射流技術基礎

（內部試用）

武汉大学《射流小組》編写

一九七一年九月

毛主席语录

教育必须为无产阶級政治服务，必須同生产劳动相結合。

大学还是要办的，我这里主要說的是理工科大学还要办，但学制要縮短，教育要革命，要无产阶級政治挂帅，走上海机床厂從工人中培养技术人员的道路。要從有实践經驗的工人农民中間选拔学生，到学校学几年以后，又回到生产实践中去。

我們必须打破常規，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期內，把我国建設成为一个社会主义的現代化的强国。

实践、认識、再实践、再认識，这种形式，循环往复以至无穷，而实践和认識之每一循环的內容，都比較地进到了高一級的程度。

自然科学是人們爭取自由的一种武裝。人們为着要在社会上得到自由，就要用社会科学来了解社会，改造社会进行社会革命。人們为着要在自然界里得到自由，就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，從自然里得到自由。

目　录

72—505

第一章　流体的基本参数和基本原理

引　　言

什么是射流技术呢？这首先要搞清什么是射流。在日常生活中，如水从救火龙头中喷出，高速气流从喷气式飞机的喷管中喷出，空气从“皮老虎”的嘴里喷出等等都是射流。毛主席教导我们：**“社会实践的继续，使人们在实践中引起感觉和印象的东西反复了多次，于是人们的脑子里生起了一个认识过程中的突变（即飞跃），产生了概念”**。由所列举的一些例子，我们可以得出这样一种概念，即：一般说来，射流就是一束从喷管里高速度喷出的流体的流动。射流在流动过程中具有一些特殊的性能，利用这些性能可以做成各种射流元件，将这些射流元件按一定的要求组合起来，配合其他一些辅件，完成生产过程的自动化，这就是射流技术。

我们来看一个例子，如我们需要控制容器中液面的高度，用下面的装置便可实现，如图1—1所示，高压流体经喷嘴1流入，当容器中流体低于 H 高时，管口4通大气，这时流体经通道2注入容器中；当容器中水位达到 H 高时，管口4被封住，这时流体会自动的改换从通道3排走如图中沿虚线所示方式流动。这样，当容器的水位低于所需的高度时，会自动进水，而当到达所需水位时它又可自动停止供水，因而实现了液面的自动控制。这是一个很

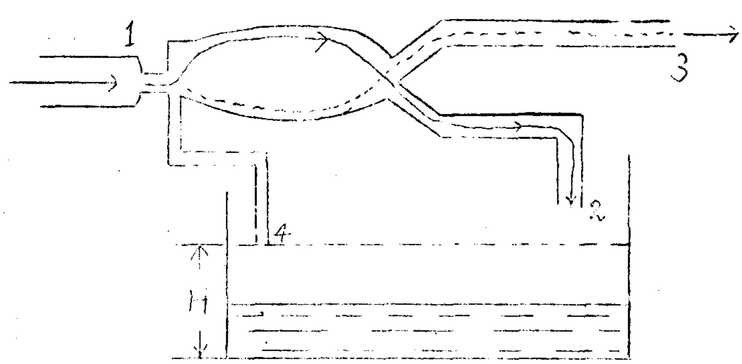


图　1—1

简单的射流控制系统，只用到了一个射流元件。现今射流技术的发展已经用到了上千个元件所组成的复杂射流控制系统。但是它们都和上例一样，利用了射流在流动中的一些规律，因此掌握流体流动的规律是很必要的。为此，我们先熟悉几个流体的物理方面的基本概念，例如质量、速度、压力、……等等这些决定流体流动的状态的所谓流体的参数，以及反映流体参数的内在联系的一些基本原理。

§1 基本参数

描述流体状况的参数很多，我们将它们分类叙述。

一　质量的量度

物体的种类千差万别，它们在运动时也存在着差别，例如两个物体同处于静止状态，如果改变这种静止状态，要它们运动，并使它们以同样的速度开始运动，那末作用在这两个物体上的力是不一样的，相反的如果两个不同的物体，以同样的速度运动，而要使它们突然停止下来，那末阻碍这两个物体使之停止运动的力也不一样。例如一个木球和一个同它一样大小的铁球，要它们都从静止开始作同样的速度运动，那末铁球比木球难于运动，反过来，如果这两个球已经作相同速度的运动了，而要它们停止下来，那末也是铁球比木球难于停止。这就是说物体保持它静止或者运动状态的能力是不一样的，我们就称这种能力为物体的质量，用 m 来表示，并规定 m 的单位为〔克〕（在工程上质量的单位用公斤·秒^2/米）。在上面的例子中，如果规定木球的质量 $m_{木}=1$ 克，而铁球由静止到刚好开始运动比木球由静止到刚好开始运动需要五倍的推力，那末铁球的质量 $m_{铁}=5$ 克。

从上面我们知道，同样大小的木球和铁球它们的质量是不同的，而即使是同样的铁做成的球，大小不同，质量也不同。为了便于比较，我们取物体一个单位体积所具有的质量，称作密度，并用 ρ 表示，如一个物体的质量是 m，它所具有的体积是 V，那末它的密度就是

$$\rho=\frac{m}{V} \tag{1.1}$$

如果质量单位用克，体积单位用米^3，那末密度单位就是克/米^3，但在工程上密度单位常采用公斤·秒^2/米^4。从这里可以看出密度只与物体性质有关而与体积无关。

前面所提到物体的质量，密度的概念，不仅适用于木球，铁球等固体状态的物体，而且适用于流体。如果一个物体的密度处处一样，我们称它是均质物体。

物体除了具有质量外，还具有重量，我们用 G 表示，（重量的意义下面再讲）我们称单位体积的重量为重度，用 γ 表示，那末

$$\gamma=\frac{G}{V} \tag{1.2}$$

重度的单位是公斤/米^3；公斤/厘米^3。

二　运动的量度

（1）速度：如果物体在一定的时间内，走过了一定的距离，我们就说物体在这段时间作了运动。如果两个物体在相同的时间内所走的距离不同，走的距离长的就比距离短的运动要快，我们称在单位时间内物体所走的距离为速度。例如一个物体在5秒钟内走了100米，我们就说这个物体的运动速度是平均每秒20米，更一般的，如果物体在 t 秒钟内从 A 点运动 B 点（图1－2）

而 A、B 两点间的距离是 S 米，我们称平均速度 v 就是

$$v=\frac{S}{t}. \qquad (1.3)$$

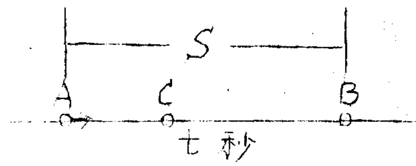


图 1—2

为什么称平均速度呢？ 因为物体在从 A 至 B 的运动过程中可能时快时慢，因此上面所讲的不能叫速度，只能说是平均速度，它是指整个路程而言的，并不能反映物体在 AB 间运动过程的每一时刻，（例如物体运动到 C 点时的速度），可是我们要描述的是物体在运动过程中通过每一点的真实速度 v. 尽管如此，上面所讨论的平均速度对我们仍然是有启发的，它暴露了矛盾，同时也为我们解决矛盾提供了线索，我们就来将上面的运动细致地考究一下，如果我们将 AB 分成 10 等分，每等分的长度是 $\Delta_{10}S$，而物体经过每各等分距离的时间是 t_1，t_2，……，t_{10}（图 1－3）

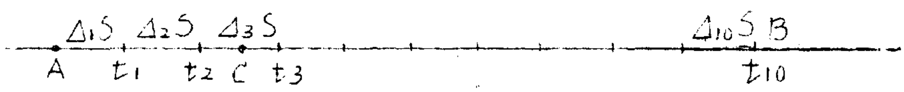


图 1—3

那末物体在各段运动的平均速度就是

$$v_1=\frac{\Delta_1 S}{t_1}, \qquad v_2=\frac{\Delta_2 S}{t_2}, \qquad \cdots\cdots \quad v_{10}=\frac{\Delta_{10} S}{t_{10}}$$

如果 C 点在 $\Delta_3 S$ 这段内，那末 C 点的速度就近似的为

$$v_c \doteq v_3=\frac{\Delta_3 S}{t_3}$$

很显然用 v_3 来表示在 C 点的速度比用 v 来表示在 C 点的速度是更接近真实情况。如果将 AB 分成更多的等分，例如分成 100 等分，那末我们就得到更加真实的速度。按照这个思想，我们来求 C 点的真实速度，设物体到达 C 点后，过一个极短的时间 Δt，我们测得它所运动的距离是 ΔS，那末 C 点的速度就是近似的为 $v_c \doteq v_c=\frac{\Delta S}{\Delta t}$

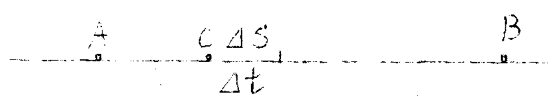


图 1—4

因此当 Δt 趋近于零时，$\frac{\Delta S}{\Delta t}$ 的极限就是 C 点的真实速度，从数学中我们知道这就是距离对时间的导数。

$$v_c = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt} \tag{1.4}$$

例如物体从空中自由下落，它落下的距离与时间有这样的关系 $S = \frac{1}{2}gt^2$。这里，g 是一个常数 $g = 9.8$ 米/秒²。所以物体下落的速度为 $v = \frac{dS}{dt} = gt = \sqrt{2gS}$

因此物体下落 10 秒钟时的速度为 98 米/秒，这时它走过的距离是 $\frac{1}{2} \times 9.8 \times 100 =$ 490 米。

以上讨论的是物体沿直线上的运动，如果物体沿曲线运动，（如炮弹的飞行）这时的情况，也可以类似的讨论。（图 1－5）

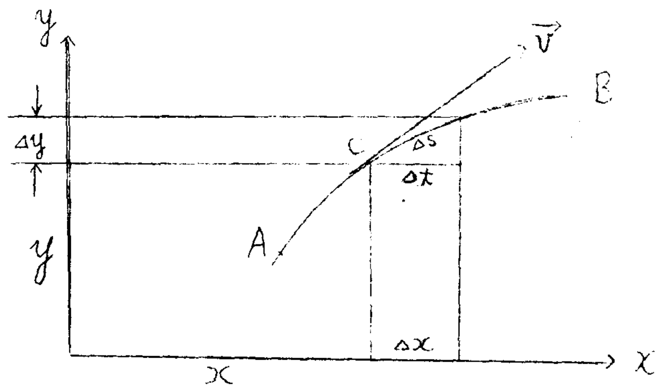


图 1—5

这时的速度仍然是

$$v = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt} \tag{1.4'}$$

这里不同的是速度有方向的问题，在直线运动时速度只有一个方向，这里速度的方向是变化的，上面的(1,4)式只说明了速度的数值，而没有说明方向，但是从(1.4)的推导过程，我们知道速度在每一点的方向是与这一点的路程曲线相切的，象速度这样的量不但有数量上的大小，而且还有方向，这种量我们称向量并用 $\vec{v}$ 来表示。由图1－5我们知道 ΔS 在 X、Y 轴上的投影为 ΔX，ΔY，所以

$$\begin{aligned} (\vec{v})_{\text{在 x 轴投影}} &= v_x = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \\ (\vec{v})_{\text{在 y 轴投影}} &= v_y = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{dy}{dt} \end{aligned} \tag{1.5}$$

（2）加速度：物体的运动速度也往往是随时间而变化的，为了衡量这种变化，我们引入

加速度的概念，加速度就是单位时间内速度的改变量，或者说速度随时间的变化率，如果在 t_1 时刻物体的速度是 $\vec{v_1}$，在 t_2 时刻物体的速度是 $\vec{v_2}$，

那末在 t_1 到 t_2 这段时间的平均加速度 $(\vec{a})_{平均}$ 就是

$$(\vec{a})_{平均}=\frac{\vec{v_2}-\vec{v_1}}{t_2-t_1}=\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \qquad (1.6)$$

或者更确切地说它的加速度 $\vec{a}=\dfrac{d\vec{v}}{dt}$ (1.6′)

加速度的几何表示如图(1—6)，所以加速度也是一个向量。

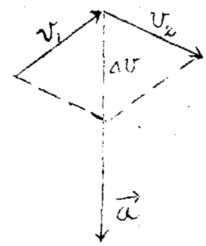


图 1—6

很显然加速度的单位是米/秒^2 或厘米/秒^2

例 1 我们来求物体自由下落的加速度，上面我们已经求得下落的速度为 $v=gt$。

令在 t_1, t_2 时刻的速度各为 v_1, v_2，所以

$$a=\frac{v_2-v_1}{t_2-t_1}=\frac{gt_2-gt_1}{t_2-t_1}=g$$

所以物体自由下落的加速度为 g，称重力加速度。

例 2 我们来求以等角速度 ω 旋转的园盘的边缘上的某一点 A 的加速度。

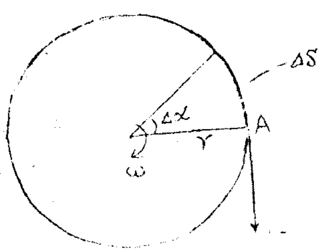
所谓等角速度就是说园盘在转动过程中的任意相同的时间内转动的角度或弧度相同。

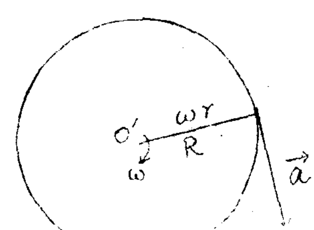
因此不管时间 Δt 取多长，如果用 $\Delta\alpha$ 表示在 Δt 时间园盘转过的弧度，那末 $\Delta\alpha/\Delta t$ 总是等于 ω。同时如果以 ΔS 表示园盘上 A 点在 Δt 时间所走过的距离，则 A 点的速度 $v=\Delta S/\Delta t$，而由弧度的定义 $\Delta\alpha=\Delta S/r$ 推得：

$$v=\frac{\Delta S}{\Delta t}=\frac{\Delta\alpha\cdot r}{\Delta t}=\omega r.$$

因为 ω 不随时间而变，这样速度的量值也不随时间而变，但这并不表示没有加速度，因为速度的方向在改变。

现在来求加速度，我们将 A 点的速度向量的端点放在一个固定点 O'，园盘转动，相应的速度向量 $\vec{v}$ 也在转动，而速度 $\vec{v}$ 的大小 ωr 是不变的，速度 $\vec{v}$ 转动的角度也总是等于 ω。因加速度是速度的变化率，所以求加速度就变成求一个假想的园盘边缘上一点对时间的变化率，而这个假想的园盘以角速度为 ω 绕定点 O' 转动，园盘半径 $R=v=\omega r$。





根据前面求以等角速度 ω 旋转的园盘的边缘上一点 A 的速度的同样方法，我们立刻可以得到加速度 $a=\omega R=\omega^2 r$ 而 $\omega=\frac{v}{r}$，所以 $a=\frac{v^2}{r}$。

因为加速度方向与速度方向垂直，所以加速度方向是沿着 r 方向的，但指向中心 O，所以称向心加速度。

流体在某些射流元件内部流动的过程中经常形成涡流现象，而涡流也可以看作流体质点绕某点（即涡流中心）为中心所作的园周运动，根据例2，因而它也产生向心加速度，这种物理现象对于我们分析将来射流元件很有帮助。

（3）流量：单位时间里流过某一个断面的流体的量称为流量，如果流过的流体按体积计算就称体积流量，按质量计算就称质量流量，按重量计算就称重量流量，并分别用 Q_v，Q_m，Q_G 表示，例如空气压缩机铭牌上所示的流量 $0.6M^3$/分，$0.5M^3$/分 等等就是体积流量。射流元件的输出流量，是衡量元件性能重要指标之一。它的流量的计算也是采用体积流量，例如300升/时，200升/时 等等。下面来看看如何计算流量。

设一束流体的流动如图1－7所以，我们要计算流过面积为 A 的流量，设处在 A 中的流体经过 Δt 时间，它们流到了 A' 处，流经的距离是 ΔS，那末在 Δt 时间内流过 A 断面的流量就是 A，A' 之间的流体的体积，我们假定 A 及 A' 面都垂直于流束，那末 A，A' 间流体的体积 Δv 就是 $\Delta v=A\cdot\Delta S$。

单位时间所流过的体积 Q_v 就是

$$Q_v=\frac{\Delta v}{\Delta t}=A\frac{\Delta S}{\Delta t}$$

而 $\frac{\Delta S}{\Delta t}$ 的极限就是断面的移动速度 v，所以有下面体积流量公式：

$$Q_v=Av \tag{1.7}$$

由(1－1)式我们知道 $\Delta m=\rho\Delta v$，因此，按照类似的方法可得

$$Q_m=\frac{\Delta m}{\Delta t}=\rho\frac{\Delta v}{\Delta t}=\rho Q_v,$$

并由此得到质量流量公式为

$$Q_m=\rho Av \tag{1.8}$$

又由(1.2)知道 $\Delta G=\gamma\Delta v$，所以

$$Q_G=\frac{\Delta G}{\Delta t}=\gamma\frac{\Delta v}{\Delta t}=\gamma Q_v$$

因此可得重量流量公式为

$$Q_G=\gamma Av \tag{1.9}$$

要注意一点的是，在推导这些公式时，都假定了断面 A 中的微团速度是一样的，所以用了一个公共的速度 v，这对于计算较小的断面或者断面上的微团的流动速度差别不大的情况是可以的，如果不是这种情况，那末就要另行计算，我们仍从上图的 A 断面来考虑，取 A 中一个小面 dA，由于 dA 很小，它上面的速度可以用同一个速度 v 表示(图1－8)，这样流过 dA 面的体积流量就是 vdA，将 A 都分成这样的小面积，而将流过这些小面积的体

积流量加起来，并取极限，就是流过断面 A 的体积流量，由数学中知道这就是积分，

$$Q_v=\int_A v dA \tag{1.7'}$$

同样的道理有

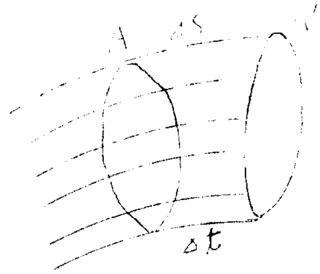


图 1—7

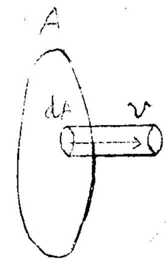


图 1—8

$$Q_m=\int_A \rho v dA \tag{1.8'}$$

$$Q_G=\int_A \gamma v dA \tag{1.9'}$$

三　力的量度：

（1）压力：压力的概念我们经常碰到，如压路机压路面就是压路机的压滚向路面施加压力，而把路面压平。在轧钢中就是钢锭通过两轧辊而将钢锭挤压成所需的型钢。汽缸中活塞的移动也是汽缸中充满了一定压力的气体，推动活塞的结果。我们现在主要讨论流体的压力，在流体中存在着压力的事实，可用各种压力计测得，而得到证明，如图(1－9)，就是膜片式压力计测量液体中压力的情况，这种压力计是由一个带膜片的盒子 C 和它上面连着根带刻度的玻璃管所组成。盒子与玻璃管中充满了较轻的液体和酒精，当压力计未放入液体中时，压力计中的液面在 A 处，当压力计插入液体中某一深度时，压力计中的液面上升到 B 处，这就是因为液体中有压力将膜片压得变曲了，改变了盒子的体积而造成的。潜水员潜入深海中会感到耳膜和胸腔压得难受。这些都证明了流体中是存在着压力的，流体中产生压力是因为流体的重量和流体分子的碰撞运动所造成的。对液体来说由于分子碰撞运动较小，所以压力主要是由重量造成的，对气体来说由于重量很小，压力主要是由分子碰撞运动所产生。流体在静止状态和运动状态所表现的压力是不一样的，下面分别讨论之，先讨论静止的情况。

我们所讲的压力是指流体中某单位面积（通常取 cm^2）上所受的力，例如：在膜片压力计中如果膜片上所受的力是 F，膜片的面积是 A，那么膜片所受的压力 P 就是

$$P=\frac{F}{A} \tag{1.10}$$

压力所用的单位是公斤/米^2；公斤/厘米^2。式（1.10）并不能代表每一处的压力，尤其是当

膜片面积较大时，压力分布是不一样的，依照以前讲过的思想，我们可以在膜片上取一个小面积 dA，如果它上面所受的力是 dF，那么这个面 dA 上的压力就是

$$P=\frac{dF}{dA} \tag{1.10'}$$

由于 dA 很小，因而就用它来表示某点的压力。

现在我们来讨论静止液体中的压力。如果我们要求出在容器中深为 h 处，面积为 dA 上的压力如图(1－10甲)所示。我们假想作这样一个立体液柱，这个液柱的底面为 dA，高为 h。并讨论它的表面 dA 上所受的力。由于液体是易于流动的，如果作用在它面上的力不

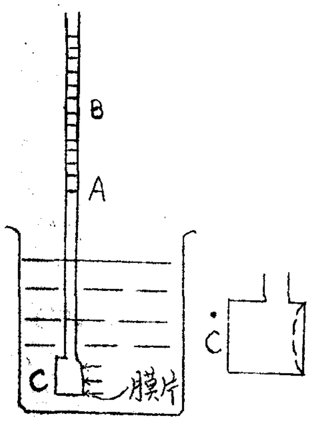


图 1—9

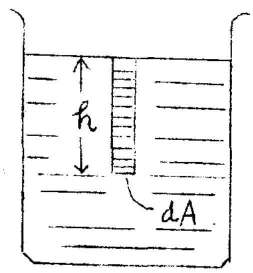


图 1—10甲

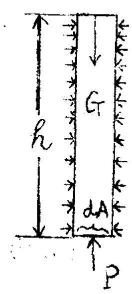


图 1—10乙

与这个面垂直，那么会使这个液面发生流动，同时力的方向也只能朝着这个面，如果背离这个面，那就成了拉力了，而液体是不能受拉力的，这样，在静止流体中，任一个面上的压力都是垂直的向着这个面的，如图(1－10乙)。这个液柱所受的力的总和除压力外还有液柱的重量 G，由于液柱是静止的，那么液柱侧面上的压力总和等于零，而底面上的力又必须与液柱重量相平衡，也就是说它们应当相等，因此设 dA 面上所受的力是 dF，那么这个力必须同 G 相等，即 $dF=G$。由(1.10′)及(1.2)有 $dF=PdA$； $G=\gamma v=\gamma hdA$ 因此 $PdA=\gamma hdA$。消去 dA 我们得到

$$P=\gamma h \tag{1.11}$$

这是个很重要的公式，它说明液体中某处(即某一点)的压力只与这一点到自由表面(即与大气接触的表面)的高度及液体的重度有关系，也就是说在同一液体中，距自由表面为 h 的水平面上的压力是处处相同的。如果考虑到自由表面上的大气压(用 P_a 表示)则上式变成

$$P=\gamma h+P_a \tag{1.12}$$

我们称 $P-P_a$ 为相对压力或表压，如果相对压力小于零我们就称它为负压。

毛主席教导我们：**“马克思主义的哲学认为十分重要的问题，不在于懂得了客观世界的**

规律性，因而能够解释世界，而在于拿了这种对于客观规律性的认识去能动地改造世界”。

利用公式(1.11)和(1.12)所反映的流体压力分布规律可以制成简单的测量气体压力的 U 形管测压计．下面就来看看 U 形管压力计是如何测量压力的，如图(1－11)所示在 U 形

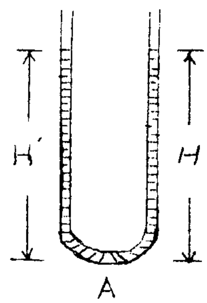


图 1—11

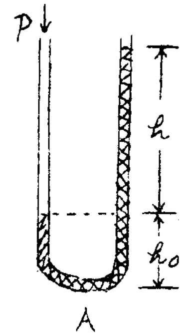


图 1—12

管中如左右两边都通大气而没有加另外的压力，此时由于 U 形管中液体处于平衡状态，所以管底截面 A 上的压力左右相等．由左边算得在 A 上的压力为

$$P_a+\gamma H'$$

而由右边算得在 A 上的压力为

$$P_a+\gamma H$$

因为 A 面的左右两边压力相等，

所以 $$P_a+\gamma H'=P_a+\gamma H.$$

即 $$\gamma H'=\gamma H; \qquad H'=H.$$

所以左右两边的液柱是一样高的，这是可以理解的。

如图(1－12)所示，如果在 U 形管左边另加了压力 P，此时在压力 P 的作用下，U 形管左边水柱下降，因而右边上升，假定此时左右两边液柱高度差为 h，我们来分析高度 h 与压力 P 的关系，由于 U 形管底截面 A 两边压力平衡，所以 A 截面的左边压力 $P_a+P+\gamma h_0$ 与 A 截面右边的压力 $P_a+\gamma(h_0+h)$ 应相等，即

$$P_a+P+\gamma h_0=P_a+\gamma(h_0+h)$$

$$P=\gamma h$$

因此如果知道了 P 就可以算出 h，知道 h 也可以算出 P，这样 U 形管就可以测量压力了，它测出的压力是表压．通常测量射流元件的压力就是用这个方法．

例 U 形管中盛的是水，当 U 形管的液柱之差是 $h=1000$ 毫米时，问这时通入的压力 P 为多少？

因为 $$\gamma_{水}=0.001\text{公斤/厘米}^3$$

$$h=1000\text{毫米}=100\text{厘米}.$$

所以 $$P=\gamma_{水}h=0.001\times100=0.1\text{公斤/厘米}^2$$

采用液柱高来表示压力时，可按下列等式进行换算：

一个工程大气压 = 1 公斤/厘米^2 = 10米水柱 = 735毫米水银柱。

上面所说的压力公式(1.11)和(1.12)是对静止的液体而言的，对于静止的气体情况不完全一样，我们知道敞开容器中气体的压力就是外界大气压（或者说相对压力为零）。而在密闭容器中，它的压力是处处相同的，根据实验得知压力 P 与气体的密度 ρ，温度 T 以及是什么气体有关，并有如下的关系式

$$P = \rho g RT = \gamma RT, \tag{1.13}$$

这里 R 是一个常数，对不同的气体有不同数值，如对空气 $R = 29.27$公斤·米/公斤°K。对氮气和氢气分别为 30.25，420.50公斤·米/公斤°K。

T 是绝对温度（以 °K 表示）它与普通摄氏温度（以 ℃ 表示）之间的关系是：

$$T°K = 273 + t℃$$

如摄氏10度，即 $t = 10$℃ 则相当于绝对温度

$$T = 273 + 10 = 283°K$$

从式(1.13)我们知道，当温度不变时，如果将容器的体积缩小 5 倍，那么它的密度就增加了 5 倍，这样压力也增加了 5 倍。同样的道理，在相同的容积内，如果气体压力增加 5 倍，那末密度也增加 5 倍。根据这点，我们可以粗略计算空压机的流量。设空压机的贮气罐的体积是$0.5M^3$，当罐中压力为零（一个大气压）时启动，而罐中压力为 8 公斤/厘米^2 时停车，共用了 6 分钟。如果忽略在整个过程中温度的变化。并设原来的压力，密度，温度为 P_0, ρ_0, T_0，经过 6 分钟后变为 $P + P_0$，$\rho + \rho_0$，T_0。

因为 $P_0 = \rho_0 g RT_0$，$P + P_0 = (\rho + \rho_0) g RT_0$ 以及 $P = 8P_0$，

所以有：
$$\frac{P}{P_0} = \frac{\rho}{\rho_0} \quad 及 \quad \rho = 8\rho_0$$

从而气体的体积 V 也比原体积 V_0 增加 8 倍。

即
$$V = 8V_0 = 8 \times 0.5 = 4M^3,$$

所以压缩机流量
$$Q_V = \frac{V}{t} = \frac{4}{6} = 0.6M^3/分。$$

上面我们讨论了静止的流体中的压力，那么运动中流体的压力又如何呢？如果我们用前面所讲的膜片压力计来测量，将膜片的一面对着流动的方向，此时如果玻璃管中的液柱上升到某一高度，说明是有压力存在，但是这个压力并不表示流体中的静止压力，因为流体在流动，就具有一定的速度，当它们碰到膜片时速度减慢，因而它们就对膜片有一个冲击力，这样压力计水柱上升的高度除了量得的静压力外它还包括了流体冲击力所产生的压力。如果我们将膜片压力计随着流体一起运动，因为它和流体运动的速度一样，它就和流体处于相对静止，这样量出的压力就是流动流体的静止压力。但这是很难办到的。如果我们将压力计的膜片顺着流动的方向放置，这就可以消除流体流动速度的影响，量得的压力可以看作静压力，但膜片盒子有一定的厚度，因而仍能阻止流体的流动，所以量得的压力是难以准确的。为了

比较精确的测量静压力，可以采取如下的方法来测量，如图(1－13甲)所示，在气体流动管道的管壁上开一小孔，若小孔与 U 形测压管相连，由于静压力在某一截面上（垂直于管道中心线）认为是相等的，所以这时 U 形管水柱的高度就是所感受到的静压力。

如果把一只内径很小（与管道截面比较）测压管伸进管道里（如图1－13乙），一端对准速度方向，另一端（弯成90度）也连接 U 形管，这时水柱高度所感受的压力是一种与速度有关的压力，并称它为总压力，这种测压方法在射流装置中经常用到。

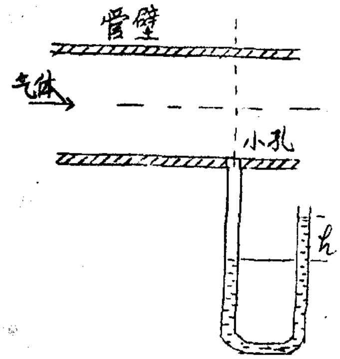


图 1－13甲

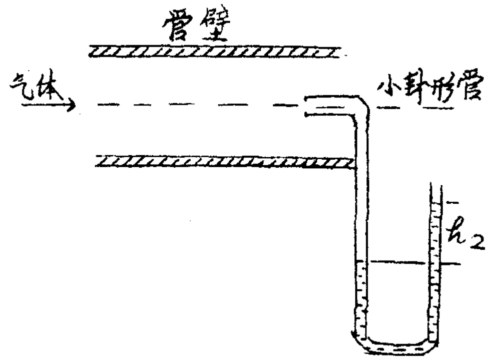


图 1－13乙

②阻力：流体在运动中，流体的一部分会对另一部分的运动起影响作用，这种现象我们也是经常碰到的，例如：站在铁路边的人，当火车开过去的时候会感到有一阵风（气体流动），这是因为靠近车皮的一层气体和车皮间有摩擦，车皮就带动这层气体前进，同时这运动着的气层又和紧挨着它的另一层气层之间有摩擦，因而又带动了这另层气体运动，这样一层一层地传下去气体也就都运动起来了，而达到人身上，使人感到气流的运动。一般地说，如果两层运动速度不一样的流体作相对运动时，那么快的一层会带动慢的一层，而慢的一层会阻碍快的一层，也就是说两层流体会因运动速度的不同而产生摩擦阻力，这是克服质点内聚力的结果。根据实验我们得出摩擦阻力是与沿流层面的垂线方向速度的改变量成正比例的。如图（1－14），没有一层 A 流体，它的速度是 v_1，另一层 B 流体，

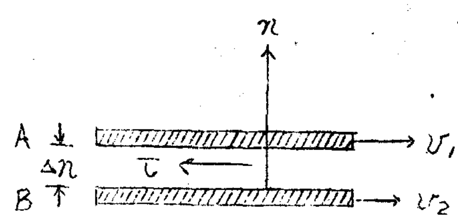


图 1－14

它的速度是 v_2，它们之间的距离是 Δn，如果我们记单位面积上的摩擦阻力为 τ，那么 τ 是正比于

$$\frac{v_1-v_2}{\Delta n}=\frac{\Delta v}{\Delta n}$$

当 Δn 取极限时，我们有

$$\tau = \mu \frac{dv}{dn} \tag{1.14}$$

μ 是一个比例常数，它表征流体的内摩擦特性即粘性，我们称它为动力粘性系数。在工程上往往取

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \tag{1.15}$$

并称 γ 为运动粘性系数，它的单位是 米²/秒，公分²/秒。

下表是水和空气的运动粘性系数表（公分²/秒）

温 度 C	水	空 气
0°	0.0179	0.1370
10°	0.0131	0.1470
20°	0.0101	0.1570
30°	0.0081	0.1660

上面所讲的粘性系数或称粘度很不易测量，所以在实用上往往采用相对粘度，就是说以水为标准，其他的流体，都来同水进行比较。有一种常用而简单的测量相对粘度的粘度计的构造是这样，一个带刻度的玻璃漏斗，下有一个直径为2.8毫米的小孔。测量时将200立方厘米的流体从漏斗中流过，记下它所用的时间，再将200立方厘米的水从漏斗中流过，记下它所用的时间，将这两个时间的比值就作为相对粘度，并用 E 表示。因为粘度与温度有关所以还要注明温度，如20℃的粘度就写成 $E°20$。例如200厘米³的机油在50℃时需要234秒流完，而同体积的水在50℃时只要52秒就可流完，那么机油的粘度就是

$$E°50 = \frac{234}{52} = 4.5.$$

四　流动状态的量度：

我们常见的流体运动有各种形式，如有很平稳的流动，有很湍急的流动，流动中还有旋涡和波浪等等，在这些不同的流动状态中，我们如何抓住主要方面，而区分它们在本质上的差异呢？"透过现象看本质"。任何流体的流动，都是流体的无数微团运动的总和，这些微团要么是很有规则的运动，要么是杂乱无章的运动。微团的不同运动状况，反映了流体的整体运动状态，我们就用这种观点来看待流体的流动状态。一个很明显的例子是当我们打开自来水龙头时，我们发现，当龙头的开度较小时，水很平滑而又很规律的流出，而且很透明，当龙头开得很大时，水流就很急，而且扩散成一定的角度，流体微团作混乱运动，同时还吸入了一些空气，所以水流也就不再透明了。

流体微团的有规则运动和杂乱的运动就是流体的两种不同的运动状态，前者称层流，后者称紊流（或湍流）。

毛主席教导我们说：**"一切矛盾着的东西，互相联系着，不但在一定条件之下共处于一个统一体中，而且在一定条件下互相转化。"**那么流体在什么条件下是层流流动，什么条件下是紊流流动，人们对此做了大量的实验，我们将这类实验中的一个典型试验方法叙述如下。