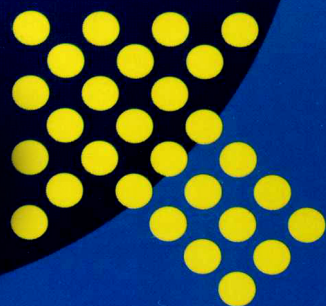


21世纪高等学校规划教材



建筑热能工程 实验及测试技术

刘学亭 张从菊 编著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

21世纪高等学校规划教材



建筑热能工程 实验及测试技术



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书着重阐述了建筑环境与设备工程专业和热能动力工程专业中的流体力学、传热学、供热工程、空气调节、制冷技术等课程中各项实验及测试技术方面的知识；主要内容包括在建筑热能工程实验及测试技术中常用的各种热工测量仪表的测量参数、结构与原理；测量误差的分析与实验数据的处理；各实验装置系统图以及实验目的、原理，实验步骤、方法等。

本书可作为高等院校建筑环境与设备工程专业和热能动力工程专业实验教学用书，也可供建筑热能工程技术人员工作时参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑热能工程实验及测试技术/刘学亭, 张从菊编著. —北京: 中国电力出版社, 2010. 8

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5123-0768-1

I. ①建… II. ①刘…②张… III. ①建筑热工-热工试验-高等学校-教材②建筑热工-热工测量-高等学校-教材
IV. ①TU111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 160819 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 252 千字

定价 18.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

15

—

本书内容是编者多年来实验教学经验的总结。建筑环境与设备工程专业和热能与动力工程专业中的流体力学、传热学、供热工程、空气调节、制冷技术等课程中各项实验及测试技术是教学环节中的重要组成部分,为使实验教学规范化、系统化,同时符合教育部本科教学水平评估的要求,特编写了本书,以指导和帮助学生顺利完成专业实验教学任务。

建筑热能工程实验及测试技术是建筑类院校制冷空调领域的实用技术,它广泛应用于制冷、热电、通风空调等工程领域。建筑工程的竣工验收可通过实验测试加以量化评定,对于实际工程中出现的故障也可以通过实验测试查找和改进。同时,书中对建筑热工等常用检测仪表进行了详细介绍。本书内容全面、简明、实用,可作为高等院校建筑环境与设备工程专业和热能与动力工程专业实验教学用书,也可供建筑热能工程技术人员工作时参考。

本书内容涵盖了建筑环境与设备工程专业和热能与动力工程专业全部课程的教学实验,同时增加了部分设计型实验。本书编写分工如下:山东建筑大学刘学亭编写通风空调部分,张从菊编写流体输配管网和供热工程部分,于国丽编写制冷和食品冷藏部分,李慧、魏建平编写热工测试技术部分,张春阳编写流体力学部分,刘杰编写燃气热工部分;山东建筑大学李爱景、李明钧、李铁、陈明九、孙霞、罗佳君等也参加了本书部分章节的撰写、校核和修改工作。刘学亭和张从菊负责全书统稿,全书由李明弟和张林华主审。本书在编写过程中得到了山东建筑大学热能学院相关教研室教师的大力协助,在此谨致谢意。

限于编者水平,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2010年7月

目 录

前言

单元一 流体力学	1
实验一 动量方程实验	1
实验二 文丘里流量计实验	2
实验三 气体紊流射流实验	5
实验四 雷诺实验	7
实验五 管路沿程阻力实验	9
实验六 管路局部阻力实验	11
实验七 孔口、管嘴实验	13
实验八 阀门不同开启度时的阻力系数测定实验	15
单元二 工程热力学	17
实验一 CO_2 的临界状态观测及 $p-v-t$ 关系实验	17
实验二 气体比定压热容测定实验	22
单元三 传热学	26
实验一 材料热导率和热扩散率测定实验	26
实验二 空气自由流动换热系数的测定实验	37
单元四 建筑环境测试技术	41
实验一 风管内风量测定实验	41
实验二 热电偶校验实验	48
实验三 热工仪表操作实验	50
实验四 压力计校正实验	52
单元五 流体输配管网	54
实验 供热管网调节实验	54
单元六 热质交换原理与设备	57
实验 喷淋室性能实验	57
单元七 自动控制原理	59
实验一 不同对象的阶跃响应分析实验	59
实验二 PID 控制器分析实验	61
单元八 供热管网及换热站	67
实验 换热器性能测定实验	67
单元九 锅炉与锅炉房设备	71
实验一 煤的发热量测定实验	71
实验二 煤的挥发分测定实验	78

实验三	煤的烟气分析实验	80
单元十	燃气输配	85
实验一	土壤腐蚀性测定实验	85
实验二	湿式气体流量计校正实验	86
单元十一	通风工程	88
实验一	旋风除尘器性能实验	88
实验二	工作区空气含尘浓度的测定实验	89
单元十二	供热工程	92
实验一	热水供暖系统模拟实验	92
实验二	散热器热工性能实验	93
单元十三	制冷技术	96
实验一	制冷压缩机性能实验	96
实验二	制冷制热系统运行实验	98
单元十四	空气调节	100
实验一	风机盘管空调器制冷量的测定实验	100
实验二	风机盘管空调器水侧阻力的测定实验	102
实验三	空调工程实验与测定实验	104
单元十五	燃气燃烧与应用	106
实验	燃气灶具热工性能测定实验	106
单元十六	制冷与低温原理	109
实验一	一机两库测试实验	109
实验二	制冷热泵循环演示实验	111
单元十七	电机学	113
实验一	单相变压器实验	113
实验二	三相笼型异步电动机的工作特性实验	115
实验三	直流电动机认知实验	121
单元十八	制冷压缩机	123
实验	活塞式制冷压缩机整机拆卸与装配实验	123
单元十九	食品冷藏工艺学	127
实验一	食品冻结温度曲线的测定实验	127
实验二	食品解冻温度曲线的测定实验	128
实验三	食品解冻技术实验	129
单元二十	换热器设计	131
实验	横流板式间接蒸发换热器阻力特性实验	131
单元二十一	汽轮机	133
实验一	125MW 凝汽式汽轮机结构实验	133
实验二	汽轮机冲动级的工作原理实验	134
单元二十二	常用热工测试仪表	136

仪表一	温度测量仪表.....	136
仪表二	相对湿度测量仪表.....	139
仪表三	流速测量仪表.....	143
仪表四	压力测量仪表.....	147
仪表五	流量测量仪表.....	153
参考文献		161

(7) 实验结束，关闭水泵，拔下电源开关。

五、注意事项

- (1) 实验测量工作必须在水流稳定后进行。
- (2) 数显表零点飘移较大，需经常校正，在不受力的情况下，读数为零。

六、实验数据处理

实验所测数据记录在表 1-1 中。

表 1-1 动量方程实验测定数据记录表

序号	∇ (m ³)	t (s)	Q (m ³ /s)	v (m/s)	计算值 $R'_x = \rho Q v$ (N)	实测值 R_x (N)	误差 (%)
1							
2							
3							
4							
5							
6							

七、实验分析

试分析用动量定律求得的力和实测力之间产生误差的原因。

实验二 文丘里流量计实验

一、实验目的

- (1) 了解文丘里流量计的构造和适用条件，测定流量系数，学习应用文丘里流量计测量管道流量的原理和技巧。
- (2) 验证能量方程的正确性。

二、实验装置

实验所用装置为多功能水力学实验台，如图 1-2 所示，其中 1~12 为管道上的测点。

三、实验原理

在文丘里流量计入口处取 I-I 断面，在喉部收缩段处取 II-II 断面，由于流量计系水平放置，可列出上述两断面的能量方程为（不计水头损失）

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$$

(1-2)

根据连续性方程，得

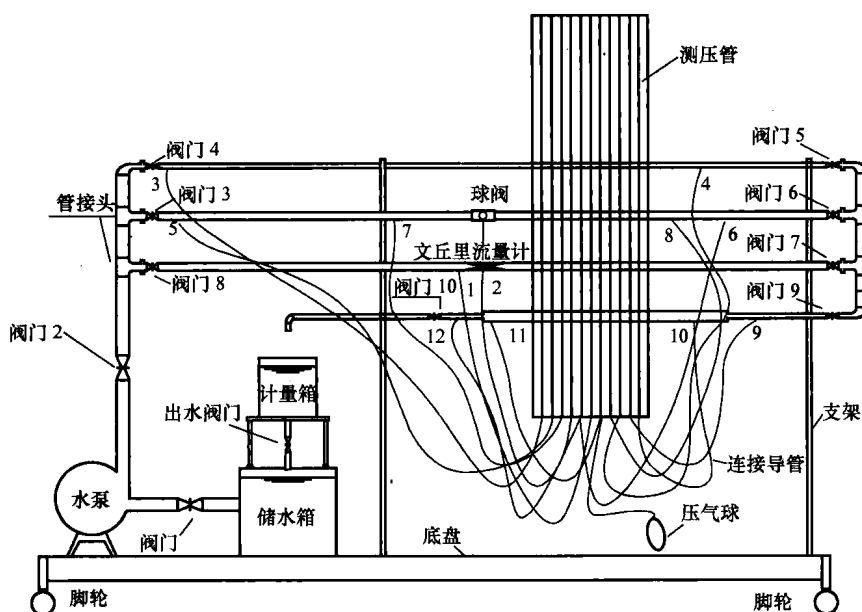


图 1-2 多功能水力学实验台

$$\frac{\pi}{4} d_1^2 v_1 = \frac{\pi}{4} d_2^2 v_2$$

令 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ ，可得计算流量的公式为

$$Q = \frac{\frac{\pi}{4} d_2^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{\gamma}} \quad (1-3)$$

式中 $\frac{p_1 - p_2}{\gamma}$ ——两断面测压管水头差，也即测压计内的液面高差 Δh 。

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

式 (1-3) 可写成

$$Q = k \sqrt{\Delta h} \quad (1-4)$$

因此，测出测压计内的液面高差 Δh 后，即可求出计算流量。

由于实际上所取的两个断面之间存在着水头损失，所以实际流量 Q_0 一般要略小于计算流量 Q ，如令

$$\mu = \frac{Q_0}{Q}$$

则 μ 是一小于 1 的数，称为流量系数。

该实验的目的就是用实验的方法确定流量系数 μ 的具体数值。实际流量 Q_0 用体积法测定，即

$$Q_0 = \frac{\nabla}{\Delta t} \quad (1-5)$$

式中 ∇ —— Δt 时间内由管道流入计量箱内的水的体积。

四、实验步骤

1. 准备工作

- (1) 记录仪器常数 d_1 、 d_2 ，并计算流量计系数 k 值。
- (2) 检查测压计液面是否水平（此时 $Q=0$ ，如果不在同一水平面上，则必须将橡胶管内的空气排尽，使两个测压管液面处于水平状态方能进行实验）。
- (3) 关闭测点 3~10 的小阀门。
- (4) 打开阀门 7~10，关闭阀门 3~6。
- (5) 阀门 2 为实验阀门，可先调至较小开度。
- (6) 文丘里流量计收缩断面（测点 2）经常处于负压状态，实验前应将连接橡胶管灌满水，以防进气。

2. 进行实验

- (1) 开启泵，此时 1、2 号测压管中应出现较小的高度差。
- (2) 缓慢开启阀门 2，使压差调到最大（如 2 号测压管中液位降得太低可关小阀门 10，使液位抬高；如测压计中液位太高，可用压气球加压，压低液位）。

五、注意事项

- (1) 实验测量工作必须在水流稳定后进行，每次应缓慢调节出水阀门，并同时注意控制测压管中液面的高度差。
- (2) 读压差、控制阀门、测量流量需同步进行。
- (3) 如出现测压管冒水现象，可把阀门 10 全开，或停泵重做实验。

六、实验数据处理

实验所测数据记录在表 1-2 中。

表 1-2 文丘里流量计的测定数据记录表

序号	h_1 (cm)	h_2 (cm)	Δh (cm)	∇ (cm ³)	Δt (s)	Q (cm ³ /s)	Q_0 (cm ³ /s)	流量系数 μ	平均流量系数 μ_{pj}
1									
2									
3									
4									
5									

七、思考题

实验时，若将文丘里流量计倾斜放置，各测压管内液面高度差是否会发生变化？

实验三 气体紊流射流实验

一、实验目的

- (1) 观测气体紊流射流结构。
- (2) 通过测定气体紊流射流断面流速分布, 了解气体紊流射流的运动规律。

二、实验装置

实验所用装置为空气动力学多功能实验台。采用圆柱形喷嘴, 喷嘴半径 $r_0 = 15\text{mm}$ 。

三、实验原理

射流是指孔口或喷嘴向外喷出, 进入另一流体领域的一股流体。射流的运动形态分为层流和紊流。

紊流射流自喷嘴出口以均匀的流速射入静止的环境中, 由于紊流的脉动、卷吸, 周围静止流体进入射流, 两者混掺向前运动, 从而增加了射流的流量, 也就增加了射流的宽度, 降低了射流的速度。越往下游, 射流的边界就越宽, 流量也越大, 而流速就越小。因此, 射流沿流向越来越粗, 流动越来越慢。此时保持出口流速的部分称为射流核心区, 其余小于出口流速的部分称为边界层。

射流分成两段: 起始段和主体段。射流以初始速度均匀从喷嘴喷出, 由于卷吸和混掺作用, 在离开喷嘴一定距离后, 保持初始速度的射流核心区就消失了。射流核心区完全消失的横断面称为转折断面。喷嘴与转折断面之间的流段称为起始段, 射流核心区就在起始段中。在转折断面之后的流段为主体段。

由于射流起始段的长度较短, 因此工程上主要研究和利用的是射流的主体段。

射流主体段各断面的横向速度分布具有相似性, 在射流主体段上, 随着射流距离的增加, 轴向流速逐渐减小, 断面上的流速分布曲线也趋于平坦。用无因次坐标来表示断面上的速度分布, 则所有横断面上的无因次流速分布是相等的, 这就是射流流速分布的相似性。用无量纲的半经验公式来表示, 即

$$\frac{v}{v_m} = \left[1 - \left(\frac{y}{R} \right)^{1.5} \right]^2 \quad (1-6)$$

式中 v ——测点射流速度;

v_m ——测量断面中心射流速度;

y ——测点距射流中心的距离;

R ——所测断面射流半宽度。

R 可按式(1-7)计算, 即

$$R = r_0 + 3.4as \quad (1-7)$$

速度 v 和 v_m 可以用式(1-8)计算, 即

$$v = \phi \sqrt{2g \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \Delta h \cos \alpha} \quad (1-8)$$

式中 v ——测点射流速度；
 ϕ ——毕托管的校正系数，取 1；
 g ——重力加速度；
 γ_1 ——压力计内液体的重力密度；
 γ_2 ——气体的重力密度；
 α ——测压管与垂直方向的夹角；
 Δh ——测得的压差。

四、实验步骤

- (1) 调平斜管压力计的水平泡，确定斜管的倾斜角度。将毕托管的全压管接到斜管压力计的“+”处，静压管接到斜管压力计的“-”处。
- (2) 去掉实验台上的活动盖板，接通风机电源，开机。
- (3) 打开风门，调好风量，将毕托管放在测量断面上进行测量。测定流体的出口速度、不同射程 s 与断面速度，以及轴心速度。
- (4) 测定大气压和气温。
- (5) 实验完毕停机，关闭电源，使设备恢复原状。

五、实验数据处理

- (1) 将实测数据填入表 1-3 中。

表 1-3 气体紊流射流实验的测定数据记录表

测量断面	测量项目	测点编号										
		5	4	3	2	1	轴心	1	2	3	4	5
1-1 ($s=$) ($R=$)	测点距射流中心的距离 y											
	压差 Δh											
	测点射流速度 v											
	v/v_m											
	y/R											
2-2 ($s=$) ($R=$)	测点距射流中心的距离 y											
	压差 Δh											
	测点射流速度 v											
	v/v_m											
	y/R											
3-3 ($s=$) ($R=$)	测点距射流中心的距离 y											
	压差 Δh											
	测点射流速度 v											
	v/v_m											
	y/R											

- (2) 绘出射流结构图。
- (3) 计算各测量断面上的测点流速，定出中心点最大流速，绘出速度分布图。

(4) 计算主体断面无因次速度 v/v_m 和无因次坐标 y/R , 绘出无因次速度分布图, 与式 (1-6) 相比较。

六、思考题

为什么用无量纲 (因次) 数分析射流的运动?

实验四 雷 诺 实 验

一、实验目的

- (1) 观察层流和紊流的流动特征及转变情况, 以加深对层流、紊流形态的感性认识。
- (2) 测定层流和紊流两种流态的沿程阻力与断面平均流速之间的关系。
- (3) 绘制沿程阻力和断面平均流速的对数关系曲线, 即 $\lg h_f - \lg v$ 曲线, 并计算临界雷诺数 Re_c 。

二、实验装置

实验所用装置为雷诺实验仪, 如图 1-3 所示。

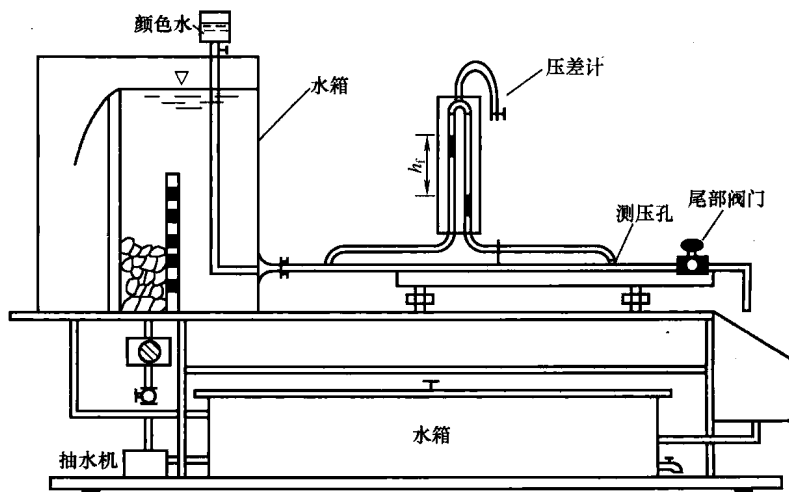


图 1-3 雷诺实验仪

三、实验原理

同一种液体在同一管道中流动, 当流速不同时, 可有两种不同的流态。当流速较小时, 管中水流的全部质点以平行而不互相混杂的方式分层流动, 这种形态的液体流动称为层流; 当流速较大时, 管中水流各质点间发生互相混杂的运动, 这种形态的液体流动称为紊流。

层流与紊流的沿程阻力规律也不同。层流的沿程阻力大小与断面平均流速的 1 次方成正比, 即 $h_f \propto v$ 。紊流的沿程阻力与断面平均流速的 1.75~2.0 次方成正比, 即 $h_f \propto v^{1.75 \sim 2.0}$ 。

视水流情况, 沿程阻力和断面平均流速的关系可表示为 $h_f = kv^m$ (式中 m 为指数), 或表示为 $\lg h_f = \lg k + m \lg v$ 。

每套实验设备的管径 d 固定不变, 当水箱水位保持不变时, 管内即产生恒定流动。沿程阻力 h_f 与断面平均流速 v 的关系可由能量方程导出, 即

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_f \quad (1-9)$$

当管径不变, $v_1 = v_2$ 时, 取 $\alpha_1 = \alpha_2 \approx 1.0$, 所以

$$h_f = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) = \Delta h \quad (1-10)$$

其中 Δh 值由压差计读出。

在圆管流动中采用雷诺数来判别流态, 即

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

式中 v ——圆管水流的断面平均流速;

d ——圆管直径;

ν ——水流的运动黏滞系数。

当 $Re < 2000$ 时为层流状态, $Re > 2000$ 时为紊流状态。

四、实验步骤

1. 观察流动状态

将进水管打开使水箱充满水, 并保持溢流状态; 然后用尾部阀门调节流量, 将阀门微微打开, 待水流稳定后, 注入颜色水。当颜色水在实验管中呈现一条稳定而明显的流线时, 管内即为层流状态。

随后渐渐开大尾部阀门, 增大流量, 这时颜色水开始颤动、弯曲, 并逐渐扩散, 当扩散至全管, 水流紊乱到已看不清着色流线时, 则是紊流状态。

2. 测定 $h_f - v$ 的关系及临界雷诺数

(1) 熟悉仪器, 测记有关常数。

(2) 检查尾部阀门全关时压差计液面是否齐平, 若不平, 则需排气调平。

(3) 将尾部阀门开至最大, 然后逐步关小阀门, 使管内流量逐步减少; 每改变一次流量, 均待水流平稳后, 测定每次的流量、水温 and 实验段的水头损失 (压差)。流量 Q 用体积法测量, 即用量筒量取水的体积 V , 用秒表计时间 T , 则流量 $Q = V/T$ 。相应的断面平均流速 $v = Q/A$ 。

(4) 流量用尾部阀门调节, 共进行 10 次。当 $Re < 2500$ 时, 为确保精确, 每次压差减小值只能为 3~5mm。

(5) 用温度计测量当日的水温, 由此可查得运动黏滞系数 ν , 从而计算雷诺数 $Re = \frac{vd}{\nu}$ 。

(6) 相反, 将调节阀由小逐步开大, 管内流速慢慢加大, 重复上述步骤。

五、注意事项

(1) 在整个试验过程中, 要特别注意保持水箱内的水头稳定。每改变一次阀门开度, 均

待水头稳定后再测量流量和沿程阻力。

(2) 在流动形态转变点附近, 流量变化的间隔要小些, 使测点多些, 以便准确测量临界雷诺数。

(3) 在层流流态时, 由于流速 v 较小, 所以沿程阻力 h_f 值也较小, 应耐心、细致地多测几次。同时注意不要碰撞设备并保持实验环境的安静, 以减少扰动。

六、思考题

(1) 要使注入的颜色水能确切地反映水流状态, 应注意什么问题?

(2) 如果压差计用倾斜管安装, 压差计的读数差是不是沿程阻力 h_f 值? 管内用什么性质的液体比较好? 其读数怎样换算为实际压强差值?

实验五 管路沿程阻力实验

一、实验目的

- (1) 观察和测试流体在等直径管道中流动时的能量损失情况。
- (2) 掌握测定管道沿程阻力系数 λ 的方法。
- (3) 了解沿程阻力系数在不同雷诺数下的变化情况, 绘制沿程阻力系数 λ 与雷诺数 Re 的对数关系曲线。

二、实验装置

实验所用装置为多功能水力学实验台, 如图 1-2 所示, 主要部件有水泵, 上水管及阀门 2, 计量箱, 沿程阻力实验管道, 突扩、突缩实验管道, 测压管等。

三、实验原理

通过对一等直径管道中的恒定水流, 在任意两过水断面 1-1、2-2 上写能量方程, 可得

$$h_f = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right) \quad (1-11)$$

而沿程阻力的表达式为

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (1-12)$$

则沿程阻力系数 λ 为

$$\lambda = \frac{\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right)}{\frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}} = \frac{2gd}{l} \frac{h_f}{v^2} \quad (1-13)$$

一般可认为 λ 与相对粗糙度 $\frac{K_s}{d}$ 及雷诺数 Re 有关, 即

$$\lambda = f\left(\frac{K_s}{d}, Re\right) \quad (1-14)$$

四、实验步骤

- (1) 熟悉实验设备, 记录仪器常数。
- (2) 关闭测点 1、2、5、6、7、8、9、10 处的小阀门。
- (3) 打开阀门 3、4、5、6。
- (4) 开启泵, 调节阀门 2, 使流量在测压管量程范围内达到最大, 待水流稳定后记录测压管读数, 并测量流量, 流量用体积法测量。
- (5) 逐渐关闭阀门 2, 依次减小流量, 测量各次流量和相应的压差值。
- (6) 用温度计测记本次实验的水温 t_0 , 并查得相应的 ν 值, 从而可计算出相应于每次流量下的雷诺数 Re 值。

五、注意事项

- (1) 每次关闭阀门 2 时, 要缓慢关闭, 为使水流稳定, 需待 1~2min 再测读数据, 以保证实验结果的正确性。在层流时, 压差为 3~5mm, 在紊流时, 压差可适当大些。
- (2) 由于水流紊动原因, 压差计液面有微小波动, 当流速较大时, 表现尤为显著。需待水流稳定时, 读取上下波动范围的平均值。
- (3) 测记水温, 求雷诺数时用开始和终了两次水温的平均值求 ν 。
- (4) 如出现测压管冒水现象, 可把阀门全开或停泵重做实验。

六、实验数据处理

实验所测数据记录在表 1-4 中。

表 1-4

管路沿程阻力实验数据记录表

水温 $t_0 =$

运动黏滞系数 $\nu =$

测次	时间 (s)	水量 (cm ³)	流量 (cm ³ /s)	流速 (cm/s)	测压管指示		沿程阻力 h_f (cm)	沿程阻力 系数 λ	雷诺数 Re
					h_3	h_4			
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									

七、思考题

- (1) 如果将实验管道倾斜安装, 压差计中的读数差是不是沿程阻力 h_f 值?
- (2) 随着管道使用年限的增加, $\lambda-Re$ 关系曲线将有什么变化?