

高 迅 刘翠蓉 编

禹华谦 审

工程流体力学实验

GONGCHENG
LIUTI LIXUE SHIYAN



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

工程流体力学实验

高 迅 编
刘翠蓉
禹华谦 审

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

工程流体力学实验 / 高迅, 刘翠蓉编. —成都: 西南交通大学出版社, 2004.9

ISBN 7-81057-953-3

I. 工... II. ①高... ②刘... III. 工程力学: 流体力学 - 实验 - 高等学校 - 教材 IV. TB126-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 086319 号

工程流体力学实验

高迅 刘翠蓉 编

*

责任编辑 陈渝生

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbsxx@swjtu.edu.cn

四川森林印务有限责任公司印刷

*

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 3.75

字数: 87 千字 印数: 1—3000 册

2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-81057-953-3/TB · 354

定价: 4.90 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: (028) 87600562

前 言

“工程流体力学”课程是高等工科院校土建类、机械类、环境类及工程力学各专业的重要技术基础课程，而工程流体力学实验则是其教学中不可缺少的重要环节。通过实验教学，可以增强学生的感性认识和实际动手技能，进一步培养学生分析问题和解决问题的能力，为学生今后从事实际及研究工作打下基础。为满足教学的需要，在多年使用由西南交通大学水力学教研室编写的《水力学及工程流体力学实验》讲义的基础上，我们根据教学的基本要求和近年来对实验教学的一些改革，配合实验设备、实验手段的更新，并参考国内外同类教材及相关文献资料编写了此书。

本书内容主要包括流体基本物理量的室内测量技术和 17 个教学实验项目（分演示和测定两大类）。每个实验项目按实验目的、实验原理、实验装置及仪器、实验步骤（含注意事项）、实验结果要求及分析（含思考题）、实验记录参考的结构编写。为便于使用，书末附有工程流体力学常用数据表。

本书可供高等院校土建类、机械类、环境类及工程力学等各专业的本科、专科学生使用。由于书中的实验项目覆盖面较宽，各专业教师在教学中可根据各自课程的教学基本要求及学时情况酌情选用。

本书编写工作由高迅编写第一、二、三（3.1（部分），3.2，3.3（部分），3.9，3.10（部分））、四、五（5.1（部分），5.3（部分），5.4）章，刘翠蓉编写第三（3.1（部分），3.3（部分），3.4，3.5，3.6，3.7，3.8，3.10（部分））、五（5.1（部分），5.2，5.3（部分））章，全书由高迅统稿整理，禹华谦教授审定。陈春光副教授、麦继婷副教授等对本书的编写提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2004 年 9 月于西南交通大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程流体力学教学实验目的	1
1.2 工程流体力学实验要求	1
1.3 工程流体力学实验室水流循环系统简介	2
第 2 章 实验中流体基本物理量的测量技术	4
2.1 压强的测量	4
2.2 水位的测量	6
2.3 流量的测量	7
2.4 流速的测量	9
第 3 章 工程流体力学基本实验	11
3.1 流体静力学实验	11
3.2 流动显示实验	14
3.3 管路测压管水头线实验	15
3.4 不可压缩流体恒定流动量定律实验	19
3.5 毕托管测速实验	21
3.6 文丘里流量计实验	23
3.7 雷诺实验	26
3.8 管路沿程水头损失实验	28
3.9 管路局部水头损失实验	30
3.10 孔口与管嘴实验	32
第 4 章 水泵及气流实验	37
4.1 离心式水泵性能实验	37
4.2 圆柱绕流阻力实验	39
4.3 平板边界层实验	42

第 5 章 明渠水流实验44

5.1 水跃实验44

5.2 明渠非均匀流水面曲线实验46

5.3 宽顶堰溢流实验49

5.4 小桥过流演示实验52

附 录 工程流体力学常用数据表53

参考文献.....54

第 1 章 绪 论

1.1 工程流体力学教学实验目的

工程流体力学是应用性较强的专业技术基础课。从学科的发展来看,工程流体力学属于技术基础学科,实验方法是促进其发展的重要研究手段。由于流体运动的复杂性,工程流体力学的研究就更加离不开科学实验。现代工程流体力学的蓬勃发展,更是和飞跃进步的现代实验技术分不开的。因此,工程流体力学实验是学习理论知识、探求流体运动规律的重要教学环节。

工程流体力学教学实验的目的是:

- (1) 观察流动现象,扩大感性认识,提高理论分析能力。
- (2) 根据实测资料验证工程流体力学的基本理论或根据所观察的流体流动现象进行某些深入的思考,以加强和巩固理论知识的学习。
- (3) 学会使用工程流体力学实验的基本测量仪器,掌握对工程流体力学基本量的测量实验技术。
- (4) 培养分析实验数据,整理实验成果和编写实验报告的能力。
- (5) 通过综合及设计性实验,学会搜集资料,设计实验方案,独立组装仪器设备和完成实验过程并撰写实验论文,培养实验研究的初步能力。
- (6) 培养严谨踏实的科学作风和与人融洽合作的共事态度,为将来进行科学研究和实际工作打下良好的基础。

1.2 工程流体力学实验要求

1.2.1 实验要求

- (1) 每次实验前,必须了解本次实验的目的、实验原理和实验所要验证的理论。为此,实验前应预习实验指导书和教科书中的有关内容。
- (2) 进入实验室后,应注意听取指导教师对实验方法的讲授,待完全弄清楚实验方法与步骤后,方能动手实验。
- (3) 实验中,应注意观察流动现象,细心读取实验数据。若实验结果完全错误,应重做实验。

(4) 实验时应爱护仪器设备及实验室其他公物。注意安全, 未经允许不得随便打开或关闭实验室的电路开关及与所做实验无关的水阀。如有损坏应立即报告指导教师, 并按学校有关规定处理。在整个实验过程中, 均须保持实验场所整洁安静, 做到文明实验。

总之, 应以严肃的态度, 严格的要求, 严密的方法, 一丝不苟的操作来对待实验, 只有这样, 才能圆满完成实验技能的训练任务。

1.2.2 实验报告要求

(1) 实验报告一般包括以下几项内容:

- ① 班级、姓名、同组人及实验日期。
- ② 实验名称及实验目的。
- ③ 实验原理。
- ④ 实验装置简图及仪器。
- ⑤ 流动现象的描述及实验原始记录。
- ⑥ 计算实验结果。

⑦ 实验结果的表示: 在实验中除根据实测数据整理并计算结果外, 有时还要采用曲线图来表示实验的结果。曲线均应绘在方格纸(或坐标纸)上, 图中应标明坐标轴所代表的物理量及坐标分度, 实验点应当用形如“。”、“×”、“·”、“△”等标记表示。当描绘曲线时, 不要用直线逐点连接成折线。简单的方法是根据多数点所在的位置, 内插描绘成光滑的曲线。如图 1.1 中虚线为不正确的描法, 实线为正确的描法。

⑧ 在实验报告最后部分应对实验结果进行分析与评价, 并回答有关思考题。

(2) 实验报告必须按实验要求每人独立完成一份, 并按规定时间交给指导教师。报告要求文字通顺, 字迹清楚, 计算无误, 表格曲线须用相应的器具绘制, 线条要清楚、整洁。

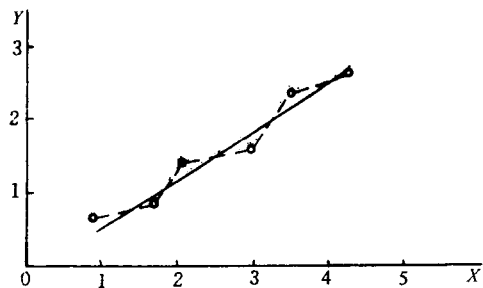


图 1.1

1.3 工程流体力学实验室水流循环系统简介

工程流体力学实验室须设置水流循环系统, 以保证在恒定的实验水头下供给各个实验设备所用的流量。水流循环系统主要包括蓄水库、管路系统、水泵、平水箱及回水渠等, 如图 1.2 所示(图中实验设备为玻璃水槽, 也可改为管道系统)。

(1) 蓄水库设在地面之下, 用来储存全部实验用水。蓄水库的容量应包括平水箱、管路系统和实验设备中的水量, 还应包括回水渠及蓄水库最低水位以下(即死库容)的水量; 蓄水库的深度一般为 2~3 m, 库面最低水位应保证在水泵吸水阀以上不少于 0.5 m。

(2) 管路系统用来供水、溢水和输水, 其管径和长度根据需要确定。

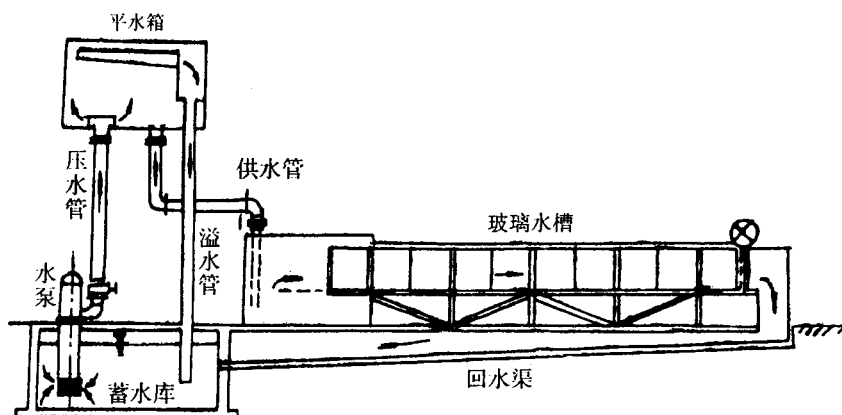


图 1.2

(3) 水泵将水从蓄水库抽送至平水箱，以保证维持足够高的实验水头。一般选用多台功率大小不等的水泵配合使用，以便能保证最经济的用水。水泵由电动机驱动。

(4) 平水箱是用来保证实验水流维持为恒定水头的设备。平水箱有两个作用，一是保证以恒定水头供水，二是保证向各实验设备输水。

(5) 通过实验设备的水流经地下回水渠流到蓄水库，完成水流的循环。

第 2 章 实验中流体基本物理量的测量技术

工程流体力学的实验目的，一方面在于观察各相应条件下的流动现象，加深感性认识，为理论分析提供基础；另一方面还在于通过对压强、水位、流量、流速等主要物理量的测量，更好地描绘流体运动图像及其力学、几何特性。现就目前普遍采用的主要物理量的测量方法简介如下：

2.1 压强的测量

2.1.1 测压管

测压管常用于测量流体各个单点上的压强水头。它由测压孔、连接管及测压管三部分组成，如图 2.1 所示。测压管一般为直径大于 10 mm 的透明管；其一端与被测压强的测点相通，另一端开口与大气相通。当测量较大压强时，可采用 U 形水银测压计，如图 2.2 所示。测量两点压力差时，可用 U 形或倒 U 形差压计，如图 2.3 所示。实验前应预先排除管内积气。测压孔的大小，形状对流动形态和测量精度影响甚大，孔径太大会使测量压强均化，不能真正反应点压强；孔径太小，由于毛细现象影响则压强变化反应迟缓，并易堵塞。测压孔与引出管轴须垂直，孔口与箱体表面齐平。

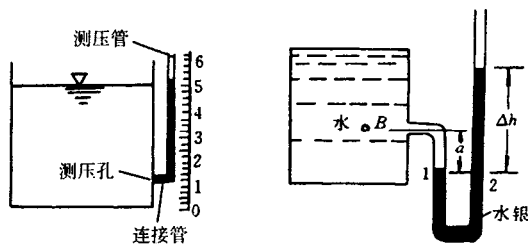


图 2.1

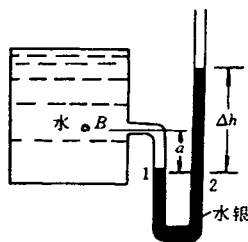


图 2.2

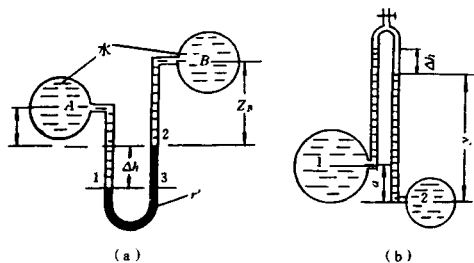


图 2.3

2.1.2 斜管式压力计

斜管式压力计如图 2.4 所示。为提高测量较小压强的精度，将测压管与水平面成 α 角斜置，放大测读范围，其计算式为

$$P = \gamma h = v \cdot l \cdot \sin \alpha$$

式中, P 为所测液体相对压强; v 为压力计液体重度。

2.1.3 金属压力计

金属压力计常用于测量较大的压强, 图 2.5 为管状金属压力计。其敏感元件是截面呈椭圆形并弯曲成圆弧状的金属弹簧管; 当其内壁加压后弯管产生弹性变形使它的曲率变小, 因而管的端部产生位移, 然后由传动机构将位移反映为指针的偏转, 再由表盘读出相应的压力。压力计所测压强为相对压强。

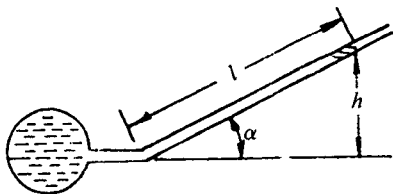


图 2.4

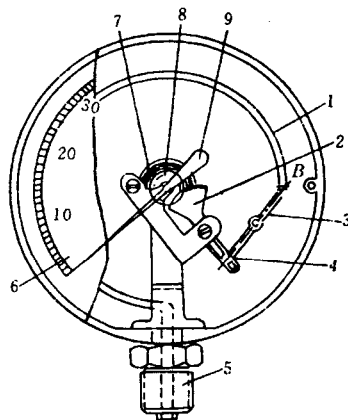


图 2.5

1—弹簧管; 2—扇形齿轮; 3—拉杆; 4—调节螺钉; 5—接头; 6—表盘; 7—浮丝; 8—中心齿轮; 9—指针

金属真空计其结构如同金属压力计。当小于大气的压强作用于铜管内壁时, 使铜管弯曲, 通过拉杆和齿轮的作用, 使指针偏转, 以指示真空值。

2.1.4 脉动压力传感器

近代压力传感技术主要向快速、多点测量的方向发展。对流体脉动压强可采用非电量电测技术进行测量。这种方法主要是利用电子元件制成的探头（传感器）将流体压强的变化转变为电学量的变化（如电压、电流、电容或电感等），然后用电子仪器来计测这些电学量，再经过某些相应的换算而求得压强的变化值。常用的压力传感器有以下几种：电阻应变式压力传感器；电容式压力传感器；电感式脉动压力传感器等。

根据测量要求及测压元件的形式不同, 可制成不同形式的应变式传感器。与压力传感器测压时配用的二次仪表如图 2.6 中虚线框内所示。

信号放大器将压力传感器的电信号放大, 经数据采集器将数据直接输入主控计算机显示及分析处理。

采用压力传感器测量压强的方法可改

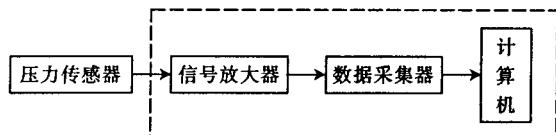


图 2.6

变以往静态单点测量方式，实现动态连续的多点测量，测量速度及精度大为提高。

在沿程水头损失、绕流阻力实验及提高性、综合性、设计性实验中都采用了压力传感器的测量方法。

2.2 水位的测量

2.2.1 测压管式水位计

由于测压管可以如实地显示出无压容器、明渠等的水面标高，因此也可用作无压流动水位的测量。此种方法应用较广，其精度约为 1 mm，为减小毛细现象的影响，测压管径不宜太细，以内径大于 10 mm 为宜。

2.2.2 水位测针

水位测针是实验室测量水位、水面曲线等基本量的主要仪器之一。如图 2.7 所示。图中套筒 1 牢固地安装在支座 2 上，测杆 3 以弹簧片嵌固在套筒上，通过齿盘带动套筒上下移动来调整测针上下移动。水位测针结构简单，精度可达 0.1 mm。为了避免表面吸附作用的影响，还可以把针尖做成钩状。

测量时，应使针尖自上向下逐渐接近水面（勿从水中提起），直至针与其水中倒影刚巧重合；钩状测针则先将针尖浸入水中，然后徐徐向上移动至使针尖触及水面时进行测读；测量波动水位时，则应测量最高与最低水位多次，取平均值作为平均水位。

2.2.3 数字编码自动跟踪水位仪

数字编码自动跟踪水位仪是近年来研制成功的一种测量仪器。它与数字记录仪或巡回检测仪配合，可作多点测量，并将数据打印记录；也可作单点测量，数字显示。

数字编码自动跟踪水位仪由电阻电桥器、可逆电机及传动机构、编译码器和数字显示部分组成，如图 2.8 所示。跟踪水位仪的传感器是两根不锈钢探针，一长一短，长的一根接地，短的一根插入液体中约 0.5 ~ 1.5 mm 深，作为电桥的一臂。当探针相对于水面不动时，两根探针间的水电阻不变，此时电桥处于平衡状态，无信号输出。当水位升降变化时，水电阻改变，使电桥失去平衡。将电信号送入放大器，放大的电信号驱动可逆电机转动，带动探针上下移动；达到平衡位置，电桥亦无输出，电机停止转动，从而达到跟踪水位的目的。

目前国产水位仪最大跟踪速度为 1.5 m/s，跟踪最大距离为 400 cm，读数精度为 ± 0.1 mm。

2.2.4 电感闪光测针

电感闪光测针如图 2.9 所示。其原理是利用水为导电介质的特点，当针尖接触水面时，电流接通，闪光灯发亮。电感闪光测针主要用来测量不便于操作的高处或远处的水位及某些无法用目测或需要监测和控制水位的场合。

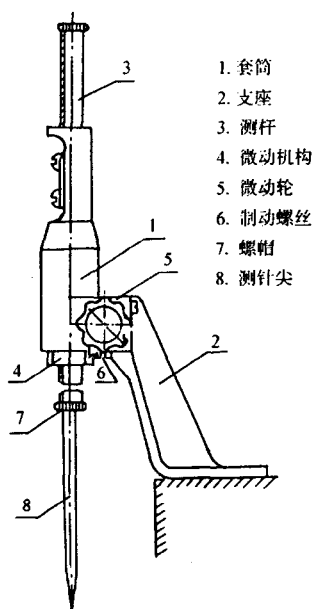


图 2.7

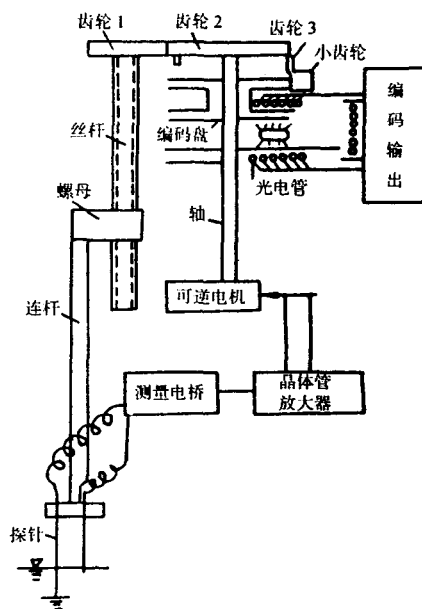


图 2.8

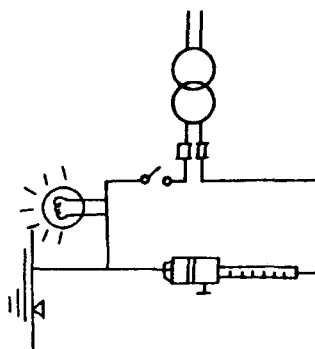


图 2.9

2.3 流量的测量

流量的测量分直接测量法与间接测量法两种。

2.3.1 直接测量法

1. 重量法测流量

设 T 段时间内流入水箱内的液体重量为 G ，比值 G/T 就是单位时间液体的重量流量。

2. 体积法测流量

设时间 T 内液体流入准确标定过的水箱（量桶，容积为 V ），比值 V/T 就是单位时间液体的体积流量。

以上两种方法多用于小流量液体的测量，具有较高的精确度。

2.3.2 间接测量法

1. 量水堰测流

量水堰的形式有多种，如薄壁堰、宽顶堰、实用断面堰等。用薄壁堰测流，首先要作出堰板的率定 $Q = f(H)$ 。测量时只要测出水头 H ，即可查得流量 Q 。薄壁堰过流断面形式有多种，如三角形、矩形、梯形等，如图 2.10 所示。

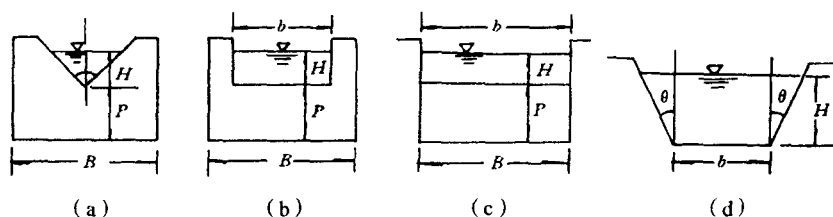


图 2.10

(1) 直角形三角堰。

直角形三角堰（见图 2.10 (a)）是根据过堰流量 Q 与三角堰顶水头 H 之间的一定函数关系 $Q = f(H)$ ，通过测定 H 转而计算出 Q 。目前采用的公式是 $Q = CH^{5/2}$ ， C 为三角堰的流量系数，随 H 略有变化，初步计算时可取 $C = 1.4$ 。也可预先制成 $Q-H$ 曲线表，便于查用。式中 H 的单位以 m 计算， Q 的单位为 m^3/s ；其适用范围 $H = 0.05 \sim 0.25$ m，堰高 $P \geq 2H$ ，堰宽 $B \geq (3 \sim 4)H$ 。

(2) 矩形堰。

矩形堰或称全宽堰（见图 2.10 (c)），其堰板过流宽度 b 与堰宽 B 相等，流量公式为

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2}$$

式中， g 为重力加速度； H 为堰上水头； m_0 为流量系数（需通过率定实验确定）。

矩形薄壁堰另有侧收缩堰（四角堰），如图 2.10 (b) 所示。其堰板宽度 b 小于堰宽 B 。矩形堰可测量大流量，但误差较大，因一部分水的周边和边墙相接，流通条件不好。

2. 转子流量计

转子流量计（或称浮子流量计）如图 2.11 所示。转子流量计常用于小流量的测量，是工业管道和实验室最常用的流量装置之一。具有结构简单、直观、能量损失小等优点。该装置主要由表面标有刻度，内径上粗下细的锥形玻璃筒和置于筒内可沿中轴上下滑动的不锈钢浮子所组成。当流体自下而上流经锥管时，被浮子节流，在浮子上下游之间产生压差，浮子在此压差作用下上升。当浮子上升的力和浮子所受的重力及粘性力三者的合力相等时，浮子处于平衡装置，因此流经流量计的流体流量与浮子的上升高度，即与流量计的流通面积之间存在着一定的比例关系，这就是转子流量计的基本工作原理。

3. 涡轮流量计

涡轮流量变速器（即涡轮流量计）的结构如图 2.12 所示，它主要由叶轮组件、导流件、壳体、信号检测和前置放大器部分所组成。当被测介质流过变速器时，变速器内的叶轮借助于流体的动能而旋转，导磁的叶轮即周期性地改变磁感应系统中的磁阻值，使通过线圈的磁

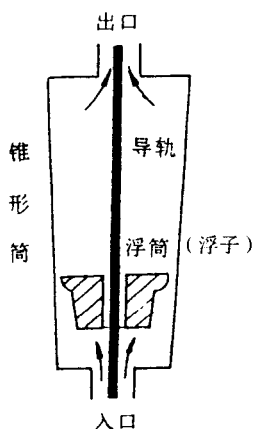


图 2.11

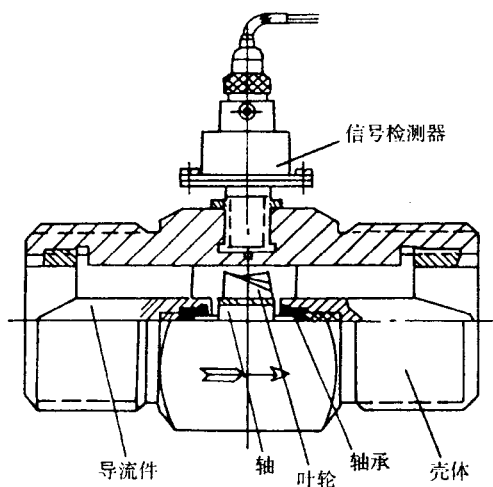


图 2.12

通量发生变化而产生脉冲电信号；该信号经过前置放大器放大后，送至显示仪表实现流量测量。在测量范围内，信号脉冲数与叶轮的转速成正比，叶轮的转速与流量成正比，所以测得脉冲总数 N 后，除以仪表常数 f ，便得到总流量 $Q = N/f$ 。

由于涡轮流量计对流量的测量精度高（可达 1%），反应快，维修方便，故常用于实验室及科学研究中。但其测量小流量的精度不高，且流体通过旋转涡轮时，能量损失较大，并对水质有较高要求。

2.4 流速的测量

2.4.1 毕托管

毕托管是 1930 年由亨利·毕托（Henri Pitot）发明的，目前已有几十种形式。毕托管的构造如图 2.13 所示。毕托管是一根弯成直角的细管，主要由测压管（静压管）和测速管（动压管）两部分组成。动压管的开口面正对着水流方向，管中水头为静压和流速水头的总和。静压管的开口面与水流方向平行，管中水头为静压水头。所以两者之差为流速水头。根据 $v = k\sqrt{2g\Delta h}$ ，求得速度 v 。 Δh 为水头差， k 为毕托管改正系数，一般需通过率定毕托管求得， g 为重力加速度。

毕托管不能自动调整方向。在进行测量之前需已知水流方向，然后安装毕托管，校正水流方向，假若方向不对，则速度水头值变小。在测量介质为液体时，可采用

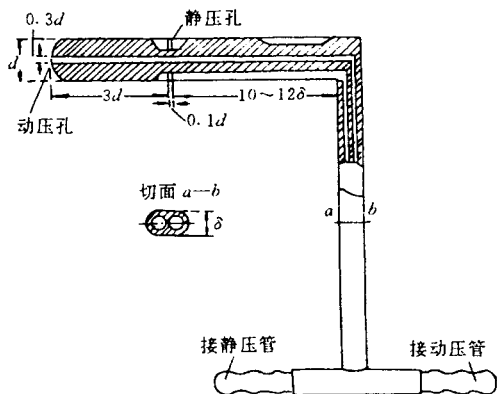


图 2.13

反冲法排除连接管内存气体，并观察两差压管内液面是否水平，以鉴别管内有无积气。当被测介质为气体时，可直接与微压计连接。

在明渠中测速，毕托管的测量范围一般为 $0.15 \sim 2.0 \text{ m/s}$ 。在有压管道中可用柱形毕托管进行测速，其最大速度限度可达 6 m/s 。

实际上，用毕托管测量得到的只是断面上某一定点的流速。由于流体的粘性作用，断面上各点的流速分布是不相同的。为准确地计算流量，必须求得有代表意义的平均流速 v_{cp} 。对于圆形管道，通常采用等环面法，具体计算步骤请参考有关资料。

2.4.2 旋桨式流速仪

旋桨式流速仪是一种江河水文仪器，用以测定河流、渠道水库、湖泊等水流的速度，它也是目前国内外实验室用来测量明渠水流速度的一种测量设备，如图 2.14 所示。它是由旋转传感器、计算器及有关配套仪表组成。当可旋转的叶片受水流冲击后，叶片旋转的转速与水流的流速有着一定的函数关系 $v = f(n)$ 。其计算公式为

$$v = kn + c$$

式中， v 为流速 (m/s)； n 为旋转回转率，等于总转数 N 与相应的测速时间 T 之比，即 $n = N/T$ ； k 为仪表常数； c 为仪器的摩阻系数。

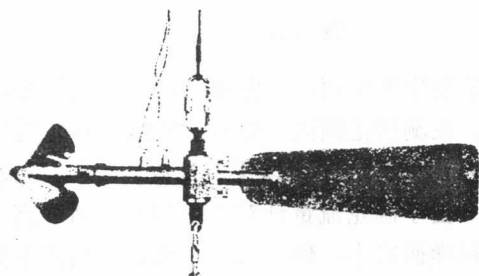


图 2.14

2.4.3 激光测速仪

激光测速仪 (Laser Doppler Velocimeter) 是 20 世纪 60 年代后期发展起来的一种新型测速仪器。它具有无接触测量，不干扰流场，测量范围宽 (从 $10 \mu\text{m/s} \sim 2000 \text{ m/s}$)，空间分辨率高 (测量体积小于 10^{-4} mm^3)，动态响应快，速度信号以光速传播，惯性极小，测量精度高等优点，因而受到普遍的欢迎。目前已被广泛应用于航空、水利、气象、化工、环保、热工测量等各行各业测量流体的时均、脉动及边界层流速等。国际上丹麦、美国、日本、英国、德国、澳大利亚都有定型产品。我国不少科研单位及高等学校也都自制了激光测速仪。

第 3 章 工程流体力学基本实验

3.1 流体静力学实验

3.1.1 实验目的

- (1) 掌握用测压管测定流体静压强的技能。
- (2) 验证不可压缩流体静力学基本方程。
- (3) 通过对流体静力学现象的实验分析, 进一步加深基本概念的理解, 提高解决静力学实验问题的能力。

3.1.2 实验原理

在重力作用下不可压缩流体静力学基本方程为

$$c = z + p / \gamma \quad (3.1)$$

或

$$p = p_0 + \gamma h \quad (3.2)$$

式中, z 为被测点在基准面以上的位置高度; p 为被测点的静压强, 用相对压强表示; p_0 为水箱液面表面压强; γ 为液体重度; h 为被测点的液体深度; c 为积分常数。

另对装有水油的 U 形测管 (见图 3.1), 应用等压面关系可得油的比重 S_0 为:

$$S_0 = \frac{\gamma_o}{\gamma_w} = \frac{h_1}{h_1 + h_2} \quad (3.3)$$

据此可用该仪器直接测得 S_0 。

3.1.3 实验装置

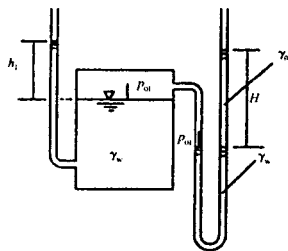
此实验装置包括两种仪器, 以下分别说明。

3.1.3.1 仪器一

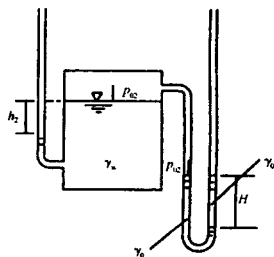
仪器一如图 3.2 所示。

1. 实验步骤

- (1) 将空气阀 D 打开, 并摇动手柄将水头调节器放在最低位置; 当水箱水面稳定后, 关闭空气阀, 再将水头调节器尽量上移, 于是箱中空气受到压缩, 水面压强 $P_0 > P_a$ 大气压强。



(a)



(b)

图 3.1