

食品工程原理 CAI 实验指导书



北京农学院
食品科学系工程教研室

2009年2月

目 录

实验一 管路流动阻力实验·····	1
实验二 离心泵特性曲线实验·····	3
实验三 流量计校核实验·····	5
实验四 过滤常数测定实验·····	7
实验五 传热系数测定实验·····	10
实验六 干燥曲线及干燥速率曲线实验·····	12
实验七 精馏操作实验·····	15

实验一 管路流动阻力实验

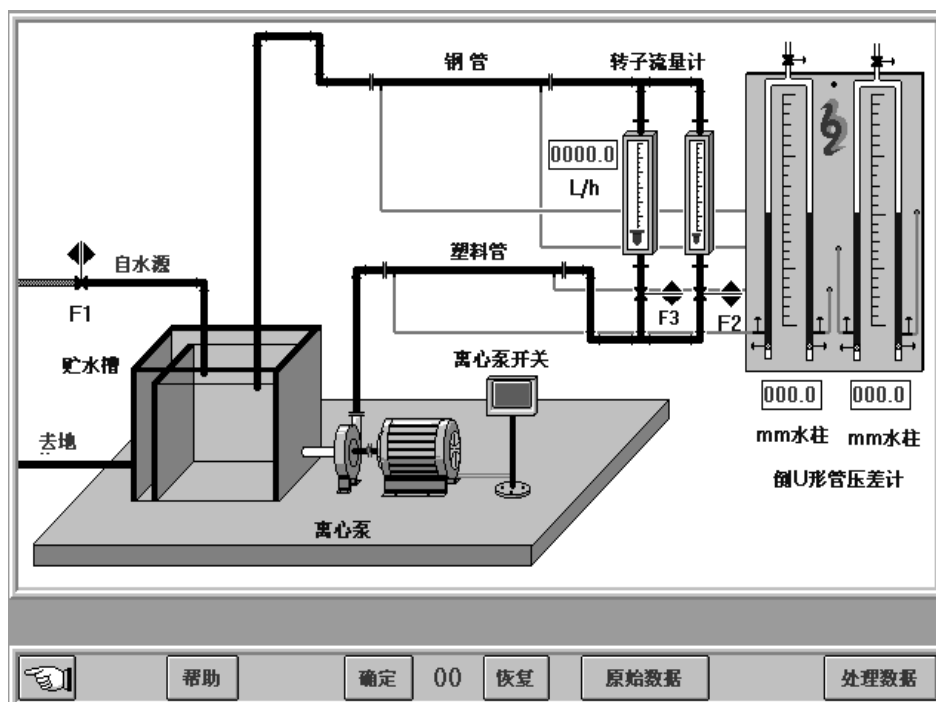
一、实验目的

1. 掌握管路沿程阻力摩擦系数 λ 的测定方法；
2. 了解流量测定与压差测定的仪器构造及原理；
3. 掌握双对数坐标绘制关系曲线。

二、实验内容

光滑管和粗糙管摩擦系数 λ 的测定。

三、实验装置



已知，光滑管和粗糙管的直径为 0.027m，两测压点间的距离为 1.2m。

四、实验原理

由于流体具有粘性，在管内流动时必须克服内摩擦力；当流体呈湍流流动时，质点间不断地相互碰撞，引起质点间动量交换，从而产生了湍动阻力，消耗了流体能量。由于流体的粘性而产生的内摩擦力和由于流体的涡流所产生的湍动阻力之和为流体的流动阻力，其表现为流体沿程的压力降，可用 Fanning 公式计算：

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

依据此式，通过测量管路沿程的压力降和流速，即可计算摩擦系数 λ 。

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

其中： l —两测压点间直管的长度，m

d —直管内径，m

λ —摩擦阻力系数

u —流体流速，m/s

Δp_f —直管阻力引起的压降，N/m²

μ —流体粘度，Pa.s

ρ —流体密度，kg/m³

本实验通过改变水的流量，测得一系列流量下不同直管的 ΔP_f 值，将已知尺寸和所测数据代入公式，分别求出 λ 和 Re ，并在双对数坐标纸上绘出 $\lambda \sim Re$ 曲线。

五、实验操作

详见 CAI 实验系统帮助。

六、实验结果

1. 利用所测数据分别计算出光滑管和粗糙管的 Re 、 λ 值，并列表。
2. 以 Re 为横坐标， λ 为纵坐标，在双对数坐标纸上标绘出 Re 和 λ 的关系曲线。

七、思考题

1. 当管路中流体流速增加时，管路的摩擦系数 λ 将怎样变化？管件的局部阻力系数 ξ 将怎样变化？
2. 用流体静力学方程描述倒置 U 管压差计的测量原理。

实验二 离心泵特性曲线实验

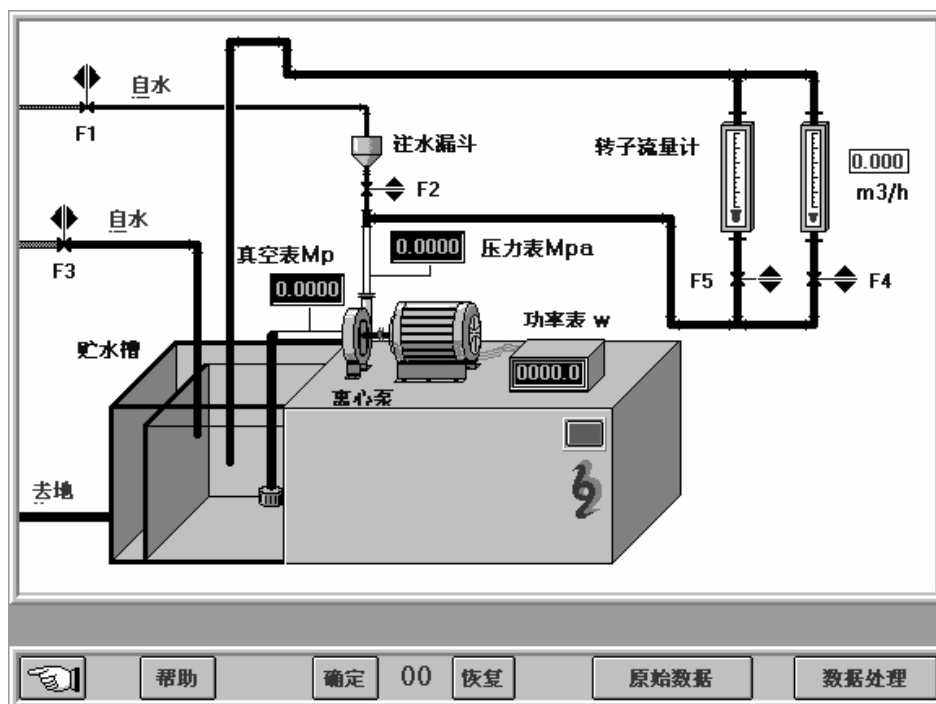
一、实验目的

1. 熟悉离心泵操作方法，了解离心泵安装要求；
2. 掌握离心泵在一定转数下特性曲线的测定方法。

二、实验内容

测定离心泵的特性曲线。

三、实验装置



四、实验原理

离心泵的扬程、轴功率、效率都与离心泵的流量有关。这些关系难以定量计算，而是通过实验测定。离心泵在出厂前测出了一系列关系曲线，以反映产品的基本性能，称作离心泵特性曲线。包括：

- (1) H-Q 曲线：表示离心泵扬程与流量的关系；
- (2) N-Q 曲线：表示离心泵轴功率与流量的关系；
- (2) η -Q 曲线：表示效率与流量的关系。

测定离心泵特性曲线的实验装置见上图。在测定过程中，先将离心泵出口阀门关闭，启动离心泵，测出流量为 0 时泵的出口压力和入口真空度以及轴功率；然后逐渐开启泵出口阀门，调节流量，在相应的流量下测出泵的出口压力和入口真空度以及轴功率，通过计算即

可得出离心泵特性曲线。

1. 通过在泵入口的真空表和出口的压力表之间列柏努利方程，可得到扬程的计算式：

$$H = \frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + h_0 \quad (mH_2O)$$

$$H = H_{\text{压}} + H_{\text{真}} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + h_0 \quad (mH_2O)$$

其中：H—扬程，mH₂O

p₁、p₂—泵进出口处压强，Pa

H_压、H_真—以米水柱表示的压力表和真空表读数，mH₂O

2. 由电动机输入离心泵的功率称为轴功率，可由功率表直接测得。
3. 离心泵的有效功率可由下式计算：

$$N_e = QH\rho g$$

有效功率与轴功率之比为离心泵的效率：

$$\eta = \frac{N_e}{N}$$

五、实验操作

详见 CAI 实验系统帮助。

六、实验结果

1. 将实验数据列表并计算出 Q、H、N 及 η 等数据。
2. 在坐标纸上作出泵的特性曲线，即 H~Q、N~Q、η~Q 三条曲线并根据所得曲线，标出适宜操作区。

七、思考题

1. 离心泵启动时，应注意什么？
2. 用离心泵抽井水，由于入口管处有裂缝或接管密封不严，则会发生什么现象？
3. 对现有实验条件，泵的特性曲线能否改变？
4. 由实验得知，泵的流量越大，泵进口处真空度越大，为什么？

实验三 流量计校核实验

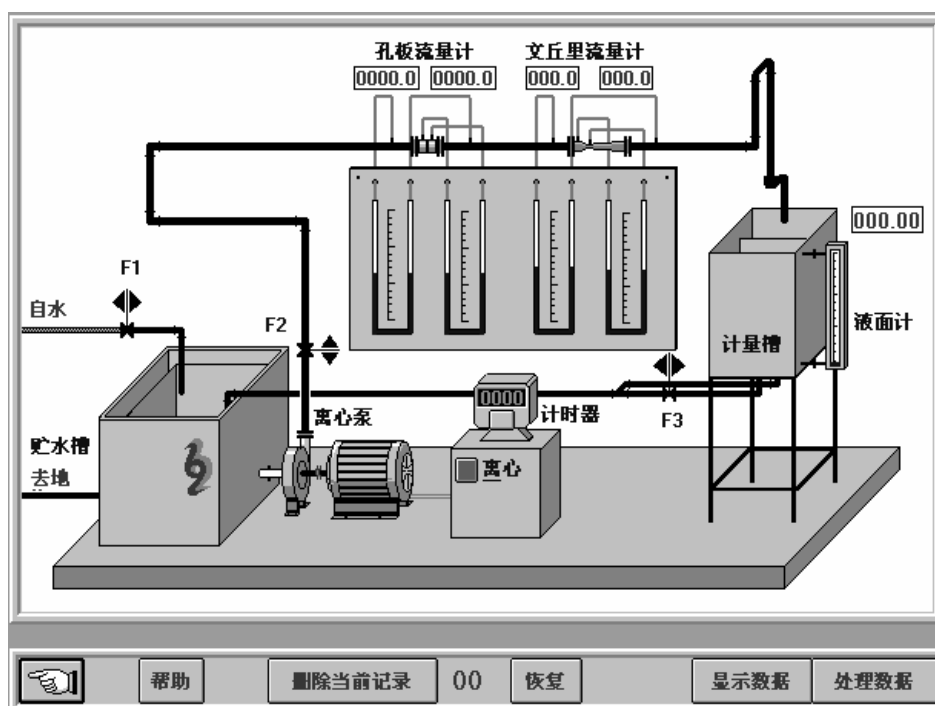
一、实验目的

1. 熟悉孔板流量计和文丘里流量计的构造、性能和使用方法；
2. 学习测定孔板、文丘里流量计孔流系数的方法。

二、实验内容

测定孔板、文丘里流量计孔流系数。

三、实验装置



已知，孔板流量计圆孔面积为 $1.18 \times 10^{-4} \text{m}^2$ ，文丘里流量计缩孔截面积为 $1.54 \times 10^{-4} \text{m}^2$ 。

四、实验原理

从流体流量测量原理可知，孔板流量计为压差流量计，其流量计算式为：

$$Q_s = c_o A_o \sqrt{\frac{2R(\rho_A - \rho_B)g}{\rho_B}}$$

$$c_o = \frac{Q_s}{A_o \sqrt{\frac{2R(\rho_A - \rho_B)g}{\rho_B}}}$$

文丘里流量计亦为压差流量计，计算公式为：

$$Q_s = c_v A_o \sqrt{\frac{2R(\rho_A - \rho_B)g}{\rho_B}}$$
$$c_v = \frac{Q_s}{A_o \sqrt{\frac{2R(\rho_A - \rho_B)g}{\rho_B}}}$$

其中： c_o —孔板流量计孔流系数

c_v —文丘里流量计孔流系数

A_o —流量计喉部截面积

R —U 管压差计的读数

五、实验操作

详见 CAI 实验系统帮助。

六、实验结果

1. 在不同流量下，测出孔板流量计和文丘里流量计的孔流系数，并计算平均值；
2. 比较孔板流量计和文丘里流量计孔流系数的大小，并说明原理。

七、思考题

1. 流体流经缩脉时，流量将怎样变化？压强将怎样变化？
2. 说明压差流量计和截面流量计的异同。

实验四 过滤常数测定实验

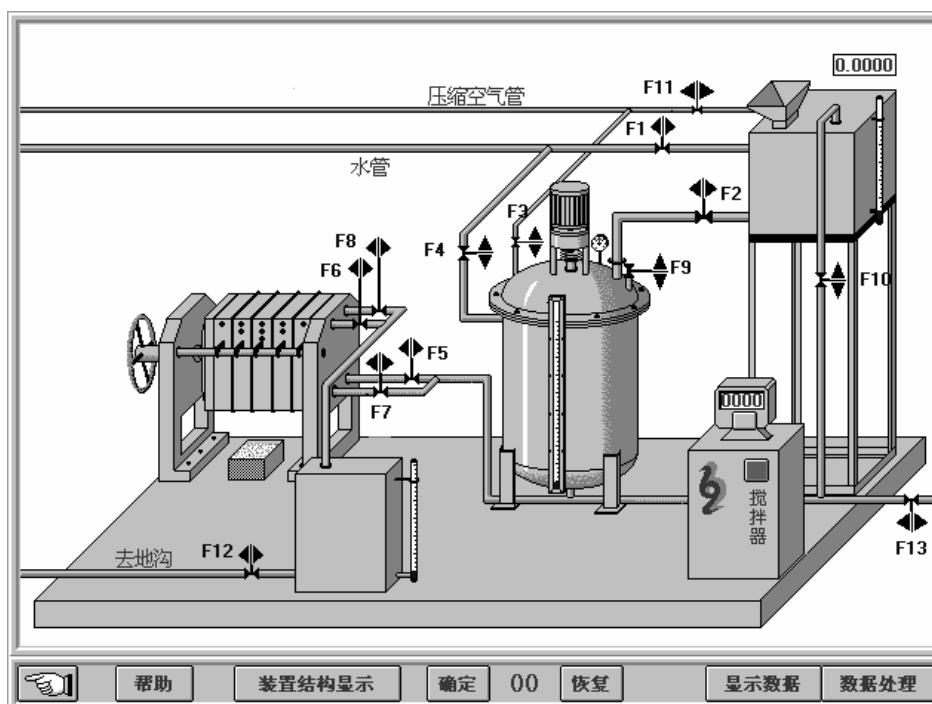
一、实验目的

1. 熟悉板框式恒压过滤装置流程、结构及其操作方法；
2. 掌握恒压过滤常数 K 、 q_e 的测定方法；
3. 了解滤饼洗涤方法。

二、实验内容

测定恒压过滤常数 K 、 q_e 。

三、实验装置



已知，板框式压滤机的过滤面积为 4.2m^2 。

四、实验原理

过滤过程是将悬浮液送至过滤介质，在其上维持较高的压力，液体通过介质变成滤液，而固体粒子则被截留逐渐形成滤饼。过滤速率由过滤介质两端的压力差及过滤阻力决定。过滤阻力由二部分组成，一为过滤介质阻力，一为滤饼阻力（先堆积下来的滤饼成为后来悬浮液的过滤介质）。因为滤饼厚度（亦即滤饼阻力）随着时间而增加，所以恒压过滤速率随着时间而降低。对于不可压缩性滤饼，在恒压过滤情况下，滤液量 V 与过滤时间 τ 的关系可用下式表示：

$$(V + V_e)^2 = KA^2(\tau + \tau_e)$$

式中：V— τ 时间内的滤液量， m^3

V_e —虚拟滤液的体积，它是形成相当于过滤介质阻力的一层滤饼时，应得到的滤液量， m^3

A—过滤面积， m^2

K—过滤常数 m^2/s

τ —相当于得到滤液 V 所需的过滤时间，s

τ_e —相当于得到滤液 V_e 所需的过滤时间，s

上式也可写成：

$$(q + q_e)^2 = K(\tau + \tau_e)$$

式中： $q=V/A$ ，即单位过滤面积的滤液量，m

$q_e=V_e/A$ ，即单位过滤面积的虚拟滤液量，m

将过滤方程式微分后得到

$$\frac{d\tau}{dq} = \frac{2}{K}q + \frac{2}{K}q_e$$

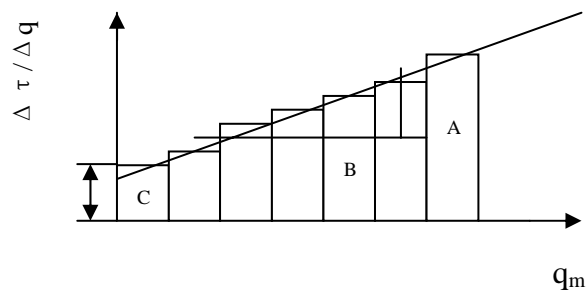
不能从实验测定 $\frac{d\tau}{dq}$ ，可用 $\frac{\Delta\tau}{\Delta q}$ 代替，则

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta q} = \frac{2}{K}q + \frac{2}{K}q_e$$

这样，在恒压下，测定一系列 τ ，V（或 q）值，将其转化为 $\Delta\tau$ ， Δq 值，在直角坐标

上以 $q_m = \frac{q_i + q_{i+1}}{2}$ 为横坐标，以 $\frac{\Delta\tau}{\Delta q}$ 为纵坐标作图，可得一直线，该直线斜率为 $\frac{2}{K}$ ，截

距为 $\frac{2q_e}{K}$ ，计算可得 K、 q_e 。



五、实验操作

详见 CAI 实验系统帮助。

六、实验结果

1. 由恒压过滤实验数据求 K , q_c 的值;
2. 写出完整的过滤方程式。

七、思考题,

1. 当操作压强增加一倍, 其 K 值是否也增加一倍? 要得到同样的过滤液, 其过滤时间是否缩短一半?
2. 过滤速度与过滤速率有何不同?
3. 恒压过滤时, 欲增加过滤速率, 可行的措施有哪些?

实验五 传热系数测定实验

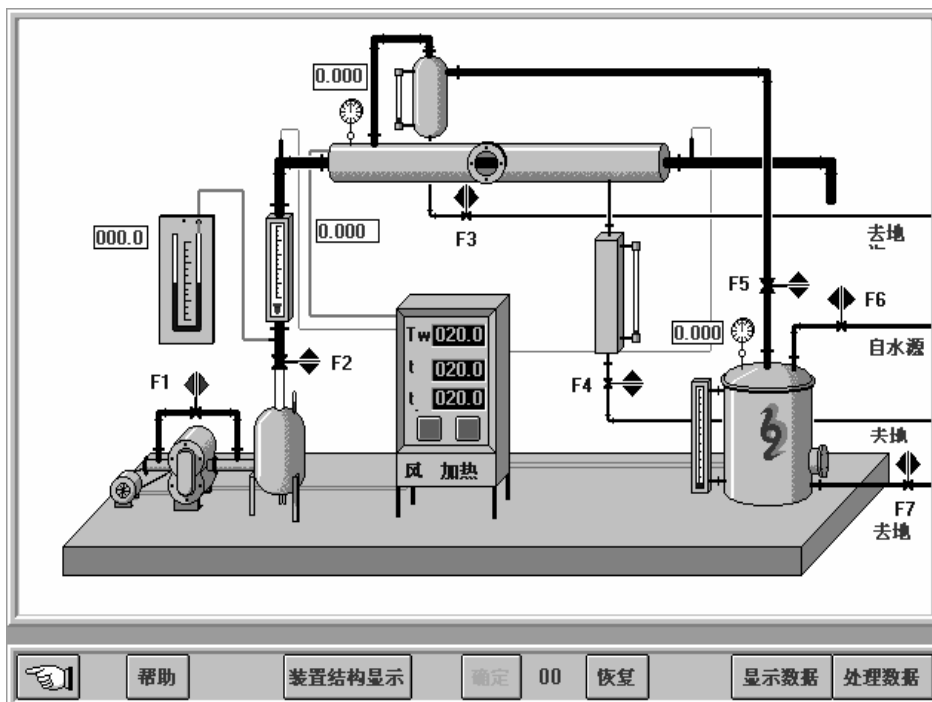
一、实验目的

1. 学习测定传热系数和给热系数的方法；
2. 加强对传热理论的理解；
3. 学习常用的准数关联方法及双对数坐标纸的使用。

二、实验内容

测定传热系数和给热系数。

三、实验装置



已知，加热套管的管长为 1m，管外径为 360mm。

四、实验原理

从传热原理可知，对稳定传热有：

$$Q = W_c c_{pc} (t_2 - t_1) = KA\Delta t_m$$

$$K = \frac{W_c c_{pc} (t_2 - t_1)}{A\Delta t_m}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{b}{\lambda} \frac{d_0}{d_i} + \frac{1}{\alpha_i} \frac{d_0}{d_i}}$$

由于蒸汽冷凝热阻与管壁热阻远小于内管空气对流传热热阻，因此可以忽略不计，故有：

$$K \approx \alpha$$

由因次分析可知，流体对流传热关联式为：

$$N_u = CR_e^m P_r^n G_r^p$$

对于强制湍流，Gr 准数可以忽略，则：

$$N_u = CR_e^m P_r^n$$

对于流体物性确定的情况，则：

$$N_u = CR_e^m$$

将上式两边取对数得：

$$\lg N_u = \lg c + m \lg R_e$$

因此可用图解法或最小二乘法计算准数关联式中的指数 m 和系数 C。

五、实验操作

详见 CAI 实验系统帮助。

六、实验结果

1. 根据实验结果，计算出 α 、Nu、Re 值，并列出结果数据一览表。
2. 以 Re 为横坐标，Nu 为纵坐标，在双对数坐标纸上绘制一条直线，确定出 C、m 值。

再写出流体在圆管内做强制湍流流动时的传热膜系数半经验关联式。

七、思考题

1. 将实验得到的半经验准数关联式和公认式进行比较，分析造成偏差的原因。
2. 本实验中管壁温度应接近加热蒸汽温度还是空气温度？为什么？
3. 管内空气流动速度对传热膜系数有何影响？当空气流速增大时，空气离开热交换器时的温度将升高还是降低？为什么？
4. 试估算实验近似取 $\alpha_i = K$ 对 K 造成的误差。（可取 $\alpha_o = 8000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$ ）

实验六 干燥曲线及干燥速率曲线实验

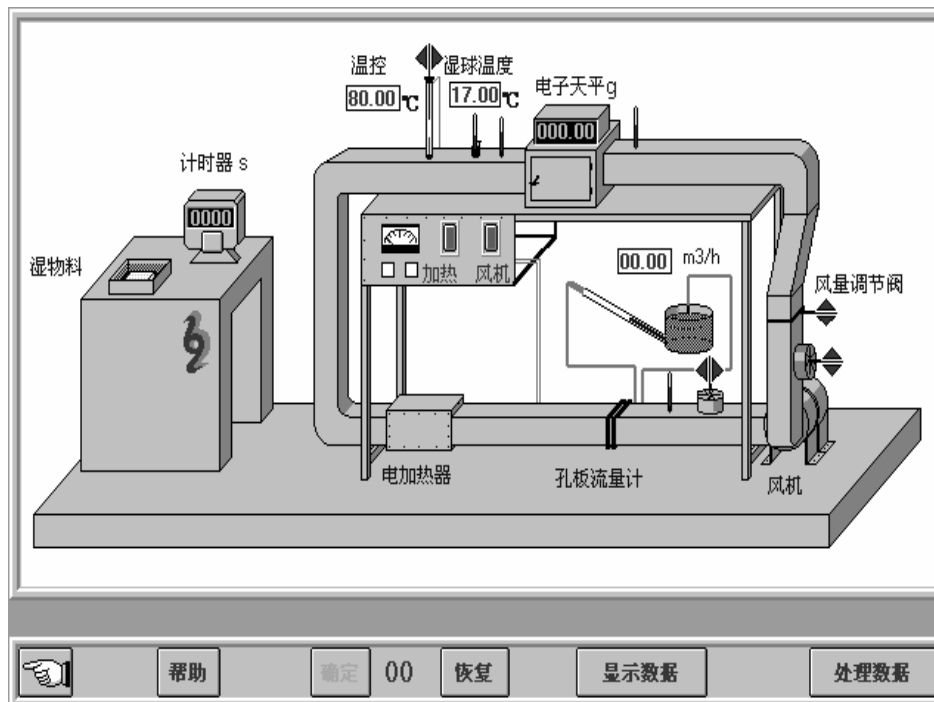
一、实验目的

1. 测定在恒定干燥条件下，物料的干燥曲线和干燥速率曲线；
2. 测定恒速干燥阶段的传质系数和传热系数；
3. 了解影响干燥速率曲线的主要影响因素。

二、实验内容

测定在恒定干燥条件下，物料的干燥曲线和干燥速率曲线

三、实验装置



已知，用于干燥的砖片 $G_c=100\text{g}$ ，体积= $100\text{mm}\times 40\text{mm}\times 8\text{mm}$ 。

四、实验原理

当湿物料与干燥介质相接触时，物料表面的水分开始气化，并向周围介质传递。根据干燥过程中不同期间的特点，干燥过程分为两个阶段。

第一阶段为恒速干燥阶段。在过程开始时，由于整个物料的湿含量较大，其内部的水分能迅速地达到物料表面。因此，干燥速率为物料表面上水分的气化速率所控制，故此阶段也称为表面气化控制阶段。在此阶段，干燥介质传给物料的热量全部用于水分的气化，物料表面的温度维持恒定（等于热空气湿球温度），物料表面处的水蒸气分压也维持恒定，故干燥速率恒定不变。

第二阶段为降速干燥阶段，当物料被干燥达到临界湿含量后，便进入降速阶段。此时，

物料中所含水分较少，水分自物料内部向表面传递的速率低于物料表面水分的气化速率，干燥速率为水分在物料内部的传递速率所控制，故此阶段亦称为内部迁移控制阶段。随着湿含量的逐渐减少，物料内部水分的迁移速率也逐渐减小，故干燥速率不断下降。

恒速阶段的干燥速率和临界含水量是干燥过程研究和干燥器设计的重要数据，本实验在恒定干燥条件下对物料进行干燥，测定干燥曲线和干燥速率曲线，目的是掌握恒速段干燥速率和临界含水量的测定方法及其影响因素。

1. 干燥速率的测定

$$U = -\frac{G_c}{S} \frac{dX}{d\tau} = -\frac{G_c}{S} \frac{\Delta X}{\Delta \tau}$$

式中：U — 干燥速率，kg/m².s

S — 干燥面积，m²

Δ τ — 时间间隔，s

G_c — 绝干物料量，kg

Δ X — 时间间隔内干燥气化的干基含水量

2. 恒速阶段的对流传热系数 α 的确定

$$\alpha = \frac{Q}{S\Delta t} = \frac{U \cdot r_{tw}}{t - t_w}$$

式中：t — 试样放置处的干球温度，℃

t_w — 试样放置处的湿球温度，℃

U — 临界干燥速率，kg/m².s

r_{tw} — 湿球温度下水的汽化潜热，J/kg.

3. 传质系数的确定

$$k_H = \frac{U}{H_{s, tw} - H}$$

式中：H_{s, tw} — 物料表面的饱和湿度

H — 空气的湿度

五、实验操作

详见 CAI 实验系统帮助。

六、实验结果

1. 计算出物料各时间的干基含水量 X，干燥速率 U。
2. 在普通直角坐标纸上标绘出干燥曲线，干燥速率曲线。

3. 计算恒速阶段的对流传热系数 α 和传质系数 k_H 。

七、思考题

1. 提高空气温度和风速对恒速干燥速率的影响如何？试解释原因。
2. 提高空气温度和风速对临界含水量的影响如何？试解释原因。
3. 改变空气的操作条件，对降速干燥阶段有何影响？

实验七 精馏操作实验

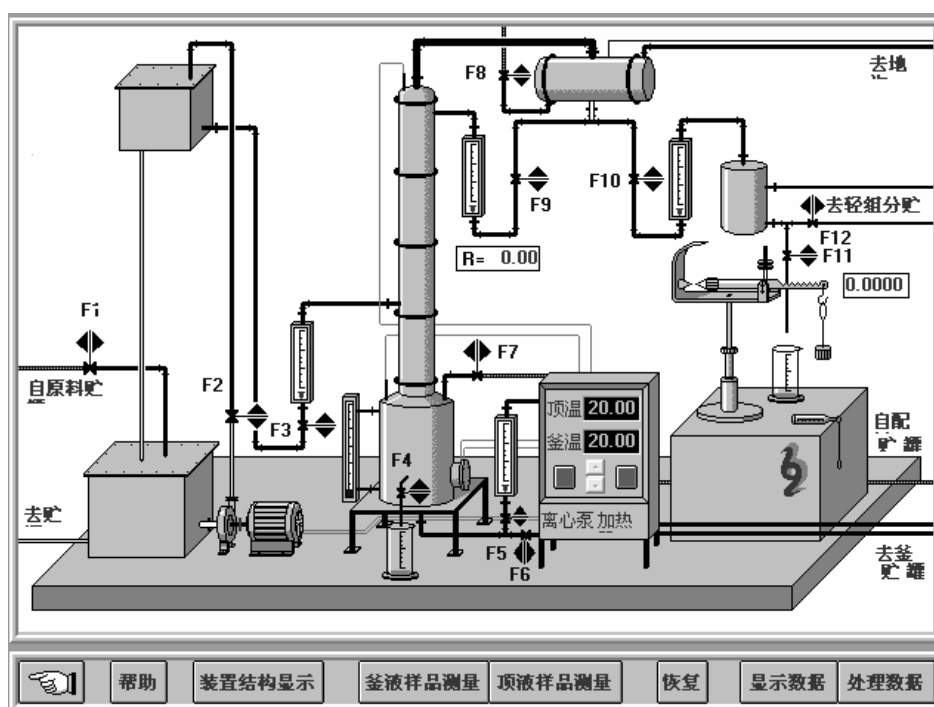
一、实验目的

1. 熟悉连续精馏装置的内部结构及工艺流程；
2. 了解连续精馏装置的开车和停车操作程序及其调节；
3. 掌握回流比对精馏结果的影响。

二、实验内容

回流比对精馏结果的影响。

三、实验装置



四、实验原理

从精馏塔过程操作计算原理知道，回流比是精馏塔操作的重要调节参数，在一定塔板数下，要维持塔的正常操作，保证馏出液质量，在操作的过程中必须提供足够的回流量（RD）。如因分离能力不足而引起馏出液质量下降，在保持产品量 D 不变的情况下，可以适当加大回流比，以保持和改善馏出液质量。但这须加大塔釜加热量及塔顶冷凝量，即以经济作为代价。

1. 全回流

若塔顶上升蒸汽经冷凝后，全部回流至塔内，没有进料和产品采出，这种方式称为全回流。全回流，回流比为无穷大，是回流比的上限。由于这种操作情况下得不到精馏产品，生产能力为零，对正常生产无实际意义，但在精馏的开工阶段，多采用全回流操作，以便过程

的稳定和控制。

2. 精馏塔总板效率

$$\eta = \frac{N_T}{N_F} \times 100\%$$

其中： N_T — 理论塔板数

N_F — 实际塔板数

五、实验操作

详见 CAI 实验系统帮助。

六、实验结果

比较不同回流比（ R ）下，馏出液组成和釜残液组成，以及总板效率，分析回流比对精馏塔分离效果的影响。

七、思考题

1. 根据回流比对精馏塔分离效果的影响，试分析应如何选择适宜的回流比？
2. 用图解法求理论板层数时，为什么一个梯级代表一层理论板？