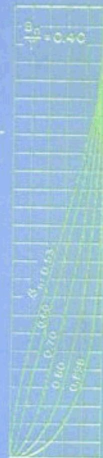
工學叢書

船用流體力學

汪群從・丁錫鏞 著



工學叢書

船用流體力學

汪群從・丁錫鏞 著

船用流體力學

69. 3. 0287

中華民國六十九年四月初版

定價：新臺幣六百元

著　者　汪群從 • 丁錫鏞
發行人　王　必　成

出版者　聯經出版事業公司
臺北市忠孝東路四段555號
電　話：7074151 • 3940137
郵政劃撥帳戶第100559號

行政院新聞局出版事業登記證局版臺業字第0130號

• 33008 •

目錄

第一部分　基礎流力

第一章　黏性流體力學

第二章　理想流體力學

第二部分　船舶阻力

第三章　船舶黏性阻力

第四章　船舶波浪阻力

第三部分　船舶推進

第五章　翼面理論

六章　推進理論

第四部分　船舶運動

第七章　船舶操縱

第八章　耐海性能

第一部分
基 礎 流 力
(Fundamental Fluid Mechanics)

第一章

黏性流體力學

§ 1-1 緒 論

在物理學的領域中，物質被區分爲固體、液體、及氣體三種狀態，這三態的熱力特性亦有截然不同的分野；不過，在力學範疇內，卻可簡化爲固體與流體二大類別。固體與流體的最大差異在於固體可以抵抗剪力（Shear Force），而流體卻不行。但是，由於溫度的影響，一般對於固體與液體不易予以明確的判別；譬如說，在室溫狀況下，將一塊磚放在一堆瀝青上，這相當於對瀝青施以剪力，初時，發現瀝青剛強如石頭，而能承受磚塊的剪力作用，但時日一久，瀝青會與磚塊稍黏結而產生變形，那麼，在室溫狀況下，瀝青究竟屬於固體還是液體呢？這實在是人類直覺意識上的一種挑戰。不過，在力學領域中，一般是將上述的瀝青視爲一種潛變流體（Creeping Fluid）。諸如此類的特例實不勝枚舉，爲免混淆起見，本書將不討論這些特殊的流體現象。

流體具有四類性質：1.運動性質（Kinematic Properties），包括線性速度，角速度，渦動量（Vorticity），加速度，及應變率（Strain Rate）等；2.傳導性質（Transport Properties），包括黏性係數（Viscosity），熱傳導係數（Thermal Conductivity），及質量擴散係數（Mass Diffusivity）等；3.熱力性質（Thermodynamic Properties），包括壓力，密度，溫度，焓

(Enthalpy)，熵(Entropy)，比熱(Specific Heat)，Prandtl 數，容積彈性模數(Bulk Modulus)，及熱膨脹係數等；

4.其他性質，如表面張力(Surface Tension)，蒸汽壓等。茲簡要說明與本書有關的諸項性質如下：

《 **運動性質** 》

在流體力學中，流體的速度是一項非常重要的性質。爲求明瞭流體的運動狀況，一般有二種研究的途徑：一爲 Lagrangian 方法，一爲 Eulerian 方法。

Lagrangian 方法是針對固定的流體粒子，來觀察、記錄該粒子的運動位置，進而計算流體粒子的速度及加速度等性質。這個方法的優點在於可追踪每一流體粒子的軌跡及運動性質，而且由於自始至終是追隨某一固定的粒子，故質量守恒的關係必然成立。但是，在流體力學領域中，我們感興趣的是流體運動的狀態與現象，而非某一流體粒子的自我表現；因此，一般均不採用 Lagrangian 方法。不過，在固體力學中，它卻是非常重要的。即使是在流體力學中， Lagrangian 方法亦提供了許多重要的觀念，而有不可忽略的價值。

基於上述的理由，我們通常選擇一個適當的座標系統，捨棄追踪某一固定流體粒子的奢念，而只探討在某一位置的粒子的速度隨時間而變化的狀況；這種途徑，謂之爲 Eulerian 方法。它注重在某一特定位置處的流體粒子的表現，而不計較這個流體粒子的"出身"爲何。在 Eulerian 方法中的速度向量 $\vec{V}$ 定義爲：

$$\begin{aligned}\vec{V}(\vec{r},t)&=\vec{V}(x,y,z,t)\\&=\vec{i}\,u(x,y,z,t)+\vec{j}\,v(x,y,z,t)+\vec{k}\,w(x,y,z,t)\end{aligned} \tag{1-1}$$

而流體力學的主要目的之一便是求解速度分量 (u, v, w)。

Eulerian方法雖較便利，但是力學的三大定律 — 質量守恒，動量守恒，能量守恒 — 卻是針對某一固定粒子而言，亦即屬於 Lagrangian 方法的觀念範疇。因此，欲解決流體力學的問題，必須連合運用 Eulerian 方法及 Lagrangian 的觀念。假設 $Q(x, y, z, t)$ 爲流體的某一性質，則其總微分量（Total Differential Change）爲：

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial x} dx + \frac{\partial Q}{\partial y} dy + \frac{\partial Q}{\partial z} dz + \frac{\partial Q}{\partial t} dt \qquad (1\text{-}2)$$

由於上式係對某一固定粒子而言，故其位置變移量 dx，dy，及 dz 可表爲：

$$dx = u\,dt\,,\quad dy = v\,dt\,,\; dz = w\,dt \qquad (1\text{-}3)$$

代入 (1-2) 式可得

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + u\frac{\partial Q}{\partial x} + v\frac{\partial Q}{\partial y} + w\frac{\partial Q}{\partial z} \qquad (1\text{-}4)$$

式中，$\frac{dQ}{dt}$ 一般表爲 $\frac{DQ}{Dt}$，稱之爲隨物微分（Substantial Derivative）；$\frac{\partial Q}{\partial t}$ 稱之爲局部微分（Local Derivative）；$\left(u\frac{\partial Q}{\partial x} + v\frac{\partial Q}{\partial y} + w\frac{\partial Q}{\partial z}\right)$ 則稱之爲傳遞微分（Convective Derivative）。(1-4) 式可寫成下列形式：

$$\frac{DQ}{Dt} = \frac{\partial Q}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\,Q \qquad (1\text{-}5)$$

式中，　∇ = 梯度運算因子（Gradient Operator）

$$= \vec{i}\,\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\,\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\,\frac{\partial}{\partial z}$$

如果 Q 代表速度向量 $\vec{V}$，則該粒子的加速度向量爲：

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \vec{i}\,\frac{Du}{Dt} + \vec{j}\,\frac{Dv}{Dt} + \vec{k}\,\frac{Dw}{Dt} \qquad (1\text{-}6)$$

根據向量等式關係可知

$$(\vec{V}\cdot\nabla)\vec{V}\equiv\nabla\left(\frac{V^2}{2}\right)-\vec{V}\times(\nabla\times\vec{V}) \tag{1-7}$$

上式顯示出傳遞微分項爲非線性項，這也便是求解黏性流的癥結所在。

當流體元素在運動時，通常會發生四種變形：1. 平移(Translation)；2.旋轉(Rotation)；3.膨脹(Dilation)；4. 剪應變(Shear Strain)；參圖1-1。圖中表示在時間 t 與 $t+dt$ 的區間內，B點平移至B'點，對角線BD旋轉至$B'D'$，元素$ABCD$經膨脹及剪應變而成菱形的$A'B'C'D'$。

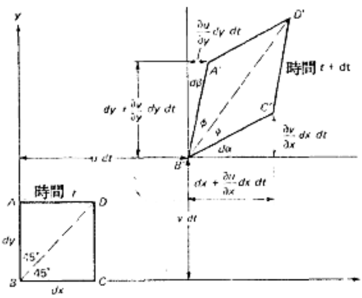


圖1-1　流體元素之變形

圖1-1中，顯而易見地，平移變形的速度爲 u, v, w，且對角線BD的 z 軸方向的旋轉變形量爲：

$$d\Omega_z=\phi+d\alpha-45^\circ$$

因爲

$$2\phi+d\alpha+d\beta=90^\circ$$

所以可得

$$d\Omega_z = \frac{1}{2}(d\alpha - d\beta) \tag{1-8}$$

而且，由圖1-1可得

$$d\alpha = \lim_{dt\to 0}\left(\tan^{-1}\frac{\frac{\partial v}{\partial x}dxdt}{dx+\frac{\partial u}{\partial x}dxdt}\right) = \frac{\partial v}{\partial x}dt \tag{1-9}$$

$$d\beta = \lim_{dt\to 0}\left(\tan^{-1}\frac{\frac{\partial u}{\partial y}dydt}{dy+\frac{\partial v}{\partial y}dydt}\right) = \frac{\partial u}{\partial y}dt \tag{1-10}$$

將(1-9),(1-10)二式代入(1-8)式可得曉 z 軸的角速度爲：

$$\frac{d\Omega_z}{dt} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) \tag{1-11}$$

推而可求得角速度向量爲：

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{\Omega}}{dt} &= \vec{i}\frac{d\Omega_x}{dt} + \vec{j}\frac{d\Omega_y}{dt} + \vec{k}\frac{d\Omega_z}{dt}\\ &= \vec{i}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}\right)\right] + \vec{j}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right]\\ &\quad + \vec{k}\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]\end{aligned} \tag{1-12}$$

渦動量（Vorticity）$\vec{w}$ 定義爲：

$$\vec{w} = 2\frac{d\vec{\Omega}}{dt} = \nabla\times\vec{V} \tag{1-13}$$

如果 $\vec{w}=0$，則稱爲非旋性流動（Irrotational Flow）。由(1-13)與(1-7)式可知渦動量與加速度的傳遞微分項有極爲密切的關係。

如果以圖1-1中的 AB 及 BC 爲最初基準線，則可得剪應變率（Shear Strain Rate）分別爲：

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx} = \frac{1}{2}\left(\frac{d\alpha}{dt} + \frac{d\beta}{dt}\right) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right) \tag{1-14}$$

$$\epsilon_{yz}=\epsilon_{zy}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right) \tag{1-15}$$

$$\epsilon_{zx}=\epsilon_{xz}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right) \tag{1-16}$$

同時可得膨脹應變率分別為：

$$\epsilon_{xx}=\frac{\partial u}{\partial x},\quad \epsilon_{yy}=\frac{\partial v}{\partial y},\quad \epsilon_{zz}=\frac{\partial w}{\partial z} \tag{1-17}$$

茲定義應變率張量（Tensor）如下：

$$\epsilon_{ij}=\begin{pmatrix}\epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz}\\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz}\\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz}\end{pmatrix} \tag{1-18}$$

顯然地，應變率張量具有對稱的特性，即 $\epsilon_{ij}=\epsilon_{ji}$。

《傳導性質》

傳導性質包含黏性、熱傳導、及擴散係數，而三係數係分別對應於動量、熱、及質量的傳導。本書中將只討論黏性係數的特性。假設流體流動於二平板之間，參圖1-2，由於 $u=u(y)$，$v=0$，所以剪應變率 ϵ_{xy} 為：

$$\epsilon_{xy}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)=\frac{1}{2}\frac{du}{dy} \tag{1-19}$$

經反覆的試驗顯示，對於水、氣體、或油類的普通流體，其剪應力（Shear Stress）τ_{xy} 與剪應變率 ϵ_{xy} 的關係為：

$$\tau_{xy}=\mu\frac{V}{h}=2\mu\epsilon_{xy}=\mu\frac{du}{dy} \tag{1-20}$$

式中，μ 定義為黏性係數。滿足上式關係的稱為牛頓流體（Newtonian Fluid），反之則為非牛頓流體（Non-Newtonian Fluid）。

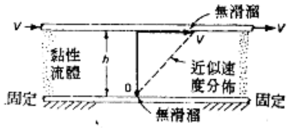


圖1-2　二平板間之流動

黏性係數 μ 的單位爲（ lb-sec/ft^2 ）或（ slugs/ft-sec ）或 Poise(P)，其換算係數爲：

$$1\,P = 1\ \text{g/cm-sec} = 0.0020886\ \text{slug/ft-sec}. \quad (1\text{-}21)$$

一般而言，黏性係數爲溫度及壓力的函數。如果以臨界點（ Critical Point ）的溫度（T_c）及壓力（P_c）作爲無單位化的特性數量，則無單位的黏性係數 μ/μ_c 可以圖 1-3 來表示，其誤差在

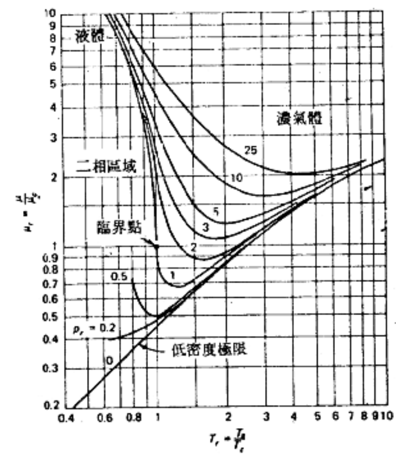


圖1-3　任何流體之無單位黏性係數。
（註：$P_r = p/P_c$）

±20 % 以內。由圖 1-3 可發現：1. 液體的黏性係數隨溫度之增高而急遽地下降；2. 低壓稀釋氣體的黏性係數隨溫度之增高而增大；3. 黏性係數隨壓力之增高而增大；4. 在臨界點附近不易求得準確的黏性係數。

Bingham 氏於 1922 年曾導出淡水在常壓狀態下的黏性係數之經驗公式如下：

$$\frac{1}{\mu} \doteqdot 0.021482 \left[z + \left(z^2 + 8078.4 \right)^{\frac{1}{2}} \right] - 1.20 \tag{1-22}$$

式中，　$z = T_0 - 8.435$

T_0＝溫度（°C）

μ＝黏性係數， cP（Centi-Poise）

上式的精確度爲± 1 %，其計算結果列於表 1-1 。

（表1-1 ） 常壓下，淡水的黏性係數。

T_0, °C	μ, Cp	T_0, °C	μ, Cp	T_0, °C	μ, Cp
0	1.7919	35	0.7225	70	0.4060
5	1.5188	40	0.6560	75	0.3799
10	1.3077	45	0.5988	80	0.3565
15	1.1403	50	0.5494	85	0.3354
20	1.0049	55	0.5064	90	0.3165
25	0.8935	60	0.4687	95	0.2994
30	0.8007	65	0.4355	100	0.2838

另外，有關黏性係數的圖表，可分別參考圖 1-4 ，1-5 ，1-6，及表 1-2 ～ 1-5 。