

尚全夫 崔 莉 编著

水力学实验

大连工学院出版社

水 力 学 实 验

尚全夫 崔 莉 编著

大连工学院出版社

水力学实验

SHUILIXUE SHIYAN

尚金夫 崔 莉 编著

大连工学院出版社出版发行

辽宁省新华书店经销

(大连市甘井子区凌水河)

朝阳新华印刷厂分厂印刷

开本: $787 \times 1092 \times \frac{1}{16}$ 印张: $15\frac{1}{2}$ 字数: 396千字

1988年2月第1版

1988年2月第1次印刷

印数: 1—2000

责任编辑: 海 川

封面设计: 羊 戈

责任校对: 水 舟

ISBN 7-5611-0052-3/TB·4 定价: 2.96元

前 言

水力学是一门技术基础学科。水力学实验在水力学的教学及研究工作中占有重要地位。近年来,我们为培养学生分析问题和解决问题的能力,使学生掌握水力学实验的基本方法和基本技能,并为科学研究打下初步基础,在土木系各专业开设了独立的水力学实验课。为适应教学需要,特编写了本教材。

本书是以大连工学院多年来水力学实验教学实践为基础,并参考国内外有关水力学实验资料而编成的。

全书包括三部分,共12章。第一部分(共9章)是水力学实验,选编了26个实验项目(包括演示实验)。每项实验包括实验名称、实验目的要求、实验仪器及设备、实验原理、实验步骤及注意事项、思考题及实验记录参考格式等。第二部分是相似理论与模型设计(共1章)。第三部分为实验数据与分析处理(共2章)。

为了便于在教学中使用,同时使本书的内容更加系统完整,在第一部分每章的前面,用不长的篇幅,把与本章有关的基本概念、基本原理、基本公式等简明扼要地加以介绍。书中对水力学量测技术以及计算机在实验研究中的应用也作为基本内容加以介绍,并把应用计算机进行数据分析处理作为实验教学的一个环节,以适应当前科学技术发展的需要。

在实验项目的安排上,我们注意了加强基础,对基本内容的实验项目安排得较多。同时考虑到口径宽一点,适应的专业多一些,所以与各专业有关内容的项目也做了适当安排。可根据教学需要对不同专业选择各自所需要的内容。

本书由尚全夫编写第七、八章及边界层实验;崔莉编写第一、三、四、五、六、九、十、十一、十二各章及绪论;徐孟川编写第二章。全书由尚全夫编写提纲并进行统稿校正,最后由李士豪教授审阅。

本书在编写过程中,李鉴初、杨景芳等同志提出许多宝贵意见,在此谨致谢意。由于时间紧迫,理论水平有限,错误和不当之处在所难免。望读者批评指正。

1987年1月于大连

目 录

第一部分 水力学实验	1
结 论	1
§ 0-1 水力学实验的目的	1
§ 0-2 实验报告要求	1
§ 0-3 水力实验室水循环系统简介	2
第一章 流体参数的量测	4
§ 1-1 概述	4
§ 1-2 基本物理量的计算	4
§ 1-3 水位量测	7
§ 1-4 压强量测	10
§ 1-5 流速量测	15
§ 1-6 流量量测	18
实验 1-1 流体粘滞系统的测定	24
附表 I 水力学中常见物理量的单位和量纲表	26
附表 II 水力学中常用单位的换算	27
第二章 水静力学	30
§ 2-1 概述	30
§ 2-2 静水压强及其特性	30
§ 2-3 水静力学基本方程	30
§ 2-4 压强的表示方法及单位	31
§ 2-5 作用在平面上的静水总压力	31
§ 2-6 作用在曲线上的静水总压力	32
§ 2-7 浮力、浮体的平衡与稳定	33
实验 2-1 验证液体静力学基本方程	34
实验 2-2 稳定和浮力实验	37
第三章 液体流动的基本原理	41
§ 3-1 流动的类型	41
§ 3-2 流线	42
§ 3-3 连续原理	42
§ 3-4 能量方程	43
§ 3-5 动量定律	44
实验 3-1 水流的能量转换实验	44
实验 3-2 动量定律实验	47

实验 3·3 平面势流的水电比拟实验·····	50
实验 3·4 边界层流速分布与边界层厚度发展实验·····	53
第四章 管流与摩阻·····	58
§ 4-1 雷诺数·····	58
§ 4-2 圆管中的水流能量损失·····	59
§ 4-3 沿程损失·····	59
§ 4-4 局部损失·····	64
实验 4·1 流动型态实验·····	65
实验 4·2 管流的沿程阻力实验·····	68
实验 4·3 管路局部阻力实验·····	71
实验 4·4 文丘里流量计实验·····	74
实验 4·5 管中水击(演示)·····	76
第五章 明渠·····	79
§ 5-1 概述·····	79
§ 5-2 明渠流的能量·····	80
§ 5-3 水流的动量函数·····	82
§ 5-4 棱柱形明渠中恒定非均匀渐变流水面线型式、微分方程式·····	83
§ 5-5 断面比能原理及动量函数的应用·····	84
实验 5·1 明渠流速测量·····	88
5·1·1 毕托管测流速·····	88
5·1·2 光电流速仪测流速·····	91
实验 5·2 水跃实验·····	94
实验 5·3 水工建筑物下游的底流消能实验·····	97
实验 5·4 各种水面线的演示·····	101
第六章 闸、堰泄流·····	104
§ 6-1 堰流与孔流·····	104
§ 6-2 闸孔出流·····	105
§ 6-3 孔口与管嘴出流·····	106
§ 6-4 堰顶溢流·····	109
实验 6·1 孔口、管嘴实验·····	113
实验 6·2 闸孔出流实验·····	116
实验 6·3 宽顶堰溢流实验·····	118
实验 6·4 实用堰泄流实验·····	121
第七章 渗流·····	123
§ 7-1 基本概念与渗流模型·····	123
§ 7-2 达西定律·····	123
§ 7-3 无压恒定渐变渗流的基本方程及其浸润线·····	124
§ 7-4 土坝渗流·····	125

§ 7-5 恒定渗流的基本微分方程及其解法	126
实验 7-1 达西实验	128
实验 7-2 有压(或无压)渗流的电模拟实验	130
第八章 波浪运动	135
§ 8-1 波浪要素与分类	135
§ 8-2 拉格朗日连续方程式和运动方程式	136
§ 8-3 有限振幅推进波	137
§ 8-4 有限振幅立波	141
实验 8-1 波浪要素测定实验	143
第九章 水泵	148
§ 9-1 水泵的作用	148
§ 9-2 水泵的性能及性能曲线	148
实验 9-1 离心泵性能实验	152
第二部分 相似原理及模型设计	155
第十章 相似原理及水工模型设计方法	155
§ 10-1 前言	155
§ 10-2 水力模型试验	155
§ 10-3 流动相似的意义及特征	156
§ 10-4 相似原理的应用	163
§ 10-5 水工模型设计	171
§ 10-6 对水工模型试验的评价	172
习 题	173
实验 10-1 模型设计	174
第三部分 实验数据处理方法	176
第十一章 实验数据处理	176
§ 11-1 基本概念	176
§ 11-2 误差分析	181
§ 11-3 随机数据的基本特征	187
实验 11-1 水流脉动压力的量测与分析	190
程序 I 随机数据的基本特性计算程序	194
第十二章 实验数据的方程表示—曲线拟合	203
§ 12-1 问题的提出	203
§ 12-2 经验公式的选取	204
§ 12-3 经验公式中系数的确定	209
§ 12-4 回归直线与相关系数的简易求法	236
§ 12-5 回归方程的稳定性与两条回归直线的比较	228
习 题	232
程序 II 用最小二乘法求拟合曲线方程	235

第一部分 水力学实验

绪 论

§ 0-1 水力学实验的目的

水力学是一门应用性很强的技术学科，实验是研究技术学科非常重要的手段。由于液体运动的复杂性，水力学的研究就更加离不开科学实验。现代水力学的蓬勃发展，是和飞跃进步的现代实验技术分不开的。因此水力学实验课是学习理论知识、探求水流运动规律很重要的一环。

水力学实验课的目的主要有以下几个方面：

1. 观察水流现象，扩大感性认识，为提高理性分析能力打下基础。
2. 理论联系实际，验证水流运动的基本规律。确定某些公式中的待定系数，以及在实验中学习水力学基本知识。
3. 学会使用水力学实验的基本量测仪器，掌握一定的实验技术，培养动手能力。
4. 培养分析实验数据，整理实验成果及编写实验报告的能力。
5. 培养严谨踏实的科学作风，为进行科学研究打下基础。

§ 0-2 实验报告要求

一、实验报告一般应包括以下内容：

1. 班级，姓名，同组人，实验日期；
2. 实验名称；
3. 实验目的和要求；
4. 设备简图；
5. 水流现象的描述及实验原始记录；
6. 计算有关成果（在水力学实验中，用计算器计算即足够精确，但须注意有效数字的运算法则），并将所用公式明确列出；
7. 结果的表示：在实验中除根据测得的数据整理并计算实验结果外，一般还要采用图表或曲线来表达实验的结果。曲线均应绘在方格纸上。图中应注明座标轴所代表的物理量及比例尺。实验的座标点应当用记号表出。例如“×”、“。”、“△”、“·”等等。当联结曲线时，不要用直线逐点联成折线，应当根据多数点所在的位置，描绘出光滑的

曲线。如图 0—1 (a) 所示为不正确的描法，图 0—1 (b) 为正确的描法；

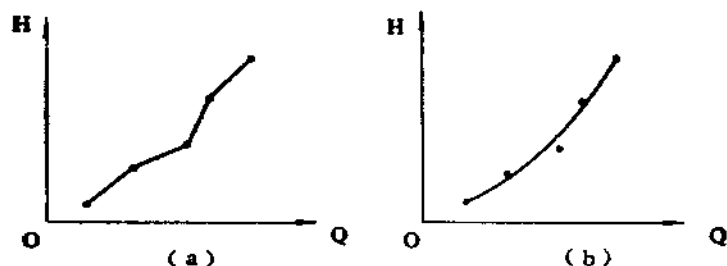


图 0—1

8. 在报告最后部分应当对实验结果进行分析和评价，以及对误差加以分析，说明本实验的优缺点，写出心得体会，并回答教师指定的思考问题。

实验前必须进行充分预习，事前如有要求（作业和计算）应将预习报告一并交上。

二、实验报告必须按指示书要求每人独立完成一份，并按规定时间交上，要求文字通顺，字迹清楚，表格曲线必须应用相应器具绘制，线条要清楚、整洁，按一定的比例绘制，计算无误。

三、实验报告应妥为保管，教师批改发回后应认真阅读，及时改正错误，学期结束时整理上交，作为考核依据。

§ 0-3 水力实验室水循环系统简介

水循环系统是水力实验室的心脏，它保证在恒定水头下供给各个试验设备所用的流量。水流循环系统包括储水库，管路系统，水泵和电动机及平水塔（或称恒压水箱）见图 0—2。

1. 储水库设在地面之下，它的容积要能保证供应室内各种试验设备中同时占用的水量，而库水面至少尚能淹没水泵吸水管的莲蓬头约一米。

2. 管路系统为供水、溢水和输水之用，其管径和长度根据需要确定。

3. 水泵组由各种大小容量的多台水泵组成，以便能保证最经济的用水，容量要求与实验室的规模，亦即与试验设备所需要用的流量相适应。水泵由电动机驱动。

4. 平水塔有两个任务，一是保证以恒定水头供水，为此设前缘很长的蛇形堰板。而水泵供应的流量大于实验所用流量的部分通过溢水管回到储水库。另一任务是保证向室内各处设备输水，为此平水塔要有一定的体积。

5. 通过试验设备的水流经地下回水渠流到储水库。

要按时完成实验，实验时不开动多于需要的水泵，以节省能源。

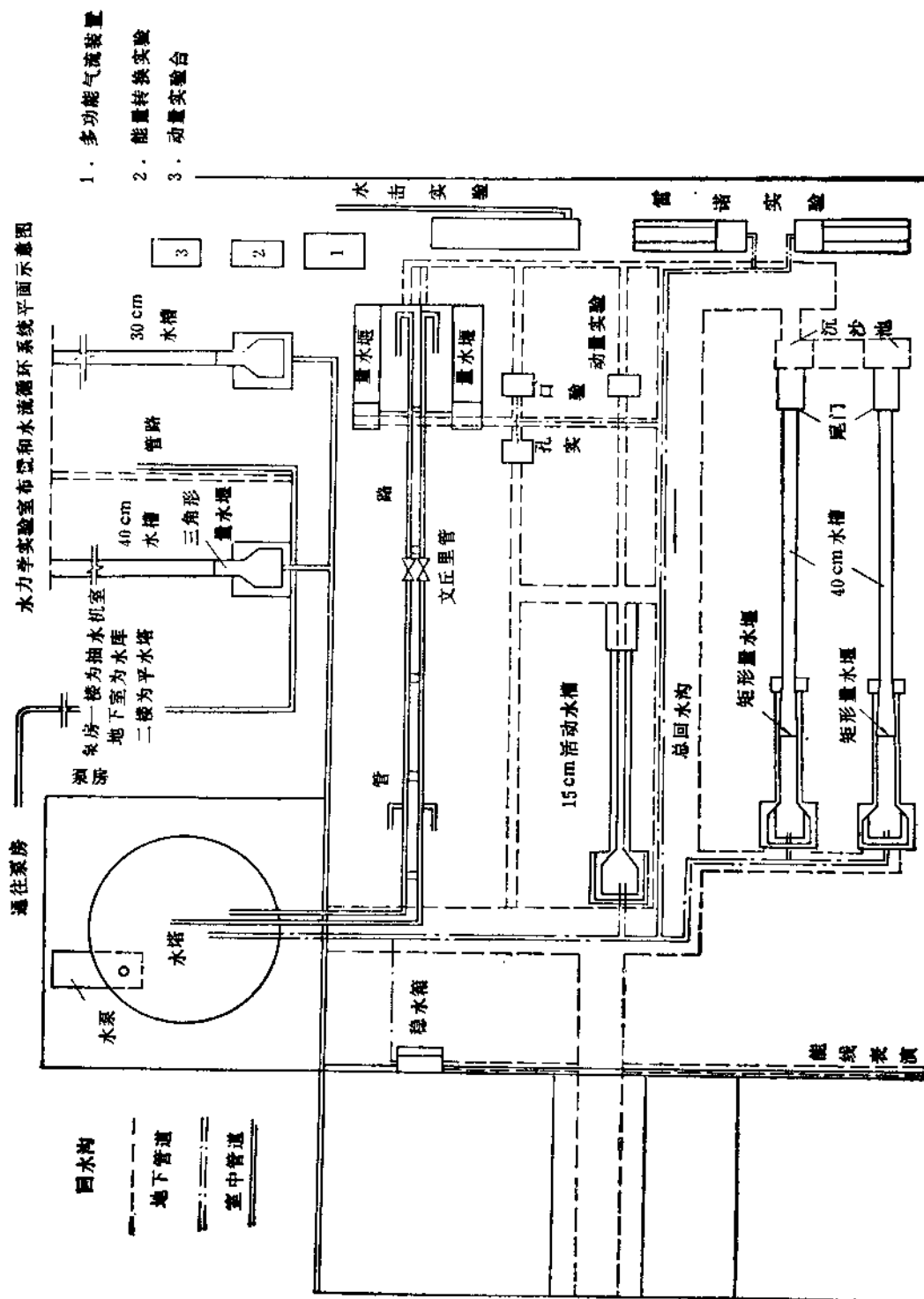


图 0-2

第一章 流体参数的量测

§ 1-1 概 述

在水力学的研究中,对各种水力要素的量测与分析是很重要的。水力学本身的发展过程也证明,由于水力要素量测技术的改进与精度的提高,对促进水力学学科的发展起了很大的作用。

在水力学实验中,经常需要量测的是:水位、流量、流速及流向、压强等水力要素。本章介绍这些量的量测原理和基本方法。

量测方法可分为直接法和间接法。直接法就是根据被测的量的基本定义,由量测数据直接决定该量的大小。例如,量测经过某一断面的水深,可把测尺插入水中,读出水面读数便是。间接法就是用量测的数据,经过一定的函数关系进行换算而得到所求的量。例如在测量经过某一断面的水量及经过的时间之后,用二者的商可算出流量。另外,间接测量还包括非电量的电测法、光学法等。

用来测量的仪器,可分为静态与动态两类。静态量测仪器可用以量测流体各要素的时均值,动态量测仪器可用以量测流体各量的瞬时值,如流速、水位和压强等随时间变化的值。

§ 1-2 基本物理量的计算

1.2.1 密度

单位体积内液体所含有的质量叫做液体的密度,密度由下式确定:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中, m 是液体的质量; V 是该质量所占有的体积; ρ 为密度。

密度的量纲为 $[ML^{-3}]$, 密度的单位为 kg/m^3

1.2.2 重度

单位体积液体作用所产生的重力叫重度 (或重率、容重), 用 γ 表示。

$$\text{即} \quad \gamma = \frac{W}{V} \quad (1-2)$$

式中, W 是液体产生的重力; V 是该液体所占有的体积。

重度的量纲是 $[MT^{-2}L^{-2}]$, 以 N/m^3 计。

重度与密度的关系是

$$\gamma = \rho g$$

$$(1-3)$$

式中 g 是重力加速度, 等于 9.80m/s^2 。

1.2.3 相对密度 (比重)

液体的质量对 4°C 时的同体积蒸馏水的质量之比叫做相对密度。相对密度是无量纲数, 用 S 表示。

1.2.4 容重的测量方法

液体的容重常常用比重计 (如图 1-1 所示) 测定。

把比重计置于盛有所测液体的容器中, 由于其下部装有重物, 它将铅直地浮在液体中。比重计标尺上位于液面的那个刻度数, 就指示出液体容重或密度的数值。



图 1-1

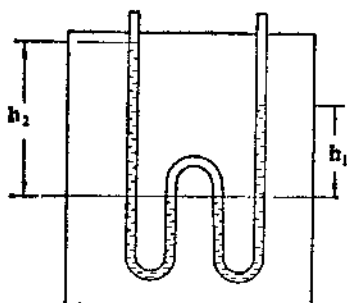


图 1-2

液体的容重可用一种较简单的方法测定, 就是把所测液体和已知容重的液体分别注入相连通的二个弯管里如图 1-2 所示, 使两液面在中间弯管中处于同一水平面上。此时未知的容重 γ_1 就可以用已知的容重 γ_2 表示:

$$\gamma_1 = \frac{h_2}{h_1} \gamma_2 \quad (1-4)$$

1.2.5 粘滞性

在运动状态下, 液体具有抵抗剪切变形的能力, 这就是粘滞性。

在液体做层流运动时, 互相接触的

的液层之间产生的剪切应力为:

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} \quad (1-5)$$

式中 μ 是一个比例常数, 通常称为液体的动力粘滞系数 (也称粘滞系数)

动力粘滞系数的量纲为 $[\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}]$, 在工程单位制中, 动力粘滞系数是以 $\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 计, 在国际单位制中, 用 $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 即帕·秒。

液体的动力粘滞系数与温度有关, 见表 1-1。这种关系多半是用经验公式来确定。对于水, 常常应用下式

$$\mu = \frac{0.0178\rho}{1 + 0.0337t + 0.00022t^2} \quad (1-6)$$

动力粘滞系数 μ 对液体密度 ρ 之比, 叫运动粘滞系数。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

运动粘滞系数量纲是 $[\text{L}^2\text{T}^{-1}]$, 它在国际单位制中是以 m^2/s 计。

水的运动粘滞系数 ν 、动力粘滞系数 μ 与温度关系表

表 1—1

温 度 ℃	μ (10^{-3} Ns/m ²)	ν (10^{-6} m ² /s)	温 度 ℃	μ 10^{-3} Ns/m ²	ν 10^{-6} m ² /s
0	1.792	1.792	26	0.874	0.877
1	1.731	1.731	27	0.855	0.858
2	1.673	1.673	28	0.836	0.839
3	1.619	1.619	29	0.818	0.821
4	1.567	1.567	30	0.801	0.804
5	1.519	1.519	31	0.784	0.788
6	1.473	1.473	32	0.768	0.772
7	1.428	1.428	33	0.752	0.756
8	1.386	1.386	34	0.737	0.741
9	1.346	1.346	35	0.723	0.727
10	1.308	1.308	36	0.709	0.713
11	1.271	1.271	37	0.695	0.700
12	1.236	1.237	38	0.681	0.686
13	1.203	1.204	39	0.668	0.673
14	1.171	1.172	40	0.656	0.661
15	1.140	1.141	41	0.644	0.649
16	1.111	1.112	42	0.632	0.637
17	1.083	1.084	43	0.621	0.627
18	1.056	1.057	44	0.610	0.616
19	1.030	1.032	45	0.599	0.605
20	1.005	1.007	46	0.588	0.594
21	0.981	0.983	47	0.578	0.584
22	0.958	0.960	48	0.568	0.574
23	0.936	0.938	49	0.559	0.565
24	0.914	0.917	50	0.549	0.556
25	0.894	0.897	52	0.532	0.539

续表 1—1

温 度 ℃	μ (10^{-3} Ns/m ²)	ν (10^{-6} m ² /s)	温 度 ℃	μ 10^{-3} Ns/m ²	ν 10^{-6} m ² /s
54	0.515	0.522	78	0.366	0.376
56	0.499	0.506	80	0.357	0.367
58	0.483	0.491	82	0.348	0.358
60	0.469	0.477	84	0.339	0.350
62	0.455	0.463	86	0.331	0.342
64	0.442	0.451	88	0.324	0.335
66	0.429	0.436	90	0.317	0.328
68	0.417	0.426	92	0.310	0.322
70	0.406	0.415	94	0.303	0.315
72	0.395	0.404	96	0.296	0.308
74	0.385	0.395	98	0.290	0.302
76	0.375	0.385	100	0.284	0.295

运动粘滞系数亦可表示为:

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2}$$

§ 1-3 水 位 量 测

随着水流运动状态的不同,水流表面的特性也有区别,测量时应针对不同的特点来选取最合适的方法。

1.3.1 测尺法

直接用木制或金属制的直尺插入水中测读,由于表面张力影响,此法的精度较低。

1.3.2 测针法

图1—3为一种常用国产测针的结构图。测针尖下端接触水面处为针形或弯钩形如图1—4所示,测量时可在拟测水位处固定测针架;也可以用一测针筒将水引出,把测针装在筒上测量。使用针形测针时测针逐渐下放,直至针尖刚好触及它在液面的倒影。弯钩

形测针精度较高，使用这种测针应把它浸入液体之中，并逐渐上提直到测针尖恰好接触液面。

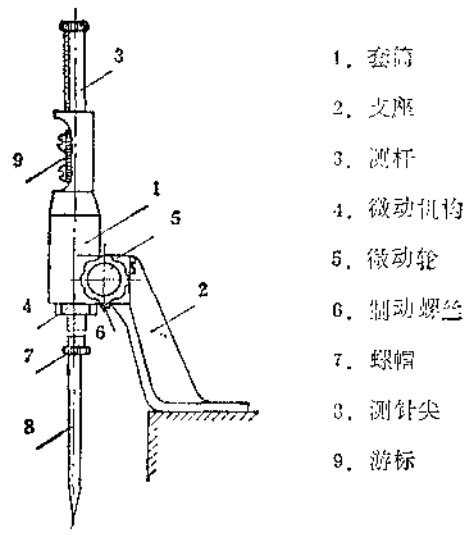


图 1—3

需要多点测量时可将测针安装在活动测针架上以便左右移动和沿导轨来回滑动，可测出任意断面处的水位与水深。测针杆上带有的刻度通常以毫米为最小分度。在杆套上附有游标，其读数精度为0.1mm。

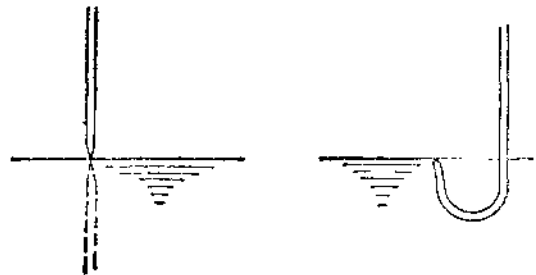


图 1—4

测量水面有波动的水位时，通常采用以下两种方法：

(1) 测量几次高水位，读数为 $a_1, a_2, \dots, a_n$ ，平均值为 a ；测量几次低水位，读数为 $b_1, b_2, \dots, b_n$ ，平均值为 b ，平均水位 = $\frac{a+b}{2}$ 。

(2) 用一直径为 5~6cm 的玻璃筒，与待测点联接成连通管，可消除水面波动，直接用测针测量玻璃筒内的水位。

使用测针时，向下驱动测针杆应多加小心，以免用力过猛，针尖触底而弯曲。

1.3.3 测压管法

在液体容器的侧壁上开一个小孔，安装一测嘴，外接透明玻璃管如图 1—5 所示，玻璃管内水位必将与容器内部水位同高。在测压管旁安装标尺就可读出容器内的水位。要注意的是玻璃管不宜太细，内径大于 10mm 为宜，以免由于毛细现象及表面张力的影响使读数不准。

上述方法多用于恒定流动水位的量测。随着现代科学技术的发展，量测随时间而变化的水位的方

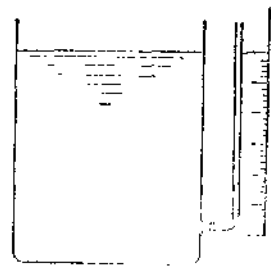


图 1—5

法越来越多,下面介绍几种目前较为先进的仪器。

1.3.4 自动跟踪式水位仪

这种仪器有测点多、可同步、自动测量等优点;如与数字显示器、记录仪或打印机配套使用,又有节省人力,使用方便的优点,一般实验室均可备用。图1—6为跟踪式水位仪工作原理示意图。跟踪式水位仪的传感器是二根不锈钢探针,较长一根接地,另一根短的针尖没入水中0.5~1.5mm,当探针相对水面不动时,二针之间的水电阻是不变的。水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。当水位上升(或下降)时,水电阻增大(或减小)则电桥失去平衡,因而有讯号输出。输出讯号经放大器放大后驱动可逆电机。电机的旋转通过齿轮2、齿轮1、丝杆、螺母、连杆等变成探针的上下移动,驱动探针又回归到平衡位置。这样,探针就跟着水位变化。

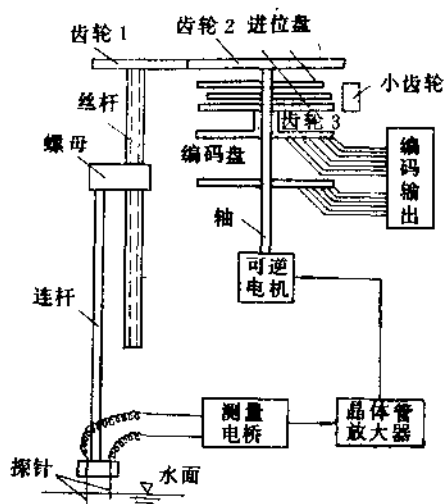


图 1—6

利用这种仪器可以测记各种波动情况下的水位变化。但由于仪器传动部分中的惯性还不能完全消除。故对水位变动较快的情况仍不能很好跟踪。

目前国产跟踪式水位仪最大速度为5.5mm/s,跟踪最大距离为2000mm,实验室常用400mm、200mm,读数误差为±0.1mm。一般用于明渠水位的量测。

1.3.5 钽丝水位计

钽丝水位计的传感器是利用电容式转换原理制成。由钽丝—氧化膜—水,构成一个电容器,水面上下变动时电容量随浸水深度呈线性变化,整机的电流或电压输出亦随此

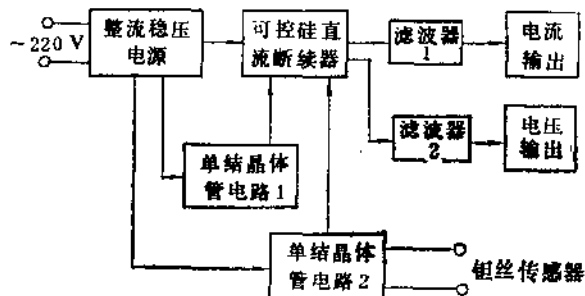


图 1—7 钽丝水位计测量系统框图

电容量呈线性地变化,将电流或电压送到记录仪器。测量系统的流程见图1—7。传感器的长短,可根据被测对象,例如波浪的波高范围而选择大、中、小不同型号,型式似一弓形。钽丝的直径为0.4~1.0mm,其表面经过一定的工艺处理后形成一层氧化钽薄膜。在一定的条件下此薄膜不导电。金属杆为铜质,杆与钽丝之间用绝缘体块绝缘,将直流电流的负极连于金属杆,正极连于钽丝。当传感器放入水中后,钽丝与水体就形成了电容的两极,氧化钽膜形成了两极间的绝缘体,其电容 C 与水深 h 的关系可用下式估算:

$$C = Kh$$

(1—8)

使用时可将电容的变化转换为电流的变化送入示波器，以示波图形式记录下来。这样水深与光点偏移的关系可由下式计算：

$$h = K\lambda \quad (1-9)$$

式中

K —率定系数，由实验获得

λ —光点偏移。

利用钽丝水位计及相应的电路能够较完满地测记各种水面变化。其最大误差为0.5mm左右。多用于波浪的量测。

1.3.6 电阻式水位传感器

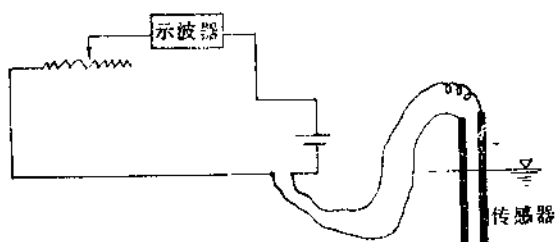


图 1-8

式中 λ —光点偏移值

K —率定系数，由实验给出。

水位变化随光点的偏转成线性变化。

在测量高水位时，如水塔上的水位，应用上述方法往往很不方便，这时可利用浮标测量，如图1-9所示。浮标随着塔内水面的升降而升降，与浮标连结之细绳端点的重锤亦作上下移动，根据锤的位置可以标出塔内水位。

电阻式水位传感器用导电金属片作为电极插入待测的水中，当水位变化时两极之间的电阻随之发生变化，便引起电流的变化，这种变化通过光点示波器记录下来，见图1-8。水位的变化 Δh 可由下式计算：

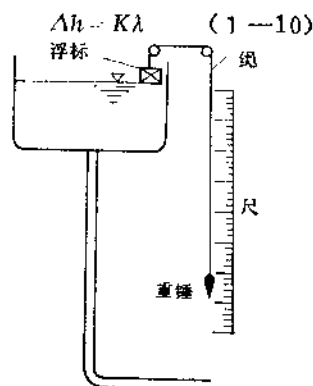


图 1-9

§ 1-4 压强量测

1.4.1 恒定流动压强测量方法

1. 压力表

图1-10所示为压力表外形，有只能测正压的压力表，有既可测正压又可测负压的真空压力表，它们都是利用弹性金属受压变形的特性来测量压强的。通常压力表内装有一根一端开口，一端封闭的镰刀形、截面成椭圆形的黄铜管或不锈钢管，开口端通过短管和被测定压强的液体相接通，封闭端有传动装置和压力表表面的指针相连，见图1-11。量测时，黄铜管在液体压力作用下，截面要变成圆形，促使黄铜管封闭端张开伸直，牵