

流體力學

曹 鶴 蓀 編

龍門聯合書局印行

序

我編寫本書目的，在求適應工學院各系關於流體力學上的需要，所以編排的次序：自第二章至第六章講流體力學上的一般理論。這一部分的教材，可以說是各系所共同必需的。自第七章至第十一章，討論各項個別的問題。例如管路，渠，升力與推進力，潤滑問題，與水力機械等。關於這幾章的教材，各系可以斟酌情形，略去比較次要的章節。例如讀土木的，可以略去第九章與第十章，讀電機的可以略去第九章，讀航空或造船的可以略去第七章與第八章。讀機械的，各章都應閱讀，但可以斟酌教學時間的多寡，在每章內略去比較次要的材料，但刪減時仍須留意教材內容的一貫性。維解析放在最後一章，其中有關於維解析在管路，渠，機翼，螺旋槳，軸潤滑等問題上的應用。

依據新的課程標準，微積分與微分方程式都是一年級的功課，所以在二年級。流體力學，就得補充些關於數學上的知識，如果在二年級已經讀過了高等微積分，或其他相當程度的工程數學，在三四年級內讀這本流體力學，那就毫無問題。書中用小號字體所排的幾節，因為內容較深，初讀時可暫從略。

本書所用的度量衡制，有米制有英制，閱讀時雖較麻煩，可是，我國的工程界目前仍兼採這兩種制度，所以讀的時候多費了一些功夫，將來應用的時候，卻可少化些腦力。

編寫本書時，承王宏基薛鴻達兩先生給我許多寶貴的建議，和許多寶貴的教學經驗，特在此表示感謝。

一九五一年七月曹鶴蓀序於上海交通大學

目 次

第一章 基本觀念

1-1. 流體力學的發展史略	1
1-2. 流體的分類和物理性	2
1-3. 密度, 重量, 容度, 和比重	3
1-4. 黏性	4
1-5. 氣體方程式	8
1-6. 壓縮性	9

第二章 流體靜力學

2-1. 靜止流體	12
2-2. 平衡條件	14
2-3. 勢	15
2-4. 加速度運動的流體	16
2-5. 無壓縮性流體的平衡	20
2-6. 水靜力方程式的應用	22
2-7. 壓力的量測	27
2-8. 阿基米得原理	31
2-9. 潛體與浮體的穩定性	33
2-10. 壓縮性流體的平衡	35
2-11. 標準大氣	37
2-12. 大氣的平衡和穩定	39
2-13. 表面張力和毛細作用	39

第三章 流體運動學

3-1. 兩種分析流體運動的方法	48
3-2. 流線, 跡線, 流管	49
3-3. 速度的分析	51
3-4. 連續性方程式	53
3-5. 流體質點的加速度	55
3-6. 流函數與流速勢	57
3-7. 複變數函數	61
3-8. 幾種簡單流動場	62
3-9. 保角變換	66

第四章 流體動力學的基本原理

4-1. 因壓力梯度而產生的流動	71
4-2. 重力對於流動的影響	73
4-3. 伯努利方程式的應用	74
4-4. 伯努利常數的變化	82
4-5. 穩定流動內動量的變化	84
4-6. 穩定流動內角動量的變化	87
4-7. 穩定流動內能量的變化	88
4-8. 空腔現象	90

第五章 黏性和擾動問題

5-1. 黏性流體內的剪應力與剪速度的關係	95
5-2. 圓管內的黏性流動	96
5-3. 能量的損失	99
5-4. 相似定律	101
5-5. 黏性流動的不穩定性	104
5-6. 擾動的特性	105
5-7. 層流邊界層	109
5-8. 湍流邊界層	111
5-9. 接近光滑或粗糙表面的速度分布	113
5-10. 光管與糙管的阻力	119
5-11. 邊界層的分離	124
5-12. 滑體上的壓力分布	126
5-13. 平面流動的擾動	128
5-14. 滑體的阻力	130

第六章 流體的壓縮性

6-1. 一維流動的基本方程式	135
6-2. 福伐爾管	140
6-3. 馬赫波	145
6-4. 管內的激波	147
6-5. 正衝擊波	148
6-6. 在高速度的阻力	151

第七章 管路

7-1. 管路上的損耗	153
7-2. 商用管的阻力經驗式	154
7-3. 配件上的損耗	157
7-4. 串聯管路	159

7-5. 並聯管路和分枝管路	162
7-6. 管內無壓縮性流體的不穩定流動	168
7-7. 水錘, 管內壓縮性流體的不穩定流動	178
7-8. 管內黏性壓縮性流體的等溫流動	183
7-9. 管內黏性壓縮性流體的絕熱流動	185

第八章 渠

8-1. 渠內流動	197
8-2. 等速流動	207
8-3. 加闊與流率圖	202
8-4. 漸變流動的方程式	207
8-5. 水躍	210
8-6. 堰上流動, 水門下流動	213
8-7. 渠內的不穩定流動; 渠內流動與壓縮性流體流動的比較	215

第九章 升力與推進力

9-1. 麥格勞斯效應	220
9-2. 機翼剖面的升力和阻力	224
9-3. 定長機翼	262
9-4. 螺旋槳的要素理論	230
9-5. 螺旋槳的動量理論	235
9-6. 輪機噴氣機	238
9-7. 火箭	240
9-8. 螺旋槳, 輪機噴氣機及火箭的推進力的比較	243

第十章 潤滑問題

10-1. 潤滑劑的性質	246
10-2. 兩面間的潤滑	249
10-3. 二維的潤滑問題	251
10-4. 扇形的止推軸承	258
10-5. 理想的軸承	259
10-6. 有載荷的軸承	260
10-7. 軸承理想潤滑的條件	263

第十一章 水力機械

11-1. 水力機械	269
11-2. 衝擊水輪機	269
11-3. 徑流式及混流式的反力水輪機	272
11-4. 軸流式反力水輪機	276
11-5. 水輪機的雜解析	277

11-6. 離心式泵	279
11-7. 軸流式泵	282
11-8. 往復式泵及其他型式的泵	282
11-9. 泵的維解析	284
11-10. 流體網	286
11-11. 換矩器	288

第十二章 維解析

12-1. 量與維	294
12-2. π 定理	294
12-3. 管路及泵的維解析	297
12-4. 升力與阻力的維解析	299
12-5. 螺旋槳的維解析	301
12-6. 軸潤滑的維解析	302
12-7. 船的維解析	304
12-8. 相似條件	305
索引	308

第一章 基本觀念

1-1. 流體力學的發展史略 人類遇到了給水,排水,和利用水力來發生動力等種種問題,纔覺得有了解流體現象的必要。古代人們不過很粗淺地懂了些流體的物理,就開始掘井,運用簡單的水輪和抽水設備等,但是除了阿基米得(Archimedes)(公元前250年)的浮力原理,近代流體力學上仍舊用到外,古時候的人關於這方面的知識,的確很少。羅馬帝國衰亡(公元476)後,流體力學一直沒有進展。到了達文企(Leonardo da Vinci 1452-1519),纔打開了這個沉寂的局面,他在意大利米蘭附近,設計並建造了一個有室的運河水閘,在水力工程上開了新紀元。他還研究鳥的飛行,研究鳥的升力是怎樣來的,在航空工程上,也推他為鼻祖。

在達文企之後,關於水力學上的知識,就大大增加。尤以伽利略(Galileo),托里拆利(Torricelli),牛頓(Newton),皮托(Pitot),伯努利(Bernoulli),達蘭貝爾(D'Alembert)諸氏,對於水力學基本觀念的貢獻為最多。他們的理論,都有很簡單的實驗來證明,但是理論和實驗,也有背道而馳的地方。達蘭貝爾曾經證明一物體在理想流體內運動,是沒有阻力的。這個理論,對於在實在流體內運動的物體,是不適用的。這個理論和實際上的差別,叫做達蘭貝爾矛盾(D'Alembert paradox),這個例,可以用來說明祇用理論來解決流體問題,是有限度的。

因為理論與實際,有了矛盾,所以在解決流體問題時,有兩派不同的想法。一派研究流體流動的理論,另一派注重它的實驗,這兩派到現在還是存在着。在理論方面的典型,是水動力學(hydrodynamics),在實驗方面的典型是水力學(hydraulics)。在理論方面,爲了要使複雜的算式簡單化,對於流體往往加以許多假定,最主要是假定流體沒有黏性的,因此導得的結果,有時和實際不符。至於實驗方面,祇得到了許多係數,許多經驗曲線,在各個個別問題之間,卻缺少聯繫。

到了奈維(Navier)(1785-1836)斯托克(Stokes)(1819-1903)兩氏,把理想流體的運動方程式,推廣到黏性流體。因此說明以前水動力學和水力學之間的許多差別,是可以協調的。約在同一時期,赫爾姆霍斯氏(Helmholtz)的渦動理論和實驗,把理論與實際上的隔閡,又消除了許多。

最近幾十年來,因為航空方面的進步,空氣動力學的產生和進展,使理論與實際的結合,更為密切。在第二次世界大戰時,因為高速度飛行的需要,對於壓縮性流體的流體力學,各國都有新的發展。現在已經成爲一種新的科學。

現在的趨向,是研究同時具有黏性和壓縮性的流體的流體力學(註)。對於這方面的研究,困難是很多。最主要的原因,是關於黏性流體的流體力學和壓縮性流體的流體力學的研究,都還不夠徹底。將來如果對於研究的工具有所改進,一定會有很大成就。

1-2. 流體的分類和物理性 物體有兩種狀態——固體和流體。流體還能區分爲液體與氣體。

固體,液體和氣體的區別,可以從它們分子間的運動距離與範圍來分。這三種物態之中,以氣體的爲最大,液體的次之,固體的最小。因此固體分子間的內聚力爲最大,液體次之,氣體最小。這就可說明固體是堅密而形狀一定的,液體的分子能在液體塊內自由運動,氣體能佈滿其整個容器。

液體和氣體,統稱流體,固體和流體的比較嚴密的定義,要根據各種型式的應力,對於它們的作用來下的。對於固體講,當它受到了牽應力,壓縮應力和剪應力的作用後,先產生彈性形變(elastic deformation),但是當應力超過了彈性限度後,就會產生永久畸變(permanent distortion)。對於流體講,祇在受壓縮應力時,它有彈性性質。它受到了剪應力,無論微小到怎樣,就要不斷地變形。因為流體受不起剪應力,所以纔有能流動的性質。流體能承受一些牽應力,但這牽應力不會大於分子間的內聚力。這力量很小,所以在解工程問題時,常略去流體內部的牽應力。

(註)參考 P. A. Lagerstrom, J. D. Cole, L. Trilling: Problems in the Theory of Viscous Compressible Fluids, 1949 年美國加拿大理工學出版。

因為流體受到了剪應力，就會產生流動。所以在靜止的流體內，不會有剪應力。在靜止流體內，我們須要討論的唯一應力，是壓縮應力，或者叫做壓力。一物體放在靜止流體內，流體作用於物體表面上的力，一定和物體表面垂直。再假定在靜止流體內，取一泛定截面。在這泛定截面上任一點的應力，亦必和這截面垂直。

1-3. 密度，重度，容度和比重 密度(density)是單位容積內的質量，重度(specific weight)是單位容積內的重量。假定把 ρ 表示密度， w 表示重度，就得這兩單位的關係如下：

$$\rho = \frac{w}{g}, \quad \text{或} \quad w = \rho g. \quad (1-1)$$

密度和重度，都隨着單位容積內分子的個數而定。因為分子的活動性和分子間的距離，隨着溫度而增。溫度愈高，在一定單位容積內分子個數愈少。所以密度和重度，都是隨着溫度的增加而減小。再假定溫度保持不變，則增加壓力，可把較多的分子壓到一定的容積內。由此可知壓力增加後，密度和重度都隨着增加。

容度(specific volume)是單位重量所占的容積。所以它就等於重度的倒數。命 v 為物體的容度，就得

$$v = \frac{1}{w}, \quad \text{或} \quad w = \frac{1}{v}. \quad (1-2)$$

比重(specific gravity) S 的定義，是一物體的重度(或密度)對於水的重度(或密度)之比。因為流體的重度或密度，都隨着溫度而變，所以在計算比重時，應該注明溫度是多少。水的溫度，普通指攝氏 4 [度] 而言。下表是幾種普通液體的比重。

命 W 為物體的重量， V 是它的容積，因此

$$W = V\rho g = Vw_0 S$$

上式內 w_0 是水的重度， S 是物體的比重，所以

$$\frac{\rho}{S} = \frac{w_0}{g}$$

假定用米制， w_0 等於 g [達因/厘米³]，所以當 ρ 的單位是 [克/厘米³] 時，它的絕對值與比重 S 相同。

液體名稱	比重(註)
乙醇(酒精)	0.789
松節油	0.862
苯	0.879
橄欖油	0.918
亞麻子油	0.942
蓖麻子油	0.960
水	0.998
甘油	1.262
四氯化碳	1.594
汞	13.546

假定用英制,水在攝氏 4 [度] 的重度是 62.45 [磅/呎³], 所以

$$w = \rho g = w_0 S = 62.45 S [\text{磅/呎}^3].$$

在英制中,質量單位是[斯勒](slug), 1 [斯勒] = 32.2 [磅, 質量], 所以水在攝氏 4 [度] 的密度是 1.941 [斯勒/呎³].

密度, 重度, 容度與比重, 都可用質量 M , 長度 L 及時間 T 的維系 (dimensional system) 來表示. 有時用力 F , 長度 L , 時間 T 的維系, 比較便利. 密度 ρ 的維系

$$[\rho] = \left[\frac{M}{L^3} \right],$$

從(1-1)式, 得重度 w 的維如下:

$$[w] = [\rho][g] = \left[\frac{M}{L^3} \right] \left[\frac{L}{T^2} \right] = \left[\frac{M}{L^2 T^2} \right] = \left[\frac{F}{L^3} \right].$$

再自(1-2)式, 得容度 v 的維如下:

$$[v] = \frac{1}{[w]} = \left[\frac{L^3 T^2}{M} \right] = \left[\frac{L^3}{F} \right].$$

比重是兩個重度或兩個密度的比, 它是一個無維量.

1-4. 黏性 所有的流體, 都有黏性, 因此在流動時, 有摩擦現象發生.

圖 1-1 表示黏性流體流過一物體表面的情況. 我們從實驗結果, 知道沿着表面的速度是零. 離開表面愈遠, 速度愈大. 這許多事實, 可以歸納在速度圖 (velocity diagram) 或速度剖面 (velocity profile) 上. 這圖

(註) 本表內液體溫度, 除橄欖油, 亞麻子油在攝氏 15 [度] 外, 其餘都在攝氏 20 [度]. 表內數據錄自 International Critical Tables, 1933 及 Smithsonian Physical Table, 1933.

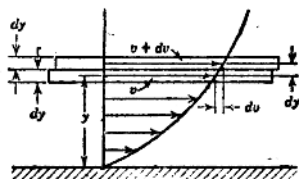


圖 1-1.

說明流體兩鄰層間的相對運動，這也就說明了兩鄰層間的摩擦作用。圖上畫有厚度 dy 的兩鄰層，下層的速度是 v ，上層的是 $v + dv$ 。因為這兩層的速度不同，所以在兩層之間有摩擦力或剪力存在。設其剪應力用 τ 來表示。據實驗結果， τ 和速度梯度 (velocity gradient) $\frac{dv}{dy}$ 成正比例。即

$$\tau \propto \frac{dv}{dy}$$

或

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1-3)$$

上式內的比例常數 μ ，叫做黏性係數 (coefficient of viscosity)。當壓力增加時， μ 的數值也稍稍有些增加。不過這增加的數量很微小，所以在一般工程問題中，常假定 μ 是與壓力無關的。因此從 (1-3) 式可知剪應力 τ 是與壓力無關的。在這裏，我們可以看出流體間摩擦力與固體間摩擦力不同的地方。固體間的摩擦力，與法線方向的壓力成正比例。流體間的摩擦力，則與壓力無關。

從 (1-3) 式，可知 μ 的維是

$$\begin{aligned} [\mu] &= \frac{[\tau]}{\left[\frac{dv}{dy}\right]} = \left[\frac{FL^{-2}}{\frac{LT^{-1}}{L}}\right] = [FTL^{-2}] \\ &= [MLT^{-2} \cdot T \cdot L^{-2}] = [ML^{-1}T^{-1}] \end{aligned}$$

μ 的單位是 [斯勒/呎·秒]，[磅·秒/呎²]，或 [克/厘米·秒]，[達因·秒/厘米²]。1 [達因·秒/厘米²] 又叫做 1 泊 (poise)。這是紀念泊謨塞氏 (Poiseuille) 而命名的。1 [泊] 的百分之一，叫做 [厘泊] (centipoise)。水在 20°C 時的 μ 是 1 [厘泊]。米制與英制單位間的換算如下：

$$1[\text{泊}] = 2.089 \times 10^{-3} [\text{磅} \cdot \text{秒} / \text{呎}^2] \\ = 2.089 \times 10^{-2} [\text{斯勒} / \text{呎} \cdot \text{秒}]$$

溫度對於黏性的影響很大，它對於液體的影響，和它對於氣體的影響剛巧相反，這是由於液體與氣體的分子間性質不同的緣故。氣體分子間的內聚力很微小，氣體流動時，在它各層間的剪應力，起因於垂直於流動方向的分子擾動所產生的各層間的動量互換。我們知道分子的活動性是隨了溫度的增加而增加的，所以氣體的剪應力和它的黏性係數，是

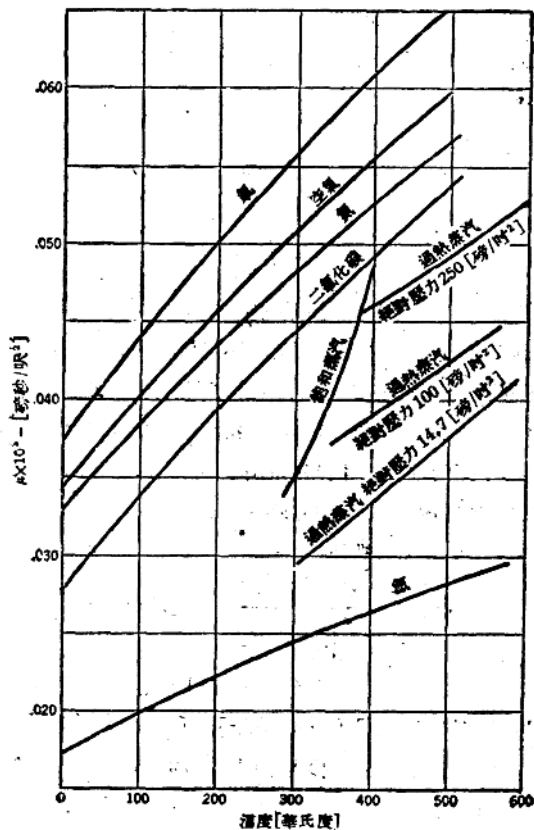


圖 1-2. 氣體的粘性係數

隨了溫度的增加而增加的(見圖 1-2)。

至於在液體內,因分子擾動而產生的動量互換的影響,小於分子間的

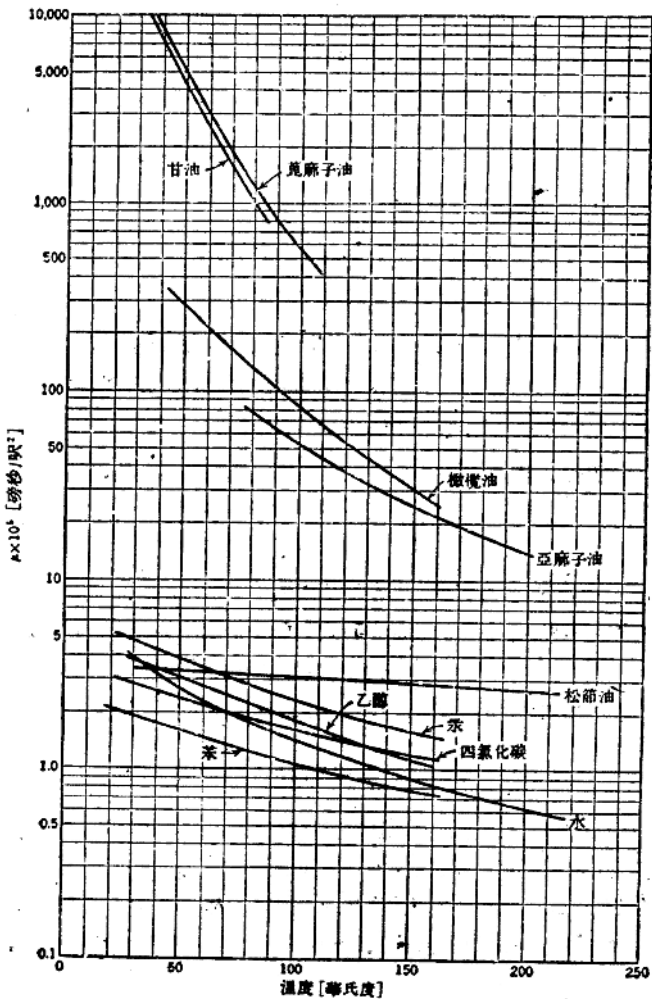


圖 1-3. 液體的粘性係數

內聚力的影響，所以液體的剪應力 τ 和它的黏性係數 μ ，多半是由其內聚力的大小而定。因為溫度增加，液體的內聚力減小，所以液體的黏性係數，隨着溫度的增加而減小（見圖 1-3）。

黏性係數 μ 與密度 ρ 的比，叫做運動黏性 (kinematic viscosity)，通常用 ν 來表示。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

從(1-4)式，可以看出 ν 的維是

$$[\nu] = \frac{[ML^{-1}T^{-1}]}{[ML^{-3}]} = [L^2T^{-1}]$$

在 ν 的維內，祇有長度與時間，這都是運動學上的維。因此我們稱 ν 為運動黏性。 ν 的單位，英制用 [呎²秒⁻¹]，米制用 [厘米²秒⁻¹]。

1 [厘米²秒⁻¹] 又稱為 1 [斯] (stoke)。這是紀念斯托克氏 (Stokes) 而命名的。在平常應用上，都用 [厘斯] (centistoke)。1 [厘斯] = $\frac{1}{100}$ [斯]。

1-5. 氣體方程式 氣體的重度，可以從氣體方程式 (equation of state of gas) (註)

$$pv = RT \quad (1-5)$$

求得。上式內， v 為容度， p 為絕對壓力， T 為絕對溫度， R 為常數。

在等溫過程內， $T =$ 常數，(1-5) 式就變為波義耳定律 (Boyle's law)。

$$pv = \text{常數} \quad (1-6)$$

在等容過程內， $v =$ 常數，(1-5) 式就變為查理定律 (Charles' law)。

$$\frac{p}{T} = \text{常數} \quad (1-7)$$

(1-5) 式內的常數 R ，叫做氣體常數 (gas constant)，它的維是 [L/絕對溫度]。依據亞佛加德羅定律 (Avogadro's law)，即：“在同一壓力及同一溫度下，所有的氣體在單位容積內的分子數都相同”，我們可以算出普用氣體常數 (universal gas constant)。假定有在同一壓力 p 及同一

(註) 在熱力學內，把滿足(1-5)式的氣體，叫做理想氣體。在流體力學內，常把沒有粘性的流體，叫做理想流體。

溫度 T 的兩種氣體，它們的氣體常數是 R_1, R_2 ；重量是 w_1, w_2 ；容度是 v_1, v_2 。從它們的氣態方程式

$$pv_1 = R_1 T, \quad pv_2 = R_2 T$$

得

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

但是依據亞佛加德羅定律，在同一壓力和溫度下，氣體的重度必和它們的分子量成正比例，即

$$\frac{w_2}{w_1} = \frac{m_2}{m_1}$$

式內 m_1, m_2 是兩種氣體的分子量，自以上兩式，得

$$m_1 R_1 = m_2 R_2 \quad (1-8)$$

換句話說，即各種氣體的分子量與其氣體常數之積，都是相等的。這個積 mR ，叫做普用氣體常數。

普通氣體的氣體常數(註)

	R , [呎/華氏度, 絕對]	mR
二氧化硫	23.6	1512
二氧化碳	34.9	1536
氧	48.3	1546
空氣	53.3	1545
氮	55.1	1543
氬	89.5	1516
氫	767.0	1546

1-6. 壓縮性 各種流體都能受壓縮的，壓縮後密度增加，分子間的距離縮短。所以把壓縮後的流體再要壓縮，就比較困難。流體的溫度增加後，把它壓縮，比它在沒有增加溫度時，也要困難得多。因為溫度增加，分子的活動性也增加，所以分子間可以被壓縮的距離減小了。

流體的彈性壓縮，可以約略地用虎克定律

$$E = \frac{\text{應力}}{\text{應變}}$$

來表示，式內的彈性係數 E 是隨着溫度與壓力而變的。因為在一般的

(註) 氣體分子為獨原子的或二原子的，其 mR 等於普用氣體常數。若其每分子所含原子多於二個時，其 mR 便與普用氣體常數有所放離了。全圖上表可知。

工程問題中，溫度與壓力的變化都不很大，所以可假定 E 是一個常數。命 dp 為壓力增量，因為壓力增加，容積減小，所以容積的應變是 $-\frac{dv}{v}$ ，因此得

$$E = \frac{dp}{-\frac{dv}{v}} = -v \frac{dp}{dv} \quad (1-9)$$

氣體的壓縮和膨脹，常隨着氣體的熱力過程而定的。假定是等溫過程，依據波義耳定律，(1-6)式，得

$$\frac{dp}{dv} = -\frac{p}{v}$$

代入(1-9)式，得

$$E = p. \quad (1-10)$$

假定是絕熱過程， p 與 v 的關係式是

$$pv^k = \text{常數}$$

式內的 k 叫做絕熱指數(adiabatic exponent)，它是氣體的等壓比熱 c_p 與等容比熱 c_v 的比。把上式微分，得

$$\frac{dp}{dv} = -\frac{kp}{v}$$

代入(1-9)式，得

$$E = kp. \quad (1-11)$$

當一物體在氣體內運動時，假定它的速度很小，因為它的運動而產生的壓縮性影響也很小。換句話說，我們假定在這種情況下的氣體是無壓縮性的，不致產生可覺察的誤差。但是速度愈高，壓縮性的影響也就愈大了。在流體力學內，用來計算速度的標準是聲速。假定物體運動的速度，超過了聲速，我們叫它是超聲速(supersonic velocity)；假定低於聲音的速度，我們叫它是亞聲速(subsonic velocity)；假定和聲音的速度，相差無幾，我們叫它是鄰聲速(transonic velocity)。物體運動的速度對於聲速的比率，叫做馬赫數(Mach number)。所以在超聲速的範圍內，馬赫數大於 1。在亞聲速的範圍內，馬赫數小於 1。當馬赫數小於 0.5 時，我們可以忽視流體的壓縮性，不致有顯著的誤差。

参 考 资 料

- W. F. Durand: The Development of Our Knowledge of the Laws of Fluid Mechanics. Science, Vol. 78, No. 2025, p. 343, 1933.
- R. Giacomelli and E. Pistolesi: Historical Sketch, Aerodynamic Theory Vol. I. Julius Springer, 1934(1943 再版, GAL C. I. T.)
- W. F. Durand: The Outlook in Fluid Mechanics. Journal of Franklin Institute, Vol. 228, No. 2. 1939.
- Th. von Kármán: The Role of Fluid Mechanics in Modern Warfare. Proc. Second Hydraulics Conf. Bul. 27. Univ. of Iowa, 1943.
- The Mechanical Properties of Fluids, A Collective Work. Blackie and Sons. 1925.
- E. C. Bingham; Fluid and Plasticity, McGraw Hill. 1922.
- E. Hatschek: The Viscosity of Liquids, D. van Nostrand, 1928.
- F. Auerbach: Eigenschaften der Flüssigkeiten, Handbuch der physikalischen und technischen Mechanik, Bd. V. 1931.
- P. P. Ewald, T. Pöschl and L. Prandtl: The Physics of Solids and Fluids, Blackie and Sons. 1932.
- 物部長種: 水理学, 第一章, 昭和八年(1933), 岩波出版。