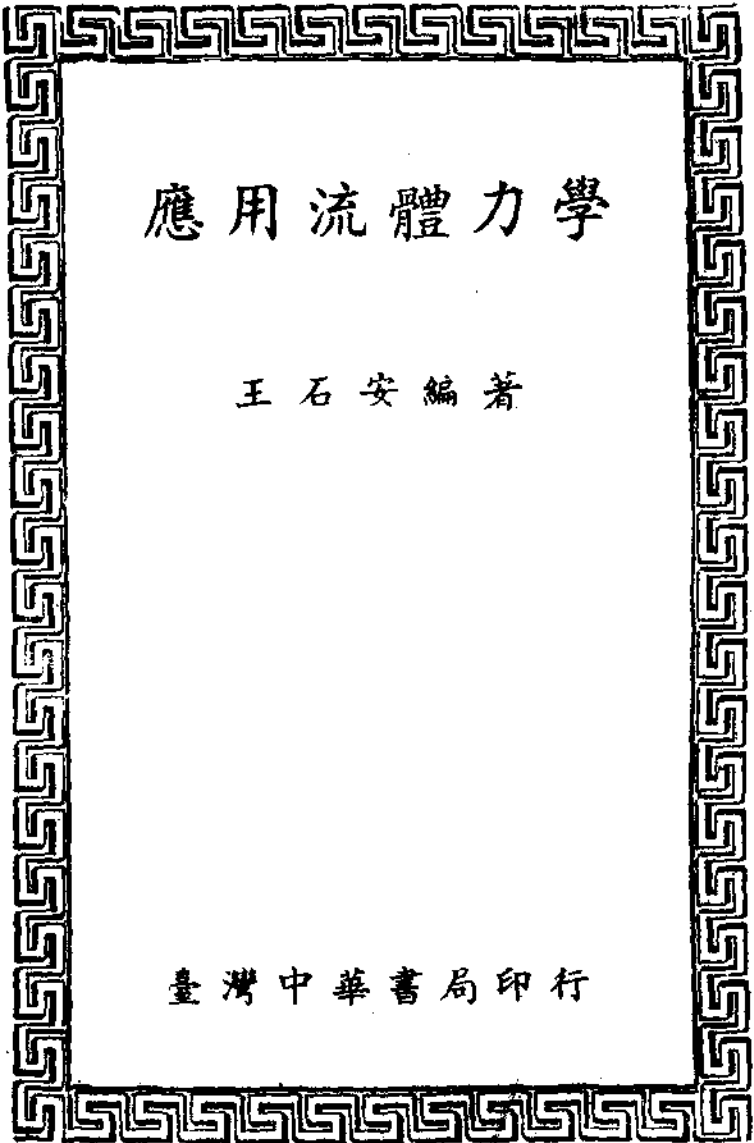


應用流體力學

王石安編著

臺灣中華書局印行



應用流體力學

王石安編著

臺灣中華書局印行

中華民國六十五年三月四版

應用流體力學（全一冊）

平裝一冊基本定價伍元肆角正

（郵運運費另加）

編著者 王 石 安

發行人 熊 鈍 生

臺北市重慶南路一段九十四號

行政院新聞局出版

臺業字第捌叁伍號

臺灣中華書局印刷廠

臺 灣 中 華 書 局

臺北市重慶南路一段九十四號

郵政劃撥帳戶：三九四二一號

Chung Hwa Book Company, Ltd.

84, Chungking South Road, Section 1,
Taipei, Taiwan, Republic of China



本書局登
記證字號
印刷者
發行處

謹以此書紀念

敬愛的父親

應用流體力學序言

卅年來航空發動機之發展神速，固因所採用的燃料與金屬材料之日新月異，而流體力學所負之性能向上，實為重大因素。即在進步顯著之化學工程中，水力學所佔之地位亦屬卓越。而工程教育方面，流體力學亦與材料力學、熱力學同被列為基礎學問。由此可知，流體力學對於應用科學方面之用途，既廣而進步亦速。

有關流體力學之書籍，各先進國家近年來出版頗多，其經我國書肆翻印者，亦復不少，足供學子研讀之需。惟是各大學研究所關於此科之入學試題，通常多較大學部教材之內容為艱，因而入所進修之青年，每感兩者程度懸殊，無從作成較優之成績。因此要求內容稍為高深之參考書，至為迫切。同時，關於中文版之此類書籍，至今尚感闕如，站在科學立場，不無落後之感。有此兩種原因，乃引起我編寫此書之動機。

在預備編寫此書之初，有人建議將德國著名流體力學專家柯夫曼（Walther Kaufmann）所寫的工業流體力學（Technische Hydro- und Aeromechanik）譯為中文出版，似可省力。此種主張，不無理由，但我知道該書是專為德國工科大學學生而寫的，較之坊間所售同類書籍程度稍高，而且其中有些章節應有而無，應詳而簡，也有應簡而過詳，應捨而偏重的，這些不合理想之處，實由於該書之作，乃以德國前期之教育為背景，故顯露此種特性。基於此一認識，乃決定另寫應用流體力學，以柯氏之書為藍本，而力求適合我國學子之要求，書中添些我認為要添的部分，而捨去我認為可捨者。

這本書之基本傾向，着重於說明帶根本性之定律及方法，而不是搜羅較多之應用問題，當然我並未忽略應用流體力學中在實踐上之特別重要部門，而進行深入之探討。

對於有關附面層理論問題，稍作廣泛之描述，因為附面層理論之任務，在於建立古典流體力學（或水動力學）與水力學兩者間之橋樑，水動

力學僅由理論上研究無摩擦阻力之流體；水力學則以經驗觀察為方向，且考慮流體摩擦阻力之影響。

紊流問題之研究，對於計算物體在流體中運動所遭遇之阻力，具有特別重要之意義。因之關於層流至紊流之轉變，已成為一個嶄新的問題，所以關於此方面之理論思考，專闢一章，對其各個基本觀念並作簡單之說明。

本書之大部分是討論不可壓縮（定積）流體之流動，此原屬於水動力學之基本應用範圍，其實僅須流速小於音速，根據密度固定不變的假定所得之定律，又同時適用於氣體，在此前提下，空氣動力學與水動力學，可視為完全一致。

氣體之流速愈接近音速，壓縮性對於流動過程之影響，亦表現愈強烈。當流速達於或超過音速時，流動之性質則完全與在亞音速區域中不同，所有壓縮性之流動過程，現均總括在氣體動力學之題目下。因此氣體動力學所描繪者為「流動介質」最普遍之運動形式。由於此一觀點，可知水動力學又為氣體動力學之一特例。

高速流動不僅在航空工程中極為重要，而且對於某部分流體機械亦具有重大之意義。因此關於高速流動推演計算有列出之必要。並在定積流動討論之後，立即就氣體力學之重要定律作一概括之敘述，但為不超越本書範圍，對於深入之討論，特加限制。此點，我認為無大妨礙，因為關於氣體動力學，已有專著全面闡述，可資參考。

於苗栗國立中央大學地球物理研究所

石 安 謹 識

民國 56 年 8 月 13 日

慈母生西三週年紀念。

應用流體力學目次

第一章 流體力學發展之簡史

第一節	概說	1
第二節	流體力學在牛頓時代進展之概況	1
第三節	古典流體力學之確立	2
第四節	古典流體力學之完成	5
第五節	近代流體力學之發達	6
第六節	高速氣體力學之發達	8

第二章 流體之物理性質

第一節	概說	10
第二節	理想流體與實際流體	11
第三節	流體之重量、質量及密度	13
第四節	氣體之屬性	15
第五節	流體之壓強	16
(一)	靜止流體中之壓強	16
(二)	大氣壓	17
(三)	靜止流體中任意點之壓力	18
(四)	流體之體積彈性係數	19
第六節	液體之電氣傳導度	20

第三章 靜止流體之平衡與壓力

第一節	歐烈平衡方程式	22
第二節	重力作用下流體內部之壓強	25
(一)	均質流體	25

(二)	比重不同之多種流體	27
(三)	連通容器	27
第 三 節	絕對壓力與表壓力	28
第 四 節	壓力之測定	30
(一)	液體壓力計	30
(二)	示差液壓計	33
(三)	液體微壓計	35
第 五 節	靜止流體對於容器壁之壓強	39
(一)	平面上之壓強	39
(二)	曲面上之壓強	44
第 六 節	加壓流體之壓強(不計重力作用)	49
第 七 節	繞定軸等速迴轉之流體	51
第 八 節	靜止流體之浮力	55
第 九 節	浮體之穩定與穩心	57
第 十 節	表面張力	61
第十一節	毛細管	63
第十二節	大氣之平衡	65
(一)	恒溫狀態	65
(二)	絕熱狀態	67
(三)	標準大氣	69

第四章 流體運動之基礎方程式

第 一 節	作用於流動流體之力與其處理	71
第 二 節	流動學上之術語	72
第 三 節	流動之解析	77
第 四 節	流管與連續性方程式	80
第 五 節	流體粒子之加速度	82
第 六 節	歐烈運動方程式	85
第 七 節	伯努利能量方程式或壓強方程式	87

第 八 節	伯努利定理之應用	88
(一)	托里則利原理	88
(二)	文德利管	91
(三)	內部有超壓的密封容器之出流	92
(四)	流動流體之吸力	93
第 九 節	駐壓強與總壓強	94
(一)	皮托管	96
(二)	皮托靜壓管	98
第 十 節	作為非壓縮性流體之空氣	100
第十一節	非穩定流之能量方程式	101
第十二節	流體動力學之動量定律	107
第十三節	動量定律之應用	109
(一)	流體對於彎管管壁之壓力	109
(二)	噴流之背壓	110
(三)	自由噴流對於擋壁之壓力	111
(四)	流動流體對於等速迴轉溝槽之壓力	112
(五)	作用於剖面變化管之壓力	113

第五章 層 流

第 一 節	概 說	115
第 二 節	黏 性	115
第 三 節	黏性之定義	116
第 四 節	黏性單位	118
第 五 節	動黏性	120
第 六 節	黏性之數值	121
第 七 節	非理想流體之能量方程式	125
第 八 節	層流與圓管之層流流量定律	126
第 九 節	兩平行界壁間之流	130
(一)	兩界壁固定	130

(二)	下界壁固定，上界壁以速度 V 沿自身平面運動	131
第十節	潤滑摩擦阻力之流體動力理論	133
第十一節	軸承	138

第六章 紊流

第一節	相似律	146
(一)	雷諾數	147
(二)	弗勞德數	152
(三)	歐烈數	153
第二節	紊流與雷諾數之實驗	156
第三節	圓管內之紊流定律	160
第四節	璦郎特混合長度與卡門相似假定	164
第五節	紊流沿平面界壁之速度分布	168
第六節	圓柱管中之紊流	170
(一)	管路紊流之阻力係數	170
(二)	流動光滑管之實驗定律	173
(三)	速度分布	175
(a)	卡門定律	175
(b)	璦郎特定律	178
(四)	光滑管之阻力定律	182
(五)	粗糙管	183
(六)	非圓形剖面之管	190
第七節	實際管路問題	191
(一)	已知 Q 與 d ，求 J 與 $\bar{v}$	191
(二)	已知 d 與 J ，求 $\bar{v}$ 與 Q	192
(三)	已知 J 與 Q ，求 d 與 $\bar{v}$	193
第八節	關閉管路中之特殊阻力	195
(一)	有管嘴容器之出流	196
(二)	剖面之變化	198
(三)	方向之變換	201

第 九 節	管路之分歧	203
第 十 節	關閉管路中之非穩定流	206
(一)	連通器之振動	207
(二)	摩擦阻力完全不計時	208
(三)	與速度成正比例之摩擦阻力	209
(四)	與速度平方成正比例之摩擦阻力	211

第七章 明渠道中之流

第 一 節	概 說	213
第 二 節	在底槽固定之渠道中之均勻流動	214
第 三 節	淌流與瀉流	221
第 四 節	非均勻運動	224

第八章 理想流體流動之基本概念與基本方程式

第 一 節	概 說	234
第 二 節	連續性方程式	234
第 三 節	歐烈運動方程式	237
第 四 節	漩渦流動與無漩渦流動(渦流與勢流)	239
第 五 節	環流及湯姆遜定律	242
第 六 節	司徒克斯積分定律	247
第 七 節	伯努利壓強方程式	249
第 八 節	平面勢流	253
第 九 節	保角變換	259
第 十 節	複勢之應用	261
(一)	源流與溝流	261
(二)	兩平面界壁夾角間之流	264
(三)	強度相同之源與溝	266
(四)	繞圓柱之平行流	270
(五)	繞矩形板之平行流	272
(六)	不同流譜之疊加	275
第 十 一 節	有環流之流	278

(一)	同心圓式之流	278
(二)	平流與環流	279
(三)	繞哥奇夫斯克機翼剖面之流	281
第十二節	迴轉對稱之勢流	285
第十三節	繞迴轉體之勢流	288
第十四節	流體之動力性升力	293
第十五節	表面波	297
(一)	直線推進波	297
(二)	駐波	302
(三)	波羣	303
(四)	表面張力之影響	305
(五)	船波	307
第十六節	漩渦流動	308
(一)	基本定律與基本概念	308
(二)	漩渦附近之速度分布	311
(三)	無漩渦流中之數根直線形平行渦束	315
(四)	渦層與分界面	318
(五)	渦街(卡門渦列)	320
(六)	平面渦場之動能	326
(a)	單一渦束之能量場	326
(b)	環流方向相同之一對渦束	328
(c)	環流方向相反之一對渦束	329

第九章 黏性流體之流

第一節	概說	334
第二節	奈維-司徒克斯運動方程式	334
第三節	雷諾數小之流(蠕動)	340
(一)	繞靜止圓球之穩定平流	340
(二)	互相接近的平行平板間之流	344
(三)	地下水之滲流	346

第 四 節	附面層理論.....	351
(一)	基本論據.....	351
(二)	附面層平面流之微分方程式.....	353
(三)	關於附面層方程式之推論.....	355
(四)	關於解附面層方程式之說明.....	358
(五)	附面層之動量定律(卡門積分條件).....	367
第 五 節	紊流附面層.....	373
(一)	概 說.....	373
(二)	順沿薄平板之流.....	374
(三)	有壓強梯度之紊流附面層.....	378
第 六 節	紊流之形成.....	378
第 七 節	流體阻力與阻力係數.....	384
(一)	關於流體阻力之概述.....	384
(二)	阻力係數.....	386
(三)	剖面阻力之實測.....	389
第 八 節	附面層之控制.....	393
第 九 節	自由紊流.....	395

第十章 機 翼

第 一 節	概 說.....	401
第 二 節	平面流動中之機翼.....	406
(一)	升力與環流.....	406
(二)	繞機翼之勢流及環流量之計算.....	411
第 三 節	有限翼展之機翼.....	423
(一)	翼後間剖面之形成.....	423
(二)	誘導阻力.....	427
(三)	環流分佈與機翼形狀之關係.....	436
第 四 節	翼 柵.....	442
(一)	概 說.....	442
(二)	無限長直線翼柵.....	443

(三) 環形翼柵.....	451
第五節 螺旋槳.....	453
(一) 概說.....	453
(二) 簡單之射流理論.....	454
(三) 翼葉理論.....	458

第十一章 壓縮性流體之流動

第一節 概說.....	465
第二節 氣體動力學之基本方程式.....	466
(一) 連續性方程式與運動方程式.....	466
(二) 物態方程式及絕熱方程式.....	468
(三) 伯努利方程式.....	469
(四) 平面流動之勢函數.....	470
第三節 微擾動之傳播與音速.....	472
第四節 瑪哈角.....	474
第五節 一因次氣流(流束理論).....	476
(一) 能量定律.....	476
(二) 變剖面管中之流.....	479
(三) 穩定型直沖波.....	483
(四) 關於管壁摩擦阻力之影響.....	485
第六節 平面亞音速流.....	489
(一) 勢函數之線性化.....	489
(二) 繞細長剖面之平面亞音速流.....	490
第七節 超音速流.....	494
(一) 線性化勢函數.....	494
(二) 線性化勢函數解應用於沿微彎界壁之平面流.....	495
(三) 沿界壁凸面之連續彎轉.....	497
(四) 沿界壁凹面之流及斜沖波.....	498
(五) 漢郎特與波斯曼之特性法.....	500
(六) 物體之超音速運動.....	504

第一章 流體力學發展之簡史

第一節 概 說

將氣體與液體總括之，謂之流體 (Flüssigkeit)，討論流體之平衡與運動以及研究物體在流體內運動時所受之阻力等等學問，謂之流體力學 (Hydro-und Aeromechanik)。

迨至 19 世紀之末葉，流體力學多由數學家與理論物理學家致力研究，且得到一個完整之體系，後因為原子物理學與量子物理學而轉移了物理學家之興趣，以致流體力學降低了身價，被視為古典力學而放棄研究。結果流體力學，不得已被列為應用力學之一部門，而代之研究者僅為工程人員。

其實流體力學自古即與工業發生有密切之關係，諸如上下水道之設施，江河之疏導，以及船舶、幫浦、渦輪機、化學工業、溫室等方面，早經利用，後隨飛機之發明，而流體力學之應用更為廣泛，因之對於此方面應用之研究，日益增多。同時流體力學本身亦希望有其新分野之開拓。由以上諸點察之，吾人特別騰出若干篇幅，而就流體力學發達之過程，予以簡單之敘述，似宜有此必要也。

第二節 流體力學在牛頓時代進展之概況

太古人類，當其尚無慣性與摩擦之概念時，總以為運動之物體是完全因為不斷加力之使然。一旦所加之力停止，則物體之運動亦即隨之而停止。甚至亞里斯多德 (Aristoteles, BC. 384~322) 氏亦有此同樣的想法，認為物體在運動時，必須與其他的物體接觸。根據此種想法，在空中飛行之砲彈，是完全依空氣始能運動，假如一旦無空氣，砲彈即無法繼續飛行。然就砲彈實際之飛行事實而察之。首先對於真空，吾人不妨視為非實際之存在。空氣如何作用於砲彈，亞里斯多德氏雖未明

確的加以說明，然以後根據其門徒之提示，認為砲彈之後，若發生真空，則空氣因填充其真空之空間，而發生強烈之關閉作用，依此作用，砲彈方由後方向前方押進。如此思考所形成之學說，後人稱之為媒質說。

然希臘人菲納波羅斯 (Philoponus) 氏則認為砲彈之飛行，實由於投彈裝置投出時發生動力之移轉。此即後人所稱之動力說。此兩種學說，一直爭論到第 10 世紀，迄未停止。等到發現慣性之概念以後，始悉空氣為阻力之原因。

在科學之研究中，尤其在人力飛行之研究中，頭腦最敏銳的畫聖達文奇 (Leonardo da Vinci, 1452~1519) 氏，始則相信亞里斯多德氏之媒質說，然自 1506 年以後，方放棄此說，而亦相信空氣為阻力之原因。

伽利略 (Galilei Galileo, 1564~1642) 氏為發現慣性之學者，彼是自始至終反對媒質說，而主張空氣為阻力之主因。同時又認為阻力恒隨速度之不同而變化。為研究此問題，特別從事於鐘擺之實驗，而得到阻力與速度成比例之結論。此種結論極關重要，在今日之流體力學中，不問速度之如何微小，亦能認出阻力與速度之成比例。此定律雖為後之研究者所使用，然伽利略本人，則認為有其成立之界限，可惜未作明確之指示。

此外發明鐘錶之海更士 (Huyghens, 1629~1695) 氏，曾於 1690 年發現物體落下所發生之阻力與速度之自乘成比例。此種主要之定律，後為牛頓 (Newton) 氏所導出，雖在今日之流體力學中，仍奉之為玉律。

第三節 古典流體力學之確立

發現萬有引力與運動定律之英人牛頓 (1642~1727) 氏雖研究與天體有關連之運行阻力問題，然阻力係與流體之密度、速度、物體之形狀，均有關係。與流體之密度有關係之阻力，恒因慣性而發生，且與速度自乘成比例。與速度自乘成比例之阻力，雖由海更士氏所發現，然依其慣性所發生之阻力，則由牛頓氏所導出。故吾人特稱之為牛頓之阻

力定律 (Widerstandsgesetz)。又摩擦力是與流體相鄰層之相對速度有關，亦由牛頓所提出。今日以此而決定黏性係數之牛頓假說，亦為吾人所熟知之者。此種假說，與虎克 (Hooke, 1635~1703) 氏於 1675 年所發現之彈性體壓縮應變 (Deformazion) 與應力 (Spannung) 之關係，即虎克定律有同樣之意義。故伽利略氏所發現的與速度成比例之阻力為隨黏性而生之阻力，可以明矣。然此種阻力，在實際上頗為微小，不妨省略。若依物體之形狀而詳察阻力之變化時，吾人不妨取球體、圓柱體及平板等作為實驗。根據此種實驗，吾人可知向流動方向傾斜之平板，其阻力恒與傾角正弦之自乘有關。

阻力之研究實由於瑞士人約翰·伯努利 (Johan Bernoulli, 1667~1748) 氏與丹尼爾·伯努利 (Daniel Bernoulli, 1700~1783) 氏父子二人之相繼鑒研，始見發展。尤以其子所遺留於人間之功蹟為最大。自是討論平衡之流體靜力學與水力學雖分別加以處理，然伯努利氏仍概括名之為流體力學。

伯努利氏曾於水槽之底開以小孔，而研究水由此小孔流出之問題，結果發現流體之問題應歸依於一個原理，此種原理即所謂 *vis viva* 之保存。在水槽之水面上，水之粒子降下，由水槽底之小孔流出時，恒與有沿水之高度以重力押下的功相等之動能。因之 *vis viva* 之保存原理約於 1848 年前後與麥秀爾 (Meyer) 及赫耳姆霍茲 (Helmholtz, 1821~1894) 兩氏所發現的能量保存之原理相當。基於 *vis viva* 之保存原理，而使伯努利氏復求得壓力與速度相結合之定律。此定律，今日特稱之為伯努利定律 (Bernoullische Gesetz)。其所表示者為速度小時而壓力大，速度大時而壓力小之關係式也。與伯努利氏同樣由水槽底之小孔作放水試驗，尚有托里則利 (Torricelli, 1608~1647) 其人。

與伯努利氏同時代之法人達蘭貝爾 (D'Alembert, 1717~1783) 氏，曾就流體之本質加以研討，發現流體是由微小之粒子集合而成，而各微小之粒子，可視為能互相分離，且能自由移動。

其後達蘭貝爾氏為研究流體平衡之問題，又發現一種原理，是即在