

流體力學概論與例題解析

王石安 編著

前程出版社 印行

流體力學概論與例題解析

王石安 編著

前程出版社 印行

流體力學概論與例題解析

定價 300 元

編者著：王 石 安

發行者：張 睦 雄

出版者：前程出版社

地 址：高雄市建國三路 38 號

出版事業登記證：局版台業字第 1121 號

版權所有



翻印必究

總 經 銷：前程書店有限公司

地 址：高雄市建國三路 38 號

郵政劃撥：44893 號

電 話：07-2411874 號

中華民國 73 年 5 月初版

序 言

要想明瞭水和空氣的流體所持的能量和控制其作用之力，如何作有效的利用，必先研究流體的性質。此種學問爲流體力學。本書序論中，爲期讀者易於瞭解，故專用比較簡單的理論和實驗的方法，來處理流體的現象，而未涉及深邃的理論。

作者在各大學講授流體力學多年，深知首先應使同學能理解有關流體的原理和定律所必要的最低限度的知識；進而化最少的時間，運用已得的知識，作有效的解決實際問題。

作者撰寫本書的動機，爲養成現代青年工程人員所必要的能力。故適合在校的機械工程科（製造組、動力組、設計組、自動化控制組、一般機械組）同學從事研究、進修；亦爲投考研究所、參加高考及留學考試所不能缺少的最現代化的參考資料。

本書爲方便同學研習起見，書中各章各節，均附有內容摘要，此不但是公式，也是最重要的知識，可應用這些知識來解析所舉各種例題，進一步培養同學解決實際問題的能力。

對於流體力學的處理，有賴於較深的數學知識，但本書爲配合工科在學同學的程度，故理論、例題解析皆深入淺出，祇要學過初等微積分和力學後，即可運用裕如，故本書不僅是有關科系同學應研讀的參考書，並且也是有關在業工程人員不可或缺的重要考資。

本書係再版，挂漏之處，經已補充修正，然時代日新月異，仍祈海外內專家學者多多匡正，則幸甚，幸甚！

西元 1983 杪謹識美國

流體力學概論與例題解析 目 次

第一章 流體的諸性質

第一節	流體與理想流體	1
第二節	單位體積重量	1
第三節	比重、比體積及密度	5
第四節	壓縮率(β)	7
第五節	表面張力	9
第六節	黏度	17
第七節	氣體的定律	24
第八節	流體壓力	27
第九節	壓力的單位	28

第二章 流體靜力學

第一節	絕對壓力與表壓力的關係	30
第二節	壓力的測定	30
第三節	作用於平面液體的壓力	37
第四節	作用於曲面液體的壓力	57
第五節	浮力	66
第六節	平衡方程式	85

第三章 流體之流

第一節	術語	95
第二節	流體運動的處理方法	97
第三節	<u>歐烈</u> 的連續方程式	98
第四節	<u>歐烈</u> 的運動方程式	103

第 五 節	<u>伯努利</u> 的定理	105
第 六 節	對於氣體的 <u>伯努利</u> 之式	122
第 七 節	<u>拉格蘭</u> 的運動方程式與連續方程式	124
第 八 節	動量方程式	126
第 九 節	迴轉運動	149
第 十 節	微小要素的形變與迴轉	157
第十一節	流體的流動	165
第十二節	流體的阻力	168
第十三節	用損失水頭與平均流速處理運動的方法	181

第四章 相似律與因次解析

第 一 節	單位與因次	197
第 二 節	因次解析與 π -定理	201
第 三 節	相似律	204
[1]	<u>雷諾</u> 的相似律	210
[2]	<u>福勞德</u> 的相似律	226
[3]	<u>瑪哈</u> 的相似律	229
[4]	<u>衛柏爾</u> 的相似律	233
第 四 節	流體機械的相似律	236

第五章 流量計測

第 一 節	小孔的流量公式	250
[1]	小形小孔	250
[2]	大形小孔	254
[3]	潛孔	258
[4]	由小孔的排水時間	260
[5]	管孔、管噴嘴及 <u>文德利</u> 管流量計	263
[6]	閘門	279

第 二 節 堰的流量公式·····	283
[1] 雙形堰·····	283
(a) 四角堰·····	284
(b) 全寬堰·····	285
(c) 直角三角堰·····	286
(d) 60度三角堰·····	286
(e) 雙形潛堰·····	286
[2] 寬頂堰·····	293
[3] 埧·····	299
[4] 其他的方法·····	303

第六章 管內之流

第 一 節 摩擦損失與平均流速公式·····	308
第 二 節 各種損失·····	322
第 三 節 單綫管路·····	327
[1] 能量綫及水力梯度綫·····	327
[2] 虹吸管·····	345
[3] 幫浦及水輪機的管路·····	351
第 四 節 枝狀管路·····	360
[1] 分枝及合流管路·····	360
[2] 複綫管路·····	369
[3] 枝狀管路的圖式計算·····	372
第 五 節 管路網·····	381

第七章 開 水 道

第 一 節 等速流·····	389
第 二 節 常流與射流·····	410
第 三 節 水躍·····	425

第 四 節 不等速流	443
[1] 剖面梯度與一樣的開水道的不等速流	443
[2] 水道梯度及寬度變化的開水道的不等速流	482

第八章 流體阻力

第 一 節 物體所受的阻力	509
第 二 節 球及其他的阻力	532
[1] 球的阻力	532
[2] 圓柱的阻力	532
[3] 其他的阻力	533
第 三 節 球的終速度	534
第 四 節 翼	539
第 五 節 船舶的阻力	542
第 六 節 附面層及附面層的應用	545
[1] 層流附面層時的平板摩擦阻力	546
[2] 紊流附面層時的平板摩擦阻力	546
第 七 節 迴轉圓板的摩擦阻力	555
[1] 在廣濶空間的迴轉圓板之式	556
[2] 置於容器中時休耳茲 - 古若勞之式	557

第九章 水 鎚

第 一 節 水鎚現象	559
第 二 節 閘閉鎖時的水鎚作用	567
[1] 依閘急閉鎖時的水鎚	567
[2] 依閘徐徐閉鎖時的水鎚	568
第 三 節 依閘的開放而壓力降下	574
[1] 閘急開放時	574
[2] 閘徐徐開放時	574

第 四 節	阿尼耶比的略算式·····	574
第 五 節	境界條件·····	577
第 六 節	黏性流體的水鎚·····	583

第十章 漩渦真空

第 一 節	水力機械的漩渦真空·····	589
第 二 節	水輪機的漩渦真空·····	594

第一章 流體的諸性質

第一節 流體與理想流體

最近吾人已知如熱可塑性體與濃厚膠質 (Kolloid) 液等亦為有固體性質的物質，以致流體的定義，發生困難。然一般比較容易流動的液體及氣體總稱之為流體。氣體易於壓縮，故謂之壓縮性流體；而液體則難於壓縮，故謂之非壓縮性流體。然氣體當其壓力的變化小，而壓縮性可省略不計時，作為非壓縮性流體來處理固未嘗不可；雖為液體而壓力的變化大時，則又必須考慮其壓縮性。

一般實際的流體恆持有黏性，故謂之黏性流體。既無黏性又無壓縮性的假想流體，謂之理想流體（或謂之完全流體）。

第二節 單位體積的重量（比重量）

[1] 水

在標準大氣壓下與約在 4°C （詳言之為 3.98°C ）時，純粹的水其單位體積的重量 γ 為 1000 kp/m^3 。

γ 之值恆隨溫度及壓力，如第 1-1 圖及第 1-2 圖所示而變化。

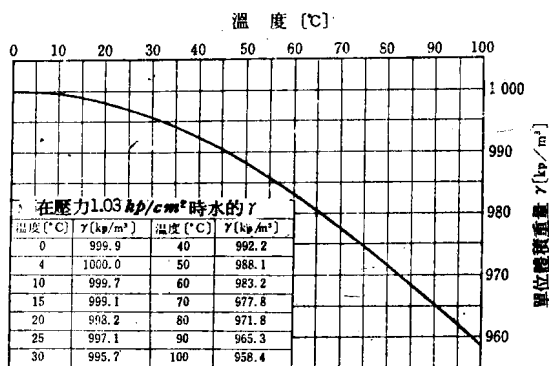
[2] 空氣

乾燥空氣的單位體積的重量可用次式表之。

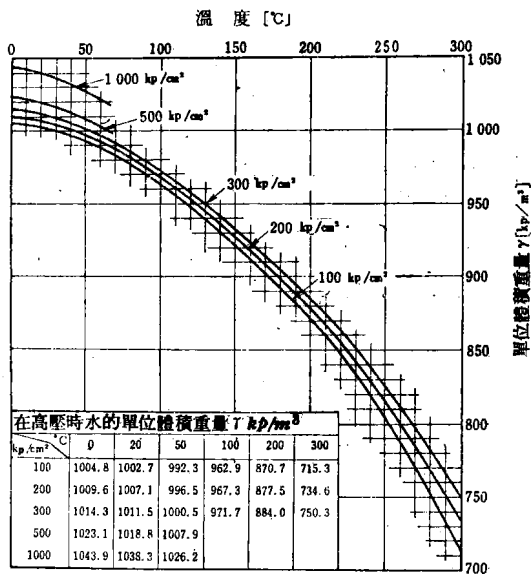
$$\left. \begin{aligned} \gamma &= 1.293 \times \frac{273}{273 + \theta} \times \frac{H}{760} \quad [\text{kp/m}^3] \\ &= 0.465 \frac{H}{T} \quad [\text{kp/m}^3] . \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中 θ 係用攝氏表示溫度的數值， T 則用絕對溫度表示溫度的數值。
 H 表示水銀柱之高用 mm 測量時的壓力之值。

第一章 流體的諸性質



第 1-1 圖 水的單位體積的重量



第 1-2 圖 壓力與單位體積的重量

在大氣中常含有若干的水蒸汽，此謂之濕空氣，此時 γ 之值可用次式計算之。

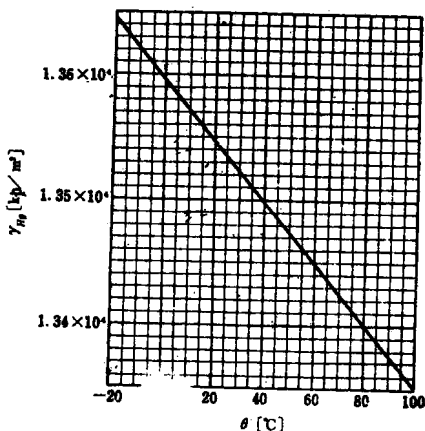
$$\gamma = 1.293 \times \frac{273}{273 + \theta} \times \frac{H - 0.378 \times H_s}{760} \quad [\text{kp/m}^3] \quad (1-2)$$

式中 H_s 係表示在其溫度時水的飽和蒸汽壓，用水銀柱之高〔mm〕所表示的數值，而 $x = \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$ ， γ_w 為濕空氣 1 m^3 中的水蒸汽的重量〔kp〕， γ_s 為水蒸汽在飽和溫度 θ 〔°C〕時，空氣 1 m^3 中水蒸汽的重量〔kp〕。

[3] 水 銀

在 1 氣壓下，及 $\theta > 0^\circ\text{C}$ 的範圍內，其 γ 恆如式 (1-3) 及第 1-3 圖所示而變化。

$$\gamma = \frac{13595}{1 + (18.182\theta + 0.00078\theta^2) \times 10^{-5}} \text{ [kp/m}^3\text{]} \quad (1-3)$$



第 1-3 圖 水銀的比重

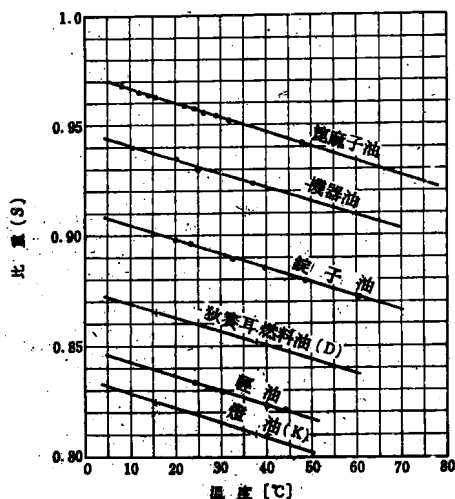
[4] 油及其他各種液體

在 1 氣壓下及在常溫以上的溫度 θ 〔°C〕時，各種油的單位體積重量可用次之近似式

$$\gamma = \gamma_{20} \{1 - 0.00065(\theta - 20)\} \text{ [kp/m}^3\text{]} \quad (1-4)$$

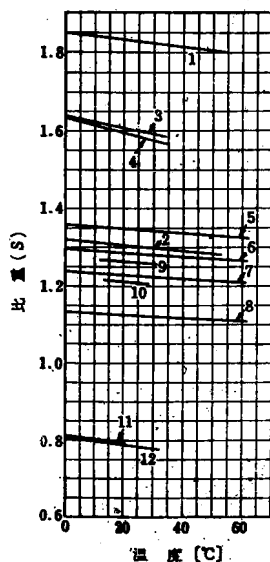
表之。式中 γ_{20} 係表示在 20°C 時 γ 之值。

第 1-4 圖係表示對於溫度，而油的比重發生變化的情形。又第 1-5 圖則表示各種液體之比重與溫度的關係。



$$S = S_{11}\{1 - 0.00065(\theta - 20)\}$$

第 1-4 圖 油的比重與溫度的關係



1. 100% 硫酸,
2. 40% 硫酸,
3. 四氯化乙烷,
4. 四氯化碳,
5. 70% 糖水,
6. 60% 糖水,
7. 50% 糖水,
8. 30% 糖水,
9. 100% 甘油,
10. 80% 甘油,
11. 甲醇,
12. 乙醇.

第 1-5 圖 各種液體的比重

第三節 比重、比體積及密度

將物質的比重量在 4°C 時用 1 氣壓的水的比重量除之，其所得之值，謂之比重，一般多用記號 S 表之， S 為無因次數。

物質比重量的逆數謂之比體積，而用記號 v 表之。

物質的每單位體積的質量謂之比質量或謂之密度，一般多用記號 ρ 表之。比重量與密度之間恆成立次之關係，即

$$\rho = \frac{\gamma}{g}, \quad (1-5)$$

式中 g 為重力的加速度， g 之值恆隨地球上的場所不同而有若干的差異。

例題 1-1 在標準大氣壓之下，水的單位重量與溫度有關。若其 1 t/m^3 時的誤差在 1% 之內，問達到攝氏何度。

〔解〕根據水的單位重量的曲線，相當於 $1.0 - 0.01 = 0.99 \text{ t/m}^3$ 的溫度為 45°C 。

例題 1-2 水在 4°C 時的比重量為 1.00 g/cm^3 ，將此值用 kp 及 m 的單位表示時又如何，同時在 4°C 時水的密度，試用 kp ， m ， s 的單位表之。

〔解〕 $1 \text{ kp} = 1 \times 10^3 \text{ g}$ ， $1 \text{ m} = 1 \times 10^2 \text{ cm}$ ，故

比重量 $\gamma = 1.00 \text{ g/cm}^3$

$$= 1.00 \text{ g} \times \left(\frac{1 \text{ kp}}{1 \times 10^3 \text{ g}} \right) / 1 \text{ cm}^3 \times \left(\frac{1 \text{ m}}{1 \times 10^2 \text{ cm}} \right)^3$$

$$= 1.00 \times 10^3 \text{ kp/m}^3.$$

密度

$$\rho = \frac{\gamma}{g}$$

$$= \frac{1.00 \times 10^3 \text{ kp/m}^3}{9.81 \text{ m/s}^2} = 1.02 \times 10^2 \text{ kps}^2/\text{m}^4.$$

第一章 流體的諸性質

例題 1-3 試求在標準狀態〔氣壓 760 mmHg，溫度 15°C〕時的空氣比重量及密度（比重量），此時空氣的氣體常數為 $R = 29.27 \text{ [m/°k]}$ 。

〔解〕比重量： $\gamma = \frac{p}{RT} = \frac{760 \times 13.6}{29.27 \times (273 + 15)} = 1.226 \text{ kp/m}^3$

密度： $\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1.226}{9.81} = 0.125 = \frac{1}{8} \text{ kpsec}^2/\text{m}^3$ 。

例題 1-4 某流體的比重為 1.8，試求此流體的比重量、比體積及密度。

〔解〕 γ_w 在 4°C 時為 1 氣壓的水的比重量，物質的比重量 γ 可用

$$\gamma = S \gamma_w$$

表之。又比體積 v 為

$$v = \frac{1}{\gamma} ,$$

故

$$\begin{aligned} \text{比重量：} \gamma &= S \gamma_w = 1.8 \times (1.00 \times 10^4 \text{ kp/m}^3) \\ &= 1.8 \times 10^4 \text{ kp/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{比體積：} v &= \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{1.8 \times 10^4 \text{ kp/m}^3} \\ &= 5.56 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{密度：} \rho &= \frac{\gamma}{g} = \frac{1.8 \times 10^4 \text{ kp/m}^3}{9.81 \text{ m/s}^2} \\ &= 1.85 \times 10^{-2} \text{ kps}^2/\text{m}^4 \end{aligned}$$

類題 在英制 ft-lb 單位中，質量的單位使用 Slug。今某物體有 1 lb 之力作用，而發生 1 ft/s² 的加速度時，則此物體的質量

爲 1 slug，試將 1 slug 用力爲 kp，長爲 m，時間爲 s 表之。

[解] 1 lb = 0.4536 kp，ft = 0.3048 m，故

$$1 \text{ slug} = \frac{1 \text{ lb}}{1 \text{ ft/s}^2} = \frac{0.4536 \text{ kp}}{0.3048 \text{ m/s}^2} = 1.488 \text{ kps}^2/\text{m}.$$

第四節 壓縮率

在體積 V ，壓力 p_1 的流體上加以 Δp 的壓力，而壓力增高爲 p_2 時，其所生的體積的變化量爲 ΔV ，此時恆隨

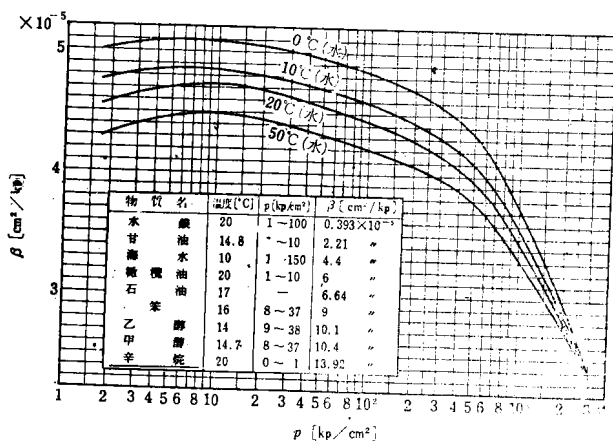
$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-6)$$

而定。式中 β 爲液體的壓縮率，於各種溫度，水的 β 實測值如第 1-6 圖所示。在計算時恆使用平均壓力

$$p = \frac{p_1 + p_2}{2}$$

時的 β 之值。

此外當計算液體中的音速度時，則使用 β 的逆數



第 1-6 水的壓縮率

$$K = \frac{1}{\beta} \text{ [kp/cm}^2\text{]} . \quad (1-7)$$

式中 K 謂之液體的體積彈性係數。

例題 1-5 某水壓機，將 20°C 之水的壓力用表壓力由 0 壓至 1000 kp/cm^2 時，問水的體積減少幾何。

〔解〕依表 (1-6) 置 $\beta = 3.95 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kp}$ ，

則

$$\begin{aligned} -\frac{\Delta V}{V} &= (3.95 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{kp}) \times 1000 \text{ kp/cm}^2 \\ &= 3.95 \times 10^{-2}, \end{aligned}$$

即有 3.95 % 的減少。

例題 1-6 20°C 的水由初容積壓縮 2 %，其所須的壓力如何。

〔解〕 $\frac{\Delta V}{V} = 0.02$ ，依水的壓縮率 $\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p}$ 而得

$$\Delta p = \frac{\Delta V}{V} / \beta = \frac{0.02}{4.09 \times 10^{-5}} = 489 \text{ kp/cm}^2 .$$

例題 1-7 在長 10 m 的管內，貯以體積彈性係數 $1.47 \times 10^4 \text{ kp/cm}^2$ 的液體，用活塞押之，其彈簧常數為 60 kp/cm^2 ，問管徑應有幾許然後可。此時假定管材料為剛體。

〔解〕彈簧力為 F ，彈簧常數為 k ，位移為 x ，管長為 l ，管的內徑為 d ，液體的體積為 V ，其變化量為 ΔV 時，即可成立次之諸公式。

$$F = \frac{\pi}{4} d^2 \Delta p , \quad \left| \right.$$