

高等院校教材

赵振兴 何建京 主编

水力学

实验

7131
59

河海大学出版社

水力学实验

主 编 赵振兴 何建京

编著者 (以姓氏笔画为序)

王 忬 何建京 张淑君

赵振兴 程 莉

河海大学出版社

内 容 简 介

本书是按原国家教育委员会高等教育司制定的《水力学课程教学基本要求》中有关对实验环节的要求而编写的。

全书由三部分组成:第一部分为水力学实验中水力要素的量测技术;第二部分为水力学及流体力学实验;第三部分为实验误差分析。

本书主要作为高等院校的水利类、土建类、机械类各专业本科和专科的实验教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学实验/赵振兴,何建京主编 —南京:河海大学出版社,2001 5.

ISBN 7-5630-1585-X

I. 水… II. ①赵…②何… III. 水力实验-高等学校-教材 IV. TV131

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 19220 号

书 名/水力学实验

书 号/ISBN 7-5630-1585-X/TV·196

责任编辑/吴毅文

责任校对/李 恬

封面设计/叶 兵

出 版/河海大学出版社

地 址/南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话/(025)3737852(总编室) (025)3722833(发行部)

经 销/江苏省新华书店

印 刷/南京京新印刷厂

开 本/787 毫米×1092 毫米 1/16 5.5 印张 105 千字

版 次/2001 年 5 月第 1 版 2001 年 5 月第 1 次印刷

印 数/1~4500 册

定 价/10.50 元(册)

前 言

水力学实验在水力学学科发展及教学中占有重要地位,尤其在我校单独作为一门课程设置后其重要性更加突出,但多年来水力学实验课一直采用讲义形式,缺少一本正式出版的教材。

本书是在河海大学水力学教研室多年教学实践经验及原有的讲义基础上,并广泛地吸取国内外实验教材中的优点编写而成的。编写过程中始终贯彻理论联系实际,注重实践环节,并结合了小型台式自循环实验仪器的开发和使用,力求符合学生的认识规律及便于自学的原则。全书共包括三部分:第一部分为水力要素在水力学实验中的量测技术,第二部分为水力学及流体力学实验,第三部分为实验误差分析。

本书采用集体讨论、分工执笔的方式进行,参加本书编写的有赵振兴、何建京、张淑君、程莉、王忖等,全书由赵振兴、何建京统编审定,由许荫椿教授主审。

由于水平所限,书中的缺点和错误在所难免,恳切希望读者指正。

编 者

2001年2月

74504104

目 录

第一章 液体运动要素量测	(1)
第一节 概述	(1)
第二节 水位量测	(1)
第三节 流量量测	(6)
第四节 流速量测	(12)
第五节 压强量测	(17)
第二章 液体物理性质实验	(21)
第一节 液体粘滞性的测定实验	(21)
第三章 水静力学实验	(23)
第一节 静水压强实验	(23)
第二节 平面静水总压力实验	(25)
第三节 液体相对平衡演示实验	(28)
第四章 液体一元恒定总流基本原理	(30)
第一节 流线演示实验	(30)
第二节 能量方程实验	(31)
第三节 动量方程实验	(34)
第五章 液流流态与液流阻力	(36)
第一节 雷诺实验	(36)
第二节 管道沿程水头损失实验	(38)
第三节 管道局部水头损失实验	(40)
第六章 有压管道实验	(43)
第一节 调压井演示实验	(43)
第二节 水击现象演示实验	(44)
第三节 水锤扬水机演示实验	(45)
第四节 文德里流量计及孔板流量计实验	(47)
第七章 明渠水流实验	(49)
第一节 毕托管测流速实验	(49)
第二节 光电流速仪测流速实验	(51)
第三节 明渠水跃实验	(53)
第四节 明渠非均匀流水面线演示实验	(56)
第八章 孔口管嘴出流与堰流实验	(59)

第一节	孔口管嘴实验	(59)
第二节	堰流实验	(61)
第九章	渗流实验	(63)
第一节	达西渗流实验	(63)
第二节	有压渗流的水电比拟实验	(64)
第十章	液体三元流动基本原理实验	(67)
第一节	平板边界层气流实验	(67)
第二节	势流叠加演示实验	(71)
第十一章	测量误差及精度分析	(73)
第一节	测量与误差的基本概念	(73)
第二节	随机误差的特点及其分布	(76)
第十二章	实验数据的处理	(78)
第一节	实验数据有效数字的确定	(78)
第二节	实验数据列表表示法	(79)
第三节	实验数据的图线表示法	(80)

第一章 液体运动要素量测

第一节 概 述

在水力学发展进程中,实验研究占有非常重要的地位。许多重要的成果,例如层流和紊流这两种流态的发现及水流阻力规律的发现,都是通过科学实验得到的。

由于水流的复杂性,重要水利工程设计方案的论证,都需要有模型试验结果的支持。需要通过试验对设计方案中人们所关心的水力学问题进行观测和量测,对流态、流量、流速、水深、压强等运动要素有所了解,从而可以对设计方案进行比较、修改和优化。所有的水力学实验,都离不开对液体运动要素的量测。

在学习水力学和做水力学实验时,应重视对水力要素的量测,加强这方面的训练,掌握量测水力要素的基本方法。本章着重介绍表征水流特征的几个重要水力要素:水位、流量、流速和压强的量测原理和方法。

第二节 水位量测

学会准确地量测水位,是做好水力学实验的重要基本功。因为在进行水力学实验时,一些量测流量、流速和压强的方法都归结为量测水位。

随着水流运动状态的不同,水面的特征也有区别。静止状态的水或流速较小的水流,其水面较平稳,很少波动。而流速较大的水流,其水面常出现不规则的波纹,波动明显。对于恒定流,水位不随时间变化,量测时不需考虑时间因素,而非恒定流水位随时间变化,需要量测瞬时水位和水位随时间的变化过程。因此,必须针对水流的不同特点选用适当的量测方法。

一、恒定水位的量测

当水面的位置不随时间改变时,通常采用以下几种量测方法。

1. 直接量测法

将具有刻度的标尺或物体放入水中,读出水面位置的读数。或者在透明容器的外部附上标尺,直接读出容器内水面位置的读数。

由于表面张力的作用,水面与标尺或容器接触部位水面局部升高,影响到水面位置读数的准确性。在应用直接量测法量测水位时,要考虑由此产生的读数误

差。

2. 测压管法

在装有液体的容器侧壁上开一小孔,外接紫铜管、橡皮管和透明的玻璃管(测压管),并在管旁设立标尺。根据连通器原理,测压管中的水位必然与容器中的水位同高。通过读出测压管中水面在标尺上的读数即可间接测出容器中的水位。必须注意选用的玻璃管不宜太细,以避免由于表面张力的影响使读数不准确。对于常温下的水,可用下式估计表面张力的影响。

$$h \approx \frac{30.2}{d}$$

式中: h 与 d 的单位均为mm; d —玻璃管的直径, h —玻璃管内水面的升高值。

为减少表面张力的影响,用作测压管的玻璃细管的内径应大于10mm。

3. 测针法

一是在需要量测水位处设置固定测针架,用测针尖量测水面位置,二是利用紫铜管及橡皮管将水由水槽或容器侧壁上的小孔连通至测针筒内,形成连通器,测针筒内的水位与水槽或容器中的水位同高。将测针架固定在测针筒旁边,用测针尖量测筒内水位,即可知水槽或容器内水位。前者直接明了,测读方便,但当水流动时,水面易产生波动,不易测读准确。后者在测针筒内测读水位,水面平静,精度较高。但对于动水,该法只能应用于渐变流过水断面,同时要防止侧壁上小孔堵塞或橡皮管内进入气泡,使用前应检查连通器内的液体是否畅通,必要时要进行排气。

实验室内使用两种型号的测针,现分别介绍它们的使用方法:

(1)传统型测针。传统型测针的构造如图1-1(a)(b)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,芯体可带动测针做上下微幅移动,使测针尖端刚好接触水面。测针的尖端可以做成针形,也可以做成钩形。

当测针尖接触水面后,游标上的零刻度对应测针杆标尺的数值为水位读数。

为提高读数的精度,需了解游标的测读方法。测针标尺的单位刻度是1mm,游标的单位刻度是0.9mm。测针标尺的单位刻度与游标的单位刻度之差为 $1.0\text{mm} - 0.9\text{mm} = 0.1\text{mm}$ 。因此,游标刻度与测针标尺刻度重合处的游标读数是精确到0.1mm的读数。例如图1-1(c),游标上零刻度正好对应测针读数2,且两刻度重合,所以水位读数为2.00cm。再如图1-1(d),游标上零刻度对应测针标尺读数在2.2cm与2.3cm之间,找到游标上6的刻度与测针标尺上某一刻度重合,可知此时水位读数为2.26cm。

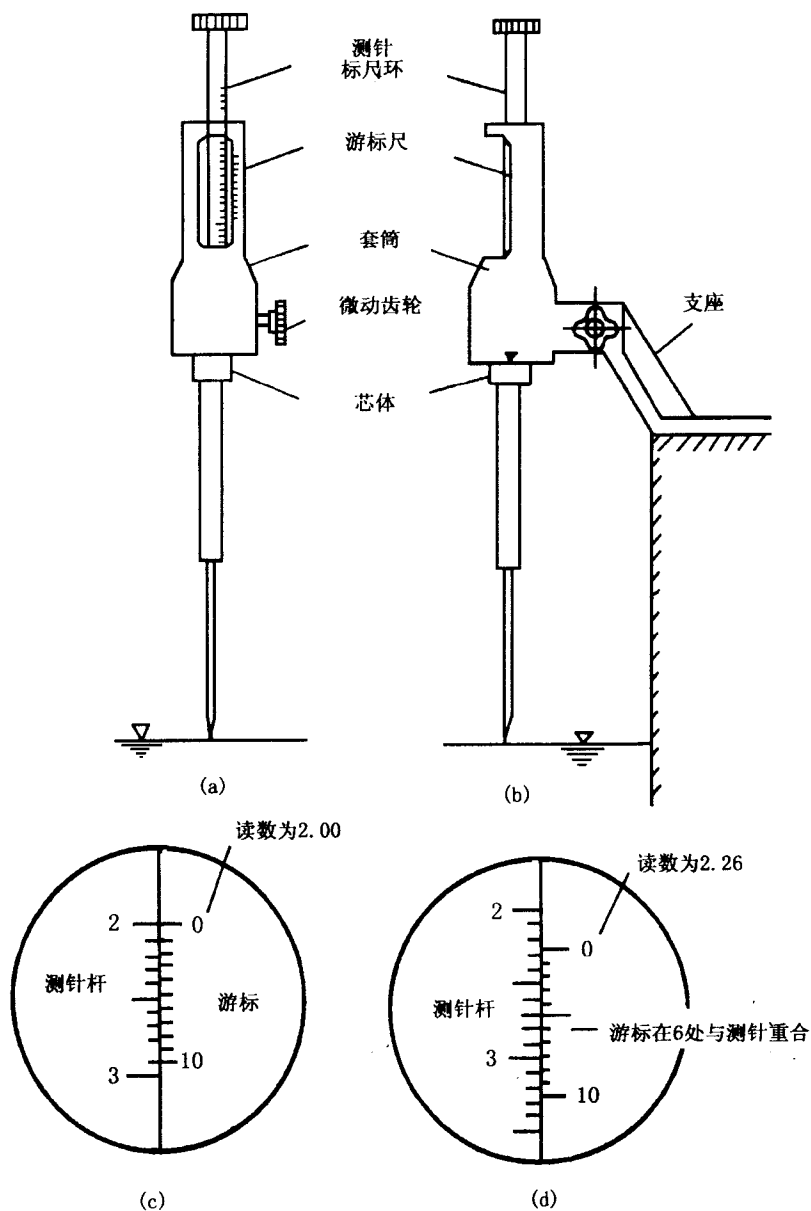


图 1-1 传统型测针结构图

在上下移动测针杆量测水位时,应首先用一只手托住芯体,另一只手抓住测针杆将其向上(或向下)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调节测针尖刚好接触水面,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(向上或向下)实行微调受阻时,应将微动齿轮向相反方向旋动,使测针杆向上(或下)移动 1.5 cm 左右,再按先粗调、后细调的步骤将测针杆调至所需位置。

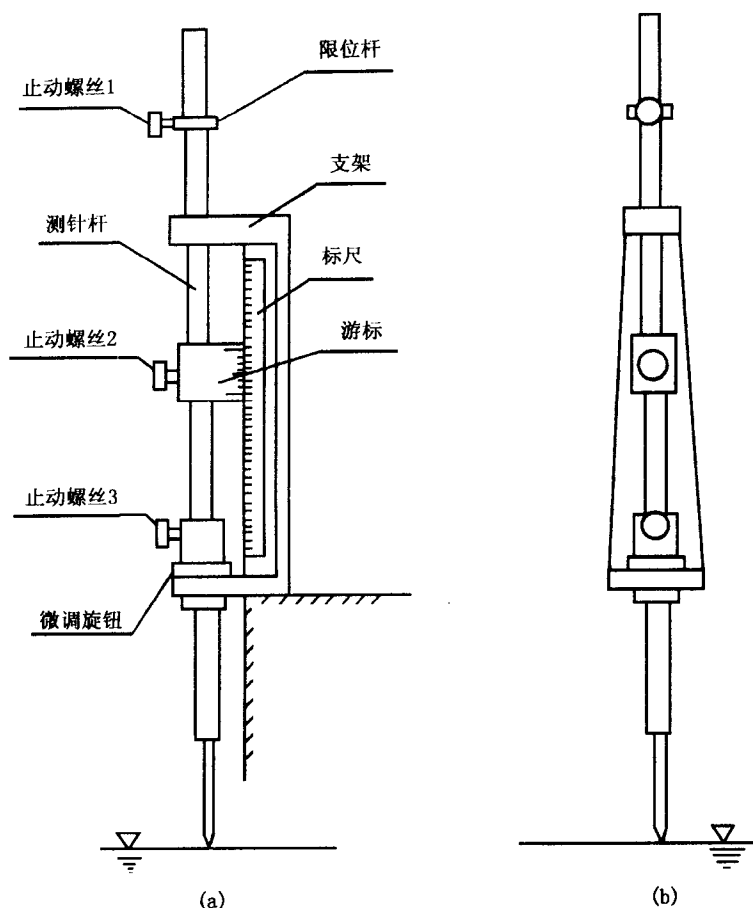


图 1-2 新型测针结构图

(2)新型测针。新型测针的构造如图 1-2(a)(b)所示,新型测针的构造简单,使用也很方便。旋松止动螺丝 3,测针杆可以上下移动,实行粗调;旋紧该螺丝后,再旋转微调旋钮,可调节测针杆做微幅上下移动,实行细调。止动螺丝 2 的作用是将游标固定在测杆上。在量测过程中,不应旋动该螺丝,否则测针的基准面高程将随之改变。止动螺丝 1 的作用是将限位环固定在测针杆上,防止测针掉入水中,量测过程中也不应旋动该螺丝。

使用新型测针量测水位时,应用一只手扶住测针杆,另一只手旋松止动螺丝 3,实行粗调。随即旋紧止动螺丝 3,将测针杆固定,再旋动微调旋钮,将测针尖调至刚好接触水面,完成细调。这时,游标上零刻度所对应标尺的数值即为水位读数,利用游标可使水位值的读数精确到 0.1 mm。

(3)使用测针时的几点注意事项:

(a)针尖勿过于尖锐,以半径为 0.25 mm 的圆尖为宜。

(b)读数时,测针尖端应自上方逐渐移近水面(不应由水中提起,否则易因表面张力作用引起误差)。

(c)当水位略有波动时,应量测水位多次,然后取其平均值。

测针既可以用来量测水面位置(设以 ∇_1 表示),也可以量测渠底位置(设以 ∇_2 表示),从而又可以得出水深的数值,水深 $h = \nabla_1 - \nabla_2$ 。

二、非恒定水位的量测

当水面位置随着时间的变化而变化时,水位是非恒定的。例如当水面产生波浪后,水位即为非恒定的。非恒定的水位又称动态水位。量测动态水位需用动态水位仪。动态水位仪是电子仪器。使用动态水位仪并配备数据采集系统时可以达到多点、同步自动量测的目的。这对于缩短量测时间、节省人力和及时处理数据均有很大意义。

动态水位仪因其传感器方式不同分为电阻式水位仪和电容式水位仪。

电阻式水位仪又称为跟踪式水位仪。其量测原理是用两根不锈钢棒或炭棒作为两个电极固定在一块绝缘板上,将其放入水中。因为水是一种导体,在两棒之间形成电阻,其电阻值随两棒的入水深度而变化,淹没越深其电阻值越小,反之则越大。这种关系可用下式表示:

$$R_{\text{水}} = \frac{D}{\rho L}$$

式中: D —两棒之间的距离; ρ —水的电导率; L —两棒的淹没深度。

跟踪式水位仪的传感器是两根不锈钢针,较长的一根接地,短的一根插入水中约0.5~1.5 mm深度。当探针相对于水面固定不动时,两根探针间的水电阻是不变的,用它作为量测电桥的一臂,并使此时的电桥处于平衡状态,没有讯号输出。当水位升降变化时,水电阻必然相应减小或增大,使电桥不平衡,电桥把不平衡电讯号送入放大器。经过放大的讯号驱动可逆电机,电机的旋转通过机械部件,齿轮结合,操纵探针上下移动,使得探针回归平衡位置。此时电桥恢复平衡,无讯号输出,电机停止转动,达到自动跟踪水位的目的。如附有记录装置,即可通过记录笔,记下水面波动值。

电容式水位仪的量测原理是基于两同轴圆筒构成的圆柱形电容,该电容的大小与水位成线性关系。两同轴圆筒形电容 C 的表达式为

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{R_B}{R_A}\right)} = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{R_B}{R_A}\right)}$$

式中: ϵ —极板间的绝缘质的介电常数; ϵ_0 —真空中介电常数, $\epsilon_0 = 0.0885$; ϵ_r —介质的相对介电常数,它随不同介质而异,如空气的 ϵ_r 近似等于1; R_B —外圆半径; R_A —内圆半径; l —圆柱高度。

由上式可见,当某一种绝缘介质 ϵ 及外形尺寸 R_b 和 R_A 不变时,电容量 C 将正比于水位高度 l 。因此水位上升时,电容量增加,反之则减小。电容式水位仪就是根据这一原理制成的。

只要能够满足把水位的变化转为电容量变化的任何绝缘导体都可作成简单的电容传感器。早期是用高强度漆包线作为传感器,目前多选用经过表面处理的钽金属丝作为传感器。钽丝具有良好的介电性能,经化学处理而在其表面形成一层氧化膜后,使电容量增大很多倍,比漆包线电容约大数万至数十万倍。钽丝电容还有一独特的优点,就是其氧化膜厚度,即电容量,很容易在阳极氧化工艺中进行控制,可使不同长度的钽丝得到相同的电容量,从而可使二次仪表的满度值不变。钽具有很高的化学稳定性,除氢氟酸外,即使是硫酸、盐酸等,对它也不起作用。在一般水中,钽和它的表层氧化膜都是非常稳定的。

钽丝传感器如图 1-3 所示。镀铬杆接地,钽丝由引线引出。随着水面淹没钽丝的长度不同,形成不同的电容量输出。二次仪表将输出的电容处理后转化成其他电量形式输出到不同的数据采集系统中显示其水位的变化。如电流量输出可接光线示波器显示水位变化曲线;电压量输出可直接由计算机采集对数据作进一步处理。

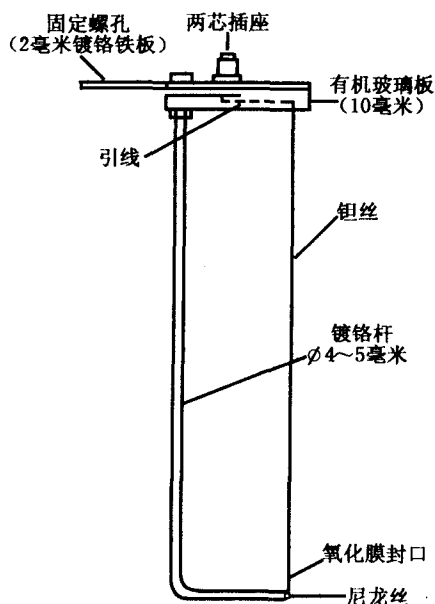


图 1-3 钽丝传感器构造图

第三节 流量量测

流量是单位时间内流经某一过水断面的流体体积。某瞬时单位时间内流过的流体体积称为瞬时流量。某段时间内流过的流体总体积除以该段时间为该段时间内的平均流量。

实验室中一般都是量测恒定流流量。下面介绍流量的量测方法。

一、体积法和重量法

体积法和重量法是根据流量的定义进行流量量测。操作方法是在某个固定的时段内,将流经管道或明渠的水流引入一个体积经过标定的固定容器内,量测

出这些水的总体积,或是用磅秤称出这些水的总重量,并记录下时段的长度。两个量相除即可得到单位时间内流过的水的体积,即流量。如果测的是重量,可用重量除以水的密度与重力加速度的乘积,即可得到体积。

体积法测流量需用秒表一只,标定容积的量水器一个,可以是量杯或水箱。

重量法测流量需用秒表一只,磅秤及水桶各一个。

提高量测流量精度的方法是注意接水的时间要足够长,接得水的总体积或总重量应足够大,使得记录时间的误差及体积和重量读数的误差的影响相对较小,以提高量测的相对精度。一般接水时间应大于 10 秒,必要时应对流量进行多次量测取平均值。

二、量水堰法

量水堰法是在明渠中量测流量。将量水堰置于明渠中,当水流从堰顶溢流时,水流发生收缩,并在水流上游形成壅水现象。此时堰上水头与过堰流量之间具有一定关系,根据实测的堰顶水头、堰的溢流宽度、堰高等数值就可由堰流公式计算出过堰流量。实验室内常用薄壁堰量测流量。

常用的薄壁堰有矩形堰和三角堰两种,如图 1-4(a)(b)所示,其过流纵剖面见图 1-4(c)。

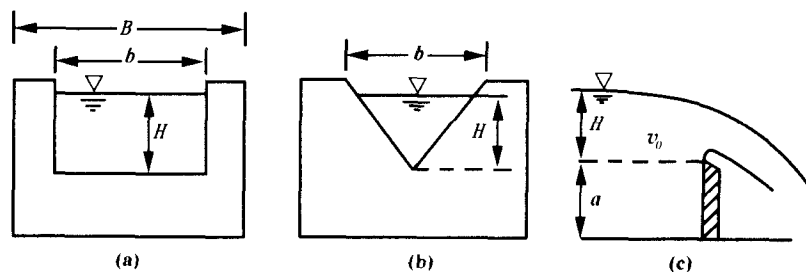


图 1-4 薄壁堰示意图

1. 矩形薄壁量水堰

如图 1-4(a)所示,其堰口为矩形。矩形薄壁堰的流量计算公式为

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

式中: m_0 —堰的流量系数; b —溢流宽度; H —堰上水头。

流量系数 m_0 可用经验公式计算,如雷保克(T. Rehbock)对于自由出流和无侧收缩矩形薄壁堰给出如下公式:

$$m_0 = 0.4034 + 0.0534 \frac{H}{a} + \frac{1}{1610H - 4.5}$$

$$0.2\text{m} < a < 1.13\text{m}; 0.1\text{m} < H < 1.24\text{m}$$

式中: H —堰上水头; a —堰高, 均以 m 计。

上式的适用条件为: $H \geq 0.025\text{ m}$; $\frac{H}{a} \leq 2$; $0.2\text{m} < a < 1.13\text{m}$; $0.1\text{m} < H < 1.24\text{m}$ 。

2. 三角形薄壁堰

三角形薄壁堰的堰口形状为等腰三角形, 简称为三角堰。当三角堰的堰上水头 H 变化时, 溢流宽度 b 也同时改变。因此, 使用三角堰测小流量时, 较小的流量变化会使堰上水头产生较大的变化, 从而提高量测精度。所以常用三角堰量测较小的流量。

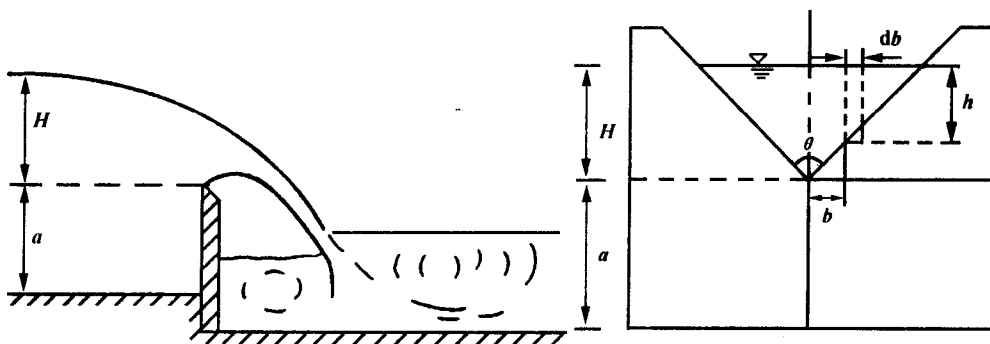


图 1-5 三角形薄壁堰示意图

如图 1-5 所示, 如将微小宽度 db 的过堰水流看成矩形薄壁堰流, 则

$$dQ = m_0 \sqrt{2gh}^{3/2} db$$

式中: h — db 处的水头。

$$\text{由几何关系} \quad b = (H - h) \tan \frac{\theta}{2}, \quad \frac{db}{dh} = -\tan \frac{\theta}{2}$$

$$\text{即} \quad db = -\tan \frac{\theta}{2} dh,$$

代入上式有

$$dQ = -m_0 \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2gh}^{3/2} dh$$

式中: m_0 —矩形薄壁堰的流量系数。

设 m_0 为常数, 将上式积分并乘以 2 即得过堰的流量为

$$Q = -2m_0 \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} \int_H^0 h^{3/2} dh = \frac{4}{5} m_0 \tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2g} H^{5/2}$$

对于直角形三角堰, $\theta = 90^\circ$, 上式可写为

$$Q = \frac{4}{5} m_0 \sqrt{2g} H^{5/2} = CH^{5/2}$$

式中: C —直角三角堰的流量系数。

汤姆森(Thompson)试验给出流量系数 $m_0 = 0.396$, 则 $C = \frac{4}{5} \times 0.396 \times 4.43 = 1.4$, 则流量公式为

$$Q = 1.4 H^{5/2} (m^3/s)$$

式中: 水头 H 以 m 计。

该式的适用条件为 $H = 0.05 \sim 0.25 m$, $a \geq 2H$, 渠宽 $B_0 \geq (3 \sim 4)H$ 。

三、压差式流量计法

压差式流量计常用来量测有压管道中的流量。

在有压管道中设置可以引起压强变化的局部管件, 当连续流动着的水流遇到安放在管道内的局部管件时过水断面突然缩小, 流速增大, 水流产生收缩现象。在水流流过这种局部管件(又称节流装置)以后, 流速又由于过水断面的变大和水流的扩散而降低, 同时在局部管件前后的水流压强产生差异。此压强差异的大小与管道内通过的流量(对一定管径而言)存在一定的关系。利用这种关系就可以根据压差的实际量测值计算出管道中通过的流量。

压差式流量计中的局部管件种类很多, 其中应用最多的是文德里(Venturi)管和孔板。

1. 文德里流量计

文德里流量计是以文德里管作为局部管件, 文德里管包括收缩段、喉管和扩散段三个部分, 如图 1-6 所示。在收缩段进口断面 1—1 和喉管断面 2—2 处设测压孔, 并连接压差计。若暂不考虑能量损失, 对 1—1、2—2 两断面可写出能量方程如下:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g}$$

令 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$, 有

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g}\right) = \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g}$$

由实验可测得压差计的高差

$$\Delta h = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g}\right)$$

该值是水流单位势能的减少量, 即水流单位动能的增加量。如果管道断面为圆形, 进口断面直径为 d_1 , 喉管断面直径为 d_2 , 由连续方程

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

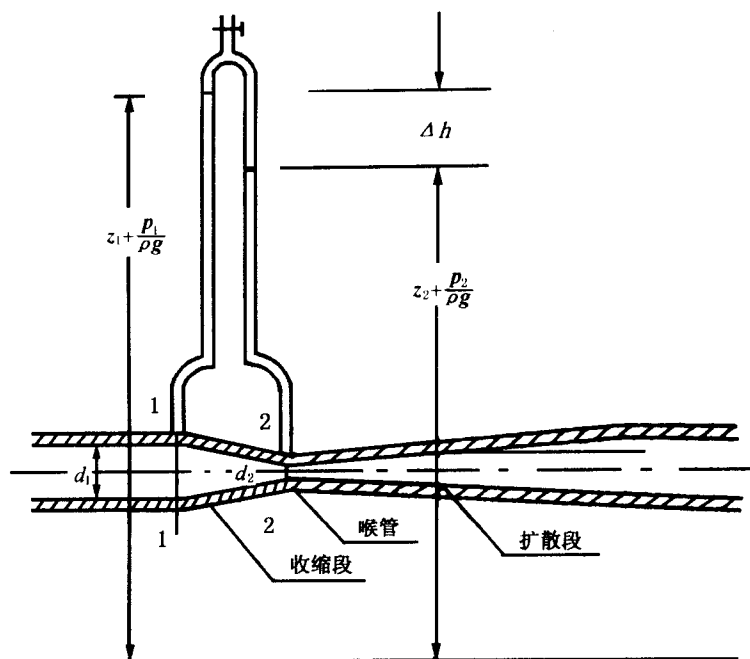


图 1-6 文德里流量计构造图

可得

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

则通过喉管时的水流单位动能的增值为

$$\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4 \right]$$

即

$$\Delta h = \frac{v_2^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4 \right]$$

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \sqrt{2g\Delta h}$$

通过有压管道的流量为

$$Q_{理} = v_2 \cdot A_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \sqrt{2g} \cdot \frac{1}{4} \pi d_2^2 \sqrt{\Delta h}$$

令 $\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \sqrt{2g} \cdot \frac{1}{4} \pi d_2^2 = K$, 当已知 d_1 及 d_2 时 K 为定值,

则

$$Q_{理} = K \sqrt{\Delta h}$$

由于在实际水流流动中存在着能量损失,因此管道中通过的实际流量 $Q_{实}$ 小于 $Q_{理}$,引入一个小于 1 的系数 μ 后就可将管道实际流量的计算式写为

$$Q_{实} = \mu K \sqrt{\Delta h}$$

μ 称为文德里管的流量系数,其值随着水流流动情况(用雷诺数表示)和管道的几何形状、尺寸(圆管时用 d_2/d_1 表示)而变化。在使用文德里管时应事先对 μ 值加以率定。在 d_1 与 d_2 均已固定的情况下,根据试验得知 μ 值随雷诺数 Re 的大小变化而变化,但在 Re 较大时 μ 值接近于常数,如图 1-7 所示。

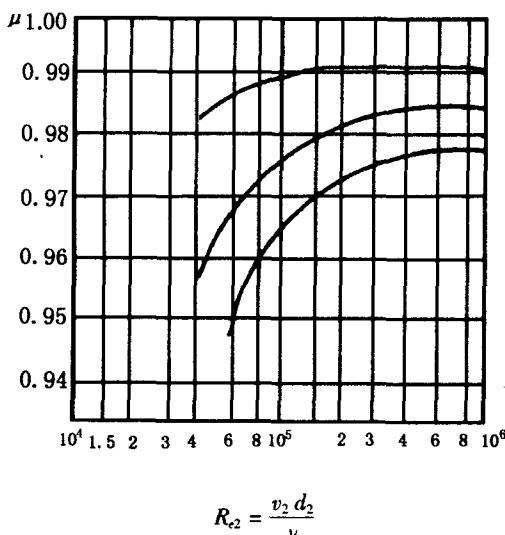


图 1-7 文德里管流量系数 μ 随雷诺数 Re 变化图

在制造文德里管时,有标准图纸可供参考,常采用 $d_2/d_1 = 0.5$,其扩散部分的扩散角 α 不宜太大,一般以 $5^\circ \sim 7^\circ$ 为宜。为防止生锈,文德里管常用铜制作。

安装时,管道在距文德里管上游 10 倍管径、下游 6 倍管径的距离内均不得有其他管件,以免水流产生旋涡而影响文德里管的流量系数。

文德里管具有能量损失较小,对水流干扰较少和使用方便等优点。但对管内壁加工精度要求较高。

2. 孔板流量计

管道中安装孔板的测流原理如图 1-8 所示。孔板的构造较为简单,但因水流在孔板背后形成较大旋涡,水流情况较文德里管更为混乱,水流能量损失较大。用孔板测流,同样是利用压差计的压差 Δh 与流量 Q 的关系,测得管中流量。其流量可用下式计算:

$$Q = CA \sqrt{2g\Delta h}$$