

流体力学和水力学实验

俞永辉 张桂兰 编著

俞永辉 张桂兰 编著

六、计算表

测量断面	测量项目	测点距断面中心距离 y	测点编号					边界 ($v=0$)						
			边界 ($v=0$)	3	2	1	轴心位置 ($v=v_m$)	1'	2'	3'	边界 ($v=0$)			
														0

-33
4

同济大学出版社

流体力学和水力学 实 验

俞永辉 张桂兰 编著

同济大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

流体力学和水力学实验/俞永辉 张桂兰编著. —上海:
同济大学出版社, 2003. 3
ISBN 7-5608-2589-3

I. 流… II. ①俞… ②张… III. ①流体力学
—实验—高等学校—教材 ②水力实验—高等学校—教材
IV. ①O35-33 ②TV131

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 010891 号

流体力学和水力学实验

俞永辉 张桂兰 编著

责任编辑 陶文文 责任校对 郁 峰 封面设计 陈益平

出 版	同济大学出版社
发 行	(上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)
经 销	全国各地新华书店
印 刷	崇明裕安印刷厂印刷
开 本	850mm×1168mm 1/32
印 张	3.25
字 数	94 000
印 数	1—4 000
版 次	2003 年 3 月第 1 版 2003 年 3 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5608-2589-3/O · 231
定 价	5.50 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换

前 言

高等工科院校的“流体力学”和“水力学”课程,是需要同时有相应的教学实验课来配合的。本书就是《流体力学》和《水力学》(同济大学版)的配套教材。它通过实验来研究和演示流体运动的基本规律,使学生在“学习“流体力学”和“水力学”课程时,加深对课程中基本概念的理解,培养实验的动手能力和严谨踏实的科学作风。

本书所列的实验是同济大学的多学时专业课程——“流体力学”和“水力学”中所开设的实验,共 21 个。其中,7 个实验要求学生自己动手,另 14 个实验则为教师演示。每个实验基本包含实验目的、实验基本原理、实验装置、实验步骤及思考题。对于该课程的少学时专业,可根据不同专业的要求而选做。书中所介绍的实验仪器是同济大学基础力学中心实验室目前所拥有的。

本书中所涉及的名词、术语和符号,原则上以国家标准为依据。鉴于目前国内《流体力学》和《水力学》教材中所用符号存在较大差异,我们对其中的名词、术语和符号都尽可能按国家标准规范行使。

本书是在原同济大学流体力学教研组和水力试验室编写的《流体力学、水力学实验指导书》的基础上改编的,在此,对原作者表示敬意和感谢! 改编中还增设了近几

年来同济大学基础力学中心实验室新增的相关实验内容,其中包括超声波流量仪和电磁流量仪的使用等。

参加本书编写的人员有俞永辉(第一章;第二章中的 § 2-1~2-10, § 2-16;第三章),张桂兰(第二章中的 § 2-11~2-15, § 2-17~2-21)。全书由同济大学基础力学专业教师朱立明和柯葵审定。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评和指正。

编 者

2002 年 11 月于同济大学

目 录

前言

第 1 章 绪论/1

- § 1-1 实验的意义和目的/1
- § 1-2 实验须知/1
- § 1-3 实验报告要求/2
- § 1-4 实验室总体简介/3
- § 1-5 基本要素的量测简介/3

第 2 章 实验内容/11

- § 2-1 静压传递实验/11
- § 2-2 静水压力实验*/13
- § 2-3 液体相对平衡实验/15
- § 2-4 流线演示实验/18
- § 2-5 能量方程实验*/20
- § 2-6 文氏流量计实验*/22
- § 2-7 动量方程实验*/24
- § 2-8 流态演示实验/27
- § 2-9 管路沿程阻力实验*/29
- § 2-10 自循环流动流谱显示实验/31
- § 2-11 管路局部阻力实验/32

* 该实验为学生动手实验,其他为教师演示实验。后同。

- § 2-12 水击演示实验/35
- § 2-13 孔口、管嘴实验/36
- § 2-14 水跃演示实验/39
- § 2-15 堰流实验*/40
- § 2-16 水面曲线实验/42
- § 2-17 矩形弯管内的流动实验/46
- § 2-18 平板附面层实验/48
- § 2-19 流体横向绕流(绕圆柱体)实验/52
- § 2-20 紊流射流实验/56
- § 2-21 水泵特性曲线测定实验*/58

第 3 章 实验报告/63

- § 3-1 静水压力实验/63
- § 3-2 液体相对平衡实验/65
- § 3-3 能量方程实验/67
- § 3-4 文氏流量计实验/73
- § 3-5 动量方程实验/75
- § 3-6 管路沿程阻力实验/77
- § 3-7 管路局部阻力实验/79
- § 3-8 堰流实验/81
- § 3-9 矩形弯管内的流动实验/83
- § 3-10 平板附面层实验/85
- § 3-11 紊流射流实验/89
- § 3-12 水泵特性曲线测定实验/95

第 1 章 绪 论

§ 1-1 实验的意义和目的

实验,是流体力学和水力学课程的组成部分之一。流体力学和水力学问题是错综复杂的,其复杂性在于其影响因素很多。由于人们对流体运动规律认识的局限性,因此还有许多问题并非由理论分析就能解决,往往有赖于实验;在某些场合,实验已成为解决问题的主要途径。事实上,不少流体运动规律和公式都是通过实验而总结出来的。在工程中,利用模型实验来研究流体运动现象、修改设计方案是非常普遍的。因此,流体力学和水力学实验,无论对从事理论研究或对解决工程实际问题,都具有极其重要的意义。

- 流体力学和水力学教学实验课的目的主要有以下几个方面:
- 观察流体的流动现象,增加感性认识,提高理论分析的能力;
 - 验证流体力学和水力学的原理,测定经验系数值,以巩固所学的理论知识;
 - 学会使用实验室的基本量测仪器,掌握一定的实验技能;
 - 培养分析实验数据、整理实验成果及编写实验报告的能力;
 - 培养严谨踏实的科学作风。

§ 1-2 实验须知

1. 实验前必须预习

预习时,应仔细阅读实验指导书及有关的教材资料,明确实验

的目的、要求和有关的实验原理,了解操作步骤和有关的仪器设备,做到心中有数;并列出实验所需要的表格。

2. 严肃认真地进行实验

到实验室后,必须保持安静,不得谈笑喧哗,不准吸烟,不准碰动与本实验无关的设备。实验时,应按实验书的要求,全神贯注地按步骤进行操作,并注意多观察流体运动现象,多思考分析问题,及时记录实验原始数据。

3. 保持良好的科学作风

实验时,应尊重原始数据,不得任意更改;实验后,应进行必要的检查和补充,经指导教师同意后,方可离开实验室;应及时整理实验数据,绘制所要求的关系曲线,认真编写实验报告。

4. 遵守规章制度

实验时,必须遵守实验室的各项规章制度,严格遵守操作规程;如发生事故或损坏设备,应立即报告指导教师,查清责任,按学校有关规定处理。

§ 1-3 实验报告要求

(1) 实验报告一般应包括:① 实验的目的和要求;② 实验设备简图;③ 水流现象描述及实验原始记录;④ 实验成果的整理计算,按要求绘制关系曲线图;⑤ 分析讨论回答思考题并给出结论和答案。

(2) 按上述内容要求认真编写实验报告。实验书上的原理、仪器设备说明及注意事项不必重新抄写。

(3) 实验报告必须独立完成,并按时上交;报告书应按书中的实验报告要求书写。

(4) 实验报告经教师批改后,应认真阅读,及时改正;不合格的,则要重写实验报告或重做实验。

§ 1-4 实验室总体简介

实验室是教学和科研的重要基地。实验室除了应有满足教学和科研的整套仪器外,还应有一套基本设备。本实验室的主要设备是供水系统,由水池、水泵、水塔和有关的附属设备构成。

本实验室供水系统采用循环水系统,即水由水泵自室外水池中抽取,送至水塔,然后由水塔中的输出管分送到各个仪器以供实验;经过各个实验仪器流出之水,则由室内地下回水沟排入水池,构成水流不断循环的系统。因此,在一般实验过程中,并不损失水量,而仅是电能的消耗。

§ 1-5 基本要素的量测简介

1. 水位的量测

用水位测针仪量测水位时,测针杆能上下移动,标示水位。此方法简捷明了。

还有用超声波水位仪量测水位。此外,还有电测法,其常用的水位仪有电阻式、电容式以及数字编码自动跟踪式等。

2. 压力的量测

(1) 金属压力表

金属压力表用来量测较大的压力。压力表所测压力为相对压力,又称表压。另有一种金属真空表,所测数值为真空度。

(2) 测压管

测压管是用来测量对应点上的压力的。测压管一般多用玻璃管,管内充满已知容重的液体。

(3) 比压计

比压计是用来测量流体的两个不同点的压力差值的。若两点的高程不同,该差值就是两点的压力之差。常用比压计有水比压

计和水银比压计等。

3. 流速的量测

(1) 毕托管

毕托管是实验室最常用的测速设备,它由测压管(静压管)和测速管(动压管)两部分组成。测速时,将毕托管置于被测流体的相应点,动压孔对准来流方向,根据公式 $v = K\sqrt{2g\Delta h}$,通过比压计上的差值 Δh ,就能计算出该点的流速 v 。 K 为毕托管修正系数,可由实验确定。

由于毕托管本身不能自动调整方向,量测时须使毕托管的方向与水流方向一致,此时读数应最大,否则测得的数值就不正确。使用前,应将毕托管放入静水匣,观察其两个测压管内液面是否处于同一水平面,以鉴别管内是否有气泡;如有积气,应设法将其排走。使用时,也需注意勿使毕托管露出水面,以免漏进空气。当被测介质为气体时,可直接与微压计连接测读。

毕托管不宜量测过小的流速。当流速小于 10cm/s 时,测量结果误差较大。毕托管量测的流速是时间平均值。另外,仪器本身对流场有一定的干扰。

(2) 微型旋桨式流速仪

微型旋桨式流速仪主要用于测量明渠水流等流速,是目前国内外实验室常用的量测仪器。它是由旋桨传感器、计数器及有关配套仪表所组成。使用时,将旋桨传感器固定于被测点,使旋桨正对流动方向,由水流作用使旋桨转动。流速越大,转动越快。由于流速与旋桨的转速呈线性关系,可根据转速计算出水流流速。

实验室除上述两种测量仪器外,目前还拥有较为先进的测试手段,如激光测速仪、热线流速仪和超声波流速仪等。

4. 流量的量测

(1) 体积法

用体积法测流量时,以秒表计量时间,以量筒或水箱测出相应计量时间内液体的体积。体积法一般用于量测较小的流量。

(2) 质量法

质量法测流量与体积法基本一致,区别在于所得结果为质量流量而非体积流量。

(3) 堰板法

堰板法测流量,简便易行,精度也较高,目前被广泛用于实验研究中。堰板形式有三角堰、矩形堰和梯形堰,适用于不同流量范围。

(4) 文丘里管法

文丘里管是在有压管道上量测流量的一种仪器。它是由圆锥形收缩段、圆柱形喉管和圆锥形扩散段三部分结合比压计而组成的。由于喉管断面收缩,断面流速加大,动能变大,势能变小,喉管断面的测压管高度和收缩段进口断面的测压管高度就有一差值 Δh 。由能量方程和连续性方程,可推导出文丘里管的流量公式:

$$Q = \frac{\pi}{4} \times \frac{D^2 d^2}{\sqrt{D^4 - d^4}} \sqrt{2g\Delta h}$$

式中 D ——管道直径;

d ——喉管直径。

与文丘里管相类似的测流量设备还有孔板流量计和喷嘴流量计。这两种流量计的工作原理与文丘里管相同。

(5) 超声波明渠流量计(图 1-1)

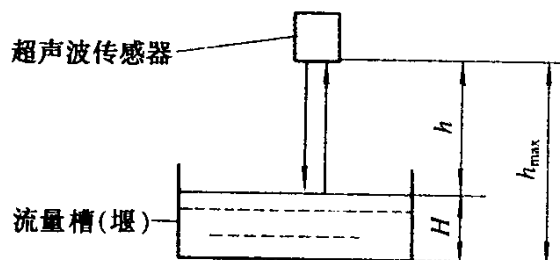


图 1-1 超声波明渠流量计原理图

LMC 超声波明渠流量计为明渠量测设备。该仪器采用气介

质集成超声波传感器进行液位测量,实现非接触测量。当被测介质全部通过流量槽(巴歇尔槽,Parshall)或堰(薄壁三角堰、薄壁矩形堰)形成自然流动时,其流量 Q 与流量槽上游水位 H 就有如下关系:

$$Q=KH^n$$

式中 K ——流量系数,其对于不同规格的槽和堰,各有不同的值;

H ——液位高度(m);

n ——指数值。

气介质超声波液位传感器在微处理机系统的控制下,进行超声发射和接收。由超声波的传播时间 t 可计算传感器与液面之间的距离:

$$h=\frac{ct}{2}$$

式中, c 为超声波在空气介质中的传播速度(m/s)。

设传感器至流量槽(堰)零液位时的距离为 $h_{\max}$,则液位高度:

$$H=h_{\max}-h$$

(6) 电磁流量计

LD-F 型电磁流量计中的变送器是根据法拉第电磁感应原理制成的,它与 LDZ-3 型或 LDZ-1A 型电磁流量转换器配套组成电磁流量计,用来测量各种导电液体或液固两相介质的体积流量。

如图 1-2 所示,当导电液体沿测量管在交变磁场中做与磁力线垂直方向的运动时,导电液体切割磁力线而产生感应电势;而在与测量管轴线和磁场磁力线相互垂直的管壁上,安装了一对检测电极,可把这个感应电势检测出来。

若感应电势为 E ,则有

$$E=k\sigma B\bar{v}l$$

式中 B ——磁感应强度(T, $1\text{T}=1\text{Wb}/\text{m}^2$);
 l ——电极间的距离,近似于测量管的内径(m);
 $\bar{v}$ ——测量管内被测流体在横截面上的平均流速(m/s);
 k, σ ——与磁场分布及轴向长度有关的系数。

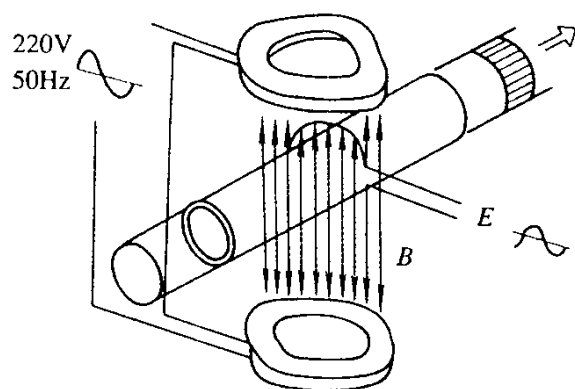


图 1-2 电磁流量计原理图

瞬时流量 $Q(\text{m}^3/\text{h})$ 与流速 $\bar{v}$ 的关系为:

$$Q = 3600 \bar{v} A = 3600 \times \frac{E}{B l k \sigma} \times \frac{\pi l^2}{4}$$

$$= \frac{900 \pi l}{B k \sigma} E = K E$$

式中 A ——测量管横截面的面积(m^2);
 K ——仪表常数。

(7) 超声波流量计(用于有压流)

超声波流量计根据测量原理的不同,大致可分为以下几类:

- 传播速度法(时差法、相位差法和频差法);
- 多普勒效应法;
- 相关法;
- 波速偏移法。

目前最常用的测量方法主要有两类:时差法和多普勒效应法。

目前,用于测量管道流量的超声波流量计一般有 TDS-100

(采用时差法,测量纯净单一液体),还有 LDZ-1J 型多普勒流量计(采用多普勒效应法,测量混合液体)两种。

1) 时差法工作原理

时差法是通过测量超声波脉冲顺流传播和逆流传播的时间差来进行流量测定的方法。其基本原理如图 1-3 所示。

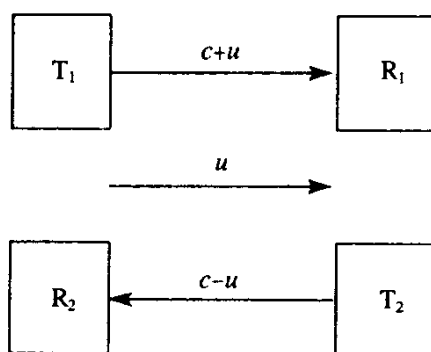


图 1-3 时差法测速示意图

在被测流体介质中,安置着两个超声波发声器 T_1 和 T_2 ,一个顺流发射超声波,另一个逆流发射超声波。在两个超声波发射器的顺、逆流方向和相同距离处,分别装有两个接收换能器 R_1 和 R_2 ,从而形成两组发射器→换能器,组成了两个通道。当被测介质处于静止状态时,两个通道中的超声波速度是相同的,两个接收换能器接收到的声信号没有任何差别。但是当流体流动的时候,情况就发生了变化。在顺流通道 $T_1 \rightarrow R_1$ 中,由于叠加了流体的速度,超声波在声道上的顺流声速为:

$$c_1 = c + u;$$

同样,在逆流通道 $T_2 \rightarrow R_2$ 中,逆流声速为:

$$c_2 = c - u$$

式中 c ——声波在静止流体中的声速;

u ——被测流体的流速。

这样,两个接收换能器接收到的信号之间就产生了与流速有

关的差别。假定声道(即发射换能器与接收换能器之间的实际距离)长度为 L , 则超声波的顺、逆流传播时间分别为:

$$\text{顺流时间} \quad t_1 = \frac{L}{c+u} \quad (1-1)$$

$$\text{逆流时间} \quad t_2 = \frac{L}{c-u} \quad (1-2)$$

将式(1-1)和式(1-2)联立求解可得:

$$u = \frac{L}{2} \times \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \quad (1-3)$$

由式(1-3)可以看出, 当声道长度固定时, 流体的流速与声波在顺、逆流声道中传播的时间差 Δt 成正比, 而与顺、逆流传播时间的乘积 $t_1 t_2$ 成反比。如果能够测得声波在顺、逆流声道中的传播时间, 根据式(1-3)就可以求出当前流体沿声道的平均流速, 再根据流速与体积流量之间的关系式, 就可以得到体积流量:

$$Q = k \frac{\pi D^2}{4} u \quad (1-4)$$

式中 Q ——体积流量(m^3/s);
 k ——流速修正系数;
 D ——管道内径(m);
 u ——沿声道上的流速(m/s)。

2) 多普勒效应法工作原理

多普勒效应法是一种利用声学上的多普勒效应进行流量测定的方法。它要求被测介质当中含有一定量的悬浮颗粒或气泡。所谓多普勒效应, 系假定声源、观察者(此处为超声波换能器)与介质之间是相对运动的, 在这种情况下观察到的超声频率与声源的发射频率有所不同。根据这一效应, 当向流体中的悬浮粒子发射频率为 f_T 的连续超声波时, 假设被悬浮粒子所反射的超声波的频率为 f_R , 则 f_T 与 f_R 将服从多普勒关系。假设粒子的移动速度为

u , 超声束与粒子移动速度方向之间的夹角为 θ , 则 $u\cos\theta$ 可以看作是声源的移动速度(如图 1-4 所示)。这时, 多普勒关系可以写成下面的式子:

$$f_R = \frac{c + u\cos\theta}{c - u\cos\theta} f_T$$

近似可得:

$$f_R = \left(1 + \frac{2u\cos\theta}{c}\right) f_T$$

所以, 多普勒频移 $\Delta f (= f_R - f_T)$ 和流速 u 之间的关系为:

$$\Delta f = f_R - f_T = f_T \frac{2u\cos\theta}{c}$$

即

$$u = \frac{c}{2\cos\theta} \times \frac{\Delta f}{f_T}$$

在这里, 流速 u 与多普勒频移 Δf 成正比。

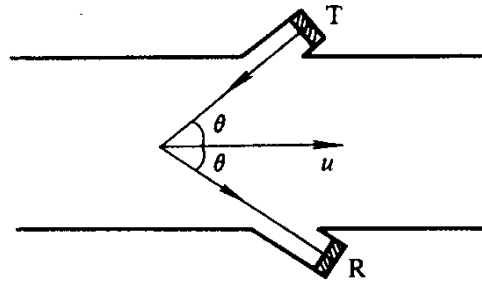


图 1-4 超声波多普勒效应

同样地, 体积流量为:

$$Q = k \frac{\pi D^2}{4} u = k \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{c}{2\cos\theta} \times \frac{\Delta f}{f_T}$$

即体积流量也与多普勒频移 Δf 有正比关系。

这里需要说明的是, 在上面的推导中, 假定被测流体中悬浮粒子的运动速度和流体的流速相同。