

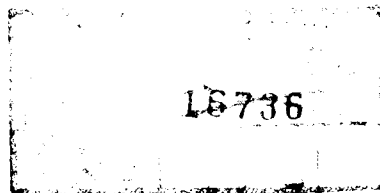
Shui Li Xue Shi Yan

水力学实验

冬俊瑞 黄继汤 主编



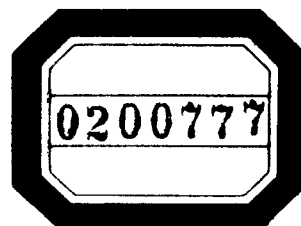
清华大学出版社



006338 水利部

水力学实验

主编 冬俊瑞 黄继汤



257/15

清华大学出版社

内 容 简 介

本书由三部分组成，第一部分为水力学实验中水力要素的室内量测技术，除常规仪器外，着重介绍了一些现代量测技术。第二部分为水力学及流体力学实验，包括34个实验项目，每个项目均包含实验目的，设备与仪器、原理与公式、实验步骤与成果分析等，并附有部分典型实验成果实例。第三部分为附录，包括误差分析与经验公式的拟合方法，水力学实验室的设计要点与水力学常用数据表等。

本书适用于高等院校的水利、土木、热能、化工、工物、海港等专业的师生，也可供有关科技人员参考。

(京)新登字158号

2015/21

水 力 学 实 验

主编 冬俊瑞 黄继汤

☆

清华大学出版社

(北京 清华园)

北京市昌平印刷厂印装

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本：787×1092 1/16 印张：14.75 字数：349千字

1991年12月第1版 1991年12月第1次印刷

印数：0001—4000

ISBN 7-302-00920-1/TV·18

定价：4.25元

序

水力学是一门技术基础课，是高等学校和中等专业学校中众多工科专业的必修课，如水工建筑、农田水利、水力机械、环境工程、暖气通风、热工锅炉、化学工程、工程物理、工业与民用建筑及海洋工程等专业均将水力学或流体力学作为必修课之一。水力学实验在水力学学科的发展及教学中占有重要地位，通过实验可以观察水流现象与验证水力学基本原理和公式，以帮助学生深化课堂教学；可以使学生掌握水力要素量测的基本方法和培养科学实验的严谨作风；并为进一步培养学生进行科学研究的工作能力打下相应基础。由于国内正式出版的水力学实验教材甚少，因此编印本书是有重要意义的。

本书是在清华大学水利水电工程系水力学教研组多年来教学实践经验的基础上编写的，同时参考了国内外有关水力学及流体力学的实验资料和文献。编写过程贯彻理论联系实际，注重实践环节，力求符合学生认识规律及便于学生自学的基本原则。

全书共包括三部分。第一部分（第一篇）为水力要素在水力学实验中的量测技术，包含水位、流速、压强和流量量测等共四章。除介绍常规仪器的基本原理和操作方法外，着重介绍了激光、超声、热线与热膜、图象处理等现代科学技术在流体力学实验中的量测技术。

第二部分（第二篇）为水力学及部分流体力学实验共34个项目（包含一部分流动现象演示实验），分成十二章。每个实验项目均包括有：实验目的、实验设备与仪器、实验原理与公式、实验步骤、成果要求与分析、注意事项、思考问题等内容。部分实验中还给出典型实验记录表格与实验成果分析图例（均以小字印出）。

第三部分（第三篇）为附录，包括误差分析与经验公式的拟合方法、水力学实验的要求与水力学实验室的设计要点及水力学常用数据表等三章。全书之末还附有参考文献。

本书既适用于水力学课或流体力学课为配合讲课进度而进行的水力学实验环节，也适用于独立开设的水力学实验课。可根据不同专业教学大纲的需要进行选用；也可根据附录2所建议的分层次设置实验课的方法来安排。本书第一篇及第三篇可供研究生与水利科技人员参考，全书也可供中等专业学校教师与学生参考使用。

本书采用集体讨论、分工执笔、相互校阅和主编审定的方式完成。参加本书编写的有冬俊瑞、黄继汤、李永祥、宋传琳、吕孝琪、丁彤等六人，由冬俊瑞与黄继汤担任主编。

夏震寰、余常昭及清华大学水力学教研组同志参加了编写提纲的讨论，李玉梁、周雪漪、李玉柱等同志在编写过程中提供了宝贵意见，在此谨致谢意。

由于水平所限，书中缺点和错误在所难免，恳切希望读者指正。

编 者

1989年8月

目 录

第一篇 水力要素的室内量测技术

第一章 水位的量测	1
§ 1-1 恒定水位的量测	1
一、测尺	1
二、测压管	1
三、测针	1
四、电感闪光测针	2
§ 1-2 非恒定水位的量测	3
一、跟踪水位计	3
二、钽丝水位计	4
第二章 流速与流向的量测	5
§ 2-1 流速的量测	5
一、浮子法	5
二、浮子摄影法	8
三、动压强法	10
四、旋桨式流速仪法	13
五、激光测速法	14
六、热线(热膜)流速仪法	19
七、图象处理测速技术	22
§ 2-2 流向的量测	23
一、流向指示剂(浮子)	23
二、流向测定方法	23
第三章 压强的量测	25
§ 3-1 液柱式压强量测法	25
一、测压管	25
二、比压计	26
三、微压计	28
§ 3-2 压力表(计)量测法	29
§ 3-3 非电量量测法	30
一、电阻应变式压力传感器	31
二、电容式压力传感器	33
三、硅压阻式脉动压力传感器	34
四、电感式脉动压力传感器	34
五、张丝式压力传感器	36
第四章 流量的量测	38
§ 4-1 直接量测法	38

一、体积法测流量	38
二、称量法测流量	38
§ 4-2 明槽流量的间接量测法	38
一、量测流速确定流量	38
二、量水堰测流	39
三、量水槽测流	41
四、孔口测流	42
§ 4-3 有压管道流量的间接量测	42
一、文透里管测流	42
二、管中喷嘴、孔板与弯管测流	43
三、浮子流量计	45
四、涡轮流量计	45
五、电磁流量计	46
六、超声式流量计	46

第二篇 水力学实验

第五章 流体物理性质实验	49
实验 5-1 液体密度的测定实验	49
实验 5-2 流体粘滞性的演示实验	51
第六章 水静力学实验	53
实验 6-1 静水压强与真空量测实验	53
实验 6-2 液体相对平衡演示实验	55
第七章 流谱、能量及动量方程验证实验	58
实验 7-1 流线与流谱演示实验	58
实验 7-2 能量转化与文透里管流量系数量测实验	60
实验 7-3 动量方程实验	64
第八章 平面势流实验	68
实验 8-1 平面势流圆柱绕流实验	68
实验 8-2 有环量机翼绕流实验	71
第九章 流动型态与边界层实验	76
实验 9-1 层流和紊流型态演示与临界雷诺数的量测实验	76
实验 9-2 平板边界层气流实验	79
实验 9-3 明槽中平板边界层激光测速实验	86
实验 9-4 氢气泡法演示流速场实验	93
第十章 流体作用力实验	95
实验 10-1 升力现象演示实验	95
实验 10-2 用压强法量测圆柱体绕流阻力实验	96
实验 10-3 矩形弯管压强分布量测实验	100
第十一章 紊动射流实验	103
实验 11-1 气体紊动射流实验	103
实验 11-2 热线风速仪量测气体紊动射流实验	107

实验 11-3 热膜流速仪量测淹没水射流实验	111
第十二章 有压管道实验	115
实验 12-1 管道沿程水头损失量测实验	115
实验 12-2 管道局部阻力系数量测实验	121
实验 12-3 管道水击现象演示实验	124
第十三章 明槽均匀与非均匀渐变流实验	129
实验 13-1 明槽水流垂线流速分布量测实验	129
实验 13-2 活动水槽糙率量测实验	131
实验 13-3 非均匀流水面曲线演示实验	133
第十四章 明槽水跃与消能实验	138
实验 14-1 明槽水跃实验	138
实验 14-2 时均压强与脉动压强的量测实验	141
实验 14-3 底流消力池实验	144
实验 14-4 挑流冲刷与面流流态过渡演示实验	148
第十五章 孔口与闸堰过流实验	153
实验 15-1 孔口和管嘴出流演示与量测实验	153
实验 15-2 平板(弧形)闸门出流实验	156
实验 15-3 实用剖面堰与宽顶堰溢流实验	158
第十六章 渗流实验	162
实验 16-1 达西定律实验	162
实验 16-2 有压地基流网水电比拟实验	164

第三篇 附 录

附录 1 误差分析与经验公式拟合方法	169
§1 量测误差的基本概念	169
一、量测的一般知识	169
二、误差的来源	169
三、误差的表示方法	170
四、误差的分类	171
§2 随机误差	172
一、随机误差的特点	172
二、随机误差的分布	172
三、最小二乘法原理与算术平均值	175
四、随机误差的表示方法	176
§3 间接误差	181
一、基本问题	181
二、误差传递原理	182
三、误差分配问题	185
四、量测最有利条件的确定	186
§4 实验数据的处理	188
一、有效数字	188

二、实验数据的表示方法	189
三、经验公式的拟合	198
四、经验公式的精度	203
五、相关分析	204
附录 2 水力学实验的要求与水力学实验室的设计要点	207
§1 水力学教学实验的要求	207
§2 水力学教学实验的内容项目与安排	207
一、基本教学实验	207
二、选修实验	208
三、科研专题性实验	208
§3 水力学实验室的主要设备与布置原则	209
一、水力学实验室的主要设备	209
二、水力学实验室的类型与布置原则	209
§4 水流循环系统的组成与设计要点	211
一、循环系统的组成	211
二、循环系统各设备的设计要点	211
附录 3 水力学常用数据表	215
附表 3-1 水力学中常用物理量的量纲及单位	215
附表 3-2 不同温度下水的物理性质	216
附表 3-3 不同温度下水的饱和蒸汽压强水头值	216
附表 3-4 普通液体的物理性质(一个大气压力下)	216
附表 3-5 水银的密度和重度	217
附表 3-6 空气的物理性质(一个大气压力下)	217
附表 3-7 气体的物理性质(一个大气压力下、20℃)	218
附表 3-8 常见气体的粘性系数(经验公式)	218
附表 3-9 不同形状的面积特性	218
附表 3-10 不同形状的体积特性	219
附表 3-11 管壁当量粗糙度 k_s 值	220
附表 3-12 管道的局部水头损失系数 ζ 值	220
附表 3-13 宽顶堰的淹没系数 σ 值	223
附表 3-14 泄水建筑物的流速系数 φ 值	223
附表 3-15 大孔口的流量系数 μ 值	224
附表 3-16 平板闸门的垂直收缩系数 ε_1 值	224
附表 3-17 弧形闸门的垂直收缩系数 ε_1 值	224
附表 3-18 上游面铅直的WES剖面堰的流量系数 m 值	224
附表 3-19 土壤的渗透系数 K 值	225
附表 3-20 常用管壁材料的弹性系数 E 值	225
附表 3-21 重力相似准则与粘滞力相似准则比例尺	226
参考文献	227

第一篇 水力要素的室内量测技术

第一章 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 恒定水位的量测

一、测尺

直接用木制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，此法简单易行，但精度较低。

二、测压管

在液体容器、水槽或模型侧壁上开一个测孔，并在孔外套装一小段铜管。孔径一般要大于 2mm，使不易堵塞；用套在铜管上的橡皮软管引出，外接一个玻璃管即为测压管。此时，玻璃管内水位必将与容器、水槽内部水位同高，利用安装在测压管旁边的标尺即可读出容器中的水位，如图 1-1 所示。这种方法应用较广，其精度约 1mm 左右；为了减小毛细管影响，玻璃管不宜太细，以内径大于 10mm 为宜。

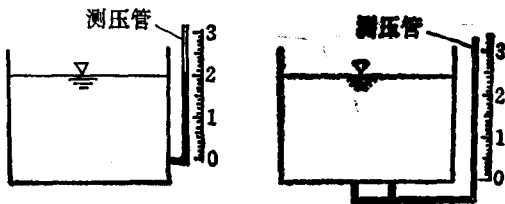


图 1-1 测压管法测水位装置图

三、测针

量测恒定水位时，测针是应用最普遍的一种仪器，图 1-2 是一种国产测针的结构图。图中套筒 1 牢固地安装在支座 2 上，测杆 3 在套筒中能上下移动，另有一套微动机构 4，借微动轮 5 来使其作微量移动，测针尖 8 下端接触水面处做成针形或钩形，测杆旁套筒上附有最小读数为 0.1mm（或 0.05mm）的游标。

使用时用测针尖直接量测水位；或安装测针筒，将水引出后，在筒内进行测读，见

图 1-3(a)。在实验室应用量水堰测流量时,测定堰上水深一般多用这种方法。但要特别

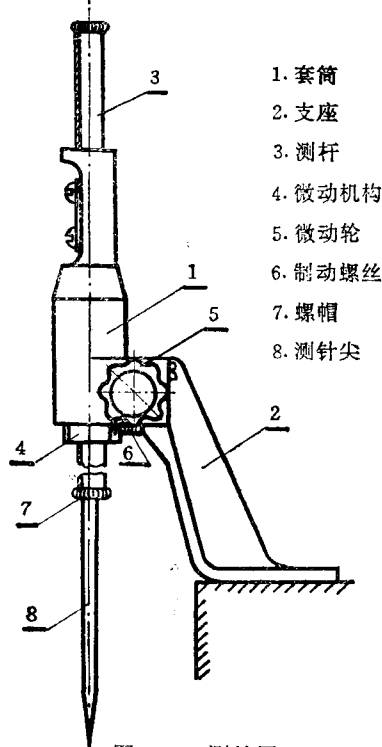


图 1-2 测针图

注意连通管内不得存留空气泡,而且测针筒不宜太细,以免由于表面张力影响量测精度,一般筒的直径以5cm左右较为合适。若需测水面线时,可将测针安装在活动测针车上,见图1-3(b),使其沿平直轨道前后左右滑动,以便测得任意断面和测点的水深和水位。为了避免水表面吸附作用的影响,还可以把针尖做成钩形,见图1-3(c)。

使用测针时,应注意下列各点:

(一) 测针尖端勿过于尖锐,以半径为 0.25mm 的圆尖为宜。

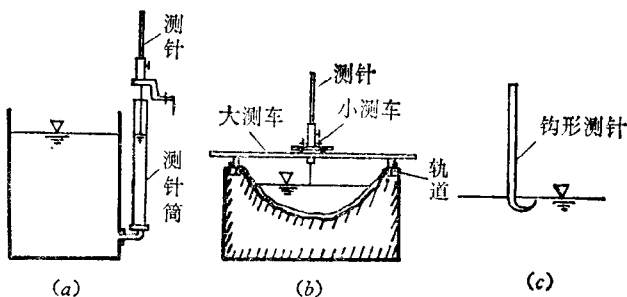


图 1-3 测针安装图

(二) 测针安装必须竖直牢固,轨道必须水平和稳固。

(三) 量测时,应使测针尖自上向下逐渐接近水面(勿从水中提起),直至针尖与其倒影刚巧重合;钩形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。

(四) 当水位略有波动时,则应量测最高与最低水位多次,然后取平均值作为平均水位。

(五) 经常检查测针有无松动、针尖有无变形等。

四、电感闪光测针

上述量测水位的测针全凭目力观测,可称为视感测针。但在某些场合无法用目测,或需要监测和控制水位时,则可使用电感闪光测针。电感测针的原理是利用水做为导电介质,当针尖接触水面时,电流接通,闪光灯发亮,见图 1-4。

电感闪光测针有单杆和双杆之分。(图1-4(a))所示的为单杆者其构造及传动装置与普通测针完全相同,只需加装电源、导线与氖气灯泡等。双杆电感闪光测针是将普通测针的单杆针头改为双针头,见图1-4(b),其中一根为标准针头,另一根为辅助针头;两针尖端的高差视试验精度的要求进行调整;各针头分别接一只氖气灯泡。使用时,由于标准针头的测针读数已事先定好,当针尖触及水面时,它的氖灯开始闪光,表示水位正好达到预期要求。若两个氖灯同时闪光,表示水位高于预期水位;两个氖灯都不亮表示水

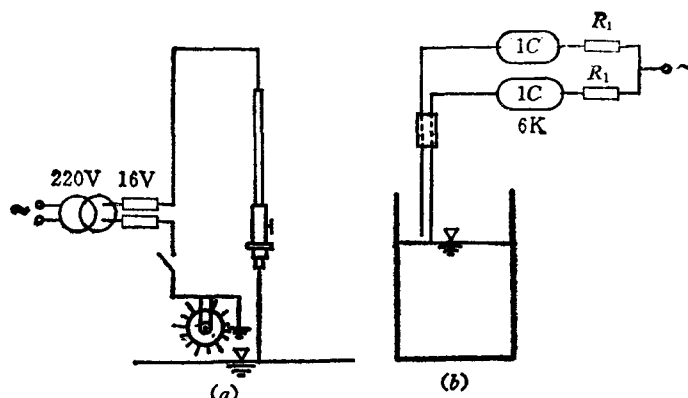


图 1-4 电感闪光测针工作原理图

位低于预期水位，均需重新调整水位。这样，既可避免实验人员往返操作，又可随时监视水位的变化情况。这种测针主要用来量测不便直接目测的高、低处和远处的水位，在实验室用于量测和监视平水塔和地下水库的水位尤为合适。

§ 1-2 非恒定水位的量测

随着现代科学技术的发展，量测随时间变化的非恒定水位的方法越来越多，下面介绍几种较为先进的量测水位的仪器。

一、跟踪水位计

图 1-5 为跟踪式水位计工作原理示意图。该水位计的传感器是二根不锈钢探针，较长的一根接地，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，二针之间的水的电阻是不变的。水电阻作为测量电桥的一个臂，这时电桥是平衡的，无讯号输出。当水位上升（或下降）时，电流通过水体，电阻值增大（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、连杆等使探针上下移动，驱动探针又回归到平衡位置。这样，探针就可跟着水位变化。

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不能很好地跟踪。

目前国产跟踪式水位计最大跟踪速度为

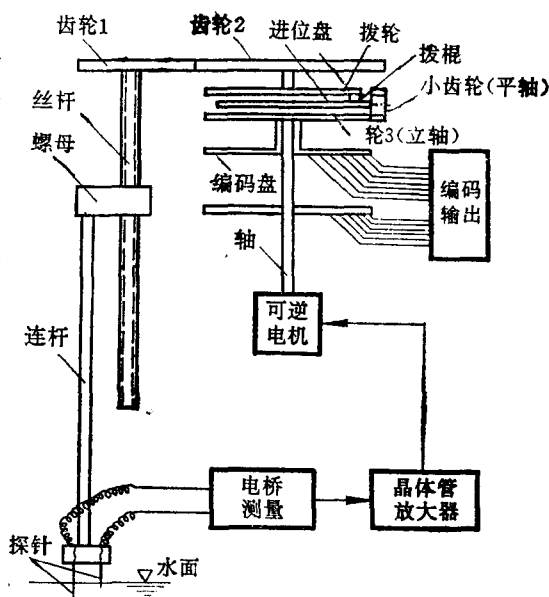


图 1-5 跟踪水位计原理和构造示意图

5.5mm/s, 跟踪最大距离为 200cm、实验室常用的跟踪距离为 40~20cm, 读数误差为 $\pm 0.1\text{mm}$ 。一般用于明渠水位的量测。还可用于数字显示水位读数, 用于多点、同步、自动巡回检测, 与打印机联动可每隔一定时间把所测水位自动打印出来。

二、钽丝水位计

图1-6所示为钽丝水位计的传感器和量测系统框图。钽丝水位计是利用电容式转换原理制成的。其传感器由钽丝和金属杆组成, 见图 1-6(a)。钽丝的直径为 0.4~1.0mm, 钽丝表面经过阳极氧化处理后, 形成一层很薄的 ($1.8 \times 10^{-4}\text{mm}$ 左右) 氧化钽膜, 在一般条件下它是不导电的。传感器下端的钽丝用氧化膜封口, 用尼龙丝与支杆连接, 上端引线密封在有机玻璃基座中, 与地线一同引入两芯插座。当水位计放入水中后, 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 间的关系可用下式估算:

$$C = Kh \quad (1-1)$$

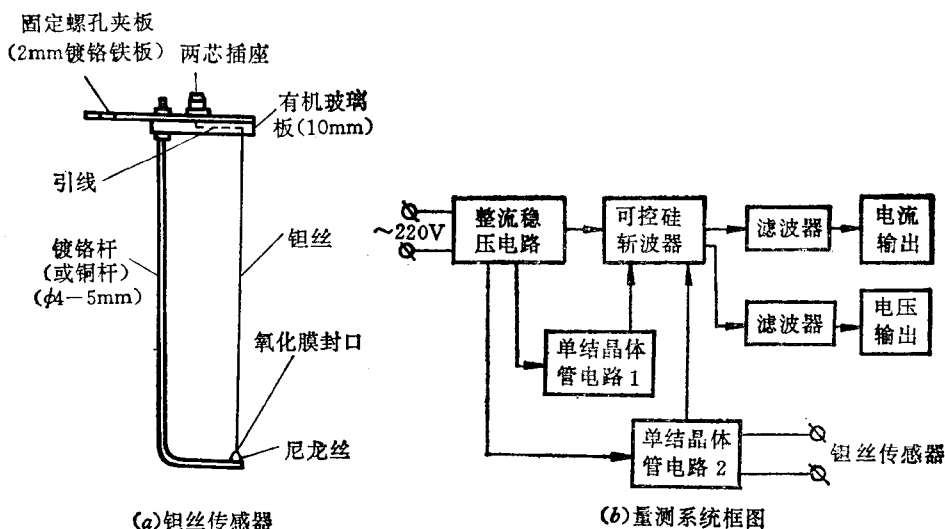


图 1-6 钽丝水位计图

式中, K 为传感器的系数, 与氧化钽的介电常数、厚度及钽丝直径等因素有关, 由实验获得; 对任一钽丝传感器而言, K 值均为常数。

钽丝水位计在使用时, 通常都是把电容 C 的变化转换为电压 (或电流) 的变化, 送入计数器或示波器, 见图 1-6(b)。这样, 拟测的水深 h 的大小, 可根据计数器的读数或示波器光点偏移量来确定。也可与计算机联用, 通过数据处理程序求得水深随时时间变化的时均值、最大与最小值、以及某些随机参量。

钽丝水位计由于精度高 (可达 0.5mm 左右), 动态响应快, 便于数据处理等优点, 被广泛应用于波动水位的量测。但水质、水温及拟测的流场边界等对传感器均有一定影响, 一般使用前应在相应流场中进行率定, 或采用屏蔽罩等措施来消除有关影响。

第二章 流速与流向的量测

在实验中如何正确地测定流场中的流速是很重要的，它既是进行理论分析的出发点，也是验证理论的重要参量。

测定流速的内容包括测定流速的大小和方向。在恒定流动情况下，流速的时间平均值虽不随时间变化，但是流速的瞬时值及其瞬时方向则是随时间变化的。在非恒定流动情况下，则流速大小的时间平均值和方向也是随时间变化的。根据这个特点，要测定流速，最基本的是量测其瞬时值及方向。用仪器或计算方法将一定时间内的瞬时值平均后，即可求得流速的时均值及其时均方向。

根据流动的具体条件，可采用下列不同的量测流速的方法。

§ 2-1 流速的量测*

一、浮子法

(一) 表面浮子法

将重量较轻的小纸片或小软木块、小泡沫塑料块、腊块等放在水流中，因其比重较水为轻，故可随水飘浮，如果每经过一定时间间隔，连续测记它们的位置或拍摄它们的轨迹，这样即可算出浮子所经过的测点的水流流速。

所采用的具体方法中，有的是在所拍摄流场的上方固定摄影机，拍摄流场边界与模型建筑物；然后在无光源情况下，使摄影机(或照像机)的快门全开，每隔一定时间使强闪光灯照射全部流场一次，这样就会在底片上每隔一定距离出现一个浮子影像，洗出底片后，根据曝光时间长短及影像间的距离即可算出各相应段内的时均流速。另外也可以在摄影机镜头前置一等速旋转的遮板，在遮板上正对镜头处打有弧形孔洞，而在水流表面上施放发光浮子(如在木板上放小腊烛)，当孔洞转到镜头前时，则底片即曝光一次。采用钟表控制机件使遮板每2秒转动1次，则底片曝光时间即为1秒(或1/2秒)。如此继续下去，即可在底片上拍下浮子的间断迹线，其流速的算法同前。图2-1即为这种测速方法的布置示意图。图2-2则为用这种方法得到的一张闸下出流的迹线照片。用这种方法只能得到水面各点的时均流速，但若重复若干次，也可以得到水面各点的瞬时流速。应用这个方法的关键在于如何测准底片的曝光时间，否则误差较大。

有时为了观察流态或流动图形，可在水面上撒些可漂浮的粉末来作观察。这些粉末可以是铝粉、石松子粉、纸花或锯木屑等。实验时要求水表面非常干净，不然表面张力的作用将使这些粉末聚拢在一起。还可用石腊涂在物体表面，可以消除水的表面张力影响，以便更好地显示物体表面附近的流动。

* 黄继扬编写

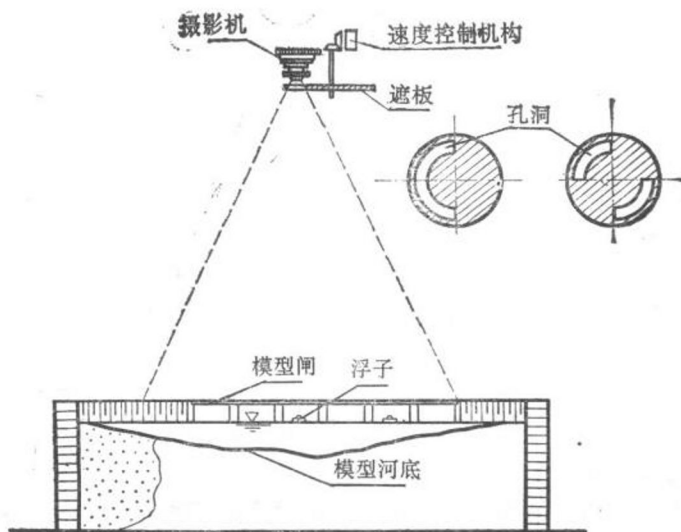


图 2-1 表面浮子法布置示意图

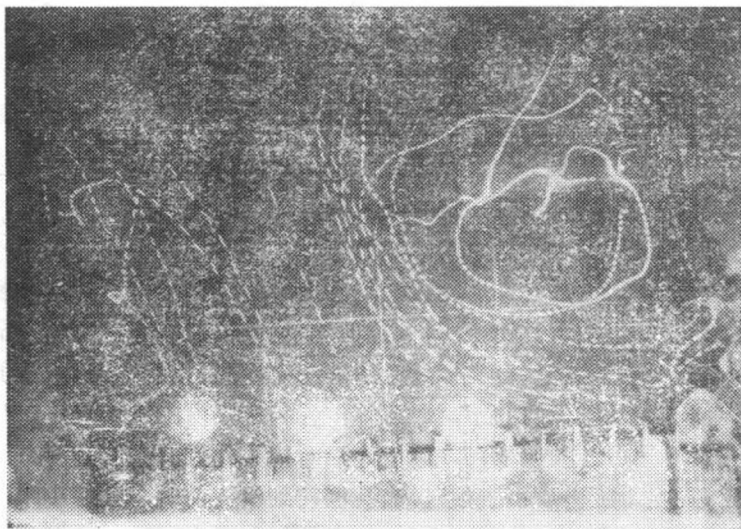


图 2-2 闸下出流迹线照片

例如，将一圆柱体垂直放入水槽中，在圆柱体前面徐徐撒上漂浮物，这样便可以看到水流的流动图形。在水流流速很慢时，圆柱体后面便会产生两个对称旋涡；当水流流速增大至某一数值后，在圆柱体后面则会形成两列交错排列、转动方向相反、周期性发生的旋涡，称为卡门 (Von Kármán) 涡列。如图 2-3 所示。图 2-4 是圆柱旋转时有环量流动的图形。

(二) 浮粒子法

若欲测水流内部各点的流速，则可在水中放入比重为 1.0 的带色小液滴(当水流速度较慢时) 或固体颗粒(当水流速度较快时)，利用上述同样方法，从水流侧面(如二维玻

璃水槽情况)或底面(通过透明的玻璃底板)进行摄影,然后对底片进行分析,即可得出流场内的流速分布。

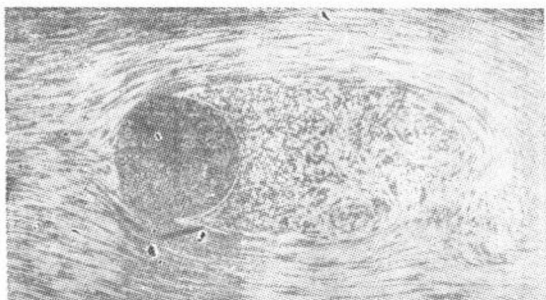


图 2-3 圆柱绕流后面的卡门涡列图形

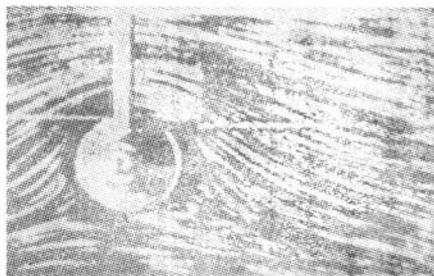


图 2-4 有环量圆柱绕流的流动图形

当水流速度较低时(例如在 10cm/s 以下),液体的浮粒子可用比重约为 1.6 的四氯化碳、比重约为 1.1 的氯苯、比重约为 0.87 的甲苯、比重约为 0.87 的二甲苯以及比重约为 0.88 的苯等,适量混合后再加入染色剂(白漆或重铬酸钾)配制而成。在滴入水中时,要使用特制的注入器,以使滴径不大于 1mm 。当水流速度较高时(例如在 1m/s 以上),则可采用比重为 1.0 的固体浮粒子,可用沥青加入适量松香、石蜡加热混合制成,粒子直径也要小于 1mm 。还可以采用经过处理的比重等于 1.0 的聚乙苯烯微粒(直径为 $0.1\text{--}1.0\text{mm}$);或很细的铝粉作为粒子,以显示水流的运动情况。

当水流速度较低时,可采用浮子法中所介绍的摄影方法,采用摄像机或电影摄影机等。但水流速度较高时则需要采用高速摄影机,以便得到准确的资料。采用高速摄影方法时,对光源的要求随拍摄速度的加快而增高;高速摄影机均附有标准时间讯号发生器,所发讯号均印于底片一侧,以作为分析流速数据之用。

用摄影方法,可采用一定措施,使底片上同时得到流场内的三维流速分布资料。

(三) 氢气泡法

在拟测的水流流场中拉上一根很细的白金丝,其直径为 $0.013\text{--}0.05\text{mm}$,使其与直流电源的阴极相连,直流电源的阳极则置于同一流场内,见图 2-5。接通电源后,作为

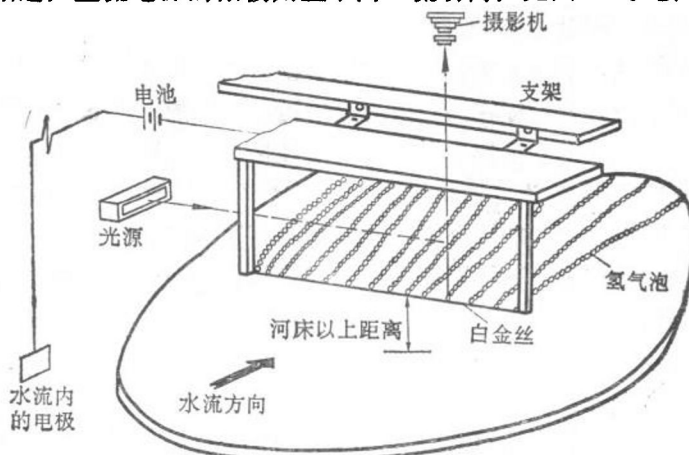


图 2-5 氢气泡法测速布置示意图

阴极的白金丝附近的水即被电解而产生氢气泡，泡的直径约为白金丝直径的一半。当流速足够大时，氢气泡即随水流运动，此时若在流场上方安置摄影机，并以适当位置照明时，则可摄得氢气泡所显示的水流迹线。如图 2-6 为经特殊处理后的白金丝垂直拉于水中测得的一根水流迹线。

如果每隔一定时间，间断地接通电源，则可得出如图 2-7 所示的图形。用与前述表面浮子法相同的分析方法就可得出有关各点的时均流速分布；改变白金丝的位置，即可得到流场内各点的时均流速分布。



图 2-6 水流迹线

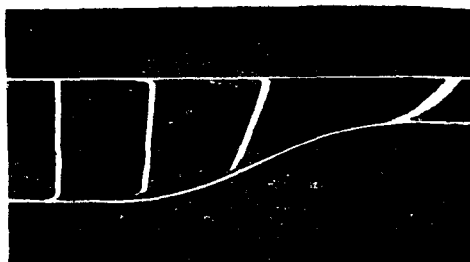


图 2-7 流场中垂向流速分布

由于氢气泡会很快地在水中消失，故每次拍摄的范围不宜过大。白金丝上产生的氢气泡大小与数量和通过白金丝的电流大小成正比，试验前应进行估算，使氢气泡的大小和数量能满足摄影的要求。当水流速度在 1.0m/s 左右时，白金丝电源电压可取 $0.5\text{--}2.5\text{kV}$ ，使电流值约为 3A ，这样可获得满意的结果。

二、浮子摄影法

属于这类方法的有间隔曝光摄影法、氢气泡摄影法、高速摄影法及摄像法等。其中前两种方法已如前述，下面只介绍后两种方法。

(一) 高速摄影法

高速摄影是把高速运动变化过程的空间信号和时间信号紧密联系在一起进行图象记录的一种摄影方法。观测快速流动过程就要靠高速摄影来放大时间标尺，使人们能直接观看并研究某一特定时刻的空间-时间图象。

对高速摄影的图象，有时要求记下单幅或多幅有关过程变化的二维图象，通常称为分幅摄影。有时只需把快速过程在某一方向上的运动轨迹的一维图象连续记录下来，通常称为扫描摄影。曝光时间和摄影频率是区别高速摄影和普通摄影的两个主要标记。摄影频率在 10^2 幅/秒以下的称为普通摄影； $10^2\text{--}10^3$ 幅/秒的称为快速摄影； $10^3\text{--}4\times 10^4$ 幅/秒的称为次高速摄影； 4×10^4 幅/秒以上的称为高速摄影。高速摄影机是结构精密、造价昂贵的光学仪器。根据各种不同原理设计制造的成系列的高速摄影机，其摄影频率可由每秒几千幅到亿幅以上。

1. 单张高速照片摄影方法

经验证明，要基本上了解一个高速流动过程，在某些情况下，并不需要将全部过程记录下来。当研究恒定高速流动过程时，例如，研究涡轮机叶片的旋转运动，若只研究其典型瞬时情况，则只要有单张照片就足以了解其过程了。

单张高速照片的获得可以分为两种情况：一种是被摄流场本身不发强光，需要利用一次历时极短的瞬间闪光来照明；另一种是被摄流场本身发光很强，照片的曝光时间需要依靠高速摄影机的高速快门来控制。

2. 分幅高速摄影方法

在多数情况下，要研究分析一个高速运动过程，一般还希望能够得到一组说明高速过程不同发展阶段的连续照片，使照片上所记录的物体运动过程成为时间的函数，并且可以从这组照片上将物体运动的速度和加速度推算出来。可以一幅一幅地进行研究，也可以用电影放映机将所拍摄的运动过程以合适的速度重现在屏幕上来进行研究。

在普通电影摄影中，胶片是间歇移动的，它的标准频率是每秒 24 次。一般摄影机频率也不超过 200—600 幅/秒。在拍摄运动速度并不十分快的高速过程时，目前广泛采用胶片连续移动的高速电影摄影机，其拍摄频率从每秒几百幅到几万幅。

下面再介绍一下如何利用高速摄影方法量测水流的流速。其基本原理与“表面浮子法”的原理相同。将所拍得的底片一幅一幅地连续或间歇地投影到屏幕上，量测某浮子指示球在两相邻底片上移动的距离(要换算成为真距离)，除以相邻底片的时间差即为该浮子指示球所在处的速度。用相邻三个底片的前两片算出的速度与后两片算出的速度之差除以每片的时间差，即可得出该浮子指示球所在处的加速度。用这样方法可以得出一个浮子指示球流经路程上每个位置的流速和加速度；若选取的浮子指示球遍布整个流场，则可得出整个流场中各点的速度和加速度。

这种量测方法，从理论上讲，如果浮子指示球的比重与水相同，其体积为无限小时，它的运动可以代表水流质点的运动；否则会引起误差；这种误差称为“跟随性误差”。如用比重为 1.05，直径为 1mm 左右的浮子指示球，在水流流速为 2—3m/s 时，其误差约为 4% 左右。

(二) 摄像法

利用摄像机来摄取水流中浮子指示球的运动情况，用类似于高速摄影法的分析也可以得出水流的速度场和加速度场。这个方法特别适用于在波浪或潮汐作用下水流做非恒定、往复运动的情况，下面用一个具体实例来加以说明。

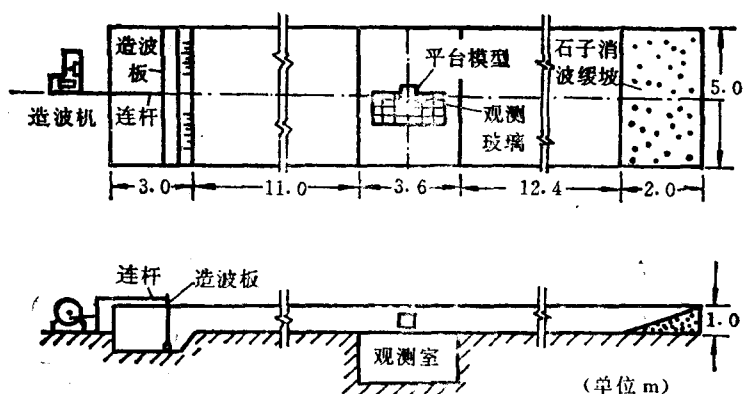


图 2-8 波浪池示意图