

科學圖書大庫

流 量 學

譯者 林 建 山

徐氏基金會出版

科學圖書大庫

流 量 學

譯者 林 建 山

徐氏基金會出版

徐氏基金會科學圖書編譯委員會
監修人 徐銘信 發行人 王洪鎧

科學圖書大庫

版權所有

不許翻印

中華民國六十八年五月三十日初版

流 量 學

基本定價 2.80

譯 者 林 建 山

本書如發現裝訂錯誤或缺頁情形時，敬請「刷掛」寄回調換。謝謝惠顧。

(67)局版臺業字第1810號

出版者 財團法人 臺北市徐氏基金會 臺北市郵政信箱53-2號 電話 7813686 號
發行者 財團法人 臺北市徐氏基金會 郵政劃撥賬戶第 1 5 7 9 5 號
承印者 大興圖書印製有限公司 三重市三和路四段一五一號 電話 9719739

譯者序

本書係克雷恩 (CRANE) 工程設計公司的設計手冊，譯者在一個偶然的機會由服務於工程設計公司的朋友處拿到本書，經過詳細研讀後，獲益非淺，尤其書內附錄所附之各種數據，給予譯者很大的方便。本書在1970年便已發行到第十一版，可見受到工程界歡迎的程度。

本書分為三大部份，第一、二章為第一部份，主要介紹工程界經常碰到的一些流體之性質，流動特性，壓力與流量之量度方式，流體流經閥門，配件與管綫之流量、磨擦係數、阻抗及流量係數的計算公式，以便讀者對流體力學之理論有一概略之認識與回顧。第二部份為流體力學上較常碰到的問題之解題公式及其實地計算之範例，第三章係以圖解法解題；此法目前係工程界最樂用的解題方式，只要在各種座標上之點相連，便能迅速的將所要求解的磨擦係數、流量、壓力降

解答出來。第四章則是實地以數學式子演算的例題，以便讀者可以循例解題。第三部份為流體的物理特性，閥門，配件與管綫的流動特性及各類的工程數據，包括黏度、密度、流量係數、磨擦係數、阻抗、工程界必備的蒸汽表、管綫管號、管徑、厚度之對照表，及管號40之鋼管內各種流體之流量表，讀者不必當心去計算，只要翻閱本書便能查出，非常的方便。

本書的原文書在台灣已買不到，譯者為了使在學的工程界準工程師們及工業界甚為忙碌的工程師們方便，特地不辭辛勞加以譯出，並交由國內大力推動科技中文化的徐氏基金會出版，聊盡一份棉薄之力，希望本書之出版，能給各位讀者不少的方便。倉促付梓，錯誤在所難免，尚望工程界的諸位先進，不吝指正。

林 建 山

序

工業愈複雜，流體在工業界所扮演的角色越重要。一百年前，水是唯一以管綫輸送的流體，而今日幾乎你所能看到的流體，其在生產、處理、輸送與利用方面均係以管綫輸送。原子能與火箭能之時代，加入了液態金屬之流體……例如鈉、鉀、鉍與液態氧、液態氮等……就如最普通的流體、如油、水、氣體、酸與液體等，今日亦以管綫來輸送。值得注意的是，輸送並不是唯一的目的。近代的飛機、船舶、汽車、車床等，均廣泛運用液壓與氣動機構加以控制。

由於液壓與流體的廣泛應用，故每一位工程師均深深覺得其亦得對流體的幾個基本定律有所了解，爲了達成這個目的而且實用，克雷恩公司 (Crane Co.) 在1935年出版了一本手冊“流體的流量與熱傳送”(Flow of Fluids and Heat Transmission) 1942修正爲“流體經過閥門，配件與管綫之流量”(Flow of fluid through Valves, Fittings and pipe) 由於書籍的銷售量大，故本書爲工程師們譽爲實用與科學，而且深獲好評。隨著增訂本的發行，本書加入了甚多最新且有用的數據。爲了得到更新的資料，克雷恩公司發啓了一個組織，利用Armour研究基金會，在V.L. Streeter

博士和W.G. Kautz先生的指導下，試驗所得到的數據。本書內之數據均是克雷恩實驗室及現場實驗的數據，均爲克雷恩公司的工程師們數年努力的結晶。

本版作了最大的努力，準備了計算流量方面最新且有用的資料，並且是以總結的方式呈現給各位，其中包括解答不尋常的流量問題之數據。例如1942年版內包括甚多圖解法，以便給喜歡使用圖解法解答簡單問題的工程師們使用，然而本版內，爲了避免重覆，刪減了一些圖解法之圖表，但加大了其使用範圍。

本書排版的方式係將理論排在第1，2章……流量問題的實際應用則在第3，4章……流體的物理性質及閥門，配件與管綫的流動特性則在附錄A……單位的換算及其他有用的工程數據在附錄B內，此外附加頁數系統，以便進一步修改時，不致影響到其他的章節。

大部份流體流經閥門與配件的數據，均是在克雷恩工程實驗室內小心試驗得出者。這些數據已被廣泛使用，而且足以信賴。本書亦提供了一些參考資料的書目，以便讀者對此問題進一步的研究。

目 錄

第一章

管綫輸送流體之理論

緒論	1-1
一、流體的物理特性	1-2
(一)黏度	1-2
(二)密度	1-3
(三)比容	1-3
(四)比重	1-3
二、管綫內的流動特性—層流與亂流	1-4
(一)流體的平均速度	1-4
(二)雷諾數	1-4
(三)水力半徑	1-4
三、能量不滅定律—柏努利定律	1-5
四、壓力之量度	1-5
五、達西公式—流體常用之流量公式	1-6
(一)磨擦係數	1-6
(二)年限與使用情況對磨擦係數之影響	1-7
六、可壓縮性流體在管綫中之定律	1-7
(一)恒溫方程式	1-8
(二)氣體在管綫內流量計算之簡化公式	1-8
(三)可壓縮性流體在長管綫內經常使用到的其他計算公式	1-8
(四)計算可壓縮性流體在管綫中流量的各種公式之比數	1-8
(五)氣體與氣化物之極限流量	1-9
八、蒸汽—一般性之討論	1-10

第三章

流體流經閥門、配件與管綫之公式與圖解法

緒論	3-1
一、公式摘要	3-2 ~ 3-5
二、液體之流量公式與圖解法	3-6
(一)流速	3-6
(二)乾淨鋼管與黑鐵管之雷諾數與磨擦係數	3-8
(三)亂流之壓力降	3-10
(四)層流之壓力降	3-12
(五)經過流孔與噴嘴之流量	3-14
三、可壓縮性流體之流量公式與圖解法	3-16
(一)流速	3-16
(二)乾淨鋼管與黑鐵管之雷諾數與磨擦係數	3-18
(三)壓力降	3-20
(四)簡化之流量公式	3-22
(五)經過流孔與噴嘴之流量	3-24

第二章

流體流經閥門與配件之流量

緒論	2-1
一、管綫系統中閥門與配件之種類	2-2
二、克雷恩 (Crane) 流量試驗	2-2
三、壓力降與流速之關係	2-7
四、阻抗係數 K ，等量長度 L/D 與流量係數 C_v	2-8
五、等量長度 L/D ，阻抗係數 K 與管綫內徑之關係	2-10
六、閥口漸增的閥門	2-10
七、終端連接點之影響	2-10
八、層流	2-10
九、求等量長度，阻抗係數與流量係數圖表的理論根據	2-11
十、彎頭之阻抗	2-12
十一、流體的其他阻抗	2-13
十二、經過噴嘴與流孔之流量	2-14
(一)液體、氣體與氣化物	2-14
(二)可壓縮性流體經過噴嘴之最大流量	2-15
(三)流經短管之流量	2-15
十三、流體流經閥門、配件與管綫之流量	2-15
(一)液體	2-15
(二)可壓縮性流體	2-15

第四章

求流量之例題

緒論	4-1
一、鋼管或黑鐵管以外管綫之雷諾數與磨擦係數	4-1
二、以 L ， L/D ， K 與流量係數 C_v 表示閥門阻抗的求法	4-2
三、止回閥尺寸之決定法	4-4
四、閥門、配件與管綫內之層流	4-4
五、管綫系統內之壓力降與流速	4-6
六、管綫之流量問題	4-10
七、流體經由管綫之輸送量	4-12
八、經過流孔流量計之流量	4-15
九、水力半徑在流量問題之應用	4-16
十、鍋爐容量之求法	4-18

附錄 A

流體之物理特性 與閥門，配件與管綫 之流動特性

緒論	A-1
流體之物理特性	
蒸汽之黏度	A-2
水之黏度	A-3
液態石油之產品	A-3
各種液體之黏度	A-4
氣體與碳氫化合物之黏度	A-5
冷媒氯化物之黏度	A-5
水之物理特性	A-6
石油的比重與溫度之關係	A-7
各種流體之比重與密度	A-7
氣體的物理特性	A-8
氣態燃料之比重與體積成份	A-8
蒸汽之 k 值	A-9
氣體與氯化物之密度與比容	A-10
飽和蒸汽與飽和水之特性	A-11
過熱蒸汽之特性	A-16
過熱蒸汽加冷凝水之特性	A-19
噴嘴與流孔之流動特性	
噴嘴之流量係數 C	A-20
邊緣有稜角之流孔的流量係數 C	A-20
可壓縮性流體之淨膨脹係數 Y	A-21
可壓縮性流體之極限壓力比 r_c	A-21
管綫、閥門與配件之流動特性	
可壓縮性流體經由管綫流至截面積較大處之淨膨脹係數	A-22
完全亂流時管綫之相對粗度與磨擦係數	A-23
各種商用管綫之磨擦係數	A-24
乾淨之商業用鋼管及黑鐵管之磨擦係數	A-25
管綫由於突然度寬與收縮造成之阻抗	A-26
管綫由於進口與出口造成之阻抗	A-26
90° 彎頭之阻抗	A-27
斜綫彎頭之阻抗	A-27
閥門之型態 (截面圖)	A-28
各級壓力之閥門與配件經由試驗求出與其阻抗相等之管綫番號 (厚度)	A-20
各種閥門配件以管徑表示之等量長度	A-30
等量長度 L , L/D 與阻抗係數 K	A-31
阻抗係數 K 與流量係數 C_v 之等式	A-32

附錄 B

工程數據

緒論	B-1
重量與體積的相等性	
可壓縮性流體之流量	B-2
黏度之換算	
絕對黏度	B-3
動黏度	B-3
動黏度與 Saybolt 通用黏度	B-4
動黏度與 Saybolt Furol 黏度	B-4
動黏度 Saybolt 通用黏度	
Saybolt Furol 黏度與絕對黏度	B-5
Saybolt 通用黏度圖	B-6
°API, Baum'e 比重, 密度與 lbs/Gal. 之換算	B-7
蒸汽數據	
鍋爐容量	B-8
引擎之馬力	B-8
主機之蒸汽消耗量	B-8
泵所需之動力	B-9
單位換算 (一般性)	
量度	B-10
重量	B-10
速度	B-10
密度	B-10
物理常數	B-10
溫度	B-10
字首	B-10
液體體積與重量	B-11
壓力與位高	B-11
底為 10 之四位對數	B-12
流經管號 40 鋼管之流量	
水	B-14
空氣	B-15
商用黑鋼管數據	
番號 10 至 160	B-16
標準、黏強與雙倍強管綫	B-18
不銹鋼管數據	
番號 5S, 10S, 40S 與 80S	B-19

附錄 C

參考資料	C-1
------	-----

文字符號之定義 見下頁

管線輸送流體之理論

第一章

將流體由一處送往他處最普通使用的方法為利用管綫輸送，而最常使用的是圓形管綫，因其不但結構堅固，而且單位牆壁面的表面積最大。因此，除非書中特別指明，否則本書所稱呼之管綫均是一支內徑相等的圓形管綫。

在流體力學中，只有少數的現象，例如管綫中的層流……可以完全由數學式子演算出來，其餘的，即非全部，亦有一部份是靠實驗來決定其係數的。流體在管綫中的現象，已有許多實驗式子被提了出來，但其應用的範圍則非常有限，通常只能應用到與該實驗性質相同的地方。

有一個公式，可以應用於近代工業製程所處理過的甚多種流體，而且相當的完美，這個公式就是達西公式 (Darcy Formula)。雖說達西公式可以用次元解析演算出來，但其公式中有一個變數，即“磨擦係數”，則必須經由實驗加以決定。這個公式流體力學中被廣泛的應用，而且本書中亦廣泛的加以應用。

一、流體的物理性質

欲解答流體的問題，必先對所要處理流體之物理性質有所認識，這樣才能準確求出其流量，這些性質包括黏度，密度……，較經常遇到的流體，其性質均已由權威人士求出，並列於本書附錄A內。

黏度：所謂黏度是流體受到外力時，流動的難易程度。流體的絕對黏度是它抵抗內部變形或剪力的一種量度。蜂蜜是一種高黏度的流體，水比起它來就小多了，而氣體的黏度比起水來又小多了。

大多數的流體是可預測的，其中有一些其黏度決定於其所在之環境。油墨、紙漿、蕃茄醬等均是具有此種因時而變的特性之流體。為了不使混淆、將黏度代入公式時，黏度的單位必須選擇適當。在C.G.S.制或米制內，絕對黏度的單位是 poise，相當於100 centipoise. poise 的度量為達因·秒/厘米²，或公克/厘米·秒。一般相信使用 centipoise 作為黏度的單位時，較不混淆，故幾乎每一本書或每一張圖形均是以 centipoise 作為黏度的單位，本書亦然。

在英制單位中，通常為“slugs/ft·sec”或“pound force/ft²”然而亦可表示成“pound mass/ft·sec”或“poundal·sec/ft²”。水在溫度68°F時，其黏度為：

$$\mu = 1 \text{ centipoise}^* = \begin{cases} 0.01 \text{ poise} \\ 0.01 \text{ g/cm} \cdot \text{sec} \\ 0.01 \text{ dyne} \cdot \text{sec/cm}^2 \end{cases}$$

$$\mu_e = \begin{cases} 0.000672 \text{ pound mass/ft} \cdot \text{sec} \\ 0.000672 \text{ poundal/ft}^2 \end{cases}$$

$$\mu'_e = \begin{cases} 0.0000209 \text{ slug/ft} \cdot \text{sec} \\ 0.0000209 \text{ pound force/ft}^2 \end{cases}$$

動黏度是絕對黏度對密度之比，在米制單位中，動黏度的單位為 stoke，而其度量為 cm²/sec，相等於 100 centistoke。

$$\nu (\text{centistoke}) = \frac{\mu (\text{centipoise})}{\rho' (\text{g/cm}^3)} = \frac{\mu}{S}$$

根據定義，公式中的比重S是根據4°C (39.2°F)之水而定，然而本書內所指之比重均是指60°F時之水而定。英制單位中動黏度的單位為 ft²/sec。

關於絕對黏度與動黏度在米制與英制間的換算，在附錄B之B-3頁中。

流體絕對黏度的測定，尤其是氣體與氯化物，常要精密的儀器與純熟的技術。然而測定油或其他黏性的液體時，簡單的儀器即可。一般的儀器是 Saybolt Universal Viscosimeter。以此儀器測定動黏度時，係計算一定量的液體流過流孔所需的時間，故流體的 Saybolt 黏度係以秒來表示。至於黏性很大的液體則使用 Saybolt Furol 儀器。

其他的黏度計與 Saybolt 有點相近，但用得並不廣泛，例如 Engler, Redwood Admiralty, 與 Redwood. Saybolt 黏度與動黏度之間的關係示於3-4頁。動黏度，Saybolt Universal, Saybolt Furol 與絕對黏度之間的換算，示於第3-5頁。

第B-6頁是ASTM規範中液態石油成品的溫度與黏度關係表，一旦某一種石油成品，在兩個不同的溫度時的黏度已經知道，則可以查出任何溫度時，該石油成品的 Saybolt Universal 黏度。A-2及A-5是一般較常見的流體的黏度。要特別說明的是：液體的黏度隨著溫度的升高而降低，而氣體則相反。壓力對液體及理想氣體的黏度之影響微乎其微，故一般均不予考慮。然而，飽和氣體或稍過熱的氣體，壓力的改變對其黏度的改變很大。第A-2頁是水蒸汽的黏度。不幸的是，除了水蒸汽以外，其他氣體的黏度與壓力的關係不是不全，就是互相矛盾，因此，一般在處理水蒸汽以外的氣體時，由於缺乏適當的資料，一般均不考慮壓力的影響。

一、流體的物理性質 (續)

密度，比容與比重：所謂比重是單位容積的物體所具有之重量。在英制單位中，其單位為 lbs/ft^3 ，而本書所表示的記號為 ρ ，在米制中單位則為 g/cm^3 ，記號為 ρ' 。

比容的記號為 $\bar{V}$ ，係密度的倒數，在英制單位中係表示一磅的物體所佔有之體積為多少 ft^3 。所以：

$$\bar{V} = \frac{1}{\rho}$$

在米制單位中，一般並沒有比容這個名詞，因每一克的物體所佔之體積，可以表示為密度的倒數，即：

$$\frac{1}{\rho'}$$

第A-6頁是水之溫度，比重與性質的變動表，A-7頁則為其他一般液體的密度，除非壓力很高，否則壓力對液體的重量並沒有大的影響，對於氣體及氯化物來說，其密度則與壓力的改變有很大的關係，“理想”氣體的密度可以由下列公式計算下來。

$$\rho = \frac{144P'}{RT}$$

獨立氣體的氣體常數 R 等於通用氣體常數 ($MR = 1544$) 除以該氣體的分子量：

$$R = \frac{1544}{M}$$

第A-8頁列出各種氣體的 R 值及其他常用的氣體常數。第A-10頁則是空氣在不同的溫度及壓力下之密度。

計算水蒸汽之流量時，經常用到密度的倒數，即比容。第A-12到A-19頁之蒸汽表中

列出有這些數值。第A-11頁是氣體之密度與比容之關係圖。

比重是密度的相對量度。由於壓力對液體的比重並沒有顯著的影響，故計算比重時溫度是唯一要考慮者。所謂比重是任何液體在 60°F 時之密度之比。

$$S = \frac{\rho(60^\circ\text{F時之液體})}{\rho(60^\circ\text{F之水})}$$

比重計可以直接用來量度液體的化重。比重的單位較常用者有三種……API 刻度係用來表示油的比重……另兩種為 Baum'e 刻度，一用來表示比水重的液體比重，另一用來表示比水輕的液體比重。比重計刻度與比重的關係如下：

$$\text{油: } S(60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F}) = \frac{141.5}{131.5 + ^\circ\text{API}}$$

$$\text{比水重的液體: } S(60^\circ\text{F}/60^\circ\text{F})$$

$$= \frac{140}{130 + ^\circ\text{Baum'e}}$$

$$\text{比水輕的液體: } S = \frac{145}{145 - ^\circ\text{Baum'e}}$$

為了方便起見，第3-7頁列出了比重計刻度與實際比重的換算表。

所謂氣體的比重係該氣體的分子量與空氣的分子量之比，亦即空氣的氣體常數對該氣體的氣體常數之比。

$$S_g = \frac{R(\text{air})}{R(\text{gas})} = \frac{M(\text{gas})}{M(\text{air})}$$

二、管綫中的流動形態——層流與亂流

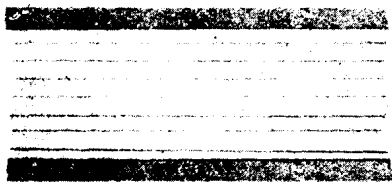


圖 1-1 層流，這是色帶隨著水流流動的真實照片。

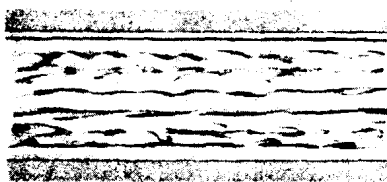


圖 1-2 層流與亂流之間的變換帶臨界速度時，色帶開始分解，表示水流漸變或亂流。

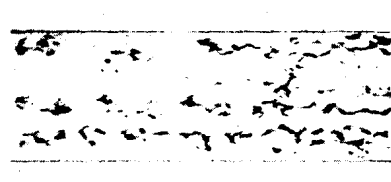


圖 1-3 亂流，圖片顯示由色料注入點下游開始，由於亂流的關係色帶碎成片狀。

上面的實驗，顯示管綫中兩種截然不同的流動形態。這個實驗是在玻璃管內流動的流體中注入小量的色料，然後在注入點下游各段觀察色料的流動型態。

圖 1-1 中顯示，如果出口端的速度或平均速度很小，則色料的紋路是成一直線的。然後慢慢增加速度，紋路仍然是一條直線，直到達到某一特定的速度時，紋路開始波動，正如圖 1-2 一樣，突然分解成混亂的形態。這時候的速度稱為臨界速度，等到速度超過“臨界速度”色帶就會像圖 1-3 一樣，不定時的出現在流體中。

速度低於“臨界速度”的流動型態稱為層流，有時亦稱為黏性流或直線流，層流的特性是整體就像同心圓柱層一樣，非常有秩序的滑過，流體在管綫軸心處的速度最快，然後急速銳減到管壁時速度為零。

速度高於“臨界速度”的流動型態稱為亂流。亂流時的流體粒子運動的方向，與主流的方向是不規則性的呈直角方向移動。亂流時經過管綫橫截面的速度分佈曲線比層流來得均勻。雖說大部份的橫截面均呈亂流，但在靠近管壁處的一小薄層，習慣上稱為“界面層”，仍然是以層流的型式流動。

平均速度：一般所稱的速度，除非特別指明，均是指某一截面的平均速度，其速度可由底下方程式求出。

$$v = \frac{q}{A} = \frac{w}{A \cdot \rho} = \frac{w \bar{V}}{A} \dots\dots\dots 1-1$$

(每一代號的定義，請參看第一章的前一頁)。

雷諾數：雷諾先生對管綫中的流動現象加以研究後得到一個結論……那就是不管是層流或亂

流……均取決於管徑，流體的密度與黏度，流動的速度，這四個變數結合而成的無單位數值，便是所謂的雷諾數，可以看成是物質流動的動力與因黏度的關係而造成的剪力之比。

雷諾數的定義如下：

$$R_e = \frac{Dv\rho}{\mu} \dots\dots\dots 1-2$$

(本方程式的另一型式，請參看第 3-2 頁)。

工程上來說，管綫中的流動，在雷諾數低於 2000 時為層流，而雷諾數高於 4000 時為亂流。兩值之間的則稱為“臨界區”，這時候的流動或為層流，或為亂流，或為正在變動時，完全定於許多可能的變數……截至目前為止，仍然無法預測。根據慎密的實驗顯示，層流有可能在雷諾數為 1200 時即消失，也有可能在高達 40,000 時才消失，但這些情形在一般的情況中並不多見。

水力半徑 (Hydraulic radius)：通常你會遇到截面並不是圓形的導管，在計算其雷諾數時，一般均是取其等量直徑 (Equivalent diameter，即四倍於其水力半徑)。所取之摩擦係數列於第 A-24 與第 A-25 頁。

R_H = 水力半徑

$$= \frac{\text{流體流過截面積 (area of flowing fluid)}}{\text{浸溼周長 (wetted perimeter)}}$$

這個公式可以應用到一般常用的導管 (如沒有滿管的圓管，橢圓形管，方形管，或長方形管)。但形狀非常狹窄的導管如環狀管或開口扁平，寬邊與長邊之比顯得太小的，則此公式並不適用。這種情況的水力半徑約等於導管寬度的一半，而速度與壓力降則根據的流經面積來計算。

三、能量不滅公式——柏努利公式 (Bernollis Theorem)

柏努利定律是用來說明導管中流體流動時能量是不滅的。在某一特定平面上導管任一點的總能量，等於其高度落差、壓力落差以及速度落差之和，公式如下：

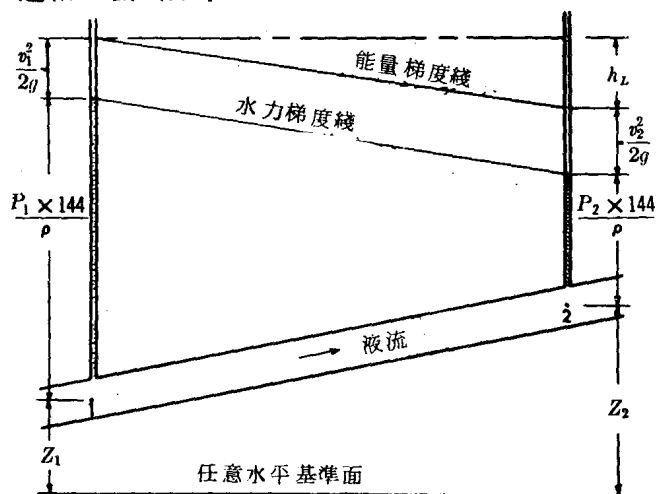


圖 1-4 流體內任兩點的能量平衡圖

摘自 R. A. Dodge 與 M. J. Thompson 所著之“流體力學”，1937 年版，麥克勞—希爾圖書公司。

$$Z + \frac{144}{\rho} P + \frac{v^2}{2g} = H$$

如果不考慮磨擦損耗之能量，亦不在管綫中加入能量（例如泵浦或汽旋機。）時，則上列公式中之線能量 H ，在流體內的任一點，應當是一個常數。但實際上能量的增加與損耗均應加以考慮，故亦必須包含於柏努利定律內，則流體內兩點的能量平衡，可以如圖 1-4 中列出來。

圖中第 1 點到第 2 點的磨擦損耗能量 h_L 之單位為呎磅/磅之流體。偶而亦表示為落差損耗，單位為呎高之液柱。該方程式的表示方式如下：

$$Z_1 + \frac{144}{\rho_1} P_1 + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{144}{\rho_2} P_2 + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \dots\dots\dots 1-3$$

所有有關於流體流量方面的公式均是由柏努利定律推演出來，只是磨擦損耗之表示方式不同而已。

四、壓力的計量

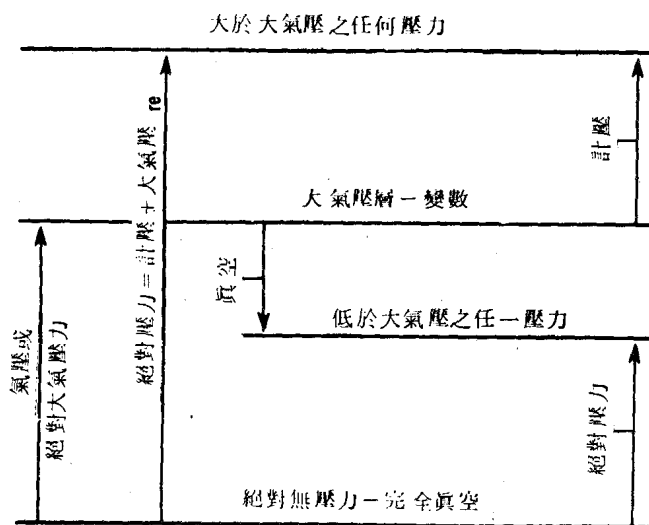


圖 1-5 計壓與絕對壓力之關係圖

圖 1-5 是用圖解的方式說明計壓與絕對壓力之間的關係。地球的表面完全真空是不存在的，要對其作壓力的量度也不容易。

氣壓 (Barometric pressure) 係表示高出完全真空的大氣壓力。

“標準的”大氣壓力為 14.696 磅/吋² 或 760 mm Hg。

錶壓係大於大氣壓力多少的量度，而絕對壓力通常是以完全真空為基準。

真空度通常表示為吋水銀柱，係表示低於大氣壓力多少，其他表示真空的方式為以吋水銀柱，厘米水銀柱或微米水銀柱來表示絕對壓力。

五、達西公式 (Darcy's Formela)——

流體流動之常用方程式

流體在管線中流動時，通常粒子與粒子之間會互相摩擦，導致所能作功的能量減少，換句話說，也就是在流動的方向會有壓力降。圖 1 - 6 是一般附有壓力錶的布登管 (Bourdon tube)，管線中有流體在流動，錶 P_1 顯示出比錶 P_2 有較高的靜壓。

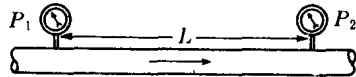


圖 1 - 6

表示壓力降的方程式即達西公式，其單位為呎高之液柱，即 $h_L = f L v^2 / D 2g$ 。這個公式也可以以 psi 表示，只要將適當的單位代入即可，其公式如下：

$$\Delta P = \frac{\rho f L v^2}{144 D 2g} \dots\dots\dots 1-4$$

(這個方程式的其他形式，參看第 3 - 2 頁)

達西公式對於管線內的任何流體，不管是層流或亂流均適用。然而當速度增加到某一限度時，管線下游的壓力降低到該液體開始氣化時，管線內會有氣泡存在，此時計算出來的流速也就不準了。故達西公式應用到氣體或會揮發性之液體時，會有所限制，其條件列於第 1 - 7 頁。

對於管徑相同，流體密度亦約略相同的直管，不管管線是水平的，垂直的，或向下傾的，方程式 1 - 4 均能計算出其因摩擦而造成的壓力降。對於上升管，垂直管或管徑變動的管線，其由於高程，速度與流體密度改變而造成的壓力變化，則必須以柏努利定律 (第 1 - 5 頁) 來計算。第 4 - 8 頁便是利用柏努利定律的一個例子。

磨擦係數：除了磨擦係數 f 必須由實驗求出來，達西公式可以由“次元解析” (Dimensional analysis) 推演出來。層流 ($R_e < 2000$) 時的磨擦係數決定於雷諾數。亂流 ($R_e > 4000$) 時，則須決定於雷諾數與管壁。

雷諾數介於 2000 到 4000 之間的“過渡區”，其流動情況係屬於層流或亂流，決定於好幾個條件，這些條件包括上游的截面積，流向與阻力之變化，例如閘門等。這個區內的磨擦係數仍未

能決定出來，但其最小值則與層流時相等，最大值則與亂流時相等。

等到雷諾數高於 4000 時，流動的情況再度穩定下來，而磨擦係數的值也可以求出來。這一點非常重要，因為它必須配合上黏度與密度，工程師才能決定出流動的特性。故特別推薦方程式 1 - 4 配合已知的實驗式，用來決定水、油、其他液體，以及符合前面所提的限制條件的可壓縮性流體的流動特性。

假如是在層流 ($R_e < 2000$) 的情況，磨擦係數可以由底下的方程式決定：

$$f = \frac{64}{R_e} = \frac{64 \mu_s}{D v \rho} = \frac{64 \mu}{124 d v \rho}$$

將這個數值代入方程式 1 - 4 而壓力降的單位為 psi 時，則壓力降為

$$\Delta P = 0.000668 \frac{\mu L v}{d^2} \dots\dots\dots 1-5$$

這便是層流的波里希利 (poiseuille) 定律。

假如是在亂流 ($R_e > 4000$) 時，磨擦係數不只決定於雷諾數，同時亦決定於相對粗糙度 ϵ / D (Relative roughness) ……即管壁的粗糙度 (ϵ) 除以管徑 (D)。對於非常光滑的黃銅管及玻璃管來說，比其其他管壁較為粗糙的管線，隨著雷諾數的增加，其磨擦係數下降的速度快得多了。

由於市面出售的管線，其內部面積一般均與管徑沒有多大關係，故對小管線來說，管壁的粗糙度對磨擦係數有較大的影響，也就是說，內徑小的管線與非常粗糙的管線情況相似，其磨擦係數比同材質的大管徑管線來說，磨擦係數大得多了。

達西公式內之磨擦係數，目前最為有用且被廣為接受的係穆迪 (L. F. Moody) 所提出者，穆迪教授合併了許多傑出的科學家最近的研究成果，將 Pigott 與 Kamler 創造的磨擦係數圖加

五、達西公式 (Darcy's Formula) —

流體流動之常用方程式 (續)

以修正，列出於A-23至A-25頁中。

第A-24頁中，係磨擦係數與由A-23頁中的相對粗糙度與雷諾數之對照圖。其磨擦係數係沿水平方向查出所算出之雷諾數，垂直引上，與由A-23頁求出之 ϵ/D 相交，然後引向左邊，即可求出。由於一般使用者均是鋼管及黑鐵管。故第A-25頁可以更快求出摩擦係數 f 。有一點必須記住的是這些圖表，只運用在乾淨的新管線。

管線的年限對磨擦耗能的影響：管線的磨擦耗能與管徑及粗糙度的變動有很大的關係。對於一個流量及磨擦係數固定的管線來說，其每呎的

壓力降與直徑的五分之一次方成反比，亦即內徑縮小2%時，壓力降增加10%，內徑減小5%時，壓力降增加23%。一個管線在操作一段時期之後，管線的內壁經常會結一層污垢，以致於內徑減小，因此在設計時，均會考慮到這種內徑的改變。

根據權威人士的說法，不管管線的材料及流體為何，其粗糙度會隨著使用時數的增加而增加，因為腐蝕及磨損的關係。伊班 (Ippen¹⁸) 在討論年限的影響時指出，一根4吋的鍍鋅鐵管在使用了三年之後，其粗糙度增加一倍，而磨擦係數增加20%。

六、可壓縮流體在管綫中的定律

欲準確求出壓縮性流體在管線中流動之壓力降時，必得知道其壓力與比容 (specific volume) 之關係，這一點並不容易，通常均考慮其為絕熱流動 ($pV_s^k = \text{常數}$) 與恒溫流動 ($pV_s = \text{常數}$)。絕熱流動通常假設在保溫良好的短管，因此時除了少量的磨擦熱進入流體外，並沒有熱能經由管線傳導進去或出來。

一般均假設是恒溫流動，一來由於比較方便，二來比較接近事實。恒溫流動最顯著的事實是天然氣在管線中的流動，道奇與湯姆森 (Dodge and Thompson¹) 認為天然氣在保溫的管線中流動時，非常接近於恒溫流動。

由於壓力與體積的關係有其他種的形式，例如 $pV_s^n = \text{常數}$ ，這種形式的稱為多次元流動，要將每一個別的場合均給予資料是不可能的。

氣體與氯化物的密度係隨著壓力而改變，例如圖1-6內，如果 p_1 與 p_2 的壓力降很大，則

密度與速度會有很明顯的改變。

故一旦所處理的是可壓縮性的流體，例如空氣，水蒸汽等，應用達西公式時，必須有下列的附加條件。

1. 如果計算出來的壓力降 ($P_1 - P_2$) 小於進口壓力 P_1 的10%時，則不管用來計算的密度是上游的或下游的，所得到的結果均有相當的準確性。

2. 一旦計算出來的壓力降 ($P_1 - P_2$) 大於進口壓力 P_1 的10%而小於40%時，假如所使用的比容係上下游的平均值的話，計算的結果仍有相當的準確性，否則必須使用第1-9頁的方法。

3. 對於更大的壓力降，例如經常碰到的長管線，則必須使用下面兩頁的方法。

六、可壓縮流體在管線中的定律 (續)

恒溫方程式：長管線中氣體的流動非常接近於恒溫狀態，而此種管線的壓力降比起進口壓力通常很大，要計算這種問題時超出了達西公式的範圍，故必須使用下列公式：

$$w^2 = \left[\frac{144 g A^2}{V_1 (f L / D + \log_e P'_1 / P'_2)} \right] \cdot \left[\frac{(P'_1)^2 - (P'_2)^2}{P'_1} \right] \dots\dots\dots 1-6$$

下面的公式是基於下面的假定條件：

1. 恒溫流動。
2. 系統不對外作功，也沒有接收外面對它作功。
3. 流量或輸送量不因時間而改變。
4. 氣體符合理想氣體定律。
5. 速度可採用截面的平均速度。
6. 整條管線的磨擦係數固定。
7. 管線係直線，而且兩端水平。

可壓縮氣體管線流動的簡化公式：實用上氣體管線除了上述7個假定條件外，另外加1個：

8. 由於管線很長，加速度可以忽略。

因此，水平管的輸出公式可以寫成：

$$w^2 = \left[\frac{144 g D A^2}{V_1 f L} \right] \cdot \left[\frac{(P'_1)^2 - (P'_2)^2}{P'_1} \right] \dots\dots\dots 1-7$$

對於長管線來說，可以看成是恒溫的方程式，而對於短的管線來說，如果壓力降比起初壓來顯得很小的話，亦可以看成是恒溫的方程式。

由於氣體的流量一般均表示成標準狀況下多少 Ft^3/hr ，為了方便起見，將方程式1-7寫成下面這個式子：

$$q'_h = 114.2 \sqrt{\left[\frac{(P'_1)^2 - (P'_2)^2}{f L_m T S_g} \right] d^5} \dots\dots\dots 1-7a$$

其他可壓縮流體在長管線中較常用到的公式：衛茂公式 (Weymouth formula²⁴)：

$$q'_h = 28.0 d^{2.667} \sqrt{\left[\frac{(P'_1)^2 - (P'_2)^2}{S_g L_m} \right] \frac{520}{T}} \dots\dots\dots 1-8$$

潘漢德公式 (Panhandle formula⁸)：適用於直徑6"到24"的天然氣管線，雷諾數 5×10^6 到 14×10^6 ，而且 $S_g = 0.6$ ：

$$q'_h = 36.8 E d^{2.6182} \left[\frac{(P'_1)^2 - (P'_2)^2}{L_m} \right]^{0.5394} \dots\dots\dots 1-9$$

流動係數 E 係經驗係數，通常假設為0.92或92%，在其他操作條件時， E 的值則示於第3-3頁。

可壓縮流體的公式的比較：方程式1-7，1-8與1-9均係由同一基本公式導出來者，只是磨擦係數選擇不同的數據。

穆迪 (Moody⁴⁸) 圖表內所列之磨擦係數，通常均使用在方程式1-7。然而，如果衛茂公式或潘漢德公式內用的磨擦係數與方程式1-7所用的相同時，則答案也會相同。

衛茂公式所使用的磨擦係數為：

$$f = \frac{0.032}{d^{1/3}}$$

此磨擦係數只有內徑20"，完全亂流時才與穆迪的磨擦係數相等，管徑小於20"時，衛茂的磨擦係數大於穆迪的磨擦係數，管徑大於20"時，則小於。

潘漢德公式所使用的磨擦係數為

$$f = 0.1225 \left(\frac{d}{d_h S_g} \right)^{0.1402}$$

在潘漢德公式所界定的流量範圍內，其計算出來的磨擦係數比穆迪的數據及衛茂的均來得小，其結果是計算出來的流量比使用方程式1-7或者使用衛茂公式均來得大。

第4-11頁列有在同樣的條件下，使用以上三個公式所計算出來的流量的區別。

六、可壓縮流體在管綫的定律（續）

氣體與氯化物的流量極限：上面幾個公式中（方程式1-4與1-6到1-9），有一個特性不太明顯，那就是管綫中可壓縮流體的流量，不管其下游的壓力如何降低，一旦其上游的壓力固定時，會達到一個最大的限度，不會超過。

可壓縮性流體在管綫中的最大速度，受到流體中以聲速傳動的壓力波傳播速度所限制。由於流體在截面積相同的管綫中往下流時，壓力減小，流速會增加，故管綫的出口端速度為最大，一旦壓力降夠大時，出口的速度會達到聲速，再進一步的降低出口端的壓力，上游亦無動於衷，因為壓力波只能以聲速運動，故這個降壓的“訊號”永遠也不會傳到上游，故而在管綫出口端已達到最大輸出量時，進一步降壓所產生的“多餘的”壓力降，也就以亂流及震動波的形式消化掉了。

管綫中所能有的最大速率為聲速，表示如下：

$$v_s = \sqrt{kgRT} = \sqrt{kg \cdot 144 P' V} \quad \dots\dots\dots 1-10$$

k 係定壓時與定容時的比熱之比，一般的雙原子氣體， k 值為1.4，氣體與蒸汽的 k 值列於第A-8及A-9頁，當壓差夠高時，在出口端或截面積縮小處會達到聲速。這一點的壓力、溫度與比容是需要研究之處。當可壓縮性流體由截面積相同的短管流到截面積較大處時，這種流動可以認為是絕熱的，這個假設可以由管長為220與130倍直徑的短管，把空氣排到大氣所作的實驗數據得到證明，在對絕熱流動¹⁹加以研究後，得到了一套校正係數，以便此種絕熱流動亦可以應用達西方程式。由於這些校正係數可以補償因流體膨脹而產生的特性改變，這個係數 Y ，定名為淨膨脹係數，示於第A-22頁中。

達西公式中包括 Y 係數時，則變成

$$w = 0.525 Y d^2 \sqrt{\frac{\Delta P}{K V_1}} \quad \dots\dots\dots 1-11$$

（ K 為阻抗係數，其定義在第2-8頁）。

必須注意的是方程式中的 K 為管綫的總阻抗係數，它包括了進口，出口的損耗以及由於閥門與配件的損耗。

在第A-22頁中用來決定 Y 值的 $\Delta P/P'_1$ 內之 ΔP 為進口壓力與截面積較大部份的壓力差。對於將可壓縮流體排到大氣的系統，其 ΔP 等於進口的計壓或進口的絕對壓力減大氣壓。一旦 Y 係數是在第A-22頁圖表 K 阻抗係數曲綫的界限內，則這個 ΔP 的值在方程式1-11中亦用得到。一旦 $\Delta P/P'_1$ 中之 ΔP 在 K 曲綫的界限外，則在出口處或管綫的某一界限區會達到聲速，則以由A-22頁圖表的右面界限點，所求出的 Y 與 ΔP 的極限值，代入方程式1-11。

方程式1-11與公式中 K ， Y 與 ΔP 的求法，請參看第4-13與第4-14的例題。

第A-22頁的圖係根據理想氣體定律計算的，一旦在出口端的速度為聲速時，所有與理想氣體非常相近的氣體計算出來的流速均非常準確。水蒸汽與氯化物並不符合理想氣體定律，故利用該圖求出之 Y 係數來計算時，所求出之流量會比出口以聲速來計算的稍微偏大（大約5%）。然而一旦達到聲速時，以該圖確認下游的壓力，而且將這個壓力下的流體特性代入聲速方程式與連續性方程式（分別為方程式3-8與3-2）求出流量時，則準確度增大。這一類型的流動型態請參看第4-13頁的例題。

這種型態的流動與第2-15頁經過噴嘴與文氏管（venturi tubes）的流動型態相似，而且這類問題的解法亦相同。

七、蒸汽——一般性的討論

蒸汽這種東西會成爲三相 (phase) 存在一固相、液相或氣相。一旦外界的情況改變時，會由某個相變成另外一個相。

大氣情況下，水是液體的形式，一旦水受到外界加熱時，水的溫度會上升，而且很快就變成小氣泡，這些小氣泡在表面不斷的形成與破裂，這種現象稱爲沸騰。

使水溫升高所需之熱量稱爲Btu (British Thermal Units)，將1磅 60°F 之水，溫度提升到 61°F 所需之熱量稱爲1 Btu。將1磅的水由 32°F (冰點) 加熱到 212°F 所需的熱量爲180.1 Btu。一旦壓力不超過 50 psia 時，通常認爲溫度升高 1°F 即代表熱含量增加 1 Btu/lb，與水的溫度無關。

通常假設在 32°F 時的熱含量爲 0， 212°F 時 1 磅水的熱含量爲 180.17 Btu，這個熱量稱爲液體的熱量或顯熱，爲了將此液體在一大氣壓下 (14.7 psia) 變成蒸汽，每 1 磅 212°F 的

水必須加入 970.3 Btu。在這個變化的階段，溫度保持不變。這些加入的熱量稱爲蒸發的潛熱，因此在大氣壓時揮發的蒸汽總熱量爲前面兩者的和，即 $180.1 + 970.3 = 1150.5 \text{ Btu/lb}$ 。

如果水是在未全滿的密閉容器內加熱時，在水蒸汽開始形成後，隨著溫度的增高，壓力會增大。

飽和蒸汽：係仍然與用來產生蒸汽的液態水保持接觸的水蒸汽，溫度既爲水的沸點，亦爲蒸汽的凝結點，這種蒸汽可以爲“乾的”，亦可爲“溼的”，完全決定於產生的情形。“乾的”飽和蒸汽是已經利用機械分離方法去除水珠，“溼的”飽和蒸汽則懸浮有水珠，任何壓力下的飽和蒸汽均有其固定的溫度。

過熱蒸汽：係指在一定的壓力下，溫度加熱到比該壓力時的飽和蒸汽的溫度還高的蒸汽。