



普通高等教育食品科学与工程类“十二五”规划实验教材

THE COMPREHENSIVE EXPERIMENTS
OF FOOD ENGINEERING



食品工程综合实验

于殿宇◎主编

中国林业出版社

普通高等教育食品科学与工程类“十二五”规划实验教材

食品工程综合实验

于殿宇 主编

第2版 (912) 中国林业出版社

中国林业出版社

内容简介

本书主要讲解了食品工程相关实验的基本知识以及多个基本单元操作,几乎涵盖食品工程领域所涉及的主要单元操作内容,并且多个实验项目涉及自动化控制和计算机数据采集领域。本书集中了多种当前较为前沿的食品工程实验操作内容,超临界流体萃取技术、挤压膨化技术、超微粉碎等,编入了计算机处理实验数据的相关内容,可以使学生掌握多种食品工程领域的计算机控制。

本书是实践性与工程性很强的教学指导书,既适用于食品科学与工程及相关专业高年级本科生的学习,也可作为相关学科工程技术人员及工程硕士研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

食品工程综合实验/于殿宇主编. —北京:中国林业出版社,2014.11

普通高等教育食品科学与工程类“十二五”规划实验教材

ISBN 978-7-5038-7574-8

I. ①食… II. ①于… III. ①食品工程学—实验—高等学校—教材 IV. ①TS201.1-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第257067号

中国林业出版社·教育出版分社

策划、责任编辑:高红岩

电话:83221489 83220109

传真:83220109

出版发行 中国林业出版社(100009 北京市西城区德内大街刘海胡同7号)

E-mail:jiaocaipublic@163.com 电话:(010)83224477

http://lycb.forestry.gov.cn

经 销 新华书店

印 刷 中国农业出版社印刷厂

版 次 2014年11月第1版

印 次 2014年11月第1次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 10.25

字 数 230千字

定 价 20.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

普通高等教育食品科学与工程类“十二五”规划实验教材

编写指导委员会

主任 罗云波（中国农业大学食品科学与营养工程学院，教授）

委员（按拼音排序）

陈宗道（西南大学食品科学学院，教授）

程建军（东北农业大学食品学院，教授）

迟玉杰（东北农业大学食品学院，教授）

江连洲（东北农业大学食品学院，教授）

李洪军（西南大学食品科学学院，教授）

李里特（中国农业大学食品科学与营养工程学院，教授）

廖小军（中国农业大学食品科学与营养工程学院，教授）

任发政（中国农业大学食品科学与营养工程学院，教授）

赵国华（西南大学食品科学学院，教授）

赵新准（东北农业大学食品学院，教授）

《食品工程综合实验》编写人员

主 编 于殿宇 (东北农业大学)

副主编 汪立君 (中国农业大学)

屈岩峰 (黑龙江东方学院)

编 者 (按拼音排序)

李 杨 (东北农业大学)

刘滨城 (东北农业大学)

刘天一 (东北农业大学)

潘明喆 (东北农业大学)

任运宏 (东北农业大学)

王铭义 (牡丹江医学院)

前 言

食品工程综合实验是高等院校食品科学与工程类专业课程的综合实验。本书旨在帮助学生掌握“食品工程综合实验”的基本方法,加深对食品工程原理等专业基础课及食品保藏学、食品工艺学等专业课程的基本概念、基本理论的理解,提高设计工程技能的实际能力。本书主要讲解了食品工程相关实验的基本知识以及多个基本单元操作,几乎涵盖了食品工程领域所涉及的主要单元操作内容,并且多个实验项目涉及自动化控制和计算机数据采集领域,适应学生对于交叉学科学习的需要,内容精练、重点突出,着重工程能力的培养。编者结合多年来教学和工作实践的经验编写了《食品工程综合实验》一书,使学生在食品工程相关课程的学习过程中加深对基本教学内容的理解,使实验过程成为学生在校学习期间理论联系实际的一个重要途径。本书可作为高等院校食品科学与工程类相关专业的实验教材。对于从事食品生产、设计和科研的人员,本书具有一定的参考价值。

本书共分5章,第一章第一至七节由于殿宇编写,第一章第八、九节由刘滨城编写;第二章第一至四节由屈岩峰编写,第二章第五节由任运宏编写,第二章第六节由王铭义编写;第三章由汪立君编写;第四章第一节由潘明喆编写,第四章第二节由屈岩峰编写,第四章第三节由李杨编写;第五章由刘天一编写。本书在编写过程中承蒙杨同舟教授的具体指导,并得到各相关食品院校食品工程原理教研组及广大教师的支持和帮助,同时杜华楠、许多现、赵丹丹、赵青霞、李俊、梁宝生、孙丽雪、李相昕、周爽、葛洪如等人参与了工艺制图及校稿工作,在此一并表示感谢。

本书引用了国内外专家学者的相关资料,在此一并表示感谢。在书的编写过程中,由于时间紧迫,加之作者的水平、条件有限,书中不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者
2014年10月

目 录

前 言

第一章 食品工程原理实验	1
第一节 雷诺实验	1
第二节 伯努利方程验证实验	4
第三节 管路流体阻力的测定	8
第四节 离心泵特性曲线的测定	12
第五节 流体黏度的测定实验	17
第六节 套管换热器液—液热交换实验	19
第七节 流化床干燥器的操作及其干燥速率曲线的测定	25
第八节 填料塔吸收传质系数的测定	28
第九节 筛板塔精馏效率测定实验	32
第二章 食品工程技术实验	41
第一节 食品冷冻干燥实验	41
第二节 超临界流体萃取实验	62
第三节 流体过滤实验	69
第四节 挤压膨化实验	76
第五节 超微粉碎实验	82
第六节 旋风分离器演示实验	88
第三章 食品工程实验实例	91
第一节 冷冻干燥实验实例	91
第二节 超临界流体萃取实验	95

第四章 数据处理在食品工程中的应用	97
第一节 用 Excel 处理食品工程实验数据	97
第二节 实验误差及数据处理	106
第三节 Origin 软件作图及数据处理	129
第五章 相关测量仪器仪表	136
第一节 压力测量及变送	136
第二节 流量测量仪表	139
第三节 测温仪器仪表	143
第四节 数字式显示仪表	145
第五节 其他仪表	147
参考文献	154

第一章 食品工程原理实验

第一节 雷诺实验

一、实验目的

研究流体流动的形态，对于化学和食品科学的理论和工程实践都具有重要的意义。本实验的目的，是通过雷诺实验装置，观察流体流动过程的不同流型及其转变过程，测定流型转变时的临界雷诺数。

二、实验原理

1883 年，雷诺(Reynolds)首先在实验装置中观察到实际流体的流动存在两种不同形态——层流和湍流，以及两种不同形态的转变过程。

经许多研究者实验证明：流体流动存在两种截然不同的形态，主要决定因素为流体的密度、黏度、流动的速度以及设备的几何尺寸。

将这些因素整理归纳为一个量纲一的特征数，称该特征数为雷诺数，即

$$Re = \frac{d\rho u}{\mu} \quad (1-1)$$

式中 d ——导管直径(m)；

ρ ——流体密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)；

μ ——流体黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$)；

u ——流体速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。

大量实验测得：当雷诺数小于某一下临界值时，流体流动形态恒为层流；当雷诺数大于某一上临界值时流体流动形态恒为湍流。在上临界值与下临界值之间，则为不稳定的过渡区域。一般情况下，下临界雷诺数为 2 000 时为层流，上临界雷诺数为 4 000 时，即可形成湍流。

应当指出，层流与湍流之间并非是突然的转变，而是两者之间相隔一个不稳定过渡区域，因此，临界雷诺数测定值和流型的转变在一定程度上受一些不确定的其他因素的影响。

三、实验装置

雷诺实验装置主要由稳压溢流水槽、实验导管和转子流量计等部分组成，如图 1-1

所示。自来水不断注入并充满稳压溢流水槽。稳压溢流水槽内的水流经实验导管和流量计,最后排入下水道。稳压溢流水槽的溢流水,也直接排入下水道。

水流量由调节阀调节。

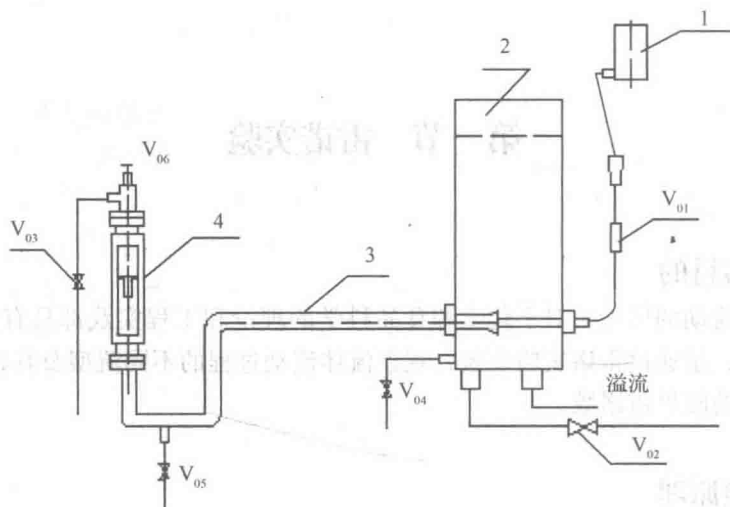


图 1-1 雷诺实验装置及流程

1. 红墨水贮瓶; 2. 稳压溢流水槽; 3. 试验导管; 4. 转子流量计

V_{01} 示踪剂调节阀; V_{02} 上水调节阀; V_{03} 水流量调节阀; V_{04} 、 V_{05} 泄水阀; V_{06} 排空阀

四、实验方法

1. 实验前准备工作

①实验前,先用自来水充满稳压溢流水槽。将适量红墨水加入红墨水贮瓶(示踪瓶)内备用,并排尽示踪瓶与针头之间管路内的空气。

②实验前,先对转子流量计进行标定,作好流量标定曲线。

③用温度计测定水温。

2. 实验操作步骤

①开启自来水阀门,保持稳压溢流水槽有一定的溢流量,以保证实验时具有稳定的压头。

②用放风阀放去流量计内的空气,再缓慢开启转子流量计的调节阀,将流量调至最小值,以便观察稳定的层流流型,再精细地调节示踪剂管路阀,使红墨水的注水速度与试验导管内主体流体的流速相近,一般略低于主体流体的流速为宜。精心调节至能观察到一条平直红色细流为止。

③缓慢地逐渐增大调节阀的开度,使水通过试验导管的流速平稳地增大。直至试验导管内直线流动的红色细流开始发生波动时,记下水的流量和温度,以供计算临界雷诺数据。

④继续缓慢地增加调节阀开度,使水流量平稳地增加。这时,导管内的流体的流型

逐步由层流向湍流过渡。当流量增大到某一数据值后，红墨水一进入试验导管，立即被分散呈烟雾状，这时表明流体的流型已进入湍流区域。记下水的流量和温度数据，以供计算临界雷诺数。

这样实验操作需反复进行至少 5~6 次，以便取得较为准确的实验数据。

3. 实验操作注意事项

①本实验示踪剂采用红墨水，它由红墨水贮瓶，经连接软管和注射针头，注入试验导管。应注意适当调节注射针头的位置，使针头位于管轴线上为佳。红墨水的注射速度应与主体流体流速相近（一般调整红墨水的流速低于主流体流速），因此，随着水流速的增大，需相应地细心调节红墨水注射流量，才能得到较好的实验效果。

②在实验过程中，应随时注意稳压水槽的溢流量，随着操作流量的变化，相应调节自来水给水量，防止稳压槽内液面下降或液泛事故的发生。

③在整个实验过程中，切勿碰撞设备，操作时也要轻巧缓慢，以免干扰流体流动过程的稳定性。实验过程会有一定滞后现象，因此，调节流量过程切勿操之过急，稳定一段时间之后，状态确实稳定之后，再继续调整，记录数据。

五、实验结果

1. 实验设备基本参数

试验导管内径 d _____ mm。

2. 实验数据记录及整理

实验 序号	流量 q_v $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	温度 T $^{\circ}\text{C}$	黏度 μ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	密度 ρ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	流速 u $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	临界雷诺数 Re	实验现象 及流型

列出上表中各项计算公式。

【思考题】

1. 流体流动形态的影响因素有哪些？
2. 在食品生产中，由于不能采用直接观察法来判断管中流体的流动形态，可用什么方法来判断流体的流动形态？

3. 有人认为流体的流动形态只用流速一个指标就能判断, 你认为这种观点正确吗? 在什么条件下可以只用流速这个指标来判断?

第二节 伯努利方程验证实验

一、实验目的

流动流体所具有的总能量是由各种形式的能量所组成, 并且各种形式的能量之间又可相互转换。当流体在导管内做稳态流动时, 在导管的各截面之间的各种形式机械能的变化规律, 可由机械能衡算基本方程来表达。这些规律对于解决流体流动过程的管路计算、流体压力、流速与流量的测量, 以及流体输送等问题, 都有着十分重要的作用。

本实验采用伯努利实验仪, 观察不可压缩流体在导管内流动时的各种形式机械能的相互转化现象, 并验证伯努利方程。通过实验, 加深对流体流动过程基本原理的理解。

二、实验原理

对于不可压缩流体, 在导管内做稳态流动, 系统与环境又无能量的交换时, 若以单位质量流体为衡算基准, 则对确定的系统即可列出机械能衡算方程:

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum h_f \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-2)$$

将式(1-2)两端除以 g , 则又可表达为

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum H_f \quad (\text{m}) \quad (1-3)$$

式中 z ——流体的位压头(m);

p ——流体的压力(Pa);

u ——流体的平均流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

ρ ——流体的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

g ——重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

$\sum h_f$ ——流动系数内因阻力造成的能量损失($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$);

$\sum H_f$ ——流动系数内因阻力造成的压头损失(m)。

式中符号下标 1 和 2 分别为系统的进口和出口两个截面。

不可压缩流体的机械能衡算方程, 应用于各种具体情况下可作适当简化, 例如:

(1) 当流体为理想液体时, 式(1-2)和式(1-3)可简化为

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-4)$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (1-5)$$

(2) 当流体流经的系统为一水平装置的管道时, 则式(1-2)和式(1-3)又可简化为

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}u_1^2 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}u_2^2 + \sum h_f \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-6)$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum H_f \quad (\text{m}) \quad (1-7)$$

(3) 当流体处于静止状态时, 则式(1-2)和式(1-3)又可简化为

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-8)$$

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 \quad (\text{m}) \quad (1-9)$$

或者将上式改写为

$$p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2 \quad (\text{Pa}) \quad (1-10)$$

式(1-8)~式(1-10)为伯努利方程的特殊形式, 即流体静力学基本方程。

三、实验装置

本实验装置主要由试验导管、稳压溢流水槽和三对测压管所组成。

试验导管为一水平装置的变径圆管, 沿程分3处设置测压管。每处测压管由一对并列的测压管组成, 分别测量该截面处的静压头和冲压头。

实验装置的流程如图1-2所示。液体由稳压水槽流入试验导管, 途经直径分别为20cm、30cm和20mm的管子, 最后排出设备。流体流量由出口调节阀调节, 流量需要直接计时测量体积进行计算。

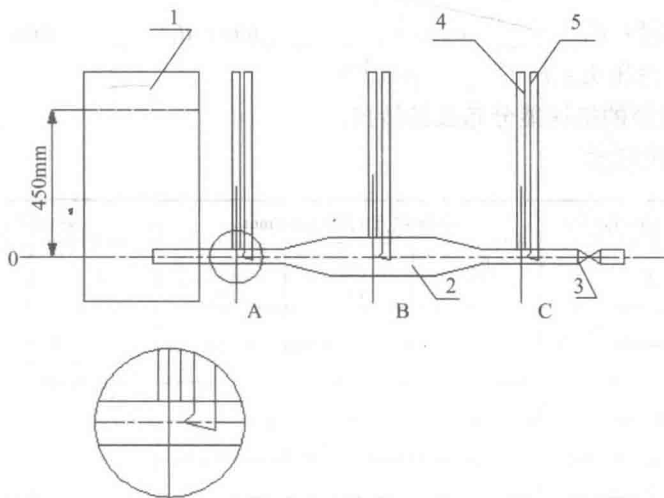


图 1-2 伯努利实验装置流程

1. 稳压水槽; 2. 试验导管; 3. 出口调节阀; 4. 静压测量管; 5. 冲压测量管

四、实验方法

实验前,先缓慢开启进水阀,将水充满稳压溢流水槽,并保持有适量溢流水流出,使槽内液面平稳不变。同时,排尽管道内的气泡。

实验可按如下步骤进行:

①关闭试验导管出口调节阀,观察和测量液体处于静止状态下各测试点(A、B和C3点)的压头。

②开启试验导管出口调节阀,观察比较液体在流动情况下的各测试点的压头变化。

③缓慢调节试验导管的出口阀,测量流体在不同流量下的各测试点的静压头、动压头和压头损失。

实验过程中必须注意以下几点:

①实验前一定要将试验导管和测压管中的空气泡排除干净,否则会干扰实验现象和测量的准确性。

②开启调节阀时一定要缓慢地调节开启程度,并随时注意设备内的变化。

③实验过程中需根据测压管量程范围,确定最小和最大流量。

④为了便于观察测压管的液柱高度,可在临实验测定前,向各测压管滴入几滴红墨水。

五、实验结果

1. 测量并记录实验基本参数

流体种类:

试验导管内径: d_A mm; d_B mm; d_C mm。

实验系统的总压头: H mm。

2. 非流动系统的机械能分布及其转换

(1) 实验数据记录

[illegible]

(2) 验证流体静力学基本方程

3. 流动体系的机械能分布及其转换

(1) 实验数据记录

实验序号		1	2	3	4	5
温度/℃						
密度/(kg·m ⁻³)						
静压头/mm	$\frac{p_A}{\rho g}$					
	$\frac{p_B}{\rho g}$					
	$\frac{p_C}{\rho g}$					
压强/Pa	p_A					
	p_B					
	p_C					
动压头/mm	$\frac{u_A^2}{2g}$					
	$\frac{u_B^2}{2g}$					
	$\frac{u_C^2}{2g}$					
流速/(m·s ⁻¹)	u_A					
	u_B					
	u_C					
损失压头/mm	$H_{f(1-A)}$					
	$H_{f(1-B)}$					
	$H_{f(1-C)}$					

(2) 验证流动流体的机械能衡算方程

【思考题】

1. 为什么实验要保持在恒水位条件下进行？
2. 用实验中观察到的现象解释流体在直管内流动的速度与阻力损失的关系。

第三节 管路流体阻力的测定

一、实验目的

研究管路系统中的流体流动和输送过程中重要的问题, 确定流体在流动过程中的机械能损耗。

流体流动时的机械能损耗(压头损失), 主要由于管路系统中存在着各种阻力。管路中的各种阻力可分为沿程直管阻力和局部阻力两大类。

本实验的目的, 是以实验方法直接测定摩擦因数 λ 和局部阻力因数 ζ 。

二、实验原理

当不可压缩流体在圆形导管中流动时, 在管路系统内任意两个截面之间列出机械能衡算方程为

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum h_f \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-11)$$

或

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum H_f \quad (\text{m}) \quad (1-12)$$

式中 z ——流体的位压头(m 液柱);

p ——流体的压强(Pa);

u ——流体的平均流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

ρ ——流体的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

g ——重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$);

$\sum h_f$ ——单位质量流体因流体阻力所造成的能量损失($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$);

$\sum H_f$ ——单位重量流体因流体阻力所造成的能量损失(m)。

符号下标 1 和 2 分别表示上游和下游截面上的数值。

假若: ①水作为试验物系, 则水可视为不可压缩流体; ②试验导管是按水平装置
的, 则 $z_1 = z_2$; ③试验导管的上下游截面上的横截面积相同, 则 $u_1 = u_2$ 。

因此式(1-11)和式(1-12)两式分别可简化为

$$\sum h_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-13)$$

或

$$\sum H_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} \quad (\text{m}) \quad (1-14)$$

由此可见, 因阻力造成的能量损失, 可由管路系统的两截面之间的压力差来测定。

当流体在圆形直管内流动时, 流体因摩擦阻力所造成的能量损失, 有如下一般关系式:

$$\sum h_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-15)$$

或

$$\sum H_f = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (1-16)$$

式中 d ——圆形直管的管径(m);

l ——圆形直管的长度(m);

λ ——摩擦因数, 量纲为1。

实验研究表明: 摩擦系数 λ 与流体的密度 ρ 、黏度 μ 、管径 d 、平均流速 u 和管壁粗糙度 ε 有关。应用量纲分析法, 可以得出摩擦因数与雷诺数和管壁相对粗糙度 ε/d 存在函数关系, 即

$$\lambda = f(Re, \varepsilon/d) \quad (1-17)$$

通过实验测得 λ 和 Re 数据, 可以在双对数坐标上标绘出实验曲线。当 $Re < 2000$ 时, 摩擦因数 λ 与管壁粗糙度 ε 无关。当流体在直管中呈湍流时, λ 不仅与雷诺数有关, 而且与管壁相对粗糙度有关。

当流体流过管路系统时, 因遇各种管件、阀门和测量仪表等而产生局部阻力, 所造成的能量损失, 有如下一般关系式:

$$\sum h_f' = \zeta \frac{u^2}{2} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-18)$$

或

$$\sum H_f' = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (1-19)$$

式中 u ——管件中流体的平均流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

ζ ——局部阻力因数, 量纲为1。

由于造成局部阻力的原因和条件极为复杂, 各种局部阻力因数的具体数值, 需要通过实验直接测定。

三、实验装置

本实验装置主要是由循环水系统、试验管路系统和高位排气水槽串联组合而成, 每条测试管的测压口通过转换阀组与压差计连通。

压差由一倒置 U 形水柱压差计显示。孔板流量计的读数由另一倒置 U 形水柱压差计显示。该装置的流程如图 1-3 所示。

试验管路系统是由 5 条玻璃直管平行排列, 经 U 形弯管串联连接而成。分别配置光滑管、粗糙管、突扩与突缩管、阀门和孔板流量计。每根试验管测试段长度, 即两测压口距离均为 0.6m。图 1-3 流程图中标出符号 G 和 D 分别表示上游测压口和下游测压