

■ 高等学校理工科土木工程类规划教材

水力学实验教程

HYDRAULICS EXPERIMENT

尚全夫 崔 莉 王庆国 编著



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

水力学实验教程 / 尚全夫, 崔莉, 王庆国编著. —2版. —大连: 大连理工大学出版社, 2007. 4

ISBN 978-7-5611-0052-3

I. 水… II. ①尚… ②崔… ③王… III. 水力实验—高等学校—教材 IV. TV131

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 045725 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84708842 邮购: 0411-84703636 传真: 0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm 印张: 14 字数: 312 千字

1988 年 2 月第 1 版 2007 年 4 月第 2 版

2007 年 4 月第 2 次印刷

责任编辑: 梁 锋 范业婷 责任校对: 宜 呈

封面设计: 宋 蕾

ISBN 978-7-5611-0052-3

定 价: 22.00 元

前 言

实验教学是高等教育人才培养计划中实践性教学的重要环节,也是培养研究型人才和应用型人才的必然要求。随着现代实验技术和信息技术的快速发展,建立系统化和信息化的实验教学体系与实验方法,有着更为积极的意义。本书旨在通过对实验理论、实验技术及实验数据计算机处理的全过程加以详尽的论述,使学生在掌握实验基本理论的基础上,建立现代的实验理念,培养分析问题与解决问题的能力,锻炼实验动手能力。同时,通过实验,深化水力学专业知识的理解,达到能够基本掌握运用实验手段验证理论、认识规律、优化设计的目的。

本书主要针对水力学这门专业基础课程,并根据作者多年实验教学和科研实验的积累,同时也吸收了国内外许多优秀成果编写而成。全书共3篇,第1篇涵盖了水静力学,液体流动,管流与摩阻,明渠,闸、堰泄流,渗流,波浪运动,水泵等基础理论。选编了25个实验,同时对实验目的、实验原理、实验步骤与方法、实验资料整理与实验报告要求等,系统地加以归纳,便于学生掌握和运用;第2篇简要介绍了相似理论及模型设计;第3篇重点讲述了实验数据的分析与处理。

本书由尚全夫,崔莉编写,王庆国修订。马震岳教授审阅了全书。

由于作者水平有限,本书的缺点和不足在所难免,敬请相关专家学者指正,也请同学们在学习和使用中对需要完善和补充的地方提出切实的意见,以达到教学相长的目的。大家有任何意见或建议,请通过以下方式与我们联系:

邮箱 jcjf@dutp.cn

电话 0411-8407962 84708947

作者

2007年3月

目 录

- 第 1 篇 水力学实验 / 1
- 第 0 章 绪 论 / 1
 - 0.1 水力学实验的目的 / 1
 - 0.2 实验报告要求 / 1
- 第 1 章 流体参数的测量 / 3
 - 1.1 概 述 / 3
 - 1.2 基本物理量的计算 / 3
 - 1.2.1 密 度 / 3
 - 1.2.2 重 度 / 3
 - 1.2.3 相对密度(比重) / 4
 - 1.2.4 容 重 / 4
 - 1.2.5 黏滞性 / 4
 - 1.3 水位测量 / 6
 - 1.3.1 测尺法 / 6
 - 1.3.2 测针法 / 6
 - 1.3.3 测压管法 / 7
 - 1.3.4 自动跟踪式水位仪 / 7
 - 1.3.5 铂丝水位计 / 8
 - 1.3.6 水位传感器 / 8
 - 1.4 压强测量 / 9
 - 1.4.1 恒定流动压强测量方法 / 9
 - 1.4.2 压强瞬时值的测量 / 12
 - 1.5 流速测量 / 13
 - 1.5.1 流速值的测量 / 13
 - 1.5.2 流向的测量 / 16
 - 1.6 流量测量 / 16
 - 1.6.1 管道中的流量测量 / 16
 - 1.6.2 明渠流量测量 / 19
- 实验 1.1 流体黏滞系数的测定 / 23
- 第 2 章 水静力学 / 25
 - 2.1 概 述 / 25
 - 2.2 静水压强及其特性 / 25
 - 2.3 水静力学基本方程 / 25
 - 2.4 压强的表示方法及单位 / 26
 - 2.5 作用在平面上的静水总压力 / 26
 - 2.6 作用在曲面上的静水总压力 / 27
 - 2.7 浮力、浮体的平衡与稳定 / 27
- 实验 2.1 验证水静力学基本方程 / 28
- 实验 2.2 稳定和浮力实验 / 31
- 第 3 章 液体流动的基本原理 / 35
 - 3.1 流动的类型 / 35
 - 3.1.1 无压流和有压流 / 35
 - 3.1.2 恒定流和非恒定流 / 35
 - 3.1.3 均匀流和非均匀流 / 35
 - 3.1.4 层流和紊流 / 36
 - 3.1.5 有势流和有涡流 / 36
 - 3.2 流 线 / 36
 - 3.3 连续原理 / 36
 - 3.4 能量方程 / 37
 - 3.5 动量定律 / 38
- 实验 3.1 水流的能量转换实验 / 38

- 实验 3.2 动量定律实验 / 41
- 实验 3.3 平面势流的水电比拟实验 / 43
- 实验 3.4 边界层流速分布与边界层厚度发展实验 / 46
- 第 4 章 管流与摩阻 / 51**
- 4.1 雷诺数 / 51
- 4.2 圆管中水流的能量损失 / 52
- 4.3 沿程损失 / 52
- 4.3.1 沿程水头损失 / 52
- 4.3.2 沿程阻力系数 / 53
- 4.4 局部损失 / 57
- 实验 4.1 流动形态实验 / 58
- 实验 4.2 管流的沿程阻力实验 / 61
- 实验 4.3 管路局部阻力实验 / 64
- 实验 4.4 文丘里流量计实验 / 67
- 第 5 章 明渠 / 69**
- 5.1 概述 / 69
- 5.1.1 弗劳德数 / 69
- 5.1.2 临界流 / 70
- 5.1.3 急流与缓流 / 70
- 5.2 明渠流的能量 / 71
- 5.2.1 总水头 / 71
- 5.2.2 断面比能 / 71
- 5.2.3 几个关系图 / 71
- 5.3 水流的动量函数 / 72
- 5.4 棱柱形明渠中恒定非均匀渐变流水面线形式、微分方程式 / 73
- 5.5 断面比能原理及动量函数的应用 / 73
- 5.5.1 水跃与消能 / 73
- 5.5.2 底流式消能防冲 / 75
- 实验 5.1 明渠流速测量 / 78
- 实验 5.1.1 毕托管测流速 / 78
- 实验 5.1.2 光电流速仪测流速 / 81
- 实验 5.2 水跃实验 / 83
- 实验 5.3 水工建筑物下游的底流消能实验 / 87
- 实验 5.4 各种水面线的演示 / 91
- 第 6 章 闸、堰泄流 / 93**
- 6.1 堰流与孔流 / 93
- 6.1.1 定义 / 93
- 6.1.2 堰流类型 / 93
- 6.1.3 堰流孔流的分界 / 94
- 6.2 闸孔出流 / 94
- 6.2.1 闸孔出流流态判别准则 / 94
- 6.2.2 闸孔泄流能力的基本计算式 / 95
- 6.3 孔口与管嘴出流 / 95
- 6.3.1 概念 / 95
- 6.3.2 薄壁孔口与管嘴恒定出流时过水能力的计算 / 96
- 6.3.3 孔口的非恒定出流 / 97
- 6.4 堰顶溢流 / 98
- 6.4.1 宽顶堰流 / 98
- 6.4.2 曲线型实用堰流 / 99
- 实验 6.1 孔口、管嘴实验 / 102
- 实验 6.2 闸孔出流实验 / 105
- 实验 6.3 宽顶堰溢流实验 / 107
- 实验 6.4 实用堰泄流实验 / 110
- 第 7 章 渗流 / 112**
- 7.1 基本概念与渗流模型 / 112
- 7.2 达西定律 / 112
- 7.3 无压恒定渐变渗流的基本方程及其浸润线 / 113
- 7.4 土坝渗流 / 114
- 7.5 恒定渗流的基本微分方程及其解法 / 115
- 实验 7.1 达西实验 / 117
- 实验 7.2 有压(或无压)渗流的电模

- 拟实验 / 118
- 第 8 章 波浪运动 / 124**
- 8.1 波浪要素与分类 / 124
- 8.2 拉格朗日连续性方程式和运动方程式 / 125
- 8.2.1 连续性方程式 / 125
- 8.2.2 运动方程式 / 125
- 8.3 有限振幅推进波 / 126
- 8.3.1 深水推进波 / 126
- 8.3.2 浅水推进波 / 128
- 8.4 有限振幅立波 / 130
- 8.4.1 深水立波 / 130
- 8.4.2 浅水立波 / 131
- 实验 8.1 波浪要素测定实验 / 133
- 第 9 章 水泵 / 137**
- 9.1 水泵的作用 / 137
- 9.2 水泵的性能及性能曲线 / 137
- 9.2.1 水泵性能 / 137
- 9.2.2 泵的性能曲线 / 139
- 实验 9.1 离心泵性能实验 / 140
- 第 2 篇 相似原理及模型设计 / 144**
- 第 10 章 相似原理及水工模型设计方法 / 144**
- 10.1 引言 / 144
- 10.2 水力模型试验 / 145
- 10.3 流动相似的意义及特征 / 145
- 10.3.1 流动相似的意义 / 145
- 10.3.2 相似的特征 / 145
- 10.4 相似原理的应用 / 152
- 10.4.1 重力相似准则 / 152
- 10.4.2 阻力相似准则 / 153
- 10.4.3 黏滞力相似准则(雷诺准则) / 155
- 10.4.4 弹性力相似准则 / 157
- 10.4.5 表面张力相似准则 / 157
- 10.4.6 局部惯性力相似准则 / 158
- 10.4.7 压力相似准则 / 158
- 10.5 水工模型设计 / 161
- 10.5.1 水工模型的设计方法 / 161
- 10.5.2 水工模型试验的种类 / 162
- 10.6 对水工模型试验的评价 / 162
- 习 题 / 161
- 实验 10.1 模型设计 / 164
- 第 3 篇 实验数据处理方法 / 166**
- 第 11 章 实验数据处理 / 166**
- 11.1 基本概念 / 166
- 11.1.1 真值与平均值、最佳值 / 166
- 11.1.2 误差及误差的分类 / 168
- 11.1.3 误差的表示法 / 169
- 11.1.4 精 度 / 171
- 11.2 误差分析 / 171
- 11.2.1 偶然误差(随机误差)的分布 / 171
- 11.2.2 统计上允许的合理误差范围 / 172
- 11.2.3 可疑观测量的取舍 / 172
- 11.2.4 间接测量中误差估计 / 173
- 11.2.5 多次测量的 M 的平均值及均方根误差 / 175
- 11.2.6 有效数字 / 175
- 11.3 随机数据的基本特征 / 177
- 11.3.1 均方值、均值与方差 / 177
- 11.3.2 概率密度函数与概率分布函数 / 177

11.3.3	自相关函数 / 178	12.3.5	曲线拟合效果的 标志 / 197
11.3.4	功率谱密度函数 / 179	12.4	回归直线与相关系数的 简易求法 / 204
实验 11.1	水流脉动压力测量 与分析 / 180	12.5	回归方程的稳定性与两条 回归直线的比较 / 206
第 12 章	实验数据的方程表示——曲线 拟合 / 184	12.5.1	回归方程的稳定性 / 206
12.1	问题的提出 / 184	12.5.2	两条回归直线的 比较 / 207
12.2	经验公式的选取 / 185	习 题 / 210	
12.3	经验公式中系数的确定 / 190	附录 / 213	
12.3.1	直线图解法 / 190	参考文献 / 216	
12.3.2	选点法 / 191		
12.3.3	分组平均法 / 191		
12.3.4	最小二乘法 / 193		

$$h_j = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2 \frac{v_2^2}{2g} = \zeta \frac{v_2^2}{2g} \quad (4-23)$$

式中

$$\zeta = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1 \right)^2$$

实验 4.1 流动形态实验

【实验目的与要求】

(1) 观察流动的层流形态和紊流形态, 观察液体层流时的流速分布, 从而对黏性液体的流动获得感性认识;

(2) 学习测量圆管中雷诺数的方法;

(3) 通过实验理解判定流动形态的量纲一参数 Re (雷诺数) 的物理意义, 测量下临界雷诺数, 并找出不同流动形态的阻力规律。

【实验设备与仪器】

(1) 装有溢流设备的水箱, 可提供恒定流动;

(2) 一细长玻璃管, 在相距 1 m 的位置上装有测压嘴, 在末端有流量调节阀;

(3) 测压管 2 支;

(4) 量筒 ($2\ 000\ \text{cm}^3$) 1 个;

(5) 秒表;

(6) 有控制阀的染色水瓶。

实验装置如图 4-6 所示。

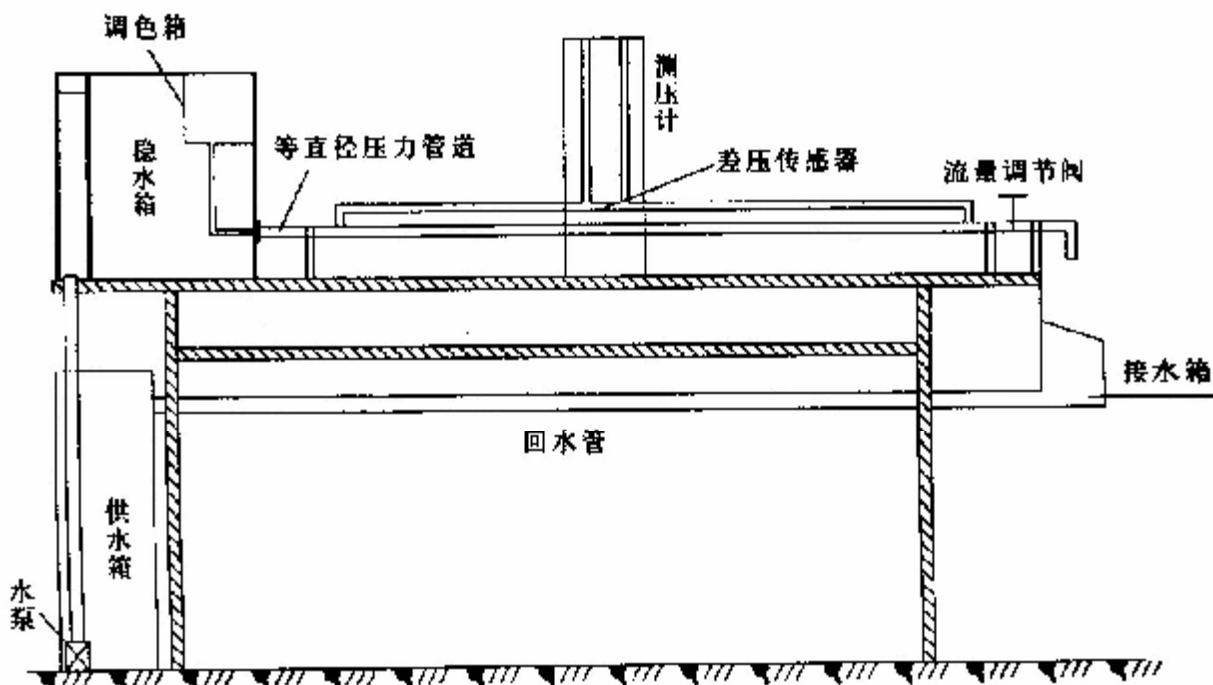


图 4-6 雷诺实验装置

【实验原理】**(1) 流动现象**

由于水流流态的可视性,在管路中装一着色喷射装置,观察当流速增加时,流动的特性。在低流速时,染色线保持一细长的条纹,一直延伸到全管路上,如图4-7(a)所示,这时流动叫层流。随着流速的增加,染色线的直线性受到破坏,下游开始波动,染色线表现出不稳定性,如图4-7(b)所示。当流速再增加时,这些不稳定性的强度逐渐加强。当流速达到上临界速度时,染色线突然完全破碎且扩散到整个流动中,如图4-7(c)所示,这时的流动叫紊流。

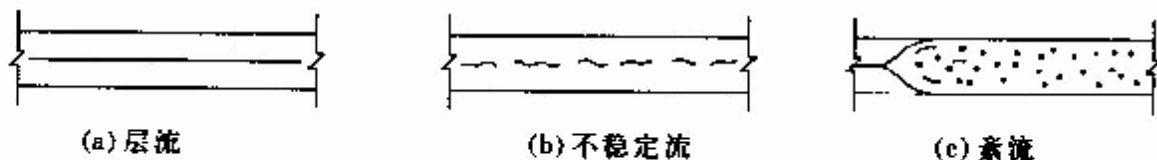


图4-7

雷诺实验还证实了层流与紊流的沿程损失规律不同。层流时沿程损失与流速成正比,紊流时沿程损失与流速的 n 次方成正比。

(2) 计算公式

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

$$Q = \frac{V}{T}$$

式中 Re ——雷诺数;

v ——管路中的平均流速, cm/s;

d ——管路的直径, cm;

ν ——运动黏滞系数, cm^2/s , 可查表 1-1;

V ——集水量, cm^3 ;

T ——集水时间, s。

$$K = \frac{4}{\pi d \nu} \left(\text{因为 } Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{Qd}{\frac{\pi}{4}d^2\nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu} \right)$$

【实验步骤与方法】**(1) 实验前的准备**

①记录已知数据,管径 d 与水温 t ;

②开启进水阀,关闭流量调节阀,使水箱充满水并保持溢流,3~5 min后便可稳定(可向管路提供恒定流动);

③检查测压管水面是否齐平,如不齐平说明系统有气泡存在,排气后方可调平。

(2) 流动形态演示

①慢慢开启流量调节阀,使通过微小流量,保持水流稳定,然后打开染色水阀,避免任何干扰振动,此时可见管内染色水成一条顺直线随同管内清水一起流动,不与周围清水混掺,水流在作层流运动;

②轻轻缓慢地开大调节阀,逐步增大管内流量,则可观察到:染色线开始波动,波动的染色线呈现断裂卷曲,逐渐形成漩涡,最后极度紊动,色线扩散看不清了,管内水流已成紊流流态;

③在确定管内水流为紊流流态时,进行反演上述过程,即轻轻地逐渐关小调节阀,可以观察到紊流转变到层流的演变过程,当出现一条稳定的顺直的染色线时,水流又恢复到层流。

(3)下临界雷诺数的测定

①开大调节阀(注意水箱内需保持溢流)使管内水流成为完全紊流流态,待水流稳定后记录测压管读数、水温,用量筒测量水量并记录集水时间;

②逐渐调节流量调节阀使流量由大到小,重复上述步骤①,要求紊流区有7~8个点,层流区有4点;

③实验完毕,依次关闭染色水阀、流量调节阀,检查两测压管水面是否齐平。

【注意事项】

- (1)水箱内应始终保持溢流;
- (2)开启阀要轻且慢;
- (3)流量调节阀只允许向一个方向旋转,中途不得逆转;
- (4)注意避免任何扰动;
- (5)测流量时要求时间尽量长一些。

【思考题】

- (1)层流转化为紊流的充分必要条件是什么?
- (2)为什么下临界雷诺数较稳定,而上临界雷诺数不稳定?

【实验资料整理】

(1)已知数据

实验设备号 _____ 玻璃管内径 $d =$ _____ cm;

两测点间长度 $l =$ _____ cm 水温 $t =$ _____ °C;

水的运动黏滞系数 $\nu =$ _____ cm^2/s

(2)实测数据

次数	流动形态 描绘	测压管读数			流量测定		
		左管	右管	压差	集水体积 cm^3	集水时间 s	流量 cm^3/s
1							
2							
⋮							

(3)计算数据

计算常数 $K = \frac{4}{\pi d \nu} =$ _____

次数	流量 $\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$	流速 $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	雷诺数 Re	压差 $\frac{\Delta p}{\gamma} (h_f)$ $\frac{\text{cm}}{\text{cm}}$	$J = \frac{\Delta p/\gamma}{l}$
1					
2					
⋮					

【实验报告要求】

(1) 实验目的与要求。

(2) 观测数据及流态示意图。

(3) 计算数据。

(4) 在对数纸上绘出水头损失 $h_f \left(\frac{\Delta p}{\gamma} \right)$ 和雷诺数 (Re) 关系曲线, 求下临界雷诺数。(5) 在对数纸上绘制水头损失与流速的关系曲线, 并求不同流态下的表达式 $h_f = K v^n$ 中的 K 与 n (图 4-8):

$$n = \frac{\lg h_{f2} - \lg h_{f1}}{\lg v_2 - \lg v_1}, \quad \lg K = \frac{\lg h_{f1} \lg v_2 - \lg h_{f2} \lg v_1}{\lg v_2 - \lg v_1}$$

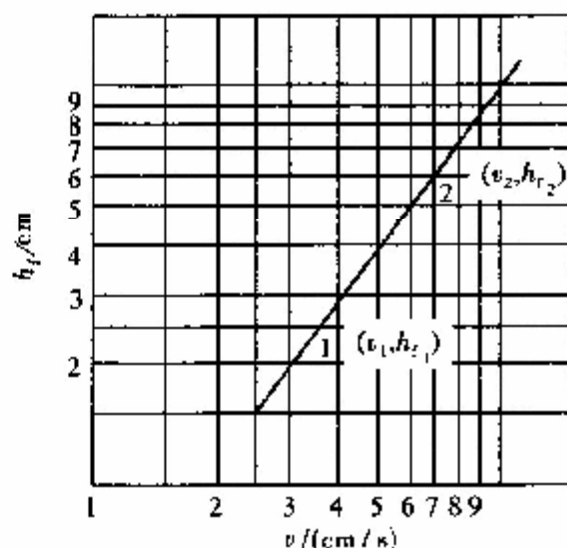


图 4-8

(6) 通过实验得出哪些规律性的结论。

实验 4.2 管流沿程阻力实验**【实验目的与要求】**

(1) 深入了解圆管在恒定流动下的水头损失变化规律, 学会整理经验公式的方法;

(2) 学会测定管路沿程阻力系数 (λ) 的方法, 并找出它的变化规律。

(3) 验证不同流区中水头损失与断面平均流速的关系, 判断实验的区域。

【实验设备与仪器】

实验设备简图如图 4-9 所示。所用测量仪器有压差计或测压计、量筒、秒表、温度计等。