

SHUILIXUE SHIYAN

孙玉霞 朱永梅 张 鹏 主编

水力学实验



黄河水利出版社

水力学实验

主 编 孙玉霞 朱永梅 张 鹏
副主编 程银才 王 萌

黄河水利出版社
· 郑州 ·

内 容 提 要

全书共分3篇,第1篇为绪论,主要阐述水力学实验的意义及要求、水力学基本参数的量测;第2篇为基础实验篇,主要以水力学教学大纲为依据,满足本科实验教学要求,内容包括流体静力学综合性实验、毕托管测速与修正因数标定实验、文丘里综合性实验、恒定总流伯努利方程综合性实验、动量定律综合性实验、雷诺实验、沿程水头损失实验、局部水头损失实验;第3篇为提升实验篇,主要满足学生课外拓展要求,提升学生水力学理论体系,内容包括达西渗流实验、平面上的静水总压力测量实验、孔口出流与管嘴出流实验、明渠流动实验、有压管流实验、演示实验等。另外,本书配有相应的CAI课件。

本书可作为高等院校水利与土木类专业的实验教材,也可作为大专、中等专业学校相关专业的实验参考书,并可作为实验检测技术人员的工具参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水力学实验/孙玉霞,朱永梅,张鹏主编. —郑州:黄河水利出版社,2017. 11

ISBN 978 - 7 - 5509 - 1915 - 0

I. ①水… II. ①孙… ②朱… ③张… III. ①水力实验 - 高等学校 - 教材 IV. ①TV131

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第303784号

出版社:黄河水利出版社

网址:www. yrcp. com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126. com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:6. 5

字数:150千字

印数:1—2 100

版次:2017年11月第1版

印次:2017年11月第1次印刷

定价:15. 00元

前 言

水力学是一门研究流体的平衡和力学运动规律及其应用的科学。侧重于工程应用的应用流体力学(有的简称流体力学或水力学)是高等院校水利、土木、环境、海洋、机械、化工等许多理工科专业的必修课程。

水力学的特点是理论和实践紧密结合,它的许多问题,即使能用现代理论分析与数值计算求解,最终还是要借助实验检验修正。因此,实验教学在水力学课程中占有相当重要的地位。

本教材是《水力学》的配套教材,以培养动手能力、分析解决问题能力和创造创新能力为编写的指导思想,按实验课程的基本要求编写而成。本教材的实验顺序按照实验内容的知识体系分章编排,符合循序渐进的认知规律。

本教材中采用的实验教学仪器是浙江大学力学实验教学中心研制的,以创新的仪器和软件作为实验教学平台,对学生的创新能力培养是十分有益的。

本教材由孙玉霞、朱永梅、张鹏担任主编,由程银才、王萌担任副主编,在编写中得到了陈少庆、贾丽梅、郑乾坤等的帮助,在此一并表示由衷的感谢。

鉴于编者的水平有限,书中难免有错误和不足之处,恳请读者批评和指正。

编 者
2017 年 3 月

目 录

第1篇 绪 论	(1)
第2篇 基础实验篇	(9)
第1章 流体静力学综合性实验	(9)
第2章 毕托管测速与修正因数标定实验	(19)
第3章 文丘里综合性实验	(22)
第4章 恒定总流伯努利方程综合性实验	(26)
第5章 动量定律综合性实验	(30)
第6章 雷诺实验	(34)
第7章 沿程水头损失实验	(38)
第8章 局部水头损失实验	(42)
第3篇 提升实验篇	(46)
第9章 达西渗流实验	(46)
第10章 平面上的静水总压力测量实验	(51)
第11章 孔口出流与管嘴出流实验	(57)
第12章 明渠流动实验	(62)
第13章 有压管流实验——水泵性能实验	(77)
第14章 演示实验	(89)

第1篇 绪论

1.1 水力学实验的意义及要求

1.1.1 水力学实验的意义及教学目的

水力学的研究方法一般有理论分析、实验研究和数值模拟三种,由于水力学问题影响因素错综复杂,以及数学求解上的困难,许多实际流动问题目前还难以通过理论方法精确求解。因此,实验在水力学中占有十分重要的地位,它不仅对理论分析和数值计算成果正确与否进行最终检验,而且在某些方面,实验已成为解决问题的主要研究手段。水力学发展史上有许多通过实验了解水流现象、寻求水流运动规律的例子,如著名的雷诺实验、尼古拉兹实验等。在实际工程中,利用模型实验来研究水的流动现象及其与建筑物的相互作用,从而验证及优化设计施工方案已经非常普遍。随着现代流动测量技术日新月异的发展,实验的量测精度也大大提高。水力学实验研究无论是对学科理论的发展还是对解决工程实际问题,都具有极其重要的意义。

水力学实验研究主要是通过在水流运动的现场或实验室的水槽、水池、管道、河工模型等实验设备中对具体流动的现测和分析,来认识水流运动的规律。水力学实验研究包括原型现测、系统实验和模型实验。水力学实验教学中的实验属于系统实验,而解决工程实际问题以模型实验为主。

对实验教学而言,水力学实验课程的目的有以下几点:

(1)通过实验观测各种水流现象和量测有关水力要素,增加感性认识,验证、巩固、拓展理论课的知识,提高理论分析的能力。

(2)学会正确使用有关的常规仪器设备和掌握科学实验的基本方法,正确量测、记录数据和整理分析实验结果,撰写出实验报告,从而培养学生的动手能力和创新思维。

(3)培养学生具有较强的协作能力,严谨、实事求是的工作作风和科学态度。

1.1.2 实验教学的要求和注意事项

水力学实验是水力学课程教学的一个重要环节,也是培养学生理论联系实际,掌握实验的基本原理和基本技能的一个重要手段。要求学生必须严肃、认真地对待实验的每一个环节,实验时要求做到以下几点:

(1)在进行实验前必须认真做好预习,仔细阅读实验指导书及理论课教材上的相关内容,明确实验的目的和要求,掌握相关实验原理,了解实验步骤和有关仪器设备的操作及注意事项,做到心中有数;做好预习报告,列出实验所需要的表格,对设计性实验还需写

出实验设计方案。

(2) 实验室是实践教学的重要场所,进入实验室后,必须遵守实验室的各项规章制度,严格遵守操作规程,爱护仪器设备,保持实验环境的安静与整洁。

(3) 实验时,应保持严谨的工作态度和良好的科学作风,按实验步骤精心操作,同时注意多观察实验现象,多分析思考问题,及时准确地记录实验数据。对实验数据的记录要做到:①原始记录数据不得凭空捏造或任意涂改;②原始记录应有记录者和校对者的姓名;③数字的有效位数应与精度保持一致;④必要时应对关键场次进行录像或拍照,不同场次或工况的数据和现象应一一对应,不要搞错;⑤实验完成后应主动交给指导老师检查并得到签字认可,凡是无指导老师签字者,该实验视为无效。

(4) 实验结束后,应对实验记录进行必要的检查和补充,关闭仪器和电源,归还秒表等用具,擦干台面水渍,量筒、吸耳球等实验用具摆放整齐,经老师同意后方可离开实验室。

(5) 水力学实验室实行开放教学,学生可以根据自己的具体情况选择实验时间。为了便于安排管理,原则上按教学班或实验组为单位预约实验时间,实验时至少提前一天到实验室进行登记预约。实验室优先安排以组为单位预约的实验,少数由于各种原因不能随组一起参加实验的学生,经过申请也可以单独预约或随到随做。

1.1.3 实验报告要求

(1) 实验报告一般应包括:①实验的目的和要求;②实验设备简图;③实验操作步骤及注意事项;④实验现象描述及原始数据记录;⑤实验数据的整理计算,包括计算表格以及绘制关系曲线;⑥实验结论分析及误差分析;⑦完成规定的分析思考题。

(2) 每个学生必须独立完成实验报告,杜绝抄袭现象;图表文字必须正确和整洁。

(3) 学生以组为单位进行实验,各项实验完成后一周内以组为单位将实验报告送交,逾期不交者将做适当处理。原则上,经实验前检查未完成上次实验报告的,不得参加本次实验。

1.2 水力学基本参数的量测

1.2.1 水位量测

水位测针是水力学实验室量测水位最常用的设备(见图 0-1),其结构简单,使用方便,精度可达 0.1 mm。测量时测针杆能上下移动,以测针尖直接测量水位,或用测针筒将水引出,在筒内进行测读。前者测读简捷,但水面波动对读数的影响较大;后者水面平静,测量精度较高。若需测水面线,可将测针安装在活动测针架上,使其沿着校平导轨前后、左右滑动,以便测得任意断面处的水深或水位。使用测针时应注意:

(1) 测量时,测针尖应自上向下逐渐逼近水面,直至针尖与其倒影刚巧吻合,水面微有跳起时观测读数。

(2) 当水位略有波动时,应测量最高、最低水位多次,然后取其平均值。

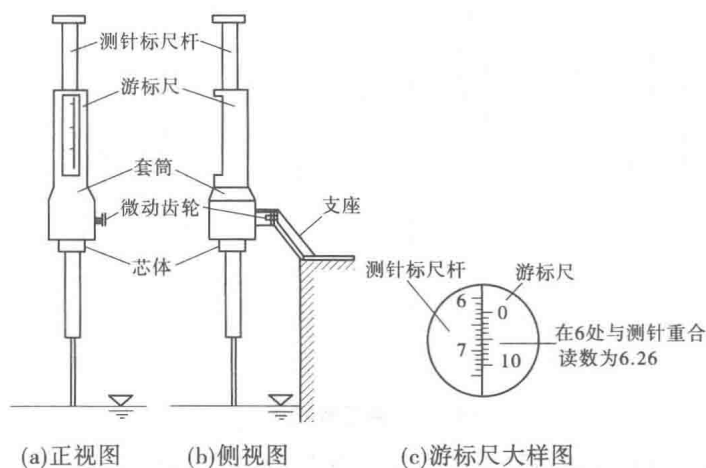


图 0-1 水位测针示意图

(3) 经常检查测针支座有无松动,零点有无变动。

此外,较常用的还有超声波水位仪,采用电测法的电阻式、电容式水位仪及数字编码自动跟踪式水位仪等。

1.2.2 压强量测

压强是流体运动的重要参数之一。通过压强的量测,可以得到流速、流量等其他运动参数,因而压强的量测是水力学实验中一项基本的量测技术。

液柱式压强计是最简单且精度较高的一种常规仪器。它是根据流体静力学原理制成的仪器,其将被测压强转换成液柱高度进行测量,采用水、酒精或水银作为工作液体,用来测量正压、负压或压强差。

1.2.2.1 测压管

测压管是一种最简单的液柱式测压计。常采用内径为 10 mm 左右的直玻璃管。测量时,将测压管的下端与装有液体的容器连上,上端开口与大气相通,如图 0-2 所示。通过观测管中液体上升的高度测量液体中对应点的压力,读数时应注意视线与液面齐平,读取测压管内弯液面底部对应的刻度值。

如果容器内装的是静止液体,液面上是大气压,则测压管内的液面均和容器内液面齐平,如图 0-3(a) 所示,静止液体内部各点的测压管水头是一个常数。

如果容器内液面的压强 p_0 大于大气压或小于大气压,则测压管内的液面会高于或低于容器的液面,但不同点的测压管水头是一个常数,如图 0-3(b) 所示。

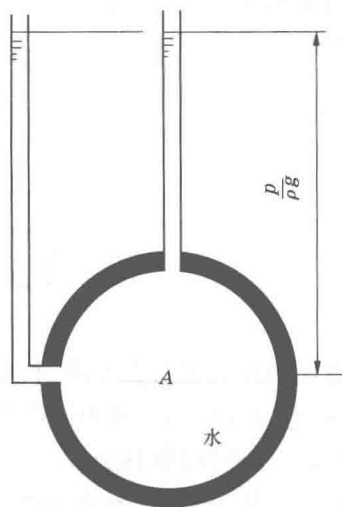


图 0-2 测压管测压

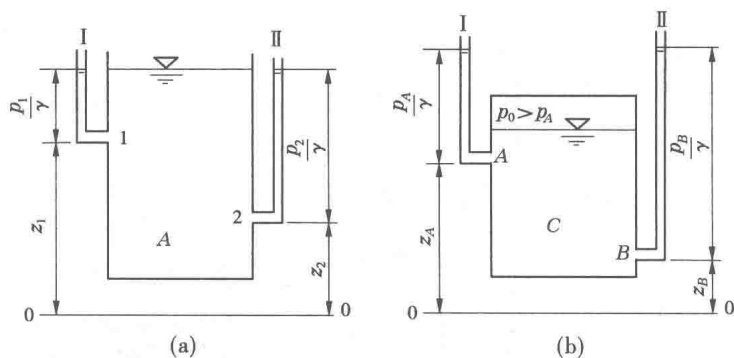


图 0-3 测压管测压

当压强很大时,为避免测压管高度过大而使量测不便,常在 U 形管内改用密度较大的液体,如水银等,如图 0-4 所示。

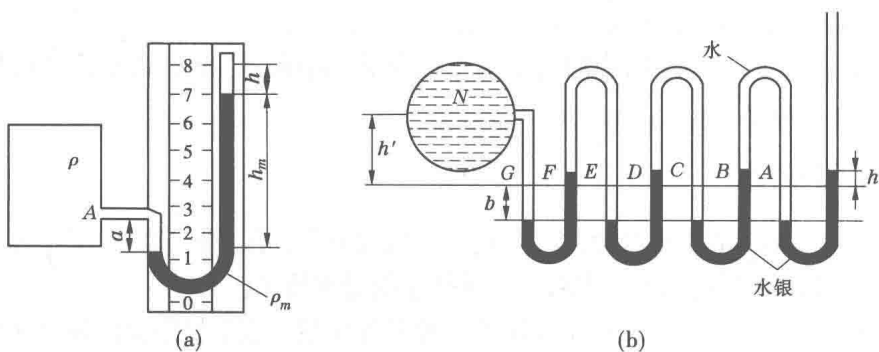


图 0-4 U 形管测压计

当压强很小时,由于读数精度不够,误差较大,往往要倾斜测压管测量,如图 0-5 所示。测点压强为 $p = \rho gh$ 。

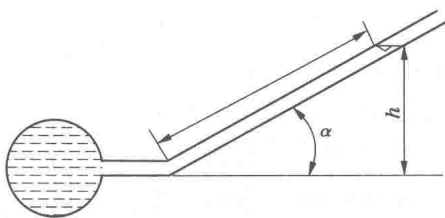


图 0-5 斜管测压计

使用测压管测量真空度时,其测量装置如图 0-6 所示。将测压管倒置于开口容器中,测压管液面的高度 h_v 即为该点的真空度。

1.2.2.2 压差计(比压计)

在很多情况下,需要测量两点压差或测压管水头差,这时可用压差计,如图 0-7 所示。

应用等压面原理可得出两点的压差。对于如图 0-7 所示的情况, A、B 两点的测压管水头差就是:

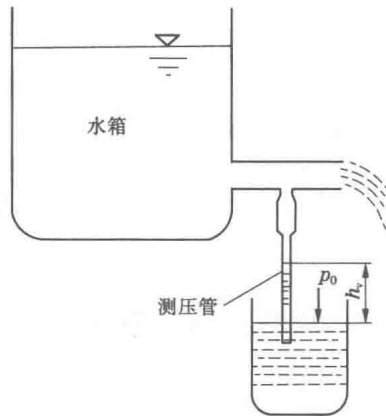


图0-6 测压管测量真空度

$$\left(z_A + \frac{p_A}{\rho g}\right) - \left(z_B + \frac{p_B}{\rho g}\right) = \left(\frac{\rho - \rho_m}{\rho}\right) \Delta h$$

当 ρ_m 为空气密度时,图 0-7 即为气-水压差计,A、B 两点的测压管水头差就是:

$$\left(z_A + \frac{p_A}{\rho g}\right) - \left(z_B + \frac{p_B}{\rho g}\right) = \Delta h$$

图 0-8 为测量不等高 A、B 点压差的气-水压差计。

1.2.2.3 微压计

在测量较小的压强时,最常用的是斜管式微压计(见图 0-9)。

上面所述的几种液柱式压强计的共同优点是:结构简单,精度和灵敏度较高,并且比较直观。缺点是:水柱

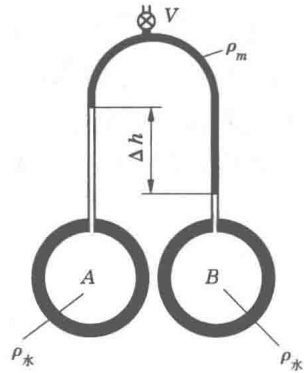


图0-7 压差计

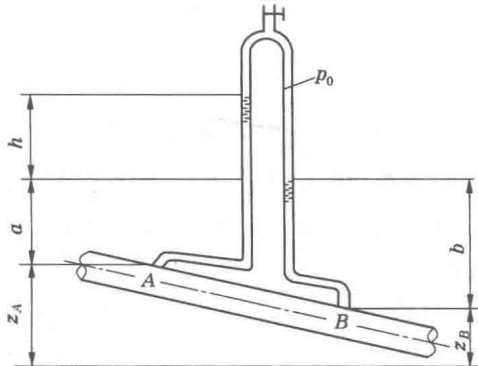


图0-8 气-水压差计

惯性大,压强反应较迟钝。只能用来测量时均压强,不能同步测量随机变化的压强。在测高压时,测管需做得很高,读测很不方便;如改用水银,压强计损坏后,水银坠地,易蒸发形成有毒气体。

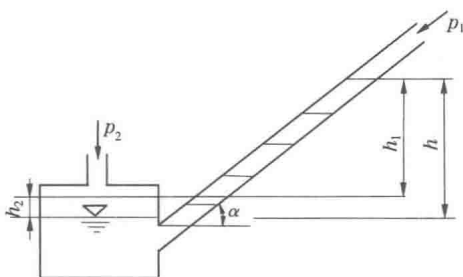


图 0-9 斜管式微压计

1.2.3 流速量测

1.2.3.1 毕托管

毕托管是实验室最常用的测速设备之一,适宜于测 10 cm/s 以上的稳定流速。毕托管由测速管(全压管)和测压管(静压管)两部分组成。测量时将测速管的一端正对着来流方向,另一端垂直向上,这时测速管中上升的液柱比测压管内的液柱高,这个差值即为全压水头和静压水头之差 Δh ,只要测量出 Δh ,根据公式 $v = c\sqrt{2g\Delta h}$,就可以确定相应点的流动速度(见图 0-10)。其中, c 为毕托管校正系数,一般由率定实验确定。

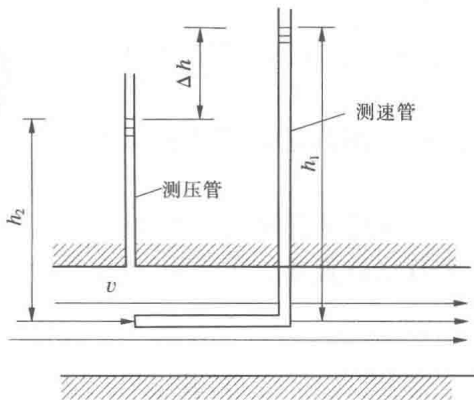


图 0-10 毕托管流速仪原理

使用毕托管时,在静水中检查两管的水压差应为 0;否则,表明管内有气泡,此时应采取措予以排除。在使用过程中,毕托管进水口切勿露出水面,以防漏气。

1.2.3.2 微型旋桨式流速仪

旋桨式流速仪主要用于量测明渠稳定流流速,实验室用的一般是微型旋桨式流速仪,它由传感器(旋桨)、计数器及有关仪表组成。量测时,将旋桨放入水流测点处并对准水流流向,水流作用于流速仪的旋桨时,由于它的迎水面的各部分受到的水压力不同而产生压力差,以致形成一转动动力矩,旋桨将产生转动。流速越大,转动越快。流速与转速间具有如下线性关系:

$$v = kf + v_0$$

式中: v 为测点流速; k 为旋桨系数,随旋桨结构而定,可由率定曲线求得; f 为叶轮旋转频

率, $f = N/T$, 其中 T 为计测时间, N 为 T 时间内叶轮旋转次数; v_0 为叶轮惯性引起的起动流速, v_0 越小, 表明旋桨越灵敏, 测速的灵敏度越高, v_0 值一般为 $2 \sim 3 \text{ cm/s}$ 。

按能量转换原理不同, 也就是叶轮旋转计数方法不同, 旋桨式流速仪可分为电阻式、电感式和光电式等。其中, 光电式在流体实验中得到较普遍的使用(见图 0-11)。在水流含沙量较大或漂浮物较多时, 旋桨式流速仪易产生缠绕等问题, 使用中应加以注意。

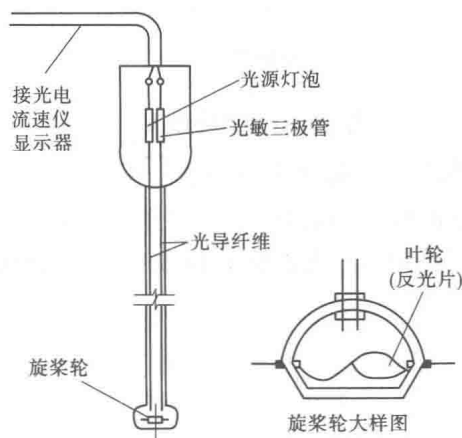


图 0-11 光电式旋桨式流速仪示意图

除以上两种常见的测速仪外, 随着流动测量技术的发展, 还有电磁式流速仪、超声式流速仪、热线流速仪、激光流速仪, 以及更为先进的粒子图像测速技术。

1.2.4 流量量测

1.2.4.1 体积法和称重法

体积法和称重法是水力学实验室最常用的流量测量方法。根据流量的定义, 当流量恒定时, 用量筒或其他盛水容器接水, 同时用秒表计时, 用量筒读出该时段内所接水的体积或用电子秤称出其重量, 除以时间, 即可计算出体积流量或重量流量, 即 $Q = V/T$ 或 $Q = G/T$ 。采用体积法或称重法时应注意接水和计时必须同步, 且同一个流量必须测量 3 次以上, 取平均值, 以保证测量精度。

1.2.4.2 量水堰

明渠模型流体实验中, 常采用量水堰测量流量。量水堰多为薄壁堰, 其断面形状一般为矩形或三角形(见图 0-12)。

当实验流量较大时常采用矩形堰测流(见图 0-12(b))。在无侧收缩、自由出流的情况下, 矩形堰的流量计算公式为:

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

式中: Q 为流量; H 为堰上水头; m_0 为流量系数, 由实验或有关经验公式确定; b 为堰宽。

当实验流量较小时, 为避免堰上水头过小形成水舌贴壁溢流, 宜采用三角形堰测流(见图 0-12(c))。直角三角形堰的流量计算公式为:

$$Q = C_0 H^{5/2}$$

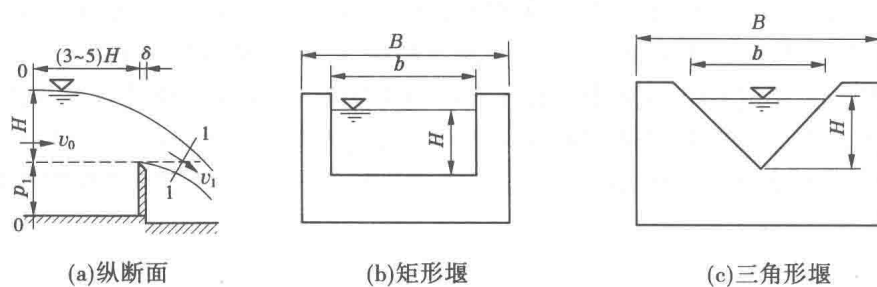


图 0-12 量水堰测流

式中： C_0 为流量系数，由实验确定，一般可取近似值 1.4。

此外，还有其他测量流量的仪器，如利用伯努利原理的文丘里流量计，利用法拉第电磁感应原理的电磁式流量计，利用声学多普勒原理或时差法，能实现非接触量测的超声波流量计，激光流量计等。

第2篇 基础实验篇

第1章 流体静力学综合性实验

流体静力学是研究流体在静止状态下的平衡规律及其在实际中应用的一门学科。本章实验内容包含流体静力学基本方程验证、流体静压强、密度等基本要素测量,一些定性分析实验、结合生活案例的设计性实验及有趣的“静压奇观”演示实验等,目的在于加深对流体静力学基本概念的理解,提高观察分析问题的能力及学用结合的能力。

1.1 流体静力学实验

1.1.1 实验装置

1. 实验装置简图

实验装置及各部分名称如图 1-1 所示。

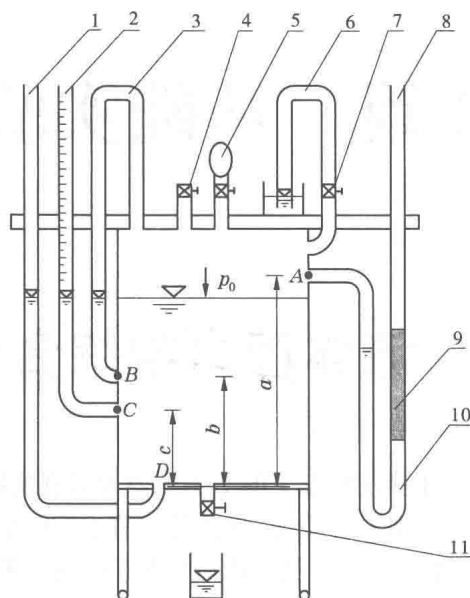
2. 装置说明

(1) 流体测点静压强的测量方法之一——测压管。

流体的流动要素有压强、水位、流速、流量等。压强的测量方法有机械式测量方法与电测法,测量的仪器有静态与动态之分。测量流体测点压强的测压管属机械式静态测量仪器。测压管是一端连通于流体被测点,另一端开口于大气的透明管,适用于测量流体测点的静态低压范围的相对压强,测量精度为 1 mm。测压管分直管形和 U 形。直管形如图 1-1 中管 2 所示,其测点压强 $p = \rho gh$, h 为测压管液面至测点的竖直高度。U 形如图 1-1 中管 1 与管 8 所示。直管形测压管要求液体测点的绝对压强大于当地大气压,否则因气体流入测点而无法测压。U 形测压管可测量液体测点的负压。U 形测压管还可测量气体测点压强,如管 8 所示,一般 U 形测压管中为单一液体(本装置因其他实验需要,在管 8 中装有油和水两种液体),测点气压为 $p = \rho g \Delta h$, Δh 为 U 形测压管两液面的高度差,当管中接触大气的自由液面高于另一液面时 Δh 为“+”,反之 Δh 为“-”。由于受毛细管影响,测压管内径应大于 8 ~ 10 mm。本装置采用毛细现象弱于玻璃管的透明有机玻璃管作为测压管,内径为 8 mm,毛细高度仅为 1 mm 左右。

(2) 恒定液位测量方法之一——连通管。

测量液体的恒定水位的连通管属机械式静态测量仪器。连通管是一端连接被测液



1—测压管;2—带标尺测压管;3—连通管;4—通气阀;5—加压打气球;
6—真空测压管;7—截止阀;8—U形测压管;9—油柱;10—水柱;11—减压放水阀

图 1-1 流体静力学综合性实验装置

体,另一端开口于被测液体表面空腔的透明管,如管 3 所示。敞口容器中的测压管也是测量液位的连通管。连通管中的液体直接显示了容器中的液位,用毫米刻度标尺即可测读水位值。本装置中连通管与各测压管同为等径透明有机玻璃管。液位测量精度为 1 mm。

(3) 所有测压管液面标高均以带标尺测压管 2 的零点高程为基准。

(4) 测点 B、C、D 位置高程的标尺读数分别以 ∇_B 、 ∇_C 、 ∇_D 表示,若同时取标尺零点作为静力学基本方程的基准,则 ∇_B 、 ∇_C 、 ∇_D 亦为 z_B 、 z_C 、 z_D 。

(5) 本仪器中所有阀门旋柄均以顺管轴线为开。

3. 基本操作方法

(1) 设置 $p_0 = 0$ 条件。打开通气阀 4,此时实验装置内压强 $p_0 = 0$ 。

(2) 设置 $p_0 > 0$ 条件。关闭通气阀 4、减压放水阀 11,通过加压打气球 5 对装置打气,可对装置内部加压,形成正压。

(3) 设置 $p_0 < 0$ 条件。关闭通气阀 4、加压打气球 5 底部阀门,开启减压放水阀 11 放水,可对装置内部减压,形成真空。

(4) 水箱液位测量。在 $p_0 = 0$ 条件下读取管 2 的液位值,即为水箱液位值。

1.1.2 实验原理

(1) 在重力作用下不可压缩流体静力学基本方程为:

$$z + \frac{p}{\rho g} = C$$

即在连通的同种静止液体中,各点对于同一基准面的测压管水头相等。

(2) 由静水压强的分布规律,且测压管的一端接大气,这样就把测压管水头表示出来了。再利用液体的平衡规律,可知连通的静止液体区域中任何一点的相对压强为:

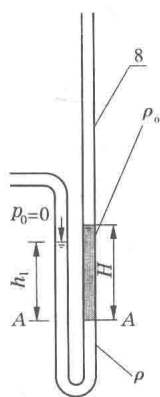
$$p = p_0 + \rho gh = p_A + \rho gh = \rho gh$$

(3) 油密度测量原理。

方法一:测定油的密度 ρ_o , 简单的方法是利用 U 形测压管 8, 再另备一根直尺进行直接测量。实验时需打开通气阀 4, 使 $p_0 = 0$ 。若水的密度 ρ 为已知值, 如图 1-2 所示, 由等压面原理则有:

$$\frac{\rho_o}{\rho} = \frac{h_1}{H}$$

图 1-2 油的密度测量方法一



方法二: 不另备测量直尺, 只利用测管 2 的自带标尺测量。

先加压使 U 形测压管 8 中的水面与油水交界面齐平, 如图 1-3(a) 所示, 有:

$$p_{01} = \rho gh_1 = \rho_o gH$$

再减压放水, 使 U 形测压管 8 中的水面与油面齐平, 如图 1-3(b) 所示, 有:

$$p_{02} = -\rho gh_2 = \rho_o gH - \rho gH$$

联立两式则有:

$$\frac{\rho_o}{\rho} = \frac{h_1}{h_1 + h_2}$$

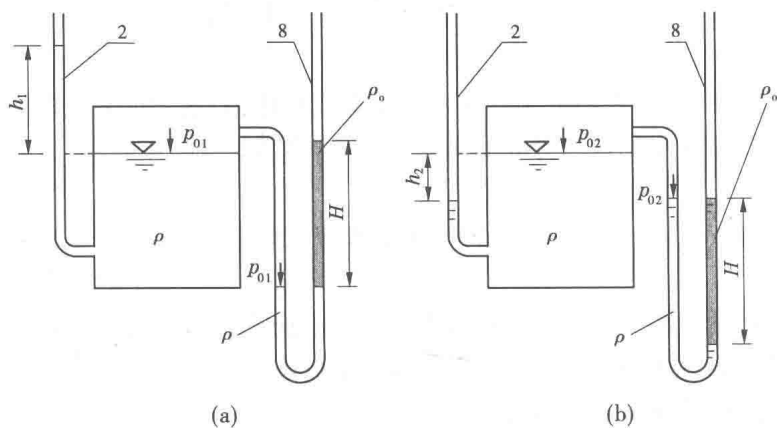


图 1-3 油的密度测量方法二

1.1.3 实验目的与要求

- (1) 掌握用测压管测量流体静压强的技能。
- (2) 通过对诸多流体静力学现象的实验观察分析, 加深理解位置水头、压强水头及测管水头的概念。
- (3) 验证不可压缩流体静力学基本方程。
- (4) 观察真空现象, 加深对真空压强、真空度的理解。

(5)测定油的密度。

1.1.4 实验内容与方法

1. 定性分析实验

(1)测压管和连通管的判定。

按测压管和连通管的定义,实验装置中管1、2、6、8都是测压管,当通气阀关闭时,管3无自由液面,是连通管。

(2)测压管高度、压强水头、位置水头和测压管水头的判定。

测点的测压管高度即为压强水头 $\frac{p}{\rho g}$,不随基准面的选择而变,位置水头 z 随基准面选择而变。

(3)观察测压管水头线。

测压管液面的连线就是测压管水头线。打开通气阀4,此时 $p_0 = 0$,那么管1、2、3均为测压管,从这三管液面的连线可以看出,对于同一静止液体,测管水头线是一根水平线。

想一想:同一静止液体内,(a)测压管水头线是一根水平线;(b)测压管水头处处相等;(c)测压管高度处处相等;(d) $z + \frac{p}{\rho g} = C$ 。错误答案是()。

(4)判别等压面。

关闭通气阀4,打开截止阀7,用加压打气球5稍加压,使 $\frac{p_0}{\rho g}$ 为0.02 m左右,判别下列几个平面是不是等压面:

①过C点做一水平面,相对管1、2、8及水箱中液体而言,这个水平面是不是等压面?

②过U形测压管8中的油水分界面做一水平面,对管8中液体而言,这个水平面是不是等压面?

③过管6中的液面做一水平面,对管6中液体和方盒中液体而言,该水平面是不是等压面?

根据等压面判别条件——质量力只有重力、静止、连续、均质、同一水平面——可判定上述②、③是等压面。在①中,相对管1、2及水箱中液体而言,它是等压面,但相对管8中的水或油来讲,它都不是同一等压面。

(5)观察真空现象。

打开减压放水阀11降低箱内压强,使管2的液面低于水箱液面,这时箱体内 $p_0 < 0$,再打开截止阀7,在大气压力作用下,管6中的液面就会升到一定高度,说明箱体内出现了真空区域(负压区域)。

答一答:此时实验装置内的真空区域是哪些?

(6)观察负压下管6中液位变化。

关闭通气阀4,开启截止阀7和减压放水阀11,待空气自管2进入圆筒后,观察管6中的液面变化。

想一想:管6中的液位,(a)升高;(b)下降;(c)不变。正确答案是(),为什么?