

GAODENG YUANXIAO JINGPIN
GUIHUA JIAOCAI

高等院校精品规划教材

水力学(工程流体力学)实验

◎ 主 编 奚 斌

◎ 副主编 闻建龙 朱仁庆



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

GAODENG YUANXIAO JINGPIN
GUIHUA JIAOCAI

高等院校精品规划教材

水力学(工程流体力学)实验

◎ 主 编 奚 斌

◎ 副主编 闻建龙 朱仁庆

主编 奚斌 教授 天津理工大学 副主编 闻建龙 教授 天津理工大学 副主编 朱仁庆 教授 天津理工大学 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业	出 版 社 中 国 水 利 水 电 出 版 社 中 国 水 利 水 电 出 版 社
天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业 天津理工大学水利工程专业	中 国 水 利 水 电 出 版 社 中 国 水 利 水 电 出 版 社 中 国 水 利 水 电 出 版 社



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材由四部分组成。第一部分绪论主要介绍实验课的任务及研究方法,量测的基本知识,实验的基本知识。第二部分主要介绍水力要素的量测技术,分5章,分别介绍明渠流水力要素的量测技术,管流水力要素的量测技术和流体旋度的量测简介,气流要素的量测技术,以及流体要素现代量测技术,流动可视化技术简介。第三部分为水力学(工程流体力学)实验,分演示实验、操作实验、综合设计实验三类介绍,共有27个实验项目。每个项目包括:目的、原理、设备、步骤等。最后一部分为附录,包括误差分析与经验公式的拟合方法和水力学(工程流体力学)常用数据表等。

本书适用于高等院校的水利、给水排水、建环、土木、热能、船舶、化工、海港、环境工程等专业的师生,也可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学(工程流体力学)实验/奚斌主编. —北京:中国水利水电出版社, 2007

高等院校精品规划教材

ISBN 978-7-5084-4492-5

I. 水… II. 奚… 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038005号

书 名	高等院校精品规划教材 水力学(工程流体力学)实验
作 者	主编 奚斌 副主编 闻建龙 朱仁庆
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 12.25印张 298千字
版 次	2007年4月第1版 2007年4月第1次印刷
印 数	0001—7000册
定 价	22.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

水力学（工程流体力学）是工科类高等院校一门重要的专业基础课程，水力学（工程流体力学）教学包括理论教学和实验教学两部分。水力学（工程流体力学）实验在水力学（工程流体力学）学科发展中占有很重要的地位，是整个水力学（工程流体力学）理论教学不可替代的环节。其重要性在于加强学生对水流现象的感性认识，验证所学理论，掌握基本的水力要素测试技术和方法，培养学生基本的实验技能和科学研究的严谨作风，为学生今后进一步深造和工作打下良好的基础。

目前，许多高校使用的是紧扣教学实验内容的实验报告，对实验中测试技术和方法的总结介绍不多，使得学生做完实验后，对实验印象不深，在今后的学习和工作中使用到实验知识时，一方面感到无从下手，另一方面感到无资料可查；同时随着高校教学改革的深入，特别是全国本科教学评估工作的进行，对水力学（工程流体力学）实验亦提出了一些新的要求，如要求开设综合设计性的实验等。编者结合多年教学实践经验和自身从事实验工作的体会以及教学设备的开发研制，广泛吸收国内外实验教材中的优点，去除了原有一些资料中介绍的不常用或很难使用的测试方法，根据科学技术的发展，增添了一些新的测试设备的介绍，如微型 ADCP 等，在编者原编实验讲义的基础上，由扬州大学、江苏大学、江苏科技大学共同编写而成，其内容涵盖了水力学（工程流体力学）教学大纲要求的所有实验。

编写过程中始终贯彻理论联系实际、学以致用原则，注重实践创新，结合了水力学（工程流体力学）开放实验的特点，力求教材内容符合学生的认识规律，便于学生独立操作。

本书由奚斌主编。绪论、第 1 篇的第 1、2 章和第 2 篇由扬州大学奚斌同志编写；第 1 篇的第 3 章由江苏科技大学的朱仁庆教授编写；第 1 篇的第 4、5 章由江苏大学的闻建龙教授编写；附录由扬州大学成立副教授编写。全书由奚斌同志统稿。

书中部分文字的录入和绘图由郭瑞、王雪芹等同志完成。

全书由扬州大学刘超教授主审。

本书编写过程中，参阅引用了许多文献资料，特向有关作者致谢！同时

向编者的原编实验讲义主审黄才安教授，提供了相关资料的江苏科技大学杨大明实验师，给予本书编写关心指导的扬州大学周济人副教授、熊亚南副教授、郑松桥高级实验师表示感谢！向所有给予本书编写工作支持和帮助的人表示衷心的感谢！

本书获扬州大学教材出版基金资助。

由于时间仓促，水平有限，书中的缺点和错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

2007年3月于扬州

目 录

前 言

绪论	1
0.1 水力学(工程流体力学)实验课的任务及研究方法	1
0.1.1 水力学(工程流体力学)实验课的任务	1
0.1.2 实验研究的方法	1
0.2 量测的基本知识	2
0.2.1 量测的作用	2
0.2.2 量测的分类	2
0.3 实验的基本知识	3
0.3.1 数据收集	3
0.3.2 数据处理	3
0.3.3 整理实验报告的一般方法	6

第1篇 水力学(工程流体力学)流体要素的量测

第1章 明渠流水力要素的量测	7
1.1 水位的量测	7
1.1.1 测尺	7
1.1.2 连通测压管法	7
1.1.3 测针	8
1.1.4 电感闪光测针	9
1.1.5 跟踪水位计	9
1.1.6 液位传感器(变送器)	11
1.2 流速与流向的量测	11
1.2.1 浮子法	11
1.2.2 浮子摄影法	13
1.2.3 毕托管法(动压强法)	15
1.2.4 旋桨式流速仪法	17
1.2.5 明渠超声波流速仪	18
1.2.6 流量断面法	20
1.2.7 流向测定	20
1.3 流量的量测	21
1.3.1 体积法	21
1.3.2 称重法	21
1.3.3 量水堰法	21

1.3.4	量水槽法	23
1.3.5	孔口测流量法	24
1.3.6	微型 ADCP 测流量法	24
1.3.7	流速断面法	27
第 2 章	管流水力要素的量测	28
2.1	管流压强的量测	28
2.1.1	测压管	28
2.1.2	比压计	29
2.1.3	微压计	31
2.1.4	压力表 (计)	32
2.1.5	压力传感器 (非电量量测法)	32
2.1.6	电差压变送器	37
2.2	有压管道流速和流向的量测	38
2.2.1	多孔毕托球法	38
2.2.2	动压法	39
2.2.3	流量断面法	39
2.2.4	超声波流量计测速法	39
2.3	有压管道流量的量测	40
2.3.1	文透里管 (Venturi Meter) 流量计	40
2.3.2	孔板流量计	41
2.3.3	浮子流量计	41
2.3.4	涡轮流量计	42
2.3.5	电磁流量计	43
2.3.6	超声式流量计	44
2.3.7	弯管 (肘管) 流量计	45
2.3.8	喷嘴 (或管嘴) 流量计	46
2.3.9	体积法与称重法	46
2.4	管流中流体旋度的量测简介	46
2.4.1	流体旋度的概念	46
2.4.2	流体旋度测量仪及旋度涡角的计算公式	46
第 3 章	气流要素的量测技术	48
3.1	温度的量测	48
3.1.1	热电偶测温	48
3.1.2	热电阻测温	49
3.1.3	红外测温	50
3.2	压强的量测	50
3.2.1	测压孔、静压管和总压管	50
3.2.2	液柱式压强计	51

3.2.3 压强传感器	56
3.3 流速和流向的量测	57
3.3.1 皮托管 (Pitot)	57
3.3.2 热线 (膜) 风速计	58
3.3.3 激光多普勒测速仪 (LDV)	60
3.4 气体流量的量测	61
3.4.1 流量计的分类	61
3.4.2 气体流量的量测方法	63
第4章 流体要素现代量测技术	66
4.1 激光多普勒测速技术 (LDA)	66
4.1.1 激光及激光器	67
4.1.2 多普勒测速原理	67
4.1.3 装置与性能	68
4.1.4 散射粒子	68
4.1.5 信号的分析与处理	69
4.1.6 激光多普勒测速仪的主要用途	70
4.2 PIV 测试技术	70
4.2.1 PIV 基本原理	71
4.2.2 PIV 系统组成	71
4.2.3 示踪粒子的选择	73
4.2.4 PIV 应用实例——喷雾场的测量	73
4.2.5 PIV 的主要用途	74
4.3 相位多普勒测速技术 (PDPA)	75
4.3.1 PDPA 系统的基本结构及光学模型	75
4.3.2 PDPA 系统的测量原理	76
4.3.3 某一 PDPA 系统参数、技术指标及光学参数设置	78
第5章 流动可视化技术简介	79
5.1 水流显示方法	79
5.1.1 着色法	79
5.1.2 化学反应示踪法	80
5.1.3 悬浮物法	81
5.1.4 漂浮物法	81
5.1.5 空气泡法	82
5.1.6 氢气泡法	82
5.2 低速气流显示方法	83
5.2.1 烟流法	83
5.2.2 丝线法	85
5.2.3 油膜法	86

5.3 流动显示新技术简介	88
5.3.1 激光诱发荧光法	88
5.3.2 激光分子测速技术	88
5.3.3 发光压力传感技术(压敏涂层测压技术)	89
5.3.4 流动显示技术的发展趋势	89
5.4 计算流动显示技术(CFI)	90
5.4.1 光学流动显示方法	91
5.4.2 计算流体力学结果的计算流动显示方法	91
5.5 高速摄影技术的应用	92
5.5.1 常用高速摄影机简介	93
5.5.2 高速单次拍摄	94
5.5.3 高速连续拍摄	94
5.5.4 应用实例	94

第2篇 水力学(工程流体力学)实验

第1章 演示类实验	97
实验1 自循环静压传递扬水实验	97
实验2 水流流动形态及绕流现象演示实验	98
实验3 流线演示实验	99
实验4 水击现象演示实验	100
实验5 虹吸原理演示实验	102
实验6 水面曲线演示实验	104
实验7 空化机理演示实验	106
实验8 紊动机理演示实验	107
实验9 势流叠加演示实验	109
第2章 操作类实验	111
实验1 静水压强实验	111
实验2 静水总压力实验	112
实验3 流量测量实验	114
实验4 流速测量实验	116
实验5 能量方程(伯努利方程)实验	119
实验6 动量方程验证实验	120
实验7 管道突扩、突缩局部阻力系数的测定实验	124
实验8 管道沿程阻力系数测定实验	125
实验9 雷诺实验	127
实验10 孔口与管嘴出流实验	129
实验11 明渠糙率测定实验	131
实验12 堰流实验	132

第3章 综合、设计类实验..... 135

实验1 管道流量测量综合分析实验 135

实验2 管网特性综合分析实验 139

实验3 水跃实验及泄水建筑物消能演示 143

实验4 二元机翼表面压力分布及流体动力特性测量 145

实验5 管道瞬态特性测试分析实验 148

实验6 明渠流量测量综合设计实验 149

附 录

附录1 误差及不确定度 151

附1.1 误差的基本概念及计算 151

附1.1.1 真值与近似值 151

附1.1.2 误差的种类 151

附1.1.3 误差的主要来源 152

附1.1.4 平均值 152

附1.1.5 绝对误差与相对误差 153

附1.1.6 误差估算 153

附1.1.7 误差回归方程 155

附1.1.8 最小二乘法数据拟和计算程序 (FORTRAN 和 MATALAB) 159

附1.2 测量不确定度及其评定 163

附1.2.1 测量不确定度的概念 163

附1.2.2 不确定度的来源 163

附1.2.3 测量不确定度的分类 164

附1.2.4 测量不确定度的评定流程 164

附1.2.5 测量不确定度的报告 169

附1.2.6 测量不确定度评定举例 170

附录2 水力学 (工程流体力学) 常用数据表 173

参考文献..... 184

绪 论

0.1 水力学（工程流体力学）实验课的任务及研究方法

0.1.1 水力学（工程流体力学）实验课的任务

一切理论知识都是来自于生产实践。人类通过生产实践，逐步了解自然现象的本质，经过总结提高，上升为理论，然后再指导实践。反复实践，总结提高的过程，就推动了科学的发展。水力学（工程流体力学）这门课程就是人类在长期和水害斗争中不断总结提高发展起来的。

但是自然界的水流现象是十分复杂的，受到多种因素的影响，例如天然河道中的水流，除受各种力的作用外，还受各种边界条件的影响，研究其运动规律时，若将各种因素全部考虑，不仅使问题相当复杂，有时甚至是不可能做到的。而水力学（工程流体力学）实验就是人为地排除某些干扰，抓住主要因素，忽略次要因素，控制或模拟水流的各种现象，进行验证理论和探索水流运动规律的一种特定的科学实践活动。因此，水力学（工程流体力学）实验课的任务不仅是配合理论课讲解巩固和验证所学理论知识，更重要的是使同学受到基本实验技能的训练和进行科学实验能力的培养，包括智能、方法、态度和作风等方面的培养。

实验能力包括两个方面，即基本实验能力和创造性实验能力。基本实验能力，表现在一般的实验技能和操作技能方面；创造性实验能力，表现在实验的总体设计、实验方案的确定、综合分析和新知识的探索方面。所以说，实验能力不仅仅表现为会做实验，更重要的是实验前方案的确定、实验中的分析研究、实验后的综合提高等。

作为一名搞自然科学的高级技术人才，不仅仅要掌握较深的理论知识，而且必须具有一定的动手能力，而动手能力的培养，课堂教学是无能为力的，如增强感性知识、培养科学态度、训练操作技能等一系列特殊能力的培养，只能通过实验课这一特殊的教学活动来达到。因此，实验教学在培养既有理论知识，又有实验能力的全面人才方面具有极其重要的作用。

0.1.2 实验研究的方法

按照运动的相对性原理，流体力学实验研究的方法，大体可分为两类：一种是流体不动物体运动的研究方法，如船舶和飞机的航行阻力试验等；另一种是物体不动流体运动的研究方法，这种方法在水力学（工程流体力学）实验中得到广泛的应用，如研究水流的作用力、水流的能量转换、各种边界条件下的流态和水流通过各种建筑物的流量系数等。

由于水流运动的复杂性，水力学（工程流体力学）理论的发展在相当程度上取决于试验研究的水平，目前水力学（工程流体力学）教材中有很多系数（如流量系数、收缩系数、淹没系数等）和经验公式，这些都是试验研究的成果，这些成果解决了水利建设中大量的水力计算问题，但是并没有解决生产中所有的水力计算问题，因为系数和经验公式的适用范围有一定的局限性。至今水利建设中还有不少实际问题无法用理论公式进行精确计

算,要解决这些生产问题,主要采用物体不动流体运动的研究方法,根据相似理论进行模型试验,预演未来的水流现象,通过观察进行分析研究,揭示未来水流中的内在规律,指导生产建设。

0.2 量测的基本知识

0.2.1 量测的作用

量测是一种认识过程,就是将被测量的物体与选用作单位的同类物理量进行比较,从而确定它的大小的过程。量测工作在科学技术领域和工业生产中是非常重要的工作,它是人们获得实践知识的重要手段,也是科学实验和工业生产中不可缺少的内容。

水力学(工程流体力学)实验,实质上就是对各水力要素进行实验性的探究,因此,实验本身就不仅仅是定性地观察水流现象,更重要的是对各水力要素进行一系列的定量的量测工作,从一系列的量测数据中分析研究出水流运动各要素之间的内在规律,这样才能达到水力学(工程流体力学)实验的目的。

0.2.2 量测的分类

(1) 按照如何获得量测结果的方法,把量测工作分为直接测量和间接测量。

1) 直接测量。凡是用一种测量器具能够直接量测到待求物理量结果的测量方法称为直接测量。例如,用尺测量长度,用压力表测量压力,用浮子流量计测量流量等。

2) 间接测量。凡是不能用一种测量器具直接测得待求物理量的结果,要根据直接测量的数据按照一定的函数关系,通过计算才能求得待求物理量结果的测量方式称为间接测量。例如,体积法测流量(见图 0.1),首先用直接测量法测出某时段内流入水箱内水体的体积,然后根据流量定义,流量=水体积/时间,算出流量值。又如用 U 形管测量某液体重度 γ' (见图 0.2),此时水的重度 γ 为已知值,必须先用直接测量法测出 U 形管中 h 和 h' 值,然后通过静水压强基本方程式,由 $\gamma' = \frac{h}{h'}\gamma$ 求出 γ' 值。

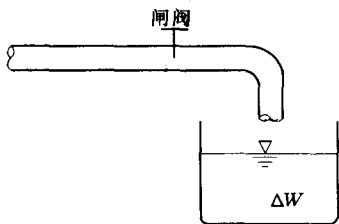


图 0.1 体积法测流量示意图

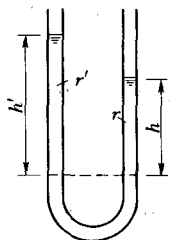


图 0.2 U 形管测液体重度示意图

(2) 按照待求物理量在测量过程中是否变化,把测量分为静态测量和动态测量。

1) 静态测量:待求物理量在测量过程中不随时间变化,或者变化很慢,可以用普通测量器具进行测量的称为静态测量。一般水力学(工程流体力学)实验内的各种水力要素(水位、流速、流量等)在不考虑脉动影响时,都是静态测量,为了提高测量精度,常常对同一物理量进行多次测量,取平均值,所以静态测量又称重复测量。

2) 动态测量:待求物理量在测量过程中随时间快速变化(或周期性变化),需要用特

殊的仪器进行测量和记录的,例如,紊动水流中的瞬时流速和瞬时压强,洪水期河道中的水位和流量等。因此,动态测量又称过程测量或瞬时测量。

(3) 按照量测对象的特点不同,把量测可分为明渠水力要素量测和管流水力要素量测。

1) 明渠水力要素量测:是对液体表面作用的是大气压强的流体水力要素的量测。一般情况下由于明渠流动处于开敞状态下,量测设备的安装比较方便,但由于水面波浪等外界干扰因素较多,量测结果误差较大。如天然河道、渠道、水槽水力要素的量测。

2) 管流水力要素的量测:是对液体表面作用的不是大气压强的流体水力要素的量测。一般情况下由于流体处于密封状态下,量测设备的安装比较烦琐,但水力要素相对较稳定。如对自来水管内水流、水泵进出水管内流体等水力要素的量测。

0.3 实验的基本知识

实验是人们认识自然规律的手段,是科学研究的基础,是检验理论的主要途径。水力学(工程流体力学)教学实验的目的,除了培养能力,掌握量测技术外,主要是增加感性,加深对水流运动规律的认识,验证理论公式,测定经验系数等。为此每个教学实验都有它一定的目的,大家只要严肃认真,独立思考地完成每个实验的全过程,就能取得预期的效果。每个实验过程,大体分为以下五个步骤:

- (1) 根据实验目的,对照实验仪器,设计实验方案(包括操作程序)。
- (2) 根据实验原理或基本公式,设计记录表格和计算表格。
- (3) 按设计的实验方案进行实验,并将收集的数据记入记录表格内。
- (4) 按规定要求进行数据处理,得出试验结果。
- (5) 编写实验报告。

以上五个步骤中,(1)、(2)两个步骤,因实验内容和实验仪器的不同而有所变化,也是反映实验能力培养的重要内容,为了培养大家的实验能力,要求大家在每次实验预习阶段认真做好这项工作。下面主要介绍数据收集、数据处理和编写实验报告三方面内容。

0.3.1 数据收集

数据收集在实验过程中是一项非常重要的工作,它关系到整个实验的成败,因此,一定要高度认真、一丝不苟。获得数据的方法一般有两种。一种是直读式,就是从测量器具上直接读到数据。如测针测水位、浮子流量计测流量等,但是在直读时要细心看清测量器具的刻度分划值和单位,每次读数要读到最小分划值的下一位,若附有游标尺时,要注意游标尺的读法。另一种是自动显示或自动记录,此法在非电量的电测法中,广泛应用,如带显示器的涡轮流量计、光电流速仪等,它们显示出电脉冲数,然后由电脉冲数查率定曲线得到被测值,也有通过程序控制直接把电脉冲数转换成被测量值显示出来,也称为直读式,在动态测量中用示波器等自动记录变化过程,再从变化过程中找出某瞬时的被测量值。

0.3.2 数据处理

数据处理就是将收集到的数据按照一定规律和形式表示成实验的成果,其表示方法有以下三种:

(1) 列表法。是将各变量之间的函数关系用表格的形式表示出来,实质上就是函数式的计算表格,所以又称函数表。列表时应注意按自变量增大或减小的顺序排列,应变量与

其一一对应, 自变量间的差值要适宜, 差值过大, 使用时内插不准确, 差值过小又会增大表格篇幅, 表中应注明各变量的名称、符号和单位, 必要时还要加上表注。

列表法的优点是简单易作, 数据应用比较方便, 在表中可以清楚地看出因变量和自变量的变化关系。例如表 0.1 表示纯水在一个标准大气压下它的密度 ρ 随温度 t 的变化。

表 0.1 纯水在标准大气压下的密度随温度的变化

温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	0	4	8	10	15	20	30
密度 ρ (kg/m^3)	999.87	1000.00	999.88	999.73	999.13	998.23	995.67
温度 t ($^{\circ}\text{C}$)	40	50	60	70	80	100	
密度 ρ (kg/m^3)	992.24	988.27	983.24	977.81	971.83	958.38	

表 0.1 只是两个变量间的关系, 在实际工作中, 还有三个变量和四个变量间的列表法。

三个变量的列表法, 将表格中第一行表示一个变量, 第一列表示另一变量, 表中其他各行列皆为第三变量, 例如表 0.2 中表示静水总压力 P 和水深 H 及受压宽度 b 的关系, 由式 $P = \frac{1}{2} \gamma H^2 b$ 列表, 式中 γ 为水的容重, 等于常数 ($\gamma = 9.8 \text{ kN}/\text{m}^3$)。

表 0.2 三个变量列表法 单位: kN

壁宽 b (m) \ 水深 H (m)	1	2	3	4	5	6
1	4.9	9.8	14.7	19.6	24.5	29.4
2	19.6	39.2	58.8	78.4	98.0	117.6
3	44.1	88.2	132.3	176.4	220.5	264.8
4	78.4	156.8	235.2	313.6	392.0	470.4
5	122.5	254.0	381.0	508.0	635.0	762.0
6	176.4	352.8	529.2	705.6	882.0	1058.4

四个变量的列表法, 一般由几张表格组成一组表格, 列表时将变化范围小、连续性差的变量, 按一定差值记在表格顶部, 然后按三个变量的列表方法进行列表。

例如, 水力学 (工程流体力学) 中的曼宁公式

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} i^{1/2}$$

其中含 V 、 n 、 R 、 i 四个变量, 列表时将 n 以一定差值放在表顶部, 如 n 为 0.02; 0.0225, 0.025, 0.030... 按三变量列成表 0.3 形式的表格。

列表法最多只能用于四个变量的函数式, 所以有一定的局限性。

(2) 图形表示法。是根据试验测得的数据点绘成曲线 (或直线) 图形, 表示变量之间的关系, 这种表示法的优点, 是变量间的关系明显直观, 数据应用方便, 并能显示出最大、最小和转折点等情况。所以对实验工作有启示作用, 根据实验数据作图, 一般要注意以下几点:

1) 图纸的选择。常用的图纸有等分直角坐标纸、双对数坐标纸、半对数坐标纸, 究竟选用哪一种, 应根据实际情况而定, 大家知道, 在图形中直线是最容易绘制, 而且使用方便, 因此对于幂函数型曲线, 可采用双对数坐标纸; 指数型函数曲线, 可采用半对数坐

标纸，这样曲线图形就变成了直线图形，其实质就是将幂函数和指数函数经过对数变换，而成为直线函数。

表 0.3 四个变量列表法

n=0.0225						
R (m) i	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
1	0.444	0.629	0.770	0.889	0.994	1.089
2	0.706	0.998	1.222	1.411	1.578	1.728
3	0.924	1.307	1.601	1.850	2.067	2.265
4	1.120	1.584	1.940	2.240	2.504	2.743
5	1.300	1.838	2.251	2.599	2.906	3.183

n=0.025						
R (m) i	0.0001	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006
1	0.126	0.179	0.219	0.253	0.283	0.310
2	0.201	0.284	0.384	0.402	0.449	0.492
3	0.263	0.372	0.456	0.526	0.588	0.645
4	0.319	0.451	0.552	0.637	0.713	0.781
5	0.370	0.523	0.641	0.740	0.827	0.906

注 表中 V 的单位为 m/s。

2) 纵横坐标比例尺的确定。一般以横坐标表示自变量，纵坐标表示因变量。确定比例尺大小的原则，是所有实验点据都能在坐标轴上定出来，并考虑实验点据的精度，使在图纸上绘出的曲线（或直线）有近于 1 的斜率，或使曲线的坡度位于图纸上 30°~60°之间，为了符合上述要求，根据实验数据采用不同的纵横比例尺进行试绘，当符合要求后，决定纵横比例尺。

3) 在坐标轴上要标注变量名称、符号、单位，并将实验数据准确地点在图纸上，若数据的种类或来源不同时，要用不同的点符加以区别。

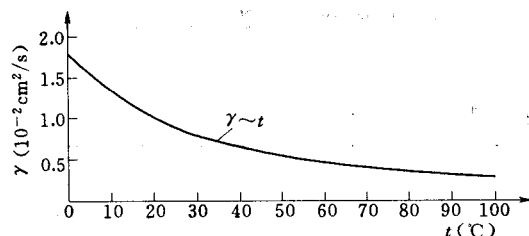
4) 根据实验点连曲线，在连曲线之前，要详细观察诸实验点的分布趋势，然后用铅笔轻轻地绘出一条光滑曲线，再根据位于曲线两边的实验点据基本相等和两边实验点至曲线的垂直距离的总和也大致相等的原则，对曲线进行修改，最后用曲线板复描，注意曲线不能向实验点外任意延长，如在一张图纸上有几条曲线，应分别用不同的线（如实线、虚线、点划线等），加以区别，以免混乱。

5) 对图中不同线型和不同实验点符所代表的资料或来源应加以注释，必要时对图还要加以简单的说明，以便应用。

例如，在一个标准大气压下测得水的运动粘滞系数 γ 随温度变化数据如表 0.4 所示。

表 0.4 标准大气压下测得的运动粘滞系数 γ 随温度变化数据

温度 t (°C)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
运动粘滞系数 γ ($10^{-2}\text{cm}^2/\text{s}$)	1.794	1.310	1.010	0.804	0.659	0.556	0.478	0.416	0.367	0.328	0.296

图 0.3 $\gamma \sim t$ 曲线

用图形表示如图 0.3 所示。

图 0.3 表示法仅是两个变量之间的变化关系, 若在实际工作中遇到三个变量之间的关系时, 可以取其中的一个变量作为参变数, 对其他两个变量间的关系, 进行作图表示。

例如, 平底闸孔淹没出流时, 淹没系数 σ_s 与相对水位差 $\frac{\Delta Z}{H}$ 和相对开启度 $\frac{e}{H}$ 有关, 这是一个三变量之间的关系, 在用图形表示时, 可以将相对开启度 $\frac{e}{H}$ 作为参变数, 作 σ_s 和 $\frac{\Delta Z}{H}$ 之间的图形, 如图 0.4 所示。

(3) 方程表示法。上面介绍的列表法和图形表示法, 往往就事论事, 不能深刻地反映变量之间的内在联系, 为了克服这一缺点, 可以采用方程表示法, 将实验数据中因变量和自变量间的变化关系, 用数学方程的形式表示出来, 称为回归方程 (或经验公式), 回归方程有直线回归方程和曲线回归方程。简单经验公式 (回归方程) 的求法详见附录 1.1.7。

0.3.3 整理实验报告的一般方法

实验报告是实验成果的如实反映, 因此要求在整理实验报告时, 尊重科学, 忠于原始观察资料, 严禁任意修改数据, 抄袭他人成果, 对试验结果要进行分析判断, 发现错误要重做。书写要工整, 文句要简明, 计算、绘图要准确, 在报告上要写清实验名称, 必要时在报告最后加以说明。

教学实验报告内容大体包括以下六个方面:

- (1) 实验目的。
- (2) 实验仪器 (包括号码、草图或剖面图, 已知常数)。
- (3) 简述试验原理, 列出所用公式, 并根据公式设计出合理的记录表格。
- (4) 按照要求进行数据处理。
- (5) 分析试验结果, 得出实验结论。
- (6) 回答思考题。

研究、设计性实验报告内容大体包括以下六个方面:

- (1) 研究内容概述。
- (2) 研究方法介绍。
- (3) 数据处理。
- (4) 试验结果。
- (5) 结果分析及建议。
- (6) 参考文献。

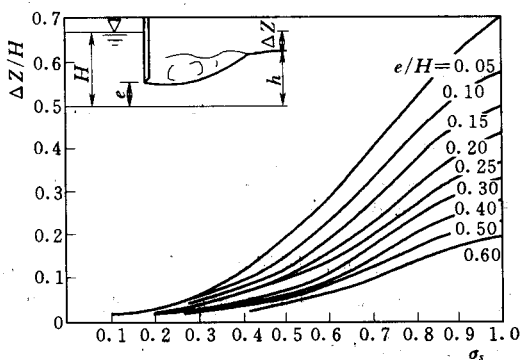


图 0.4 平底闸孔淹没系数关系图

第1篇 水力学（工程流体力学）

流体要素的量测

水力学（工程流体力学）实验，实质上就是对各水力要素进行实验性的探究，因此实验本身就不仅是定性地观察水流现象，更重要的是对各水力要素进行一系列的定量的测量工作，从一系列的测量数据中分析研究出水流运动各要素之间的内在规律，这样才能达到水力学（工程流体力学）实验的目的。

本篇从明渠流和管流以及气流三个方面介绍了流体运动要素的量测，同时对流体要素现代量测技术和流体运动的演示技术进行了简介。

第1章 明渠流水力要素的量测

明渠流有着其特有的流动特点，一般来讲，流体上方作用的是大气压强，且大多为开敞式，但其流动易受风力、边界等多因素的影响。形成恒定流动较困难，因而水力要素量测值多为时均值。下面分别介绍水位、流速、流量在明渠中常用的量测方法。

1.1 水位的量测

水位的量测是水力要素量测中的重要内容之一，在水力学（工程流体力学）教学实验或有关科学研究的实验及原型观测中，量测水位是必不可少的。当水流运动状态不同时，水流表面特性也有区别。量测水位必须针对其不同的特点选取比较合适的量测仪器和量测方法。

1.1.1 测尺

直接将具有一定刻划精度的工程塑料或金属制的尺子插入水中或在玻璃水槽、玻璃测压管外面进行测读（见图 1.1），此法简单易行，但由于水的表面张力和水面波动的影响精度较低。在测量过程中要注意尺子的起始刻度所在位置。

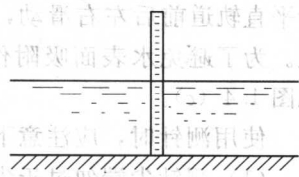


图 1.1 水尺法示意图

1.1.2 连通测压管法

测压管是用来量测某过水断面水位的，测压管是根据连通管原理制作的，它是由测压孔、连通管与测压管等几部分组成，如图 1.2 所示。测压管一般多用玻璃管，管后附有刻度尺或管中装有测针 [见图 1.4 (a)] 来量测液面的高程。管子的内径最好大于 10mm，否则，会因毛细管作用而影响测量的精度。管的内径必须均匀，如用多管组成测压管组时，各管内径也要相等，否则，毛细管升高将有不同。管内必须保持清洁，不然也会影响精度。

测压孔为在盛水容器（如水箱、管道、水槽等）的底板或侧壁等处开设的径向小孔，