

王 英 谢晓晴 李海英 主编

流体力学

实验



中南大学出版社

流体力学实验

王 英 谢晓晴 李海英 主编

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

流体力学实验/王英,谢晓晴,李海英主编. —长沙:
中南大学出版社,2005.8
ISBN 7-81105-133-8

I. 流... II. ①王...②谢...③李... III. 流体力
学-实验-高等学校-教材 IV. 035-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 094380 号

流体力学实验

王英 谢晓晴 李海英 主编

☐责任编辑 刘 辉

☐责任印制 汤庶平

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 中南大学印刷厂

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 6 ☐字数 137 千字

☐版 次 2005 年 7 月第 1 版 ☐2005 年 7 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81105-133-8/G·049

☐定 价 10.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前言

一、流体力学实验教学的目的

流体力学是研究流体的平衡和机械运动规律的一门科学,是许多专业重要的技术基础课。实验方法是研究技术科学的重要手段,在流体力学中,尤其占有重要的地位。由于流体运动的复杂性,使得流体力学研究离不开科学实验。现代流体力学就是在纯理论的古典流体力学与偏重实验的古典水力学结合后才蓬勃发展起来的,理论分析、实验研究和数值计算是其三大支柱。因此,教学实验是学习流体力学课程必不可少的重要环节之一。其目的主要有:

1. 观察液流现象,增加感性认识,提高理论分析能力;
2. 验证流体运动的基本规律,测定经验系数值,巩固加深理论知识的学习;
3. 学会使用基本的量测仪器,掌握一定的实验技术和操作技能,锻炼动手能力;
4. 进行分析实验数据、整理实验成果及编写实验报告的训练,培养独立思考和独立工作的能力;
5. 树立严谨细致、实事求是的科学作风和爱护国家财产的良好风尚,为进行科研工作打下初步基础;
6. 利用或稍加改动现有仪器设备,改进、设计新的实验,量测新的参数,培养创新精神和能力。

二、本教材的主要内容及特点

为了扩大学生的知识面,增强工程概念,本书特别撰写了流动要素量测简介;对流谱流线演示等9项演示型实验,流体静压强实验等10项量测型实验在实验目的、实验原理、实验装置、实验方法与步骤、注意事项等方面进行了详尽的指导;重点突出了实验成果分析与问题讨论,针对实验中观察到的液流现象、量测到的实验数据,提出一些问题供同学们思考与讨论,并提出改进性、设计性及创新性实验要求,书后以实验量测结果为依据,综合应用了流体力学、应用数学、量测技术等相关知识,以文字、数学分析和图表等形式,作了比较系统、全面、深入的解答,解答不局限于问题本身,还介绍了涉及到的与问题密切相关的工程实例、实验技巧,以加强学生分析问题、解决问题能力的锻炼,培养工程观念、创新精神与能力。

三、对学生的要求

学生在实验前,应先学习学生实验守则,预习实验指导教材及实验报告中的相关内容。实验中仅仅能按规定完成实验操作步骤是远远不够的,还必须针对实测成果和演示型实验的观察进行问题讨论和实验,分析与思考。提倡独立实验,鼓励采用智能方法处理实验数据,避免繁琐计算,支持对现有实验装置进行大胆的设计和改进,进行实验探索。

本教材由中南大学王英(第1、2、3、4章)、谢晓晴(第2、3、4章)、李海英(第3、4章)共同编写。由于时间仓促,可能存在疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正!

编者
2005年5月

目 录

第1章 流动要素量测	(1)
1.1 液位量测	(1)
1.2 压强量测	(4)
1.3 流速量测	(8)
1.4 流量量测	(12)
第2章 演示实验	(19)
2.1 流谱流线演示实验	(19)
2.2 流动现象演示实验	(21)
2.3 静压传递自动扬水演示实验	(25)
2.4 紊动机理演示实验	(26)
2.5 虹吸原理演示实验	(29)
2.6 水击综合演示实验	(31)
2.7 明渠水面曲线演示实验	(34)
2.8 水跃、水跌演示实验	(37)
2.9 堰、闸及桥、涵出流演示实验	(38)
第3章 量测实验	(40)
3.1 流体静压强实验	(40)
3.2 平面静水总压力实验	(43)
3.3 能量方程实验	(45)
3.4 动量方程实验	(48)
3.5 毕托管测速实验	(53)
3.6 文丘里(孔板)流量计实验	(55)
3.7 雷诺实验	(58)
3.8 沿程水头损失实验	(61)
3.9 局部水头损失实验	(64)
3.10 孔口管嘴实验	(67)
第4章 实验分析与问题讨论解答指导	(70)
4.1 演示实验	(70)
4.2 量测实验	(76)

第1章 流动要素量测

流动要素是正确反映液流运动的物理量。要取得反映客观实际的实验成果,必须对各种流动要素进行正确的量测与分析,它是流体力学研究、发展与应用的重要环节。流体力学发展历史也充分证明,正是由于对流动要素量测技术的不断改进,量测精度的不断提高,才促进了流体力学学科的发展。因此,要做好流体力学实验,首先必须重视流动要素的量测。

本章着重介绍表征液流特征的几个重要流动要素如液位、压强、流速和流量的量测原理和方法。

1.1 液位量测

液位即液面高程,液位量测常用的仪器包括:测尺、测针与测压管。

1.1.1 测尺

将木制或金属制的测尺垂直置入液体中,直接测读液面高程。由于表面张力的影响,此法精度较低,但它直接、简单。常常可见在桥墩、码头上设置的水尺,以直观地显示水位的涨落。

1.1.2 测针

1. 测针构造与使用

传统型测针的构造如图 1.1.1 所示。测针杆是可以上下移动的标尺杆,量测时置于固定在支架上的套筒中,套筒上刻有游标。芯体位于套筒内,芯体上装有齿条,与微动齿轮配合,旋转微动齿轮,芯体可带动测针及标尺做上下微量移动,使测针尖端接触液面。测针的尖端可以做成针形,也可以做成钩形。

当测针尖端接触液面后,游标上的零对应测针杆标尺的数值为液位值。测针的单位刻度是 1 mm,游标刻度与测针刻度重合处游标读数的精度是 0.1 mm。例如图 1.1.1(c),游标上的零对应测针的读数在 2.2cm 与 2.3cm 之间,找到游标上 6 的刻度与测针上某一刻度重合,故液位值为 2.26cm。

在上下移动测针杆量测液位时,应首先用一只手托住芯体,另一只手抓住测针杆将其向上(或下)移动到所需位置附近,此步骤称为粗调(粗调时芯体不随测针杆移动)。再用微动齿轮仔细地将其调整到测针尖刚好接触液面,此步骤称为细调。由于微动齿轮调节范围有限,细调范围一般不应大于 0.4 cm,以免损坏设备。当向某一方向细调受阻时,应将微动齿轮向相反方向旋动,使测针杆向上(下)移动 1.5 cm 左右,再按先粗调、后细调的步骤将测针杆移至所需位置。

2. 几点注意事项

(1) 针尖勿过于尖锐,以半径为 0.25 mm 的圆尖为宜。

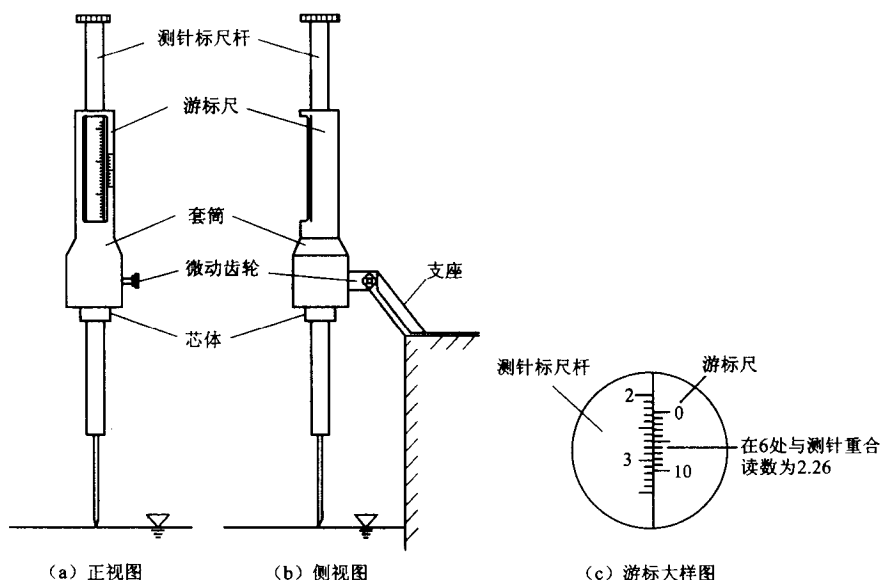


图 1.1.1 传统型测针

(2) 为了避免表面张力影响、提高量测精度,应当将测针自上而下地逐渐接近液面,当针尖刚好与液面接触时便立即停止移动测针。当测针尖端在液中的倒影与针尖正好吻合时,读数即为所求。

(3) 当液位略有波动时,应量测液位多次,然后取其平均值。

(4) 根据液位量测的需要,可以在需测液位处设置固定测针架直接用针尖量测液面位置。为了操作方便,也常常利用紫铜管、橡皮管等将液体引出至透明的量筒内,将支架固定在量筒上,测针伸入筒内测读。前种方法直接明了、测读简便,但液面波动大时,不易测读准确;在测针筒内测读液位时,液面平静,精度较高,但只能应用于渐变流断面。同时还要注意防止容器侧壁上的小孔及连接管阻塞或进入气泡,否则测读结果会失真。

测针法被广泛应用于室内液位的量测,能够获得较高的量测精度,但测读的方便性较差。

1.1.3 测压管

测压管是一根两端开口的细直玻璃(或有机玻璃)管,一端通过软管连接在欲量测液位的容器壁上,另一端和大气相通,在管旁设立标尺,如图 1.1.2 所示。根据等压面原理,测压管中的液位必然与容器中的液位同高。读出测压管中液面在标尺上的读数即可间接测出容器中的液位。该法测读方便,在实验室及工业生产中大量应用。

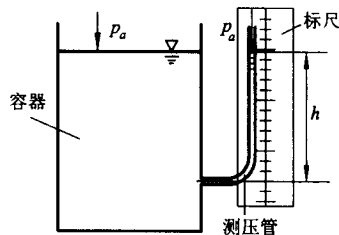


图 1.1.2 测压管

1.1.4 液位量测

学会准确地量测液位,是做好流体力学实验的重要基本功。在进行流体力学实验时,一些量测流量、流速和压强的方法都首先要量测液位。

随着液流运动状态的不同,液面的特征也有区别:静止状态的液体或流速较小的液流,其液面较平稳,很少波动;而流速较大的液流,其液面常出现不规则的波纹,波动明显;高速液流的液面还会混入空气(掺气)。因此,必须针对各种液面的不同特点来选用适当的量测方法。

1. 恒定液位的量测

当液面的位置不随时间改变时,称为恒定液位。通常采用上述的测尺、测针、测压管等直接量测。

2. 非恒定液位的量测

当液面位置随着时间的不同而变化时,是非恒定的液位。常采用液位计来量测。

(1) 浮子液位计

浮子液位计是机械式非恒定液位跟踪量测设备,如图 1.1.3。主要用于江河湖海水位的野外自动跟踪记录。当液面变化时,浮子会跟随液面一起上、下运动,从而带动游标作相应的运动,能够自动在运动着的时间记录纸上绘制液位变化曲线。

浮子液位计较笨重、量测精度较差,但它的优点是适合于量测较大幅度的液位变化。

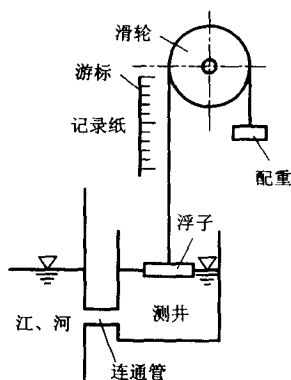


图 1.1.3 浮子液位计

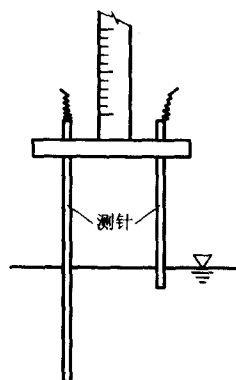


图 1.1.4 电阻式液位计

(2) 跟踪液位仪

跟踪液位仪因其传感器方式不同分为电阻式液位仪和电容式液位仪。下面仅介绍电阻式液位仪。

如图 1.1.4,它的传感器是两个不锈钢测针,一根较长的接地没入液体中较深,另一根较短的工作时其针尖没入液中 $0.5 \sim 1.5\text{mm}$ 。当测针相对于液面不动时,两根测针间的液体电阻是不变的。该电阻接入测量电桥的一个臂,这时电桥是平衡的,无讯号输出。当液位上升(或下降)时,液体电阻增大(或减小),因空气与液体的电导率有很大差别,电桥失去平衡产生输出讯号。输出讯号经放大器放大后,驱动可逆式伺服电机带动测杆上(下)移动,驱使测针又回到平衡位置,这样就实现了测针的自动跟踪液位变化。一般地,跟踪的最大速度为 $5 \sim$

20mm/s,跟踪的最大距离为20~40cm,精度为0.1~0.2mm。跟踪式液位计对温度、液体杂质含量等因素的变化不敏感,因此可靠性较好。但是仪器较为复杂、昂贵。

1.2 压强量测

量测流体压强的大小在工程上是非常普遍的要求,按工作原理的不同,压强量测仪器分成液柱式测压计、弹力测压计与电测计三种;按所测压强的高低,分成压强计与真空计两种,压强计用于量测绝对压强大于大气压强时的相对压强值,真空计用于量测真空压强。此外,根据仪器的构造与尺寸、量测范围与灵敏度、测压液体的种类等,压强量测仪器又可分成若干种。本节主要介绍用于实验室精确量测压强的液柱式测压计。

液柱式测压计是根据流体静力学的基本方程与等压面原理,根据测压管液柱高度来量测流体压强或压差的仪器,其构造简单,方便可靠,量测精度高,但量程小,一般用于低压实验场所。

对于重力场中的常密度流体,如图1.2.1,根据流体静力学基本方程,可以计算流体内部任意两点A、B的压强及压差

$$\begin{aligned} p_A &= p_0 + \rho g h_A \\ p_B &= p_0 + \rho g h_B \\ p_A - p_B &= \rho g (h_A - h_B) = \rho g \Delta h \end{aligned}$$

式中: ρ 为所测液体的密度。

可见:在静止、连通的同种流体中,任意两点的压强差只与这两点的铅直高差有关,而与容器的形状无关,这就是静止流体的连通器原理。用一句简单的话说就是等压面是水平面(注意有前提条件)。

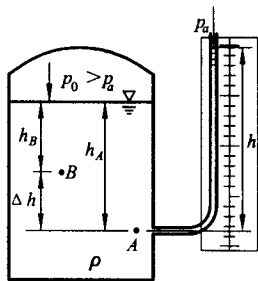


图 1.2.1 测压管

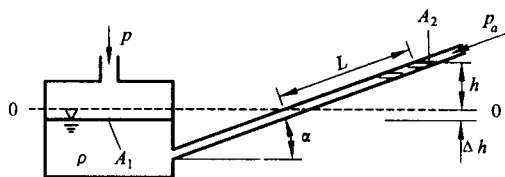


图 1.2.2 微压计

1.2.1 测压管

如图1.2.1所示,欲量测A点的压强。如果A点的绝对压强大于大气压强,测压管中液面将上升,只要设置适当的标尺,读出测压管中自由液面在A点水平面以上的高度 h ,A点的压强即为:

$$p = \rho g h$$

或

$$p'_A = p_a + \rho gh$$

式中: p_A 、 p'_A 分别为 A 点的相对压强、绝对压强, h 称为压强水头或压强高度。

测压管构造简单、造价低、使用方便,用于量测的压强范围为 $0.01 \sim 2.0 \text{ mH}_2\text{O}$ ($98 \text{ Pa} \sim 19.6 \times 10^3 \text{ Pa}$),量测精度与测压管的直径、放置倾角有关(直径为 10 mm 、铅直放置的测压管量测误差约为 $1 \sim 3 \text{ mm}$)。

当压强较低或需要提高量测精度时,可以将测压管倾斜放置,如图 1.2.2 所示,称为微压计。容器横截面面积为 A_1 ,内盛密度为 ρ 的液体,其侧壁装有可调节倾角 α 的横截面面积为 A_2 的测压管。设容器内初始液面为 $0-0$,当容器内液体受待测气体压强 $p(>p_a)$ 的作用而液面下降 Δh 时,倾斜管内液体上升 L 斜长,垂直上升高度为 $h = L \sin \alpha$,达到平衡,于是可得

$$p - p_a = \rho g(\Delta h + L \sin \alpha)$$

从初始液面算起,上下变动的液体体积相等,则 $A_1 \Delta h = A_2 L$,也即是 $\Delta h = \frac{A_2}{A_1} L$,代入上式,得待测气体的相对压强为

$$p = \rho g L \left(\sin \alpha + \frac{A_2}{A_1} \right)$$

若 A_2 远小于 A_1 ,即 $\frac{A_2}{A_1} \approx 0$,则忽略容器中的液面变化,相对压强为

$$p = \rho g L \sin \alpha$$

常用的倾角 α 值为 $10^\circ \sim 30^\circ$,这样可将液柱高度的读数放大 $2 \sim 5$ 倍。

若在测压管中放置与被测液体不相混掺的轻质液体(如煤油),也可量测较低的压强或提高量测精度。

1.2.2 U 形水银测压计

当压强高于 $2.0 \text{ mH}_2\text{O}$ 时,需要的测压管过长,测读不方便,可改用 U 形水银测压计,如图 1.2.3 所示。U 形管内盛水银,一端连接在需要量测压强的部位,另一端与大气相通。在测点压强的作用下, U 形管的左、右侧管中水银液面形成高差,根据连通器原理,水平面 1-2 是等压面, $p_1 = p_2$, 即

$$p'_A + \rho_p g h_1 = p_a + \rho_p g h_2$$

则 A 点的绝对压强 $p'_A = p_a + \rho_p g h_2 - \rho_p g h_1$

A 点的相对压强 $p_A = (\rho_p h_2 - \rho_p h_1) g$

可见只要测出 h_1 和 h_2 的数值,即可求出 A 点的压强。

1.2.3 压差计

压差计是直接量测两点压强差的仪器,一般用 U 形管制成。根据压差的大小, U 形管中可装入空气或各种不同密度的流体。常用的压差计有空气压差计、油压差计、水银压差计三种。

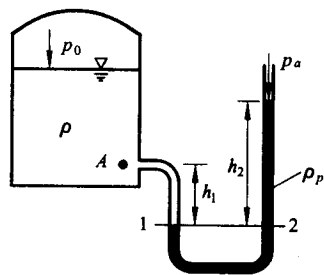


图 1.2.3 U 形水银压差计

1. 空气压差计

空气压差计为一倒置的 U 形管,上部充以空气,下部两端分别用软管连接到容器中需要量测压差的 A、B 两点,如图 1.2.4 所示。图中 1-1 为等压面,因为空气的密度很小,在气柱中因高度差 h 而引起的压强差可以忽略不计,认为两管内的液体表面压强相等。

$$p_A - \rho g(h + h' - H) = p_B - \rho gh'$$

$$p_A - p_B = \rho g(h - H)$$

若 A、B 处同高,则

$$p_A - p_B = \rho gh$$

可见,测得液面高差 h 即可求出 A、B 两点的压强差。

2. 油压差计

当压差较小时,为了提高量测精度,可以将压差计倾斜放置,如图 1.2.5 所示。提高量测精度的另一方法是将空气压差计中的气柱部分装入比所测液体轻的轻质液体(如油),这种压差计称为油压差计。此时上式变为

$$p_A - p_B = (\rho - \rho')gh$$

式中: ρ 为所测液体的密度, ρ' 为轻质液体的密度。

可见,轻质液体的密度越是接近所测液体的密度,则 h 越大,压强差读数的放大倍数越大。

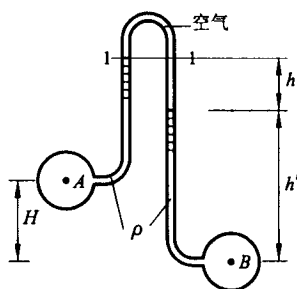


图 1.2.4 空气压差计

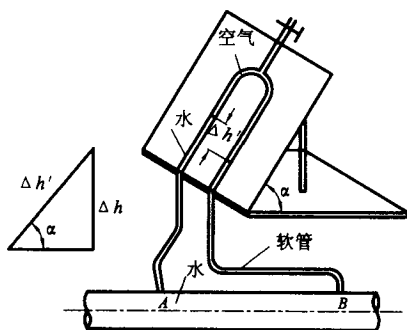


图 1.2.5 倾斜式空气压差计

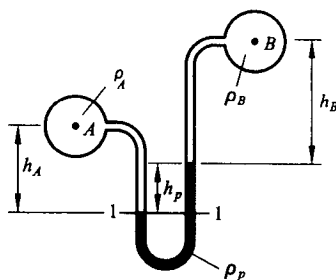


图 1.2.6 U 形水银压差计

3. 水银压差计

当压差较大时,为了方便测读,可在 U 形管中注入水银,如图 1.2.6 所示。图中 1-1 为等压面。

$$p_A + \rho_A gh_A = p_B + \rho_B gh_B + \rho_p gh_p$$

$$p_A - p_B = \rho_B gh_B + \rho_p gh_p - \rho_A gh_A$$

若 A、B 处为同种液体,即 $\rho_A = \rho_B = \rho$, 则

$$p_A - p_B = \rho g(h_B - h_A) + \rho_p gh_p$$

若 A、B 处为同种液体,且同高,即 $h_A = h_B + h_p$, 则

$$p_A - p_B = (\rho_p - \rho)gh_p$$

若此时 A 、 B 处为同种气体,忽略空气密度,则

$$p_A - p_B = \rho_p g h_p$$

1.2.4 真空计

真空计是用来量测真空值的仪器,如图 1.2.7 所示。如果封闭容器 A 中压强 p'_A 小于大气压强,在真空作用下可将容器 B 内的液体吸上一高度 h ,则

$$p'_A = p_a - \rho g h$$

$$p_{vA} = \rho g h = -p_A$$

式中: p_v 为真空值。

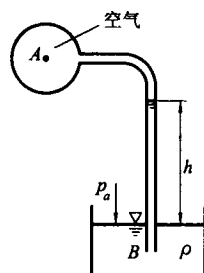


图 1.2.7 真空计

1.2.5 其他测压仪器

1. 弹力测压计

最常用的弹力测压计是金属测压表(图 1.2.8),是利用弹性材料的变形幅度与所测压强成比例,且变形促使指针偏转,从而将压强显示在表盘上。通过量测变形的大小达到量测压强的目的。其优点是携带方便、读数容易。金属测压表(简称压力表)常用于量测较大的压强或真空度(测真空度的压力表称为真空表),压强量测范围可以从几个大气压到几百个大气压,工业上普遍采用,但是它的精度有限。

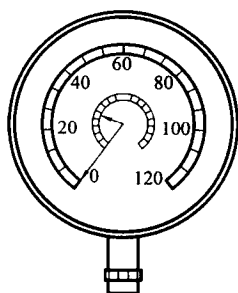
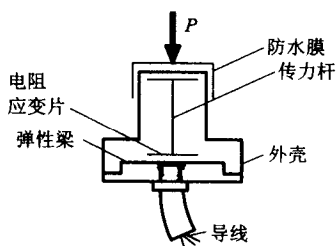
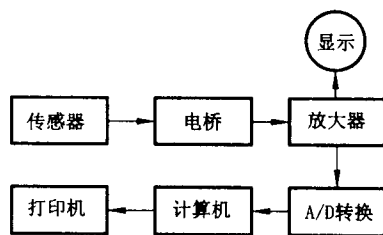


图 1.2.8 金属测压表



(a) 压力传感器



(b) 量测系统框图

图 1.2.9 脉动压强计

2. 压强的电测仪器

如图 1.2.9 所示,其传感器(图 1.2.9a)采用的敏感元件为电阻应变片。压力 P 通过传力杆作用在弹性梁上,使弹性梁弯曲变形,固定在弹性梁上、下侧的应变片将梁的变形转换成应变片电阻的变化。为了提高量测的灵敏度,将应变片电阻作为桥式电路的一个臂,电桥输出信号经放大器放大后,在显示器上显示电阻值;或将放大后的信号存储到计算机中进行分析处理。由此可见,电测仪器先将压强转化成电信号,然后通过对电信号的放大与量测来实现压强的量测。近些年来用压电材料作敏感元件制作的压强传感器应用较为普遍。

电测仪器的优点在于测读的自动化,便于压强变化过程的跟踪与自动记录。因此,它被广泛应用于随时间发生迅速变化的非恒定压强量测。由于电阻应变片或压电材料的性能受温度的影响较大,在电测仪器中需要采用一定的电路设计来减小温度影响。因此,常用的电测仪器

一般较为昂贵。量测精度取决于仪器的率定方法,而且频繁的率定工作既费时又费力。这些缺点限制了电测方法的广泛应用。

1.2.6 脉动压强量测简介

前面介绍的压强量测方法只能量测压强的时均值。当所测压强不是一稳定值,即存在压强的脉动现象时,用前面介绍的方法量测压强,会发现压差计或测压计液面出现波动,此时应注意观察液面波动的范围,取一时均值。

由于生产和科研工作的需要,有时仅能量测压强的时均值是不够的,人们需要了解压强脉动的有关特性,如脉动压强的频率、幅值等精细特性。因此,脉动压强的量测技术得到迅速发展。

量测脉动压强需用特别的压强传感器和专用仪器仪表,可以将压强随时间的变化转换成相应的电量变化记录下来,供人们进行分析和研究。上面介绍的电测仪器就是其中一种。脉动压强量测属于电测技术的一个分支,若需详细了解脉动压强的量测方法,可参阅其他书籍。

1.3 流速量测

在流体力学的科研、生产中,流速量测是常见而且具有实际意义的量测工作。

1.3.1 毕托管法

毕托管是根据元流能量方程设计的最基本的流速量测仪器,是1732年由法国人亨利·毕托(Henri Pitot)发明的,通过压强量测来实现点流速量测,经过200多年来各方面的改进,目前已有几十种型式。下面介绍一种常用的毕托管——普朗特(L. Prandtl)型毕托管。

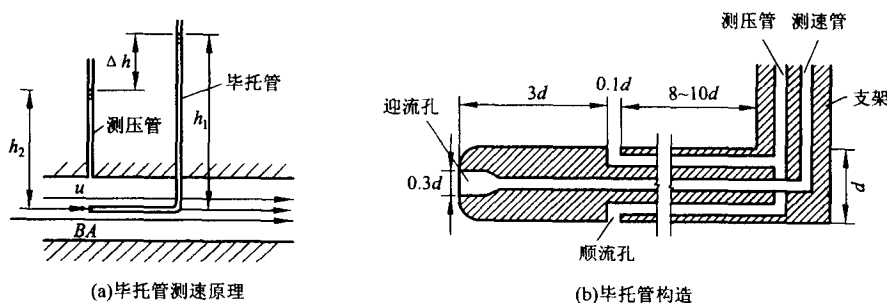


图 1.3.1 毕托管

毕托管测速原理:液流中某点A所在的过流断面上测压管液面高程如图1.3.1(a)中左侧所示,液柱高度为 h_2 。如将一根两端开口的直角弯管插入液流并使其下端管口正对A点的流速方向,则A点的流速由原来的 u 值变为零,由于液流的动能转化为势能,弯管中的液面将比测压管中的液面升高 Δh ,如图1.3.1(a)中右侧所示。对于A点处质量为 dm 、重量为 gdm 的微小液体,在弯管未插入前具有的动能是 $\frac{1}{2}u^2dm$;当弯管插入液流后,该微小液体的动能全

部转化为势能 $gdm\Delta h$, 即

$$\frac{1}{2}u^2 dm = gdm\Delta h$$

于是可得

$$\Delta h = \frac{u^2}{2g}$$

可见弯管与测压管的液面高差 Δh 表示液流中 A 点的单位动能。这个两端开口的直角弯管就称为毕托管, 可用来量测液流中某一点的流速:

$$u = \sqrt{2g\Delta h}$$

只要量测出两管中的液面高差 Δh , 即可按上式计算出 A 点的流速值。

考虑到液流机械能在相互转化过程中存在能量损失、毕托管对液流有干扰以及毕托管与测压管的进口有一定距离等影响, 上式需加以修正, 写为

$$u = \varphi \sqrt{2g\Delta h}$$

式中: φ 称为毕托管流速校正系数。

工厂生产的普朗特型毕托管探头的构造如图 1.3.1(b)。它由两根空心细管组成, 前端迎流的开口连接测速管, 侧面的顺流孔(一般为 4~8 个或做成环形槽状)与测压管相通, 两细管上端用软管分别与压差计中的两根玻璃管相连接。为避免对流场的干扰引起误差, 迎流孔与顺流孔、顺流孔与支架之间的距离不能过小。

图 1.3.2 为毕托管测速示意图。用毕托管量测液流流速时, 将毕托管的下端放入液流中, 并使迎流孔正对测点处的流速方向, 测流前必须首先将毕托管及连接软管内的空气完全排出。如果所测点的流速较小, Δh 的数值也较小, 为了提高量测精度, 可将压差计倾斜放置。施测时, 读出两管沿倾斜方向的液面距离 $\Delta h'$, 并根据玻璃管的倾斜角度 θ 换算出相应的垂直液面高差 $\Delta h = \Delta h' \sin \theta$, 代入公式即可得出测点的流速值。

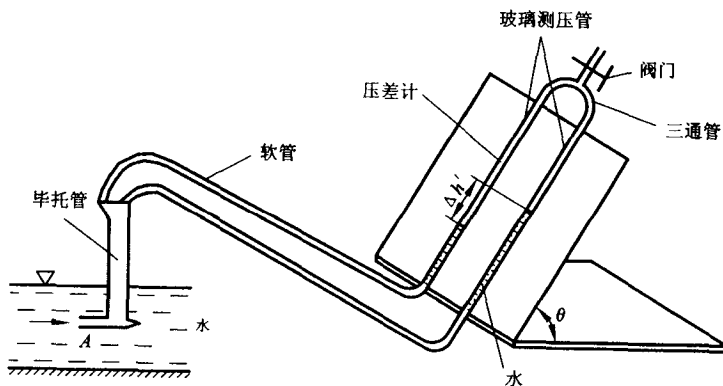


图 1.3.2 毕托管测速示意图

关于毕托管的流速校正系数 φ , 因其值与毕托管的构造、尺寸及表面光滑程度等因素有关, 须经专门的率定试验来确定。一般 φ 值由制造毕托管的工厂给出。由于 φ 值与 1 很接近, 亦可近似地采用 $\varphi = 1$ 。

毕托管经长期应用,不断改进,现已十分完善。具有结构简单、使用简便、测量精度高、稳定性好、成本低、耐用等优点,广泛用于室内液(气)流的量测。毕托管的适用范围在 $20 \sim 200 \text{ cm/s}$,不宜量测过小的流速(如流速小于 15 cm/s),否则很难量测准确,误差也较大。另外,用毕托管测流速时,仪器本身对流场会产生扰动,这是这种方法测流速的一个缺点。

后面介绍的光、声、电的测速技术及其相关仪器,虽具有瞬时性、灵敏、精度高以及自动化记录等诸多优点,有些优点是毕托管无法达到的,但往往因其结构复杂,使用约束条件多及价格昂贵等因素,从而应用上受到限制。尤其是传感器与电器在信号接收与放大过程中,有否失真,或者随使用时间长短、环境温度的改变是否飘移等,难以直观判断,致使可靠度难以把握,因而所有光、声、电测速仪器,包括激光测速仪都不得利用专门装置定期率定(有时是利用毕托管率定)。可以认为,毕托管测速至今仍然是最可信、最经济而又简便的测速方法。

1.3.2 流速仪法

1. 微型旋桨式流速仪

常见的螺旋桨是利用流体动量方程设计的器件。小型螺旋桨能够用于恒定流场中点流速的量测,因为在液流作用下螺旋桨叶轮产生旋转,旋转运动产生的机械摩擦作用与液流作用相平衡,使螺旋桨能够以一定的转速转动(图 1.3.3)。由于螺旋桨对准来流放置时,其转速与来流流速存在固定的关系,因此可以通过测定螺旋桨转速来确定流速。目前应用光电或电阻原理能够方便、精确地计量一定时段内螺旋桨的转数,所以螺旋桨流速仪被广泛用于室内与野外的流速量测。

图 1.3.3 中旋桨探头采用光电原理,螺旋桨每旋转一周,贴在叶片边缘的反光片就将光导纤维中的入射光反射一次,反射光经另一束光导纤维传到液面上照射到导光管上,经量测电路得到电脉冲,利用数字式频率计记下每秒钟螺旋桨的转数,查标定曲线就可得到流速值。

根据量测要求不同,螺旋桨的尺寸也不同。实验室常用的螺旋桨直径为 10 mm ,目前最小的螺旋桨直径约为 3 mm ,用于野外的螺旋桨直径为 50 mm 以上。由于螺旋桨的转动需要一定的起动力矩,而且当流速较低时,转速与流速之间的线性度差,因此旋桨式流速仪不适合于小流速的量测。直径为 10 mm 的螺旋桨的测速范围为 $0.05 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 。微型螺旋桨(直径小于 5 mm)能测到的最小流速为 $0.01 \sim 0.02 \text{ m/s}$ 。此外,螺旋桨在使用过程中会产生磨损,需要经常率定才能保证量测精度。

2. 超声波测速仪

图 1.3.4 为超声波流速仪的测速原理示意图。

如图所示, T_1 发射的频率为 f_0 的超声波经悬浮微粒 A 反射与散射后被 T_2 所接收。由于悬浮微粒随液流一起运动,根据多普勒原理, T_2 所接收到的多普勒频率 f_D 为:

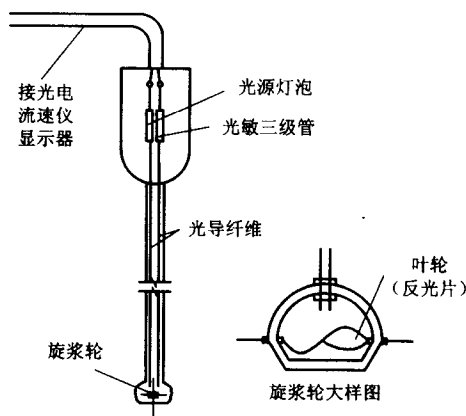


图 1.3.3 旋桨式流速仪

$$f_D = f_0 \frac{u}{C} (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$

$$\text{即: } u = \frac{C}{f_0 (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} f_D$$

式中: f_D 为多普勒频率, f_0 为发射频率, u 为点流速, C 为声波在水中的传播速度。

由于 f_0 与 C 为已知数, θ_1 与 θ_2 已由仪器结构确定, 上式可简化为

$$u = K f_D$$

可见, 流速 u 与多普勒频率 f_D 是线性关系。通过对 f_D 的检测与 $f_D \sim u$ 的转换, 即可测得流速值。

超声波测速仪测速的工作过程为: 传感器感应发射器发出的频率为 f_0 的信号及测试点悬浮微粒的反射与散射波记号, 并把它送至接收器混频; 然后由解调器检出多普勒频率 f_D , 并进行放大整形; 再由微机控制并进行数据处理, 得到流速值; 最后进行存储、显示或打印。

超声波测速仪是一种先进的测速仪器。它的优点是适用性强, 在流动的清水、浑水、污水及有水草的水质条件下都可施测, 具有较强的抗泥沙与抗飘浮物能力; 测速范围大, 在浑浊水质中, 测速范围为 $0.01 \sim 8.00 \text{ m/s}$, 且有很高的灵敏度与流速分辨率, 使用也很方便; 因为超声波传感器置于被测点的下游, 所以一般不破坏测点流态。超声波测速仪具有良好的应用前景。

3. 激光测速仪

应用激光量测流体速度是 20 世纪 60 年代才发展起来的一种测速方法。由于具有许多独特的优点, 所以发展十分迅速。目前已在航空、气象、水利、化工等很多部门得到广泛应用。与毕托管、旋浆式流速仪等流速量测方法比较, 激光测速具有对所测流场无干扰 (为无接触量测), 空间分辨率高 (被测点的体积只有 0.001 mm^3), 精度高, 动态响应快, 可测瞬时流速, 测速范围大 (可量测 $0.04 \text{ mm/s} \sim 10^4 \text{ m/s}$ 的速度) 等优点。这些优点很适合于对层流边界层和紊流的流速量测。对于高温或高度腐蚀性流体的流速量测更是一种比较理想的方法。

激光测速是利用流体中带有杂质微粒对激光散射的性质。若这种微粒大小适中, 微粒的速度即反映流体的速度。

如图 1.3.5 所示, 激光器发生的激光, 被分成两束, 照射在跟随流体运动的固相颗粒上, 形成了与流速垂直的明暗交替的干涉条纹, 当流体带动固相颗粒通过这些条纹时, 即发出间隙的散射闪光。显然每秒钟散射闪光的次数 (又称为多普勒频率) 和流速成正比。流速越大, 每秒钟穿过干涉条纹的次数越多, 则闪光的次数也越多。因此, 需要在流体中散播适当尺寸与浓度的微粒即示踪粒子 (如大气中的尘埃、水中的悬浮物、牛奶微粒等), 微粒必须具有较好的跟随性。由于激光具有良好的单色性, 在激光多普勒流速仪中氦氖激光与氩激光被用作产生信号的光源。

应用激光来量测流体流速, 特别是边界层流速, 是一种比较理想的测速方法。但是激光测速仪也同其他仪器一样, 使用时具有一定的局限性。它要求被测流体及其边壁有一定的透光性, 如量测管道内的流体流速时, 要求有透明的窗口才能进行量测。另外由于用激光测速时采

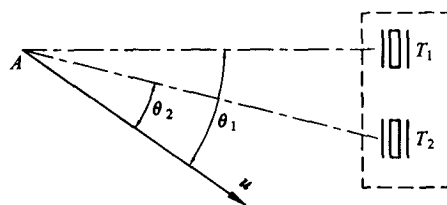


图 1.3.4 超声波测速仪原理

T_1 —传感器发射探头; T_2 —传感器接收探头; A —水中的悬浮微粒; u —速度矢量; θ_1 —发射声轴 T_1A 与流速 u 的夹角; θ_2 —接收声轴 T_2A 与流速 u 的夹角。

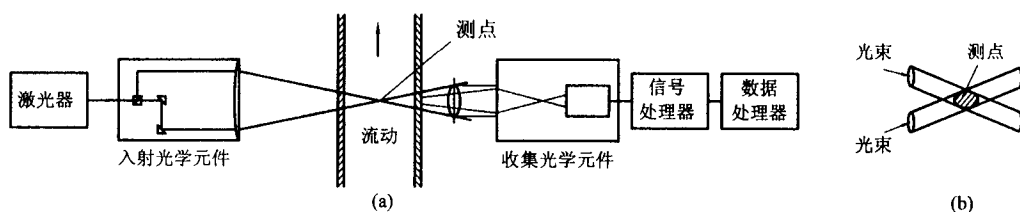


图 1.3.5 激光测速仪原理

用的是可见光,容易被流体吸收,难于远距离量测。同时仪器昂贵、依赖于示踪粒子等。因此,一般在实验室内使用。

1.4 流量量测

流量是单位时间内流经某一过流断面的流体体积(或重量)。某瞬时流过的流体体积(或重量)称为瞬时流量;某段时间内流过的流体总体积(或总重量)除以该段时间为该段时间内的平均流量。

实验室中量测恒定流流量的方法可分为直接量测法与间接量测法两大类。

1.4.1 直接量测法

直接量测法是量测流量最原始的也是最可靠的一种方法:根据流量的定义,直接量测在一定时段内流经管道或明渠的液流总体积(或者用磅秤称出这些液体的总重量),即可得到单位时间内流过的液体体积(或重量)即流量。

1. 体积法

设备:秒表一只,标定容积的量具一个(量筒、水箱等)。

方法:用秒表记录时间 T ,同时读出该段时间内流入量具的液体体积 V ,由此可得平均流量的量测值为

$$Q = \frac{V}{T} (\text{cm}^3/\text{s} \text{ 或 } \text{L}/\text{s})$$

2. 重量法

设备:秒表一只,磅秤及水桶各一个。

方法:用秒表记录时间 T ,用磅秤称出该时段内流入水桶中液体的重量 G 。根据公式 $G = \rho g V$ (ρ 为液体的密度),可以换算出平均流量的量测值为

$$Q = \frac{V}{T} = \frac{G}{\rho g T} (\text{cm}^3/\text{s} \text{ 或 } \text{L}/\text{s})$$

直接量测流量的方法在流量较小时简单易行且比较精确,但在量测较大流量时很难量测准确。应用此法时还应注意量测时间 T ,一般应大于 10s ,以保证量测的精度,必要时应对流量进行多次量测取其平均值。