

流 体 力 学 实 验 手 册

浙江工业大学水力实验室

2021 年 4 月

目 录

1 流体静力学综合型实验.....	1
2 不可压缩流体恒定流能量方程综合性实验.....	4
3 雷诺实验.....	8
4 不可压缩流体恒定流动量方程综合型实验.....	10
5 文丘里流量计综合型实验.....	13
6 孔口出流与管嘴出流实验.....	16
7 局部水头损失实验.....	19
8 沿程水头损失实验.....	22

自学考试实践环节流体力学实验大纲

一、课程的性质、目的和任务

本课程是自学考试流体力学的实践环节，其目的使学生掌握流体力学的基本实验原理，能够独立操作实验，分析实验数据等。通过实验，加深对流体静力学、不可压缩流体恒定流能量方程、动量方程、层流和紊流、水头损失、孔口和管嘴出流等流体力学知识点的认识。

二、课程的基本内容

(一) 课程基本内容

本课程实验的基本内容分为演示类实验和操作类实验。

演示类实验主要包括自循环式流动演示、流谱流线显示、虹吸原理、水击、静压传递、空化等等内容的演示和听讲。

操作类实验主要包括流体静力学实验、不可压缩流体恒定流能量方程实验、不可压缩流体恒定流动量方程实验、雷诺实验、局部水头损失实验、沿程水头损失实验、孔口与管嘴出流实验、文丘里流量计实验等。

(二) 学时分配

演示类实验安排 1.0 学时，操作类实验安排 4.0 学时，完成 3 个指定的实验项目以及任选 1 个实验项目，具体安排见下表。

实验计划表

序号	实验项目	学时	每组人数	实验类型
1	自循环式流动演示、流谱流线显示、虹吸原理、水击、静压传递、空化	1.0	2-3	演示类实验
2	流体静力学实验	1.0	2-3	操作类实验
3	不可压缩流体恒定流能量方程实验	1.0	2-3	
4	雷诺实验	1.0	2-3	
5	以下操作类实验任选一： 不可压缩流体恒定流动量方程实验 文丘里流量计实验 孔口出流实验 管嘴出流实验 沿程水头损失实验 局部水头损失实验	1.0	2-3	
			2-3	
			2-3	
			2-3	
			2-3	
			2-3	

三、课程的基本要求

本课程要求学生在规定的时间内完成实验任务，真实记录实验数据，并分析实验成果。

1 流体静力学综合型实验

一、实验目的和要求

1. 掌握用测压管测量流体静压强的技能；
2. 验证不可压缩流体静力学基本方程；
3. 测定油的密度；
4. 通过对诸多流体静力学现象的实验观察分析，加深流体静力学基本概念理解，提高解决静力学实际问题的能力。

二、实验装置

1. 实验装置简图

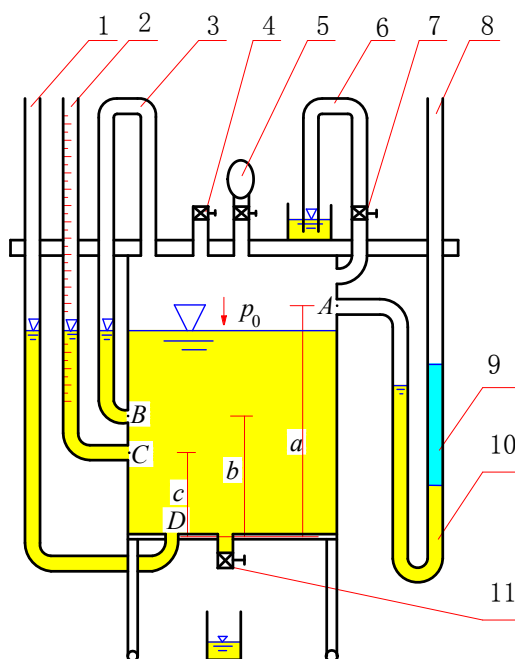


图 .1 流体静力学综合型实验装置图

1. 测压管 2. 带标尺测压管 3. 连通管 4. 通气阀 5. 加压打气球
6. 真空测压管 7. 截止阀 8. U 型测压管 9. 油柱 10. 水柱 11. 减压放水阀

2. 基本操作方法：

- (1)设置 $p_0 = 0$ 条件。打开通气阀 4，此时实验装置内压强 $p_0 = 0$ 。
- (2)设置 $p_0 > 0$ 条件。关闭通气阀 4、放水阀 11，通过加压打气球 5 对装置打气，可对装置内部加压，形成正压；
- (3)设置 $p_0 < 0$ 条件。关闭通气阀 4、加压打气球 5 底部阀门，开启放水阀 11 放水，可对装置内部减压，形成真空。

(4)水箱液位测量。在 $p_0 = 0$ 条件下读取测管 2 的液位值，即为水箱液位值。

三、实验原理

在重力作用下不可压缩流体静力学基本方程

$$z + \frac{p}{\rho g} = C \quad \text{或} \quad p = p_0 + \rho gh$$

式中：

- z —— 被测点相对基准面的位置高度；
- 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；
- ρ —— 液体密度；
- h —— 被测点的液体深度。

四、数据处理及成果要求

1. 记录有关信息及实验常数

实验设备名称：_____ 实验台号：_____

实 验 者：_____ 实验日期：_____

各测点高程为： $\nabla_B = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 、 $\nabla_C = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 、 $\nabla_D = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$

基准面选在_____ $z_C = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 、 $z_D = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$

2. 实验数据记录及计算结果（参表 1，表 2）

3. 成果要求

(1) 回答定性分析实验中的有关问题。

(2) 由表中计算的 $z_C + \frac{p_C}{\rho g}$ 、 $z_D + \frac{p_D}{\rho g}$ ，验证流体静力学基本方程。

(3) 测定油的密度，对两种实验结果作以比较。

六、注意事项

1. 用打气球加压、减压需缓慢，以防液体溢出及油柱吸附在管壁上；打气后务必关闭打气球下端阀门，以防漏气。

2. 真空实验时，放出的水应通过水箱顶部的漏斗倒回水箱中。

3. 在实验过程中，装置的气密性要求保持良好。

表 1 流体静压强测量记录及计算表

实验条件	次序	水箱液面 ∇_0 / (10 ⁻² m)	测压管 液面 ∇_H / (10 ⁻² m)	压 强 水 头				测压管水头	
				$\frac{p_A}{\rho g} = \nabla_H - \nabla_0$ / (10 ⁻² m)	$\frac{p_B}{\rho g} = \nabla_H - \nabla_B$ / (10 ⁻² m)	$\frac{p_C}{\rho g} = \nabla_H - \nabla_C$ / (10 ⁻² m)	$\frac{p_D}{\rho g} = \nabla_H - \nabla_D$ / (10 ⁻² m)	$z_c + \frac{p_c}{\rho g}$ / (10 ⁻² m)	$z_D + \frac{p_D}{\rho g}$ / (10 ⁻² m)
$p_0 = 0$									
$p_0 > 0$									
$p_0 < 0$ (其中一次 $p_B < 0$)									

2 不可压缩流体恒定流能量方程综合性实验

一、实验目的和要求

1. 通过定性分析实验，提高对动水力学诸多水力现象的实验分析能力；
2. 通过定量测量实验，进一步掌握有压管流中动水力学的能量转换特性，验证流体恒定总流的伯努利方程，掌握测压管水头线的实验测量技能与绘制方法；

二、实验装置

1. 实验装置简图

实验装置及各部分名称如图 1 所示。

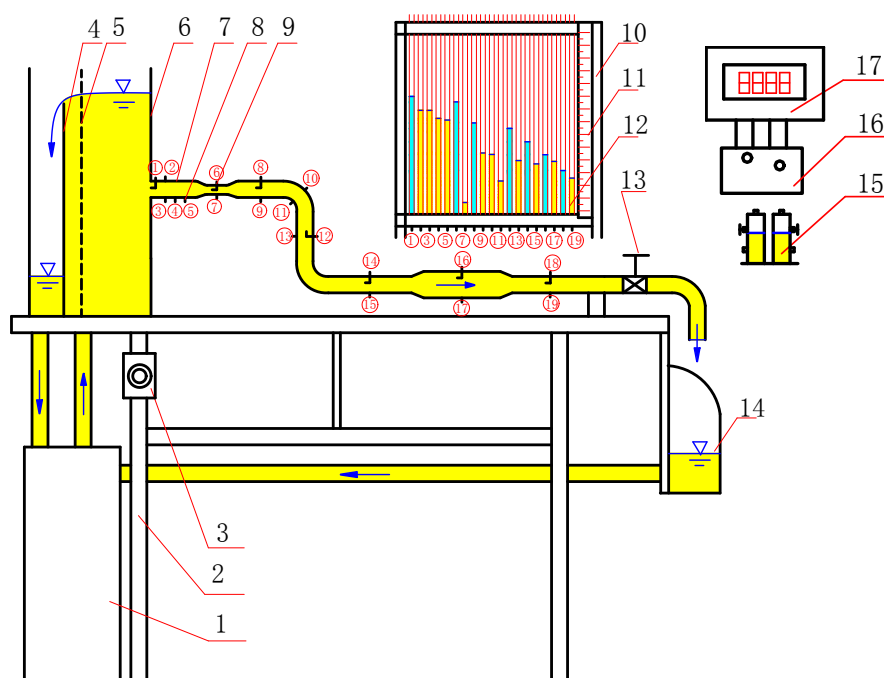


图 1 伯努利方程综合性实验装置图

1. 自循环供水器 2. 实验台 3. 可控硅无级调速器 3. 溢流板 5. 稳水孔板
6. 恒压水箱 7. 实验管道 8. 测压点①~⑱ 9. 弯针毕托管 10. 测压计
11. 滑动测量尺 12. 测压管①~⑱ 13. 实验流量调节阀 14. 回水漏斗
15. 稳压筒 16. 传感器 17. 智能化数显流量仪

2. 基本操作方法

(1) 测压管与稳压筒的连通管排气。打开开关供水，使水箱充水，待水箱溢流，间歇性全开、全关管道出水阀 13 数次，直至连通管及实验管道中无气泡滞留即可。再检查调节阀关闭后所有测压管水面是否齐平，如不平则需查明故障

原因（例连通管受阻、漏气或夹气泡等）并加以排除，直至调平。

（2）恒定流操作。全开调速器，此时水箱保持溢流，阀门 13 开度不变情况下，实验管道出流为恒定流。

（3）非恒定流操作。调速器开、关过程中，水箱 6 无溢流情况下，实验管道出流为非恒定流。

（4）流量测量。实验流量用阀 13 调节，记录智能化数显流量计的流量值。

三、实验原理

1. 伯努利方程。在实验管路中沿管内水流方向取 n 个过水断面，在恒定流动时，可以列出进口断面(1)至另一断面(i)的伯努利方程式($i=2,3,\dots,n$)

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g} + h_{w1-i}$$

取 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_n = 1$ ，选好基准面，从已设置的各断面的测压管中读出 $z + \frac{p}{\rho g}$ 值，

测出通过管路的流量，即可计算出断面平均流速 v 及 $\frac{\alpha v^2}{2g}$ ，从而可得到各断面测管水头和总水头。

2. 过流断面性质。均匀流或渐变流断面流体动压强符合静压强的分布规律，即在同一断面上 $z + \frac{p}{\rho g} = C$ ，但在不同过流断面上的测压管水头不同，

$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \neq z_2 + \frac{p_2}{\rho g}$ ；急变流断面上 $z + \frac{p}{\rho g} \neq C$ 。

四、数据处理及成果要求

1. 记录有关信息及实验常数

实验设备名称：_____ 实验台号：_____

实 验 者：_____ 实验日期：_____

均匀段 $d_1 = \underline{\hspace{2cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 喉管段 $d_2 = \underline{\hspace{2cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 扩管段 $d_3 = \underline{\hspace{2cm}} \times 10^{-2} \text{m}$

水箱液面高程 $\nabla_0 = \underline{\hspace{2cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 上管道轴线高程 $\nabla_z = \underline{\hspace{2cm}} \times 10^{-2} \text{m}$

（基准面选在标尺的零点上）

2. 实验数据记录及计算结果

表 1 管径记录表

测点编号	①*	②③	④	⑤	⑥* ⑦	⑧* ⑨	⑩ ⑪	⑫* ⑬	⑭* ⑮	⑯* ⑰	⑱*
管径 $d/10^{-2}\text{m}$											
两点间距 $l/10^{-2}\text{m}$	4	4	6	6	4	13.5	6	10	29.5	16	16

表 2 测压管水头 h_i , 流量测记表 (其中 $h_i = z_i + \frac{p_i}{\rho g}$, 单位 10^{-2}m , i 为测点编号)

实验 次数	h_2	h_3	h_4	h_5	h_7	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{13}	h_{15}	h_{17}	h_{19}	q_V $/(10^{-6}\text{m}^3/\text{s})$
1													
2													

表 3 计算数值表

(1) 流速水头

管径 d $/10^{-2}\text{m}$	$q_{V1} = V_1/t_1 = 201.3$ $/(10^{-6}\text{m}^3/\text{s})$			$q_{V2} = V_2/t_2 =$ $/(10^{-6}\text{m}^3/\text{s})$		
	A $/10^{-4}\text{m}^2$	v $/(10^{-2}\text{m}/\text{s})$	$v^2/2g$ $/10^{-2}\text{m}$	A $/10^{-4}\text{m}^2$	v $/(10^{-2}\text{m}/\text{s})$	$v^2/2g$ $/10^{-2}\text{m}$

(2) 总水头 H_i (其中 $H_i = z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{\alpha v_i^2}{2g}$, 单位 10^{-2}m , i 为测点编号)

实验 次数	H_2	H_4	H_5	H_7	H_9	H_{13}	H_{15}	H_{17}	H_{19}	q_V $/(10^{-6}\text{m}^3/\text{s})$
1										
2										

3. 成果要求

(1) 计算流速水头和总水头。

(2) 绘制上述成果中最大流量下的总水头线和测压管水头线。(轴向尺寸参见图 5，总水头线和测压管水头线可以绘在图 5 上)。

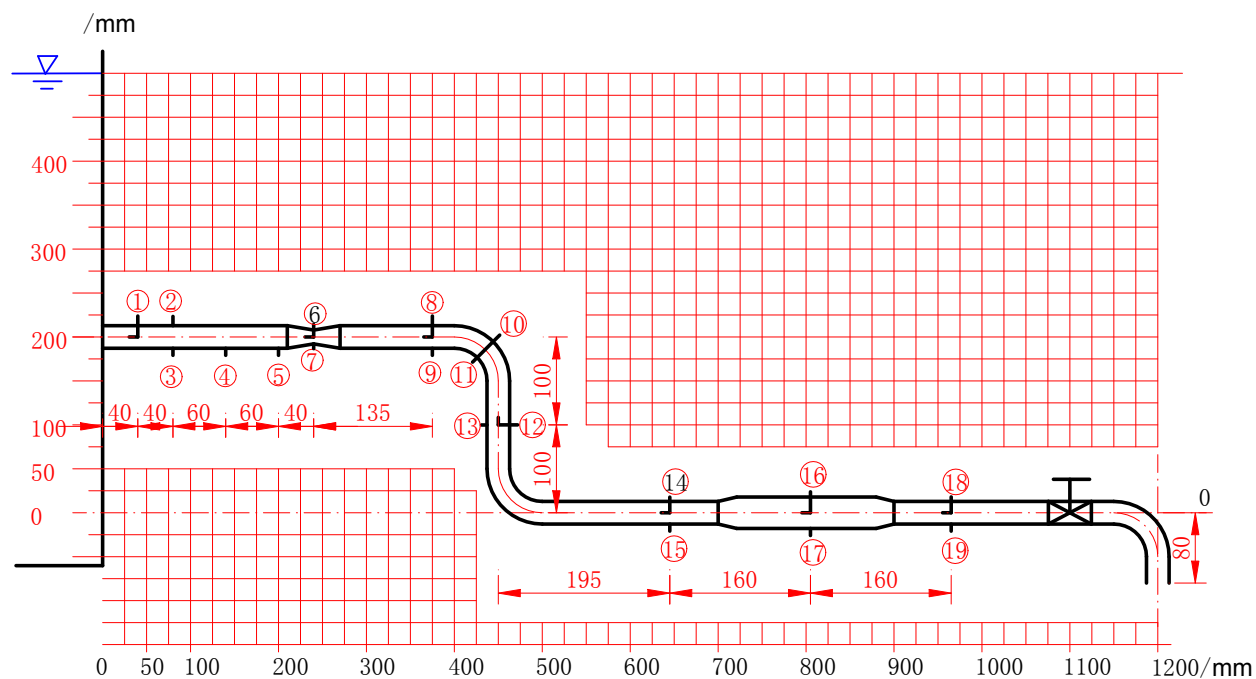


图 5 绘制测压管水头线坐标图

六、注意事项

1. 各自循环供水实验均需注意：计量后的水必须倒回原实验装置的水斗内，以保持自循环供水（此注意事项后述实验不再提示）。

2. 稳压筒内气腔越大，稳压效果越好。但稳压筒的水位必须淹没连通管的进口，以免连通管进气，否则需拧开稳压筒排气螺丝提高筒内水位；若稳压筒的水位高于排气螺丝口，说明有漏气，需检查处理。

3. 传感器与稳压筒的连接管要确保气路通畅，接管及进气口均不得有水体进入，否则需清除。

4. 智能化数显流量计开机后需预热 3~5 分钟。

3 雷诺实验

一、实验目的和要求

1. 观察层流、湍流的流态及其转换过程；
2. 测定临界雷诺数，掌握圆管流态判别准则；

二、实验装置

1. 实验装置简图

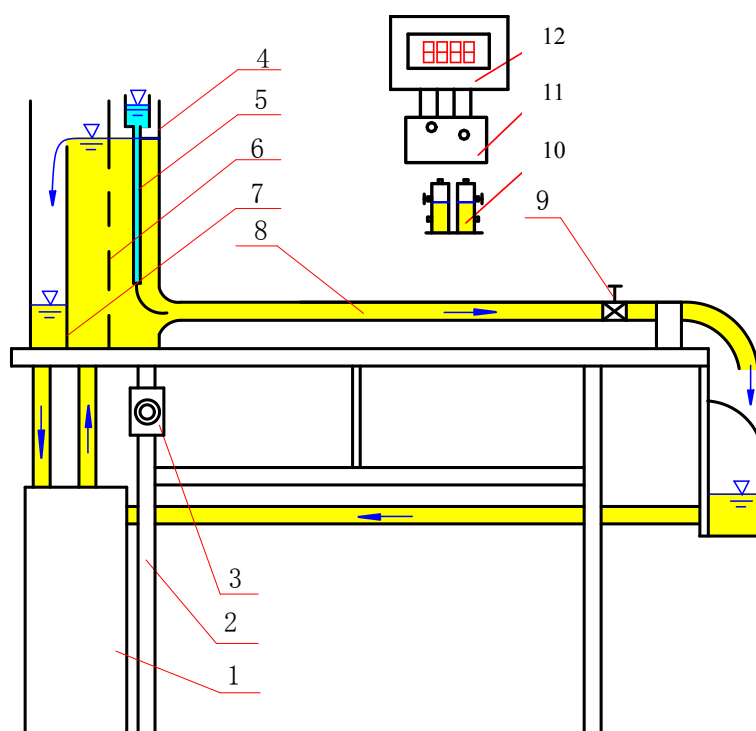


图 1 雷诺实验装置图

1. 自循环供水器 2. 实验台 3. 可控硅无级调速器 4. 恒压水箱
5. 有色水水管 6. 稳水孔板 7. 溢流板 8. 实验管道 9. 实验流量调节阀
10. 稳压筒 11. 传感器 12. 智能化数显流量计

三、实验原理

$$Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{4q_v}{\pi \nu d} = Kq_v$$

式中： v 为流体流速； ν 为流体运动粘度； d 为圆管直径； q_v 为圆管内过流流量； K 为计算常数， $K = \frac{4}{\pi \nu d}$ 。当流量由大逐渐变小，流态从湍流变为层流，对应一个下临界雷诺数 Re_c 。一般以下临界雷诺数作为判别流态的标准。经反复测试，得出圆管流动的下临界雷诺数 Re_c 值为 2300。工程上，一般取 $Re_c=2000$ 。

四、实验内容与方法

1. 定性观察两种流态。

2. 测定下临界雷诺数

先调节管中流态呈湍流状，再逐步关小调节阀，每调节一次流量后，稳定一段时间并观察其形态，当颜色水开始形成一直线时，表明由湍流刚好转为层流，此时管流即为下临界流动状态。注意，接近下临界流动状态时，流量应微调，调节过程中流量调节阀只可关小、不可开大。

五、数据处理及成果要求

1. 记录有关信息及实验常数

实验设备名称：_____ 实验台号：_____

实 验 者：_____ 实验日期：_____

管径 $d =$ _____ $\times 10^{-2}$ m, 水温 $t =$ _____ $^{\circ}\text{C}$

运动粘度 $\nu = \frac{0.01775 \times 10^{-4}}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2}$ (m^2/s) = _____ $\times 10^{-4}$ m^2/s

计算常数 $K =$ _____ $\times 10^6$ s/m^3

2. 实验数据记录及计算结果

表 1 雷诺实验记录计算表

实验次序	颜色水线形状	流量 q_V ($10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)	雷诺数 Re	阀门开度增 (\uparrow)或 减(\downarrow)	备注
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
实测下临界雷诺数 (平均值) $\overline{Re_c} =$					

六、 注意事项

1. 为使实验过程中始终保持恒压水箱内水流处于微溢流状态，应在调节流量调节阀后，相应调节可控硅调速器，改变水泵的供水流量。

2. 实验中不要推、压实验台，以防水体受到扰动。

4 不可压缩流体恒定流动量方程综合型实验

一、 实验目的和要求

1. 通过定性分析实验，加深动量与流速、流量、出射角度、动量矩等因素间相关关系的了解；
2. 通过定量测量实验，进一步掌握流体动力学的动量守恒定理，验证不可压缩流体恒定总流的动量方程，测定管嘴射流的动量修正因数；

二、 实验装置

1. 实验装置简图

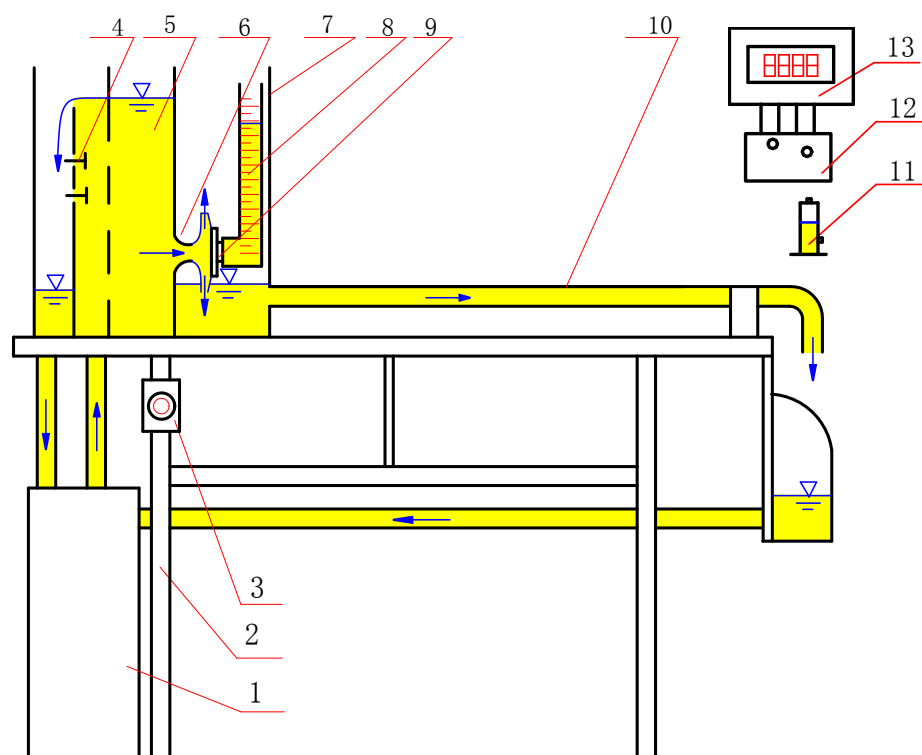


图1 动量定律综合型实验装置图

- | | | | |
|----------------|------------|------------|-------------|
| 1. 自循环供水器 | 2. 实验台 | 3. 水泵电源开关 | 4. 水位调节阀 |
| 5. 恒压水箱 | 6. 喇叭型进口管嘴 | 7. 集水箱 | 8. 带活塞套的测压管 |
| 9. 带活塞和翼片的抗冲平板 | 10. 上回水管 | 11. 内置式稳压筒 | 12. 传感器 |
| 13. 智能化数显流量仪 | | | |

2. 基本操作方法

(1)测压管定位。待恒压水箱满顶溢流后，松开测压管固定螺丝，调整方位，要求测压管垂直、螺丝对准十字中心，使活塞转动松快。然后旋转螺丝固定好。

(2)恒压水箱水位调节。旋转水位调节阀 4，可打开不同高度上的溢水孔盖，调节恒压水箱 5 水位，管嘴的作用水头改变。调节调速器，使溢流量适中，待水头稳定后，即可进行实验。

(3)活塞形心处水深 h_c 测量。标尺的零点已固定在活塞园心的高程上。当测压管内液面稳定后，记下测压管内液面的标尺读数，即为作用在活塞形心处的水深 h_c 值。

(4)管嘴作用水头测量。管嘴作用水头是指水箱液面至管嘴中心的垂直深度。在水箱的侧面上刻有管嘴中心线，用直尺测读水箱液面及中心线的值，其差值即为管嘴作用水头值。

(5)测量流量。

三、 实验原理

恒定总流动量方程为

$$\vec{F} = \rho q_v (\beta_2 \vec{v}_2 - \beta_1 \vec{v}_1)$$

取控制体如图 2(b)，因滑动摩擦阻力水平分力 $F_f < 0.5\%F_x$ ，可忽略不计，故 x 方向的动量方程可化为

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

即

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

式中： h_c ——作用在活塞形心处的水深；

D ——活塞的直径；

q_v ——射流的流量；

v_{1x} ——射流的速度；

β_1 ——动量修正因数。

实验中，在平衡状态下，只要测得流量 q_v 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，并测定射流的动量修正

因数 β_1 值。

四、数据处理及成果要求

1. 记录有关信息及实验常数

实验设备名称: _____

实验台号: _____

实 验 者: _____

实验日期: _____

管嘴内径 $d =$ _____ $\times 10^{-2} \text{m}$

活塞直径 $D =$ _____ $\times 10^{-2} \text{m}$

2. 实验数据记录及计算结果

表 1 测量记录及计算表

测次	管嘴作用水头 H_0 / 10^{-2}m	活塞作用水头 h_c / 10^{-2}m	流量 q_V / $(10^{-6} \text{m}^3/\text{s})$	流速 v / (10^{-2}m/s)	动量力 F / 10^{-5}N	动量修正因数 β
1						
2						
3						

五、 注意事项

若活塞转动不灵活，会影响实验精度，需在活塞与活塞套的接触面上涂抹 4B 铅笔芯。

5 文丘里流量计综合型实验

一、 实验目的和要求

1. 了解文丘里流量计的构造、原理和适用条件，率定流量因数 μ ;
2. 掌握应用气~水多管压差计量测压差的方法;

二、 实验装置

1. 实验装置简图

实验装置及各部分名称如图 1 所示。

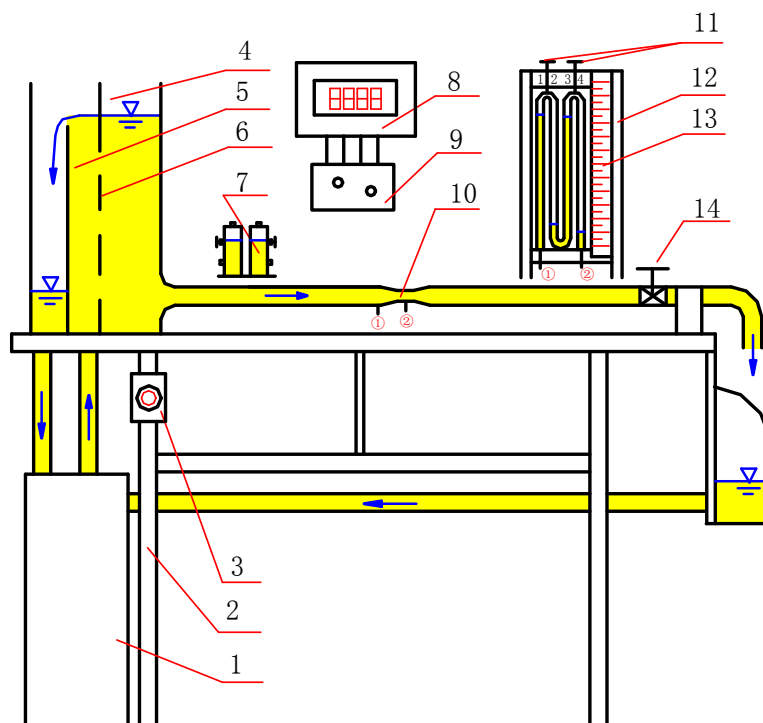


图 1 文丘里综合型实验装置图

1. 自循环供水器 2. 实验台 3. 水泵电源开关 4. 恒压水箱 5. 溢流板
6. 稳水孔板 7. 稳压筒 8. 智能化数显流量仪 9. 传感器 10. 文丘里流量计
11. 压差计气阀 12. 压差计 13. 滑尺 14. 实验流量调节阀

2. 基本操作方法

(1)排气方法。打开开关供水，使水箱充水，待水箱溢流，间歇性全开、全关管道出水阀数次，直至连通管及实验管道中无气泡滞留即可，排气后测管液面读数 $h_1 - h_2 + h_3 - h_4$ 为 0。

(2)调节多管测压计。全开调节阀 14 检查各测管液面是否都处在滑尺读数范围内？否则，按下列步序调节：(a) 关阀 14，拧开气阀 11，待各测压管中液位稳

定后，将清水注入压差计 12 中编号为 2、3 的测管内，使 $h_2=h_3\approx 0.24\text{ m}$ ；(b) 拧紧气阀 11，全开阀 14，若压差计 12 中编号为 1、3 的测压管液面上升过高，可微微松开相应的气阀 11，液面将自动降低，可使测管读数控制在测读范围内，速拧紧气阀 11 即可。

(3) 测压管水头差 Δh 测量

读取气—水多管压差计 12 各测压管的液面读数 h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 ， $\Delta h = h_1 - h_2 + h_3 - h_4$ 。

(4) 流量测量。

(5) 真空度测量。智能化数显流量仪正端显示为流量，负端显示为压差水柱。利用流量仪的这一智能化特性可测量文丘里喉颈处的真空度。实验时，将传感器低压端用连通管连接于文丘里流量计喉颈处，传感器高压端接通大气，并调整传感器放置高度，使高压端口与文丘里流量计喉颈处的测点齐平。此时，即可实验测量测点的真空度。

三、 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

$$q_v' = \frac{\frac{\pi}{4} d_1^2}{\sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^4 - 1}} \sqrt{2g \left[\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) \right]} = k \sqrt{\Delta h}$$

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

$$\Delta h = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right)$$

式中： Δh 为两断面测压管水头差；

k 为文丘里流量计常数，对给定管径是常数。

由于阻力的存在，实际通过的流量 q_v 恒小于 q_v' 。今引入一个无量纲因数 $\mu = q_v / q_v'$ (μ 称为流量因数)，对计算所得流量值进行修正。

$$\text{即} \quad q_v = \mu q_v' = \mu k \sqrt{\Delta h}$$

另由静水力学基本方程可得气—水多管压差计的 Δh 为

$$\Delta h = h_1 - h_2 + h_3 - h_4$$

四、数据处理及成果要求

1. 记录有关信息及实验常数

实验设备名称：_____ 实验台号：_____

实 验 者：_____ 实验日期：_____

$d_1 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ $d_2 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 水温 $t = \underline{\hspace{1cm}} ^\circ\text{C}$,

$$\nu = \frac{0.01775 \times 10^{-4}}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s},$$

水箱液面高程 $\nabla_0 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 管道轴线高程 $\nabla_z = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$

(基准面选在标尺的零点上)

2. 实验数据记录及计算结果

表 1 记录表

次 数	测压管读数 (10^{-2}m)				流量 q_V /($10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)
	h_1 / 10^{-2}m	h_2 / 10^{-2}m	h_3 / 10^{-2}m	h_4 / 10^{-2}m	
1					
2					
3					
4					
5					
6					

表 2 计算表 $K = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-5} \text{m}^{2.5}/\text{s}$

次 数	q_V /($10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)	$\Delta h = h_1 - h_2 + h_3 - h_4$ / 10^{-2}m	Re	$q_V' = (K\sqrt{\Delta h})$ /($10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)	$\mu = \frac{q_V}{q_V'}$
1					
2					
3					
4					
5					
6					

6 孔口出流与管嘴出流实验

一、 实验目的和要求

1. 量测孔口与管嘴出流的流速因数、流量因数、侧收缩因数、局部阻力因数以及圆柱型管嘴内的局部真空度；
2. 分析圆柱形管嘴的进口形状（圆角和直角）对出流能力的影响以及孔口与管嘴过流能力不同的原因。

二、 实验装置

1. 实验装置简图

实验装置及各部分名称如图 1 所示。

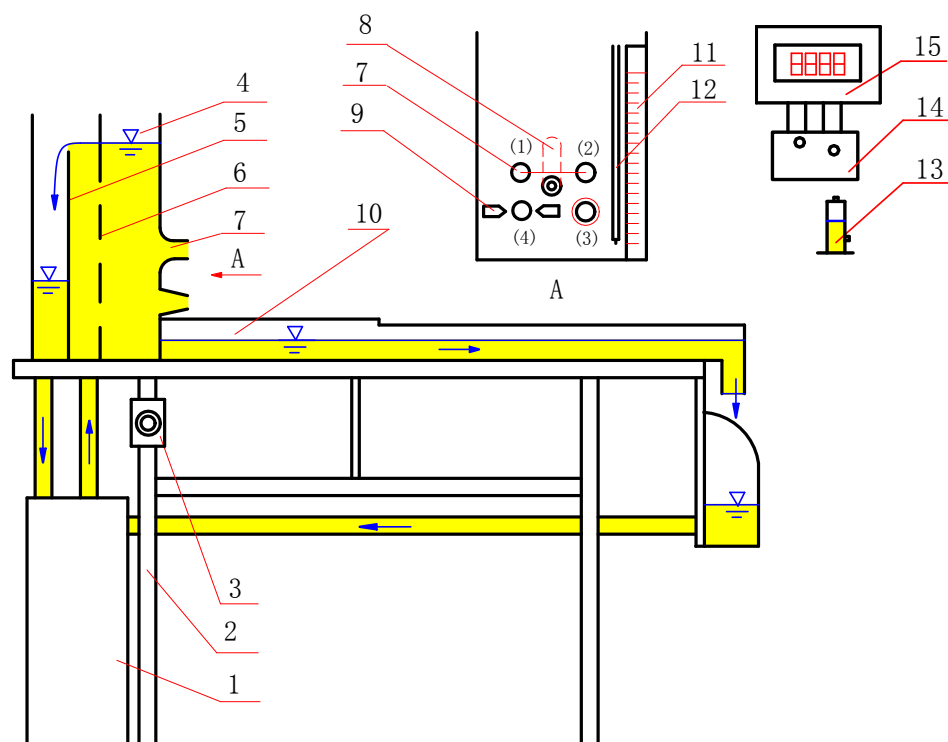


图 1 孔口出流与管嘴出流实验装置图

- | | | | |
|------------|----------|--------------|---------|
| 1. 自循环供水器 | 2. 实验台 | 3. 可控硅无级调速器 | 4. 恒压水箱 |
| 5. 溢流板 | 6. 稳水孔板 | 7. 孔口管嘴 | 8. 防溅旋板 |
| 9. 移动触头 | 10. 上回水槽 | 11. 标尺 | 12. 测压管 |
| 13. 内置式稳压筒 | 14. 传感器 | 15. 智能化数显流量仪 | |

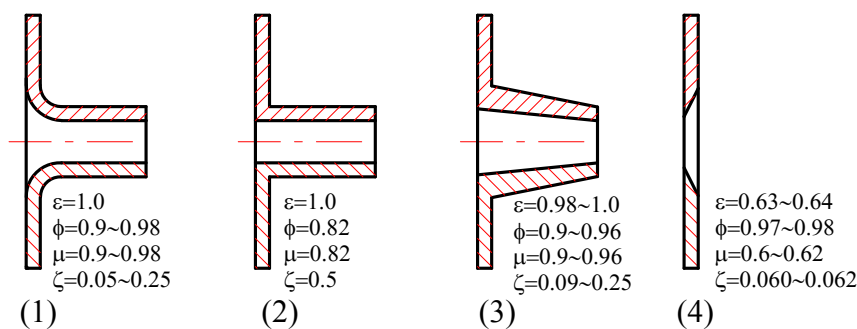


图2 孔口管嘴结构剖面图

(1) 圆角进口管嘴 (2) 直角进口管嘴 (3) 锥形管嘴 (4) 薄壁圆形小孔口

2. 基本操作方法

(1) 管嘴切换。防溅板 8 用于转换操作，当某一管嘴实验结束时，将旋板旋转至进口截断水流，再用橡皮塞封口；当需开启时，先用旋板挡水，再打开橡皮塞。这样可防止水花四溅。

(2) 孔口射流直径测量。移动触头 9 位于射流收缩断面上，可水平向伸缩，当两个触块分别调节至射流两侧外缘时，将螺丝固定。用防溅旋板关闭孔口，再用游标卡尺测量两触块的间距，即为射流收缩直径。

(3) 直角进口管嘴收缩断面真空度 h_v 测量。标尺 11 和测压管 12 可测量管嘴高程 z_1 及测压管水位 z ，则 $h_v = z_1 - z$ 。

三、 实验原理

在一定水头 H_0 作用下薄壁小孔口（或管嘴）自由出流时的流量，可用下式计算：

$$q_v = \varphi \varepsilon A \sqrt{2gH_0} = \mu A \sqrt{2gH_0}$$

式中： $H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}$ ，一般因行近流速水头 $\frac{\alpha v_0^2}{2g}$ 很小可忽略不计，所以 $H_0 = H$ ；

ε 为收缩因数， $\varepsilon = \frac{A_c}{A} = \frac{d_c^2}{d^2}$ ， A_c 、 d_c 分别为收缩断面的面积、直径；

φ 为流速因数， $\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}} = \frac{\mu}{\varepsilon}$ ；

μ 为流量因数， $\mu = \varepsilon \varphi = \frac{q_v}{A \sqrt{2gH_0}}$ ；

ζ 为局部阻力因数， $\zeta = \frac{1}{\varphi^2} - \alpha$ ，可近似取动能修正因数 $\alpha \approx 1.0$ 。

ε 、 μ 、 φ 、 ζ 的经验值参图 2。

根据理论分析，直角进口圆柱形外管嘴收缩断面处的真空度为： $h_v = \frac{p_v}{\rho g} = 0.75H$ 。

实验时，只要测出孔口及管嘴的位置高程和收缩断面直径，读出作用水头 H ，测出流量，就可测定、验证上述各因数。

四、 数据处理及成果要求

1. 记录有关信息及实验常数

实验设备名称：_____ 实验台号：_____

实 验 者：_____ 实验日期：_____

孔口管嘴直径及高程：

圆角管嘴 $d_1 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 直角管嘴 $d_2 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$

出口高程 $z_1 = z_2 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$

锥形管嘴 $d_3 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$ 孔口 $d_4 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$

出口高程 $z_3 = z_4 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$

（基准面选在标尺的零点上）

2. 实验数据记录及计算结果

表 1 孔口管嘴实验记录计算表

项目 \ 分类	圆角管嘴	直角管嘴	圆锥管嘴	孔口
水箱液位 $z_0 / (10^{-2} \text{m})$				
流量 $q_V / (10^{-6} \text{m}^3/\text{s})$				
作用水头 $H_0 / (10^{-2} \text{m})$				
面积 $A / (10^{-4} \text{m}^2)$				
流量因数 μ				
测压管液位 $z / (10^{-2} \text{m})$	/		/	/
真空度 $h_v / (10^{-2} \text{m})$	/		/	/
收缩直径 $d_c / (10^{-2} \text{m})$	/	/	/	
收缩断面 $A_c / (10^{-4} \text{m}^2)$	/	/	/	
收缩因数 ε				
流速因数 φ				
阻力因数 ζ				
流股形态				

七、 注意事项

1. 实验次序先管嘴后孔口，每次塞橡皮塞前，先用旋板将进口盖好，以免水花溅开；关闭孔口时旋板的旋转方向为顺时针，否则水易溅出；

2. 实验时将旋板置于不工作的管嘴上，避免旋板对工作孔口、管嘴的干扰。不工作的孔口、管嘴应用橡皮塞塞紧，防止渗水。

7 局部水头损失实验

一、 实验目的和要求

学习掌握三点法、四点法测量局部阻力因数的技能，并将突扩管的实测值与理论值比较，将突缩管的实测值与经验值比较；

二、 实验装置

1. 实验装置简图

实验装置及各部分名称如图 1 所示。

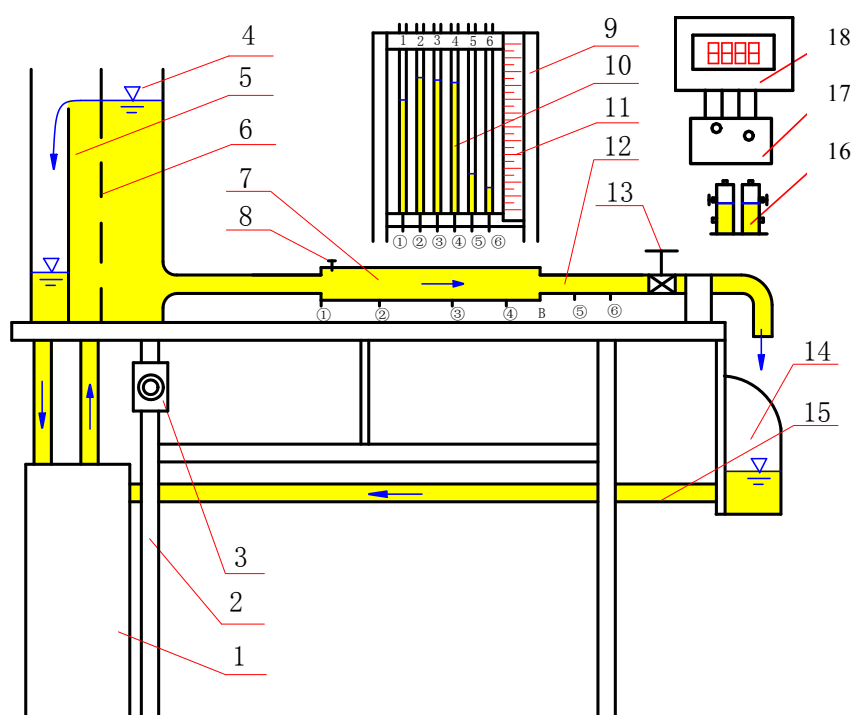


图 1 局部水头损失实验装置简图

- 1.自循环供水器 2.实验台 3.可控硅无级调速器 4.恒压水箱 5.溢流板
6.稳水孔板 7.圆管突然扩大 8.气阀 9.测压计 10.测压管①~⑥ 11.滑动测量
12. 圆管突然收缩 13.实验流量调节阀 14.回流接水斗 15.下回水管
16. 稳压筒 17.传感器 18. 智能化数显流量仪

尺

2. 基本操作方法

(1) 排气。启动水泵待恒压水箱溢流后，关闭实验流量调节阀 13，打开阀 8 排除管中滞留气体。排气后关闭阀 8，并检查测压管各管的液面是否齐平，若不平，重复排气操作，直至齐平。

(2) 测压管水头用测压计测量，基准面可选择在滑动测量尺零点上。

(3) 流量测量。实验流量用阀 13 调节。

三、 实验原理

由于局部阻力做功而引起的水头损失称为局部水头损失，用 h_j 表示。局部水头损失是在一段流程上，甚至相当长的一段流程上完成的，如图 2，断面 1 至断面 2，这段流程上的总水头损失包含了局部水头损失和沿程水头损失。若用 h_i ($i=1,2,\dots$) 表示第 i 断面的测压管水头，即有

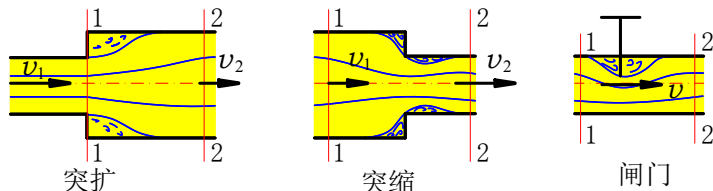


图 2 局部水头损失

$$h_w = h_j + h_{f1-2} = \left(h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g}\right) - \left(h_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g}\right)$$

或

$$h_j = \left(h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g}\right) - \left(h_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g}\right) - h_{f1-2}$$

局部阻力因数 ζ 为

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

(1) 圆管突然扩大段: $\zeta = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2$

(2) 圆管突然缩小段经验公式: $\zeta = 0.5\left(1 - \frac{A_3}{A_4}\right)$

四、 实验内容与方法

1. 测量突然扩大局部水头损失与突然缩小局部水头损失，并测定相应的局部水头损失因数。

参照实验基本操作方法，在恒定流条件下改变流量 2~3 次，其中一次为最大流量，待流量稳定后，测记各测压管液面读数，同时测记实验流量。

五、 数据处理及成果要求

1. 记录有关信息及实验常数

实验设备名称: _____ 实验台号: _____

实 验 者: _____ 实验日期: _____

实验管段直径:

$$d_1 = D_1 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m} \quad d_2 = d_3 = d_4 = D_2 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$$

$$d_5 = d_6 = D_3 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$$

实验管段长度:

$$l_{1-2} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m} \quad l_{2-3} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m} \quad l_{3-4} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$$

$$l_{4-B} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m} \quad l_{B-5} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m} \quad l_{5-6} = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{m}$$

2. 实验数据记录及计算结果

表 1 局部水头损失实验记录表

次数	流量 q_V /($10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)	测压管读数/ 10^{-2}m					
		h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6
1							
2							
3							

表 2 局部水头损失实验计算表

次数	阻力形式	流量 q_V /($10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)	前断面		后断面		h_j / 10^{-2}m	ζ	理论值 经验值 ζ
			$\frac{\alpha v^2}{2g}$ / 10^{-2}m	E_1' / 10^{-2}m	$\frac{\alpha v^2}{2g}$ / 10^{-2}m	E_2' / 10^{-2}m			
1	突然扩大								
2									
3									
1	突然缩小								
2									
3									

注: ζ 对应于突扩段的 v_1 或突缩段的 v_5 。

七、 注意事项

1. 恒压水箱内水位要求始终保持在溢流状态, 确保水头恒定。
2. 测压管后设有平面镜, 测记各测压管水头值时, 要求视线与测压管液面及镜子中影像液面齐平, 读数精确到 0.5 mm。
3. 其他参见伯努利方程实验。

8 沿程水头损失实验

一、实验目的和要求

1. 学会测定管道沿程水头损失因数 λ 和管壁粗糙度 Δ 的方法；
2. 分析园管恒定流动的水头损失规律、 λ 随雷诺数 Re 变化的规律，验证沿程水头损失 h_f 与平均流速 v 的关系。

二、实验装置

1. 实验装置简图

实验装置及各部分名称如图 1 所示。

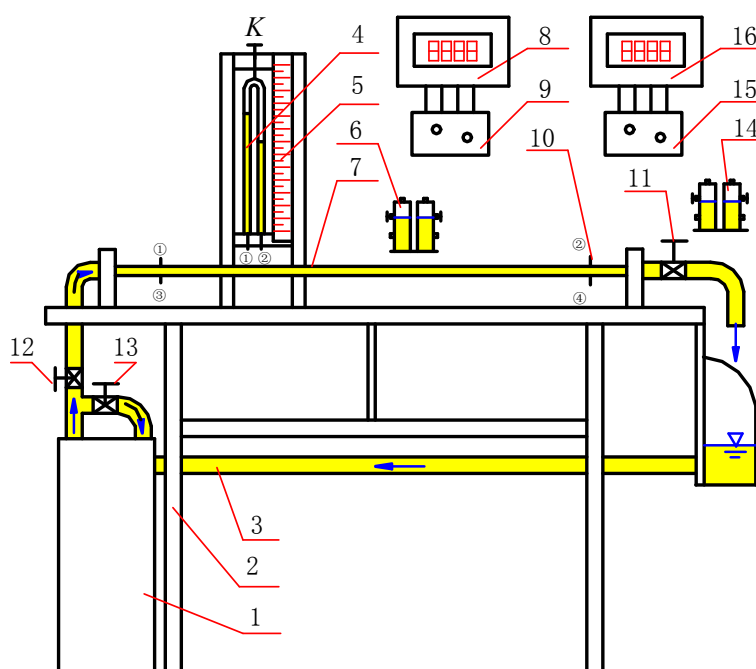


图 1 沿程水头损失实验装置图

1. 自循环高压恒定全自动供水器
2. 实验台
3. 回水管
4. 压差计
5. 滑动测量尺
6. 稳压筒
7. 实验管道
8. 压差数显仪
9. 压差传感器
10. 测压点
11. 实验流量调节阀
12. 供水管及供水阀
13. 旁通管及旁通阀
14. 稳压筒
15. 流量传感器
16. 智能流量数显仪

2. 基本操作方法

(1) 压差计测量

压差由压差计测量，流量用称重法或量体积法。

1) 称重法或量体积法是在某一固定的时段内，计量流过水流的重量或体积，进而得出单位时间内流过的流体量，是依据流量定义的测量方法。

本实验及后述各实验的测流量方法常用称重法或量体积法，用秒表计时，用

电子称称重，小流量时，也可用量筒测量流体体积。为保证测量精度，一般要求计时大于 15~20 秒。

2) 压差计连接管排气与压差计补气。启动水泵，全开阀 11，间歇性开关旁通阀 13 数次，待水从压差计顶部流过即可。若测压管内水柱过高须补气，全开阀门 11、13，打开压差计 4 顶部气阀 K ，自动充气使压差计中的右管液位降至底部（必要时可短暂关闭阀 12），立即拧紧气阀 K 即可。排气后，全关阀 11，测压计压差应为零。

3) 实验时始终全开阀 13，用阀 11 调节流量。层流范围的压差值仅为 2~3cm 以内，水温越高，差值越小，由于水泵发热，水温持续升高，应先进行层流实验。用压差计测量，流量调节后须等待几分钟，稳定后再测量。

(2) 数显压差仪测量

用管夹关闭压差计连通管，压差由数显压差仪测量。

1) 调零。启动水泵，全开阀 11，间歇性开关旁通阀 13 数次，以排除连通管中的气泡。然后，在关闭阀 11 的情况下，管道中充满水但流速为零，此时，压差仪和流量仪读值都应为零，若不为零，则可旋转电测仪面板上的调零电位器，使读值为零。

2) 流量调节方法：全开实验流量调节阀 11，调节旁通阀 13 来调节流量。

三、 实验原理

1. 对于通过直径不变的圆管的恒定水流，沿程水头损失由达西公式表达为

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

式中： λ 为沿程水头损失因数； l 为上下游测量断面之间的管段长度； d 为管道直径； v 为断面平均流速。

若在实验中测得沿程水头损失 h_f 和断面平均流速，则可直接得沿程水头损失因数

$$\lambda = \frac{2gdh_f}{l} \cdot \frac{1}{v^2} = \frac{2gdh_f}{l} \left(\frac{\pi}{4} d^2 / q_v \right)^2 = k \frac{h_f}{q_v^2}$$

其中

$$k = \pi^2 g d^5 / 8l$$

由伯努利方程可得

$$h_f = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) = \Delta h$$

沿程水头损失 h_f 即为两测点的测压管水头差 Δh ，可用压差计或电测仪测得。

2. 圆管层流运动

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

四、 实验内容与方法

1. 沿程水头损失因数测量与分析实验

参照实验基本操作方法，分别在层流和湍流两种流态下测量流量、水温、压差各 4~6 次。实验数据参考表 1 处理。

五、 数据处理及成果要求

1. 记录有关信息及实验常数

实验设备名称：_____ 实验台号：_____

实 验 者：_____ 实验日期：_____

圆管直径 $d = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{ m}$ 测量段长度 $l = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^{-2} \text{ m}$

2. 实验数据记录及计算结果（参表 1）

七、 注意事项

1. 实验装置长期静置不用后再启动时，需在切断电源后，先用螺丝刀顶住电动机轴端，将电机轴转动几圈后方可通电启动。

2. 实验时，去掉水泵罩壳，以防泵体过热。

3. 其他参见伯努利方程实验。

表 1 沿程水头损失实验记录计算表

测次	体积 V / 10^{-6}m^3	时间 t / s	流量 q_V / $(10^{-6}\text{m}^3/\text{s})$	流速 v / $(10^{-2}\text{m}/\text{s})$	水温 T / $^{\circ}\text{C}$	粘度 ν / $(10^{-4}\text{m}^2/\text{s})$	雷诺数 Re	压差计、电测仪读数 / 10^{-2}m		沿程损失 h_f / 10^{-2}m	沿程损失因数 λ	$\lambda = \frac{64}{Re}$ ($Re < 2300$)
								h_1	h_2			
1												
2												
3												
4												
5												
6	/	/										/
7	/	/										/
8	/	/										/
9	/	/										/
10	/	/										/
11	/	/										/