流体机械能量的转换

——柏努利方程仪

一、实验目的与要求

1．通过本实验，加深对流体机械能量互相转换规律的理解；

2．观察流体流经收缩、扩大管段时，各截面上的静压头之变化。

二、实验原理

流体得以流动的必要条件是系统两端有压强差或位差，如高位槽的水输出时，部分位能转化成动能而使水流动；压缩气体通过管道时，部分势能（工程上称为静压能）转化成动能而流动。流体强制流动时，必须由外界输入能量，例如：系统减压时，需用真空泵输入能量以克服气体分子间的吸引力而使气体吸出，并将吸出的气体压缩，使其压强大于外界压强而排出；位置低的液体经泵输入能量后才能向高处排出。因此，流体流动过程实质上是能量的转化过程。

流体本身所具有的机械能量有三种形式：

（1）位能 是指流体因距所选的基准面有一定距离，由于重力作用而具有的能量。基准面是说，工程中为计算方便，常选某一特定的基准作为运算的起点，例如对位置可选地平面为基准，也可选某一水平面作为基准面。高于基准面为正值，低于基准面则为负值。

距基准面 H 高处的 m[kg]流体所具有的位能为 mgH，等于将 m 流体提高到 H 所需的能量，换言之，该流体因处于 H 高度而能向基准面作功，作的功的数量为 mgH。

能量的国际单位是 J（焦耳），其基本单位为：$m^2.kg.s^{-2}$(即 N.m)。

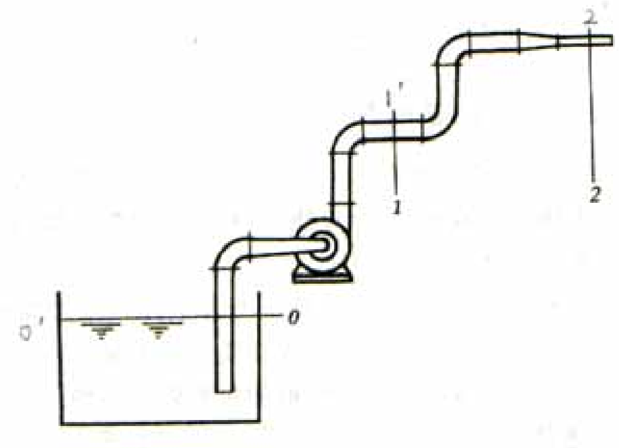
（2）动能 流体因流动而具有动能，m（单位为 kg）流体所具有的动能为 $m\omega^2/2$，其基本单位为：$kg.(m.s^{-1})=m^2.kg.s^{-2}$(=J)。

（3）静压能 是流体处于当时压强 p 下所具有的能量，即指流体因被压缩而能向外膨胀而做功的能力，其总值等于 pV。当外界条件变化时，对不可压缩流体因静压能而能作的功为 $V\Delta p$，对可压缩的流体则为 ΔPV 或 $\int Vdp$。m[单位为 kg]流体的体积为 m/ρ，在 p 压强下，它所有的静压能为 $m.p/\rho$，其基本单位也为

$$kg(kg.m^{-1}.s^{-2})/kg.m^{-3}=m^2.kg.s^{-2}(=J)$$

流体流动过程中，流体所具有的能量能在不同形式间相互转化。

理想液体的特征是密度不随压强而变化，不具有粘度，流动时没有阻力。因此，理想流体在流动时没有热力学能（内能），而只有机械能间的转化。



如图,在 1,2 两点之间，m[单位为 kg]理想液体所具有的机械能 E 为当时条件下该液体的位能、动能和静压能的总和，即

$$E_1=mgH_1+m\omega_1^2/2+m.\ p_1/\rho$$

$$E_2=mgH_2+m\omega_2^2/2+m.\ p_2/\rho$$

1,2 两点之间没有外界能量输入，液体也没有向外界做功，根据能量守恒定律，得：$E_1=E_2$

$$mgH_1+m\omega_1^2/2+m.\ p_1/\rho=mgH_2+m\omega_2^2/2+m.\ pP_2/\rho$$

两边除以 m，得：

$$gH_1+\omega_1^2/2+p_1/\rho=gH_2+\omega_2^2/2+p_2/\rho \qquad (1)\ [J/kg]$$

若两边除以 mg，得：

$$H_1+\omega_1^2/2g+p_1/\rho g=H_2+\omega_2^2/2g+p_2/\rho g \qquad (2)\ [m]$$

(2)式为理想流体流动的能量衡算方程，称为理想流体的柏努利（Bernoulli）公式（方程）。

(1)式中的 gH，$\omega^2/2$，p/ρ 各项表示每千克流体所具有的各种形式的能量，各项的单位均为 J/kg。当各项用 H，$\omega^2/2g$，p/ρg 表示时，各项是指每牛顿流体所具有的各种形式的能量，其单位均为 m，实际上更明确地应理解为米液柱（这一概念在具体应用时很重要）。

例如，p/ρg 这一项可以这样来理解：p/ρg 是指每牛顿流体因处于 P 压强下

而能克服其重力向外作功的能力，若写成 $p/\rho g= h$，则该项能量能将 1 牛顿(N)该流体克服其重力而提升到 h 高度。

工程上将每牛顿流体所具有的各种形式的能量统称为压头，H 称为位压头，$\omega^2/2g$ 称为动压头，$p/\rho g$ 称为静压头。

对理想气体，当所选系统两点的压强相差不大时，气体的密度变化不多，也可近似地应用上述柏努利方程。

柏努利方程有下述的物理意义：

（1）　理想流体在导管中作定态流动时，导管任一截面的总能量或总压头为一常数。

（2）　能量在不同形式间可以互相转化，当某一形式的压头的数值因条件而发生变化时，将相应地引起其他压头的数值的变化。

当系统中有外界能量输入时，如 0，1 间有泵对流体施加能量时，(2) 式变为

$$H_0+\omega_0^2/2g+ p_0/\rho g+H_e= H_1+\omega_1^2/2g+ p_1/\rho g$$

H_e—外界加于每牛顿流体的能量，单位为 m。

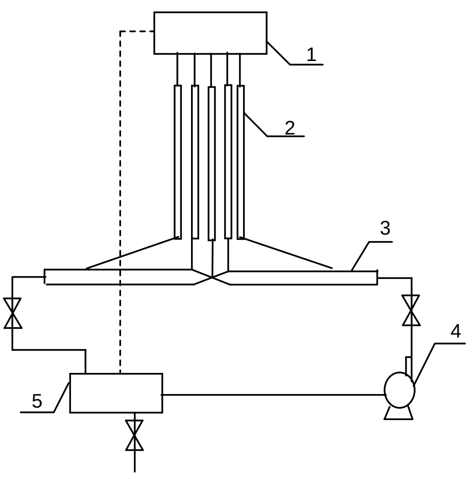
实际流体流动时存在流动摩擦阻力，柏努利方程变为

$$H_0+\omega_0^2/2g+ p_0/\rho g+H_e= H_1+\omega_1^2/2g+ p_1/\rho g+H_f$$

H_f—每牛顿流体流动时因阻力而消耗的能量，单位为 m。

以上各式也使用于 1，2 两点间密度变化不大的实际气体。

三、实验装置



水箱，泵，静压头测量管，文丘利管，转子流量计

本实验所用流体为水（H_2O），在实验测量部分，可以用

$$H_1+\omega_1^2/2g+p_1/\rho g=H_2+\omega_2^2/2g+p_2/\rho g+H_f \qquad (3)$$

对于水平玻璃导管，阻力很小可以忽略，同时因为水为难以压缩流体，p 值不变，(3) 式可简化为

$$\omega_1^2/2g+p_1/\rho g=\omega_2^2/2g+p_2/\rho g$$

四、实验操作步骤

1. 检查水箱，开泵（电源）

（水箱里盛水量为水箱容积的 2/3，太多不安全，太少利用率不高，化工车间及实验室，容器盛放液体量均为容积 2/3）。

2. 开阀（进水量开到最大）
3. 排气（排尽管中气泡）

排气方法：

（1） 实验导管中气泡：抬起仪器一端，赶走气泡；

（2） 橡皮管中气泡：拍打一下橡皮管。

4. 调节转子流量计（同时关小进水开关）
5. 待液面稳定后，读数，记录数据

注：静压头测量管液面波动（上下 5mm）是由于泵出水压力波动造成的。

消除方法：通过加长管道可以减弱或消除干扰。

6. 重复三次

记录：静压头测量管 1，2，3，4，5 处静压头[单位 m 液柱]及转子流量计读数（6 个数据）；静压头液面可调节与视线相平或稍高一点，便于读数。

五、实验数据处理说明

数据记录：

No.	$p_1/\rho g$(cm)	$p_2/\rho g$(cm)	$p_3/\rho g$	$p_4/\rho g$	$p_5/\rho g$	q_v(l/h)
1						
2						
3						

$\omega_1^2/2g+p_1/\rho g=\omega_2^2/2g+p_2/\rho g$

$\Phi_1=\Phi_5=25mm$

利用 ω_1，ω_5 数值计算 Φ_3(由 1，5 套用公式计算 ω_3)

1-5 处静压头数值为 m 液柱

$q_v = \omega.S$,　　$S=\pi.(\Phi/2)^2=\pi\Phi^2/4$

$\omega.\pi\Phi^2/4=q_v$，　由 Φ=0.025m 算出 ω_1，ω_5

由 ω_1，ω_3 计算 Φ_3；由 ω_5，ω_3^* 计算 Φ_3^*

数据处理：

No.	ω	ω_3	ω_3^*	Φ_3	Φ_3^*	$\Sigma H_{f1,5}$
1						
2						
3						