水力学实验报告

实验一 流体静力学实验

实验二 不可压缩流体恒定流能量方程（伯诺利方程）实验

实验三 不可压缩流体恒定流动量定律实验

实验四 毕托管测速实验

实验五 雷诺实验

实验六 文丘里流量计实验

实验七 沿 程 水 头 损 失 实 验

实验八 局部阻力实验

实验一 流体静力学实验

实验原理

在重力作用下不可压缩流体静力学基本方程

$$z+\frac{p}{\gamma}=const$$

或

$$p=p_0+\gamma h \qquad (1.1)$$

式中： z 被测点在基准面的相对位置高度；

p 被测点的静水压强，用相对压强表示，以下同；

p_0 水箱中液面的表面压强；

γ 液体容重；

h 被测点的液体深度。

另对装有水油（图 1.2及图 1.3）U 型测管，应用等压面可得油的比重 S_0 有下列关系：

$$S_0=\frac{\gamma_0}{\gamma_w}=\frac{h_1}{h_1+h_2} \qquad (1.2)$$

据此可用仪器（不用另外尺）直接测得 S_0。

实验分析与讨论

1. 同一静止液体内的测管水头线是根什么线？

测压管水头指 $(Z+\frac{p}{\gamma})$，即静水力学实验仪显示的测管液面至基准面的垂直高度。测压管水头线指测压管液面的连线。实验直接观察可知，同一静止液面的测压管水头线是一根水平线。

2. 当 $P_B<0$ 时，试根据记录数据，确定水箱内的真空区域。

$\frac{p_B}{\gamma}<0$，相应容器的真空区域包括以下三部分：

(1)过测压管 2 液面作一水平面，由等压面原理知，相对测压管 2 及水箱内的水体而言，该水平面为等压面，均为大气压强，故该平面以上由密封的水、气所占的空间区域，均为真空区域。

(2)同理，过箱顶小水杯的液面作一水平面，测压管 4 中，该平面以上的水体亦为真空区域。

(3)在测压管 5 中，自水面向下深度某一段水柱亦为真空区。这段高度与测压管 2 液面低于水箱液面的高度相等，亦与测压管 4 液面高于小水杯液面高度相等。

3. 若再备一根直尺，试采用另外最简便的方法测定 γ_0。

最简单的方法，是用直尺分别测量水箱内通大气情况下，管 5 油水界面至水面和油水界面至油面的垂直高度 h 和 h_0，由式 $\gamma_\omega h_\omega=\gamma_0 h_0$，从而求得 γ_0。

4. 如测压管太细，对测压管液面的读数将有何影响？

设被测液体为水，测压管太细，测压管液面因毛细现象而升高，造成测量误差，毛细高度由下式计算

$$h=\frac{4\sigma\cos\theta}{d\gamma}$$

式中，为表面张力系数；为液体的容量；d 为测压管的内径；h 为毛细升高。常温(t=20℃)的水，=7.28dyn/mm，=0.98dyn/mm。水与玻璃的浸润角很小，可认为 cosθ=1.0。于是有 $h=\frac{29.7}{d}$ (h、d 单 位 为 mm)

一般来说，当玻璃测压管的内径大于 10mm 时，毛细影响可略而不计。另外，当水质不洁时，减小，毛细高度亦较净水小；当采用有机玻璃作测压管时，浸润角较大，其 h 较普通玻璃管小。

如果用同一根测压管测量液体相对压差值，则毛细现象无任何影响。因为测量高、低压强时均有毛细现象，但在计算压差时，互相抵消了。

5. 过 C 点作一水平面，相对管 1、2、5 及水箱中液体而言，这个水平面是不是等压面？哪一部分液体是同一等压面？

不全是等压面，它仅相对管 1、2 及水箱中的液体而言，这个水平面才是等压面。因为只有全部具备下列 5 个条件的平面才是等压面：（1）重力液体；（2）静止；（3）连通；（4）连通介质为同一均质液体；（5）同一水平面。而管 5 与水箱之间不符合条件（4），因此，相对管 5 和水箱中的液体而言，该水平面不是等压面。

6. 用图 1.1 装置能演示变液位下的恒定流实验吗？

关闭各通气阀门，开启底阀，放水片刻，可看到有空气由 c 进入水箱。这时阀门的出流就是变液位下的恒定流。因为由观察可知，测压管 1 的液面始终与 c 点同高，表明作用于底阀上的总水头不变，故为恒定流动。这是由于液位的降低与空气补充使箱体表面真空度的减小处于平衡状态。医学上的点滴注射就是此原理应用的一例，医学上称之为马利奥特容器的变液位下恒定流。

7. 该仪器在加气增压后，水箱液面将下降而测压管液面将升高 H，实验时，若以 $P_0=0$ 时的水箱液面作为测量基准，试分析加气增压后，实际压强（H+δ）与视在压强 H的相对误差值。本仪器测压管内径为 0.8cm，箱体内径为 20cm。

加压后，水箱液面比基准面下降了，而同时测压管 1、2 的液面各比基准面升高了 H，由水量平衡原理有

$$2\times\frac{\pi}{4}d^2H=\frac{\pi D^2}{4}\delta$$

则

$$\frac{\delta}{H}=2\left(\frac{d}{D}\right)^2$$

本实验仪　　d=0.8cm, D=20cm,

故　　H=0.0032

于是相对误差有

$$\varepsilon=\frac{H+\delta-H}{H+\delta}=\frac{\delta}{H+\delta}=\frac{\delta/H}{1+\delta/H}=\frac{0.0032}{1+0.0032}=0.0032$$

因而可略去不计。

其实，对单根测压管的容器若有 D/d_{10} 或对两根测压管的容器 D/d_7 时，便可使 0.01。

实验二 不可压缩流体恒定流能量方程（伯诺利方程）实验

实验原理

在实验管路中沿管内水流方向取 n 个过断面。可以列出进口断面(1)至另一断面(i)的能量方程式(i=2,3,……,n)

$$Z_1+\frac{p_1}{\gamma}+\frac{a_1v_1^2}{2g}=Z_i+\frac{p_i}{\gamma}+\frac{a_iv_i^2}{2g}+h_{w_{1-i}}$$

取 a1=a2=…an=1，选好基准面，从已设置的各断面的测压管中读出 $Z+\frac{p}{\gamma}$ 值，测出通过管路的流量，即可计算出断面平均流速 v 及 $\frac{av^2}{2g}$，从而即可得到各断面测管水头和总水头。

成果分析及讨论

1. 测压管水头线和总水头线的变化趋势有何不同？为什么？

测压管水头线（P-P）沿程可升可降，线坡 J_p 可正可负。而总水头线（E-E）沿程只降不升，线坡 J 恒为正，即 J>0。这是因为水在流动过程中，依据一定边界条件，动能和势能可相互转换。测点 5 至测点 7，管收缩，部分势能转换成动能，测压管水头线降低，Jp>0。测点 7 至测点 9，管渐扩，部分动能又转换成势能，测压管水头线升高，$J_p<0$。而据能量方程 $E_1=E_2+h_{w1-2}$，h_{w1-2} 为损失能量，是不可逆的，即恒有 $h_{w1-2}>0$，故 E_2 恒小于 E_1，（E-E）线不可能回升。(E-E) 线下降的坡度越大，即 J 越大，表明单位流程上的水头损失越大，如图 2.3的渐扩段和阀门等处，表明有较大的局部水头损失存在。

2. 流量增加，测压管水头线有何变化？为什么？

有如下二个变化：

（1）流量增加，测压管水头线（P-P）总降落趋势更显著。这是因为测压管水头

$H_p = Z + \frac{p}{\gamma} = E - \frac{v^2}{2g} = E - \frac{Q^2}{2gA^2}$，任一断面起始时的总水头 E 及管道过流断面面积 A 为定值时，Q 增大，$\frac{v^2}{2g}$就增大，则$Z + \frac{p}{\gamma}$必减小。而且随流量的增加阻力损失亦增大，管道任一过水断面上的总水头 E 相应减小，故$Z + \frac{p}{\gamma}$的减小更加显著。

（2）测压管水头线（P-P）的起落变化更为显著。
因为对于两个不同直径的相应过水断面有

$$\Delta H_p = \Delta(Z + \frac{p}{\gamma}) = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \zeta\frac{v_2^2}{2g} = \frac{Q^2/A_2^2 - Q^2/A_1^2}{2g} + \zeta\frac{Q^2/A_2^2}{2g}$$
$$= (1 + \zeta - \frac{A_2^2}{A_1^2})\frac{Q^2/A_2^2}{2g}$$

式中为两个断面之间的损失系数。管中水流为紊流时，接近于常数，又管道断面为定值，故 Q 增大，H 亦增大，（P-P）线的起落变化就更为显著。

3. 测点 2、3 和测点 10、11 的测压管读数分别说明了什么问题？

测点 2、3 位于均匀流断面（图 2.2），测点高差 0.7cm，$H_p=Z + \frac{p}{\gamma}$均为 37.1cm（偶有毛细影响相差 0.1mm），表明均匀流同断面上，其动水压强按静水压强规律分布。测点 10、11 在弯管的急变流断面上，测压管水头差为 7.3cm，表明急变流断面上离心惯性力对测压管水头影响很大。由于能量方程推导时的限制条件之一是“质量力只有重力”，而在急变流断面上其质量力，除重力外，尚有离心惯性力，故急变流断面不能选作能量方程的计算断面。在绘制总水头线时，测点 10、11 应舍弃。

4. 试问避免喉管（测点 7）处形成真空有哪几种技术措施？分析改变作用水头（如抬高或降低水箱的水位）对喉管压强的影响情况。

下述几点措施有利于避免喉管（测点 7）处真空的形成：
（1）减小流量，（2）增大喉管管径，（3）降低相应管线的安装高程，（4）改变水箱中的液位高度。

显然（1）、（2）、（3）都有利于阻止喉管真空的出现，尤其（3）更具有工程实用意义。因为若管系落差不变，单单降低管线位置往往就可完全避免真空。例如可在水箱出口接一下垂 90 弯管，后接水平段，将喉管的高程降至基准高程 0—0，比位能降至零，比压能 p/γ 得以增大（Z），从而可能避免点 7 处的真空。至于措施（4）其增压效果是有条件的，现分析如下：

当作用水头增大 h 时，测点 7 断面上$Z + \frac{p}{\gamma}$值可用能量方程求得。

取基准面及计算断面 1、2、3，计算点选在管轴线上（以下水柱单位均为 cm）。于是由断面 1、2 的能量方程（取 $a_2=a_3=1$）有

$$Z_1 + \Delta h = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{w1-2} \qquad (1)$$

因 h_{w1-2} 可表示成此处 c1.2 是管段 1-2 总水头损失系数，式中 e、s 分别为进口和渐缩局部损失系数。
又由连续性方程有

$$\frac{v_2^2}{2g}=(\frac{d_3}{d_2})^4\frac{v_3^2}{2g}$$

故式（1）可变为

$$Z_2+\frac{p_2}{\gamma}=Z_1+\Delta h-\left[(\frac{d_3}{d_2})^4+\zeta_{c1.2}\right]\frac{v_3^2}{2g} \tag{2}$$

式中$v_3^2/2g$可由断面 1、3 能量方程求得，即

$$Z_1+\Delta h=Z_3+\frac{v_3^2}{2g}+\zeta_{c13}\frac{v_3^2}{2g} \tag{3}$$

由此得

$$v_3^2/2g=(Z_1-Z_3+\Delta h)/(1+\zeta_{c13}) \tag{4}$$

代入式（ 2有(Z_2+P_2/γ)随 h 递增还是递减，可由(Z_2+P_2/γ)加以判别。因

$$\frac{\partial(Z_2+p_2/\gamma)}{\partial(\Delta h)}=1-\frac{(d_3/d_2)^4+\zeta_{c1.2}}{1+\zeta_{c1.3}} \tag{5}$$

若 1-[(d3/d2)4+c1.2]/(1+c1.3)>0，则断面 2 上的(Z+p/γ）随 h 同步递增。反之，则递减。文丘里实验为递减情况，可供空化管设计参考。

在实验报告解答中，d_3/d_2=1.37/1，Z_1=50，Z_3=-10，而当 h=0 时，实验的(Z_2+P_2/γ)=6，$v_2^2/2g=33.19$，$v_3^2/2g=9.42$，将各值代入式(2)、(3)，可得该管道阻力系数分别为c1.2=1.5，c1.3=5.37。再将其代入式(5)得

$$\frac{\partial(Z_2+p_2/\gamma)}{\partial(\Delta h)}=1-\frac{1.37^4+1.15}{1+5.37}=0.267>0$$

表明本实验管道喉管的测压管水头随水箱水位同步升高。但因(Z_2+P_2/γ)接近于零，故水箱水位的升高对提高喉管的压强（减小负压）效果不显著。变水头实验可证明该结论正确。

5. 由毕托管测量显示的总水头线与实测绘制的总水头线一般都有差异，试分析其原因。

与毕托管相连通的测压管有 1、6、8、12、14、16 和 18 管，称总压管。总压管液面的连续即为毕托管测量显示的总水头线，其中包含点流速水头。而实际测绘的总水头是以实测的$(Z+\frac{p}{\gamma})$值加断面平均流速水头 v2/2g 绘制的。据经验资料，对于园管紊流，只有在离管壁约 0.12d 的位置，其点流速方能代表该断面的平均流速。由于本实验毕托管的探头通常布设在管轴附近，其点流速水头大于断面平均流速水头，所以由毕托管测量显示的总水头线，一般比实际测绘的总水线偏高。

因此，本实验由 1、6、8、12、14、16 和 18 管所显示的总水头线一般仅供定性分析与讨论，只有按实验原理与方法测绘总水头线才更准确。

实验三 不可压缩流体恒定流动量定律实验

实验原理

恒定总流动量方程为

$$F=\rho Q(\beta_2 v_2-\beta_1 v_1)$$

取脱离体，因滑动摩擦阻力水平分离$f_x<0.5\%F_{x1}$，可忽略不计，故 x 方向的动量方程化为

$$F_x=-p_c=-\gamma h_c\frac{\pi}{4}D^2=\rho Q(0-\beta_1 v_{1x})$$

即 $$\beta_1\rho Qv_{1x}-\frac{\pi}{4}\gamma h_c D^2=0$$

式中：h_c——作用在活塞形心处的水深；

D——活塞的直径；

Q——射流流量；

V_{1x}——射流的速度；

β_1——动量修正系数。

实验中，在平衡状态下，只要测得 Q 流量和活塞形心水深 h_c，由给定的管嘴直径 d 和活塞直径 D，代入上式，便可验证动量方程，并率定射流的动量修正系数β_1值。其中，测压管的标尺零点已固定在活塞的园心处，因此液面标尺读数，即为作用在活塞园心处的水深。

实验分析与讨论

1、实测β与公认值(β=1.02～1.05)符合与否？如不符合，试分析原因。

实测β=1.035与公认值符合良好。(如不符合，其最大可能原因之一是翼轮不转所致。为排除此故障，可用 4B 铅笔芯涂抹活塞及活塞套表面。)

2、带翼片的平板在射流作用下获得力矩，这对分析射流冲击无翼片的平板沿 x 方向的动量力有无影响？为什么？

无影响。

因带翼片的平板垂直于 x 轴，作用在轴心上的力矩 T，是由射流冲击平板是，沿 yz 平面通过翼片造成动量矩的差所致。即

$$T=\rho Qv_{yz2}\cos\alpha_2 r_2-\rho Qv_{yz1}\cos\alpha_1 r_1=\rho Qv_{yz2}\cos\alpha_2 r_2$$

式中 Q——射流的流量；

V_{yz1}——入流速度在 yz 平面上的分速；

V_{yz2}——出流速度在 yz 平面上的分速；

α_1——入流速度与圆周切线方向的夹角，接近 90°；

α_2——出流速度与圆周切线方向的夹角；

$r_{1,2}$——分别为内、外圆半径。

该式表明力矩 T 恒与 x 方向垂直，动量矩仅与 yz 平面上的流速分量有关。也就是说平板上附加翼片后，尽管在射流作用下可获得力矩，但并不会产生 x 方向的附加力，也不会影响 x 方向的流速分量。所以 x 方向的动量方程与平板上设不设翼片无关。

3、通过细导水管的分流，其出流角度与V_2相同，试问对以上受力分析有无影响？

无影响。

当计及该分流影响时，动量方程为

$$-\gamma h_c \frac{\pi}{4} D^2 = \rho Q_2 \beta_2 v_{2x} + \rho Q_3 \beta_3 v_{3x} - \rho Q \beta_1 v_{1x}$$

$$\because v_{2x} = v_{3x} = 0$$

$$\therefore \gamma h_c \frac{\pi}{4} D^2 = \beta_1 \rho Q v_{1x}$$

即

$$\beta_1 \rho Q v_{1x} - \gamma h_c \frac{\pi}{4} D^2 = 0$$

该式表明只要出流角度与 V_1 垂直，则 x 方向的动量方程与设置导水管与否无关。

4、滑动摩擦力 f_x 为什么可以忽略不记？试用实验来分析验证 f_x 的大小，记录观察结果。(提示：平衡时，向测压管内加入或取出 1mm左右深的水，观察活塞及液位的变化)

因滑动摩擦力 f_x<5 墙，故可忽略而不计。

如第三次实验，此时 h_c=19.6cm，当向测压管内注入 1mm 左右深的水时，活塞所受的静压力增大，约为射流冲击力的 5。假如活动摩擦力大于此值，则活塞不会作轴向移动，亦即 h_c 变为 9.7cm 左右，并保持不变，然而实际上，此时活塞很敏感地作左右移动，自动调整测压管水位直至 h_c 仍恢复到 19.6cm 为止。这表明活塞和活塞套之间的轴向动摩擦力几乎为零，故可不予考虑。

5、V_{2x} 若不为零，会对实验结果带来什么影响？试结合实验步骤 7 的结果予以说明。

按实验步骤 7 取下带翼轮的活塞，使射流直接冲击到活塞套内，便可呈现出回流与 x 方向的夹角 α 大于 90°(其 V_{2x} 不为零)的水力现象。本实验测得 $\alpha \approx 135°$，作用于活塞套圆心处的水深 h_c'=29.2cm，管嘴作用水头 H_0=29.45cm。而相应水流条件下，在取下带翼轮的活塞前，V_{2x}=0，h_c=19.6cm。表明 V_{2x} 若不为零，对动量立影响甚大。因为 V_{2x} 不为零，则动量方程变为

$$-\gamma h_c' \frac{\pi}{4} D^2 = \rho Q(\beta_2 v_{2x} - \beta_1 v_{1x})$$

$$= -\rho Q[\beta_1 v_{1x} + \beta_2 v_2 \cos(180 - \alpha)] \quad (1)$$

就是说 h_c'随 V_2 及 α 递增。故实验中 h_c'> h_c。

实际上，h_c'随 V_2 及 α 的变化又受总能头的约束，这是因为由能量方程得

$$\frac{\alpha v_1^2}{2g} = h_c' + h_\omega \quad (2)$$

而

$$\frac{\alpha v_1^2}{2g} < H_0$$

所以

$$h_c' < H_0$$

从式(2)知，能量转换的损失 h_ω 较小时，$h_c' \approx \frac{\alpha v^2}{2g} \approx H_0$

实验四 毕托管测速实验

实验原理

$$u = c\sqrt{2g\Delta h} = k\sqrt{\Delta h}$$

$$k = c\sqrt{2g} \qquad (4.1)$$

式中：u—毕托管测点处的点流速；

c—毕托管的校正系数；

Δh—毕托管全压水头与静水压头差。

$$u = \varphi'\sqrt{2g\Delta H} \qquad (4.2)$$

联解上两式可得 $\varphi' = c\sqrt{\Delta h/\Delta H}$ (4.3)

式中：u —测点处流速，由毕托管测定；

φ'— 测点流速系数；

ΔH—管嘴的作用水头。

实验分析与讨论

1. 利用测压管测量点压强时，为什么要排气？怎样检验排净与否？

毕托管、测压管及其连通管只有充满被测液体，即满足连续条件，才有可能测得真值，否则如果其中夹有气柱，就会使测压失真，从而造成误差。误差值与气柱高度和其位置有关。对于非堵塞性气泡，虽不产生误差，但若不排除，实验过程中很可能变成堵塞性气柱而影响量测精度。检验的方法是毕托管置于静水中，检查分别与毕托管全压孔及静压孔相连通的两根测压管液面是否齐平。如果气体已排净，不管怎样抖动塑料连通管，两测管液面恒齐平。

2. 毕托管的动压头 h 和管嘴上、下游水位差 H之间的大关系怎样？为什么？

由于 $u = c\sqrt{2g\Delta h}$

且 $u = \varphi'\sqrt{2g\Delta h}$

即 $\Delta h = (\varphi'/c)^2\Delta H$

一般毕托管校正系数 c=11‰（与仪器制作精度有关）。喇叭型进口的管嘴出流，其中心点的点流速系数 φ'=0.9961‰。所以Δh<ΔH。

本实验Δh=21.1cm，ΔH=21.3cm，c=1.000。

3. 所测的流速系数说明了什么？

若管嘴出流的作用水头为 H，流量为 Q，管嘴的过水断面积为 A，相对管嘴平均流速 v，则有

$$v = \frac{Q}{A} = \varphi\sqrt{2g\Delta H}$$

φ称作管嘴流速系数。

若相对点流速而言，由管嘴出流的某流线的能量方程，可得

$$\Delta H=\frac{u^2}{2g}+h_w=\frac{u^2}{2g}+\zeta\frac{u^2}{2g}$$

$$u=\sqrt{\frac{1}{1+\zeta}}\sqrt{2g\Delta H}=\varphi'\sqrt{2g\Delta H}$$

$$\varphi'=\sqrt{\frac{1}{1+\zeta}}$$

式中：ζ 为流管在某一流段上的损失系数；φ' 为点流速系数。

本实验在管嘴淹没出流的轴心处测得 φ'=0.995，表明管嘴轴心处的水流由势能转换为动能的过程中有能量损失，但甚微。

4.据激光测速仪检测，距孔口 2—3cm 轴心处，其点流速系数为 0.996，试问本实验的毕托管精度如何？如何率定毕托管的修正系数 c？

若以激光测速仪测得的流速为真值 u，则有

$$u=\varphi'\sqrt{2g\Delta H}=0.996\sqrt{2\times980\times21.3}=203.51cm/s$$

而毕托管测得的该点流速为 203.46cm/s，则 ε=0.2‰

欲率定毕托管的修正系数，则可令

$$u=c\sqrt{2g\Delta h}=\varphi'\sqrt{2g\Delta h}$$

$$\therefore \quad c=\varphi'\sqrt{\Delta H/\Delta h}$$

本例：$c=0.996\sqrt{21.3/21.1}=1.0007\approx1.0$

5.普朗特毕托管的测速范围为 0.2—2m/s，轴向安装偏差要求不应大于 10 度，试说明原因。(低流速可用倾斜压差计)。

（1）施测流速过大过小都会引起较大的实测误差，当流速 u 小于 0.2m/s 时，毕托管测得的压差Δh 亦有

$$\Delta h<\frac{u^2}{2g}=\frac{20^2}{1960}=0.204cm$$

若用 30 倾斜压差计测量此压差值，因倾斜压差计的读数值差Δh 为

$$\Delta h'=\Delta h/\sin30^\circ=2\times0.204=0.408cm,$$

那么当有 0.5mm 的判读误差时，流速的相对误差可达 6% 。而当流速大于 2m/s 时，由于水流流经毕托管头部时会出现局部分离现象，从而使静压孔测得的压强偏低而造成误差。

（2）同样，若毕托管安装偏差角（α）过大，亦会引起较大的误差。因毕托管测得的流速 u 是实际流速 u 在其轴向的分速 ucosα，则相应所测流速误差为

$$\varepsilon=\frac{u-u\cos\alpha}{u}=1-\cos\alpha$$

α若>10，则 $\varepsilon>1-\cos10^\circ=0.015$

6.为什么在光、声、电技术高度发展的今天，仍然常用毕托管这一传统的流体测速仪器？

毕托管测速原理是能量守恒定律，容易理解。而毕托管经长期应用，不断改进，已十分完善 。具有结构简单，使用方便，测量精度高，稳定性好等优点。因而被广泛应用于液、气流的测量（其测量气体的流速可达 60m/s）。光、声、电的测速技术及其相关仪器，虽具有瞬时性，灵敏、精度高以及自动化记录等诸多优点，有些优点毕托管是无法达到的。但往往因其机构复杂，使用约束条件多及价格昂贵等因素，从

长短，环境温度的改变是否飘移等，难以直观判断。致使可靠度难以把握，因而所有光、声、电测速仪器，包括激光测速仪都不得不用专门装置定期率定（有时是利用毕托管作率定）。可以认为至今毕托管测速仍然是最可信，最经济可靠而简便的测速方法。

雷诺实验

实验原理

$$R_e = \frac{vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu} = KQ$$

$$K = \frac{4}{\pi d \nu}$$

实验分析与讨论

1.流态判据为何采用无量纲参数，而不采用临界流速？

雷诺在 1883 年以前的实验中，发现园管流动存在两种流态——层流和紊流，并且存在着层流转化为紊流的临界流速 V，V’与流体的粘性 ν 及园管的直径 d 有关，即

$$v' = f(\nu, d) \qquad (1)$$

因此从广义上看，V’不能作为流态转变的判据。

为了判别流态，雷诺对不同管径、不同粘性液体作了大量的实验，得出了用无量纲参数（vd/ν）作为管流流态的判据。他不但深刻揭示了流态转变的规律，而且还为后人用无量纲化的方法进行实验研究树立了典范。用无量纲分析的雷列法可得出与雷诺数结果相同的无量纲数。

可以认为式（1）的函数关系能用指数的乘积来表示。即

$$v' = K \nu^{\alpha_1} d^{\alpha_2} \qquad (2)$$

其中 K 为某一无量纲系数。

式（2）的量纲关系为

$$\left[L T^{-1}\right] = \left[L^2 T^{-1}\right]^{\alpha_1} \left[L\right]^{\alpha_2} \qquad (3)$$

从量纲和谐原理，得

L：$2\alpha_1 + \alpha_2 = 1$

T：$-\alpha_1 = -1$

联立求解得 $\alpha_1 = 1$， $\alpha_2 = -1$

将上述结果，代入式（2），得

$$V' = K\frac{\nu}{d} \quad 或 \quad K = \frac{v'd}{\nu}$$

雷诺实验完成了 K 值的测定，以及是否为常数的验证。结果得到 K=2320。于是，无量纲数 vd/ν 便成了适应于任何管径，任何牛顿流体的流态转变的判据。由于雷诺的奉献，vd/ν 定命为雷诺数。

随着量纲分析理论的完善，利用量纲分析得出无量纲参数，研究多个物理量间的关系，成了现今实验研究的重要手段之一。

2.为何认为上临界雷诺数无实际意义，而采用下临界雷诺数作为层流与紊流的判据？实测下临界雷诺数为多少？

～5000 范围内，与操作快慢，水箱的紊动度，外界干扰等密切相关。有关学者做了大量实验，有的得 12000，有的得 20000，有的甚至得 40000。实际水流中，干扰总是存在的，故上临界雷诺数为不定值，无实际意义。只有下临界雷诺数才可以作为判别流态的标准。凡水流的雷诺数小于下临界雷诺数者必为层流。一般实测下临界雷诺数为 2100 左右。

3.雷诺实验得出的圆管流动下临界雷诺数 2320，而目前一般教科书中介绍采用的下临界雷诺数是 2000，原因何在？

下临界雷诺数也并非与干扰绝对无关。雷诺实验是在环境的干扰极小，实验前水箱中的水体经长时间的稳定情况下，经反复多次细心量测才得出的。而后人的大量实验很难重复得出雷诺实验的准确数值，通常在 2000～2300 之间。因此，从工程实用出发，教科书中介绍的园管下临界雷诺数一般是 2000。

4.试结合紊动机理实验的观察，分析由层流过渡到紊流的机理何在？

从紊动机理实验的观察可知，异重流（分层流）在剪切流动情况下，分界面由于扰动引发细微波动，并随剪切流速的增大，分界面上的波动增大，波峰变尖，以至于间断面破裂而形成一个个小旋涡。使流体质点产生横向紊动。正如在大风时，海面上波浪滔天，水气混掺的情况一样，这是高速的空气和静止的海水这两种流体的界面上，因剪切流动而引起的界面失稳的波动现象。由于园管层流的流速按抛物线分布，过流断面上的流速梯度较大，而且因壁面上的流速恒为零。相同管径下，如果平均流速越大则梯度越大，即层间的剪切流速越大，于是就容易产生紊动。紊动机理实验所见的波动→破裂→旋涡→质点紊动等一系列现象，便是流态从层流转变为紊流的过程显示。

5.分析层流和紊流在运动学特性和动力学特性方面各有何差异？

层流和紊流在运动学特性和动力学特性方面的差异如下表：

	运动学特性:	动力学特性:
层流:	1.质点有律地作分层流动	1.流层间无质量传输
	2.断面流速按抛物线分布	2.流层间无动量交换
	3.运动要素无脉动现象	3.单位质量的能量损失与流速的一次方成正比
紊流:	1.质点互相混掺作无规则运动	1.流层间有质量传输
	2.断面流速按指数规律分布	2.流层间存在动量交换
	3.运动要素发生不规则的脉动现象	3.单位质量的能量损失与流速的（1.75～2）次方成正比

实验六 文丘里流量计实验

实验原理

根据能量方程式和连续性方程式，可得不计阻力作用时的文氏管过水能力关系式

$$Q'=\frac{\frac{\pi}{4}d_1^2}{\sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4-1}}\sqrt{2g\left[\left(Z_1+\frac{p_1}{\gamma}\right)-\left(Z_2+\frac{p_2}{\gamma}\right)\right]}=K\sqrt{\Delta h}$$

$$K=\frac{\pi}{4}d_1^2\sqrt{2g}\Big/\sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4-1}$$

$$\Delta h=\left(Z_1+\frac{p_1}{\gamma}\right)-\left(Z_2+\frac{p_2}{\gamma}\right)$$

式中：Δh 为两断面测压管水头差。

由于阻力的存在，实际通过的流量 Q 恒小于 Q 。今引入一无量纲系数 μ=Q/Q’（μ称为流量系数），对计算所得的流量值进行修正。

$$Q=\mu Q'=\mu K\sqrt{\Delta h}$$

另，由水静力学基本方程可得气—水多管压差计的Δh 为 $\Delta h=h_1-h_2+h_3-h_4$

1.本实验中，影响文丘里管流量系数大小的因素有哪些？哪个因素最敏感？对 d_2=0.7cm 的管道而言，若因加工精度影响，误将（d_2－0.01）cm值取代上述 d_2 值时，本实验在最大流量下的μ值将变为多少？

由式

$$Q=\mu\frac{\pi}{4}d_1^2\sqrt{2g\Delta h}/\sqrt{\left(d_1/d_2\right)^4-1}\text{得}$$

$$\mu=Q\sqrt{d_2^{-4}-d_1^{-4}}/\frac{\pi}{4}\sqrt{2g\Delta h}$$

可见本实验（水为流体）的μ值大小与 Q、d_1、d_2、Δh 有关。其中 d_1、d_2 影响最敏感。本实验中若文氏管 d_1 =1.4cm，d_2=0.71cm，通常在切削加工中 d_1 比 d_2 测量方便，容易掌握好精度，d_2 不易测量准确，从而不可避免的要引起实验误差。例如当最大流量时μ值为 0.976，若 d_2 的误差为－0.01cm，那么μ值将变为 1.006，显然不合理。

2.为什么计算流量 Q' 与实际流量 Q不相等？

因为计算流量 Q 是在不考虑水头损失情况下，即按 理想液体推导的，而实际流体存在粘性必引起阻力损失，从而减小过流能力，Q<Q'，即μ<1.0。

3.试证气—水多管压差计（图 6.4）有下列关系：

$$\left(Z_1+p_1/\gamma\right)-\left(Z_2+p_2/\gamma\right)=h_1-h_2+h_3-h_4$$

如图 6. 4所述，$\Delta h_1=h_1-h_2,\Delta h_2=h_3-h_4$，

$$\because \frac{p_1}{\gamma}=\frac{p_2}{\gamma}-H_2+\Delta h_2-H_3+\Delta h_1+H_3+H_1$$

$$=\frac{p_2}{\gamma}-H_2+\Delta h_2+\Delta h_1+H_1$$

$$\therefore \left(Z_1+p_1/\gamma\right)-\left(Z_2+p_2/\gamma\right)=Z_1+p_2/\gamma-H_2+\Delta h_2+\Delta h_1+H_1-Z_2-p_2/\gamma$$

$$=\left(Z_1+H_1\right)-\left(Z_2+H_2\right)+\Delta h_1+\Delta h_2$$

$$=h_1-h_2+h_3-h_4$$

4.试应用量纲分析法，阐明文丘里流量计的水力特性。

运用量纲分析法得到文丘里流量计的流量表达式，然后结合实验成果，便可进一步搞清流量计的量测特性。

对于平置文丘里管，影响 v_1 的因素有：文氏管进口直径 d_1，喉径 d_2、流体的密度ρ、动力粘滞系数μ及两个断面间的压强差ΔP。根据π定理有

$$f\left(v^2,d_1,d_2,\rho,\mu,\Delta p\right)=0$$

从中选取三个基本量，分别为：