

工程流体力学

上册

吴仲华 著



第一部分 緒論和流体靜力学

第一章 緒 論

一、流体与流体力学

流体力学是力学中一个很大的分支，专门研究流体的平衡、运动以及流体和固体間的相互作用。和固体力学一样，流体力学不研究流体内部的微观問題，而只研究它的宏观現象。这种“宏观力学”是建立在分子运动学說的統計观点以及由生产实践和科学实验所确定的基本力学定律和热力学定律的基础之上的。因此，在流体力学中，不論是液体或气体都被看作是一种連續的介質，其中沒有真空的地方，沒有分子間間隙和分子运动。用連續介質模型来代替实际流体的分子結構，对極大多数流体力学問題是合适的，因为在極大多数情况下，考虑的流体和固体的尺寸比起分子的尺寸和分子間的平均自由路程要大得多。例如在常温常压下，每边只有千分之一毫米长的立方体的空气中还有 27×10^6 个分子，——有足够多的分子来給出宏观的統計平均值。

作为連續介質的質点的“流体質点”的意义同固体力学中質点的意义相同，而和数学上的点的意义不同。虽然，就位置而言，流体力学上的質点和数学上的点的意义是一样的，但是流体力学上的質点却指包含該点在內并作为重心的一个只在物理意义上是无限小的体积(和質量)。所謂物理意义上无限小是指小到使該体积內流体的物理性質是均匀的并且都同該点上的数值一样，但却大得包含足够多的分子在內以能得出一定的統計平均值。同样，在某点上的流体速度也并不是指在該点上流体的分子的运动速度，而是指在該处一微小体积流体的重心的速度。此外，流体質点还可以組合成質綫、流片、流体体积等。

流体的宏观現象和固体的宏观現象間有一个基本的差別，这就是流体中質点間的粘結力非常小，因而它非常容易在外力的作用下改变它的形状，也就是說非常容易改变流体各質点間的相对位置。这个流体的特性称为易流性。在静止时，流体和固体一样可以承受正压力，但在同样的压力强度下，流体的变形（特别是气体的变形）要比固体的大得多。在静止时固体可以承受切力，而流体不能承受切力，它只有在流动中方能承受切力。固体受到切力时所发生的变形，在弹性限度內，与切应力成正比；流体受到不論多小的切力，都会繼續不停地产生变形，它的变形率与切应力成正比。我們在下面用两个最簡單的例子來說明这一点。

图 1.1 表示一个静止固体，在面积 A 上承受一外切力 F 后，产生了上下两面間的相对位移 d 。从实验得出，在弹性限度內，

$$\frac{F}{A} = G \frac{d}{h} \quad (1.1)$$

在上式中， G 是固体的一个属性，叫做抗切弹性系数。 G 的数值很大（如普通钢的 G 是 8×10^5 公斤/厘米²），因而变形 d 比 h 为很小。

图 1.2 表示一个在相距很近的两块长板中运动的流体承受切力的情况。在流体下面的长板固定不动，而在上面的板则受到一外力 F 并以速度 U 向右移动。因为流体和两板接触的地方都没有相对滑动，流体运动的速度从下板处的另值增加到上板处的 U 值。

原来在垂直方向的一根质线 oa 经过一个单位时间后移到了 oa' 位置，经过二个单位时间后移到了 oa'' 位置……。这说明受到切力后流体的变形是随着时间一直增加下去的。但是从实验得出：

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{U}{h} \quad (1.2)$$

也就是说流体的角度变形率 U/h （也就是 oa 线的角速度或 aox 角的减小率）却与所受的单位切力成正比。（ μ 是流体的一个属性，称为粘性系数，在一定温度下是个常数）。

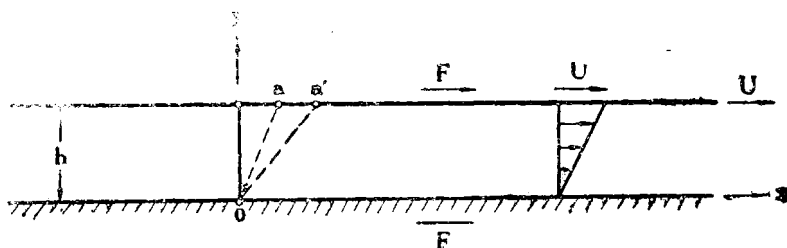


图 1.2 运动中的流体承受切力情况

在各种流体中润滑油是粘性比较大的流体，水和空气是粘性比较小的流体（见表 8.1）。油和水在管子中或固体在水中和空气中运动时，在流体和固体的接触处都存在着摩擦力。但是一般只在流体和固体接触处的附近的一个区域（称为边界层）内流体的速度在与固体表面垂直的方向具有较大的变化，因而流体的切应力或内摩擦力也较大。在研究这部分流体的运动时，粘性的影响必须考虑在内。在边界层以外，在与固体表面垂直方向流体速度的变化一般很小，粘性的影响可以忽略不计。因之在研究这大部分流体的运动时可以把流体看作是一种没有粘性的所谓理想流体。研究这种流体的运动规律和流体与固体间作用的科学叫作理想流体动力学或无粘性流体动力学。

在流体中，液体可以在坚固的容器中承受很大的压力而只产生很小的体积改变。例

如水在 0°C 时，每增加 1 公斤/厘米² 的压强，它的体积只减少 0.005%。因此，在一般問題中，我們可以把液体看作是体积不改变或不可压缩的流体，也就是說在处理水的流动問題时可以把每个質点的体积或密度看作是常数。用数学推导方法来研究这种液体的运动以及液体和固体間的相互作用的科学叫做水动力学。偏重于使用实验得出的数据来解决許多包含这种流体的实际工程問題的工程科学叫做水力学。

空气和其他气体，不象液体那样，沒有体积一定的屬性，在一个容器中它总是扩散开来，充滿整个容器。此外，气体在流动中，它的每个質点的体积或密度随着它的压强与温度的变化而变化。但是这个变化当气体的流动速度远較声音在气体中传播的速度为小时也是可以略去不計的。在这种情况下，水动力学的理論和計算方法也可以应用到气体的流动中来。用分析和实验方法研究以較低速度流动的气体（特别是空气）运动以及气体和固体（特别是飞机）間的相互作用力的科学叫做空气动力学。专门研究高速气体流动的科学叫做高速空气动力学或气体动力学。

根据所研究問題的范围、研究的目的、和研究的方法，每門流体动力学又可分为理論的和工程的（或实用的）两种。因为本書的内容比較着重对于研究和設計噴气推进机和燃气輪机等热力叶片机械中最需要的流体动力学知識，因之称为工程流体动力学。

二、流体力学发展簡史

水是人类在生活和生产实践中最早接触到并且最早使用的一种物質。中国在三千年前，就能够筑堤壩防水災、修渠道灌溉田地和制造船舶在水上航行等。在紀元前二百五十年，Archimedes（紀元前 287—212 年），总結了实践，提出了液体平衡和物体浮力理論，成为水靜力学中的基本定律。这些理論也推动了一些水力器械（如活塞式水泵及虹吸管等）的制造。

在此以后的 17 个世紀中，由于在封建主义社会中生产力发展的停滞，利用水利的生产实践和理論发展得很慢。在这个期間，中国在水力学方面的进展有二千年前制造的掌握了流量和水面高度間关系的規律的銅壺滴漏，带动天文仪器的水輪和稍后創造的用水輪舂米、碾米，磨面、紡紗或者通过曲柄連杆机构来拉风箱化鉄或篩面等。在七百年前发明的火箭利用了噴射推进的原理，也是中国的一个特出貢獻。

到紀元十六世紀后，在欧洲，封建制度的崩潰与資本主义的兴起引起了生产力的发展，大量水渠、水道和其他水工建筑的建設大大推动了水力学的发展。从对于水在各种情况下的观察和測量得出了流体中压力传递的規律，孔口洩水的規律，流体中內摩擦力定律等。在十七世紀末 I. Newton (1642—1727 年) 的关于物体运动的三大定律奠定了整个力学的基础。此后，在十八世紀中，Л. Эйлер (1707—1783) 建立了一般性的連續方程、理想流体的运动方程，动量变化定理，以及关于流体和轉动叶片間作用力矩的基本方程等。Д. Бернулли (1700—1783 年) 建立了流体的压强与速度和高度之間的普遍关系等。Эйлер 和 Бернулли 建立的流体动力学理論開創了水动力学这門科

学。在这个时期中，由于对于在水中航行的船舶和在空气中飞行的炮弹要求提高速度的需要，一系列理論分析和实验研究得出了阻力与物体运动速度的平方和物体截面积成正比以及在高速度运动中流体粘性对阻力的影响很小等关系。

在十九世紀，流体动力学发展的特点是进一步用数学分析法来研究无粘性流体运动的規律，解决了一些平面和空間无旋流动問題，旋渦流动、重流体中波动等問題，建立了粘性流体的运动方程，并完成了所謂經典水动力学这门科学的建立。但是这些理論工作还远远不能解决当时迅速发展着的許多工程实践中的复杂問題，因而造成了水力工程师单纯依靠模型实验来解决实际問題的情况。1833年 Reynolds (1842—1912年) 发现了粘性流体在管中的两种完全不同的流动——层流和湍流，創始了湍流运动的理論，对水力学、阻力理論和传热学等都有很大的应用；此外他又发展了用于流体运动的相似原理，使能把許多实验数据科学地归納出有用的規律来。在这个世紀中，由于蒸汽輪机的发展，要求蒸汽在噴管中流动的速度大于声音的速度，以及弹道学等其他方面的需要，气体的一維高速流动理論得到了較大的发展，并且建立了激波理論。

从十九世紀末开始到现在，由于航空工业、噴气技术、燃气輪机制造的高速度发展，空气动力学与气体动力学理論和实验技术随着有極大的发展。各国的科学研究工作者和設計、制造工程师都作出了很多的貢獻。其中值得特別提出的是伟大的俄罗斯学者 Н. Е. Жуковский (1847—1921) 的机翼举力理論、螺旋桨和有限翼展机翼的渦旋理論、С. А. Чаплыгин 的机翼理論与非定常运动理論、有限翼展机翼的誘导阻力理論，叶輪机的叶栅理論、气体动力学理論，L. Prandtl (1875—1951) 的边界层理論，和 T. von Kármán (1911—) 的尾流渦列理論等。这个时期流体动力学发展中的两个特点是实验研究的比重日益增加和理論研究与生产实践的密切結合。特别是在苏联，十月革命后建立的流体动力学学派是建立在科学为生产服务和实践与理論总结的統一和紧密的相互联系的基础之上的。这也是苏联流体动力学工作在世界上占領先地位的原因之一。

三、几种質量单位和重量单位

在目前，除了物理学中的 CGS 系統以外，工程方面使用的計量单位系統有好几种，还没有公認的統一标准。它們中間的差別主要是由于以質量或重量作为基本計量单位之一而引起的。因为目前流体力学有关文献中，这几种系統都在被使用，在下面我們对几种較多使用的系統作一个簡单的介紹。

在长度方面，物理系統用厘米 (cm) 为单位，(公制) 工程系統都用米 (m) 为单位，两者只是大小的不同。在時間方面，所有系統都用秒 (s) 为单位，沒有差別。但是在質量和重量方面，有的用質量的单位为基本单位再从而推导出重量的单位(和 CGS 系統一样)，有的用重量的单位为基本单位，再从而推导出質量的单位。从質量单位推导重量单位，或从重量单位推导質量单位时，都使用牛頓第二定律：

$$F = ma \quad (1.3)$$

根据上式，一个单位的力作用于一个单位质量时产生与力同方向的一个单位的加速度。

1. CGS 系统与重力系统 在 CGS 系统中，质量的单位用克 (g)，加速度单位用厘米/秒² (cm/s²)，力的单位就成为克·厘米/秒²，(g cm/s²)，叫做达因 (dyne)。在最早的工程系统 (重力系统) 中，力单位用公斤 (kg)、加速度的单位用 米/秒² (m/s²)，质量单位就成为公斤·秒²/米。(kg s²/m)。(这个质量单位没有特别名称，相当的英制单位叫作 slug)。

CGS 物理系统的优点是：质量是物体的一个基本属性，不论它在地球上什么位置，它的数值不变；它的缺点是力的单位是个复合单位，实用上不方便。工程重力系统的优点是：在工程中，力和牵涉到力的物理量（如功，功率等）用得非常广，所以用公斤作为力的单位，公斤·米作为功的单位…，在实用中比较方便。这个系统的缺点是质量的单位是个复合单位，不好叫，对它的大小也不易具有一个明确的概念。此外，物体的重量随着位于地球上的高度的改变而改变，并不是物体的一个属性。

在上述这二种系统中，物体的质量和重量间的关系也用 (1.3) 式来决定。例如物体位于地心加速度为 g 值的高度时，物体的重量即为

$$w = mg \quad (1.4)$$

因而在 CGS 系统中，一克质量物体的重量是 981 达因（一千克质量物体的重量是 981 千达因或 9.81 千克·米/秒²）；在工程重力系统中， w 公斤重量物体的质量是 w/g 公斤·秒²/米。

2. MKKS 系统与 MKS 系统 近年来工程界有不少人使用另外两种计量单位系统。在一种系统中，质量和重量的单位都采用千克（在右下角分别注明“质”或“力”），并且在最常遇到的海平面情况下，一个 1 千克质量物体的重量是 1 千克力。这个系统的好处是质量和重量以及包括它们的许多物理量都用了简单的单位，和习惯符合，使用时很方便；在通常遇到的海平面情况下也不必特别说明是多少千克质量或多少千克重量，说多少千克就行了。

用这种系统时，我们须使用下列形式的牛顿第二定律：

$$F = kma \quad (1.5)$$

因为，原来牛顿第二定律只是说 F 与 ma 成正比，不过在上述两种系统中，我们只选择三个基本单位因而可以使 k 等于 1。在现在讲的这种新系统中， k 的数值须这样来考虑：在海平面上，1 千克质量物体受到 1 千克的地心吸力时所具有的重力加速度是 9.81 (9.80665) 米秒⁻²。将这些数值代入 (1.5) 式后，我们得到

$$1 \text{ 千克力} = k \cdot 1 \text{ 千克质} \times 9.81 \text{ 米/秒}^2$$

并由此得出

$$k = \frac{1}{9.81} \frac{\text{千克力秒}^2}{\text{千克质米}}$$

如果，我們用 g_0 来代表 k 的倒数，即

$$g_0 = 9.81 \frac{\text{千克}\cdot\text{米}}{\text{千克力}\cdot\text{秒}^2} \quad (1.6)$$

那末牛頓第二定律就可写成

$$\mathbf{F} = \frac{1}{g_0} m \mathbf{a} \quad (1.7)$$

$$\text{单位: } \text{千克力} = \frac{\text{千克力}\cdot\text{秒}^2}{\text{千克}\cdot\text{米}} \text{ 千克}\cdot\text{米}/\text{秒}^2$$

根据上式，如在海平面上某高度处，地心加速度是 g 米/秒²。这时，1 千克 $\cdot$ 物体的重量，也就是物体受到的地心吸力根据 (1.7) 式是 $\frac{g}{9.81}$ 千克力。所以，在这个系中，重量和質量的关系是：

$$w = \frac{1}{g_0} mg \quad (1.8)$$

在这种系統中，有人用 kg 来代表千克力， kg^* 来代表千克 $\cdot$ ；也有人用 kp 来代表千克力， kg 来代表千克 $\cdot$ 。根据我国用公斤来代表千克力 $\cdot$ 的習慣，我們可以用公斤 (kp) 来代表千克力，用千克 (kg) 来代表千克 $\cdot$ 。我們可以称这种工程系統为 MKKS 制。

我們注意到，在海平面上同是 1 千克 $\cdot$ 質量和 1 千克力重量的物体在前面講到的 CGS 系統中它的重量是 9.81×10^5 达因，在重力系統中它的質量是 $\frac{1}{9.81}$ 千克力 $\cdot$ 秒²，所以千克力和达因之間的关系以及千克力 $\cdot$ 秒²和千克 $\cdot$ 之間的关系是：

$$1 \text{ 千克力} = 9.81 \times 10^5 \text{ 达因} \quad (1.9)$$

$$1 \text{ 千克力}\cdot\text{秒}^2 = 9.81 \text{ 千克}\cdot \quad (1.10)$$

这两个方程是这几种单位系統間的一个基本关系，从不同文献中所給的数据換算时必須用到它們。

在最近几年中举行的一些国际會議，例如第五届重量与計量會議 (1948 年)，第四届 (1954 年) 与第五届 (1956 年) 蒸汽表會議，以及国际标准局在 1955 年，都建議采用一种实用的絕對单位系統。在这个单位系統中，質量的单位用千克 (kg)，加速度的单位用米/秒²，根据 (1.3) 式推导出来的力的单位是 千克米/秒²，叫做牛頓 (用 N 来代表)。因此，在質量和力的这方面，这个系統是与物理系統相似的，只是使用了工程上比較大的加速度单位而已 (在功和热能等单位不同处見第四章第五节)。从質量和加速度所用的单位加以比較后，我們得出

$$1N = 10^5 \text{ 达因} \quad (1.11)$$

这种系統叫作 MKS 系統。（如果再用安培作为电流的单位，叫作 MKSA 系統）。

現在把上面所講的四種單位系統中的四個基本物理量的單位比較于表 1.1 中：

表 1.1 四種質量 and 重量單位系統

單位系統	長 度	時 間	質 量	重 量	重量和質量關係
CGS 系統	厘米, cm	秒, s	克 g	達因 $\left(g \frac{cm}{s^2} \right)$, dyn	$w = mg$
MKS 系統	米, m	秒, s	千克, kg	牛頓, N	$w = mg$
MKKS 系統	米, m	秒, s	千克, kg	公斤 (千克力), kp	$w = \frac{mg}{g_0}$
重力系統	米, m	秒, s	$\frac{公斤秒^2}{米}$ $\frac{kps^2}{m}$	公斤 (千克力), kp	$w = mg$

$$1 \frac{公斤秒^2}{米} = 9.81 \text{ 千克}$$

$$1 \text{ 公斤} = 9.81 \text{ 牛頓} = 9.81 \times 10^5 \text{ 達因}$$

$$\left(1 \frac{kps^2}{m} = 9.81 \text{ kg} \right)$$

$$(1kp = 9.81N = 9.81 \times 10^5 \text{ dyn})$$

在上述三種工程系統中，我們以採用 MKKS 系統或 MKS 系統較好，因為重力系統採用了重量單位為基本單位，從而得出的質量單位是很不合适的。MKKS 的優點是：質量和重量都使用了實用中方便的千克和公斤，它的缺點是牛頓公式和用它推導出來的一系列方程中都多了一個 g_0 （MKS 系統避免了這個缺點，但是它使用的力的單位 N 比實用中熟悉的單位公斤小了約十倍）但是這個缺點是比較次要的，因此本書採用了這個單位系統。

四、流體的連續介質性質

1. 連續介質的密度和比容

密度是流體的一個重要屬性。因為我們宏觀地把流體看作是沒有空隙地分布在一定的體積內的連續介質，考慮該體積中某一點 a 處的密度時，我們考慮包含 a 點在內的一個微小體積 Δv 中的流體的質量 Δm ， $\Delta m / \Delta v$ 就是該體積內流體的平均密度。要得到點 a 處的真正密度，我們必須取 Δv 這樣一個數值，就是它首先應該小得足夠能得出點 a 處的真正密度值，但是它又應該大得足夠不致使 Δv 內包含的分子數目太少以致當分子跑進跑出時，密度值會隨之發生變化。如果這個合適的體積用 δv 來代表， δv 中流體的質量是 δm ，那麼點 a 處的密度值就是：

$$\rho = \frac{\delta m}{\delta v} \quad (1.12)$$

密度的單位由長度和質量的單位來決定。在上節所述四種系統中，它分別是：

g/cm^3 , kg/m^3 , kg/m^3 , $\text{kg s}^2/\text{m}^4$ 。

上面第四个密度的单位是不好使用的，因此工程师就改用重度（重量密度）来替代密度。重度就是每单位体积的重量（用 γ 来代表）：

$$\gamma \equiv \frac{\delta W}{\delta V} \text{ 公斤/米}^3 (\text{kp/m}^3) \quad (1.13)$$

在 MKS 制中，
$$\gamma = \rho g \text{ 牛頓/米}^3 (\text{N/m}^3) \quad (1.14)$$

在 MKKS 制中
$$\gamma = \frac{\rho g}{g_0} \text{ 公斤/米}^3 (\text{kp/m}^3) \quad (1.15)$$

在热力学和气体动力学中，有时使用比容 v 较使用密度 ρ 或重度 γ 更为方便。在重力系统中，比容的定义是

$$v \equiv \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\rho g} \frac{\text{米}^3}{\text{公斤}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kp}} \right) \quad (1.16)$$

在 MKS 系统中，比容的定义是

$$v = \frac{1}{\rho} \frac{\text{米}^3}{\text{千克}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \quad (1.17)$$

在 MKKS 系统中，比容的定义也可以是重量比容（1.16 式），也可以是质量比容（1.17 式）。

液体的密度比气体的密度要大得多。例如在 4°C 和一个大气压下，水的密度是 1 克/厘米^3 或 $1,000 \text{ 千克/米}^3$ ，而空气的密度只有 1.26 千克/米^3 。此外，液体的密度随温度的变化很小而气体的密度随温度的变化很大。例如在一个大气压下，水的温度自 0°C 增加到 100°C 时，它的密度只减少了 4%；石油的温度自 15°C 增加到 100°C 时，它的密度只减少了 7%；而空气的温度自 0°C 增到 100°C 时，它的密度却减少了 27%。表 1.2 和表 1.3 列出了一些液体和气体的密度的测定值。

表 1.2 若干液体的密度（千克/米³）或重度（公斤/米³）

液 体	温 度 $^\circ\text{C}$	密度和重度	液 体	温 度 $^\circ\text{C}$	密度和重度
水	0	1,000	海 水	15	1,025
	10	1,000	酒 精	15	809
	20	998	汽 油	15	730
	40	992	煤 油	15	840
	60	983	潤滑油	15	910
	80	972	甘 油	15	1,260
	100	958	水 銀	15	13,590

表 1.3 在 760 毫米水銀柱压强下若干气体的密度
(千克/米³) 或重度 (公斤/米³)

气 体	温 度 °C	密度和重度	气 体	温 度 °C	密度和重度
空 气	-20	1.39	氢 气	15	0.085
	-10	1.34	氮 气	15	0.169
	0	1.29	甲 烷	15	0.679
	10	1.24	过热水蒸汽	15	0.761
	20	1.20	氮 气	15	1.18
	40	1.12	一 氧 化 炭	15	1.18
	60	1.06	空 气	15	1.23
	80	1.00	氧 气	15	1.35
	100	0.95	二 氧 化 炭	15	1.87

液体的密度随压强的变化很小 (例如在常温下, 压强增加一个大气压时, 水的体积改变不到 0.005%, 甘油不到 0.0025%, 煤油不到 0.0077%, 酒精不到 0.011%), 而气体密度随压强的变化则很大 (例如理想气体的密度是和压强成正比的)。

2. 作用于連續介質上的力

流体所受的外力可以分成两类。一类是流体体积内各質点上所受的力, 如地心吸力、万有引力、靜电引力等, 称为体积力或質量力。一类是流体和外界接触的表面上所受到的力, 如大气压力、容器壁压力、活塞压力等, 称为表面力。

流体体积内某点 a 处的体积力的强度是指和 (1.2) 式中那样性質的一个微小 δv 上所受到外力的 δF 的比值:

$$f_v \equiv \frac{\delta F}{\delta v} \quad (1.18)$$

而質量力的强度是指:

$$f_m \equiv \frac{\delta F}{\delta m} = \frac{\delta F}{\rho \delta v} = \frac{1}{\rho} f_v \quad (1.19)$$

在流体和外面接触的表面上, 在一般情况下外界作用于流体某点处一个微小表面积 δA 上的力可分为法向压力 δP 与切向力 $\delta F_{\text{切}}$ 两个力, δA 的尺寸和上面所述 δv 的尺寸相似。于是流体 a 点处的压力强度或压强即为

$$p \equiv \frac{\delta P}{\delta A} \quad (1.20)$$

切力强度或切应力即为

$$\frac{\delta F_{\text{切}}}{\delta A} \quad (1.21)$$

在上述四种計量系統中，体积力的单位和重度相同，分别为达因/厘米³，牛頓/米³，公斤/米³，公斤/米³，質量力的单位分别为厘米/秒²，牛頓/千克，公斤/千克，米/秒²；压力强度与切力强度的单位分别为达因/厘米²，牛頓/米²，公斤/米²，公斤/米²。对于大一点的压强或切力强度，面积的单位可改用厘米²或毫米²。

参 考 文 献

- [1] 刘仙洲：中国在原动力方面的发明，机械工程学报，1953 年 10 月号。
- [2] А. А. Угинчус: Гидравлика и гидравлические машины, 1953. (水力学和水力机械，电力工业出版社，1956) 緒論。
- [3] А. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа, 1958. (液体与气体力学，高等教育出版社，1957)，緒論。
- [4] Н. С. Аржаников и В. Н. Мальцев. Аэродинамика, 1952. 空气动力学，高等教育出版社，1954)。第一章，苏联——空气动力学的诞生地。
- [5] М. Е. Дейч: Техническая газодинамика, 1953. (工程气体动力学，燃料工业出版社，1955)，緒論。
- [6] R. Glacomelli and E. Pistolesi: Historical sketch: Division D of Vol: 1, Aerodynamic Theory, 1934。
- [7] T. von Karman: Aerodynamics, Selected Topics in the Light of the Historical Development, 1954。
- [8] American Society of Mechanical Engineers: Minutes of the Fourth International Conference on Properties of Steam in Philadelphia, 1954。
- [9] International Standard Organization: Proposal of the Secretariat for tables of quantities and units, Document Isoltc 12 (Secretariat—53) 134E, Copenhagen, 1955。
- [10] Л. А. Сена: Единицы измерения физических величин (物理学单位，科学出版社，1957)。

第二章 流体静力学

一、静压强和其特征

液体和气体在静止状态时，它们的质点间不存在粘性力或摩擦力。因之，考虑具有粘性的非理想流体的静力学问题时，也不必考虑它们的粘性。

静止的液体或气体一般都受到上章第4节中所讲的两重外力。即加在它们表面上的外力，例如加在河水表面上的大气压力，或容器四壁作用于容器内流体表面上的压力，以及地球对于流体中各质点的吸力（与密度的分布成比例地分布在流体中）。

图 2.1 表示静止的流体的一部分，在它的表面四周受到流体的其他部分作用予它的压力如各箭头所示。这一部分流体受到外压力后，必然相应地在它的内部产生内应力。如果我们想象在任一平面处把这部分流体再分成上下两个部分，而考虑图 2.2 中所表示的下面一部分时，原来上面那部分加于下面这部分的内力这时就变成了加于这部分的外力。这种向内垂直于平面的力叫做压力。严格地讲“内力”指在该平面上的“总压力”。压力在该平面上的分布我们也是宏观地看作连续的。我们已经在上章第3节中给出了平面上某一点处的压力强度的定义（方程 1.20）。在一般问题中，我们经常用到压强 p 而很少用到总压力 P （在工程界习惯于把压强 p 也叫做压力）。

象上面那样，用假想平面把流体分开而把在该平面处的内力变成外力的方法是非常有用的。譬如，使用了几个这种平面后我们就可以得出所谓流体的体积元素来考虑各种问题。

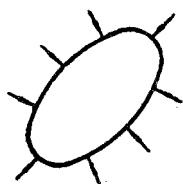


图 2.1



图 2.2

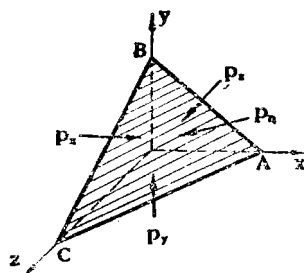


图 2.3

現在我們就利用这种在流体中取体积元素的方法來說明在靜止流体中压强 p 的一个特性。如图 2.3 所示，我們在 O 点取边长为 dx 、 dy 、 dz 的微小四面体 $OABC$ 。这个四面体在四个表面上受到的压力分别用 P_x 、 P_y 、 P_z 和 P_n 来代表。它受到的地心引力是 $\frac{\gamma}{6} dx dy dz$ 。

面积 ABC (用 dA 来代表) 上法綫 n 的方向是可以通过使用各种 dx 、 dy 、 dz 比例来任意选定。这个法綫与 x 、 y 、 z 軸所成的角我們分別用 (n, x) 、 (n, y) 、 (n, z) 来代表。考虑这个体积元素在 x 、 y 、 z 三个方向的平衡后，我們得到

$$\left. \begin{aligned} p_x \frac{1}{2} dy dz - p_n dA \cos(n, x) &= 0 \\ p_y \frac{1}{2} dz dx - p_n dA \cos(n, y) - \frac{\gamma}{6} dx dy dz &= 0 \\ p_z \frac{1}{2} dx dy - p_n dA \cos(n, z) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

这四个表面积間有下列关系：

$$\left. \begin{aligned} dA \cos(n, x) &= \frac{1}{2} dy dz \\ dA \cos(n, y) &= \frac{1}{2} dz dx \\ dA \cos(n, z) &= \frac{1}{2} dx dy \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

用 (2.2) 式代入 (2.1) 式并且考虑了 $\frac{\gamma}{6} dx dy dz$ 为高阶无限小趋近于另后，我們就得到

$$\left. \begin{aligned} p_x - p_n &= 0 \\ p_y - p_n &= 0 \\ p_z - p_n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

$$p_x = p_y = p_z = p_n \quad (2.4)$$

因为 n 方向是任意取的，所以在一个靜止的流体中任何一点在各个方向的压强都是一样大的。

这个結論不但适用于連續流体的內部，也适用于流体和固体（例如与容器）的接触处。因而压强为 p 的流体作用于容器壁一小面积 dA 上的总压力总是 $p dA$ ，不論器壁是怎样傾斜的。

我們应当注意，在上面的推导中，沒有考虑摩擦力或粘性力。因此，对于沒有粘性的理想流体來說，不管它是否靜止或者在流动，上述結論都适用。但是对于有粘性的实际流体來講，它只适用于靜止状态。

二、液体静力学基本方程

现在我们先考虑密度或重度为常数的液体的静力学平衡问题。在这种问题中主要是考虑在静止液体中，由于重力的影响而发生的压强的变化。

例如在图 2.4 所示容器内的液体中，由于重力的影响，液体的压强随着深度 h 的增加而增加。这个变化可以自图中所示的体积元素求出。因为作用于这个体积元素上的重力是 $\gamma h dA$ ，这个体积元素所受外力在垂直方向的平衡方程是：

$$p_0 dA + \gamma h dA = p dA$$

或

$$p = p_0 + \gamma h$$

(2.5)

这就是液体静力学的基本方程。从这个方程可以看出液体的压强是随着深度线性地增加的，流体在深度 h 处的压强等于液体自由面上的压强 p_0 。加上液体的深度和比重的乘积。这个乘积也可以看作一个高度为 h ，截面积为 1 的液柱的重量。所有深度相同的各点上存在的压强相同，构成一个等压面。

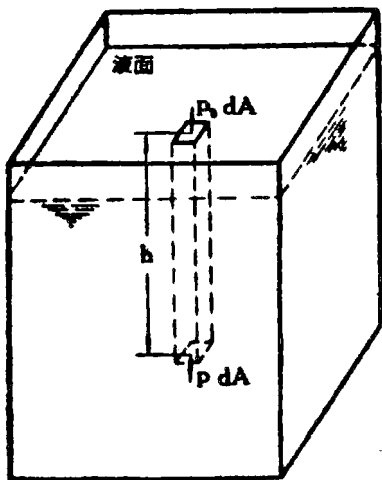


图 2.4

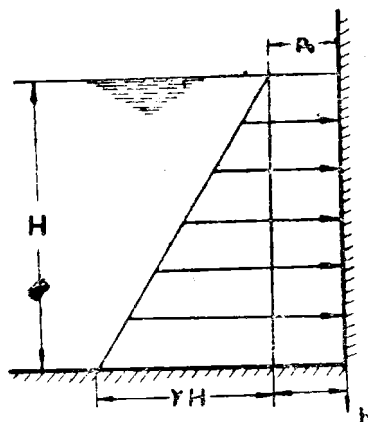


图 2.5

在 (2.5) 式中， p_0 是液体自由表面上的压强。在开口容器中， p_0 就是大气压力。这时， p 称为完全或绝对水静压强， γh 称为余压强或相对压强。

压强图

在解决某些水静力学问题中，需要把液体加在沉没在液体中固体外表面上的压强分布图画出来。这种图是根据方程 (2.5) 来画的，压强分布是根直线，它的梯度就是重度 γ (见图 2.5)。根据这种压强图和固体的表面形状就可以算出加在该表面上的总压力。

我們注意到流体的压强只是随着深度而增加。在某一深度处容器壁上所受到的压强只决定于深度而与器壁的形状无关。但是在計算器壁上所受的总压力时，必須注意到加于器壁上各处压力的方向，方能將它們在同方向的分力加以积分以得出总压力。

三、串通容器与压强测量仪器

串通容器

图 2.6 表示一个装着靜止液体的两端开口的串通容器，在两端开口处，液体承受外界作用力的强度是 p_1 和 p_2 。 p_1 与 p_2 間的关系可以利用上节所述液体靜力学基本方程来求得。如果以 p_a 来代表液体中任意一水平面 $a-a$ 上的压强，从容器的左边部分看来，

$$p_a = p_1 + \gamma h_1$$

从右边部分看来

$$p_a = p_2 + \gamma h_2$$

所以

$$p_1 - p_2 = \gamma(h_2 - h_1) = \gamma h \quad (2.6)$$

这个方程可以用在各种串通容器問題上。

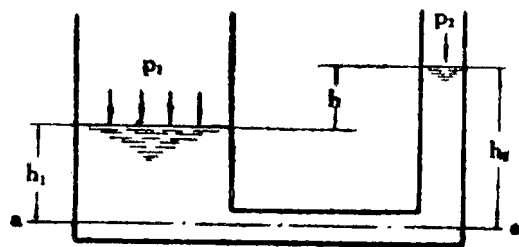


圖 2.6

假使 $p_1 = p_2$ ，那么 $h = 0$ 或 $h_1 = h_2$ 。所以当两端开口处都是受到大气压力时，两边液面的高度是相同的。

压强测量仪器

测量压强的仪器有很多种类，根据测量压强的大小而具有各种不同的结构。它們的精确度也各有不同。一般講来，测量压强的仪器有下列三大类：(1) 测压管，(2) 测压计，(3) 真空計。

(1) 测压管 通常使用直径大于 5mm 的玻璃管作为测压管 (图 2.7)，管子的上端通大气，下端接到要测量压强的地方。如大气压用 p_0 来代表，那么测量处的压强

$$p = p_0 + \gamma h_{\text{計}} \quad (2.7)$$

如果容器内液面测量处的高度 $h_{液}$ 是已知数，那么要测的液面上压强

$$p_1 = p_0 + \gamma(h_{计} - h_{液}) \quad (2.3)$$

测压管的优点是可以测得压强的真正大小。但是如果要测量的压强很高，就需要用很高的玻璃管了。这时可以用 γ 较大的水银来作为测压管中的液体或者用下面讲到的水银测压计。

用测压管来测量比较小的压强时，可以使用较轻的液体如酒精并且把管子倾斜过来。如果它与平面所成的角度是 θ 的话，同样一个压差高度 h 在管上的长度就成为 $h/\sin\theta$ ，因此就可以读得更准确了。

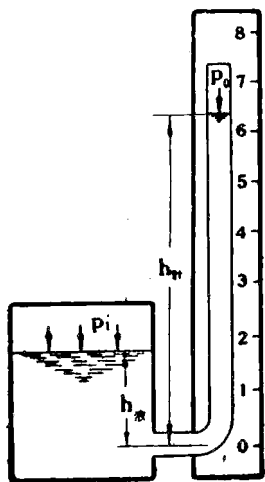


圖 2.7 测压管

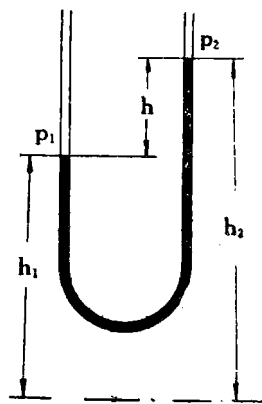


圖 2.8 差压计

(2) 测压计 测压计有两种型式，液体测压计和金属测压计。

液体测压计也可以看作是串通容器的一种，假使串通容器的形状是个 U 形管（图 2.8）就成了常用的液体差压计。两端液体所受到压强的差值是

$$p_1 - p_2 = \gamma h \quad (2.9)$$

例如差压计的左端接到要测量的某个气体的压强而右端通到大气，那末要测量的压强

$$p_1 = p_0 + \gamma h \quad (2.10)$$

p_1 称作被测量气体的绝对压强， $(p_1 - p_0)$ 或 γh 叫作相对压强或表压强。

假使图 2.8 的右端液面上是真空，它就变成了大气压强计而 (2.10) 式成为

$$p_1 = \gamma h \quad (2.11)$$

物理学家采用的海平面上标准大气压强是 1.0332 公斤/厘米² 或 10,332 公斤/米²。如果大气压强计的液体用水的话，水的高度将是 10.3 米，这个高度显然太大、不方便的，因而一般用水银来测量大气压强，这时高度只有 $10332/13595 = 0.760$ 米或 760 毫米（用

0°C 时水銀的比重)。当大气压强发生变动时, 气压計的水銀柱高也灵敏地随着变动。

为了簡便起見, 工程师采用 1 公斤/厘米^2 作为标准大气压, 称为工程大气压。

在 CGS 制中, 压强的单位达因/厘米²叫做微巴, 一兆个微巴叫做巴 (*bar*) :

$$1 \text{ 巴} = 10^6 \text{ 微巴} = 10^6 \text{ 达因/厘米}^2 \quad (2.12)$$

在 MKS 制中, 也用巴作为压强单位。因为 $1 \text{ 牛頓} = 10^5 \text{ 达因}$ (式 1.12), 所以

$$1 \text{ 巴} = 10^5 \text{ 牛頓/米}^2 = 10^6 \text{ 达因/厘米}^2 \quad (2.13)$$

$$= \frac{10}{9.80665} = 1.019716 \text{ 公斤/厘米}^2 \quad (2.14)$$

綜合上述, 在大气压强和压强单位方面我們有下列一些关系:

$$\left. \begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10,000 \text{ 公斤/米}^2 \\ 1 \text{ 物理大气压} &= 1.0332 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10,332 \text{ 公斤/米}^2 = 1.033 \text{ 工程大气压} \\ 1 \text{ 巴} &= 1.019716 \text{ 公斤/厘米}^2 = 10,197 \text{ 公斤/米}^2 = 1.02 \text{ 工程大气压} \end{aligned} \right\} (2.15)$$

根据上述几个单位間的关系, 我們可以得出表 2.1 中所列的各单位之間的轉換系数。

表 2.1 各压强单位間的轉換系数

	达因/厘米 ²	巴	物理大气压	工程大气压 或 公斤/厘米 ²	毫米水銀柱
1 达因/厘米 ²	1	10^{-6}	0.986923×10^{-6}	1.019716×10^{-6}	0.750062×10^{-3}
1 巴	10^6	1	0.986923	1.019716	750.062
1 物理大气压	1,013,250	1.013250	1	1.033228	760
1 工程大气压或 公斤/厘米 ²	980,665	0.980665	0.967841	1	735.559
1 毫米水銀柱	1,333.224	1.333224×10^{-3}	1.315790×10^{-3}	1.359510×10^{-3}	1

假使图 2.8 所示的差压計 (装以水銀) 是用来测量液体的压强 (见图 2.9) 那么被測量液体的压强是

$$p = p_0 + \gamma_{\text{液}} h - \gamma_{\text{液}} d \quad (2.12)$$

这时, 就須唸两个高度才能算出要测量的压强。

水銀差压計的构造很簡單并且具有相当高的准确度, 用来测量三、四个大气压以內的压强是很合适的。因此它們被广泛地使用在噴气推进机和燃气輪机的实验室中。