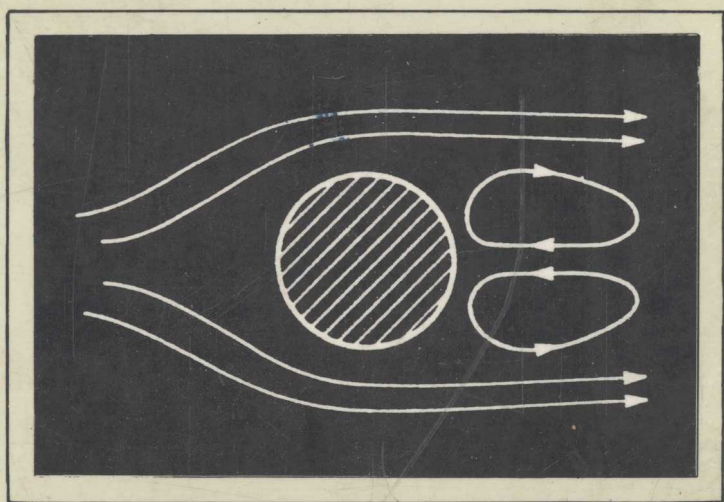


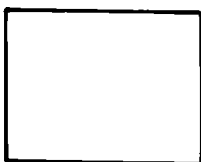
化工流體力學

陳信銘 編著



九功出版社

翻
印
必
究



版
權
所
有

本出版社經新聞局核准登記
登記證局版臺字第 3103 號

化 工 流 體 力 學

編 著 者：陳 信 銘

發 行 所：九 功 出 版 社

發 行 人：林 淑 美

地 址：台北市南昌路一段 21 號 2 樓

電 話：3923348・3925269

郵政劃撥：0785090-2 林淑輝

打字印刷：大廣打字印刷行

電 話：3515579

定 價：新台幣 200 元整

中華民國七十五年七月初版

（本書如有缺頁倒裝可隨時更換）

序

流體力學為物理學之一支，化工、機械、航空、造船、水土等科系，均列入基本專業科目。流體力學以牛頓第二運動定律、質量守恒定律及熱力學第一定律為基礎，可分為流體靜力學（fluid statics）及流體動力學（fluid dynamics），在分析工程問題時，可由微視平衡（microscopic balance）或巨視平衡（macroscopic balance）着手，視問題要求之層次而定。研究流體力學之方法有兩種；以粒子運動學（kinematics）之觀點，探討粒子運動之軌跡，為拉格拉奇觀點（Lagrangian view）；描述粒子在各處之速度分布為歐拉觀點（Eulerian view），本書以歐拉觀點為主，來描述流體流動。

在研究流體力學時，其重點因科系而異；航空系着重在氣流中潛體之界面層阻力的問題，土木方面較重靜力之問題，至於化工與機械方面，對於流系中所需功率、及摩擦因數之探討較有興趣，如管路中之摩擦因數，流經潛體之牽引係數。這些摩擦因數與在填充床之摩擦因數，以及攪拌槽中之動力數等，均具有共通性，只是此兩者及過濾操作均為化工上的重要應用，其他科系較少涉及，故本書命名為化工流體力學。

本書共分為十一單元，以SI單位為主，故以質量 $[M]$ ，長度 $[L]$ 及時間 $[t]$ 為基本因次，有時亦將熱 $[H]$ 及溫度 $[T]$ 視為基本因次。在處理質量、動量及能量之平衡時，採用控制體積（control volume）之觀念，由牛頓運動定律及熱力學第一定律，而得解決流動問題之有用公式（第三～五單元）。在處理微視平衡時，為導公式方便，會採用拉格拉奇觀點，而得運動方程式（或Navier-Stokes方程式）界面層流動與擾流問題在第八～九單元提及，粒體運動及粒子床之應用安排在第七單元；第十單元為過濾操作，基本上為達西定律（Darcy's law）之應用。液體之攪拌與混合操作安排在最後單元，由於擾流問題及波動速度為攪拌操作之核心，目前無法有效運用理論來解釋，一般在經驗方面重於理論。

鄙人先後參考許多最新資料，在數年內完成此書；其間經多次修正、校對俾使錯誤降至最少程度，建立讀者信心，以提高中文用書之水準，但人為疏忽或許難免，盼讀者不吝批評指教。此外，在編著此書時，蒙多人鼎力支持，得以完稿，特申謝意。

編 者 謹識

中華民國七十五年六月于台北

目 錄

序

第一單元 總論

1-1	流體力學與單元操作	1- 1
1-2	單位與因次	1- 3
1-3	因次分析	1- 9
1-4	流體之物性	1-18
1-5	基本定律及一般方程式	1-31
1-6	輸送方程式	1-32
	符號說明	1-34
	參考資料	1-36

第二單元 流體力學基礎

2-1	流體力學靜壓力	2- 1
2-2	靜止流體內之壓力變化	2- 2
2-3	浮力原理	2- 3
2-4	量度壓力及壓力差之裝置	2- 6
2-5	兩不互溶液體之重力分離器	2-12
2-6	離心傾析器	2-14
2-7	氣壓方程式	2-17
2-8	流體運動學	2-19
2-9	連續方程式	2-27
2-10	旋性與非旋性流體	2-28
2-11	流函數與速度勢函數	2-29
	符號說明	2-34
	參考資料	2-35

第三單元 流體流動之巨視平衡

3-1	質量守恒	3- 1
3-2	能量守恒	3- 8

3-3	在管路中之能量損失.....	3-16
3-4	摩擦因數與雷諾數數據.....	3-17
3-5	非圓形截面之導管.....	3-21
3-6	流體在管中輸送功率，流量的計算.....	3-30
3-7	複雜管路系統.....	3-39
3-8	動量守恒.....	3-46
3-9	已知流動幾何形狀、流率估計、壓差、摩擦損失以及作用力.....	3-49
3-10	非牛頓流體在管路中流動.....	3-57
	符號說明.....	3-62
	參考資料.....	3-64

第四單元 可壓縮流體之流動

4-1	在水平管中理想氣體之等溫流動.....	4- 2
4-2	在水平管中理想氣體之絕熱流動.....	4- 6
4-3	音速.....	4- 8
4-4	收斂—發散噴嘴中之流動.....	4-10
	符號說明.....	4-19
	參考資料.....	4-19

第五單元 管件、流量計、輸送裝置

5-1	導管.....	5- 1
5-2	管件及接合方式.....	5- 2
5-3	閥.....	5- 6
5-4	流體輸送裝置.....	5-11
5-5	流體流量之量度.....	5-26
	符號說明.....	5-39
	參考資料.....	5-40

第六單元 微視觀點之流體流動

6-1	薄層動量平衡.....	6- 1
6-2	流體流經傾斜平板面.....	6- 3
6-3	平行板間之流動.....	6- 8
6-4	圓形管中之流動.....	6-10
6-5	套管中流體之流動—軸向流動.....	6-15

6-6	兩不互溶液體在兩平板間流動	6-18
6-7	運動方程式	6-22
6-8	運動方程式之應用	6-28
6-9	蠕動	6-40
6-10	理想流體之流動	6-45
6-11	非穩態粘性流動	6-48
	符號說明	6-53
	參考資料	6-54

第七單元 界面層流動

7-1	流經平板之界面層狀流動—正確解	7- 4
7-2	積分動量方程式—近似解	7- 9
7-3	能量積分方程式	7-19
7-4	於圓導管中層狀流動入口長度	7-21
	符號說明	7-23
	參考資料	7-24

第八單元 擾流

8-1	時間平均值	8- 1
8-2	雷諾應力 (REYNOLDS STRESSES)	8- 5
8-3	在導管中之擾流 (TURBULENT PIPE FLOW)	8- 6
8-4	流經平板擾流界面層厚度	8-19
8-5	流經平板粘性副層的厚度	8-24
8-6	流經界面層的阻力	8-22
	符號說明	8-26
	參考資料	8-27

第九單元 通經潛體之流動

9-1	流經單粒球體	9- 1
9-2	在加速力場下之單向運動	9- 9
9-3	其他形狀之潛體的牽引係數	9-11
9-4	受阻沉降	9-11
9-5	沉降判斷準則	9-13
9-6	粒子床	9-18

9-7	類析·····	9-30
9-8	沉積與稠化 (Sedimentation and thickening) ·····	9-34
	符號說明·····	9-40
	參考資料·····	9-41

第十單元 過濾

10-1	過濾機的種類·····	10- 1
10-2	濾質與助濾劑·····	10- 9
10-3	過濾基本學說·····	10-10
10-4	恒壓過濾·····	10-13
10-5	連續過濾·····	10-17
10-6	恒速過濾·····	10-19
10-7	速率變化—壓力變化之操作·····	10-22
10-8	沖洗濾餅方程式及總循環時間·····	10-23
10-9	離心過濾·····	10-27
	符號說明·····	10-32
	參考資料·····	10-33

第十一單元 液體之攪拌與混合

11-1	混合程度·····	11- 1
11-2	攪拌裝置·····	11- 2
11-3	攪拌器之插置方式·····	11- 6
11-4	循環管·····	11-10
11-5	攪拌槽中之泵送學說·····	11-11
11-6	因次分析·····	11-15
11-7	攪拌強度·····	11-26
11-8	液體混合之動力量度·····	11-26
11-9	液體混合系統之規模放大·····	11-28
	符號說明·····	11-33
	參考資料·····	11-34

附錄 A1	單位換算、常數、與變換因數·····	A-1
附錄 A2	水之物性·····	A-3
附錄 A3	液體之粘度·····	A-5
附錄 A4	管、抽製管之性質·····	A-8

附錄 A5 各管件之層流高差損失.....	A- 9
附錄 A6 以 Lennard-Jones 為根據之位能而計之碰撞函數 Ω 及常數.....	A-10
附錄 A7 誤差函數值.....	A-12
附錄 A8 熱線，熱膜流速計與雷射速度計.....	A-13

第一單元 總 論

於各種的程序工廠裡，我們均能將其分為一系列的步驟，每個步驟即為操作，而每種操作均可能在某程序中出現，同時在不同程序中所出現的相同操作，均根據相同的科學原理，而具有共同的技術。例如，製塩程序係由固體與液體之輸送、熱傳、蒸發、結晶、乾燥及篩選所組成的，而製糖工業亦需行固、液體之輸送、熱傳、蒸發、結晶等步驟，兩種不同製程，但有許多共同之操作，故單元操作係對這些共同之操作本身作有條理、有系統的研究是也。

然而，與單元操作密不可分的輸送現象，實與單元操作屬一體兩面，這裡所指的“現象”是具有共通性稱之，而輸送為指量的傳遞，這些量包括動量、能量與質量，所以輸送現象應指此三量間的傳遞具有共通性，亦即具有類似的現象，換句話說，動量傳遞具有的現象如推動力（driving force）與阻力，在能量、質量傳遞裡均同樣地存在。

在輸送現象裡，通常係分為巨視觀點與微視觀點，後者主要是求取設計單元的參數，而前者是以所獲得之參數設計各單元，例如由流體流動獲得熱傳係數，以進行熱交換器的設計。這些各別單元的設計在單元操作裡極為重要，是單元操作研究的對象。

有許多科學原理與技術均為處理單元操作的基礎，如用於動量傳遞的牛頓運動定律，用於熱傳之熱力學第一定律及牛頓冷卻定律，以及用於質傳的質量守恒原理與費克定律（Fick's law），此外尚有動力學之速率觀念以及某些物質性質均是研究單元操作不可或缺的；有時在研究單元時，無法有效的運用上述定律，則賴操作時之經驗，此時經驗重於科學，往往為了瞭解系統之變數關係，而採用因次分析（dimensional analysis）以化簡實驗次數。總之，單元操作與輸送現象為科學與經驗的結晶。

1-1 流體力學與單元操作

流體力學為工程科學中的一門，研究流體靜止與運動中的種種行為；因此流體流動必伴隨著傳遞質量、熱量與動量，故它與單元操作與輸送現象有密不可分的關係，在以流體為介質的工程問題中，在分析、設計與綜合研究時，均以流體力學為基礎。

當流體涉及流動時，常需運用一質量不減定律、能量不減定律，以及動量不減定律等來分析有關流體流動之問題。若流體具有可壓縮性（如氣體），常

需以熱力學的觀點來處理流體流動的特定流動程序。

就研究流體運動的方法可分為兩類即 a. 流體運動學；b. 流體動力學。前者是以描述固體質點運動與變形的基本定理來描述流體，而後者則以受力的觀點來探討流體的流動。此外，流體靜力學為流體動力學的特例。

處理流體流動的問題可依下列兩觀點加以分析：

1 巨視（量）觀點——不須知道流動場之詳細概況，僅須知道流體運動之總特性即可，經常是指能量需要。例如：

a、在管路中流動

已知物性之流體從 A 處泵至 B 處，其流率與管徑為已知，需決定泵流體所需之功率，以及泵流體之成本；更進一步可決定最適管徑。

b、填充床內流動

在床內填置觸媒，使氣體或液體流經其間而反應，或在床內填置惰性材料以增加接觸面，可用於吸收氣體或改善熱交換；壓力降為重要的設計參數，不但影響到所需之功率亦直接影響到反應速率與平衡參數，因而直接影響到產物之轉化率及分布。

2 微視（量）觀點——流動場之詳細結構重要時，則必須加以考慮，此能提供研究熱傳與質傳的重要根據。例如：

a、熱傳係數

在管路中流動之液體，可於外管壁將熱能排除或供給熱能但需知內外管壁流體之熱傳係數，故為了計算熱傳係數必須知道管壁附近之

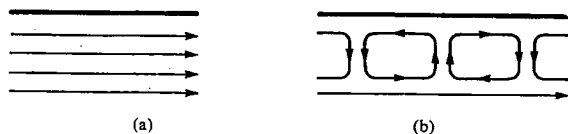


圖 1-1 接近器壁可能之流態

詳細流態。圖 1-1 為管壁附近可能之流態，在 (a) 圖中熱傳是靠流體之傳導而進行，那麼在 (b) 圖因有流體循環發生，故熱傳是靠對流進行，顯然，靠熱傳導進行熱交換在效果上比熱對流來得緩慢。

b、顆粒—流體質量傳遞

基於說明方便以圖 1-2 來說顆粒一流體質量傳遞之關係，首先亦應先知道在固體附近之流態，但流態與流體之總流動條件有關；若流體與固體進行反應，則從流體中之反應物移動至固體之表面之速率與流態之性質有關，若反應迅速，那麼進行反應之速率由質量之傳遞所控制，故應設法取得質量傳遞係數之數據，才能進行此類反應系統的計算。

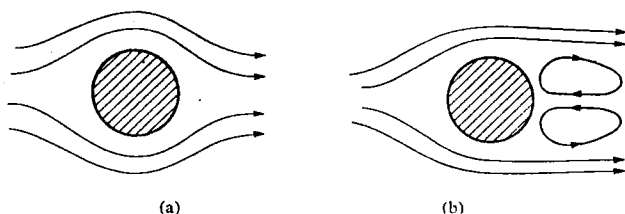


圖 1-2 流經球體可能之流態

1-2 單位與因次

每一物理量均由長度（ L ），質量（ M ），時間（ θ ），以及溫度（ T ）等基本因次（dimensions）所組成的；例如，加速度表示每單位時間之長度，其次為 $L\theta^{-1}$ ，又如力 = 質量（ M ） $\times$ 加速度（ $L\theta^{-1}$ ），所以力之因次為 $ML\theta^{-1}$ ，故任何物理量之因次皆可依其定義導出，而稱為導出量。故因基本單位不同，而有許多不同的導出單位，在流體力學中所用之基本因次為 $ML\theta$ ，但在某些書籍或文獻中則採用 $FL\theta$ ，前者為 cgs 制或 Bmu（英制質量單位）常採用的因次，而後者為 Egu（英國重力單位）採用，其中將力量 F 當做基本因次；例如，用 $ML\theta$ 因次之密度為 ML^{-1} ，但用 $FL\theta$ 因次，則因 $F = ML\theta^{-1}$ ，故 $M = FL^{-1}\theta$ ，所以密度之因次成為 $FL^{-1}\theta$ 。

在本世紀之前半世紀中，科學文獻之報導大都採用 cgs 制，而工程文獻中則大都採用 Bmu 制，但上兩系統均由目前之 SI 制（國際系統）所取代，並廣泛的用於科學與工程的文獻中，在美國化學工程師學會（AICHE）與美國機械工程師協會（ASME）所出版之刊物中均相規定採用 SI 系統，足見其重要性了。

1-2-1 各系統之基本單位

1 cgs 制

	因 次	單 位
長 度	L	cm
質 量	M	g
時 間	θ	s

cgs 制先選定質量與加速度，然後由力的定義導出力的單位，亦即質量為 1 g 之物體以加速度 1 cm/s² 運動，其受力為

$$1 \text{ dyne} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm/s}^2, \text{ 因次為 } ML\theta^{-2}$$

2 SI 制

此系統是將 cgs 系統修正，但採用較大之單位，

物理量	因 次	單 位
長 度	L	m
質 量	M	kg
時 間	θ	s

就質量為 1 kg 之物體，以 1 m/s² 之加速度運動，受力即為

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2, \text{ 其因次為 } ML\theta^{-2}, \text{ 顯然}$$

$$1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyne}$$

若 1 N 之力作用於一物體使之產生 1 m 之位移，則作功為

$$1 \text{ N} \cdot \text{m} = 1 \text{ J} = 10^7 \text{ ergs}$$

若在 1 s 內作功 1 J，則功率為

$$1 \text{ J/s} = 1 \text{ watt}$$

物理量	因 次	單 位	基本單位
力	$ML\theta^{-2}$	N	$\text{kg m}^2 / \text{s}^2$
能 量	$ML^2\theta^{-2}$	J	$\text{kg m}^2 / \text{s}^2$
功 率	$ML^2\theta^{-3}$	W	$\text{kg m}^2 / \text{s}^3$

實際上應用，有時 SI 系統之單位太大或太小，基於書寫、易看、易懂方面，應由特殊符號表示，如

10³ 以 “M” 表示，

10⁶ 以 “k” 表示，

10⁻³ 以 “c” 表示，

10⁻⁶ 以 “m” 表示，

10^{-6} 以 “ μ ” 表示，

於是 10^{-6} m，常以 $100 \mu\text{m}$ 表示，而 10^6 pa，則以 100 Mpa 表示，但 10^3 kg 不能寫為 1 kkg 。

3. 英制重力單位 (Egu) —— 英國工程系統

Egu 系統之長度單位用 ft，時間用 s，但使用 ℓb_f 為第三基本單位，因此可由此三基本單位定義出質量單位，因使 $1 \ell b_m$ 之物質產生 32.17 ft/s^2 之加速度即為 $1 \ell b_f$ ，於是若有 $1 \ell b_f$ 之重力作用於質量為 M 之物質，此時之重力加速度為 32.17 ft/s^2 ，則

$$1 \ell b_f = M \times 32.17 \text{ ft/s}^2$$

所以

$$M = \frac{1}{32.17} (\ell b_f) (s^2) (ft)^{-1}$$

將之系統之質量單位定為 slug。也就是說 $1 \ell b_f$ 作用於物體上使之產生 1 ft/s^2 之加速度，此時物質之質量即為 1 slug 。亦即

$$1 \text{ slug} = 1 \ell b_f (ft)^{-1} (s)^2$$

或是

$$1 \ell b_f = 1 \text{ slug} - ft/s^2$$

但因 $1 \ell b_f = 32.174 \ell b_m - ft/s^2$ ，所以

$$1 \text{ slug} = 32.17 \ell b_m$$

4. 英制質量單位 (Bmu)

此系統之長度單位用 ft，時間用 s，質量用 ℓb_m 而力的單位為 poundal，亦即使 $1 \ell b_m$ 之物質產生 1 ft/s^2 之加速度所需之力，也就是說

$$1 \text{ poundal} = 1 (\ell b_m) (ft) (s)^{-2}$$

因 $1 \ell b_f = 32.17 \ell b_m - ft/s^2$ ，顯然

$$1 \ell b_f = 32.17 \text{ poundal}$$

有許多作者常將 ℓb_f 與 ℓb_m 用在相同的公式中計算，雖 ℓb_f 與 ℓb_m 為常使用之單位，但因此兩者並非同一系統之單位，故在使用時應格外的小心，基於使用方便必須在 ℓb_f 與 ℓb_m 間附加一比例轉換因數，此即 g_c ，也就是說

$$\text{力} (\ell b_f) = (\ell b_m) (ft/s^2) / g_c$$

用因次表示即為

$$F = ML\theta^{-2} / g_c$$

那麼 g_c 之因次爲

$$g_c = F^{-1}ML\theta^{-1}$$

即然 Egu 系統之 $1 \text{ slug} = \text{Bmu}$ 系統中之 32.17 lb_m ，且 slug 之單位爲 $\text{lb}_f \cdot \text{s}^2/\text{ft}$ ，故 lb_m 與 slug 間之轉換因數 g_c 爲 $32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{s}^2$ ，則由牛頓第二定律知

$$F = \frac{1}{g_c} \frac{d}{dt}(Mv) \quad (1-1)$$

其中 $g_c = 32.2 (\text{lb}_m)(\text{ft})/(\text{lb}_f)(\text{s}^2)$ ，此時 (1-1) 可適用於任何系統，若長度爲 ft ，時間爲 s 且質量爲 lb_m ，而以 lb_f 爲第四因次，則此稱爲 fps 制。下表爲各種系統單位及轉換因子比較。

系統	長度	時間	力	質量	g_c
Egu	ft	s	lb_f	slug	$1 \frac{\text{slug}(\text{ft})}{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}$
Bmu	ft	s	poundal	lb_m	$1 \frac{(\text{lb}_m)(\text{ft})}{(\text{poundal})(\text{s})^2}$
工程 fps	ft	s	lb_f	lb_m	$\frac{32.174(\text{lb}_m)(\text{ft})}{(\text{lb}_f)(\text{s})^2}$

1-2-2 導出單位

SI 系統與 cgs 系統之三個基本單位爲長度、質量、與時間，且已知力之因次爲 $ML\theta^{-1}$ ；此外，亦有其他導出單位用基本之 $ML\theta$ 系統來表示，如壓力爲單位面積上受力，其因次爲 $ML^{-1}\theta^{-1}$ 。

黏度爲每單位速度梯度之剪應力，其因次爲

$$(ML\theta^{-1}/L^2) / (L\theta^{-1}/L) = ML^{-1}\theta^{-1}$$

動黏度 (kinematic viscosity) 之定義爲黏度除以密度，其因次爲

$$ML^{-1}\theta^{-1}/ML^{-3} = L^2\theta^{-1}$$

茲將 SI 系統通常所接觸之單位，因次說明如下：

量度	單位	因次	基本單位
力	N	$ML\theta^{-1}$	1 kg m/s^2
能量	J	$ML^2\theta^{-1}$	$1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
功率	W	$ML^2\theta^{-1}$	$1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3 = 1 \text{ J/s}$
壓力	pa	$ML^{-1}\theta^{-1}$	$1 \text{ kg/ms}^2 = 1 \text{ N/m}^2$

黏 度	Pa·s	$ML^{-1}\theta^{-1}$	$1 \text{ kg/ms} = 1 \text{ Ns/m}^2$
頻 率	hertz	θ^{-1}	1 1/s

1-2-3 熱單位

因熱為能量的一種形式，故可用因次 $ML^2\theta^{-2}$ 來表示其單位，但以這種方式來表示其單位，在使用上不太方便，若溫度的觀念用因次 T 來表示，則物體之熱能量 H 方便表示為

$$H \propto \text{質量}(M) \times \text{溫度}(T)$$

其中之比例常數即為比熱，比熱隨物質不同而異。因此必須採用特定物質定義熱量，通常用 298 K (15°C) 之水，若設此條件水之比例常數為 1，則

$$H = MT$$

在 SI 系統所用之熱量單位為 J，而在 cgs 系統中，熱量之定義為大氣壓下使 1 g 之水溫度上升 1°C，其單位為 cal。

而 Bmu 與 Egu 系統中熱量用 Btu 為單位，這是指在大氣壓力使 1 lb_m 之水溫度上升 1°F (60 – 61°F)。

將熱能表為與機械能相同單位，比熱之因次為

$$ML^2\theta^{-2}/MT = L^2\theta^{-2}T^{-1}$$

那麼水之比熱即為熱的機械當量，於是根據所採用水之比熱的系統不同，水之比熱值如下：

cgs 系統	1 cal/g°C
英國工程單位	1 Btu/lb _m °F
SI 系統	4186.8 J/kg K

建立熱功當量之關係可用 J 表示之，亦即

$$J = \frac{\text{機械能(功)}}{\text{熱能}} = \frac{LF}{H} = \frac{L(ML\theta^{-2})}{MT}$$

$$= L^2\theta^{-2}T^{-1}$$

$$1 \text{ kcal} = 4186.8 \text{ J 或 } 1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$$

$$778.17 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f = 1 \text{ Btu 且 } 1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal}$$

於是機械能與熱能在相同公式中出現，使用時必須留心以確定兩者均保持相同之單位，在 SI 系統中，熱與功之單位通用，均以 J 表示，故 J=1。

【例題 1-1】粘度單位換算

將黏度為 1 P (g/cm·s) 轉換為英國工程單位及 SI 單位。

解：

$$\begin{aligned}
 1 \text{ P} &= 1 \text{ g/cm} \cdot \text{s} = \frac{1 \text{ g}}{1 \text{ cm} \times 1 \text{ s}} \\
 &= \frac{(1/453.6) \text{ lb}_m}{(1/30.48) \text{ ft} \times 1 \text{ s}} \\
 &= 0.0672 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{s} \\
 &= 242 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{h}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 1 \text{ P} &= 1 \text{ g/cm} \cdot \text{s} = \frac{1 \text{ g}}{1 \text{ cm} \times 1 \text{ s}} \\
 &= \frac{(1/1000) \text{ kg}}{(1/100) \text{ m} \times 1 \text{ s}} \\
 &= 0.1 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \\
 &= 0.1 \text{ N} \cdot \text{S/m}^2 \\
 &= 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}
 \end{aligned}$$

【例題 1-2】功率單位換算

將 1 kW 變換為 hp。

解：

$$\begin{aligned}
 1 \text{ kW} &= 10^3 \text{ W} = 10^3 \text{ J/s} \\
 &= 10^3 \times \frac{1 \text{ kg} \times 1 \text{ m}^2}{1 \text{ s}^2} \\
 &= \frac{10^3 \times (1/0.4536) \text{ lb}_m \times (1/0.3048)^2 \text{ ft}^2}{1 \text{ s}^2} \\
 &= 23.730 \text{ lb}_m \text{ ft}^2/\text{s}^2 \\
 &= 23.730/32.2 = 737 \text{ slug ft}^2/\text{s}^2 \\
 &= 737 \text{ lb}_f \cdot \text{ft/s} \\
 &= 737 / 550 = 1.34 \text{ hp}
 \end{aligned}$$

或是

$$1 \text{ hp} = 0.746 \text{ kW}$$

問題

1-1 在 SI 單位系統中 g_c 之單位是 _____。

在MKS單位系統中 g_c 之單位是 _____。

1-2 1 Torr 相當於 _____。

1 bar = _____ Pa, 1 kgf/cm^2 = _____ atm。

1-3 因次分析

在研究流體力學、熱傳與質傳等，常因影響系統之變數很多而發生了困難，而難以用數學理論分析來處理，在這種情況下，可藉助因次分析來處理，應注意，因次分析並非萬靈丹，它只是一個方便的工具，可大大的減少變數的數目；這是因某些因次之變數組成一無因次之參數，此法只能得到部分的解答或定性方面的解答而已，並不能提供各變數間關係的全部資料，尚須仰賴實驗才能獲得結果，不過可減少許多實驗時間。

1-3-1 雷賴法 (Rayleigh method)

此法為 1899 年由雷賴所提出，這種方法是以指數方程式之型式表示，系統中之變數 x ，為獨立變數 $x_1, x_2, \dots$ 等之函數，那麼方程式可以寫為

$$x_1 = f(x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) \quad (1-2)$$

在 (1-2) 式中兩邊之因次必須是齊次，由因次齊次原理 (Principle of dimensional homogeneity) 可將上式改為

$$x_1 = C x_2^a x_3^b \dots x_n^v \quad (1-3)$$

其中 C 為無因次常數，可由問題的物性及自實驗之量度而得到，而 $a, b, \dots$ 等這些指數可利用 (1-3) 式兩邊同因次之指數相等，而得到之聯立方程式加以解出，再將幕次相同的變數聚集在一起即形成無因次參數群之間的關係。

欲瞭解此法最好由下列之例子來說明：

【例題 1-3】管中流因次分析

不可壓縮流體流經長為 L 且管徑為 D 之導管，其平均流速為 v ，若流體之密度與黏度分別為 ρ 與 η ，試由因次分析得到壓差 Δp 與上述變數之關係。

解：

先將各變數及其因次列出，如下表所示：

變 數	因 次
Δp	$ML^{-1}T^{-2}$
D	L
L	L