到的限於與本書前幾章中有密切關係的這些現象。

正同其他各種力學一樣，流體運動的基本定律是採取數學形式，同時加以物理現象的描述。故本書所視為主要的原理均應用大學本科工程學生所懂得的微積分來推導，而每一次推導都有詳細的物理解釋。不過，不論每單獨原理所得結果如何精密，在包括一種以上流體性質的複雜流動問題中，要合併這些原理去嚴格解決問題是困難的，而且常常是不可能的。當讀者閱讀此書時，將自會明白工程師和科學家必須仍在某一範圍內應用簡化的近似方法，作為流體運動的最後分析。爲了這個緣故，讀者須好好地掌握住本書所推導的基本原理，才會有滿意的成績。

討 論 問 題

1. 在何種環境下人類也許開始認識需要流體運動基本原理的智識？
2. 在(a)日常生活及(b)工程實例中，列舉幾個流動的現象。
3. 在瞭解流體的性質後如何可應用到下列各種專門場合：橋樑設計；油井開鑿；衛生工程；鑛冶；水土保持；化學工程；地質學。
4. 空氣的運動總是紊亂的嗎？這種運動憑肉眼有何方法辨認？
5. 近代車輛為什麼做成流線型？對於流線型(a)有科學根據，或(b)僅為美觀，試各舉例子。
6. 人體血液流動是否像鍋爐管中一樣的紊亂，或血液以另一種方式傳導熱量而不藉紊動？
7. 大風會掀起房屋的頂而不會將它壓入，試用壓力分佈的理由解釋之。
8. 說明在風吹時電話線嗡嗡作響的原因。
9. 說明影響流體運動的各種流體性質以及因每一種性質影響所產生的流動現象。
10. 一個人浮在海中比浮在淡水中更容易，這是熟知的事實，但是否在海水中會游得更快些？
11. 在一已知的斜坡渠內，水銀還是水可流下得較快些？

12. 爲什麼汽車在冬季比夏季要用較“輕”的油？這“輕”字是指油的何種性質？
13. 你想像空氣流動的粘滯阻力大於還是小於水流的粘滯阻力？
14. 在(a)氣泡中，及(b)一滴液體中，單位壓力是大於，等於還是小於四周介質的單位壓力？
15. 彈丸發射時呼嘯作聲，其音波在彈丸之後或在其前？

第二章

流體的速度和加速度

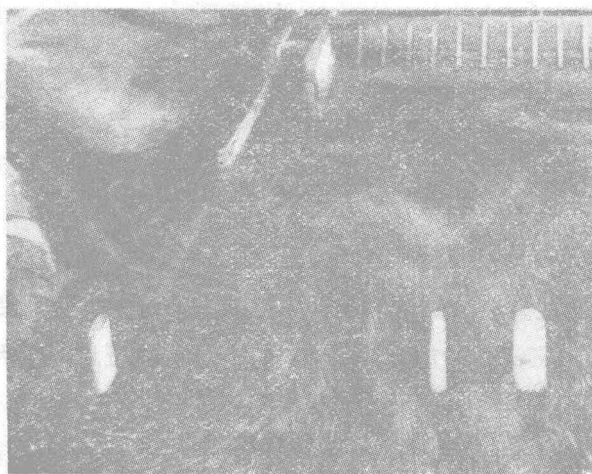
4. 速度和流線⁽¹⁾

流態⁽²⁾的觀察 有風之日，自烟囱中出來的輕烟，可以使我們想像到周圍空氣流動的情形。同樣，雲層的動態，可以觀察大氣的大規模移動而得；河渠中的水流情形可從懸移的沙泥，石屑辨出。在上面的每一種例子中，我們可有兩種不同的方法去觀察流動。第一種是觀察流體中某一區域繼續不斷的流動趨向，第二種方法是任意選取某一小部份懸移質，追蹤它所取的途徑，於是可以用意會的方法求得整個流動中某方面的概念。

但在大多數流動現象中，流體內並無這種可見的介質，像烟末，泥沙等存在。在實驗室中，常在流體內加入油滴或撒以光耀的鉛粉，以供觀察或拍攝流動情形之用。但在普遍情形下，我們祇能想像，或在紙上描繪出一組曲線來表示任何部份中流動的本質。起初看來，這樣的一組曲線，似乎是完全任意描繪的，事實上，他們所指示的流動情形，必須完全符合力學原理，本書的目的，就在研究這種原理。至於本章的目的，是在研究流體圍繞任何形狀的邊界⁽³⁾，或在任何形狀的邊界間的流態。所以首先介紹一種表示和解釋任何流態的方法，即下面所述的流線。

速度向量⁽⁴⁾和分速度 流體的運動，正和固體相同，是用速度來

(1) stream line (2) flow pattern (3) boundaries (4) velocity vector



照片 I 河流模型中的水流,用紙屑撒在水面上觀察。

量度的,不過在研究固體運動時,通常可量計整個物體的速度已足,而在流體運動中,各點的速度,可能有很大的差別,但流體中任何

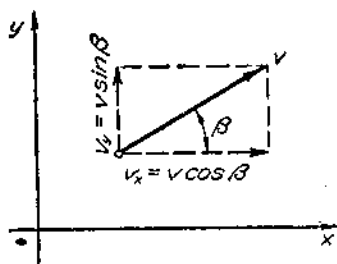


圖 1. 速度向量和直線分速

一點的速度完全決定該點在某一瞬間的運動狀態:不但表明流體經過該點時的速率⁽¹⁾,同時更指出經過該點時的方向。所以速度是一個向量,因為它有大小和方向兩種性質。向量一般可用一個矢號來表示,如圖 1 中所示,矢的長度與速度的大小

成比例,矢的方向表示速度的方向。

因速度是一個向量,故可沿任何指定方向分解為分速度,(例如圖 1 中沿兩正直方向⁽²⁾分解為 v_x 和 v_y)。反之,在一點的諸分速

(1) speed

(2) rectilinear direction