# 化工基础实验

沈王庆　李国琴　黄文恒　主编





西南交通大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 化工基础实验

沈王庆　李国琴　黄文恒　主　编

西南交通大学出版社

·成　都·

图书在版编目（CIP）数据

化工基础实验 / 沈王庆，李国琴，黄文恒主编. —
成都：西南交通大学出版社，2019.8
ISBN 978-7-5643-7118-0

Ⅰ. ①化… Ⅱ. ①沈… ②李… ③黄… Ⅲ. ①化学工
程－化学实验－高等学校－教材 Ⅳ. ①TQ016

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 194875 号

Huagong Jichu Shiyan
化工基础实验

沈王庆　李国琴　黄文恒 / 主　编
责任编辑 / 牛　君
封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行
（四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼　610031）
发行部电话：028-87600564　　028-87600533
网址：http://www.xnjdcbs.com
印刷：四川森林印务有限责任公司

成品尺寸　185 mm × 260 mm
印张　8　　字数　197 千
版次　2019 年 8 月第 1 版　　印次　2019 年 8 月第 1 次

书号　ISBN 978-7-5643-7118-0
定价　26.00 元

课件咨询电话：028-81435775
图书如有印装质量问题　本社负责退换
版权所有　盗版必究　举报电话：028-87600562

# 前　言

“化工基础实验”是在学习“化工原理”“化学工程基础”等相关理论知识后，进行实践应用操作的实验课程，是化学、应用化学和资源循环科学与工程等专业的一门重要的技术基础课程，对培养学生的动手能力和今后的工作能力至关重要，在相关专业的教学计划中占有重要地位，发挥着重要作用。

本书共精选了20个实验，内容涵盖流体流动、流体输送机械、沉降与过滤、传热、吸收、蒸馏和干燥等。每个实验的内容包括实验目的、实验原理、实验装置及流程、操作步骤、注意事项、数据记录及计算、问题与思考。本书编写简单、易懂，与实践操作结合紧密，具有较强的适用性。

编者经过近三年的努力完成本书的编写工作。感谢教材编订过程中北京东方仿真有限公司、莱帕克（北京）科技有限公司等企业提供的相关技术支持。教材建设属于内江师范学院2016“本科教学工程”项目（jc16003），感谢内江师范学院提供的资金支持。最后感谢西南交通大学出版社对本教材的修订及出版。

由于编者水平有限，书中还有诸多不足之处，敬请各位读者批评、指正。

编　者

2019年5月

# 目 录

实验 1　雷诺实验 ……1
实验 2　离心泵性能曲线测定及孔板流量计标定实验 ……4
实验 3　流体阻力测定实验 ……10
实验 4　伯努利方程实验 ……15
实验 5　套管换热器液-液热交换系数及膜系数的测定 ……21
实验 6　筛板精馏实验 ……29
实验 7　萃取实验 ……36
实验 8　单管蒸发实验 ……44
实验 9　吸收实验 ……50
实验 10　吸收与解吸实验 ……58
实验 11　流量计标定实验 ……66
实验 12　离心泵综合性能测定实验 ……71
实验 13　非均相分离实验 ……76
实验 14　冷模塔演示实验 ……79
实验 15　恒压过滤实验 ……82
实验 16　综合流体力学实验 ……88
实验 17　流线（轨线）演示实验 ……99
实验 18　静力学实验 ……102
实验 19　列管传热器实验 ……109
实验 20　循环风洞干燥实验 ……113
参考文献 ……121

需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 实验 1　雷诺实验

## 一、实验目的

（1）了解流体在圆管内的流动形态与雷诺数 $Re$ 的关系。
（2）观察流体在圆管内做稳定层流及湍流的流动形态，掌握圆管流态判别准则。
（3）学习应用无量纲参数进行实验研究的方法，并了解其实用意义。

## 二、实验原理

雷诺数 $Re=\dfrac{du\rho}{\mu}=\dfrac{4q_v\rho}{\pi d\mu}$

## 三、实验装置及流程（图 1-1）

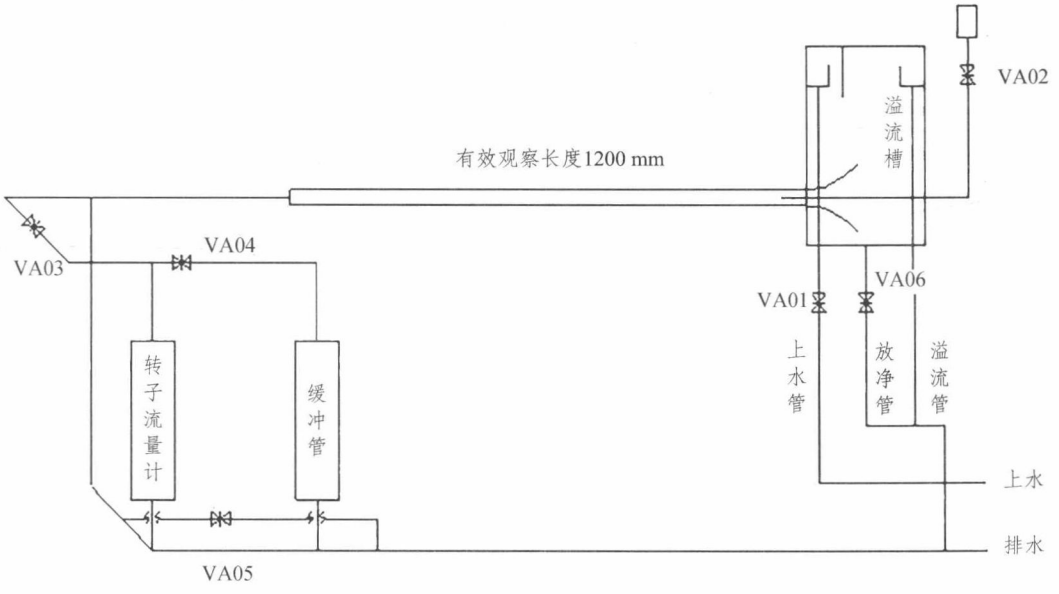



图 1-1　实验装置流程图

在 400 mm×500 mm×600 mm 的有机玻璃溢流水箱内安装一根内径为 25 mm、长为 1 200 mm 的有机玻璃管，玻璃管进口做成喇叭状，以保证水能平稳地流入管内。在进口端中心处插入注射针头，通过小橡皮管注入显色剂——红墨水。自来水源源不断地流入水箱，超出溢流堰部分从溢流口排出，管内水的流速可由管路下游的阀门 VA04 控制。

实验自备消耗品：水和红墨水。

## 四、操作步骤

（1）检查阀门状态，确保所有阀门均处于关闭状态。

（2）开启进水阀（阀门 VA01）上水，待水淹没过喇叭进口时，观察有机玻璃管两端及水箱两侧是否漏水。

（3）继续加水，至溢流槽出现溢流，为保证水面稳定，关小阀门维持少量溢流即可（溢流越小越好）。

（4）打开排气阀（VA03）和全开流量调节阀（VA04），将管路内气泡排出。

（5）关闭排气阀 VA03，将已配制好的 1∶1 的红墨水注入墨水储槽，调节阀门（VA02）控制红墨水的流量。

（6）关闭阀门 VA03，缓慢调节阀门 VA04，观察记录红墨水随水流的不同流动状态及相应的流体流量大小，计算不同流动状态下的 $Re$（雷诺数）。

（7）调节阀门（VA04）至流体流动状态为层流，用手堵住出口，在喇叭口内注入大量红墨水，放开水流动，通过观察红墨水的流动形状分析流体层流时的速度分布；将转子流量计流量调节到最大，方法同上，观测湍流时的速度分布。

（8）实验结束，打开阀门 VA03、VA04、VA05、VA06，将装置内部水排空。

（9）操作补充：

① 由于红墨水的密度大于水的密度，因此为使从针头出来的红墨水线不发生沉降，将红墨水按 1∶1 的比例稀释（具体稀释比例视红墨水的性质而定，以实验现象最佳为准）。

② 在观察层流流动时，当把水量调到足够小的情况下（在层流范围），禁止碰撞设备，减小周围环境的振动对线形造成的影响。

③ 为防止上水时造成的液面波动，上水量不能太大，维持少量溢流即可。

④ 红墨水的流量要根据实际水流速度调节，流量太大，超过管内实际水流速度，容易造成红墨水的波动；流量太小，红墨水线不明显，不易观测。

⑤ 将水箱注满水，关闭上水阀，使用静止状态的水观察红墨水的流动状态，临界雷诺数可达 2 000 左右。

## 五、注意事项

（1）在移动该装置时，请保持平稳，严禁磕碰。

（2）长期不用该装置时，将水放净。玻璃水箱打扫干净后，将水箱口盖上，以免灰尘落入。

（3）冬季室内温度达到冰点时，水箱内严禁存水。

## 六、数据记录及计算

### 1. 数据记录

水的温度：_____℃。

水的流速：记入表 1-1 中。

### 2. 结果计算

根据水的流速及其他数据计算对应的雷诺数，填入表 1-1 中。

表 1-1　雷诺实验数据记录

| 实验号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|
| $u$ | | | | | |
| $Re$ | | | | | |

## 七、问题与思考

（1）常见的流速测量装置有哪几种？分析各自的优缺点。
（2）本实验的流速测量装置是什么？分析它的测量原理。
（3）本实验对工业应用有何价值？

# 实验 2　离心泵性能曲线测定及孔板流量计标定实验

## 一、实验目的

（1）了解离心泵的操作及有关仪表的使用方法。

（2）测定离心泵在固定转速下的操作特性，绘制特性曲线。

（3）测定孔板流量计的孔流系数 $C_0$，了解孔板流量计的操作原理和特性。

## 二、实验原理

### 1. 离心泵性能曲线测定

离心泵的特性曲线取决于泵的结构、尺寸和转速。对于一定的离心泵，在一定的转速下，泵的扬程 $H$ 与流量 $q$ 之间存在一定的关系。此外，离心泵的轴功率 $P$ 和效率 $\eta$ 亦随泵的流量 $q$ 而改变。因此 $H$-$q$、$P$-$q$ 和 $\eta$-$q$ 三条关系曲线反映了离心泵的特性，称为离心泵的特性曲线。

（1）流量 $q$ 的测定：本实验装置采用涡轮流量计直接测量泵流量 $q$。

（2）扬程的计算：根据伯努利方程

$$H=\frac{\Delta p}{\rho\cdot g}$$

式中　$H$——扬程；

$\Delta p$——压差；

$\rho$——水在操作温度下的密度；

$g$——重力加速度。

本实验装置采用差压计直接测量 $\Delta p$。

（3）泵的总效率：

$$\eta=\frac{\text{泵的有效功率（泵输出的净功率）}}{\text{电机功率}}=\frac{q\cdot H\cdot\rho\cdot g}{P_{电}}$$

（4）电机功率 $P_{电}$：本实验装置采用可编程逻辑控制器（PLC）直接测量电机功率 $P_{电}$。

（5）转速校核：应将以上所测参数校正为额定转速下的数据来绘制特性曲线。

$$\frac{q'}{q}=\frac{n'}{n}$$

$$\frac{H'}{H}=\left(\frac{n'}{n}\right)^2$$

$$\frac{P'}{P}=\left(\frac{n'}{n}\right)^3$$

式中　$n'$——额定转速；

$n$——实际转速，r/min。

### 2. 孔板流量计标定

孔板流量计是根据动能和静压能相互转换的原理设计的。孔板的开孔越小，通过孔口的平均流速 $u_0$ 越大，孔板前后的压差 $\Delta p$ 越大，阻力损失也随之增大。其具体工作原理如图 2-1 所示。

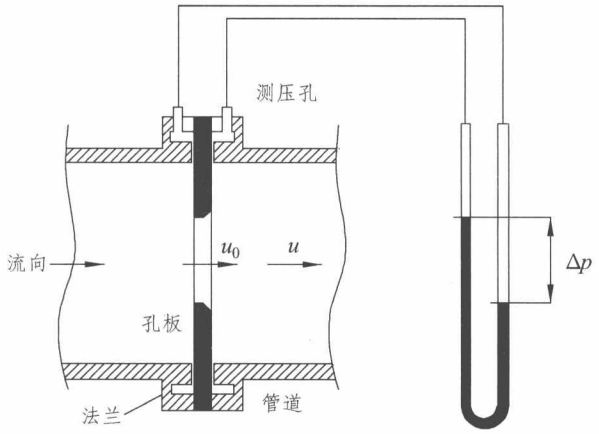



图 2-1　孔板流量计原理图

为了减小流体通过孔口后由于突然扩大而引起的大量旋涡能耗，在孔板后安装渐扩圆角。因此孔板流量计的安装具有方向性。若是反向安装，能耗增大，同时流量系数也将改变。

计算式如下（具体推导过程见教材）：

$$q=C_0\cdot A_0\cdot\sqrt{\frac{2\cdot\Delta p}{\rho}}$$

式中　$q$——流量，$m^3/s$（为实际流量）；

$C_0$——孔流系数（无因次，本实验需要标定）；

$A_0$——孔截面面积，$m^2$（孔内径 20.3 mm）；

$\Delta p$——实际压差，Pa，$\Delta p$ = 表显值–仪表零点；

$\rho$——管内流体密度，$kg/m^3$。

（1）在实验中，只要测出对应的流量 $q$ 和压差 $\Delta p$，即可计算出其对应的孔流系数 $C_0$。

（2）管内 $Re$ 的计算：

$$Re=\frac{4q\rho}{\pi d\mu}$$

以上计算过程中 $q$ 均应为实际流量。

## 三、实验装置及流程

本实验装置在满足工艺要求、质量要求的前提下，主体采用透明材质加工，使实验流程更直观化，装置更具亲和力，外观更精致、美观；附件经过严格筛选，严格的工艺要求和检测手段，保证了装置的准确性、稳定性；装置与控制柜采用一体式安装方式，便于使用者同时观察装置及控制柜的实时状态；移动终端、无线通信技术的应用更加提高了装置的灵活性，实现了单人操作，即操作装置的同时也可实时观察数据变化，更好地体现了人文关怀。

1. 流程图（图 2-2）

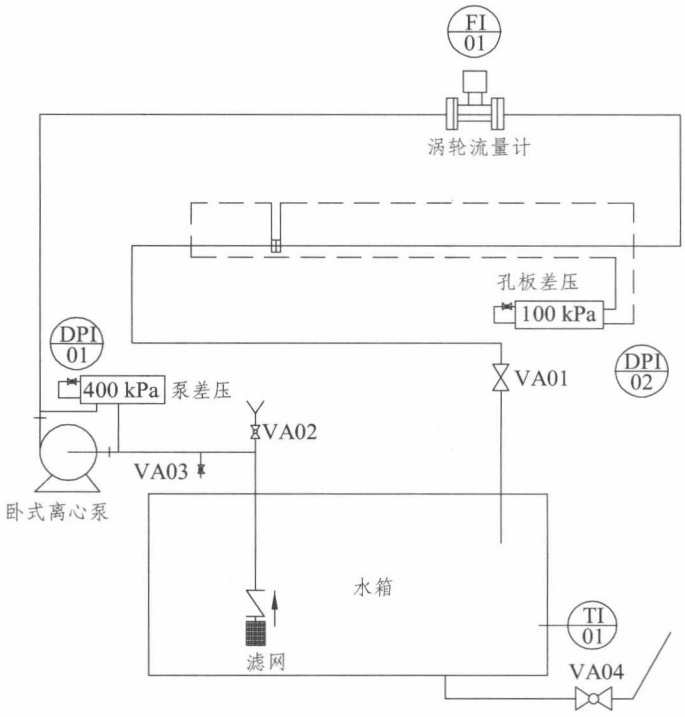



图 2-2　工艺流程图

2. 仪表参数

离心泵：型号 MS100/0.55，550 W，$H$ = 14 m；
循环水槽：有机玻璃，700 mm×420 mm×380 mm；
涡轮流量计：0.5~8 $m^3/h$；
孔板流量计：标准环隙取压，工作管路内径 = 26 mm，孔径 = 20.3 mm，面积比 $m$ = 0.6；
差压传感器：离心泵差压测量范围 0 ~ 400 kPa，孔板差压测量范围 0 ~ 100 kPa；
温度传感器：Pt100 航空接头。

## 四、操作步骤

1. 熟　悉

按照分工（实验预习时）熟悉流程，清楚各仪表、阀门的作用。



需要全本请访问 www.ertongbook.com

2. 检　查

检查两个差压传感器及平衡阀是否处于开启状态。

3. 灌　泵

泵的位置高于水面，为防止泵启动发生气缚，应先把泵灌满水。关闭泵进口阀，打开泵出口阀，打开灌泵阀，灌泵，当水不流入时，关闭灌泵阀，关闭泵出口阀，等待启动离心泵。

4. 开　车

启动离心泵。

5. 排　气

打开泵出口阀，调节流量到最大，对主管路及差压连接管路进行排气，约 20 s 即可。

6. 测　量

为了取得满意的实验结果，必须考虑实验点的分布和测量次数。

（1）在每定常流量下，应尽量同步地读取各测量值。

（2）每次改变流量，应以流量仪表显示读数来调节。建议按流量计读数调节流量，按以下流量进行：$q$ = 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, … 直至最大。

7. 停　车

实验完毕后，关闭出口阀，开启平衡阀，然后再停泵。

## 五、注意事项

（1）启动泵前检查相线和正倒转，是指长时间停用后，在启动前需检查；另在长时间不用时，开启泵时注意观察泵启动声音，是否正常转动，以防止泵内异物卡住而烧坏电机。若连续使用，可省去此步骤。

（2）因为泵是机械密封，必须在泵有水时使用，若泵内无水空转，易造成机械密封件升温损坏而导致密封不严，此时需专业厂家更换机械密封。因此，严禁泵内无水空转！

（3）在调节流量时，泵出口调节阀应徐徐开启，严禁快开快关。

（4）长期不用时，应将槽内水放净，并用湿软布擦拭水箱，防止水垢等杂物粘在上面。

（5）在实验过程中，严禁异物掉入循环水槽内，以免被泵吸入泵内损坏泵、堵塞管路和损坏涡轮流量计。

## 六、数据记录及计算

调试数据计算示例见表 2-1、表 2-2、表 2-3。

表 2-1　实验设计相关参数

| 管内径<br>$d_1$/mm | 孔内径<br>$d_0$/mm | 水温<br>$t$/℃ | 密度<br>$\rho$/(kg/m$^3$) | 流速<br>$u$/CP |
|---|---|---|---|---|
| 26 | 20.3 | | | |

表 2-2　离心泵性能调试数据示例

| 试验号 | 流量 $q$/(m$^3$/h) | 泵压差/Pa | 转速 $n$/(r/min) | 功率 $P$/W | 扬程 $H$/m | 效率 $\eta$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |
| 7 | | | | | | |
| 8 | | | | | | |
| 9 | | | | | | |
| 10 | | | | | | |

表 2-3　孔板标定计算示例

| 试验号 | 流量 $q$/(m$^3$/h) | 孔板压差/Pa | $Re/\times 10^{-4}$ | $C_0$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |

## 七、问题与思考

（1）在什么情况下 $H=\dfrac{\Delta P}{\rho \cdot g}$？

（2）实验过程中为什么要用额定转速下的数据来绘制特性曲线图？

（3）离心泵启动时为何要关闭灌泵阀和出口阀？

（4）在合成氨工艺中哪些地方用到离心泵？

# 实验 3　流体阻力测定实验

## 一、实验目的

（1）了解实验所用到的实验设备、流程、仪器仪表。

（2）了解并掌握流体流经直管和阀门引起的阻力损失及阻力系数（直管摩擦系数 $\lambda$ 与局部阻力系数 $\xi$）的测定方法及变化规律，并将 $\lambda(\xi)$与 $Re$ 的关系标绘在双对数坐标上。

（3）了解不同管径（相同材质，即相同绝对粗糙度）的直管摩擦系数 $\lambda$ 与 $Re$ 的关系；

（4）掌握差压传感器的正确应用方法。

## 二、实验原理

### 1. 流体在管内流量及 $Re$ 的测定

本实验采用涡轮流量计直接测出流量 $q(\mathrm{m^3/h})$：

$$u(\mathrm{m/s}) = 4q / (3600\pi \cdot d^2)$$

$$Re = \frac{d \cdot u \cdot \rho}{\mu}$$

式中　$d$——管内径，m；

$\rho$——流体在测量温度下的密度，$\mathrm{kg/m^3}$；

$\mu$——流体在测量温度下的黏度，Pa·s。

### 2. 直管摩擦阻力损失 $\Delta p_{0f}$ 及摩擦阻力系数 $\lambda$ 的测定

流体在管路中流动，由于黏性剪应力的存在，不可避免地会产生机械能损耗。根据范宁（Fanning）公式，流体在圆形直管内做定常稳定流动时的摩擦阻力损失为

$$\Delta p_{0f}\ (\mathrm{Pa}) = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho \cdot u^2}{2}$$

式中　$l$——沿直管两测压点间距离，m；

$\lambda$——直管摩擦系数，无因次。

由上可知，只要测得 $\Delta p_{0f}$ 即可求出直管摩擦系数 $\lambda$。根据伯努利方程和压差计对等径管读数的特性知：当两测压点处管径一样，且保证两测压点处速度分布正常时，压差读数 $\Delta p$ 即为流体流经两测压点处的直管阻力损失 $\Delta p_{0f}$。

$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot d}{\rho \cdot u^2 \cdot l}$$

式中　$\Delta p$——压差计读数，Pa。

以上即无论测定粗糙管、近似光滑管或不同相对粗糙度的直管的阻力损失 $\Delta p$、阻力系数 $\lambda$，以及随 $Re$ 的变化规律的方法。

### 3. 阀门局部阻力损失 $\Delta p_f'$ 及其阻力系数 $\zeta$ 的测定

流体流经阀门时，由于速度的大小和方向发生变化，流动受到阻碍和干扰，出现涡流而引起的局部阻力损失为

$$\Delta p_f' \text{ (Pa)} = \zeta \frac{\rho u^2}{2}$$

式中　$\zeta$——局部阻力系数，无因次。

对于测定局部管件的阻力如阀门，其方法是在管件前后的稳定段内分别设置两个测压点。按流向顺序分别为 1、2、3、4 点，在 1~4 点和 2~3 点分别连接两个压差计，分别测出压差为 $\Delta p_{14}$、$\Delta p_{23}$。

在 2~3 列伯努利方程（2~3 间直管长为 $L$）：

$$p_2 - p_3 = (\rho g Z_2 + \frac{\rho u_2^2}{2}) - (\rho g Z_3 + \frac{\rho u_3^2}{2}) + \sum \Delta p_{f23}$$

上式中，由于 2、3 点管径相同，管子水平放置，位能与动能项可消除；而总能耗可分为直管段阻力损失 $\Delta P_{f23}$ 和阀门局部阻力损失 $\Delta p_f'$，因此上式可简化为

$$\Delta p_{23} = \Delta p_{f23} + \Delta p_f' \qquad (3\text{-}1)$$

同理在 1~4 列伯努利方程（1~4 间直管长为 $2L$）：

$$\Delta p_{14} = \Delta p_{f14} + \Delta p_f' = 2\Delta p_{f23} + \Delta p_f' \qquad (3\text{-}2)$$

联立式（3-1）和（3-2），解得

$$\Delta p_f' = 2\Delta p_{23} - \Delta p_{14}$$

则局部阻力系数为 $\zeta = \dfrac{2 \cdot (2\Delta p_{23} - \Delta p_{14})}{\rho \cdot u^2}$

## 三、实验装置及流程

### 1. 装置流程图（图 3-1）

### 2. 流程说明

循环水由水箱进入离心泵入口，泵出至流量调节阀 V1，经涡轮流量计计量，通过各支路阀 V2、V3、V4 流回水箱。

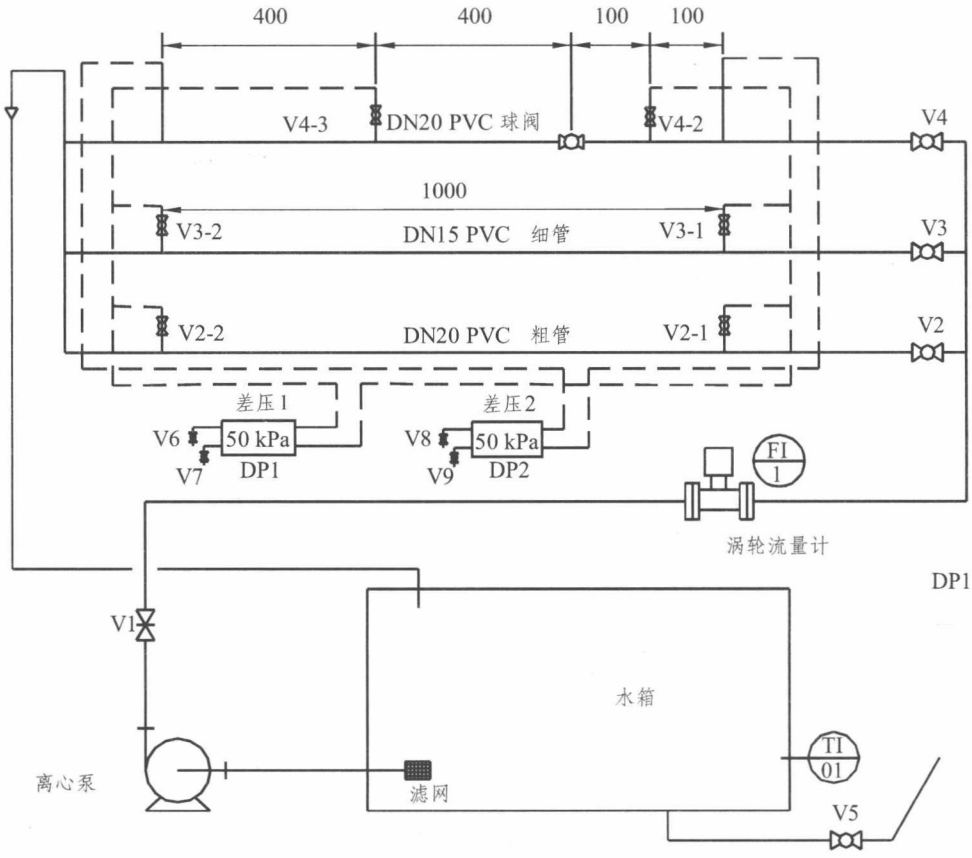



图 3-1　流体阻力实验流程图

阀门：V1—流量调节阀，V2—粗管支路阀，V3—细管支路阀，V4—阀门阻力支路阀，V2-1—粗管上游取压阀（H），V2-2 粗管下游取压阀（L），V3-1—细管上游取压阀（H），V2-2 细管下游取压阀（L），V4-1—阀门上游点 2 取压阀，V4-3 阀门下游点 3 取压阀（L），V5—放净阀；

温度：TI1—循环水温度；

差压：DP1—差压 1，DP2—差压 2；

流量：FI1—循环水流量。

### 3. 设备仪表参数

离心泵：型号 MS100/0.55，550 W，$H$ = 14 m；

水箱：700 mm×420 mm×380 mm（长×宽×高）；

涡轮流量计：0.5~8 $m^3/h$；

差压传感器：测量范围 0~50 kPa；

温度传感器：Pt100 航空接头；

细管测量段尺寸：DN15，内径 $\phi$16，透明 PVC，测点长 1 000 mm；

粗管测量段尺寸：DN20，内径 $\phi$20，透明 PVC，测点长 1 000 mm；

阀门测量段尺寸：DN20，内径 $\phi$20，PVC 球阀。



需要全本请访问 www.ertongbook.com