



食品工程原理实验

主编: 郭清南

山东农业大学

机械与电子工程学院

目 录

实验注意事项	2
第一章 实验基础知识	3
一、食品工程原理实验教学的目的	3
二、食品工程原理实验要求	3
三、食品工程原理实验数据的处理方法	4
第二章 实验内容	6
实验一 静力学方程实验	6
实验二 伯努利方程实验	11
实验三 雷诺实验	15
实验四 管路阻力的测定实验	17
实验五 泵的性能测定实验	21
实验六 风机的性能测定实验	25
实验七 压滤机过滤常数的测定实验	27
实验八 传热实验	30
实验九 干燥实验	33

实验注意事项

1. 按时进入实验室进行实验，不得有迟到和早退现象。
2. 仪器、设备安装完毕或者连接好电线之后，必须经教师检查确认无误之后，才能接通电源开始实验。
3. 一定要按实验指导书或仪器设备的使用说明书的规定使用仪器设备，或者按照教师示范的方法进行操作，以免产生不良后果。未经教师允许，不得擅自改变操作方法。实验中，仪器设备出现故障应及时报告教师，在教师的指导下进行处理。
4. 仪器、设备一般都应在达到规定的稳定状态范围后才进入实验测定阶段。因此，要注意实验数据记录应及时、准确、完整、整齐。全部数据应记录在预先准备好的表格内，不得随意乱记，以免遗漏或记错。
5. 注意节约水电、爱护国家资产。不得乱动与本实验无关的电源开关、仪器设备等。仪器设备出现损坏时，应及时报告实验指导教师，进行登记，按有关规定处理。
6. 实验室内严禁吸烟、吃零食、大声喧哗及打闹等，违者按破坏课堂纪律处理。
7. 在实验的进行过程中，要随时注意排除危及人身和财产安全的事故隐患，防止触电、失火、机械碰撞、烧毁电机、损伤身体等事故的发生。
8. 每次实验完毕，将所用仪器设备擦洗干净、整理复原、排放整齐，并把室内打扫干净。

第一章 实验基础

一、食品工程原理实验教学的目的。

食品工程原理是应用自然科学的基础理论来分析和解决食品生产过程中实际工程问题的一门技术基础课，因而具有很强的理论性和实践性。食品工程原理实验教学是食品工程原理整个教学过程中的一个重要的实践环节。其主要目的为：

(一) 学习和了解食品工程原理的实验研究方法，掌握食品工程原理实验中的主要实验技能，巩固前修基础实验课所学技能。通过让学生自学相关资料、根据所学原理设计实验方案、独立选择和使用各种仪器设备等活动，培养学生的自学能力和实际动手能力。

(二) 通过观察实验现象、正确记录数据、科学分析处理和表达数据、运用前修理论和实验课所学知识，综合判断实验结果的可靠性及分析主要误差来源等活动，培养学生的逻辑思维能力、分析问题和解决问题的能力等。

(三) 在验证食品工程原理的主要理论，巩固和加深对所学理论理解的同时，使学生的科研能力得到初步训练。

(四) 培养学生严肃、认真的科学态度和严格细致的工作作风。

二、食品工程原理实验要求。

实验教学过程主要包括实验前的准备、组织实施实验、数据的测读与记录和编写实验报告等四部分内容。对各部分内容具体提出如下的说明和要求：

(一) 准备实验。

1. 实验前做好预习。仔细阅读理论教材的有关章节、实验教材的相关内容、所用仪器设备的使用说明书、相关参考书籍及资料等，弄清实验目的和要求；

2. 看懂实验原理。掌握实验所依据的基本理论，并在基本理论的指导下弄清待测物理量及各物理量间的依存规律、基本公式及各量的物理意义和单位；

3. 弄清所用仪器设备的构造、工作性能、安装调试及操作使用方法；

4. 在此基础上制定出最佳实验方案、设计出记录原始数据的表格、掌握实验条件和操作要点；

5. 未作预习的学生不得进行实验。

(二) 组织实施实验。

1. 食品工程原理实验多是由若干人合作完成的，因此必须做好组织工作。按实验要求划分的实验小组要有一个组长负责实验方案执行的组织指挥。组员既有明确分工，又应服从统一指挥，做到相互协作，彼此要进行必要的轮换，以便得到全面训练；

2. 实验时要认真操作，严格控制实验条件，仔细观察实验现象。

(三) 实验数据的测读与记录。

1. 凡是与实验结果直接相关的数据，如大气压、水温、气温、设备的有关尺寸、物料的物理性质等，必须一一测取，不得遗漏。

2. 凡是可从手册查取的数据或由已测定的量导出的数据不比直接测定。例如水的粘度、密度等物理量，只要测知水温即可查出；

3. 所有数据都应在操作条件和实验现象达到稳定状态后读取。这是因为仪表存在滞后特性，条件改变后现象随条件的改变也存在滞后性，即存在着由不稳定状态向稳定状态过渡的

时段，因此在不稳定状态下读取的数据是不可靠的，由不可靠的数据所得出的结论必然是错误的；

4. 同一条件下至少要读取两次数据，且当两次数据相近时才记录。数据必须记录在预先拟好的记录表格内，不得随意乱记。记录时要注意各数据的单位；

5. 数据记录必须真实地反映仪表的精确度，一般记录至仪表上最小分度的下一位数，因而数据的末位都是估计数字；

6. 实验中，如果出现不正常现象，数据有明显偏差时，应在备注中注明；

7. 原始记录数据必须经指导教师审查合格后才能用于实验报告，否则应重新测定。

(四) 编写实验报告。

实验报告必须写得简单明白、数据完整、分析透彻、结论明确无误。报告应包括的款项如下：

1. 报告的题目；

2. 编写实验报告的人员及同组的合作实验人员；

3. 实验的目的要求；

4. 实验仪器设备的说明（包括流程示意图、主要设备仪器的类型及规格等）；

5. 实验的基本原理及方法步骤简述；

6. 实验数据（包括原始数据、与实验结果相关的全部数据）；

7. 数据整理与计算（引用的数据要注明来源，导出数据要列出简化计算公式，并对每一种类型都列出示例计算过程）；

8. 数据的表达（可采用列表法、图形法表示法或者方程式表示法）；

9. 实验讨论（主要结合实验现象及发现的问题，讨论误差主要来源，减小误差的措施，对实验中发现的某些现象做出解释，提出对实验方法、使用的仪器及操作方法的改进意见）；

10. 实验报告必须个人独立完成，在规定的时间内交给教师批阅。

三、食品工程原理实验数据的处理方法。

通过实验获得的原始记录数据需经整理计算（数据处理）才能得到应有的结果。实验结果的表达方法通常有列表法、图形法和方程式法三种。

(一) 数据的整理计算。

1. 在数据计算过程中，应至少写出一组数据的完整计算过程，以便检查计算方法和数字计算结果有无错误。每计算完一组数据，应首先判断结果是否合理，如数量级是否在正常范围内，以免一错到底。

2. 为减少计算工作量，最好将公式中多次重复的部分合并为公用常数。例如在测量管路的沿程阻力系数（阻力因数）时，每一个测定的平均流速 u 的值都要计算一次雷诺数 $Re = \rho du / \mu$ 。而在改变平均流速 u 时，管路的内径 d 、流体的密度 ρ 和动力黏度 μ 都可以认为保持不变，于是可合并为一个常数 $K = \rho d / \mu$ ，预先将其数值算好，于是计算雷诺数的公式变为 $Re = Ku$ ，这样使得计算简单得多了。

3. 在计算中应注意有效数字。工程计算的最后结果，一般保留三位有效数字，在中间运算过程中可多保留一或两位不定数字。数字过大或者过小时，应以科学记数法表示。

(二) 实验数据的表达方法。

1. 列表表示法。

列表表示法就是将一组实验数据中的自变量、因变量的各对应数值以一定的形式和顺序一一对应地列出，形成函数数值表。一般按自变量的数值的增大或减小的顺序排列。一个完

整的函数数值表，一般应包括序号、名称、项目、说明及数据来源等五项。

表的名称应简明扼要，一看即知其内容。表的项目应包括变量的名称及单位，一般在不加说明即可了解的情况下，应尽量用符号代表。简单的说明和数据来源可在备注栏内注明。如果难于说明时，可在表格以外的适当地方详细写明。表内的数字写法应注意整齐统一。数值为零时应记为“0”，在某栏内划一横线时则表示该数值空缺。同一竖列的数值，小数点应上下对齐。

2. 图形表示法。

实验结果可用几何图形或者函数图像表达出来。其优点在于直观形象，便于比较。例如通过函数图像（曲线）可直接看出数据的变化规律以及最高点、最低点、转折点、周期性和其它特征。如果图像作得足够准确，则不必知道变量间的数学解析式，即可利用图像对变量求微分和积分。还可根据图像的形状来确定函数方程的形式。在作图时应注意：

(1) 坐标纸选择：普通直角坐标纸适合于大多数用途，但对于符合 $y=ax^n$ 的幂函数关系的数据，采用双对数坐标纸，更为方便（因为可使图像变为直线）；

(2) 坐标标度的选择：习惯上，以横轴表示自变量，纵轴表示因变量，并在轴上标明变量的名称和单位。坐标的刻度应能表示出全部有效数字，并便于读取任意点的坐标值。直角坐标的两个变量的全部变化范围在两个坐标轴上表示的长度要相近，不可悬殊太大；

(3) 坐标点所使用的符号：常用的符号有◇、○、●、☆、△、◎、□、…等，各符号的中心点应处于数据的坐标点位置。同一图形中不同变量关系的曲线应用不同的符号，以便区别，并注明各符号的含意。符号的大小应与实验误差成比例；

(4) 描绘曲线：曲线应描绘得光滑、连续、尽可能贯穿大多数点。曲线并非应当通过所有的数据坐标点，而使所有数据坐标点均匀地分布于曲线的两侧，两侧的坐标点数接近相等，坐标点距曲线的偏差距离均匀一致。这样的曲线能较好地反映隐含在数据当中的客观规律。

3. 方程式表示方法。

方程式表示方法是用最具有代表性的函数解析方程式去拟合隐含于所测数据中的内在变化规律的一种数学方法，通常称其为**回归分析法**，回归所得到的数学表达式被称为**回归方程**。用方程式法表达数据不仅形式上更为紧凑，而且易于进行微分、积分、内插等运算，在一定的前提条件下还可进行外延运算，取值也方便得多。通常这种方程式是变量间客观规律的近似描述，因而称其为**经验方程式**（又称为**经验公式**）。它为变量间关系的理论探讨提供了线索和依据，同时在没有搞清真实的客观规律之前，为工程计算提供了有力的计算工具。

一个理想的经验公式，一方面要求形式简单，所含的待定常数较少，另一方面要求能够准确代表实验数据。这两方面的要求常是矛盾的，在实际工作中有时两者兼顾，有时则为了照顾必要的准确度，而采用较为复杂的经验方程式。对于一组实验数据，一般没有可直接获得一个理想方程式的简单方法，经验方程式是经过探索而得到的。寻找经验方程式的一般步骤为：

(1) 根据实验数据，确定坐标系并于其中作散点图像，根据散点图像的分布形状结合实际经验或与已知方程的曲线加以比较，猜测经验方程的应有形式；

(2) 用经验方程拟合实验数据，使得经验方程的值与实验数据的对应值的偏差达到最小。

(3) 用作图法或者计算法检验方程与实验数据的相符程度；

(4) 若相符程度不满意，则修正经验方程的形式，重复(2)、(3)步骤，直至拟合效果满意为止。

因为直线方程最易检验，故在允许的情况下尽可能转化为直线方程。如 $y=ax^b$ 是非线性

关系，但两边取对数之后，得

$$\lg y = \lg a + b \lg x。$$

若令

$$Y = \lg y, \quad X = \lg x, \quad A = \lg a,$$

则有

$$Y = A + b X。$$

这时，由 y 与 x 的非线性关系已经转化为 Y 与 X 的线性关系了。

在找不到合适的方程式时，常采用多项式函数式对变量间的关系进行曲线拟合。

(三) 实验误差。

凡是测量和实验，就一定有误差伴随。随着测量实验水平的提高，只能使误差逐渐减小，不可能使得误差完全消除。误差主要包括粗大误差、系统误差和随机误差三类。粗大误差是由于测量实验人员粗心大意，造成读数、记录或运算错误，而使得测量数值异常的误差。对于异常的数据必须先行核对剔除。系统误差是在测量条件一定时，误差的大小和方向恒定，而当测量条件变化时，误差的值按照某一确定的规律变化的误差。系统误差多是由于仪器设备没有标定准确，或使用方法不当等原因造成的。因此，测量实验前必须校准仪表，使系统误差降到最小程度。随机误差又称偶然误差，它是在各次测量中均不相同，时大时小，时正时负，不可与丁，无确定规律的误差。随机误差是由随机干扰因素造成的，是不可避免的，只有通过合理增加测量实验的重复次数来使之减小。

因此，在测量实验中和编写实验报告的过程中，要时刻注意分析和消除各类误差，以便提高实验测量的精确度。

第二章 实验内容

实验一 静力学方程实验

一、实验目的。

1. 理解静力学方程的物理意义及几何意义；
2. 巩固绝对压力、表压力及真空度的概念，了解各种压力的测量方法；
3. 了解静压力特性：垂直内向性、各项等值性和静压力随淹没深度而变化的特性；
4. 了解利用静力学原理测定未知液体密度的方法。

二、实验设备。

采用 SP-I 型静力学方程仪，构造如图 1-1 所示。

仪器主要由三个独立的密封容器和一个可以上下移动的活动容器组成。三个独立的密封容器的上、下各有一个阀门，容器下部装有蒸馏水并通过下方的阀门与活动容器相连通，上方的阀门控制密闭容器上部空气与外部大气的通断。4 个 U 型管测压计的指示液为酒精。其中，3 个 U 型管测压计用于测量 3 个密闭容器自由液面的表压力，而另一个则与薄膜式压力传感器相连，用于测量活动容器内液面下某测点的表压力。L 型的测压管用于测量左侧密闭

容器内液体液面下方测点处的表压力，它是利用被测压的液体作为指示液的。测压计管子排了序号 1、2、…、10、11，以便于区分。利用一根管子将管 9 的液面上方与左侧密闭容器的液面上方相连通。

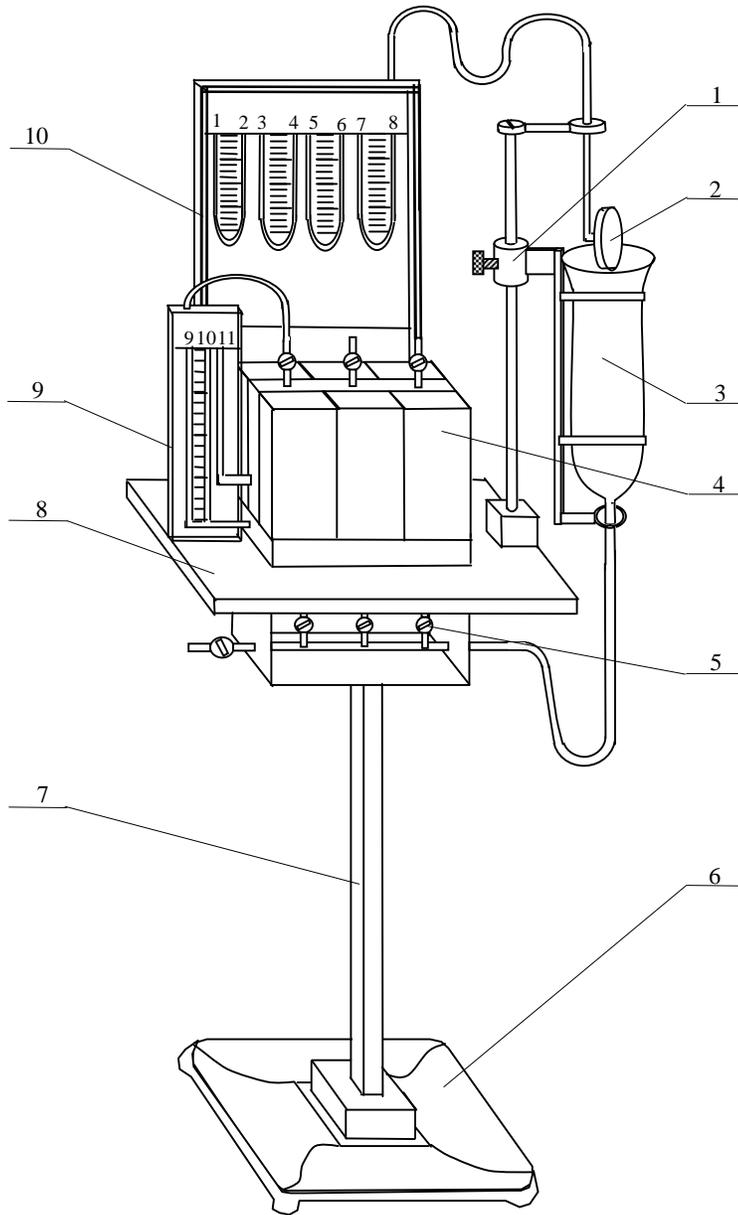


图 1-1 SP-I 型静力学方程仪构造示意图

- 1.升降机构； 2.压力传感器； 3.活动容器； 4.密闭容器； 5.阀门；
6.底座； 7.立柱； 8.台面； 9.副测压排架； 10 主测压排架

三、实验原理。

在重力场下，处于静止状态的不可压缩均质液体满足的基本方程是

$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{常量}。$$

对于存在自由液面的液体有

$$p = p_0 + \rho g h。$$

式中： z 为高程坐标为 z 的点处单位重力液体相对于基准面的位势能， m ； $p/\rho g$ 为该点处单位重力液体的压力势能， m ； ρ 为蒸馏水的密度， kg/m^3 ； h 为液面下任意一点到液体自由面的距离 m ； p 为自由液面以下任意一点的静压力， N/m^2 ； p_0 为液体自由面的静压力， N/m^2 ； g 为当地的重力加速度，取 $g=9.81 m/s^2$ 。

该装置除静压力特性实验外，均系运用连通器原理。在密封容器上串联一个活动容器，通过改变活动容器的高度，来改变密闭容器液面上部空气的压力，然后用测压计测出其改变后的值。

静压力特性实验是依据 U 型管测压计通过薄膜式压力传感器在活动容器内液面下不同深度处所测得的压力与测点距液面的深度呈线性关系的原理来验证的。用薄膜式压力传感器感知的仅有压应力来说明液体内部静压力的垂直内向性。而用保持测点的深度不变，仅改变压力传感器的方位时，所测压力值不变的原理来验证静压力各向等值性的特性。

四、实验步骤。

1. 将各密封容器内的水面调得高度基本一致，上方空气量适当，活动容器内水量合适，各测压计调零之后，关闭所有封闭容器的上、下阀门。

2. 验证静力学方程。

在左侧密闭容器上、下阀门关闭的情况下，把活动容器提高到最高位置，然后，打开下方进水阀。当测压管 10、11 的读数到二分之一的量程范围时，关闭进液阀，待稳定后观测并记录两测压管的读数；读取读数后，再次打开下方进水阀，待两测压管的读数接近最大值时，立即关闭进液阀，并再观测记录一次。读数记录于表 1-1 中。

显然有

$$\Delta_{10} = z_{10} + \frac{p_{10}}{\rho g}；$$

$$\Delta_{11} = z_{11} + \frac{p_{11}}{\rho g}。$$

如果

$$\Delta_{10} = \Delta_{11}，$$

则有

$$z_{10} + \frac{p_{10}}{\rho g} = z_{11} + \frac{p_{11}}{\rho g} = \text{常量}$$

得到验证。

式中： Δ_{10} 、 Δ_{11} 为 10、11 管液面所对应的刻度尺上的读数，m； p_{10} 、 p_{11} 为 10、11 测压管所测得的下管口处测压点 10 点和 11 点的静压力，Pa； z_{10} 、 z_{11} 为被测点 10 和 11 相对于基准面（过副测压排架上刻度尺零刻度点的水平面）的坐标高度，m。

3. 测定酒精的密度 ρ' 。

在验证静力学方程的同时，也完成了酒精密度 ρ' 的测定过程。这是因为 9 与 10 测压管中的示压介质为蒸馏水，1、2 管内的示压介质为 U 型管测压计的指示液酒精；而 9、1 管的上端与左侧密闭容器上方的气体相通，10、2 管的上端与大气相通，其液面的绝对压力为当地大气压 p_a ，所以 9、1 管中液面的表压力分别为

$$p_0 = r g (\Delta_{10} - \Delta_9),$$

$$p_0 = r' g (\Delta_2 - \Delta_1)。$$

于是有

$$r' = \frac{r (\Delta_{10} - \Delta_9)}{\Delta_2 - \Delta_1}。$$

式中： p_0 为左侧密封容器液面上的表压力，Pa； Δ_1 、 Δ_2 、 Δ_9 为 1、2、9 管内液面所对应的刻度尺上的读数，m； ρ 、 ρ' 分别为水和酒精的密度， kg/m^3 ；取水的密度为 1000 kg/m^3 ，取重力加速度为 $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ；其余符号同上。相应的读数记于表 1-2 中。

4. 测量表压力。

在活动容器处在最高位置的情况下（步骤 2 的最后状态），打开中间密闭容器的下方进水阀，到 3、4U 型管内的液位差适当大后，立即关闭进水阀。此时中间密闭容中上部空气的表压力 p_g 为

$$p_g = p'_0 - p_a = r' g (\Delta_4 - \Delta_3)。$$

式中： Δ_3 、 Δ_4 为 3、4、管内液面所对应的刻度尺上的读数，m； p'_0 为中间密封容器液面上的绝对压力，Pa； p_a 为当地大气压，Pa；其余符号同前。相应的读数记于表 1-2 中。

5. 测量真空度 p_v 。

将活动容器降至最低位置后，打开右侧密闭容器下方的进水阀，待到 5、6U 型管内的液位差适当大后，立即关闭进水阀。稳定后，观测读数 Δ_5 、 Δ_6 ，并记于表 1-2 中。此时右侧密闭容器中上部空气的真空度 p_v 和真空高度 H_v 分别为

$$p_v = p_a - p'_0 = r' g (\Delta_5 - \Delta_6)；$$

$$H_v = \frac{p_v}{r' g} = \Delta_5 - \Delta_6。$$

式中： Δ_5 、 Δ_6 为 5、6、管内液面所对应的刻度尺上的读数，m； p'_0 为右侧密封容器液面上的绝对压力，Pa； p_a 为当地大气压，Pa； H_v 为以酒精液柱表示的真空度。

6. 演示静压力特性。

在活动容器处于最低位置时，转动压力传感器至活动容器的正上方，然后升高活动容器于适当高度。可测读三点的表压力 p （包括零点）和相应的淹没深度 h ，记于表 1-3 中。转动

传感器改变其方位角，观察 7、8 管内的液面，看 U 型管测压计的指示压力是否变化。最后画出 $h-p$ 关系曲线，并写出压力随水深及方位角的变化结论。

五、实验记录及计算参考表。

表 1-1 静力学方程验证表

状况	测次	Δ_{10}/m	z_{10}/m	$p_{10}/(\rho g)/m$	Δ_{11}/m	z_{11}/m	$p_{11}/(\rho g)/m$	$z_{10} + \frac{p_{10}}{\rho g} = z_{11} + \frac{p_{11}}{\rho g}$ 否?	结论
$p'_0 > p_a$	1								
	2								

表 1-2 酒精的密度、表压力、真空度的记录计算表

状况	测次	酒精的密度 ρ' (kg/m^3)					表压力 p_g/Pa			状况				备注
		Δ_{10} /m	Δ_9 /m	Δ_2 /m	Δ_1 /m	$\frac{r(\Delta_{10}-\Delta_9)}{\Delta_2-\Delta_1}$	Δ_3 /m	Δ_4 /m	$\rho'g(\Delta_4-\Delta_3)$		Δ_5 /m	Δ_6 /m	$\rho'g(\Delta_4-\Delta_3)$	
$p'_0 > p_a$	1									$p'_0 < p_a$				
	2													
	平均													

表 1-3 静压力特性数据记录与分析表

测次	h	p	$h-p$ 曲线	p 与 h 及方位角间的变化关系
1				
2				
3				

六、讨论与建议。

1. 采用什么条件可以改变密闭容器自由液面上的绝对压力 p'_0 的值？如何实现 $p'_0 > p_a$ 及 $p'_0 < p_a$ ？
2. 为什么压力计测出的 p_0 值多是表压力值或真空度的值？
3. 这种测酒精密度 ρ' 的方法可否用于工业生产？
4. 你对本实验的评价和建议如何？

实验二 伯努利方程实验

一、实验目的。

1. 验证实际流动能量方程，加深理解能量转换和守恒定律；
2. 掌握流动损失的测量方法；
3. 掌握测量流量的主要方法；

二、实验设备。

采用 RB-I 型雷诺及伯努利方程实验仪伯努利方程实验部分，构造如图 2-1 所示。

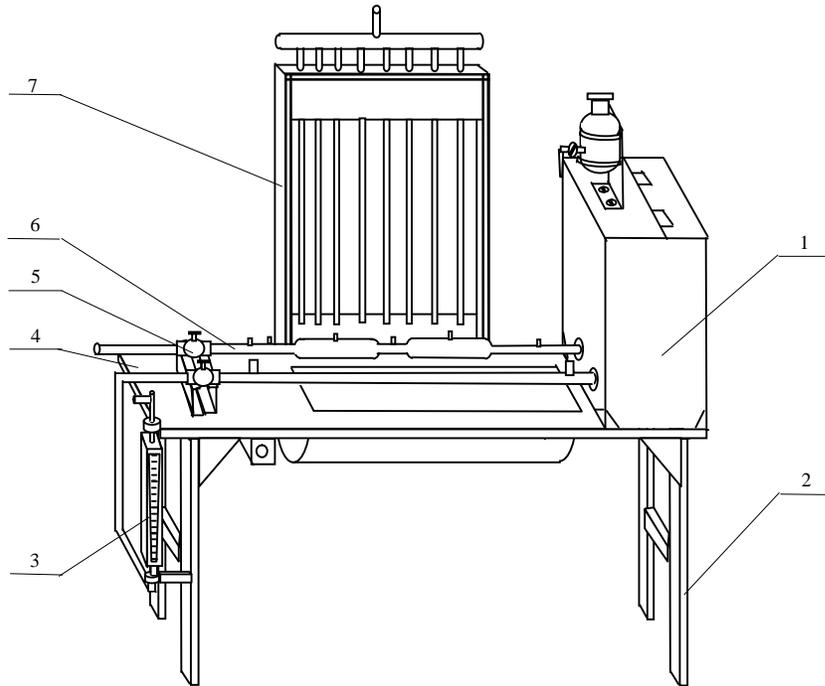


图 2-1 雷诺及伯努利方程实验仪构造示意图

1.恒定水位箱； 2.脚架； 3.转子流量计； 4.台面； 5.阀门 6.试管； 7.测压管排架

仪器主要由恒定水位箱、伯努利方程实验测管、雷诺实验测管、测压管排架、阀门和流量计等组成。由水源向恒定水位箱供水，恒定水位箱向各试管提供恒压稳定的水流，流量由阀门调节控制，由流量计测量流量，由测压管测量各测点的静压力。

三、实验原理。

实际粘性流体在重力场中沿着管道作稳定流动时，应遵循的伯努利能量方程为：

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum H_{f1 \rightarrow 2} \quad (2-1)$$

式中： z 为比位置势能，m； $p/(\rho g)$ 为比压力势能，m； $u^2/2g$ 为比动能，m； $\Sigma H_{f1\rightarrow 2}$ 为包括沿程阻力和局部阻力的总阻力损失，m； p 为某截面中心点处的静压力， $N/m^2=Pa$ ，由相应截面上的测压管测得； ρ 为水的密度 kg/m^3 ； g 为当地重力加速度， m/s^2 ； u 为截面上的平均流速， m/s ，由测得的流量和相应截面的过流截面积间接计算得到。

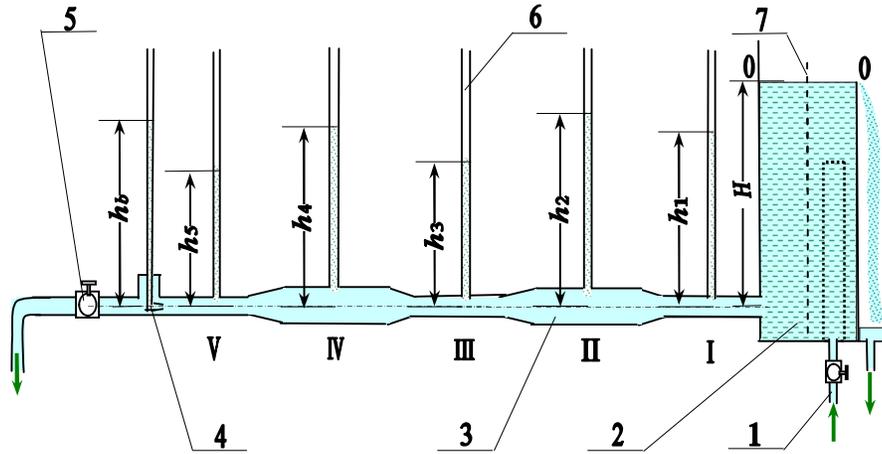


图 2-2 伯利方程实验仪实验测量简图

1.进水管；2 恒定水位箱；3.试验管；4.毕托管；5.控制阀；6.测压管；7.整流网

若管道水平放置，并且取过其中心轴线的水平面为基准面，则 $z_1 = z_2 = 0$ ，于是 2-1 式可转化为：

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \Sigma H_{f1\rightarrow 2} \quad (2-2)$$

若流体处于静止状态（阀门完全关闭，恒定水位箱内的水位稳定在最高水位 H 上），则应有 $u_1 = u_2 = 0$ ，同时 $\Sigma H_{f1\rightarrow 2} = 0$ ，2-2 式变为：

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g} = H \quad (2-3)$$

式中： H 为恒定水位箱内自由液面相对于基准面的高度，m。此时，各测压管内的液面应处于同一水平位置。即伯努利方程转化为静力学基本方程了。也就是说静力学方程是伯努利方程的特例。

根据连续性方程，平均流速 u 与截面积 A 成反比，截面积小的平均流速 u 大，即动能大，因而压力能必然小；反之平均流速 u 小压力能必大。此时在测压管排架上显示出高低不同的一组曲线，它充分地反映了各种能量的转化关系。

四、实验步骤。

1. 熟悉实验装置，掌握试管截面积与测压管内液柱高度的对应关系。
2. 打开进水阀，使水充满恒定水位箱，并保持有溢流。
3. 排除测压管及试管内的气体，可利用上方的排气管吹气撞击使气体逸出。如果伯努利试管大管径上部有气体，则可打开其最高处的排气管排除。
4. 逐渐开启试管控制尾阀，观察各测压管液面高度变化情况，等曲线处于测压管排架中部适当位置时，停止阀门调整。用流体力学原理说明曲线形成的原因及其规律性。

5. 待控制尾阀保持在合适的开度不变且流动处于稳定状态后, 读取各测压管的读数 h_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$), 并记录于表 2-2 中。 h_i ($i=1, 2, 3, 4, 5$) 分别对应于试管的截面 I、II、III、IV、V。

6. 用毕托管测流量。在进行步骤 5 的同时, 操作管式毕托管获得毕托管的测压管上的读数 h_b 。 h_b 包括两种读数。当毕托管的小孔迎着来流的方向时, 读得的是全压头 h_q ; 而小孔的轴线垂直于流向时, 读得的是静压头 h_j 。于是小孔所处的试管中心点处流体的动压头

$$h_d = h_q - h_j。$$

根据理想微元流束的伯努利方程知, 小孔处流体的点流速最大, 且最大点流速为

$$u_{\max} = \sqrt{2gh_d}。$$

管内的平均流速 u 与 u_{\max} 比值为

$$k = \frac{u}{u_{\max}},$$

可由雷诺数

$$\text{Re}_{\max} = \frac{rd_1 u_{\max}}{m}$$

查教材 28 页 (杨同舟主编的) 图 1-9 求得。其中 r 、 m 分别为水的密度和绝对黏度, 可由测得的水温查表得到。于是, 由毕托管间接测得的体积流量为:

$$q_{v\text{毕}} = k \cdot u_{\max} A_1 = k \cdot A_1 \cdot \sqrt{2gh_d}。 \quad (2-4)$$

式中: $A_1 = \pi d_1^2 / 4$ 为毕托管测点处的过流截面积, cm^2 , d_1 为测点处的试管内径, cm ; g 为重力加速度, 取其值为 $g = 981 \text{cm/s}^2$; π 为圆周率; 其余符号如前所述。

7. 用容量法测流量。在进行步骤 5 的同时, 用量筒和秒表在伯努利试管的出水口测得 t (s) 时段内的充水容积 V , m^3 , 则这时的体积流量为

$$q_v = \frac{V}{t}。 \quad (2-5)$$

应在同一条件下重复测量若干次, 以平均值 \bar{q}_v 作为所测得的体积流量。

8. 确定文丘里流量计的流量系数 C_0 。截面 III 所在的管段可看作一个文丘里流量计。在完成步骤 5 的过程中已测知 h_2 和 h_3 , 得 $h = h_2 - h_3$ 。于是文丘里流量计的理论流量 $q_{v\text{文理}}$ 为:

$$q_{v\text{文理}} = A_{\text{III}} \cdot \sqrt{2gh} = \frac{\pi d_{\text{III}}^2}{4} \cdot \sqrt{2gh}。 \quad (2-6)$$

式中: A_{III} 为截面 III 的过流截面积, cm^2 , d_{III} 为截面 III 处的试管内径, cm ; g 为重力加速度, cm/s^2 ; π 为圆周率。

容量法测得的流量 \bar{q}_v 是比较准确的, 可用 \bar{q}_v 去标定文丘里流量计, 确定其流量系数 C_0 ,

即:

$$C_0 = \frac{\bar{q}_v}{q_{v\text{文理}}}。$$

五、实验记录及计算参考表。

水温 _____ °C； 密度 $\rho =$ _____ kg/m³；

动力黏度 $m =$ _____ Pa·s； 运动黏度 $n =$ _____ cm²/s；

$H =$ _____ cm。

表 2-1 流量的数据记录与计算参考表

测次	充水量 V/cm ³	时间 t/s	$q_v /$ cm ³ /s	全压 $h_q /$ cm	静压 $h_j /$ cm	动压 $h_d /$ cm	$q_{v\text{平均}} /$ cm ³ /s	$h_2 /$ cm	$h_3 /$ cm	$h /$ cm	$q_{v\text{文理}} /$ cm ³ /s	C_0
1												
2												
3												
平均												

表 2-2 伯努利方程数据记录与计算参考表

截面 序号	内径 $d_i /$ cm	面积 $A_i /$ cm ²	$\bar{q}_v /$ cm ³ /s	$u_i /$ cm/s	$u_i^2 / 2g$ / cm	$h_i = p_i / \rho g$ / cm	$H_i = h_i + u_i^2 / (2g)$ / cm	$\sum H_{f0 \rightarrow i} = H - H_i$ / cm
I								
II								
III								
IV								
V								

根据表 2-2 的计算结果，在图 2-3 中汇出总水头曲线和测压管水头曲线。

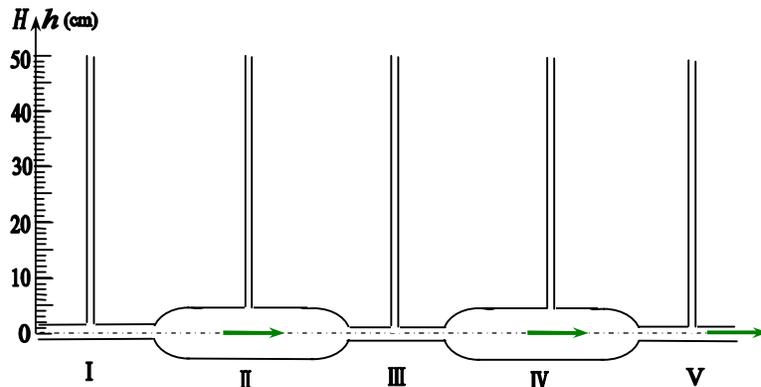


图 2-3 用于绘制水头曲线的图

六、实验记录及计算参考表。

1. 测压管中的水柱高度表示的是绝对压力还是表压力？如果管中任何地方有残存的气泡将会对测量压力带来什么影响？
2. 从所绘制的水头曲线来看能否说明能量守恒定律？
3. 你对该实验有何评价和建议？

实验三 雷诺实验

一、实验目的。

1. 观察液体流动的两种流态，建立层流、湍流（紊流）的感性认识；
2. 掌握临界雷诺数的测量和计算方法；
3. 了解测定沿程阻力和水的黏度的方法；

二、实验设备。

采用 RB-I 型雷诺及伯努利方程实验仪的雷诺实验部分，构造如图 2-1 及图 3-1 所示。与伯努利方程实验部分相比，把实验管更换为直的雷诺实验管，连接上示踪颜色液和转子流量计

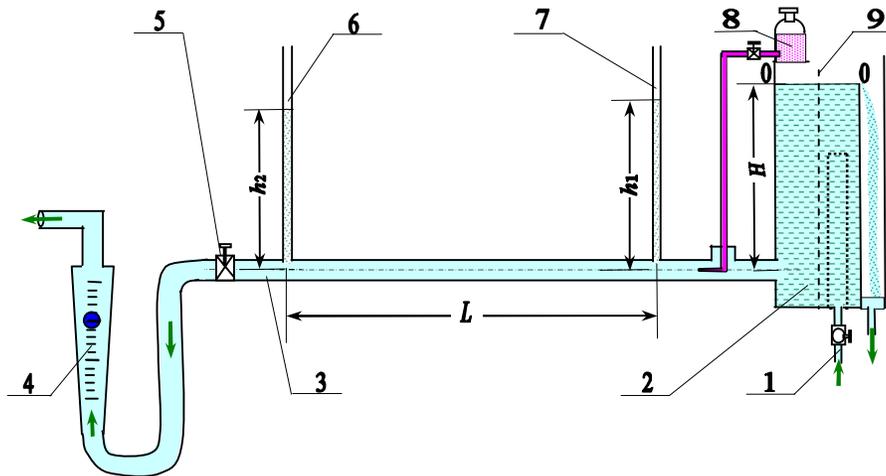


图 3-1 雷诺实验仪结构及实验测量简图

1.进水管；2 恒定水位箱；3.试验管；4.转子流量计；5.控制尾阀；6.测压管；7.测压管；8.示踪液；9.整流网
计即可。

三、实验原理。

求雷诺数的公式为：

$$\text{Re} = \frac{d \cdot u r}{m} = \frac{d \cdot u}{n} \quad (3-1)$$

式中： d 为试管的内径，cm； u 为管内水流的平均流速，cm/s； r 为水的密度， g/cm^3 ； m 为水的绝对黏度系数； $n = m / r$ 为运动黏度系数。

沿程阻力水头 H_f 和沿程阻力因数 l 的测定计算公式为：

$$H_f = \frac{p_f}{r g} = h_1 - h_2 = l \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (3-2)$$

$$l = \frac{2g \cdot d \cdot H_f}{L \cdot u^2} = \frac{2d \cdot p_f}{L \cdot u^2 r} \quad (3-3)$$

式中： h_1 、 h_2 为试管上下游测压截面上测压管的读数； L 为两截面间的管长； g 为重力加速度；

$p_f = r g H_f$ 为沿程损失压力；其余符号同前。

当试管内的水流处于层流状态时，则绝对黏度系数 m 和运动黏度系数 n 分别为：

$$m = \frac{r g \cdot d^2 \cdot H_f}{32L \cdot u} = \frac{d^2 \cdot p_f}{32L \cdot u}; \quad (3-4)$$

$$n = \frac{m}{r}. \quad (3-5)$$

式中的各符号同前。

四、实验步骤。

1. 对照实验装置，了解其构造和各个部件的性能、作用等。
2. 打开进水阀，使水充满恒定水位箱，并保持微小的溢流。
3. 打开雷诺实验管的控制尾阀，使水开始流动，观察管内有无气泡，若有气泡可利用排气系统及控制尾阀开度大小来排除。
4. 打开可视示踪颜色液输液软管上方的旋塞，使红色显示色线保持粗细适中。
5. 操作控制尾阀由小逐渐到大，然后由大到小，观察两种流态的变化，建立层流、紊流的感性认识。
6. 尾阀由小到大（始终保持有溢流但不能太大），到色线能保持约 10cm 长的直段，而其余部分散开时，即为上临界点，由转子流量计读取上临界流量。
7. 当管内水流完全紊乱后，逐渐关小控制尾阀到色线恢复上述状态时，即为下临界点，由转子流量计读取下临界流量。
8. 在层流时，记录至少一次 h_1 、 h_2 的值，同时读取相应的流量，并计算动力黏度系数 m 和运动黏度系数 n ，将计算的结果与由水温查表得到的 m 、 n 值相比较。在层流和紊流时各测量和计算一次 H_f 和 l ，并加以比较。

五、实验记录与计算参考表。

管内径 $d =$ _____ cm；过流截面积 $A =$ _____ cm^2 ；管长 $L =$ _____ cm。
 水温 _____ $^{\circ}\text{C}$ ；查表得到的：密度 $r =$ _____ g/cm^3 ； $m =$ _____ $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ；
 $n =$ _____ cm^2/s 。

表 3-1 临界雷诺数的数据记录与计算参考表

测次	流态的变化顺序	临界流量 L/h	临界流速 $u_{\text{临}}$ cm/s	临界雷诺数 $\text{Re}_{\text{临}} = d \cdot u_{\text{临}} / n$	备注
1					
2					

表 3-2 沿程阻力系数和黏度系数的数据记录与计算参考表

测次	流量/ L/h	h_1 /cm	h_2 /cm	H_f /cm	u cm/s	l	m / $\text{mPa}\cdot\text{s}$	n / cm^2/s
1								
2								

六、讨论与建议。

1. 为什么称临界雷诺数为判别流态的准数？你的实测值与标准值是否接近？
2. 你能够分析影响雷诺数大小的因素吗？
3. 你认为这种测量水的绝对黏度系数和运动黏度系数的方法是否准确可靠？
4. 你对该实验有何评价和改进意见？

实验四 管路阻力的测定实验

一、实验目的。

1. 测定直管内流动的沿程阻力损失 H_f 及沿程阻力损失系数 λ ，绘出 λ -Re 曲线；
2. 掌握测定和计算局部阻力及局部阻力系数的方法；
3. 学会准确标定流量计和确定流量系数的方法。

二、实验仪器设备。

实验仪器设备的组成与结构如图 4-1 所示。该仪器设备形成了一个完整的测量系统。由

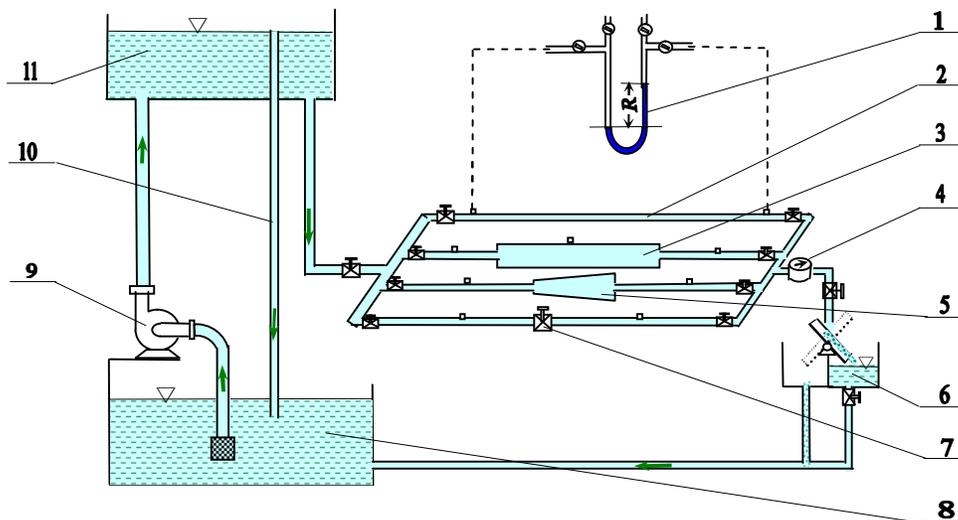


图 4-1 管路阻力实验仪结构及实验测量示意图

1. 测压计；2. 直管；3. 突扩突缩管；4. 标准流量计；5. 被标定的流量计；6. 快速切换容器；
7. 被测阀；8. 下水池；9. 水泵；10. 恒定水位溢流管；11. 恒定水位箱。

水泵将下水池内的水输送到上方的恒水位箱，然后由恒水位箱分别向各被测量的元件（直管、管件和流量计等）提供稳定的水流。各被测元件的压力损失由压差计测量。准确的流量由标准流量计标定得到，或利用快速切换容器及秒表由容量法得到。

三、实验原理。

由实际流体的伯努利能量方程知，实际水流由于粘性的存在，必然存在流动损失。这些流动损失主要包括沿程阻力损失和局部阻力损失两种。而每种损失都与流量的大小、流体的特性和管路及管件的结构等相关。

1. 沿程阻力损失的测量与计算。

直管的沿程阻力损失可由下列公式计算：

$$H_f = l \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} = \frac{\Delta p}{r g}, \quad (\text{m}); \quad (4-1)$$

$$p_f = l \frac{L}{d} \cdot \frac{r u^2}{2} = \Delta p, \quad (\text{N/m}^2); \quad (4-2)$$

$$h_f = l \frac{L}{d} \cdot \frac{u^2}{2} = \frac{\Delta p}{r}, \quad (\text{m}^2/\text{s}^2)。 \quad (4-3)$$

$$\Delta p = (r_i - r) g R, \quad (\text{N/m}^2)。 \quad (4-4)$$

式中的 H_f 、 p_f 、 h_f 为沿程阻力损失的三种不同的表示形式。在已测知水的密度 ρ (kg/m^3) 和 U 型管压差计内指示液（通常为水银）的密度 ρ_i (kg/m^3) 和当地的重力加速度 g (m/s^2) 的前提下，由压差计上读取 R (m) 后，则压力损失 p_f 的值亦即 Δp 的值由式 4-4 计算得到。因而其它形式的沿程阻力损失都可求得。

在管内壁的绝对粗糙度 e (mm)、管长 L (m)、管的内径 d (m) 和其内流动的流体的运动黏度 n (m^2/s) 确定的前提下，流动损失是流速 u 和沿程阻力系数 l 的函数。因而由雷诺数 Re 的计算公式可知

$$u = \frac{n \cdot Re}{d},$$

于是，可将沿程阻力系数表示为

$$l = \frac{2g \cdot d^3 \cdot H_f}{L \cdot n^2 \cdot Re^2} = \frac{2d^3 \cdot p_f}{L \cdot r \cdot n^2 \cdot Re^2} = \frac{2d^3 \cdot h_f}{L \cdot n^2 \cdot Re^2}。 \quad (4-5)$$

即 l 为雷诺数 Re 的函数。因此，改变直管内水流的流量，即可测量和计算出 l 和 Re 的各对应数值从而可以绘制出两者的关系曲线，即 l - Re 曲线。 l - Re 曲线一般绘制于双对数坐标纸上。

2. 局部阻力损失的测量和计算。

局部阻力损失可由下列公式计算：

$$H'_f = z \cdot \frac{u^2}{2g} = \frac{\Delta p'}{r g}, \quad (\text{m}); \quad (4-6)$$

$$p'_f = z \cdot \frac{r u^2}{2} = \Delta p', \quad (\text{N/m}^2); \quad (4-7)$$

$$h'_f = z \cdot \frac{u^2}{2} = \frac{\Delta p'}{r}, \quad (\text{m}^2/\text{s}^2)。 \quad (4-8)$$

式中的 H'_f 、 p'_f 、 h'_f 为沿程阻力损失的三种不同的表示形式。在已测知水的密度 ρ (kg/m^3) 和

U型管压差计内指示液（通常为水银）的密度 ρ_i (kg/m^3) 和当地的重力加速度 g (m/s^2) 的前提下，由压差计上读取 R (m) 后，则总压力损失 Δp 的值由式 4-4 计算得到。在减去两测压点之间的管段的沿程损失压力 p_f (若管段长度较短时， p_f 可以忽略) 之后，可得到相应的局部损失压力 $\Delta p'$ 。因而其它形式的局部阻力损失都可求得。在测知流量和管路的过流截面积后可求得流速 u ，从而可利用 4-6~4-8 式计算出局部阻力系数 z 的值。

突然扩大、突然缩小、球阀或闸阀等管件的局部阻力损失及局部阻力系数都可用前述方法测定。但须注意，在测得的压力损失（又称作压降） Δp 中，除了局部损失外，还包括两测点间的沿程阻力损失。当两测点间的距离很短时，沿程阻力损失可以忽略。

3. 孔板流量计或文丘里流量计流量系数的测量与计算。

被测定的流量计与标准流量计或容量法流量测定装置串联运行。在标准流量计或容量法流量测定装置上得到准确的流量 q_v 。而由测压计上读取了与被测定流量计的上下游压差 Δp 向对应的读数 R 。已知被测流体的密度 ρ (kg/m^3)、压差计内的指示液的密度 ρ_i (kg/m^3) 和流量计的计量过流截面积 A (孔板的孔的或文丘里管的喉部的截面积)。则不同流量 q_v 所对应的流量系数 C_0 (或者 C_v) 为：

$$C_0 \text{ (或 } C_v) = \frac{q_v}{A_0 \cdot \sqrt{\frac{2gR(r_i-r)}{r}}} \quad (4-9)$$

四、实验方法与注意事项。

(一) 方法。

1. 熟悉实验设备、测试仪表及水循环系统。
2. 检查实验设备和各部分是否都处于正常状态。
3. 按规定启动水泵，待上方恒定水位箱有溢流后向实验系统供水，并且在整个实验过程中应始终保持有溢流。
4. 对输水管道进行排气。
5. 启用标准流量计或容量法流量测定装置，打开 U 型管测压计的旋塞，进入工作状态。
6. 对所要做的实验项目逐一进行测试。
7. 实验结束后应关闭电源和水源，在管道内的遗留的水排净后关闭所有的阀门及测压计的旋塞。

(二) 注意事项。

1. 实验中上方的恒定水位箱必须保持有溢流，以便使系统内的流动稳定。
2. 在流量调节阀调节之后，必须待流量稳定之后才能读取记录数据。
3. 必须排净管路内的空气。
4. 水银 U 型管测压计在使用之前必须利用上方的旋塞将左、右两支内的水银面调整到同一水平面内。

五、实验记录及计算参考表。

大气压 _____ kPa，水温 _____ $^{\circ}\text{C}$ ，水的运动黏度 $n =$ _____ cm^2/s ，水的密度 $\rho =$ _____ kg/m^3 ，水银的密度 $\rho_i =$ _____ kg/m^3 。

1. 沿程阻力。

直管的材料 _____，直管的绝对粗糙度 $e =$ _____ mm，管内径 $d =$ _____ m，直管的长度 $L =$ _____ m。

表 4-1 沿程阻力系数测定数据记录与相关计算参考表

项目 \ 测次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R/m										
$q_v/m^3/s$										
$u/m/s$										
Re										
λ										

2. 局部阻力。

局部构件的名称 _____

表 4-2 局部阻力系数测定数据记录与相关计算参考表

项目 \ 测次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R/m										
$\Delta p/Pa$										
$q_v/m^3/s$										
$u/m/s$										
ζ										

3. 流量计标定。

流量计名称 _____ ，孔或者喉的直径 _____ m，

孔或者喉的过流截面积 $A =$ _____ m^2 。

表 4-2 局部阻力系数测定数据记录与相关计算参考表

项目 \ 测次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R/m										
$q_v/m^3/s$										
C_0 或 C_v										

六、思考与讨论。

1. 在调整阀门开度改变流量时，调整上游的阀门合理还是调整下游的合理？为什么？
2. 在实验装置及操作控制上，采用了哪些措施来保证管内的流体为不可压缩的均质流体而流动为稳定流动？
3. 影响本实验的测量精度有哪些因素？怎样正确测定有关数据？
4. 在相同内径和流动条件相同的前提条件下水平管和铅垂管的阻力损失是否相等？

实验五 泵的性能测定实验

一、实验目的。

1. 学会离心泵的性能测定的方法步骤；
2. 了解离心液泵汽蚀性能的测定方法；
3. 学会绘制离心泵的性能曲线的方法。

二、实验仪器设备。

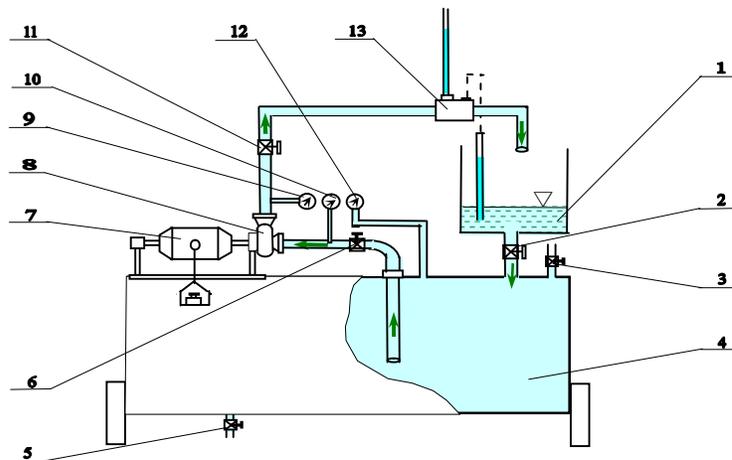


图 5-1 水泵性能实验台的结构及实验测量示意图

1. 计量水箱；2. 回水阀；3. 排气阀；4. 下水箱；5. 放水阀；6. 泵的进口阀；7. 马达天平；
8. 被测泵；9. 泵出口压力表；10. 进口水银真空计；11. 出口阀；12. 真空表；13. 流量计。

实验仪器设备的组成与结构参见图 5-1。被测泵采用了由市场上购得的一种微型旋涡水泵（属于离心泵的一种）。其规定转速为 3 000 r/min（与电机直联），铭牌标注的流量为 1.1 m³/h，扬程为 20m，吸程为 12m（测试后与之比较，校对其是否真实）。水泵的配套电机的功率为 300W。水泵的输入轴功率由马达天平测的扭矩，转速仪测得转速后求得。泵的扬程由测得进、出口的压力、管径、流量后求得。而汽蚀性能利用了下封闭容器或泵入口调节阀等装置找到泵的临界汽蚀状态点后得到。

三、实验原理。

水泵性能实验就是在规定转速下，测得不同流量下水泵的扬程、轴功率、效率和汽蚀余量等数据，并依据这些数据绘制出 $H \sim q_v$ 、 $P \sim q_v$ 、 $\eta \sim q_v$ 和 $\Delta h \sim q_v$ 等曲线，为选择和安装使用水泵提供依据。

1. 扬程 H 的测量与计算。

扬程的定义公式为

$$H = \Delta z + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}, \quad (\text{m}). \quad (5-1)$$

泵进口水银真空计的真空度 p_{v1} 值的计算式为

$$p_{v1} = r_{\text{Hg}} \cdot g \cdot R, \quad (\text{Pa}). \quad (5-2)$$

式中: Δz — 泵的进、出口测压计的高程差, m, 本仪器将两测压计的中心放置于同一高度, 因而有 $\Delta z = 0$;

p_{v1} — 泵进口水银真空计的真空度值, Pa, 用式 5-2 计算, 其中 R 为 U 型管水银测压计的两水银液面的高度差, m. 近似地取重力加速度 $g = 9.81\text{m/s}^2$, 取水银的密度 $\rho_{\text{Hg}} = 13\,600\text{kg/m}^3$;

p_1 — 泵的进口测压截面的表压力值, Pa, 它与真空度值 p_{v1} 的关系为 $p_1 = -p_{v1}$;

p_2 — 泵的出口测压截面上压力表的读数, Pa;

u_1 、 u_2 — 泵的进、出口的平均流速, m/s, 由测得的流量 q_v 和泵的进、出口管的内径 D_1 、 D_2 后求得. 本仪器的 $D_1 = D_2$, 所以有 $u_1 = u_2$;

ρ — 现场抽送水的密度, kg/m^3 , 可近似地取 $\rho = 1\,000\text{kg/m}^3$.

于是有

$$H = \frac{p_2 + p_{v1}}{r g} = \frac{p_2}{r g} + \frac{r_{\text{Hg}} \cdot g \cdot R}{r g} B \frac{p_2}{r g} + 13.6R.$$

即

$$H B \frac{p_2}{r g} + 13.6R, \quad (\text{m}). \quad (5-3)$$

2. 流量 q_v 的测量与计算。

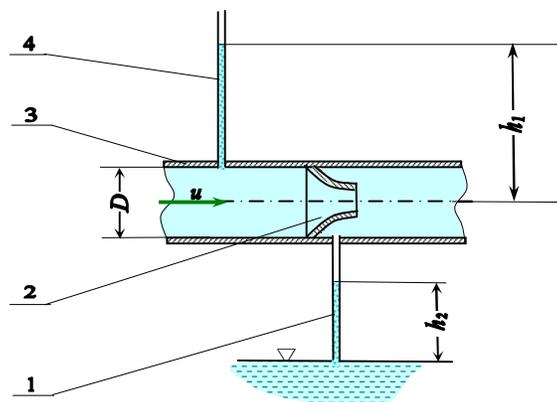


图 5-2 喷嘴式流量计的结构及实验测量示意图

1. 下游真空测压管; 2. 喷嘴; 3. 输水管道; 4. 上游测压管。

本仪器采用喷嘴式流量计测量流量 q_v , 其构造与测量方法如图 5-2 所示. 测读出 h_1 、 h_2 后由下式计算。

$$q_v = j \frac{\rho D^2}{4} \sqrt{2g(h_1 + h_2)}, \quad (\text{m}^3/\text{s}). \quad (5-4)$$

式中: φ — 流量系数, 可取 $\varphi = 0.242$ (由容量法标定而得);

D — 管路的内径, 本仪器的 $D = 0.02\text{m}$;

h_1 、 h_2 — 流量计上、下游测压管的读数, m。

3. 轴功率 P 的测量与计算。

把驱动泵的电机的壳体用轴承支撑起来,安装上力臂便构成了马达天平。测知力臂 L (m)、力臂端部作用于台秤的力(或砝码重) G (N)和电机的转速 n (本机 $n = 3\ 000\ \text{r/min}$),则泵的轴功率 P (W)可由下式计算。

$$P = \frac{GLpn}{30}, \quad (\text{W}). \quad (5-5)$$

4. 泵的效率 h 。

$$h = \frac{\text{有效功率}}{\text{轴功率}} = \frac{rgH \cdot q_v}{P}. \quad (5-6)$$

式中各符号同前述。

5. 临界汽蚀余量的测量与计算。

在保持水温、流量、转速、泵的几何安装高度和泵的入口阻力不变的前提条件下,减小下封闭水箱液面的绝对压力 p_0 绝,直到水泵进、出口压力表的指针发生颤动,示值开始急剧下降时刻即为水泵的临界汽蚀状态点。此时所对应的装置汽蚀余量即为水泵在该流量下的临界汽蚀余量。在此时刻测得水温 t ($^{\circ}\text{C}$),查得 t ($^{\circ}\text{C}$)时水的饱和蒸汽压 p_t (绝对压力,单位为 Pa),测得当地大气压 p_a (Pa),读得下封闭水箱液面的表压力 $p_{0\text{min}}$ (Pa)和此时泵的流量 q_v (m^3/s),测知从下水面到水泵入口截面(法兰盘)处的综合阻力系数 C (s^2/m^5)和水泵的几何安装高度 H_g (m),则被测水泵在此流量下的临界汽蚀余量 Δh_k 可由下式计算。

$$\Delta h_k = \frac{p_a + p_{0\text{min}} - p_t}{rg} - H_g - Cq_v^2, \quad (\text{m}). \quad (5-7)$$

这一点是逐渐调小下封闭水箱液面的表压力 p_0 而逼近得到的。在下液面的表压力 $p_0 > p_{0\text{min}}$ 之前的装置汽蚀余量 Δh 的计算式应为:

$$\Delta h = \frac{p_a + p_0 - p_t}{rg} - H_g - Cq_v^2, \quad (\text{m}). \quad (5-8)$$

改变流量 q_v 后,可得到其它流量下的临界汽蚀余量 Δh_k 的值。一般地,在流量处于(0.8~1.2) $q_{v\text{规定}}$ ($q_{v\text{规定}}$ 为水泵的设计流量,即水泵在最高效率点处的流量)的范围内至少测取三个流量所对应的临界汽蚀余量 Δh_k 的值。

四、实验方法与注意事项。

1. 熟悉实验设备的操作过程,掌握各种仪器的使用方法。
2. 离心泵启动前应先关闭出口阀(适合于普通的离心泵,对于轴流泵和本仪器用的旋涡泵则应开阀启动),并把吸水管和液泵的壳体内部都注满水。
3. 逐渐开启出口流量调节阀(普通离心泵由小开大,而轴流泵或者旋涡泵应从最大开度时启动,启动后逐渐关小)。在最小开度到最大开度之间选定 10~12 个位置,即确定 10~12 个流量点,待流态稳定后读取流量计、压力表、真空表、转速仪、扭矩仪等的读数并记录。
4. 在进行汽蚀余量的测定实验时,在改变泵的吸入装置的参数来逼近临界汽蚀状态的过程中,必须保持流量不变。
5. 实验结束后,被测泵为普通离心泵的应完全关闭出口阀后再断电停机,而旋涡泵、轴流泵应在阀门全敞开的状态下断电停机。

6. 应测量记录齐全诸如大气压、水温的与实验有关的所有相关数据。

五、实验记录及计算参考表。

大气压 _____ kPa, 水温 _____ °C, 泵的型号 _____, 泵的规定转速 _____ r/min, 泵的规定流量 _____ m³/s, 泵的规定扬程 _____ m, 泵的效率 _____ %, 电机功率 _____ W, 吸水管的内径 _____ m, 排水管的内径 _____ m, 规定汽蚀余量 _____ m, $C = \text{_____ s}^2/\text{m}^5$, $H_g = \text{_____ m}$, $p_t = \text{_____ kPa}$, $\rho_{\text{水}} = \text{_____ kg/m}^3$, $\rho_{\text{汞}} = \text{_____ kg/m}^3$ 。

表 5-1 泵的性能实验数据记录与相关计算参考表

项目 测次	台秤读数 G		压力 p_2	进口真空计 R	流量计		扬程 H	流量 q_v	轴功率	效率
	g_f	N	MPa	m	h_1/m	h_2/m	m	m ³ /s	W	%
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										

表 5-2 泵的汽蚀实验数据记录与相关计算参考表

项目 测次															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
流量 q_v	h_1/m														
	h_2/m														
	m ³ /s														
扬程	p_2/Pa														
	R_1/m														
	H/m														
液面 表压	R_0/m														
	P_0/Pa														
余量	$\Delta h/\text{m}$														

六、思考与讨论。

1. 普通离心泵为什么应关阀且注满水之后才能启动？轴流泵为什么应将叶轮浸入水中且开阀状态下启动？

2. 为什么在实际使用中一般不允许在泵的吸水管上装调节阀之类的阻力元件?
3. 水泵的流量除用节流法调节外, 还有其它方法吗?

实验六 风机的性能测定实验

一、实验目的。

掌握风机性能参数的测定方法, 学会绘制风机的性能曲线。

二、实验仪器设备。

风机性能测定实验仪器设备的组成与结构参见图 6-1。它主要包括被测风机、马达天平、转速仪、实验风筒、测压计和流量计等。本实验采用的是进气式的风机性能试验装置。

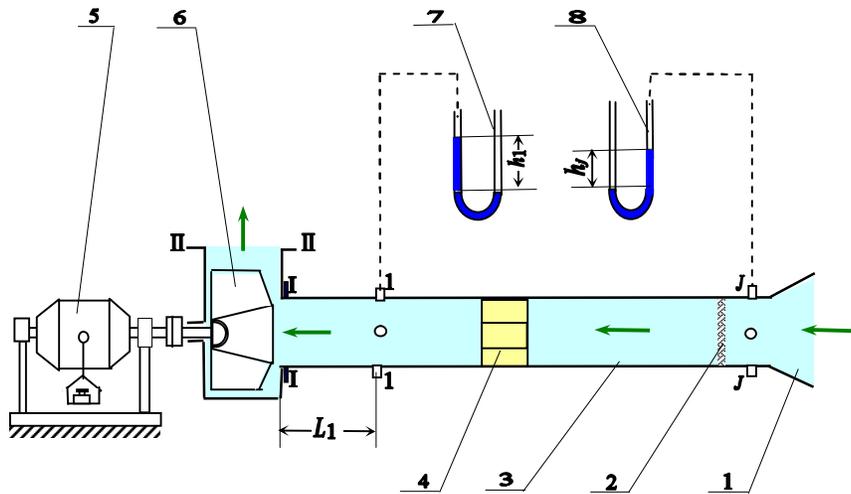


图 6-1 风机性能实验台的结构及实验测量示意图

1. 集流器; 2. 节流网; 3. 实验风筒; 4. 整流器; 5. 马达天平; 6. 被测风机;
7. 微压计 (测风机入口静压力); 8. 微压计 (测量流量)。

三、实验原理。

所谓风机性能实验就是在规定转速下测得不同流量下风机的全压、轴功率和效率等性能参数值, 并依据这些参数值绘制出 $p \sim q_v$ 、 $P \sim q_v$ 和 $h \sim q_v$ 等特性曲线, 为选择、改进和使用风机提供依据。

1. 全压 p 。

全压 p (Pa) 的定义为风机进口截面 I-I 到其出口截面 II-II 之间, 风机叶轮传递给单位体积气流的净机械能数。即

$$p = \left(p_{II} + \frac{\rho \cdot u_{II}^2}{2} \right) - \left(p_I + \frac{\rho \cdot u_I^2}{2} \right) \quad (6-1)$$

式中: p_I 、 p_{II} — 风机进口截面 I-I、出口截面 II-II 处的表静压力, Pa, 本实验的 $p_{II}=0$;

u_I 、 u_{II} — 风机进口截面 I-I、出口截面 II-II 处的平均流速, m/s, 测知流量和过流截

面积后即可求得；

r — 实验的当时当地条件下空气的密度， kg/m^3 ，近似地，可取 $r=1.2 \text{ kg/m}^3$ 。

习惯上，常将风机的全压 p (Pa) 划分成动压 p_d (Pa) 和静压 p_{st} (Pa) 两部分，即

$$p = p_d + p_{st}, \quad (\text{Pa})。 \quad (6-2)$$

规定风机的动压 p_d 为

$$p_d = \frac{ru_{II}^2}{2}, \quad (\text{Pa})。 \quad (6-3)$$

将式 (6-1)、(6-2)、(6-3) 相结合，可知风机的静压 p_{st} 为

$$p_{st} = p_{II} - p_I - \frac{ru_1^2}{2}, \quad (\text{Pa})。 \quad (6-4)$$

实际测量是在距风机进口截面 I-I 为 L_1 (m) 的上游截面 1-1 处进行的。读得截面 1-1 上微压计的读数 h_1 (m)，测知当时示压液体水的密度 $r_{水}$ (可近似地取 $r_{水}=1000 \text{ kg/m}^3$) 和实验风筒的内径 D_1 (本实验 $D_1=0.28\text{m}$)，取 1-1 到 I-I 的管路沿程阻力系数为 0.02，且有平均流速 $u_1=u_1$ (因为管的内径相同)，则风机的静压 p_{st} 可由下式计算。

$$p_{st} = r_{水}gh_1 - \left(1 - 0.02 \frac{L_1}{D_1}\right) \frac{ru_1^2}{2}, \quad (\text{Pa})。 \quad (6-5)$$

2. 风机的流量 q_v 。

在本实验中，风机的流量 q_v (m^3/s) 是用集流法测定的。在 $J-J$ 截面上读取微压计的读数 h_j (m)，量知示压液体水的密度 $r_{水}$ (kg/m^3) 和空气的密度 r (kg/m^3) 以及计量管径 D (本实验 $D=0.28\text{m}$)，取流量系数 $j=0.98$ ，重力加速度 $g=9.81\text{m/s}^2$ ，则流量可由下式计算。

$$q_v = j \frac{pD^2}{4} \sqrt{\frac{2r_{水}gh_j}{r}}, \quad (\text{m}^3/\text{s})。 \quad (6-6)$$

3. 风机的轴功率 P 。

本实验采用马达天平法测量风机的轴功率 P (W)。量得力臂长 L (m)、风机的转速 n (r/min)、力臂端作用于台秤的力 G (N)，则轴功率 P (W) 可由下式计算。

$$P = \frac{G \cdot L \cdot p \cdot n}{30}, \quad (\text{W})。 \quad (6-7)$$

4. 风机性能参数的相似换算。

因为实际测点的转速 n (r/min) 受电压、负荷等因素的干扰一般不同于被测风机的规定转速 n_0 (r/min)。所以，应把转速 n 下的各参量流量 q_v (m^3/s)、全压 p (Pa)、轴功率 P (W) 等的值，利用比例定律转化为规定转速 n_0 (r/min) 下的参量流量 q_{v0} (m^3/s)、全压 p_0 (Pa)、轴功率 P_0 (W) 等的值。比例定律的公式为：

$$\frac{q_{v0}}{q_v} = \frac{n_0}{n}, \quad \frac{p_0}{p} = \left(\frac{n_0}{n}\right)^2, \quad \frac{P_0}{P} = \left(\frac{n_0}{n}\right)^3。 \quad (6-8)$$

5. 风机的效率 h 。

风机在各状态测点的效率由下式计算。

$$h = \frac{P_0 \cdot q_{v0}}{P_0} \quad (6-9)$$

四、实验的方法步骤。

1. 被测风机为离心式风机时，应关阀启动或者停机。
2. 实验前首先将各测量仪器调整到正确的测量状态。
3. 启动风机后，用节流法由小到大（离心式风机）在最小到最大的范围内至少选定 10 个分布较合理的流量点。在各流量点上，待流态稳定后分别读取 n 、 h_1 、 h_j 和 G 等仪表的读数并记录。

五、实验记录及计算参考表。

风机型号 _____，规定转速 $n_0 =$ _____ (r/min)，电机型号 _____，电机功率 _____ kW，力臂长 $L =$ _____ m，风机出口 _____ m × _____ m，实验风筒的内径 _____ m，叶轮外径 _____ m，测压截面距离 $L_1 =$ _____ m。

表 5-2 泵的汽蚀实验数据记录与相关计算参考表

测量序号 项目		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		n	r/min								
h_j	m										
h_1	m										
G	N										
q_v	m ³ /s										
q_{v0}	m ³ /s										
p_d	Pa										
p_{st}	Pa										
p	Pa										
p_0	Pa										
$p_0 \cdot q_{v0}$	W										
P	W										
P_0	W										
η	%										

六、思考与讨论。

1. 为什么离心式风机应关阀启动或者停机？轴流式风机是否也应这样做？
2. 你认为这种测量风机流量的方法是否准确？如何确定气体流量计的流量系数？
3. 你认为本实验台应进行哪些改进？

实验七 压滤机过滤常数的测定实验

一、实验目的。

1. 了解板框压滤机的构造，掌握操作方法；
2. 测定恒压过滤方程式的过滤常数；
3. 测定洗涤速率与过滤最终速率的关系。

二、实验仪器设备。

整套实验系统主要包括电动搅拌调浆桶、离心泵、板框压滤机及过滤介质（滤布）、滤液收集桶、磅秤和计时秒表等。主要组成如图 7-1 所示。板框压滤机的非洗涤板（一钮）、框（二钮）和洗涤板（三钮）之间的安装顺序，过滤时滤浆和滤液的流动路径，洗涤时洗涤水的进入及洗涤滤液的排出路径等，如图 7-2 所示。

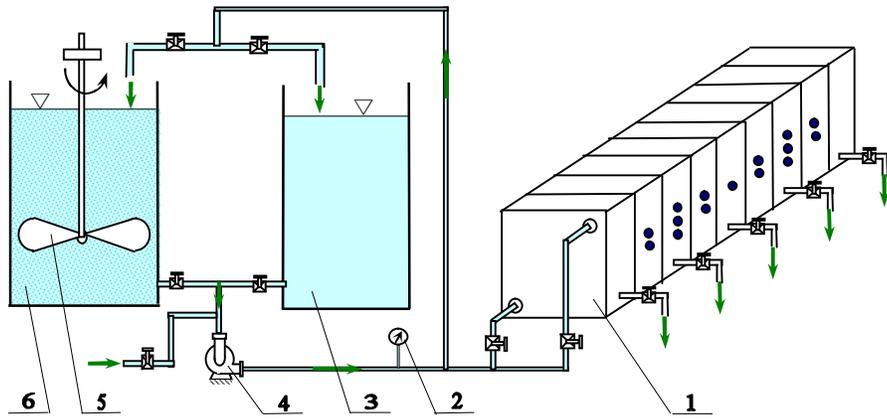


图 7-1 过滤常数测定系统的结构示意图

1.板框压滤机；2.压力表；3.洗涤清水桶；4.离心泵；5.电动机械搅拌器；6.调浆桶；

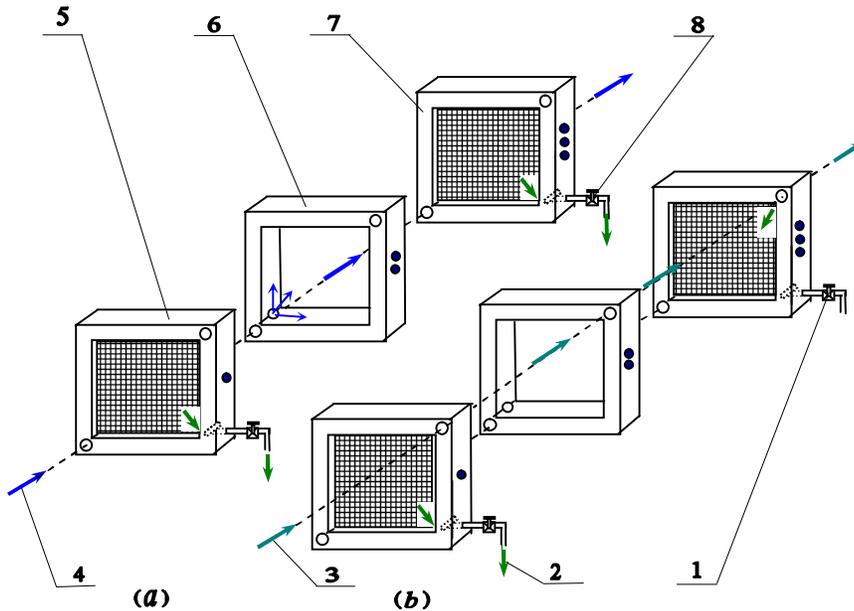


图 7-2 板、框排列顺序与流动路径示意图

(a) 过滤时的流动路径；(b) 洗涤时的流动路径。

1.阀门关闭；2.洗涤液排出；3.洗涤清水进入；4.滤浆进入；5.非洗涤板（一钮）；

6.框（二钮）；7.洗涤板（三钮）；8.滤液排出

在调浆桶内配制一定量的滤浆（本实验把碳酸钙粉与水按比例配制的悬浮液作为滤浆）。用离心泵将滤浆定压地送入板框压滤机进行过滤。用选定阀门开度的方法把过滤压力调整到并维持在要求的恒定压力上。待压滤机排出的滤液澄清后，把滤液引入收集桶内开始计时称量。洗涤时则用离心泵把洗涤水桶内的清水送至板框压滤机进行洗涤。排出的洗涤滤液同样也引入收集桶内计时称量。实验完毕，拆卸板框压滤机，将滤渣放回调浆桶。

三、实验原理。

恒压过滤的基本方程为：

$$(V + V_e)^2 = KA^2(t + t_e)。 \quad (7-1)$$

式中： t — 过滤进行的时间，s；

V — $0 \sim t$ 时间段内排出的滤液体积， m^3 ；

V_e — $0 \sim t_e$ 时间段内与滤布阻力相当的虚拟滤液体积， m^3 ，在特定的条件下为常数；

t_e — 获得虚拟滤液体积 V_e 所需要的虚拟过滤时间，s，在特定的条件下也为常数；

A — 过滤面积， m^2 ；

K — 过滤常数， m^2/s 。

在过滤过程中，过滤面积 A 可跟据过滤方式和生产任务计算得到，而 K 、 V_e 、和 t_e 在操作条件（如压力、温度等）和滤浆（悬浮液）类型确定后，而成为确定的常数，故统称为过滤常数。只有 K 、 V_e 、和 t_e 的值确定之后，才能利用过滤基本方程式计算获得一定体积 V 的滤液量所需的过滤时间 t 。 K 、 V_e 、和 t_e 等过滤常数是在确定的过滤条件和过滤料浆的前提下，通过实际的实验测量得到的。

1. 过滤常数的测定。

令 $q = V/A$ 、 $q_e = V_e/A$ ，分别为单位面积上滤液容积和与滤布相对等的虚拟滤液容积， m^3/m^2 ，则过滤基本方程式变为下列形式。

$$(q + q_e)^2 = K(t + t_e)。 \quad (7-2)$$

求关于 q 和 t 的微分得：

$$2(q + q_e) \cdot dq = K \cdot dt。$$

以 Δq 、 Δt 分别代替 dq 、 dt 并整理后得，

$$\frac{\Delta t}{\Delta q} = \frac{2}{K} \cdot q + \frac{2}{K} \cdot q_e。 \quad (7-3)$$

在确定的过滤条件和过滤面积 A 下，针对某种悬浮料浆测取一系列的 Δt 和 Δq 的值，则在以 $\Delta t/\Delta q$ 为纵坐标，以 q 为横坐标的直角坐标系中所作的图像应为一条直线。这条直线的斜率为 $2/K$ ，截距为 $2q_e/K$ ，从而可求得过滤常数 K 、 q_e 和 t_e 。

2. 最终过滤速率与洗涤速率的关系。

最终过滤速率的确定比较困难。因为何时滤渣充满滤框无法准确观察到，只能根据滤液量变化粗略估计过滤终端。测定洗涤速率的压力条件应与过滤时相同，所得的数据与理论值相比较略有差异。

四、实验方法与注意事项。

1. 应在熟悉阀门、管路系统和板框压滤机的构造之后进行操作。

2. 将滤布润湿后，放于滤框上并且四周拉紧后按正确的顺序装配。应特别注意滤浆通孔与洗涤水通孔的位置。

3. 启动调浆桶内的电动搅拌器，将碳酸钙（ CaCO_3 ）粉与水的混合物搅拌成均匀的悬浮液，作为滤浆。然后，启动离心泵，调整阀门开度使压力始终稳定在所要求的数值上。

4. 测取数据应在排出的滤液澄清后进行。开始测取数据后，不得再向调浆桶内加入清水或碳酸钙粉，以便保持滤浆浓度的恒定。

五、实验记录与计算参考表。

实验台的型号 _____，悬浮液组成 _____，悬浮液浓度 _____ %，悬浮液温度 _____ $^{\circ}\text{C}$ ，压滤机滤液的排出方式 _____，滤框尺寸 _____ $\text{m} \times$ _____ m ，滤框的个数 _____，总过滤面积 _____ m^2 ，压滤操作压力 _____ MPa ，洗涤操作压力 _____ MPa 。

表 7-1 过滤阶段测定数据记录参考表

项目 \ 测次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
过滤时间 / s												
滤液质量/kg												

表 7-2 洗涤阶段测定数据记录参考表

项目 \ 测次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
洗涤时间 / s												
洗滤液质量/kg												

六、思考与讨论。

1. 当操作压力增加一倍时，其 K 值是否也增加一倍？要得到同样数量的滤液，其过滤时间是否也缩短一半？

2. 过滤开始时，为什么滤液是浑浊的？

3. 如果滤浆中液体黏度较大，你考虑用什么方法提高过滤速度？

实验八 传热实验

一、实验目的。

1. 掌握换热器总传热系数 K 的测定方法；

2. 比较不同换热实验管道的传热效果。

二、实验仪器设备。

本实验所采用的综合传热性能实验台的组成与结构参见图 8-1。它主要包括电加热蒸汽发生器、6 根换热管、量筒、压力表、蒸汽压力自动控制系统、温度计、大气压计、风机和计时秒表等。该设备是利用电能加热水而产生水蒸汽的。水蒸汽的压力是通过电接点压力表自动控制加热电源的通断来使得所产生的水蒸汽的压力始终稳定在预置的压力范围内，实际调

定的蒸汽压力由蒸汽压力表读取，为获取蒸汽的绝对压力还应用大气压计测取当地大气压。加热蒸汽通过 6 根内部完全相同的（都是同一尺寸的纯铜管）但外表面完全不同的换热实验管道与环境空气进行热交换。6 根换热管道分别为：翅片铜管、涂黑铜管、原色纯铜管、外表面镀铬铜管、锯末包覆铜管和硅酸铝包覆铜管。

三、实验原理。

1. 水蒸汽的放热速率 Φ 。

饱和水蒸汽由始端到末端流经实验管道时，放出潜热而冷凝为同温度、同压力下的饱和液态水后聚集到量筒内。通过实验管道壁传递到环境去的放热速率可由下式计算。

$$\Phi = \Delta_v h \cdot q_m \quad (8-1)$$

$$q_m = r \cdot \frac{V}{t} \quad (8-2)$$

式中： Φ — 水蒸汽的放热速率，W。

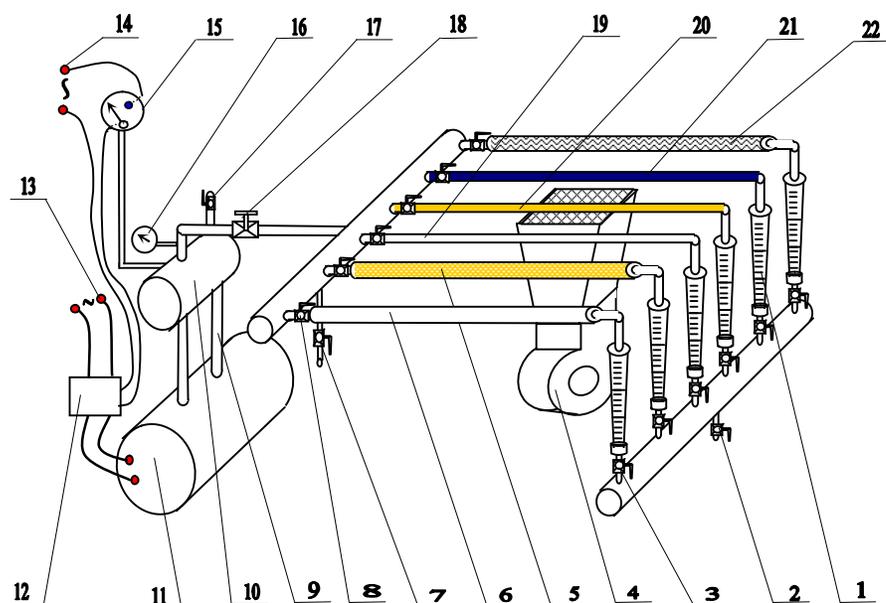


图 8-1 综合传热实验台的结构示意图

- 1.量筒; 2.排空阀; 3.排水阀; 4.风机; 5.锯末包覆铜管; 6.硅酸铝包铜管; 7.排空阀; 8.进汽阀; 9.水蒸汽分离管;
10.水蒸汽包; 11.水蒸汽发生器; 12.继电器; 13.加热电源输入线; 14.自动控制电源输入线; 15.电接点压力表;
16.蒸汽压力表; 17.安全阀; 18.总蒸汽阀; 19.镀铬铜管; 20.纯铜管; 21.涂黑铜管; 22.翅片铜管。

$\Delta_v h$ — 水蒸汽的冷凝潜热，J/kg，由饱和水蒸汽压力表上读取水蒸汽的表压力 $p_{表}$ ，再由大气压表上读取当地大气压 p_a （近似地，可取 $p_a=101\ 325\text{Pa}$ ），则水蒸汽的绝对压力 $p = p_a + p_{表}$ ，由 p 查饱和水蒸汽表可得 $\Delta_v h$ 的值，同时可查得水蒸汽的饱和温度 T_h ， $^{\circ}\text{C}$ 。

q_m — 水蒸汽的冷凝质量速率，kg/s，由式 8-2 计算。其中， ρ 为冷凝水的密度， kg/m^3 ，由冷凝水的温度 T_h ，查水的物理性质表获得； V 为冷凝水的体积， m^3 ，由量筒上直接读取； t 为冷凝时间，s，由秒表测取。

2. 平均温度差 ΔT_m , °C。

$$\Delta T_m = T_h - T_{\text{环境}}。 \quad (8-3)$$

式中: T_h — 热流体饱和水蒸汽的温度, °C, 由饱和压力 $p = p_a + p_{\text{表}}$ 查表获得。

$T_{\text{环境}}$ — 实验室内的平均温度, °C, 由室内的温度计测得。

3. 基准换热面积 A_{II} , m^2 。

为便于比较, 6 根外表面各不相同的实验换热管都以原色纯铜管的外表面为计算基准, 用下式计算。

$$A_{\text{II}} = \pi D_{\text{II}} \cdot L。 \quad (8-4)$$

式中: π — 圆周率。

D_{II} — 原色纯铜管的外径, m, 由游标卡尺测得。

L — 原色纯铜管的有效传热长度, m, 由米尺测得。

4. 相对于基准换热面积 A_{II} 的总传热系数 K_{II} , $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

由传热基本方程式

$$\Phi = K_{\text{II}} \cdot A_{\text{II}} \cdot \Delta T_m$$

可以推演得, \Rightarrow

$$K_{\text{II}} = \frac{\Phi}{A_{\text{II}} \cdot \Delta T_m}。$$

其中各符号如前所述。

四、实验方法步骤与注意事项。

1. 在蒸汽发生器内加入适量的纯净水 (最好为蒸馏水), 关闭各阀门; 在电接点压力表上预置压力 (表压应低于 0.2MPa); 然后接通电源, 观察蒸汽压力表的指示值, 待蒸汽压力稳定在预置压力之后即可进行实验。

2. 打开要进行实验的实验管的进汽阀, 同时开始用秒表计时, 达到预定的时间后, 立即关闭进汽阀并读取量筒内蒸馏水的体积, 分别记录于相应的表格中。

3. 分别在空气自然对流换热状态下和风机强制空气对流换热状态下, 对各种实验换热管进行步骤 2. 的测定。

4. 前一测定完成后, 应将量筒内的冷凝水用下部的排水阀排净后再进行后续的测定。

5. 要随时观察各处是否有漏气的现象发生, 发现后应及时处理好。实验时千万不能直接接触裸露的实验管, 以免发生烫伤。

6. 实验结束, 切断电源, 待冷却到压力降为零时, 才能打开排空阀排净积累的冷凝水。

五、实验记录及计算参考表。

设备的型号 _____, 大气压力 _____ Mpa, 室温 _____ °C, 纯铜管外径 _____ m, 纯铜管的有效长度 _____ m, 基准换热面积 $A_{\text{II}} =$ _____ m^2 , 加热蒸汽的表压力 _____ Mpa, 加热蒸汽的温度 $T_h =$ _____ °C, 冷凝水的密度 $\rho =$ _____ kg/m^3 。

表 8-1 空气自然对流实验管总传热系数测定数据记录及计算参考表

管型 \ 项目	t/s	V/cm^3	$\rho/ kg/m^3$	$q_m/kg/s$	$\Delta_v h/ J/kg$	Φ/W	$\Delta T_m/^\circ C$	A_{II}/ m^2	$K_{II}/W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
翅片铜管									
涂黑铜管									
原色纯铜管									
镀铬铜管									
锯末包铜管									
硅酸铝包铜管									

表 8-1 风机强制空气对流实验管总传热系数测定数据记录及计算参考表

管型 \ 项目	t/s	V/cm^3	$\rho/ kg/m^3$	$q_m/kg/s$	$\Delta_v h/ J/kg$	Φ/W	$\Delta T_m/^\circ C$	A_{II}/ m^2	$K_{II}/W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
翅片铜管									
涂黑铜管									
原色纯铜管									
镀铬铜管									
锯末包铜管									
硅酸铝包铜管									

六、思考与讨论。

1. 通过实验你发现不同表面状况的实验管的传热能力是否相同？若不相同是什么原因造成的？
2. 为什么当开动风机驱动空气强制对流换热时实验管的传热能力大大地加强？
3. 实验中存在哪些因素影响实验的稳定性？

实验九 干燥实验

一、实验目的。

1. 测定固体湿物料（制作成规则形状）常压恒定干燥工况下的干燥速度曲线，求出临界含水量；
2. 研究空气流的温度、流速对物料干燥速度曲线和干燥曲线的影响。

二、实验仪器设备。

本实验所采用的实验装置系统的组成与结构参见图 9-1。它主要包括风机及其管路系统、

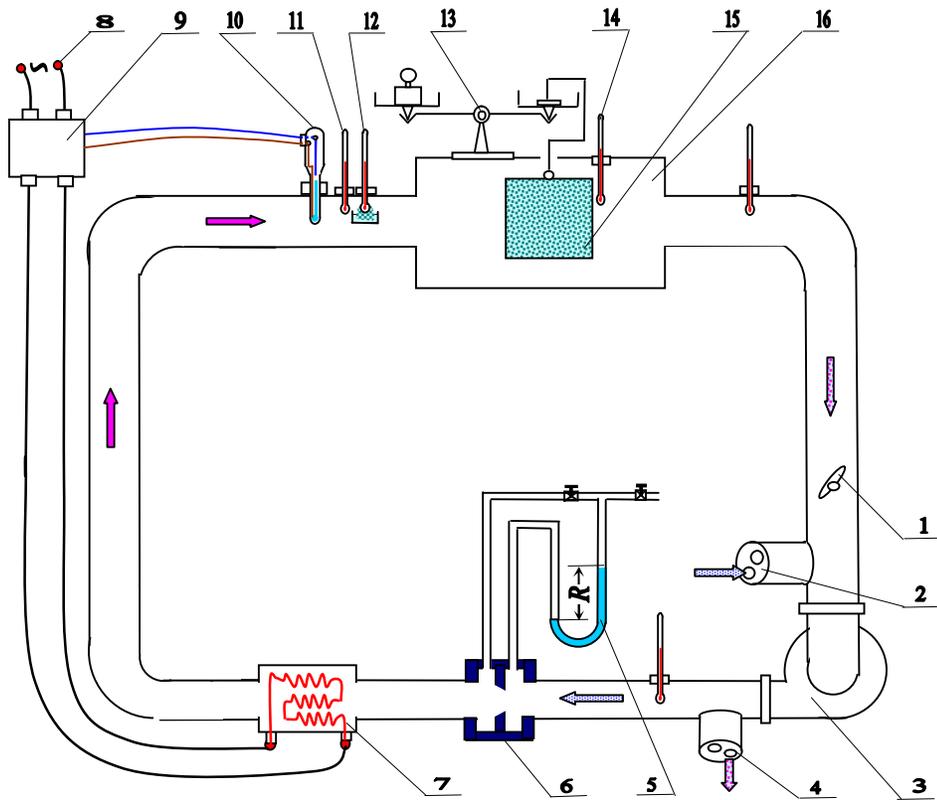


图 9-1 干燥实验系统的结构示意图

- 1.蝶阀；2.进入空气片式阀；3.风机；4.排出空气片式阀；5.压差计；6.孔板流量计；7.电加热器；
8.电源输入导线；9.控温继电器；10.水银接点温度计；11.干球温度计；12.湿球温度计；13.天平秤；
14. 湿物料表面温度计；15.被干燥的湿物料；16.干燥室。

孔板流量计、自动控制温度恒定的电加热装置、干湿球温度计、箱式干燥室、被测固体湿物料和称量天平等。恒定的干燥条件是指干燥介质空气的平均流速 V 、温度 T 、相对湿度 ϕ 、或湿含量 H 及其与湿物料的接触方式等都保持恒定不变。本实验系统利用恒定转速的风机与循环管路中的蝶形阀相配合，来获得所要求的稳定气流速度 V ，由流量计上的压差计的液位差来显示流速大小的稳定性，通过测知流量和过流截面积而求得流速 V 的大小。干燥介质空气的恒定温度 T 大小的预置是通过调整水银接点温度计的导通温度来实现的；而恒定性是由水银接点温度计通过控温继电器自动地控制电加热电流的通、断来达到的；通过分布于循环管路内的各个干球温度计来测量温度 T 的大小并显示其稳定性。干燥介质空气湿度的恒定性是通过风机进、出口端的进、排气片式阀的配合调整来实现的。当系统内空气湿度增大时，打开一点进气片式阀，让外界的干空气进入系统一部分，同时打开一点排气片式阀，让等量系统内的湿空气排到外界，并以维持系统内循环流量和湿度恒定为调整准则。空气湿度的大小和稳定性由干湿球温度计的温差来测量和显示。被测湿物料在干燥室内干燥过程中各时刻 t 的质量 m 由天平称取，物料表面的温度 θ 由温度计测取。

三、实验原理。

1. 空气密度 ρ (kg/m^3) 的测算。

改变干燥条件后，空气的密度 ρ (kg/m^3) 也随之发生变化，必须重新进行测算。空气的密度 ρ 随空气的压力、温度、和湿度的不同而异。近似地，可用操作温度和压力下干空气的理想气态方程来估算。即

$$r = 1.293 \times \frac{273}{101325} \times \frac{p_a + p_{\text{表}}}{273 + T} = 3.4837 \times 10^{-3} \frac{p_a + p_{\text{表}}}{273 + T} \quad (9-1)$$

式中： p_a — 实验地点的大气压力，Pa，由大气压力计测得。

$p_{\text{表}}$ — 密度为 ρ 的空气所在处的表压力，Pa，可近似地用孔板流量计上游或者下游截面上的测压计所测得的表压力代替系统内空气的表压力，

$$p_{\text{表}} = \rho_{\text{液}} \cdot g \cdot R_{\text{表}} \quad (9-2)$$

其中， $\rho_{\text{液}}$ (kg/m^3) 为测压计内指示液的密度， g 为当地重力加速度， m/s^2 ， $R_{\text{表}}$ 为测压计的液位高差（测压计的读数）， m 。对于本实验图 9-1 所示的孔板流量计的压差计来说，当打开通大气的阀门关闭通孔板流量计下游的阀门时，测压计的读数即为 $R_{\text{表}}$ ，它指示的是孔板上游侧空气的表压力。

T — 密度为 ρ 的空气所在处的温度， $^{\circ}\text{C}$ 。对于本实验图 9-1 所示的孔板流量计来说，其上游温度计的读数即为 T 。

若考虑空气湿度的影响，则可用下式计算空气的密度 ρ (kg/m^3)。

$$r = \frac{(p_a + p_{\text{表}}) \times \left(1 - 0.378j \cdot \frac{p_s}{p_a}\right)}{287 \times (273 + T)} \quad (9-3)$$

式中： φ — 空气的相对湿度，%；

p_s — $T^{\circ}\text{C}$ 水蒸汽的饱和蒸汽压，Pa；

p_a 、 $p_{\text{表}}$ 、 T — 如前所述。

2. 空气质量流量 q_m (kg/s) 的测定计算。

利用孔板流量计的测量结果可用下式计算空气的质量流量。

$$q_m = C_0 \cdot \frac{\rho d_0}{4} \sqrt{2\Delta p \cdot r} \quad (9-4)$$

式中： ρ — 孔板流量计处空气的密度， kg/m^3 。

Δp — 孔板流量计孔板的上、下游测压点间的压差，Pa。

$$\Delta p = \rho_{\text{液}} \cdot g \cdot R_{\text{孔}} \quad (9-5)$$

其中， $\rho_{\text{液}}$ (kg/m^3) 为测压计内指示液的密度， g 为当地重力加速度， m/s^2 ， $R_{\text{孔}}$ 为压差计的读数， m ，这时应关闭通大气的阀门打开通孔板下游的阀门。

d_0 — 孔板中央孔的内径， m 。

C_0 — 孔板流量计的流量系数（量纲一），由标定或者查使用说明书及相关手册等方法得到。

3. 干燥曲线及干燥速率曲线的测定计算。

在干燥过程中，被干燥湿物料的干基含水量 x (kg_w/kg_s) 随干燥时间 t (s) 的变化而变化，而被干物料表面温度 θ ($^{\circ}\text{C}$) 也随干燥时间 t (s) 的变化而变化。称湿物料的干基含水量 x 与干燥时间 t 的函数关系曲线及湿物料的表面温度 θ 与干燥时间 t 的函数关系曲线为干燥曲线。

单位时间内从单位被干燥物料的干燥面积上汽化出来的水分质量数，称为干燥速率。

若在 A (m^2) 被干燥物料的干燥面积上, 经过 dt (s) 时间段内汽化出来的水分质量为 dW (kg_w), 则干燥速率 u [$\text{kg}_w/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] 定义为:

$$u = \frac{dW}{A \cdot dt} \quad (9-6)$$

若被干物料的绝对干燥物质质量为 m_s (kg_s), 在 dt (s) 干燥时间段内的干基含水量由 x_t (kg_w/kg_s) 降为 x_{t+dt} (kg_w/kg_s), 则

$$dW = -m_s (x_{t+dt} - x_t) = -m_s \cdot dx。$$

于是有

$$u = -\frac{m_s \cdot dx}{A \cdot dt} \quad (9-7)$$

由此可见干燥速率 u 不仅是时间 t 的函数, 而且是被干燥物料的干基含水量 x 的函数。因此, 把干燥速率 u 与被干物料的干基含水量 x 间的函数关系曲线称作干燥速率曲线。

干燥曲线和干燥速率曲线除了随被干燥物料的种类和干燥面积的不同而变化外, 还因干燥条件而异。

在干燥室内, 以恒定的干燥条件 (干燥介质空气的温度 T 、相对湿度 φ 、或湿含量 H 及其与湿物料的接触方式等都保持恒定不变) 对已知干燥面积 A (m^2) 的被干物料进行干燥。在干燥过程中用天平称取各时刻 t ($t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n, t_{n+1}$) 被干湿物料的质量 m ($m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n, m_{n+1}^*$), 读取相应时刻物料表面的温度 θ ($\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_n, \theta_{n+1}$)。其中在 t_n 和 t_{n+1} 时刻所测得的 $m_n = m_{n+1}^*$, 即天平的读数不随时间变化, 实验测定到这时即可停止。这时, $m_n = m_{n+1}^*$ 所对应的物料的干基含水量即为此干燥条件下的平衡干基含水量 x_e 。

在测知被干物料的绝对干燥物质质量 m_s (kg_s) 之后, 各时刻所对应的被干湿物料的干基含水量 x_i 和干燥速率 u_i 可分别用下面的算式计算。

$$x_i = \frac{m_i - m_s}{m_s}; \quad (9-8)$$

$$u_i = \frac{m_s \cdot (x_i - x_{i+1})}{A \cdot (t_{i+1} - t_i)}; \quad (9-9)$$

$$i = 1, 2, \dots, n。$$

根据所得数据便可绘制出此干燥条件下的干燥曲线和干燥速率曲线。改变干燥条件则可得另外条件下的干燥曲线和干燥速率曲线。

四、实验方法与注意事项。

1. 实验前, 把试样 (被干燥的固体湿物料) 放于温度为 120°C 的电烘箱内加热干燥, 至少 2 小时获得绝对干燥物料。然后, 称得试样的绝对干燥质量 m_s (kg), 并测得其表面积 A (m^2)。

2. 将干试样浸泡于水中至少 15 分钟, 使其充分吸水并均匀地扩散至整个试样。然后, 称取湿试样的质量 m (kg)。

3. 把水银接点温度计的导通温度预置于恒定干燥条件所要求的温度 T 上。开启风机, 接通加热器预热空气, 待空气温度达到并稳定于预置温度 T 后, 才能实验测定。

4. 打开干燥室门，把准备好的试样放置入恒定干燥条件的干燥室内，并立即计时称量各时刻试样的质量 m_i ($i = 1, 2, \dots, n, n+1$)，直到试样的质量不再改变为止。

5. 随时观察各干球温度计是否稳定于预定值，干湿球温度计的温度差是否稳定。若发生较大幅度的波动应及时调整。

6. 各不同干燥条件下的气流量由孔板流量计测取，各处空气的温度由干球温度计读得，湿度由干湿球温度计获得。

7. 实验完毕，先关闭电加热器，后停止风机，并取出试样。

五、实验记录与计算参考表。

实验设备的型号 _____，被试物料的名称 _____，物料的绝对干燥质量 m_s = _____ g，湿物料的质量 m = _____ g，物料的表面积 A = _____ m^2 ，大气压力 p_a = _____ Pa，实验室内温度 _____ $^{\circ}C$ ，孔板上游测压点的表压力示值 $R_{表}$ = _____ m，孔板流量计示值 $R_{孔}$ = _____ m，测压计指示液的密度 $\rho_{液}$ = _____ kg/m^3 ，确定条件下的干燥介质空气的密度 ρ = _____ kg/m^3 。

表 9-1 干燥实验测定数据记录及计算参考表

项目 序号	干球温度 $T / ^{\circ}C$	湿球温度 $T_w / ^{\circ}C$	时间 t / s	试样质量 m_i / g	干基含水量 $x_i / kg_w/kg_s$	料面温度 $\theta_i / ^{\circ}C$	干燥速率 $u_i / kg/(s \cdot m^2)$
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							

六、思考、讨论与要求。

1. 通过干燥实验操作，试分析影响干燥速率的因素有哪些？
2. 从此干燥实验中，能否确定在干燥过程中除去的自由水、结合水及非结合水的数量？能否确定平衡水含量多少？达到平衡时的干燥速率为多少？
3. 测定干燥曲线和干燥速率曲线的意义何在？
4. 要求绘出干燥曲线和干燥速率曲线，同时列出平衡含水量 x_e 和临界含水量 x_C 。