

水力学实验

Hydromechanics Experiment



大连理工大学水利水电研究所

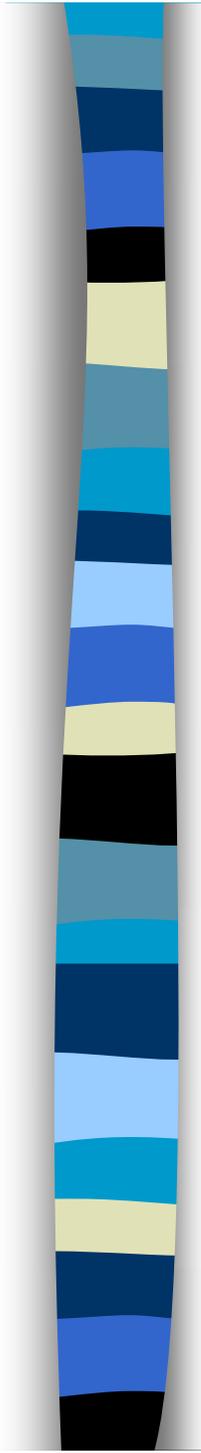
工程水力学实验室

2011年4月



实验要求

- 实验分组进行，2人一组。
- 实验结束后三天上交实验报告。每项实验至少选做《水力学实验教程》中的一道思考题。
- 实验中注意安全，小心使用实验设备。
- 请保持实验室卫生，下课后带走随身物品。

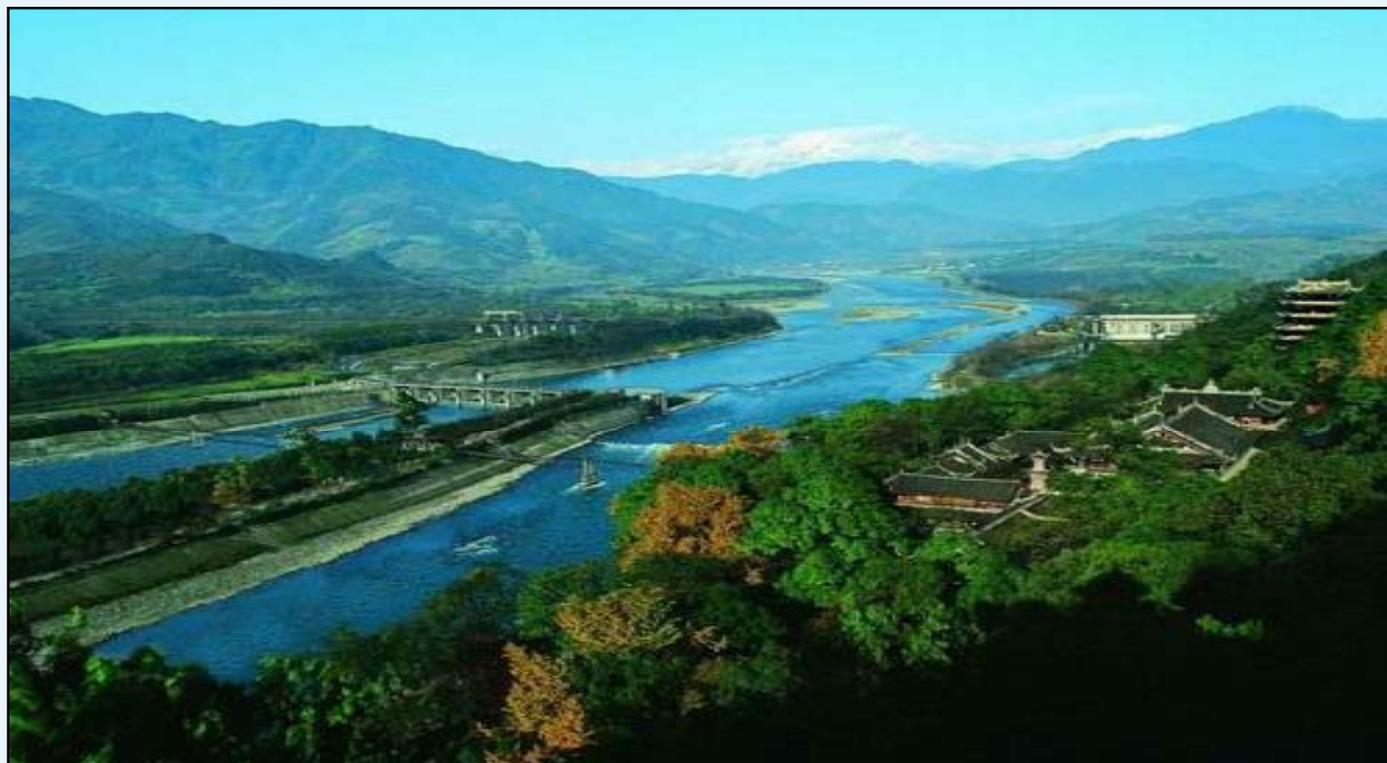


实验内容

- 实验2.1 验证水静力学基本方程
- 实验3.1 水流的能量转换实验
- 实验4.4 文丘里流量计实验
- 实验5.1 毕托管测流速

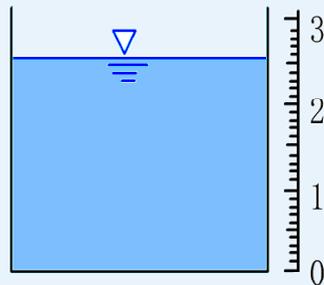
流体参数的测量

- 水力四大要素：水位、压强、流量、流速。

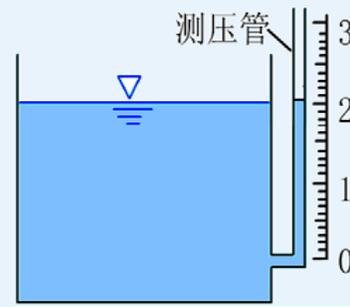


水位的测量

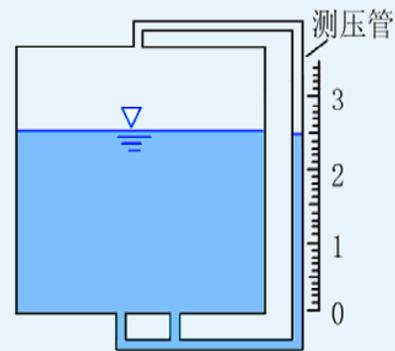
1. 测尺法



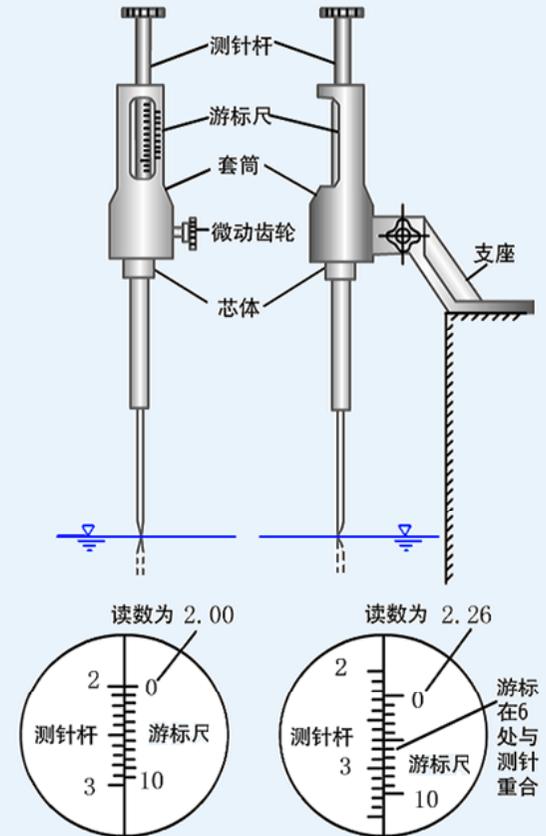
2. 测压管法



4. 跟踪式水位仪

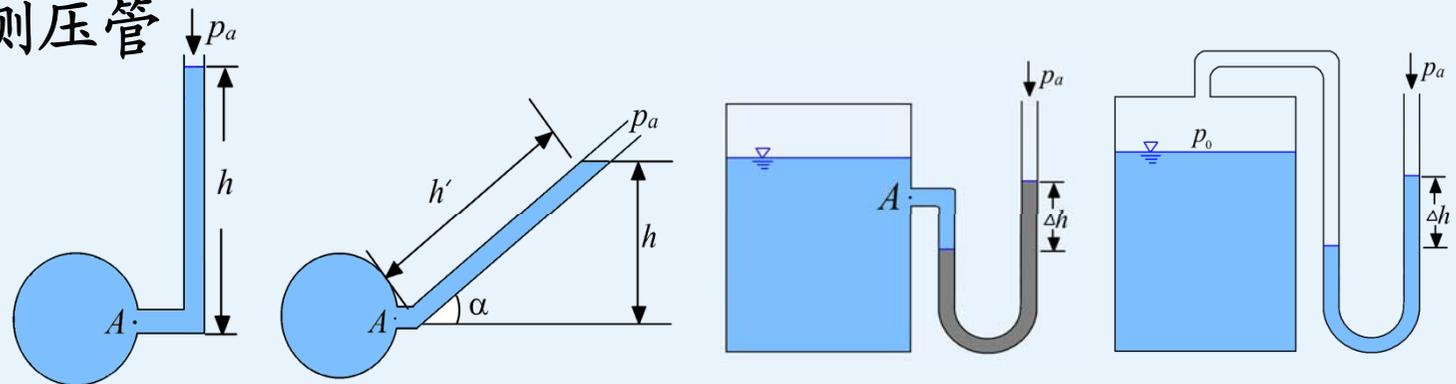


3. 测针法

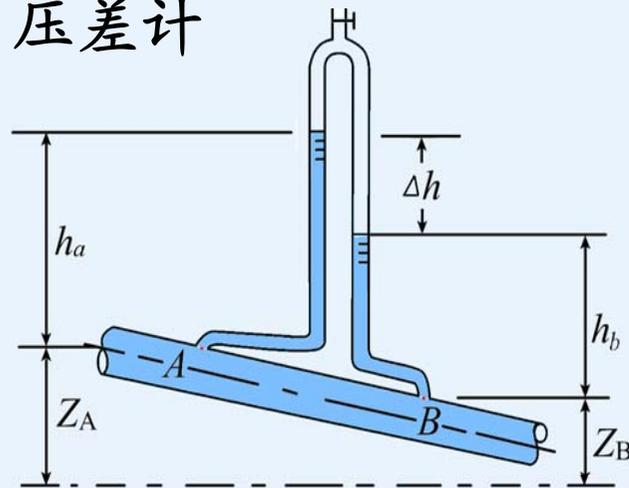


压强的测量

1. 测压管



2. 压差计



3. 压力传感器

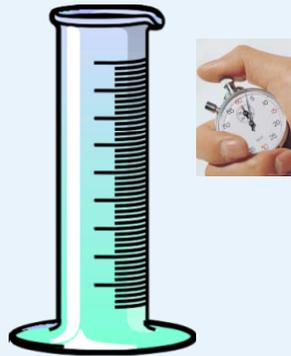


4. 压力表

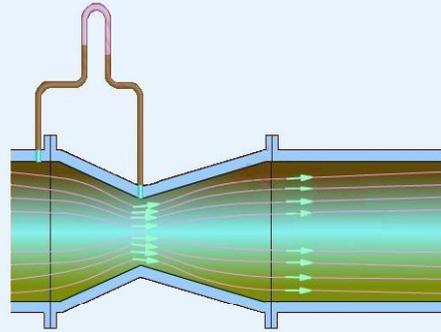


流量的测量

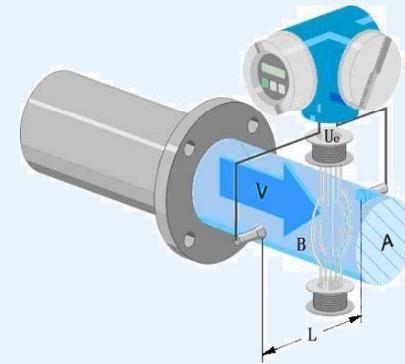
1. 体积法



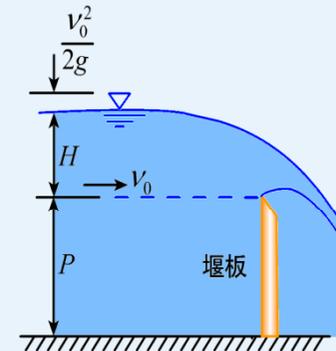
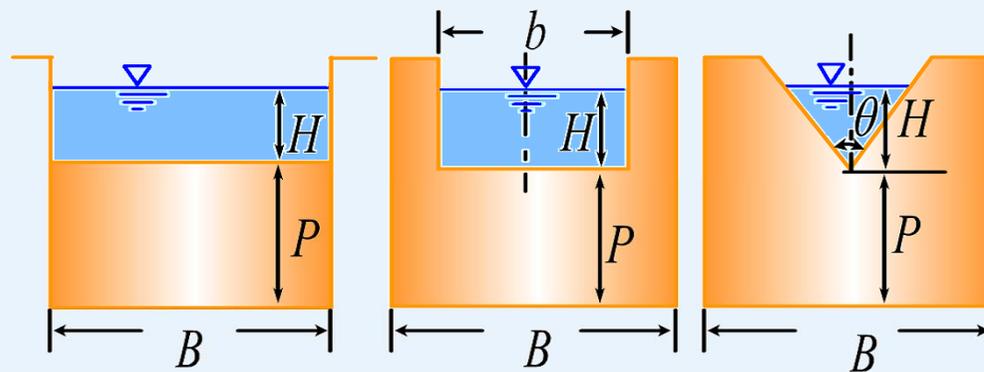
2. 文丘里流量计



3. 电磁流量计

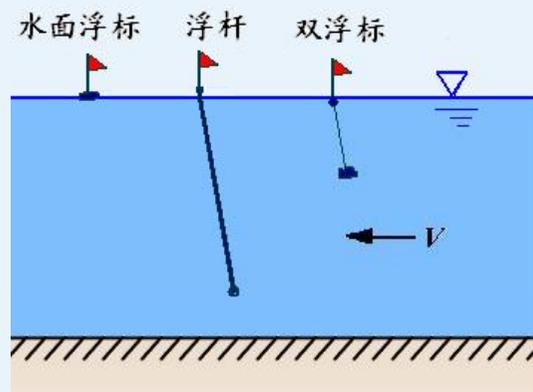


4. 量水堰

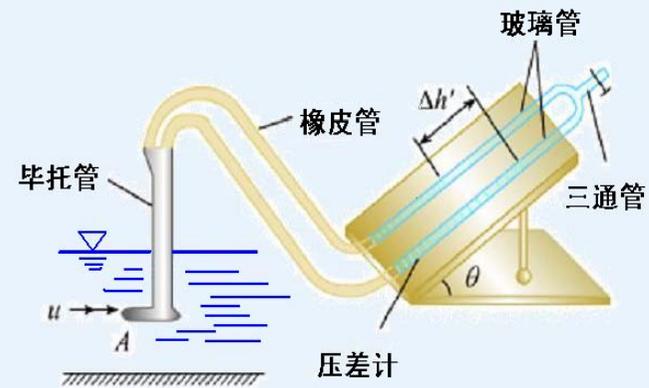


流速的测量

1. 浮标法

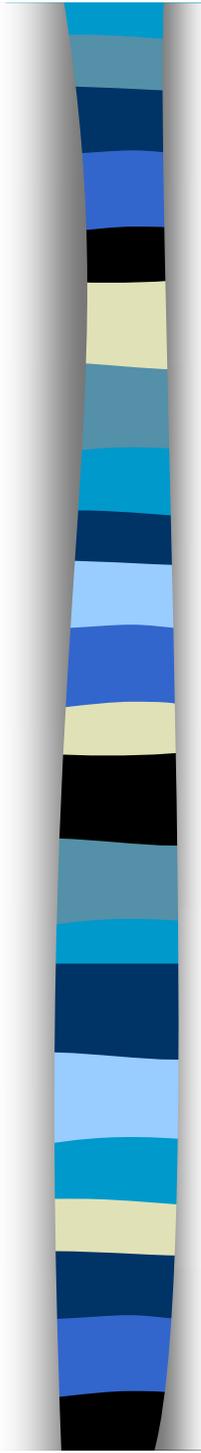


2. 毕托管



3. 旋桨流速仪





■ 实验2.1 验证水静力学基本方程

实验目的

- 通过实验加深理解水静力学基本方程的物理意义和几何意义。
- 加深理解位置水头、压强水头、测压管水头的基本概念，验证水静力学的基本方程。
- 学习测量在正压、负压时液体表面压强。
- 学习测量未知液体比重的方法。

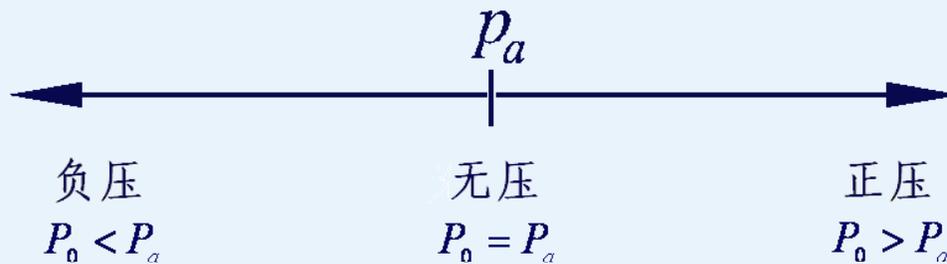
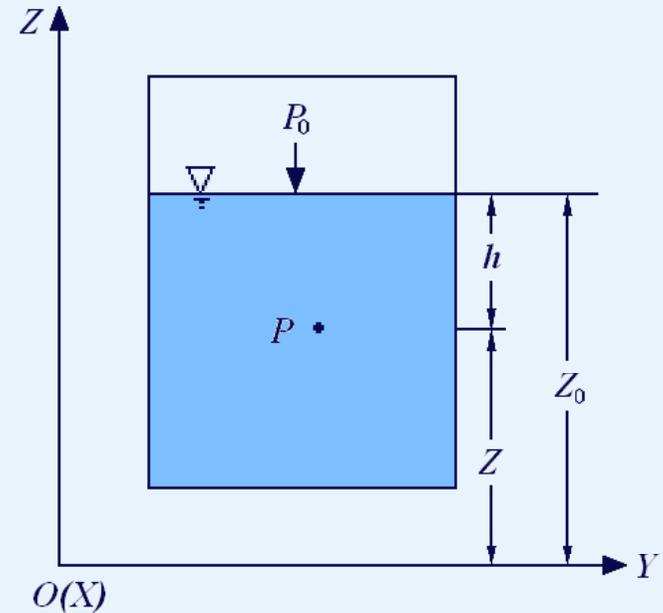
实验原理

■ 水静力学基本方程:

$$Z + \frac{P}{\gamma} = \text{Const}$$

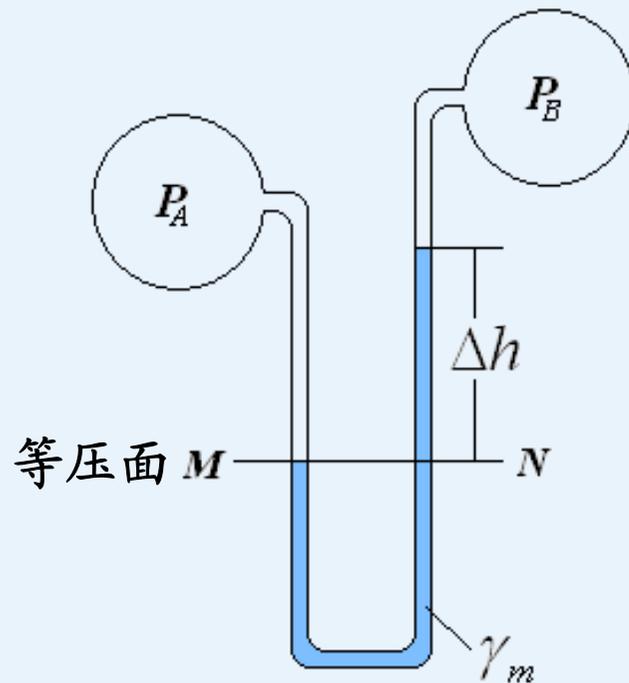
$$P = P_0 + \gamma(Z_0 - Z) = P_0 + \gamma h$$

■ 液体表面压强



实验原理

- 等压面原理：只受重力的作用下，连通的同种液体内，等压面是水平面。

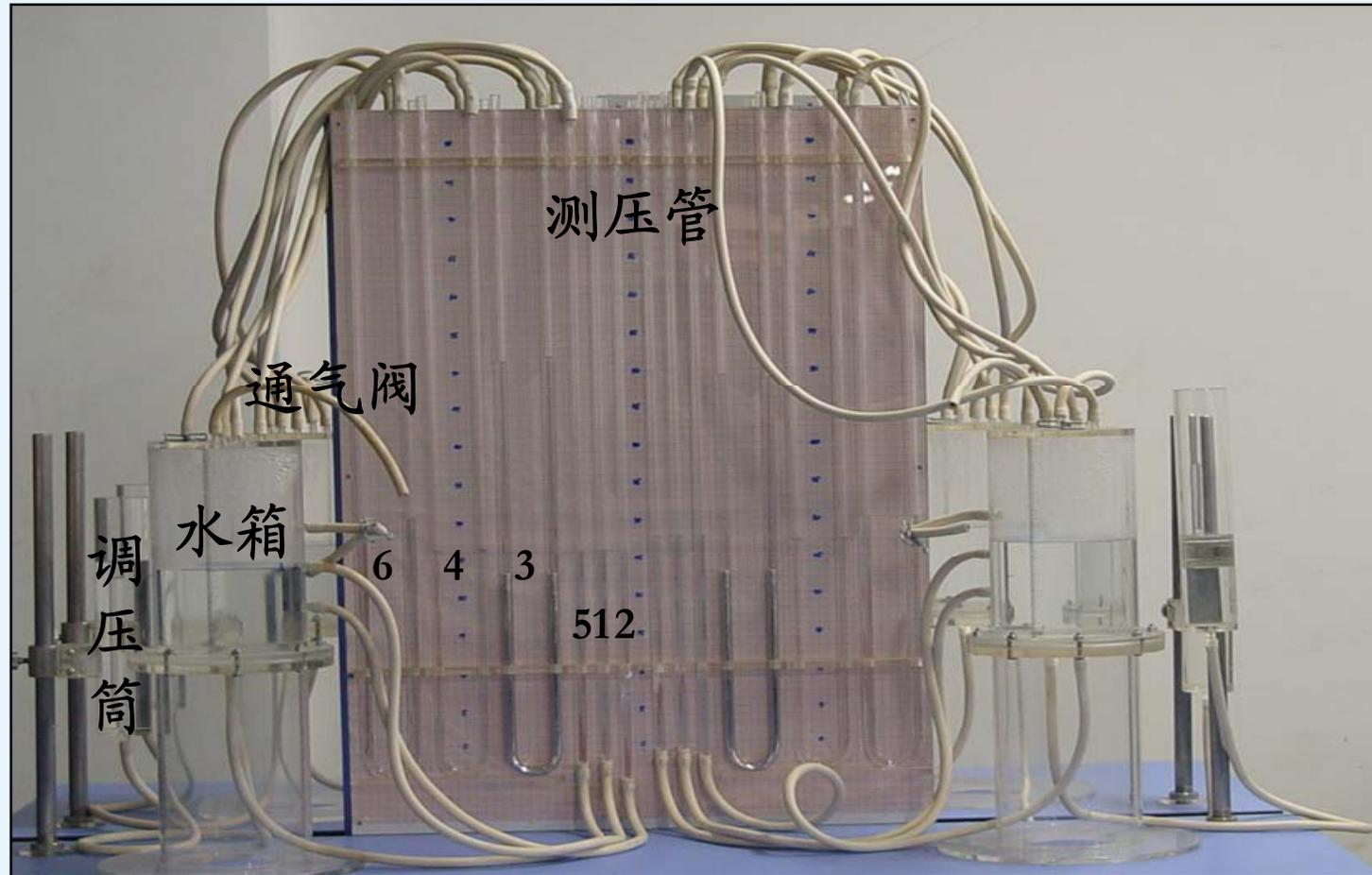


$$p_M = p_A$$

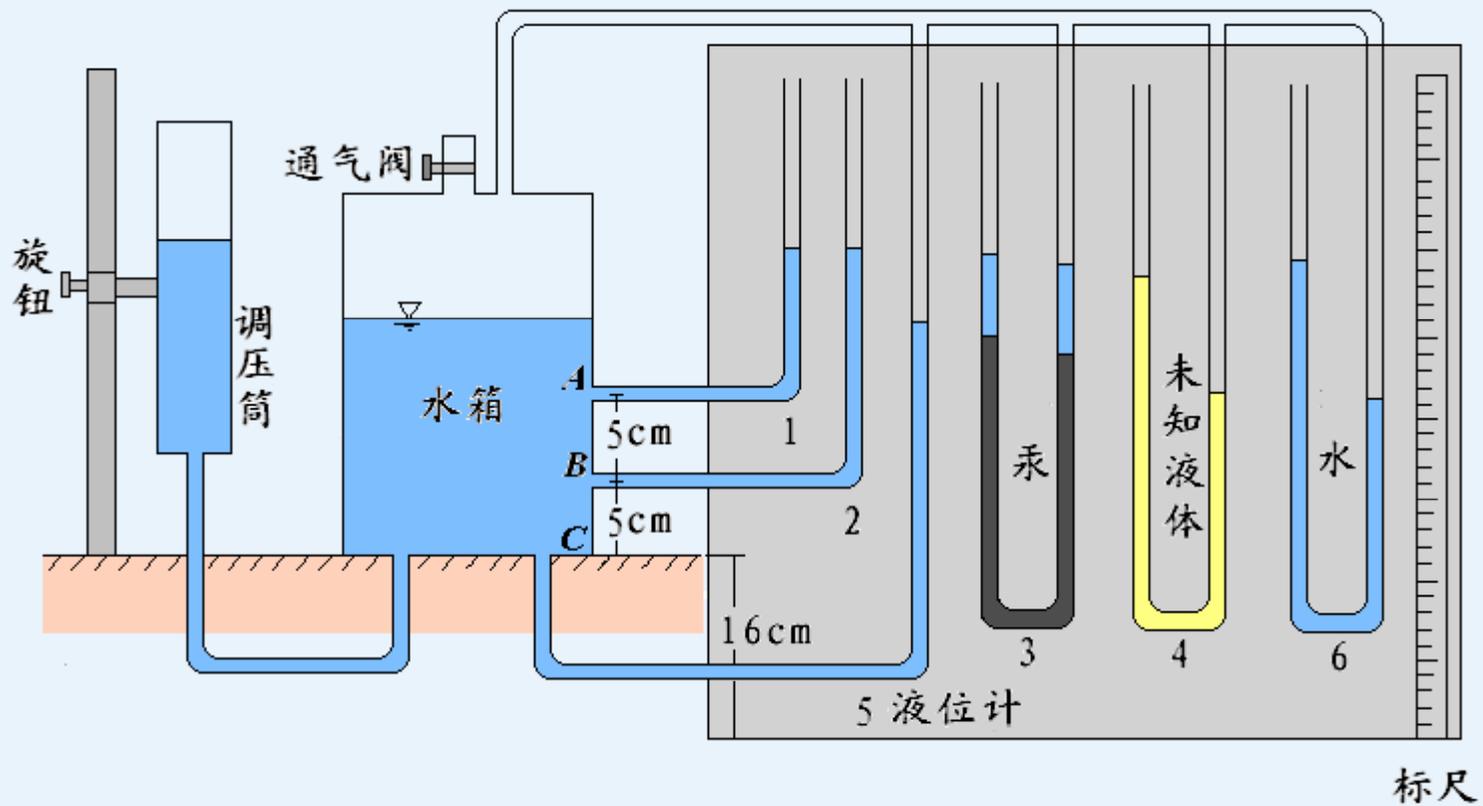
$$p_N = p_B + \gamma_m \Delta h$$

$$\therefore p_A - p_B = \gamma_m \Delta h$$

实验设备



实验设备

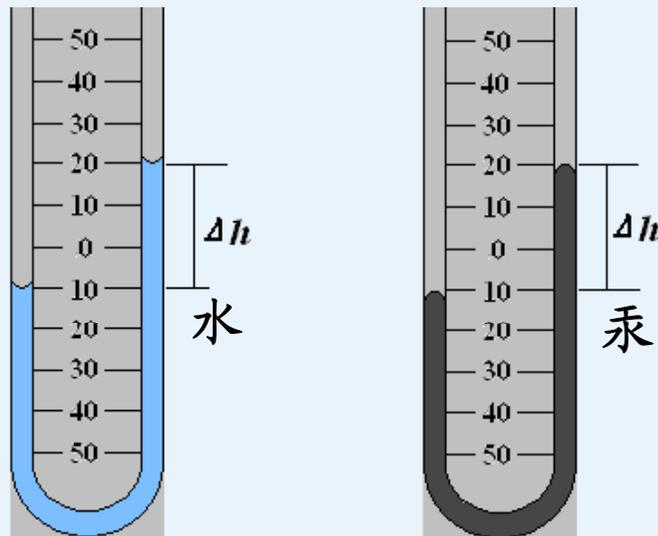


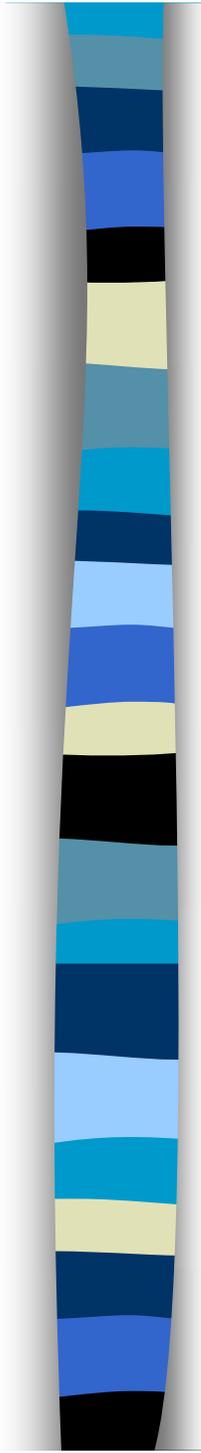
实验步骤

- 熟悉实验设备，记录各测点的位置水头。
- 将调压筒放到适当位置，打开通气阀，待液面稳定后读取各测压管读数。
- 关闭通气阀，上调调压筒，待液面稳定后读取各测压管读数。
- 下调调压筒，待液面稳定后读取各测压管读数。
- 根据实验数据计算 4 号测压管中未知液体的比重。
- 实验结束。

实验提示

- 液体的比重为该液体的密度与在标准大气压时纯水密度的比值，无量纲。
- 待稳定后再读取数据，开口测压管直接读数，U型管读两管之差。





■ 实验3.1 水流的能量转换实验

实验目的

- 水流在管内作恒定流动的情况下，当管道断面改变时，观察动能与势能的变化。
- 测定各断面单位质量水体的位置水头、压强水头以及流速水头，比较分析各断面的测压管水头和总水头，加深对伯努利方程的了解。
- 建立沿程水头损失和局部水头损失的概念。

实验原理

- 理想不可压缩流体的伯努力方程:

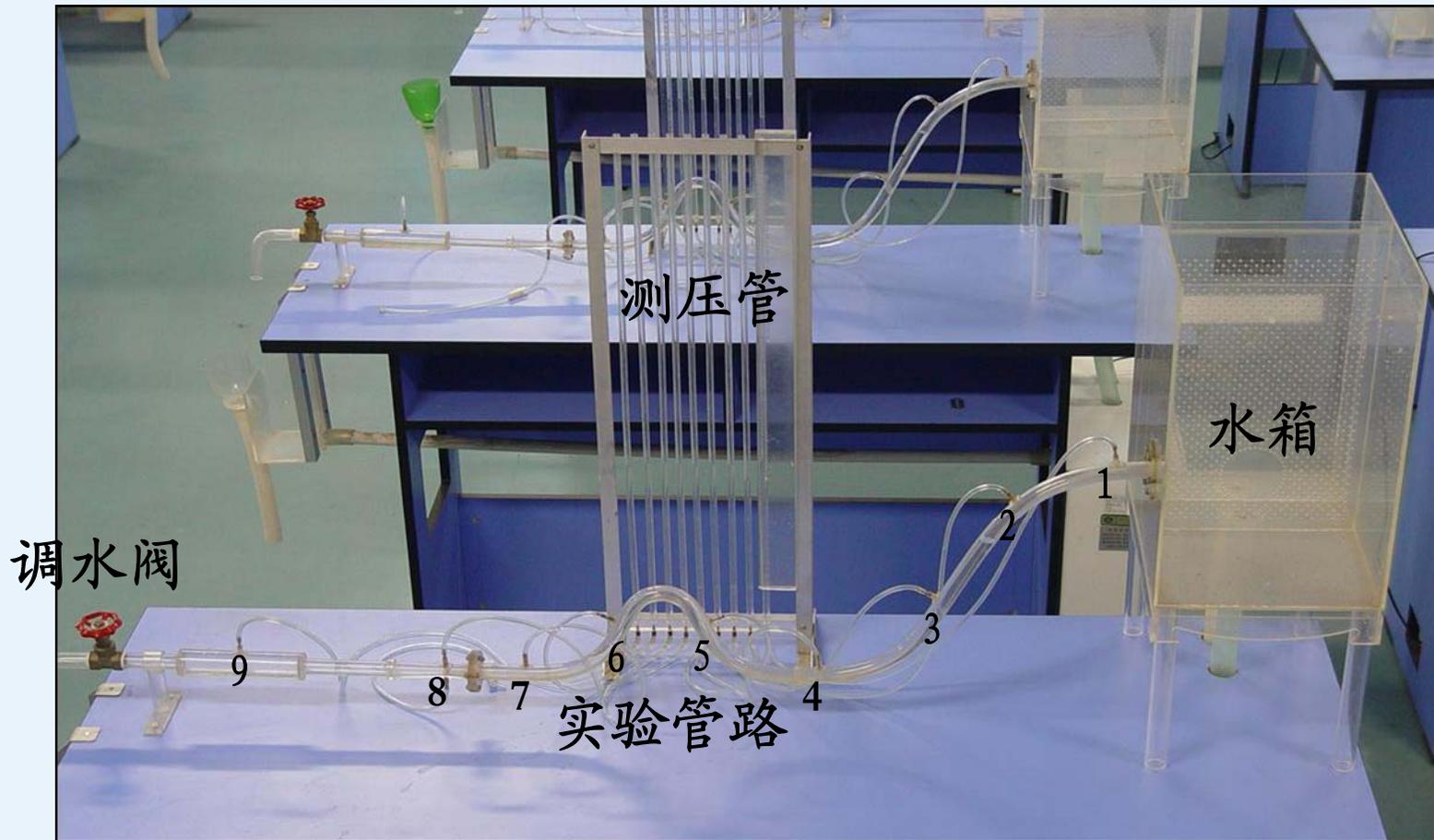
$$Z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{const}$$

- 不可压缩实际液体的伯努力方程:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{w1 \rightarrow 2}$$

↓
能量损失

实验设备



实验步骤

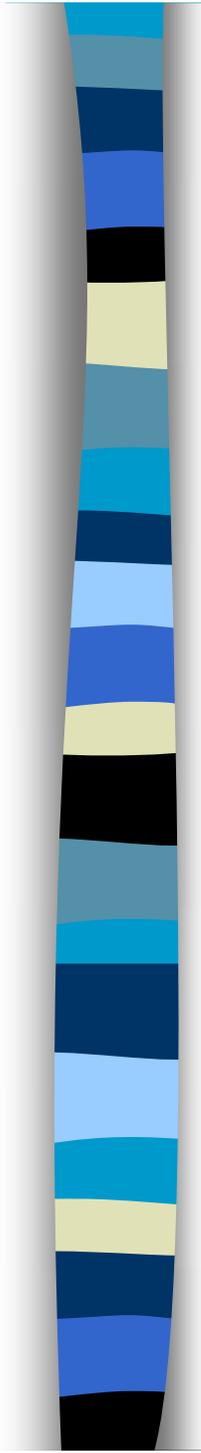
- 熟悉实验设备，记录各测点的断面尺寸以及位置水头。
- 插上供水电源，待水箱充满并保持溢流后，关闭调水阀，调平各测点的测压管水面。
- 开启流量调节阀，待流动稳定后用体积法测量流量，并记录各测压管读数。
- 改变阀门开度，重复上一步骤。
- 实验结束。

实验提示

- 流量调节阀开启要缓慢，注意测压管中水位的变化，不要使测压管水面下降太多以免空气倒吸入管路系统，影响试验进行。
- 体积法测量流量时，体积至少800~1000ml。
- 秒表的用法： 回零 计时/停止



实验注意事项 



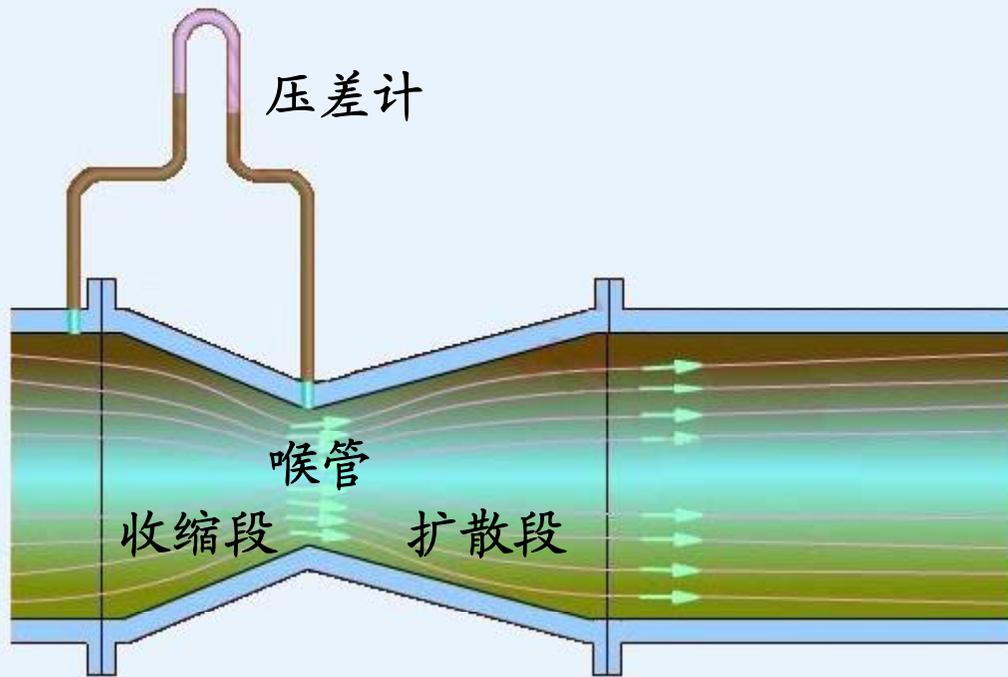
■ 实验4.4 文丘里流量计实验

实验目的

- 了解文丘里流量计测流量的原理及其构造。
- 找出压差和流量的关系，率定文丘里流量计，确定文丘里流量计的系数 μ 。

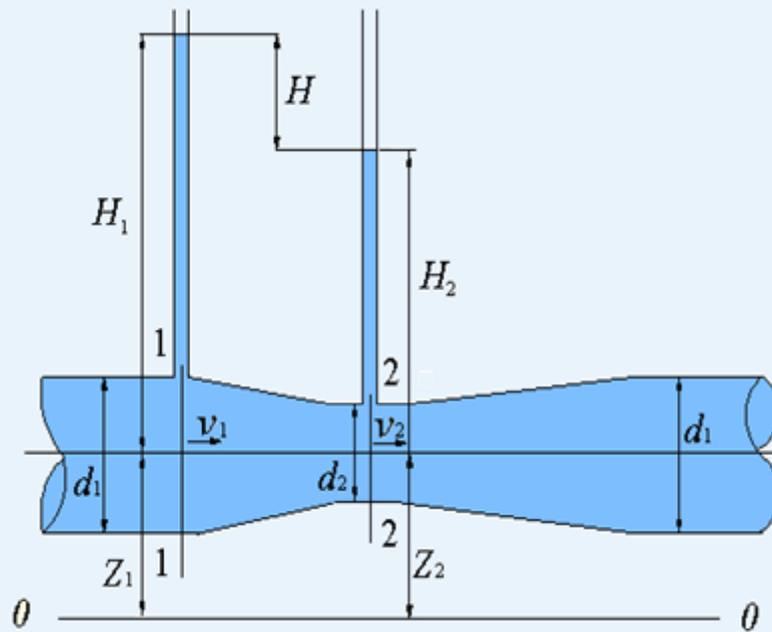
实验原理

■ 文丘里流量计构造



实验原理

■ 理论公式推导:



$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\therefore H = H_1 - H_2 = \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g}$$

根据连续性方程 $A_1 v_1 = A_2 v_2$

$$\text{则 } v_1 = \frac{d_2^2}{\sqrt{d_1^4 - d_2^4}} \sqrt{2gH}$$

实验原理

■ 计算流量:

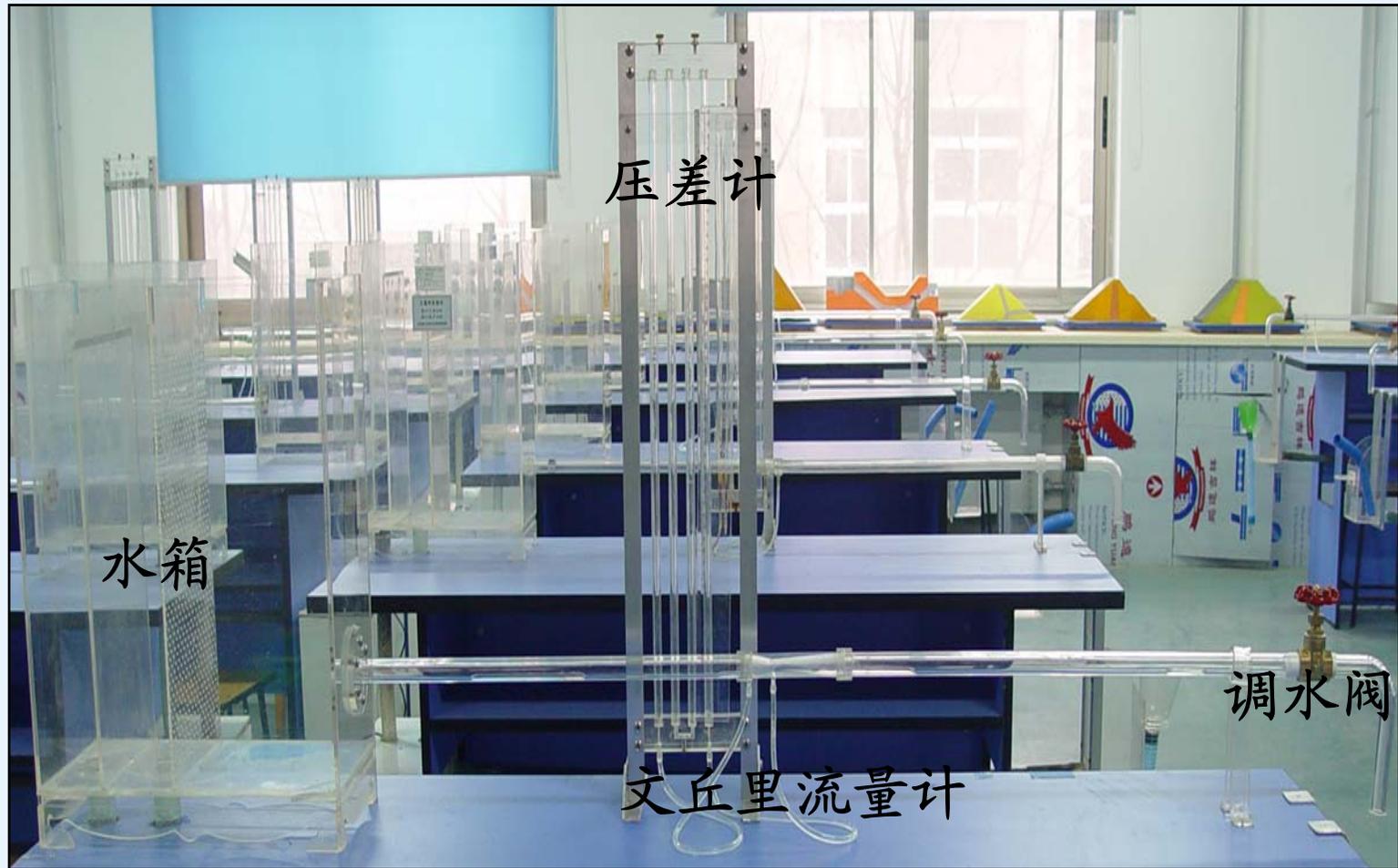
$$Q_0 = A_1 v_1 = \frac{\pi}{4} \frac{d_1^2 d_2^2}{\sqrt{d_1^4 - d_2^4}} \sqrt{2gH} = K_0 \sqrt{H}$$

$$\text{其中, } K_0 = \frac{\pi}{4} \frac{d_1^2 d_2^2}{\sqrt{d_1^4 - d_2^4}} \sqrt{2g}$$

■ 实际流量: $Q = \mu Q_0$

■ 流量系数 $\mu = \frac{Q}{Q_0}$ ($\mu < 1$)

实验设备

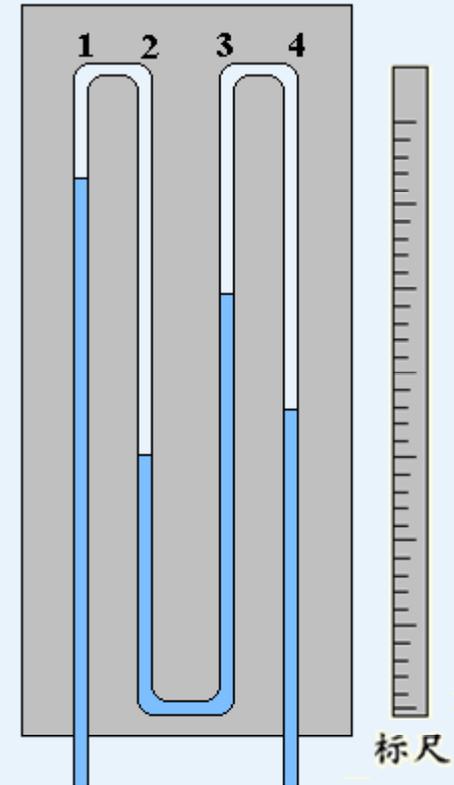


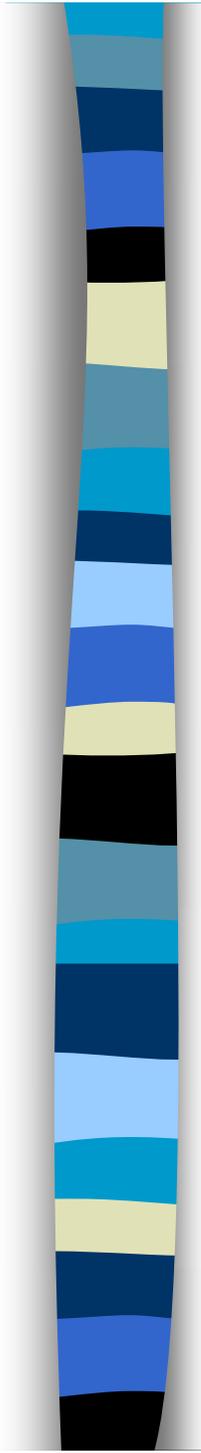
实验步骤

- 熟悉实验设备，并记录管径等相关数据。
- 插上供水电源，打开流量调节阀放入最大流量，待流动稳定后，用体积法测量流量，并记录压差计的读数。
- 逐渐关闭阀门，减小流量，重复上述步骤共做 8 次。
- 实验结束。

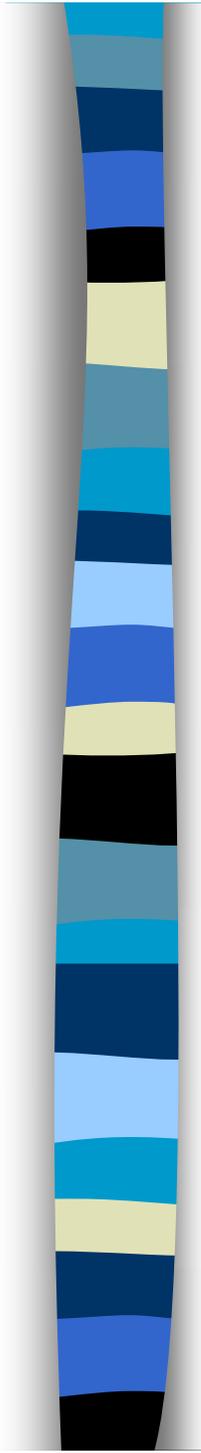
实验提示

- 开启流量控制阀时，应注意在压差计的量程范围之内。
- 读取压差的数据时，应用 1 管、3 管的读数之和减去 2 管、4 管的读数之和。
- 在计算数据时注意单位的统一，重力加速度的单位应换算成 cm/s^2 。





■ 实验5.1 毕托管测流速

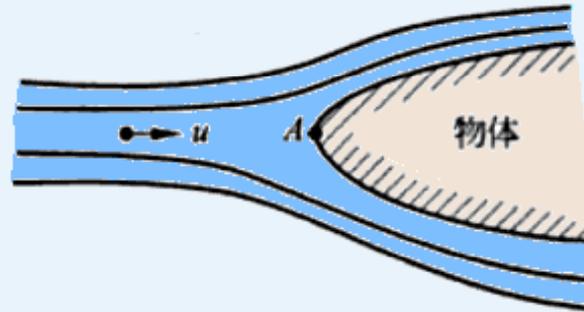


实验目的

- 了解毕托管的构造和测速的基本原理。
- 掌握毕托管测量点流速的方法。
- 测量明渠中的水平和垂直方向的流速分布。

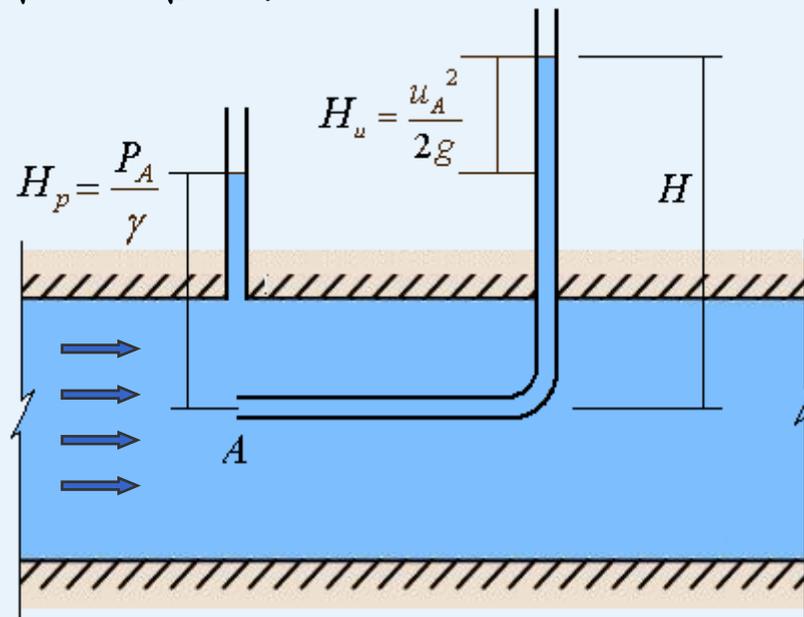
实验原理

■ 水流的驻点



$$H_u = \frac{u_A^2}{2g}$$

■ 毕托管原理



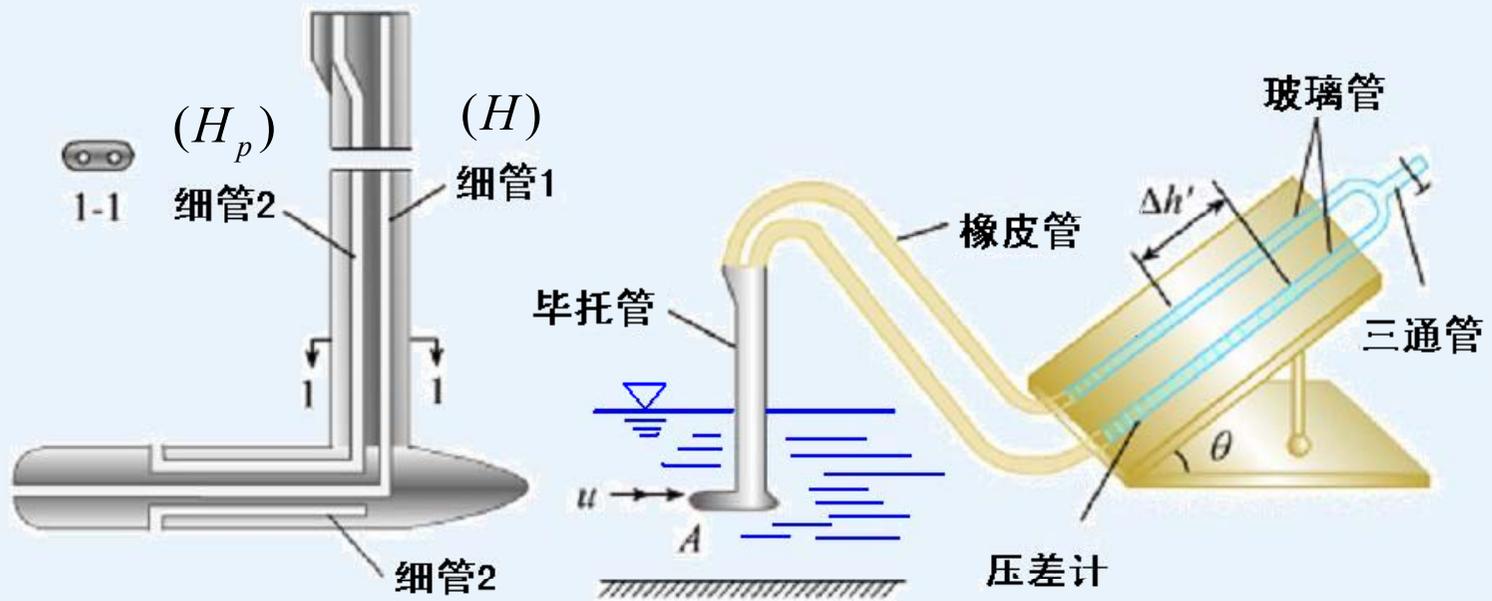
$$H = H_p + H_u$$

A点流速:

$$\begin{aligned} u_A &= \sqrt{2gH_u} \\ &= \sqrt{2g(H - H_p)} \end{aligned}$$

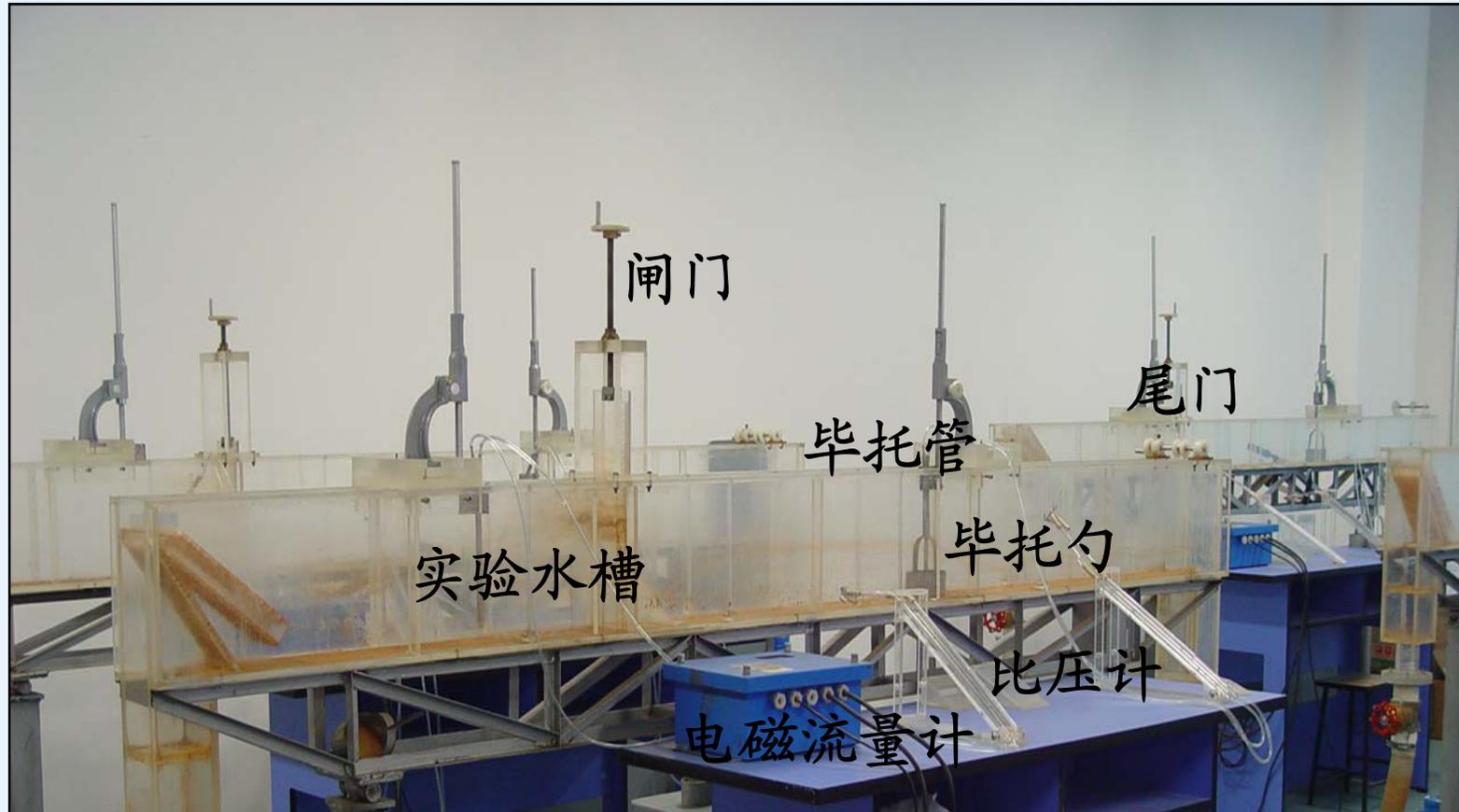
实验原理

■ 毕托管构造



$$\Delta h = \sin \theta \cdot \Delta h'$$

实验设备

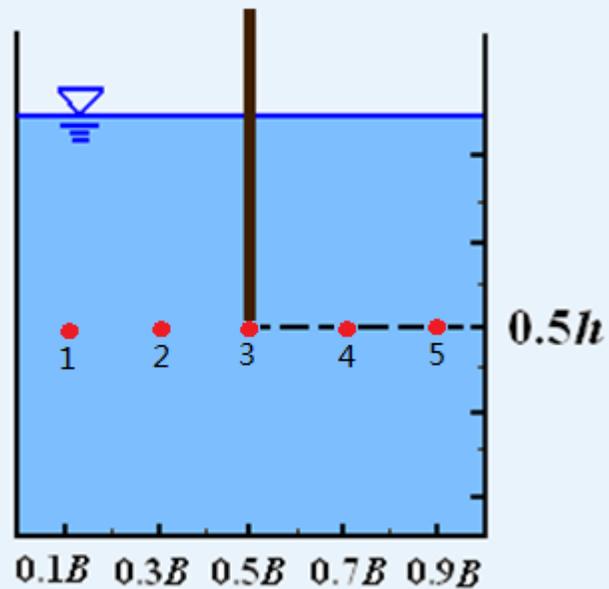


实验步骤

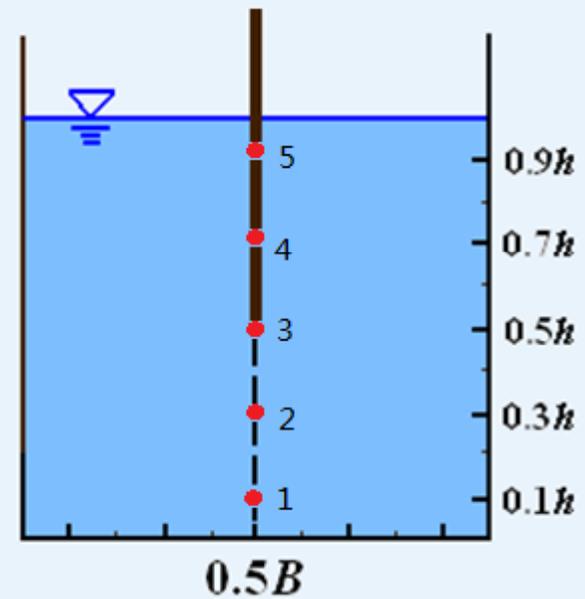
- 熟悉设备，检查系统有无气泡，记录槽宽等相关数据。
- 插上供水电源，将水放入明槽中，细心拿开毕托勺，使槽内保持适当的水深，并记录流量计及水深读数。
- 待流动稳定后，开始测量水平方向及垂直方向的流速分布，记录斜比压计读数。

实验步骤

■ 流速分布测点:



水平面上流速



垂直面上流速

实验提示

- 在测量流速时毕托管的探头应正对来流方向。
- 在实验过程中，毕托管的头部不能露出水面以免进气。实验结束时，将毕托管放入毕托勺内后再关闭电源。
- 电磁流量转换器读数的换算公式：

$$\text{读数}(\text{m}^3/\text{h}) = \frac{\text{读数} \times 10^6}{3600} (\text{cm}^3/\text{s})$$

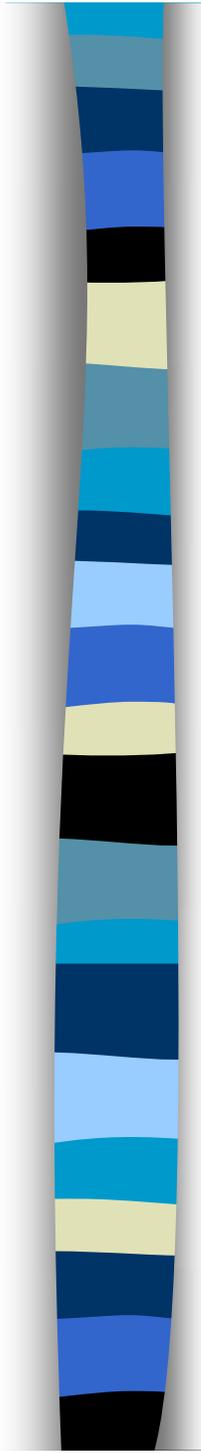
- 比压计的斜度为 30° 。





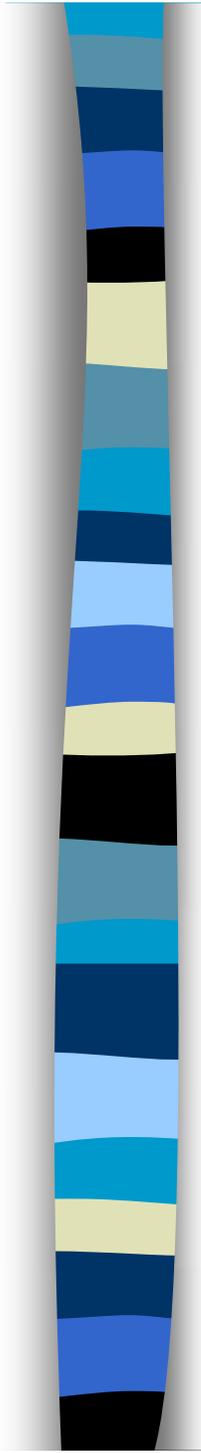
下次实验内容

- 实验4.1 流动形态实验
- 实验4.2 管流的沿程阻力实验
- 实验4.3 管路局部阻力实验
- 实验5.2 水跃实验
- 实验6.2 闸孔出流实验



实验内容

- 实验4.1 流动形态实验
- 实验4.2 管流的沿程阻力实验
- 实验4.3 管路局部阻力实验
- 实验5.2 水跃实验
- 实验6.2 闸孔出流实验



■ 实验4.1 流动形态实验

实验目的

- 观察水流的层流形态和紊流形态。
- 分析层流和紊流的流态下，沿程水头损失 h_f 随流速 v 或雷诺数 Re 的变化规律。
- 学习测量圆管中雷诺数的方法，通过实验确定下临界雷诺数。

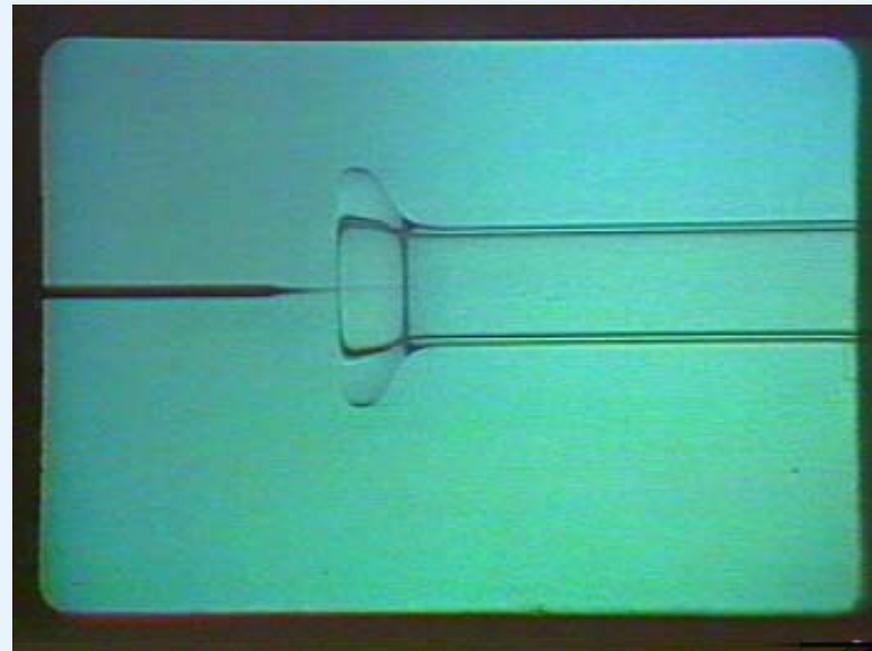
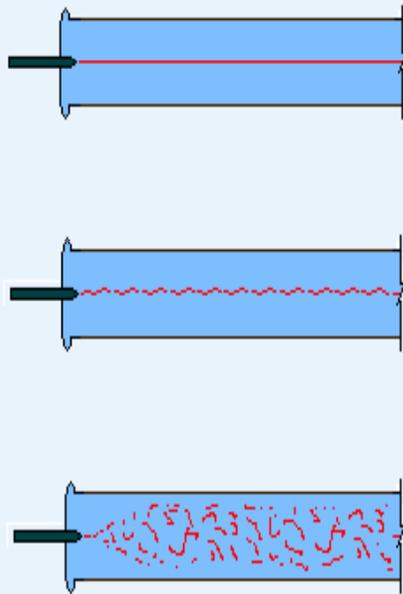
实验原理

■ 流动现象

(1) 层流状态

(2) 过渡状态

(3) 紊流状态



实验原理

- 层流 → 紊流: $ABCDE$
紊流 → 层流: $EDBA$

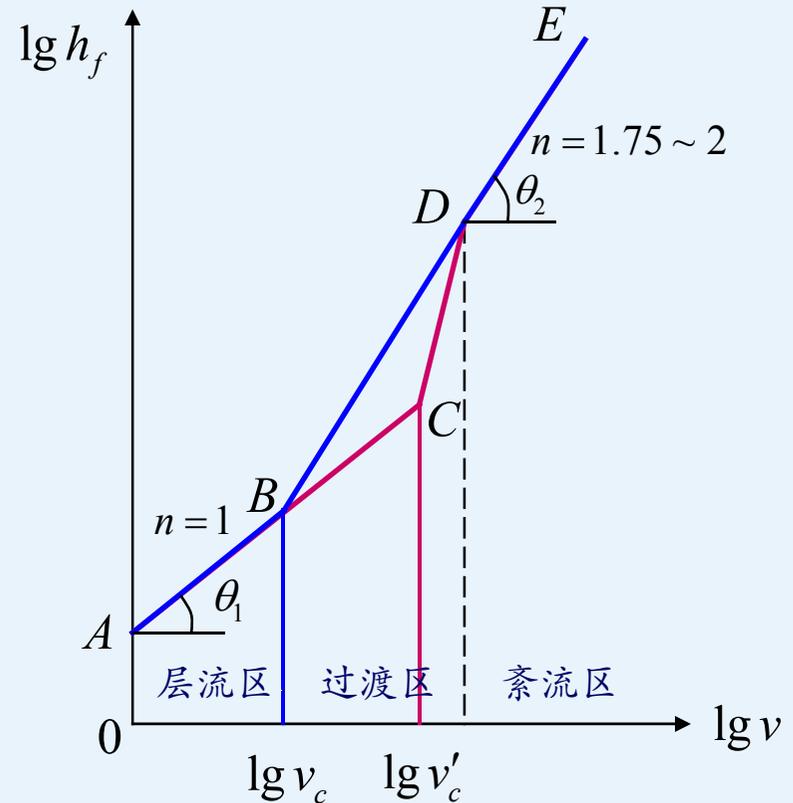
- AB 段和 DE 段:

$$\lg h_f = \lg k + n \lg v$$

$$h_f = kv^n$$

其中,

$$n = \begin{cases} 1.0 & (\text{层流}) \\ 1.75 \sim 2.0 & (\text{紊流}) \end{cases}$$



实验原理

■ 雷诺数:

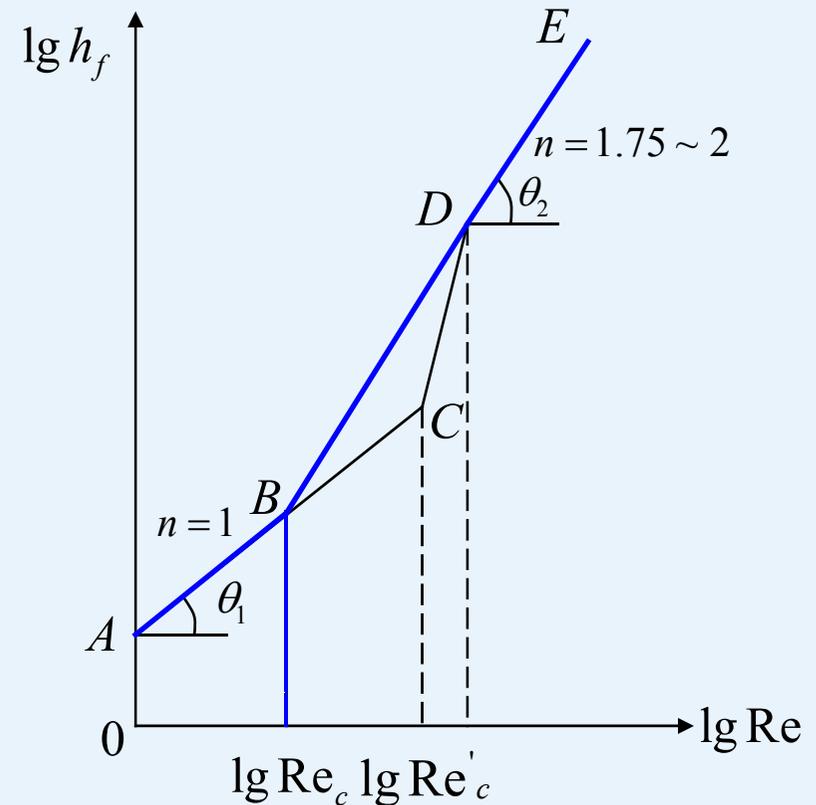
$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} = KQ$$

其中, $K = \frac{4}{\pi d \nu}$

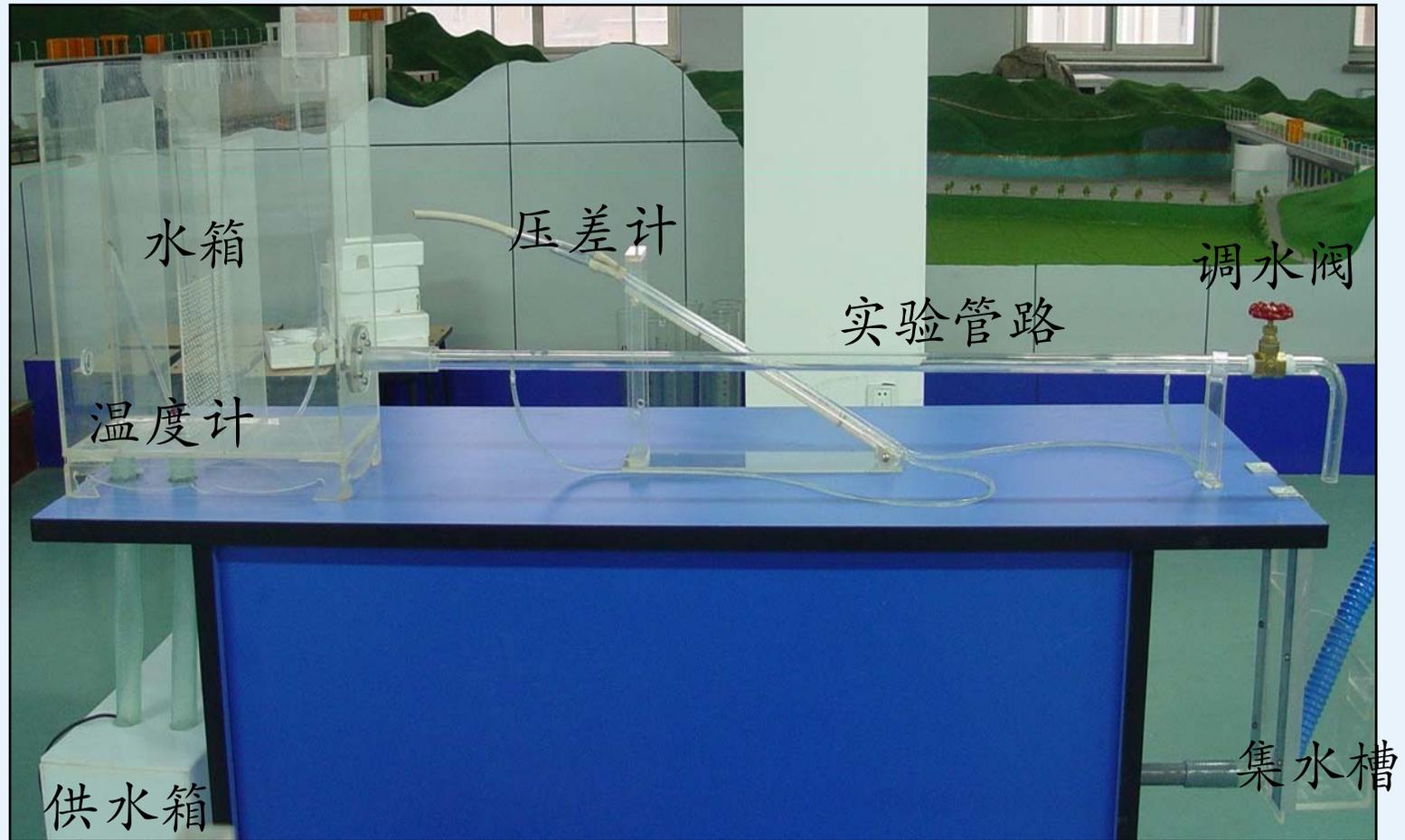
■ 临界雷诺数

$$Re'_c = \frac{v'_c d}{\nu} = 12000 \sim 20000$$

$$Re_c = \frac{v_c d}{\nu} \approx 2300$$



实验设备



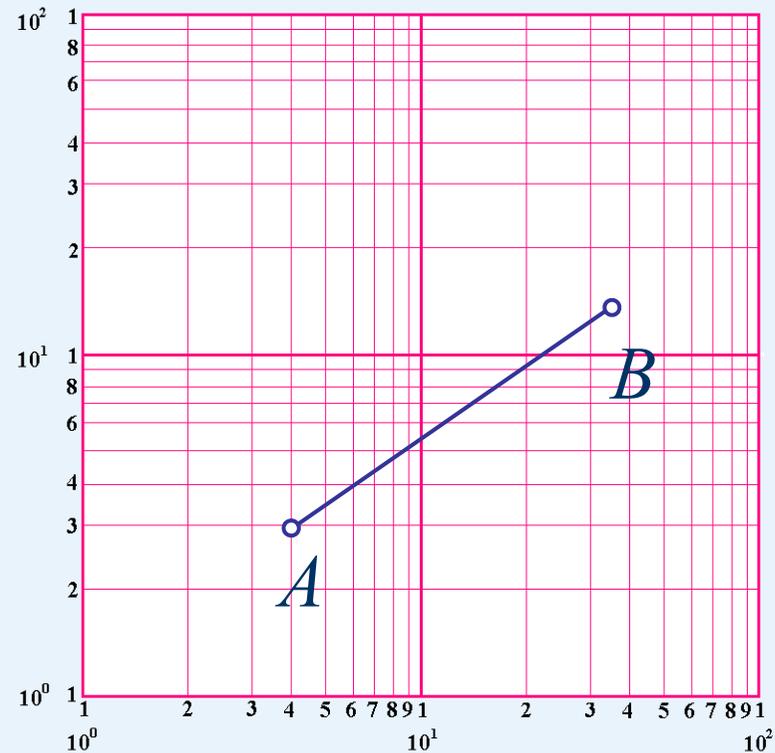
实验步骤

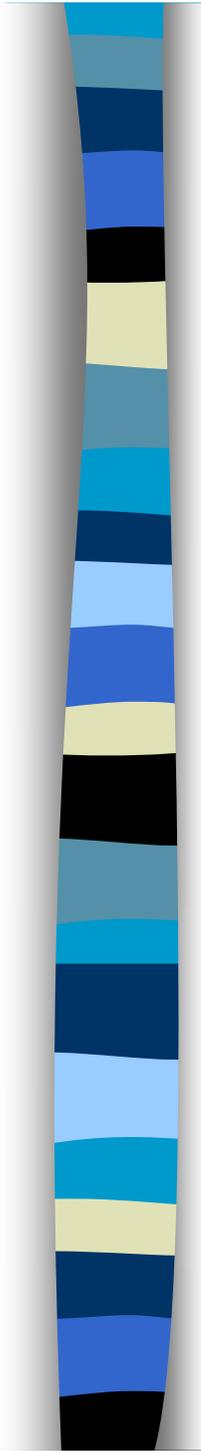
- 熟悉实验设备，检查斜比压计两管是否平齐，并记录管径、管长以及水温等相关数据。
- 插上供水电源，待水箱充满并保持溢流后，打开调水阀，调到最大流量，制造紊流流态。流动稳定后用体积法测量流量，并记录斜比压计读数。
- **逐渐减小流量（不可逆转）**，重复上述步骤。要求紊流区做 8 组，层流区至少做 4 组。
- 实验结束。

实验提示

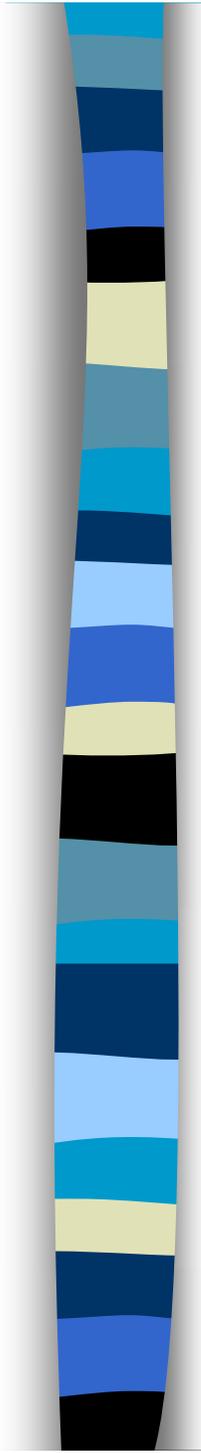
- 调节阀门要轻缓，应从紊流向层流过渡，不可以逆转。
- 比压计的斜度为 30° 。
- 实验曲线图为双对数坐标，坐标轴按指数变化增加。直接用试验数据进行绘图，不要再对数据取对数。

例：线段 AB ： $A(4,3)$ ， $B(35,15)$





■ 实验4.2 管流的沿程阻力实验



实验目的

- 了解沿程水头损失的概念，以及圆管在恒定流动下沿程水头损失的变化规律。
- 掌握测定管路沿程阻力系数 λ 的方法，了解影响沿程阻力系数的因素。

实验原理

- 沿程水头损失：在均匀流和渐变流中，沿流程由于克服摩擦阻力消耗能量而损失的水头。

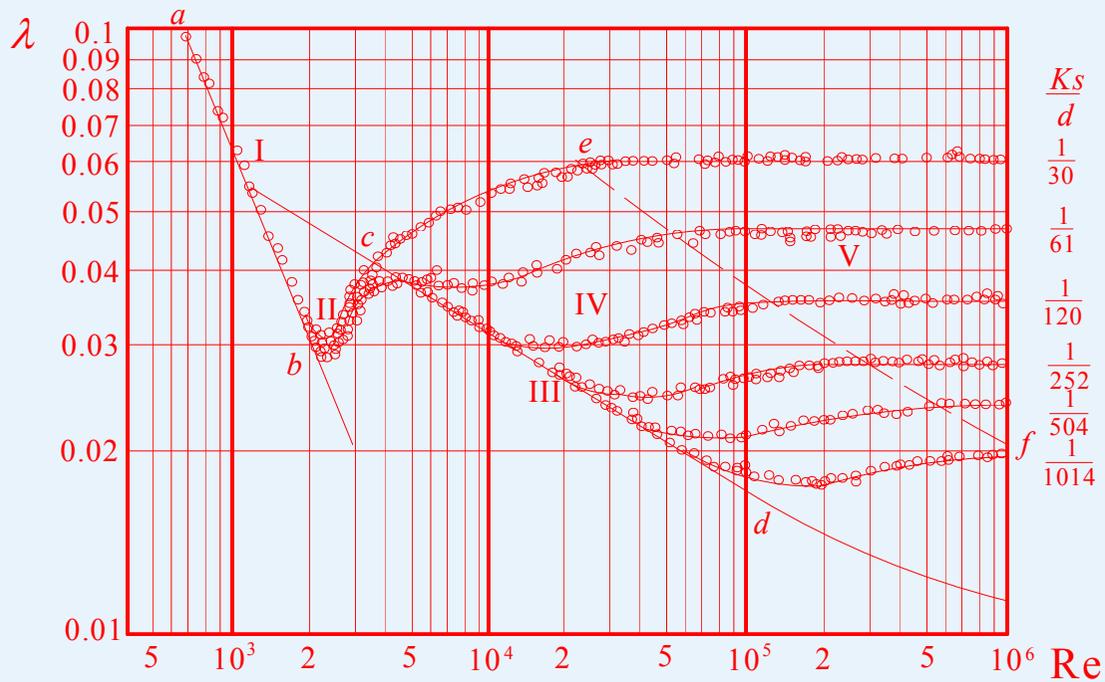
$$h_f = f(\text{Re}, \frac{K_s}{d}) \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (\text{圆管})$$

- 沿程阻力系数

$$\lambda = h_f \frac{2g}{v^2} \frac{d}{l} = K_2 \frac{h_f}{Q^2} \quad K_2 = \frac{g\pi^2 d^5}{8L}$$

实验原理

■ 沿程阻力系数 $\lambda = f(\text{Re}, \frac{K_s}{d})$ 的经验公式:



I 层流区
 II 不稳定区
 III 紊流光滑管
 IV 紊流过渡区
 V 紊流粗糙管

$\lambda = f(\text{Re})$

$\lambda = f(\text{Re}, \frac{K_s}{d})$

$\lambda = f(\frac{K_s}{d})$

实验原理

■ 沿程阻力系数 $\lambda = f(\text{Re}, \frac{K_s}{d})$ 的经验公式

I 层流区: $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$

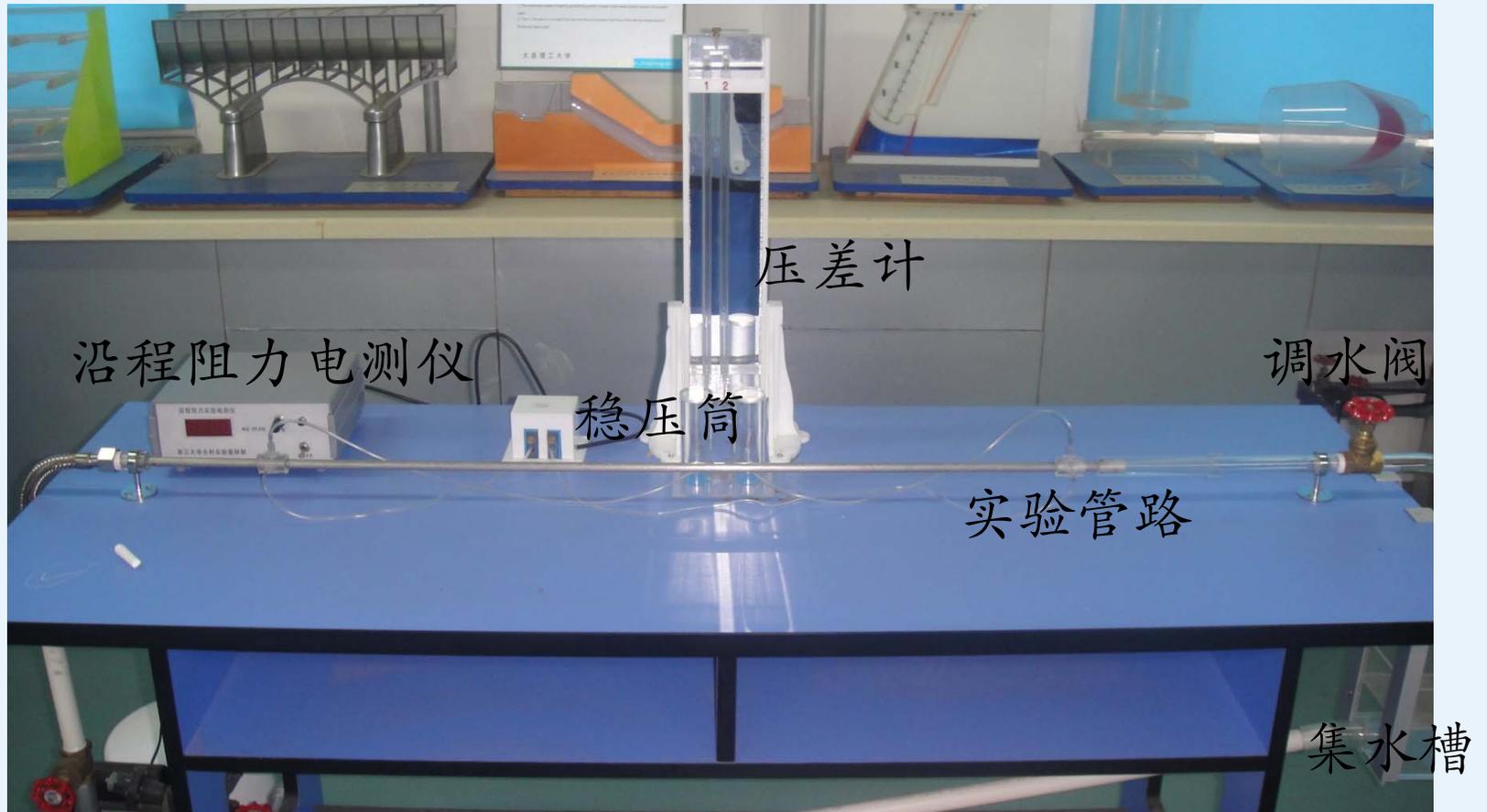
II 不稳定区: 情况复杂, 无一定规律

III 紊流光滑管: $\lambda = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}}$ (布拉休斯公式)

IV 紊流过渡区: $\lambda = 0.11 \left(\frac{K_s}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25}$ (阿里特苏里公式)

V 紊流粗糙管: $\lambda = \left(2 \lg \frac{r}{K_s} + 1.74 \right)^{-2}$ (尼古拉兹公式)

实验设备



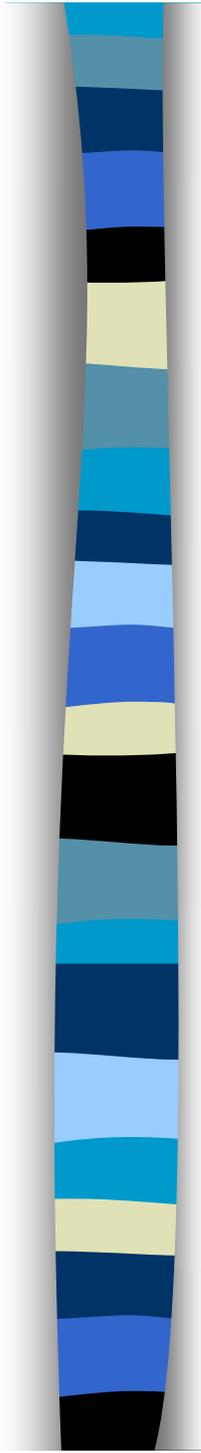
实验步骤

- 熟悉实验设备，记录管长、管径以及水温等相关数据。
- 沿程阻力电测仪读数清零（或压差计调平）。
- 插上供水电源并打开流量调节阀，放入最大流量，待稳定后用体积法测量流量，并记录沿程阻力电测仪（或压差计）的读数。
- 逐渐减小流量，重复上述步骤，共8次。
- 实验结束。

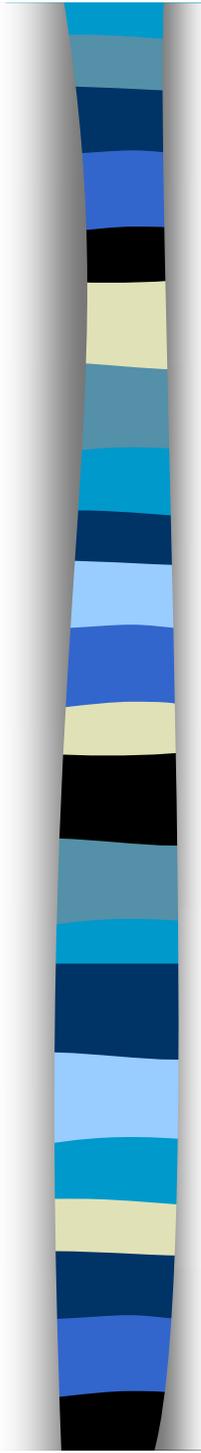
实验提示

- 用实验数据绘图时，注意应按双对数坐标画出图形。
- 计算数据时，应注意单位的统一。





■ 实验4.3 管路的局部损失实验



实验目的

- 了解局部水头损失的概念，掌握测定管路局部水头损失系数的方法。
- 测量管路突然扩大时的局部阻力系数。
- 了解影响局部阻力系数的因素。

实验原理

- 局部水头损失：由于局部边界形状急剧变化，水流结构进行急剧调整，产生旋涡和冲击消耗水流的能量引起的水头损失。

$$h_j = \zeta \frac{v_2^2}{2g}$$

- 局部阻力系数

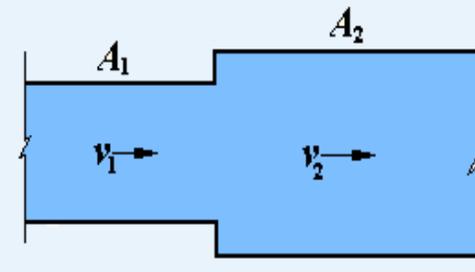
$$\zeta = h_j / \frac{v_2^2}{2g}$$

实验原理

■ 实测公式:

$$h_{j\text{实测}} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right)$$

$$\zeta_{\text{实测}} = h_{j\text{实测}} / \frac{v_2^2}{2g}$$



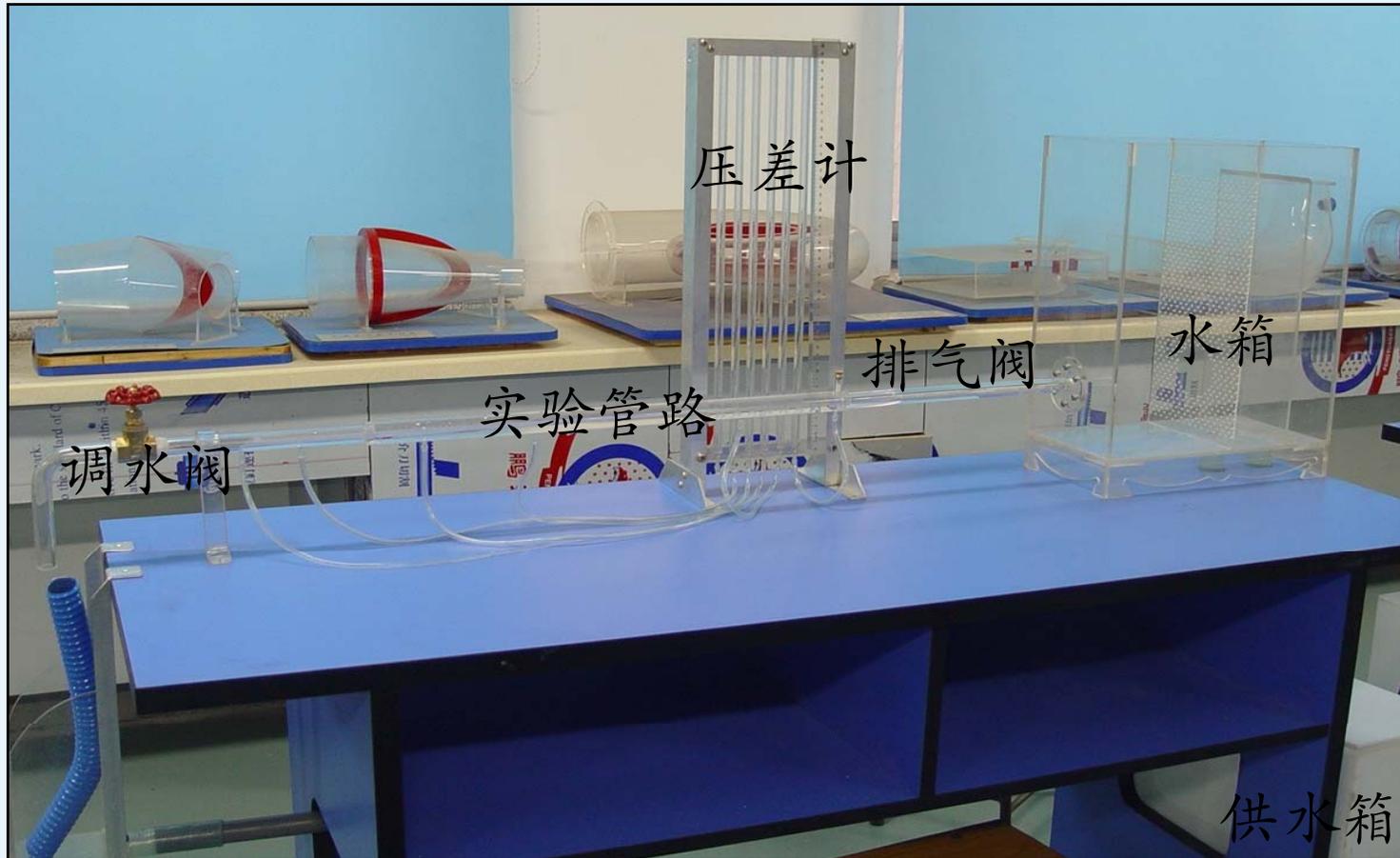
管路突然扩大

■ 理论公式:

$$h_{j\text{理论}} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = \frac{8}{\pi^2 g} \left(\frac{1}{d_1^2} - \frac{1}{d_2^2} \right)^2 Q^2 = KQ^2$$

$$\zeta_{\text{理论}} = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2$$

实验设备



集水槽

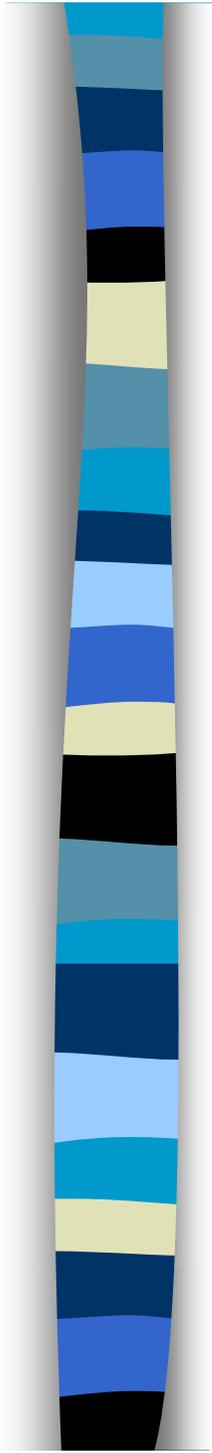
实验步骤

- 熟悉实验设备，并记录管径等相关数据。
- 关闭流量调节阀，调平压差计。
- 插上供水电源，待水箱充满并保持溢流后，打开流量调节阀，使流量在压差计的量程范围内为最大。待稳定后用体积法测量流量，并记录压差计读数。
- 减小流量，重复上述步骤，共做 2 组。
- 实验结束。

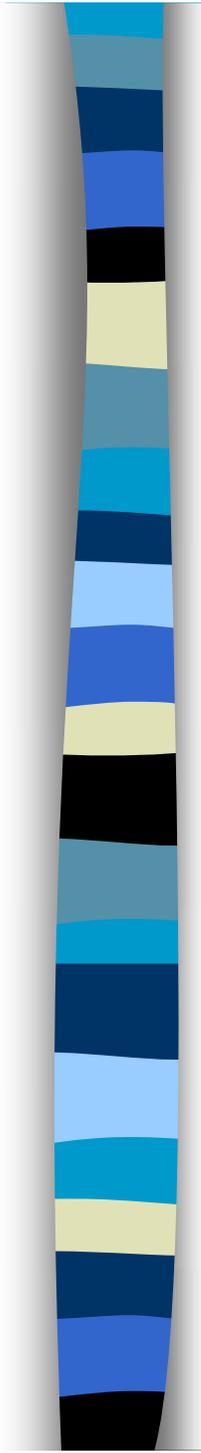
实验提示

- 本次实验只做管路突然扩大的情况。
- 在管路的突然扩大处如有气泡，用排气阀将气泡排出。
- 记录压差计读数时，注意测点的次序。





■ 实验5.2 水跃实验

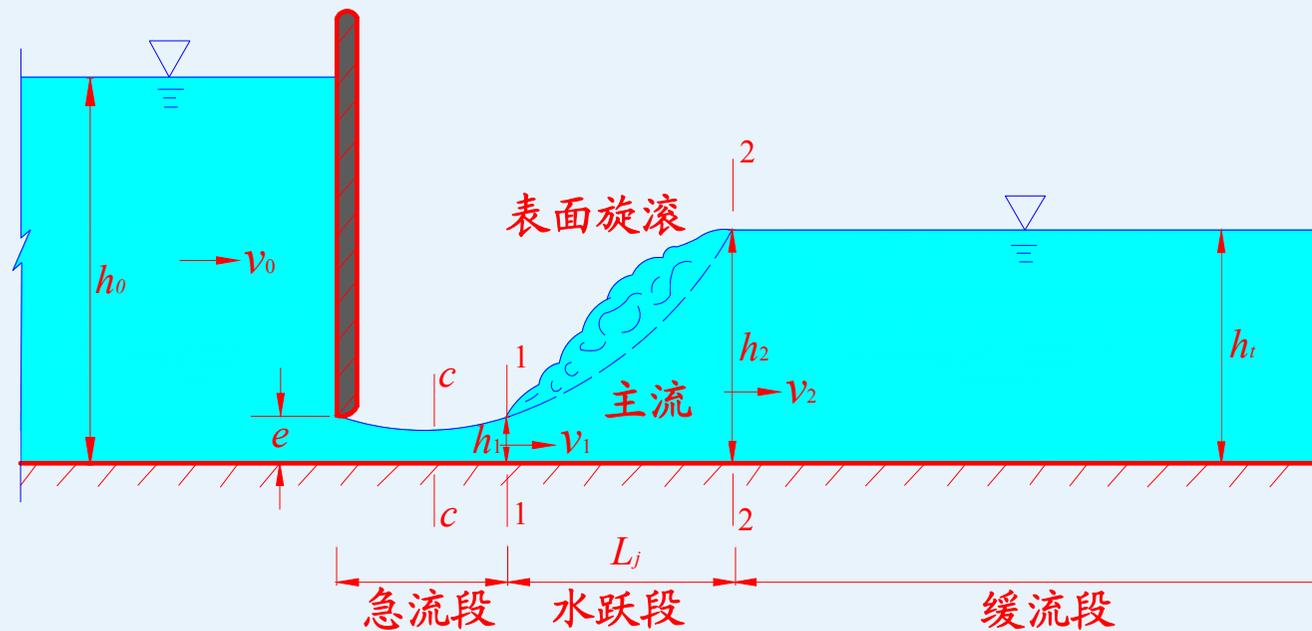


实验目的

- 观察水跃的水流现象，了解水跃的类型、水跃结构的基本特征以及形成水跃的条件。
- 掌握测量水跃参数的方法，验证水跃的基本方程。
- 了解水跃消能的物理过程，计算水跃区的能量损失和损失功率。

实验原理

■ 水跃:



$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_k}{h_1} \right)^3} - 1 \right]$$

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

$$L_j = 6.9(h_2 - h_1)$$

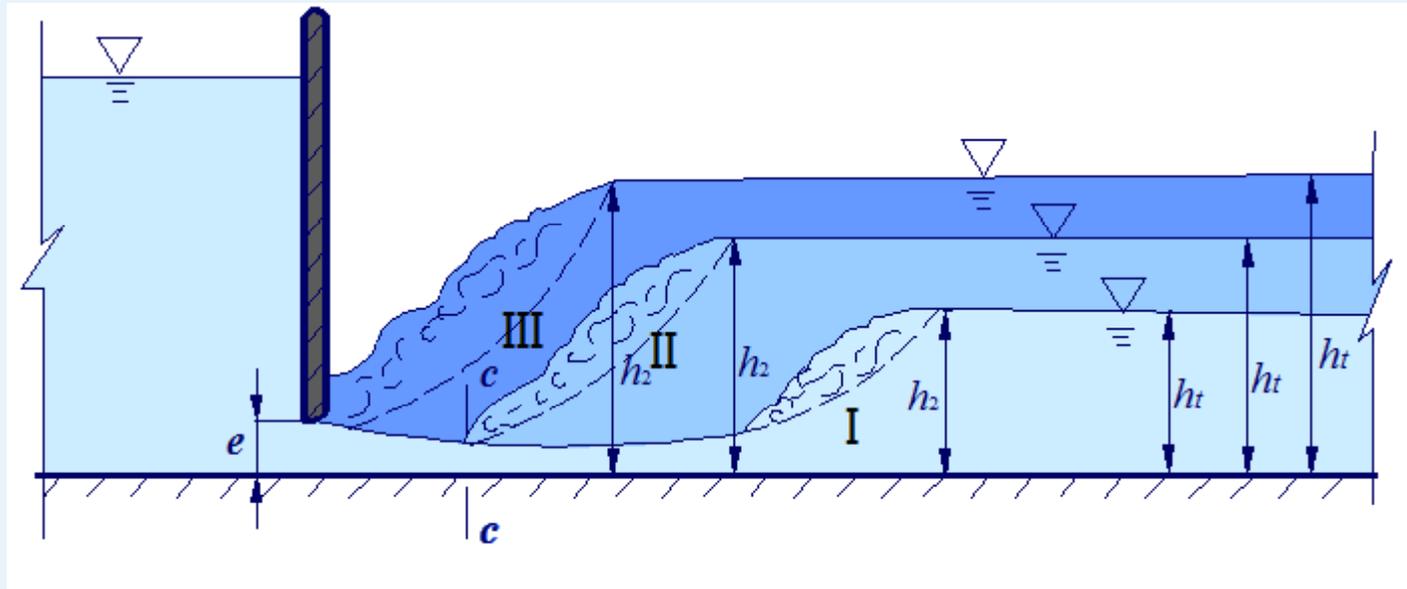
实验原理

■ 水跃的分类:

1. 远驱式水跃
($h_2 > h_t$)

2. 临界式水跃
($h_2 = h_t$)

3. 淹没式水跃
($h_2 < h_t$)



实验原理

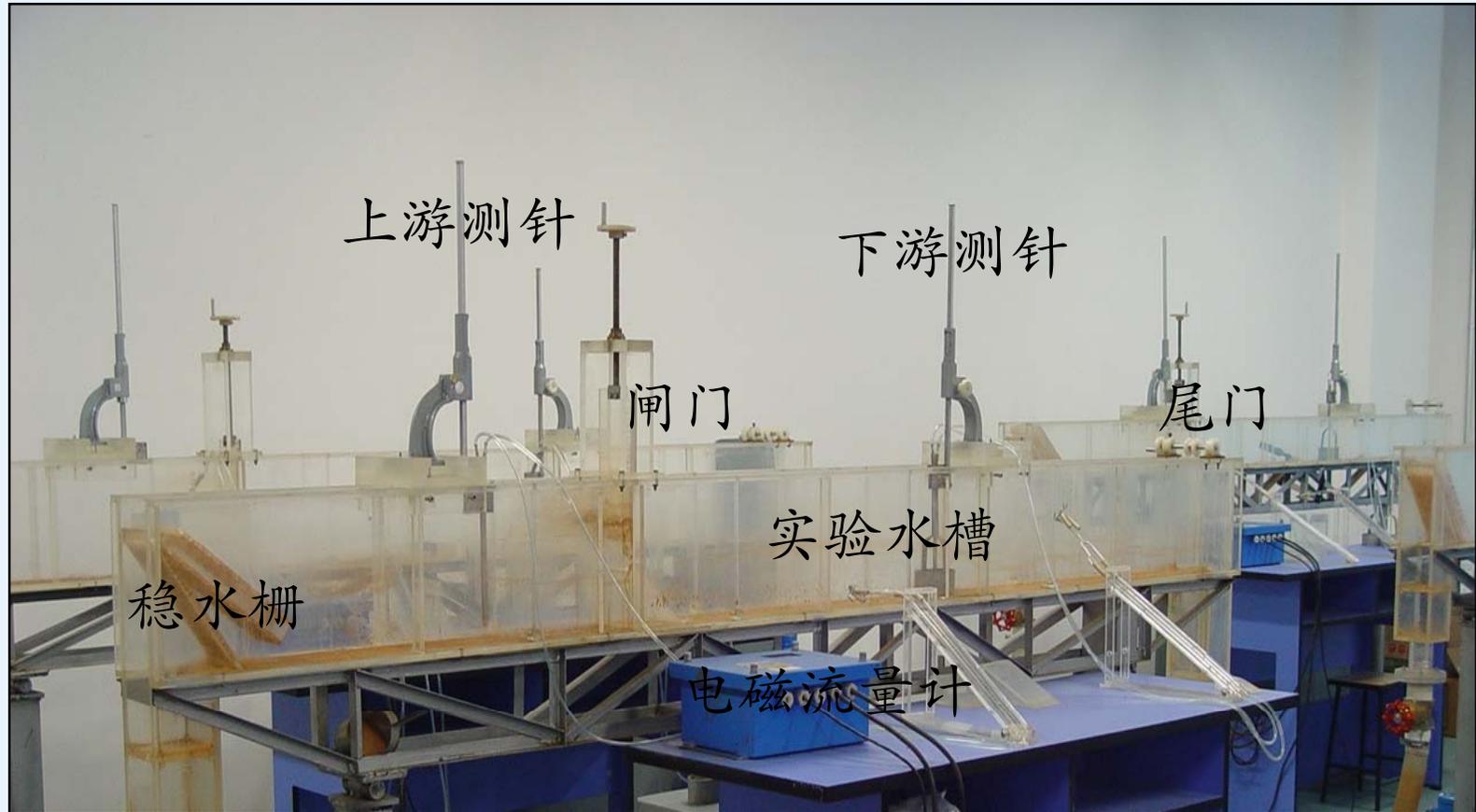
- 矩形明渠水跃区能量损失

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(h_1 - h_2)^3}{4h_1h_2}$$

- 损失功率:

$$N = \rho g \cdot Q \cdot \Delta E$$

实验设备



实验步骤

- 熟悉仪器设备。固定闸门开度 $e = 3\text{cm}$ ，并记录已知数据。
- 插上供水电源，引水入明槽，待流量稳定后记录流量计读数。然后调节下游尾门，使闸后发生临界式水跃，测量上游水深、共轭水深以及水跃长度等水跃参数。
- 改变流量，重复上述步骤，共测量2组。
- 实验结束。

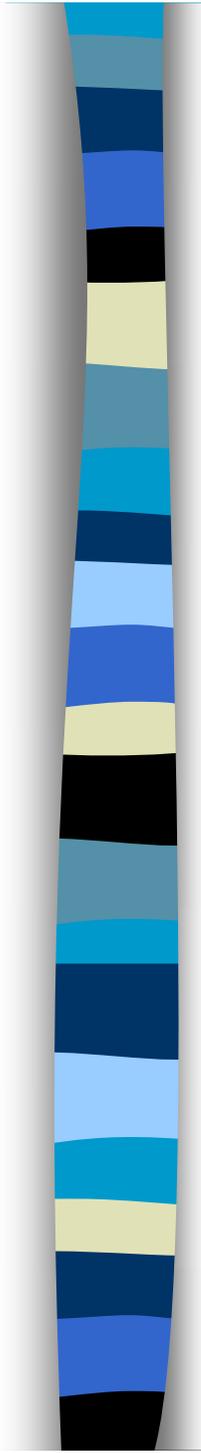
实验提示

- 实验过程中，保持闸门开度为3 cm 不变。
- 改变流量时，进水阀门要慢慢的打开，尾门要缓慢地上提，防止水从槽中溢出。
- 电磁流量转换器读数的换算公式：

$$\text{读数}(\text{m}^3/\text{h}) = \frac{\text{读数} \times 10^6}{3600} (\text{cm}^3/\text{s})$$

- 水跃结束的判定：约有 70% ~ 80% 的气泡向后移动。

实验注意事项 



■ 实验6.2 闸孔出流实验

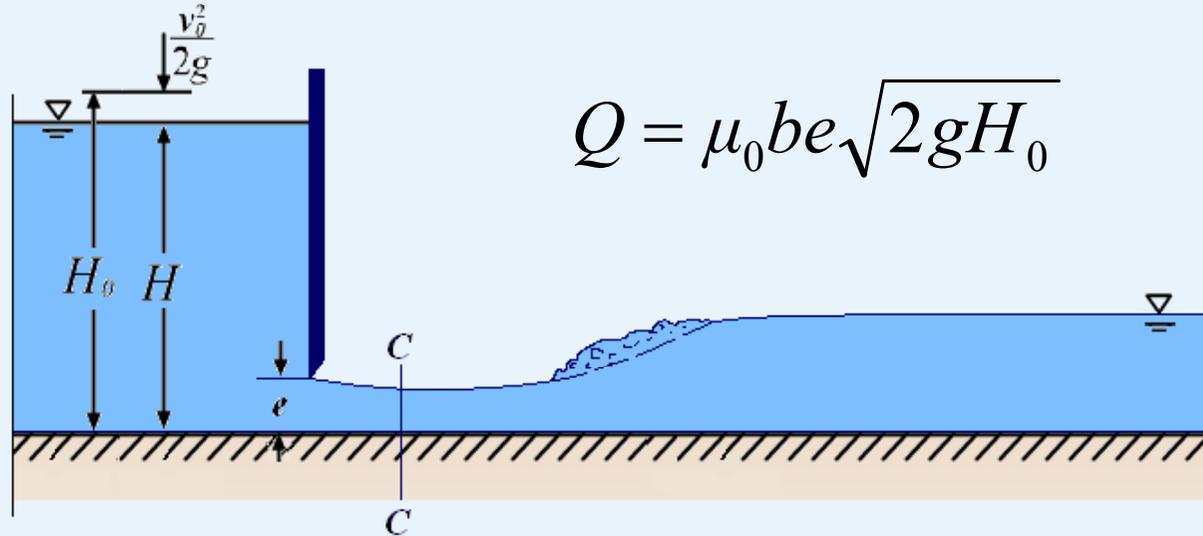
实验目的

- 观察闸孔自由出流和淹没出流时的流态。
- 掌握测定闸孔自由出流流量系数 μ_0 的方法，并将实测值与经验公式计算值进行比较。
- 掌握测定闸孔淹没出流淹没系数 σ_s 的方法。

实验原理

■ 闸孔出流现象 ($H \geq 1.54e$)

(1) 自由出流:



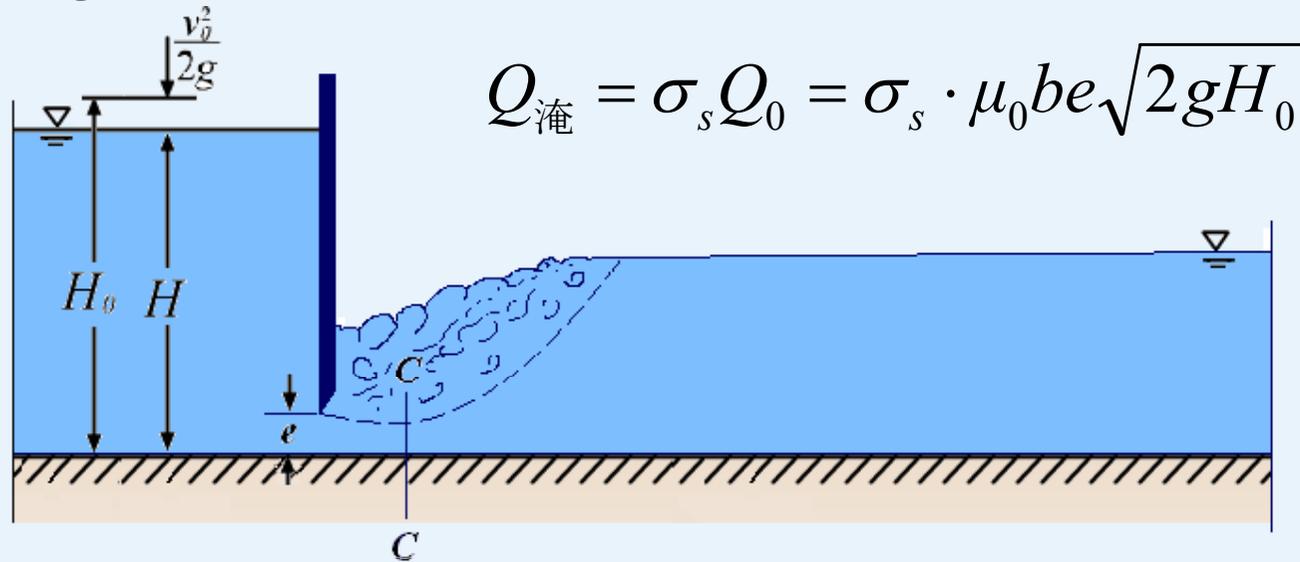
$$\mu_0 = \frac{Q}{b e \sqrt{2gH_0}}$$

经验公式 $\mu_0 = 0.60 - 0.176 \frac{e}{H}$

实验原理

■ 闸孔出流现象 ($H \geq 1.54e$)

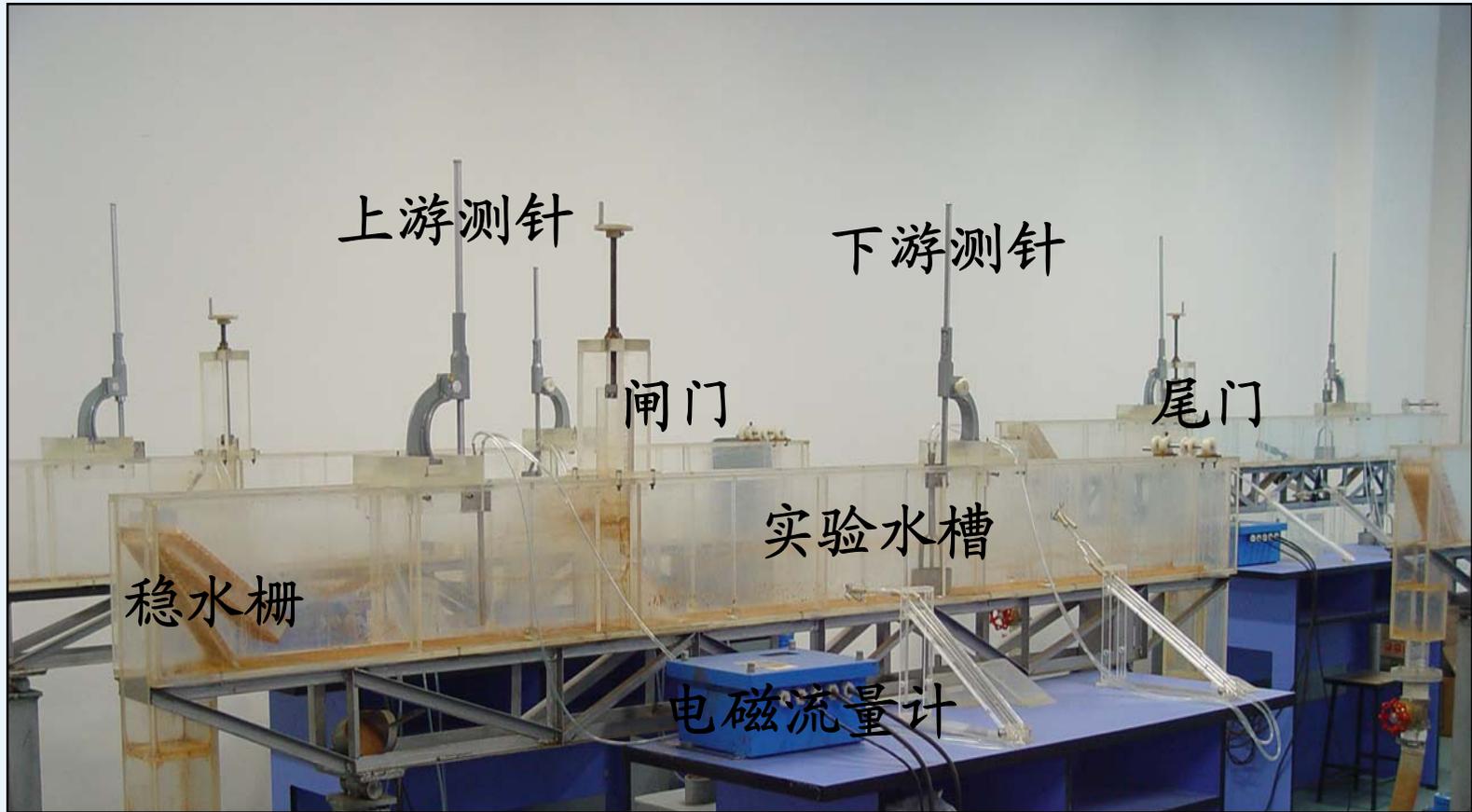
(2) 淹没出流:



$$Q_{\text{淹}} = \sigma_s Q_0 = \sigma_s \cdot \mu_0 b e \sqrt{2gH_0}$$

$$\mu_{\text{淹}} = \sigma_s \mu_0 \quad \sigma_s = \frac{\mu_{\text{淹}}}{\mu_0} = \frac{Q_{\text{淹}}}{Q}$$

实验设备



实验步骤

- 熟悉设备并记录有关数据。
- 打开进水阀，放入槽中适当的流量，待流动稳定后记录流量计读数。使闸下出现自由出流状态，待水位稳定后，记录上、下游水位等相关数据。
- 上调尾门，使闸下出现淹没出流状态，等水位稳定后，记录相关数据。
- 实验结束。

实验提示

- 实验过程中，保持闸门开度为3 cm 不变。
- 只有当 $H \geq 1.54e$ 时，才能为闸孔出流。
- 做淹没出流时，尾门要缓慢地上提，防止水从槽中溢出，待上游水位上升1~2 mm即为淹没出流。
- 电磁流量转换器读数的换算公式：

$$\text{读数}(\text{m}^3/\text{h}) = \frac{\text{读数} \times 10^6}{3600} (\text{cm}^3/\text{s})$$

