

工程流體力學

Engineering
Fluid Mechanics

原著者：J. A. FOX

譯述者：雷 萬 清

科技圖書股份有限公司

工程流體力學

Engineering
Fluid Mechanics

原著者：J. A. FOX

譯述者：雷 萬 清

科技圖書股份有限公司



本公司經新聞局核准登記
登記證局版台業字第1123號

書名：工程流體力學

評述者：雷萬清

發行人：趙國華

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市博愛路185號二樓

電話：3110953

郵政劃撥帳號15697

六十六年七月初版

六十八年九月二版

特價新台幣90元

原 序

本書是為大學土木及機械工程系學生而編寫。重點置在工程方面，但對具有更多數學興趣的讀者，亦能適合其要求。

有關分析所依據的均經細心規畫。任何分析的正確度，全就其所假定是否切合實際。故讀者必需培養一種習慣，使其對任何在考慮下的問題所作假定，在理論結構上必需重視其可用性。

以往工程師及數學家們對流體力學的貢獻不少，在近年來則趨向於運用數學方法以代替以往憑藉實驗求取結果，我相信這一趨勢將會繼續發展，而較高深的部份更需趨向數學分析方面去習展。

本書同時採用國際制及英制單位。在歐洲及英國聯邦雖已採用國際單位制，但英制單位尚不能立刻全部取消。在此過渡時期，雙制並顯亦屬必要。

在每章最後均列有若干習題，以供讀者自測其瞭解程度。習題中所列數據則國際制單位與英制單位並列。其中若干習題曾為倫敦大學及李茲大學及英國土木工程學會會員攷試的命題。承其許可轉載，至為感謝。各題的解答，則由作者自任之。

由於本書的範圍涉及過廣，故其細部不能全部包容。讀者若有興趣，可查閱本書所列的進修讀物中選讀之。

李茲大學應用科學系的職員 J. Higgins 君為本書繪製附圖，特此處表示謝意。

J. A. Fox 福克斯 於

李茲大學土木工程學系

目 錄

原序

第一章 基本定義與流體靜力學

1 - 1	基本定義	1
1 - 2	黏滯度	2
1 - 3	非牛頓流體	4
1 - 4	單位質量、重量及比重	5
1 - 5	點的靜壓力	6
1 - 6	大氣中的壓力分佈	7
1 - 7	不可壓縮流體中的靜壓力	8
1 - 8	傾斜板上的壓力	10
1 - 9	作用於曲面上之力	12
1 - 10	表面張力	15
1 - 11	壓力管計	16

第二章 流體動力學

2 - 1	連續方程式	29
2 - 2	歐拉方程式	31
2 - 3	流體元素的垂直應變力與變形	35
2 - 4	流體元素的旋轉	37
2 - 5	奈威 - 史脫克方程式	38
2 - 6	速度勢	39
2 - 7	流函數	40
2 - 8	環流	43
2 - 9	渦流	44
2 - 10	流源	46
2 - 11	流涵	48
2 - 12	流偶	51
2 - 13	渦流	52

2 - 14	勻風流	53
2 - 15	各種流型的組合	55
2 - 16	均流中環繞圓柱體的壓力分佈	59
2 - 17	施於圓柱上的力	62
2 - 18	垂直力的產生	63
2 - 19	尾跡	68
2 - 20	機翼板上的壓力分佈	70
2 - 21	流函數與速度勢的圖解加法	72
2 - 22	流線網	74
2 - 23	滲漏流	76

第三章 因次分析

3 - 1	白金漢 π 定理	85
3 - 2	π 群的構成	87
3 - 3	一般常用的 π 群之物理意義	88
3 - 4	模型	90
3 - 5	因次分析舉例	95
3 - 6	單位	102
3 - 7	具同因次性質的方程式	103

第四章 工程流體力學的基本方程式

4 - 1	連續方程式	110
4 - 2	力方程式	111
4 - 3	能量方程式	114
4 - 4	通過小孔口的流動	116
4 - 5	文托里錶	119
4 - 6	缺口	123
4 - 7	管道中隔板式孔口	128
4 - 8	皮托管	131
4 - 9	力方程式的應用	133
4 - 10	橫過諸流線間伯努利常數的變化	138

4 - 11	自由渦流	140
4 - 12	徑向流	143
4 - 13	自由螺旋渦流	143
4 - 14	強迫渦流	144
4 - 15	來金渦流	147
4 - 16	渦度	149

第五章 邊界層原理

5 - 1	邊界層的形成	157
5 - 2	普蘭多混合長度假設	159
5 - 3	邊界層的分離	162
5 - 4	球面上的電力	167
5 - 5	次生流	168

第六章 管 流

6 - 1	簡單試驗	176
6 - 2	層流	178
6 - 3	紊流	185
6 - 4	f 因子	187
6 - 5	應用管流的普蘭多混合長度假設	193
6 - 6	平滑管內的流速分佈	193
6 - 7	粗糙管的速度分析	195
6 - 8	通用管摩擦定律	197
6 - 9	管摩擦以外的其他管路損失	198
6 - 10	能量坡度及水力坡度	206
6 - 11	能量係數	208
6 - 12	動量係數	210
6 - 13	管網流	212
6 - 14	管網分析	215

第七章 渠道水力學

7 - 1	均流	231
7 - 2	蔡斯 C 的公式	232
7 - 3	普蘭多混合長度假說用於均勻自由水面的流況	234
7 - 4	經濟渠道	237
7 - 5	圓管及圓涵洞流況	240
7 - 6	漸變、非均流渠道	241
7 - 7	漸變流的分析	242
7 - 8	比力方程式	245
7 - 9	比能方程式	246
7 - 10	流體剖面	249
7 - 11	水躍	253
7 - 12	文氏渡槽	257
7 - 13	寬頂堰及渠底凸起	261
7 - 14	冲刷道	262
7 - 15	渠道水面曲線的預測	264
7 - 16	漸變流微分方程之積分方法	268
7 - 17	渠道中的湧波	270

第八章 瞬變壓力

8 - 1	水錘剛性管理論	283
8 - 2	管路末端閥門突然打開	285
8 - 3	閥門緩慢均勻關閉	287
8 - 4	彈性管理論	291
8 - 5	瞬時關閉閥門所成的壓力湧波	297

第九章 平壓塔

9 - 1	無摩擦的分析	315
9 - 2	有摩擦的分析	317
9 - 3	複雜平壓塔	321
9 - 4	平壓塔模型試驗	322

第十章 旋轉動力機械

10- 1	流體通過旋轉曲面通道	329
10- 2	反擊水輪	332
10- 3	衝擊水輪	342
10- 4	離心揚水機	348
10- 5	離心揚水機的種類	352
10- 6	旋轉動力機械的因次分析	359
10- 7	單位速率、輸水量及功率	359
10- 8	比速率	362
10- 9	由模型試驗所得的尺度結果	365
10-10	穴蝕	366
進修讀物		379

第一章

基本定義與流體靜力學

由於我們生活在地球上，因此這個世界所給我們的印象如同一個大岩石球；其外圍由漸次稀薄的空氣圈所包圍，而其表面則散佈着河川、湖泊、與廣大的海洋。如單從“外表”的觀點，宇宙似乎是由許許多多這種岩石球所組成。但從實際情形來看，地球只是具有一個固態的地殼，而其核心則很可能是由熔態的鐵質所組成。更近一步言，宇宙間的其他星球可能處於熔漿（plasma）狀態。所謂星河（galaxies）的旋轉，也可視為一種渦流（vortices）。而星束（star streams）的流型（pattern）又與流體的紊流（turbulent）極其相似。從以上的分析，吾人當知目前的固態物質（solid matter）實際上僅存於各行星的表面，或以殘骸物（debris）形態散落在行星（asteroids）之間，與其餘多數流態物質共同組成這個宇宙。

因此，如何描述流體的運動，進而瞭解吾人所生存的自然環境，確是一件極重要的任務。尤其當許多物理學家與數學家在研究流體性質及其運動上所得的成果，再經工程師們將流體力學付諸實施應用，使此種研究更具意義。

1.1 基本定義

流體力學（fluid mechanics）是研究流體因運動而造成其剪應力（shear）與速度變化的情形。至於靜態的流體，吾人可視其為速度 V 等於零的特例。若謂流體不是一種固體，而是包括氣態（gases）及液態（liquid）的物質，似乎尚不足以表明流體的特性。因流體在承受極小的剪應力時，其表現一如固態物質；當剪應力增大後，始具有流體性質。這是因為流體所具有的黏滯性（viscous property）所致。當某層流體開始流動時，立刻因黏滯性而對鄰層的流體發生一種剪應力以帶動流層。故吾人作流體的定義如下：

“流體是一種當承受微小剪應力，立刻相對地發生連續而且永久變形的物體”。

1.2 黏滯度

為研究方便，假設一種實際上不存在的“理想流體”(ideal or perfect flow)；亦即此種流體的黏滯度(viscosity)為零。當然，這種假設正如“理想氣體”(ideal gas)一樣，與事實不符。

真實流體(real fluids)的特性就在當流體一開始運動，必隨之發生一個對應的剪力變形率(rate of shear deformation)的剪應力，而使流體作連續而恆久的變形。

其次所討論的是各層間因運動而生的剪應力，其分佈又將如何，可用下式說明：

$$\tau = \text{剪應力} = \mu \, d\mu/dy = \mu \cdot f(i) \quad [lb/ft^2, kg/m^2]$$

$$\mu = \text{絕對黏滯度 (absolute viscosity)} \quad [lb \cdot sec/ft^2, kg/m \cdot s]$$

$$d\mu/dy = \gamma = \text{角變形率 (rate of angular deformation)} \quad [1/s]$$

吾人依(1.1)式作一討論：

(1) 某點的剪應力 τ 與該點的速度 u 大小無關，只與該點的速度梯度(velocity gradient) du/dy 亦即與 γ 有關。

(2) $\tau = \mu \gamma$ 是最簡單的流動情形。當某流體在定溫，定壓下，絕對黏滯度 μ 係一定值。即剪應力與角變形率成正比。這種關係是由牛頓首先發現的，故在以後，凡具此等具綫性行為(linear behaviour)的流體，通稱為牛頓流體(Newtonian fluid)。雖說這是一個極簡單的流體，但卻是大多數流體在流動時所遵行的法則。如水、空氣、一般潤滑油、某些碳氫化合物等流體皆然。

(3) $\tau = \mu f \gamma$ ，是較複雜的函數關係，吾人也就依據這種關係來歸類劃分各型的流體，如假塑性流體(pseudoplastic fluid)擴張性流體(dilatant fluid)等等。

以上的說明是針對流體的流動行為，但是造成這種外在行為的內在因素，就是黏滯性(viscosity)。所謂黏滯性，乃是流體分子間的動量傳遞，或是分子間凝聚力的情形。而溫度，壓力是分子活躍的重要因素。故可推知黏滯性應是溫度與壓力的函數。但事實上受壓力影響甚微，故溫度便成為主控因素。

就液態流體而言，溫度上升則黏滯性降低，故其流性(fluidity)增大。但氣態流體卻相反；當溫度上升時，其黏滯性反而升高；故流性降低。這種不同的結果，是由於這兩種流體的基本分子構造不同：

氣體因分子間的引力(attractive force)甚微，故其模式可視為一群無限小的球體。依各自的動量(momentum)情形作隨機運動(random motion)。因此，對任何一個小球的平均速度；乃基於來自各方向動量的向量和。於是各層間所發生的動量傳遞，從快速層(fast layer)向緩速層(slow layer)傳遞。此種過程即構成了層與

第一章 基本定義與流體靜力學 3

層間的剪應力。所以，當溫度升的愈高；氣體分子愈能活躍地表現其傳遞特性，也因此就愈加大其剪應力的效果，終使分子間的黏滯度 " μ " 相應趨大。

液體分子間的吸引力，較氣體為大，故吾人可視其模式為：「一群緊密相連的分子」；至於某層分子流動的情形，又可視為：「先破壞兩鄰層間的分子吸引鍵 (attractive bond)，然後再與下游鄰層分子重新結合的一連串行為」。當溫度增高，液體分子間的位能亦隨之增加。亦即分子間距離變大而造成吸引力趨小。故流動性自然加大此時認為流體黏滯度 " μ " 趨小。

一般而論，絕對黏滯度 μ 與溫度間的關係得成立下列兩式：

液態流體

$$\mu = \mu_0 / (1 + \alpha t + \beta t^2)$$

氣態流體

$$\mu = \mu_0 + c t - \beta t^2$$

流體為水時；c · g · s 制 μ_0 的單位為 "poise" 而

$$\mu_0 = 17.90 \times 10^{-3}$$

$$\alpha = 33.68 \times 10^{-3}$$

$$\beta = 2.21 \times 10^{-4}$$

在英制 μ_0 的單位是 slugs/ft-sec。

$$\mu_0 = 37.16 \times 10^{-6}$$

$$\alpha = 33.68 \times 10^{-3}$$

$$\beta = 2.21 \times 10^{-4}$$

在 SI 制 (國際單位制)， μ_0 單位是 kg/m-sec。

$$\mu_0 = 1.79 \times 10^{-3}$$

$$\alpha = 33.68 \times 10^{-3}$$

$$\beta = 2.21 \times 10^{-4}$$

流體為空氣溫度用攝氏計

$$\mu = (355.3 + 1.168t - 0.00248t^2) \times 10^{-9} \text{ slug/ft s}$$

$$\text{或 } \mu = (17\,040 + 56.02t - 0.1189t^2) \times 10^{-9} \text{ kg/m s}$$

4 工程流體力學

1.3 非牛頓流體

前面曾提及，吾人用剪力 τ 與角變率 $\dot{\gamma}$ 的關係可區分流體為兩大類，即：

牛頓流體 = 剪力 τ 與角變率 $\dot{\gamma}$ 具線性關係。

非牛頓流體 = 上述兩者間的關係，不僅是非線性的，有時更要加入剪力與角變率的時間因素。吾人依此可再細分如圖 1.1 所示 (1)賓

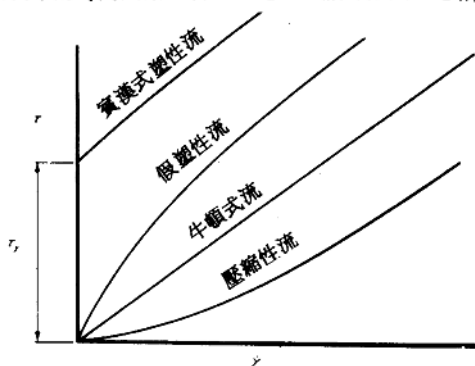


圖 1.1

漢塑性流體 (2)假塑性流體 (3)擴張性流體。

吾人可更進一步將所有流體依次分類：

(1) 純黏性流 (purely viscous flow) 此類流體，一旦受到剪應力作用即生角變量。其基本關係式為： $\tau = \mu (du/dy)n$

(2) 塑性流體 (plastic fluids)。如賓漢型塑性流體 (Bingham plastic)，具有一始動剪力 τ_1 ，當外加剪力 τ 小於 τ_1 時，流體的行為可視同固體處理；當外加剪力 τ 大於 τ_1 時，流體之剪應力與角變率間關係即具牛頓流體的線性關係。

日常所見到的如番茄汁、牛奶、有機膠體、牙膏、血液等均屬之。

(3) 剪力與角變率依時間而變之流體 如復性流 (thixotropic flow)，可塑性流 (keoplastic flow) 等。

(4) 滯彈性流 (viscoelastic flow) 此種流體所表現的，是具有固態的彈性與液態的黏滯性，二者共同的效果。如麵團。

由以上的分類，吾人可知，非牛頓流體佔有流體的大部份；且都各自具有獨特的性質。研究非牛頓流體的力學另有一專門名詞稱為質流學 (rheology)。另有一廣大的研究園地，而非本書的範圍。

1.4 單位質量，重量及比重

單位質量 (specific mass) 是指單位體積流體所具的質量。以 ρ (讀作 rho) 表示之。對氣體而言其單位質量常隨壓力的改變而有不同。此乃因氣體分子間的距離大，且具有一可壓縮特性；當外界壓力改變時，即影響到分子間的距離而使單位體積內的分子數目產生相對的改變。液體則與氣體不同，除非在水工突變過程中—如水錘現象；其因閘門關閉所造成流速的突變而引起的壓力突變外；吾人可視液體為一種不可壓縮的流體。即視其單位質量(密度)為定值。質量單位如下：

SI 單位 kg/m^3

c. g. s. 單位 g/cm^3

物理單位 lb/ft^3

英制單位 $slugs/ft^3$

單位重量 (specific weight)。是指單位體積的流體所具的重量而言。以 w 表示。單位重量是將單位質量(密度)乘上重力加速度。常用的重量單位如下：

SI 單位 N/m^3

C. G. S. 單位 $dynes/cm^3$

物理單位 pdl/ft^3

英制單位 lb/ft^3

單位重量與單位質量間的關係：

重量是力的單位。由牛頓的第二定律 $F = ma$ ， m 指質量， a 指加速度。故可推得 $w = \rho \cdot g$

假如當水之質量以物理單位表示時為 $62.4 lb/ft^3$ 。若換算成工程師用的英制單位為

$$1 g \mid lbm = 1 slug$$

$$62.4 lb/ft^3 = 1.94 slug/ft^3$$

$$\text{單位重量 } w = \rho \cdot g = 1.94 \times 32.2 = 62.4 lb/ft^3$$

$$lbm = lb(\text{質量}) = \text{質量單位的磅(磅質)}$$

$$lbf = lb(\text{力}) = \text{重量單位的磅(磅重)}$$

6 工程流體力學

$|g|$ = 當地的重力加速度。

若以 C.G.S. 單位制表示水的質量時為 $1g/cm^3$ ；轉換成 SI 單位制度時，由 $1kg = 1000g$ ， $1m^3 = (100)^3 cm^3$ ，故水的質量成為 $1000kg/m^3$ 。比重 (specific gravity) (s)。

任何體積的液體重量與同體積的水重相比，其比值稱為該液體的比重，列如下式：

$$s = w_{\text{fluid}}/w_{\text{water}}$$

由定義可知水的比重為 1。

SI 制中水的重量 $= 9810N/m^3 = 9.81 kN/m^3$

1.5 點的靜壓力

吾人一再強調，流體中的剪應力只有在流體流動時才產生。因此，凡是靜止的流體必不發生剪應力作用。而僅有壓力 (pressure) 或稱直接應力 (direct stress) 作用。如在流體中取出一極小元素面積 δa 。在 δa 面積上的作用力設為 δp ，則 $\delta p / \delta a$ 便是吾人所稱的壓力強度。假如此 δa 的面積可以取到無限小，對該點的靜壓力強度可被定義如下式：

$$p = \lim_{\delta a \rightarrow 0} \frac{\delta p}{\delta a}$$

壓力強度之常用單位是 kN/m^2 或 kpa (kilopascal)，($1N/m^2 = pa$) 或 MN/m^2 或 MPa (mega-pascal)。

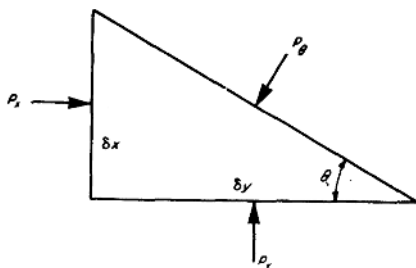


圖 1.2

證明靜壓力等向性：

流體中之某點所生的壓力，是來自各方向並且同樣大小的性質。此種性質可用圖 1.2 中一個承受各方向壓力的單位寬三角稜柱來證明將各力作 x 方向分解，故作 y 方向分解（記着，要包括該液體稜柱重）因 δx 與 δy 取得十分小時，此三角稜柱的水重 $\frac{1}{2} \delta x \delta y w$ 可視作近乎零”故得 $p_x = p_\theta$ 。

由以上的證明，得知流體中的任一點，必成立 $p_x = p_y = p_\theta$ ， θ 可取任何值。此即表明流體靜壓力的等向性。

1.6 大氣中的壓力分佈

假如取一個高度 h ，斷面積 A 的直立氣體圓柱；為便於分析，吾人在此圓柱中切一厚度 δh 的圓片，（見圖 1.3）。

設作用於圓片下方平面上的壓力強度為 p ，作用於圓片上方平面的壓力強度為 $p + (dp/dh) \cdot \delta h$ 。在該平面之淨向上垂直力為 $-(dp/dh) \delta h \cdot A$ 。與整個圓片內氣體的重量 $A \cdot \delta h \cdot \rho g$ 保持平衡，由此得成立

$$-(dp/dh) \delta h A = A \rho g \delta h$$

故

$$dp/dh = -\rho g$$

假如此時氣體的內部是處於定溫過程（isothermal process）依氣體通用法則 $p/\rho = gRT$ （其中 R 為常數； T 是絕對溫度）。利用此種關係式代入壓力對高度的基本微分式得

$$\rho = p/gRT$$

$$dp/dh = -(p/gRT)g = -p/RT$$

$$dp/p = dh/RT$$

積分之

$$\log_e p = -h/RT + B$$

式中 B 為積分常數積分之或其物理意義是，當 $h = 0$ 時；氣體壓力強度 p 為 p_0 。如此 $\log_e p_0 = B$ ，於是

$$\log_e p = -h/RT + \log_e p_0$$

$$\log_e (p/p_0) = -h/RT$$

8 工程流體力學

若考慮氣體處於絕熱過程 (adiabatic process)，則 $dp/dh = -\rho g$ 不能使用。而需改用壓力與密度關係式 $p/\rho^\gamma = k$ (k 為一常數)，將 ρ 的關係式代入壓力與高度的基本微分式 $dp/dh = -\rho g$ ，可得

$$\begin{aligned} dp &= -(p/k)^{1/\gamma} g dh \\ \therefore dp/p^{1/\gamma} &= -(1/k)^{1/\gamma} g dh \end{aligned}$$

積分後得

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} p^{(\gamma-1)/\gamma} = -(1/k)^{1/\gamma} gh + C$$

式中的 C 與 B 為一積分常數。其物理意義是當 $h = 0$ 時， $p = p_0$ 。

$$\therefore \frac{\gamma}{\gamma-1} p_0^{(\gamma-1)/\gamma} = C$$

$$\therefore \frac{\gamma}{\gamma-1} (p^{(\gamma-1)/\gamma} - p_0^{(\gamma-1)/\gamma}) = -(1/k)^{1/\gamma} gh$$

但由絕熱關係式得知

$$(1/k)^{1/\gamma} = \rho_0/p_0^{1/\gamma} = \rho/p^{1/\gamma}$$

$$\therefore \frac{\gamma}{\gamma-1} \left(\frac{p_0}{w_0} - \frac{p}{w} \right) = h$$

積分之得

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p_0}{w_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] = h$$

此式為絕熱過程中之氣體壓力分佈方程式，其中 $w_0 = \rho_0 g$ ， $w = \rho g$ 以上為氣體的兩種情形的結果。但實際上在整個大氣層中包括等溫過程與絕熱過程。若在對流層 (troposphere) 中，整個過程極近似絕熱過程。這種情形可視為轉換性平衡 (convective equilibrium) 的一種。在同溫層 (strato-sphere) 中，整個過程極近似等溫過程。這種情形也可視為傳導性平衡 (conductive equilibrium) 的一種。

所謂轉換性平衡，是發生於兩層間，氣體作等質量的轉換。同時在不增減熱量的情形下作壓力與溫度的轉換。

1.7 不可壓縮流體中的靜壓力

由圖 (1.3) 具斷面積 A 之圓形柱，其底部必有一向上的抗壓力 pA 以平衡圓柱內流體本身的重量。令 ρx 表示距底部高度 h 處的流體密度。圓柱內流體的重量 $= \int_0^h A \rho_x g dx$ 。