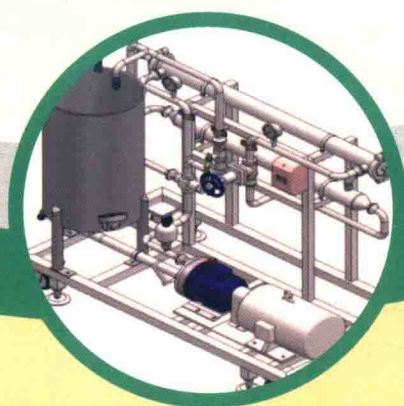


环境工程专业实验 ——基础、综合与设计

孙 杰 陈绍华 叶恒朋 等 编著



科学出版社

环境工程专业实验

——基础、综合与设计

孙 杰 陈绍华 叶恒朋 等 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书将环境工程学科理论知识同实验相结合,对现今广泛应用于环境污染控制的技术进行介绍。本书内容包括流体力学实验、环境工程原理实验、环境监测实验、水污染控制工程实验、大气污染控制工程实验、固体废弃物处理与处置实验、物理性污染控制工程实验、环境工程综合实验和环境工程设计实验等。以调整并注重基础型实验和综合型实验设置合理的比例结构,着重体现实验体系的基础性、实用性及创新性。

本书可作为高等院校环境工程专业的本科实验教材使用,同时也可对相关专业的实验技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

环境工程专业实验:基础、综合与设计 / 孙杰等编著. —北京:科学出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-03-057610-1

I. ①环… II. ①孙… III. ①环境工程—实验 IV. ②X5-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 115634 号

责任编辑:刘 畅/责任校对:孙寓明

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2018 年 6 月第 一 版 印张:13 1/2

2018 年 6 月第一次印刷 字数:317 000

定价:49.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

环境工程专业是一门新兴工程专业,着重培养具有系统、扎实的基础理论、专业知识和实践能力,从事环境保护的高级工程技术人才。环境工程专业课教学是环境工程专业的重要教学内容,专业课教学由理论教学和实验教学两部分组成。环境工程专业实验在环境工程学科发展中占有重要的地位,是整个环境工程专业教学不可替代的环节。

本书的雏形是2001年中南民族大学环境工程教研室编写的实验讲义《环境工程专业实验指导》。经过近20年的发展,作者广泛吸收了国内外实验教材中的优点,结合自身的教学工作、科研工作和工程实践体会,进行不断地吸纳、融合和创新,最终编写成本书。编写过程中始终贯彻理论联系实际、注重实践环节、力求符合学生的认识规律及便于独立操作的原则。

本书1~7章为环境工程专业课程的基础实验,内容覆盖环境工程专业教学大纲,其重要性在于加强学生对工程现象的感性认识、验证所学理论、培养基本的实验技能和树立科学研究的严谨作风。同时,将教师的科研成果或新的研究方法和技术总结在第8章环境工程综合实验和第9章环境工程设计实验中,体现了很好的原创性,有助于培养学生的工程实践能力和创新能力。如杜冬云教授和孙杰教授主持的“硫酸和制药行业典型难处理废水的处理与综合利用”研究项目获得2013年国家环境保护科学技术二等奖,该研究成果部分转化为本书8.2、8.3和8.4节的内容。通过将科研成果转化为优质实验教学资源,彰显了本书特色。此外,设计型实验在内容设置方面给学生较大发挥度,在引导学生进行创新创业等第二课堂活动中也发挥了积极作用。

本书由中南民族大学环境工程专业教师共同编写,各部分具体编写人员有孙杰(1.1到1.13节,8.3、8.4节,9.2和9.3节为孙杰和梁珈祥共同编写)、陈绍华(2.2到2.6节,9.1节)、汤迪勇(2.1节,5.1到5.6节,8.7节)、丁耀彬(3.1到3.8节)、吴桂萍(4.1到4.4节)、孙杰(小)(4.5到4.15节)、占伟(6.1到6.4节,8.6节)、李佳(6.5节)、吴晨捷(7.1到7.3节,9.4节)、叶恒朋(8.1节)、杜冬云(8.2节)、吴来燕(8.5节)、熊玲(9.5节)。陈绍华、梁珈祥仔细阅读后做了大量的校对工作,孙杰对全书进行了策划和统稿。

本书亦是“湖北省普通高等学校战略性新兴(支柱)产业人才培养计划”——环境工程专业建设的教学研究成果。在编写过程中,得到了武汉大学侯浩波教授、杨小亭教授和美国加利福尼亚州立大学郭继汾教授的帮助和指导,在此表示感谢。

由于时间仓促,作者水平有限,书中的疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2017年12月于南湖园

目 录

第 1 章 流体力学实验	1
1.1 流线演示实验	1
1.2 能量方程演示实验	2
1.3 静水压强量测实验	4
1.4 动量方程实验	7
1.5 文丘里流量计及孔板流量计实验	9
1.6 流速量测(毕托管)实验	11
1.7 孔口管嘴综合实验	14
1.8 管道局部水头损失实验	16
1.9 管流流态(雷诺)和沿程阻力实验	20
1.10 堰流流量系数的测定实验	23
1.11 闸下自由出流流量系数的测定实验	26
1.12 水跃演示与验证实验	28
1.13 明槽水面曲线变化规律演示实验	29
第 2 章 环境工程原理实验	33
2.1 伯努利实验	33
2.2 离心泵性能测定实验	37
2.3 套管换热器液-液热交换系数及膜系数测定实验	45
2.4 流体流动阻力测定实验	52
2.5 填料塔液侧传质膜系数测定实验	59
2.6 干燥曲线和干燥速率曲线测定实验	66
第 3 章 环境监测实验	74
3.1 水中氨氮测定实验	74
3.2 水中总氮测定实验——碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—2012)	76
3.3 水中总磷测定实验	78
3.4 水中六价铬测定实验	81

3.5	大气中总悬浮颗粒物测定实验	83
3.6	化学需氧量(COD)测定实验	84
3.7	生化需氧量(BOD)测定实验	86
3.8	水中总大肠菌群的测定实验——多管发酵法	89
第4章	水污染控制工程实验	93
4.1	颗粒自由沉淀实验	93
4.2	混凝沉淀实验	96
4.3	活性炭吸附实验	101
4.4	离子交换树脂的鉴定及交换容量测定实验	104
4.5	铁碳内电解实验	112
4.6	染料废水的光化学氧化实验	115
4.7	活性污泥性质测定实验	116
4.8	SBR 工艺演示实验	118
4.9	接触氧化工艺演示实验	120
4.10	过滤及反冲洗工艺演示实验	121
4.11	传统活性污泥工艺演示实验	122
4.12	生物流化床工艺演示实验	122
4.13	生物转盘工艺演示实验	123
4.14	上流式厌氧污泥反应床演示实验	124
4.15	气浮演示实验	125
第5章	大气污染控制工程实验	127
5.1	粉尘的采样与测定实验	127
5.2	粉尘粒度分布测定实验	129
5.3	粉尘比电阻测量实验	132
5.4	碱液吸收二氧化硫实验	135
5.5	环境空气中二氧化氮质量浓度测定实验	137
5.6	活性炭吸附法净化 VOCs 废气实验	140
第6章	固体废弃物处理与处置实验	144
6.1	粉煤灰物理特性综合测定实验	144
6.2	粉煤灰化学特性综合测定实验	148
6.3	污泥比阻综合实验	151

6.4	粉煤灰胶凝固化实验	155
6.5	硅钼蓝分光光度法测定有效硅含量实验	159
第7章	物理性污染控制工程实验	162
7.1	校园环境噪声监测实验	162
7.2	道路交通噪声测量实验	164
7.3	手机近场电磁辐射强度数据采集实验	165
第8章	环境工程综合实验	168
8.1	生物接触氧化法处理有机工业废水启动实验——生物膜的接种、培养与驯化	168
8.2	利用粉煤灰、铝矾土制备聚合氯化铝絮凝剂实验	172
8.3	纳滤分离水中盐分和有机物实验	174
8.4	湖泊沉积物中磷元素形态调查实验	177
8.5	电渗析除盐淡化实验	180
8.6	市政污泥浸出毒性测定实验	182
8.7	电动力学技术修复重金属铅污染土壤实验	185
第9章	环境工程设计实验	190
9.1	有机污染物初级生物降解度测定实验	190
9.2	生物质制备碳吸附材料实验	192
9.3	生物质制备碳电化学材料实验	195
9.4	城市生活污水处理厂模型搭建实验	198
9.5	城市污水处理系统工艺设计及工艺参数控制实验	200
参考文献	206

第 1 章 流体力学实验

1.1 流线演示实验

【实验目的】

- (1) 通过演示进一步了解流线的基本特征。
- (2) 观察液体流经不同固体边界时的流动现象。

【实验原理】

流场中液体质点的运动状态,可以用迹线或流线来描述,迹线是一个液体质点在流动空间所走过的轨迹。流线是流场内反映瞬时流速方向的曲线,在同一时刻,处在流线上所有各点的液体质点的流速方向与该点的切线方向相重合,在恒定流中,流线和迹线互相重合。在流线仪中,用显示液(自来水、红色水),通过狭缝式流道组成流场,来显示液体质点的运动状态。整个流场内的“流线谱”可形象地描绘液流的流动趋势,当这些有色线经过各种形状的固体边界时,可以清晰地反映出流线的特征及性质。

【实验设备】

演示设备如图 1-1 所示,它们分别显示 2 种特定边界条件下的流动图像:图 1-1(a)可显示机翼绕流流场中流体的流动形态;图 1-1(b)可显示实用堰溢流的流动形态。

演示仪均由有机片制成狭缝式流道,其间夹有不同形状的固体边界。在演示仪的左上方有 2 个盛水盒,一个装自来水,一个装红色水,两盒的内壁各自交错开有等间距的小孔通往狭缝式流道,流道尾部装有泄水调节阀。

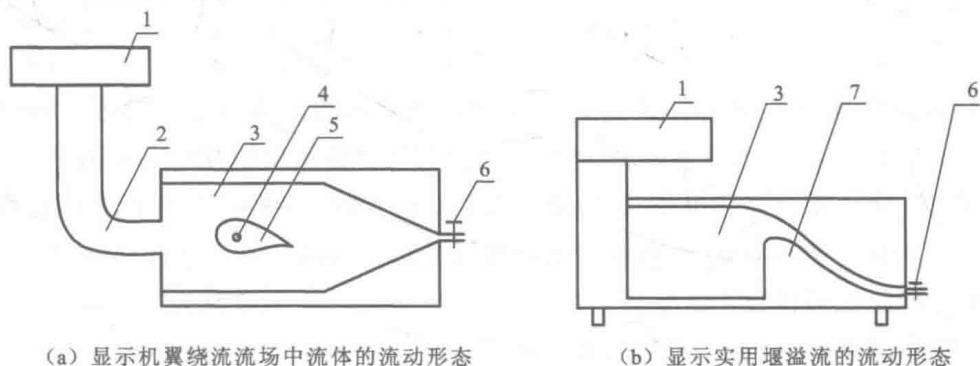


图 1-1 演示仪简图

1. 盛水盒; 2. 弯道; 3. 狭缝式流道; 4. 机翼角度调节开关; 5. 机翼; 6. 泄水调节阀; 7. 实用堰

【实验步骤】

- (1) 首先打开演示仪尾部的泄水调节阀进行排气,待气排净后拧紧泄水调节阀,并将上方的2个盛水盒装满自来水。
- (2) 将装有自来水的2个盛水盒其中的任一个滴少许红墨水搅拌均匀。
- (3) 调节尾部泄水调节阀,可使显示液达到最佳的显示效果。
- (4) 待整个流场的有色线(即流线)显示后,观察分析其流动情况及特征。

【思考题】

- (1) 流线的形状与边界有没有关系?
- (2) 流线的曲、直和疏、密各反映了什么?

1.2 能量方程演示实验

【实验目的】

- (1) 观察恒定流情况下,有压管流所具有的位置势能(位置水头)、压强势能(压强水头)和动能(流速水头),以及在各种边界条件下能量守恒及转换的基本规律,加深对能量方程物理意义的理解。
- (2) 观察测压管水头线和总水头线沿程变化的规律,以及水头损失现象。
- (3) 观察管流中的真空现象及渐变流过水断面与急变流过水断面上的动水压强分布规律。
- (4) 观察恒定总流连续性方程中速度与管径的变化关系。

【实验原理】

实际液体在有压管道中做恒定流动时,单位重量液体的能量方程如下:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_w \quad (1-1)$$

式中: z 为位置势能; p 为流体中某点压强; v 为流点液体的流速; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; h_w 为水头损失。式(1-1)表明:单位重量的液体在流动过程中所具有的各种机械能(单位位能、单位压力能和单位动能)是可以相互转化的。但由于实际液体存在黏性,运动的阻力要消耗一定的能量,也就是一部分机械能转化为热能而散逸,即为水头损失。因而各断面的机械能沿程减小。

在均匀流或渐变流过水断面上,其动水压强分布符合静水压强分布规律

$$z + \frac{p}{\rho g} = c \quad \text{或} \quad p = p_0 + \rho gh \quad (1-2)$$

式中: c 为常量; h 为该点所在高度。但不同的过水断面上 c 值不同。

在急变流流段上,由于流线的曲率较大,每一质点处存在惯性力,表现为在这个流段中各过水断面上水流的压强分布不符合静水压强分布规律。

【实验设备】

如图 1-2 所示的能量方程演示仪为自循环的水流系统,在进水管段设有进水阀、转子流量计,演示段由直管、突然扩大管、文丘里管、突然缩小管、垂直弯管和水平弯管等有机管段连接而成,在管道上沿水流方向的若干过水断面的边壁上设有测压孔,在设置测压管的过水断面上同时装有单孔毕托管,用以测量该断面中心点的总水头。在管道的出口还设有尾阀。进水阀和尾阀用来调节和控制流量。进水阀和尾阀用来调节和控制流量。

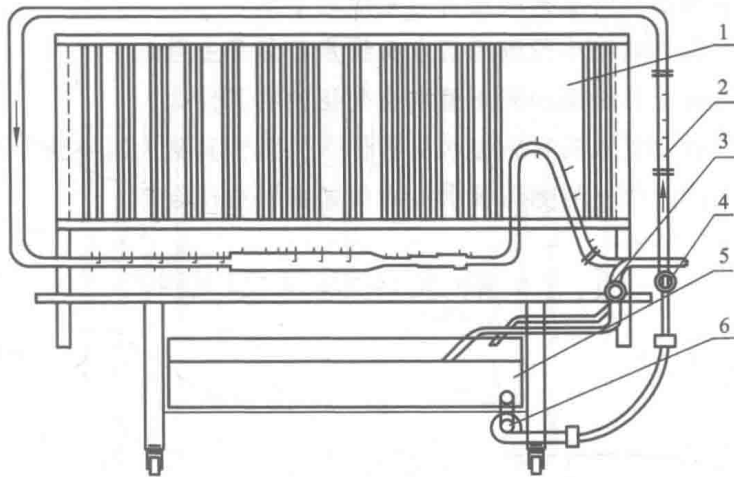


图 1-2 能量方程演示仪

1. 测压牌; 2. 转子流量计; 3. 尾阀; 4. 进水阀; 5. 水箱; 6. 水泵

【实验步骤】

(1) 熟悉设备,分辨测压管和单孔毕托管。

(2) 接通电源。

(3) 缓缓打开进水阀,反复开关尾阀将管道及测压管中的空气排净。

(4) 调节进水阀,固定某一流速(以 $Q=1500\text{ L/h}$ 左右为宜),待水流稳定后,根据能量方程观察管道各断面上单位重量水体的位能、压力能、动能和水头损失,并弄清能量守恒及位能、压力能和动能的相互转化。

(5) 观察测压管水头线和总水头线沿程变化的规律,并分析其原因。

(6) 观察管道中各种局部水力现象,如突然扩大和突然缩小情况下测压管水头的变化;渐变流过水断面上各点的测压管水头相等,而急变流过水断面上各点的测压管水头不相等;垂直弯管段上的真空现象等。

(7) 将尾阀开大或关小,观察各测压管水头线的变化。

(8) 演示结束后,切断电源。关闭总进水阀。

【注意事项】

(1) 阀门开启一定要缓慢,并注意测压管中水位的变化,不宜开启过猛,以免使测压管中的压力上升过快,造成不良后果。

(2) 演示实验时,一定要将管道和测压管中的空气排净。

【思考题】

- (1) 如何确定管中某点的位置高度、压强强度、流速水头、测压管水头和总水头?
- (2) 总水头线和测压管水头线是否总是沿程下降?
- (3) 突然扩大和突然缩小段测压管水头线是否总是上升?
- (4) 文丘里管段上各断面的测压管水头变化说明了什么?
- (5) 垂直管段的位置水头和压强水头有什么关系? 其最大真空值如何确定?
- (6) 弯管段凹凸边壁上的测压管水头有何差异? 为什么?

1.3 静水压强量测实验

【实验目的】

- (1) 量测静水中任一点的压强。
- (2) 测定另一种液体的密度。
- (3) 掌握 U 形管和连通管的测压原理,培养运用等压面概念分析问题的能力。

【实验原理】

如图 1-3 所示,利用调压筒的升降来调节密封水箱内液体表面压强和液体各点的压强。

根据在重力作用下不可压缩液体的静力压强基本方程

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-3)$$

可以求得相应各点处的静压强。其中 A 点、B 点高程有关常数见表 1-1。

A 点的绝对压强 p_A 、相对压强 p'_A 为

$$p_A = p_a + \rho_{\text{水}}g(\nabla_7 - \nabla_A) \quad p'_A = \rho_{\text{水}}g(\nabla_7 - \nabla_A) \quad (1-4)$$

式中: p_0 为密封箱中表面压强; p_a 为大气压强; ∇ 为高程读数。

同理, B 点的绝对压强 p_B 、相对压强 p'_B 为

$$p_B = p_a + \rho_{\text{水}}g(\nabla_6 - \nabla_B) \quad p'_B = \rho_{\text{水}}g(\nabla_6 - \nabla_B) \quad (1-5)$$

密封容器液面上绝对压强 p_0 、相对压强 p'_0 为

$$p_0 = p_a + \rho_{\text{水}}g(\nabla_6 - \nabla_5) \quad p'_0 = \rho_{\text{水}}g(\nabla_6 - \nabla_5) \quad (1-6)$$

由于连通管和U形管反映着相同的压差,故有

$$p_0 - p_a = \rho_{\text{水}} g (\nabla_6 - \nabla_5) = \rho' g (\nabla_1 - \nabla_2) = \rho_{\text{水}} g (\nabla_3 - \nabla_4) \quad (1-7)$$

由此可以求得另一种液体的密度 ρ' 为

$$\rho' = \rho_{\text{水}} \frac{\nabla_6 - \nabla_5}{\nabla_1 - \nabla_2} = \rho_{\text{水}} \frac{\nabla_3 - \nabla_4}{\nabla_1 - \nabla_2} \quad (1-8)$$

当 $p_0 < p_a$ 时,水箱液体表面真空度用水柱高度表示为

$$\frac{p_a - p_0}{\rho g} = \nabla_5 - \nabla_6 = \nabla_5 - \nabla_7 \quad (1-9)$$

【实验设备】

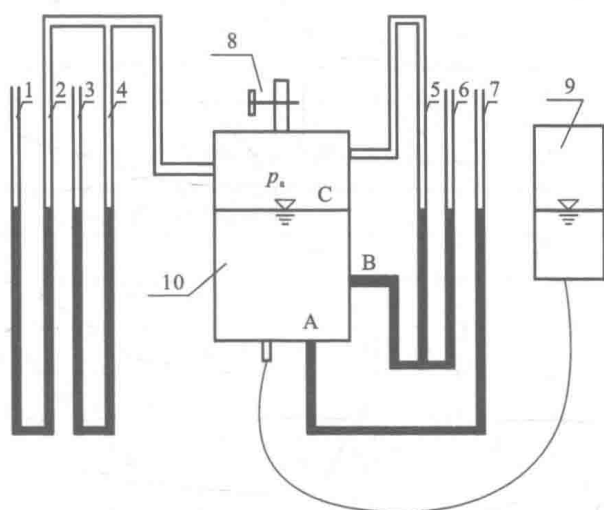


图 1-3 静水压强实验仪

1~7. 测压管;8. 通气阀门;9. 调压筒;10. 密封容器;
1~2. 测压管注入油,3~4. 测压管注入水,二者的液体不能混

【实验步骤】

(1) 打开通气孔,使密封水箱与大气相通,则密封箱中表面压强 p_0 等于大气压强 p_a 。那么开口筒水面、密封箱水面及连通管水面均应齐平。

(2) 关闭通气阀门,将调压筒向上提升到一定高度。此时密封箱中表面压强 $p_0 > p_a$ 。等到水位稳定后,记录各测压管的液面标高于表 1-2 中。将调压筒继续提高,再做两次实验。

(3) 打开通气阀门,待液面稳定后再关闭通气孔(此时不要移动调压筒)。

(4) 将调压筒降至某一高度。此时密封箱中表面压强 $p_0 < p_a$ 。等到水位稳定后,记录各测压管的液面标高于表 1-2 中。将开口筒继续降低,再做两次实验。

(5) 将仪器恢复原状(将调压筒放到适当高度,打开通气阀门)。

【注意事项】

(1) 首先检查密封箱是否漏气。

(2) 调压筒向上提升时不宜过高,在升降调压筒后,一定要用手拧紧固定螺丝,以免调压筒向下滑动。

【数据处理】

表 1-1 有关常数

高程读数	实验台 1	实验台 2	实验台 3
∇_A/cm	14.2	14.2	14.1
∇_B/cm	26.1	25.9	25.8

表 1-2 量测记录表格

(单位:cm)

工况	测次	测压管液面高程读数						
		∇_1	∇_2	∇_3	∇_4	∇_5	∇_6	∇_7
$p_0 > p_a$	1							
	2							
	3							
$p_0 < p_a$	1							
	2							
	3							

表 1-3 计算结果

工况	测次	$p'_0/(\text{N}/\text{cm}^2)$	$p'_A/(\text{N}/\text{cm}^2)$	$p'_B/(\text{N}/\text{cm}^2)$	$\rho_{\text{油}}/(\text{kg}/\text{cm}^3)$
$p_0 > p_a$	1				
	2				
	3				
$p_0 < p_a$	1				
	2				
	3				

【思考题】

(1) 第 5、6、7 号管和第 2、4 号管,可否取等压面? 为什么?

(2) 第 2、4、7 号管和第 6、7 号管中的液面,是不是等压面? 为什么?

1.4 动量方程实验

【实验目的】

- (1) 测定管嘴喷射水流对平板或曲面板所施加的冲击力。
- (2) 将测出的冲击力与用动量方程计算出的冲击力进行比较,加深对动量方程的理解。

【实验原理】

如图 1-4 所示,应用力矩平衡原理,求射流对平板和曲面板的冲击力。

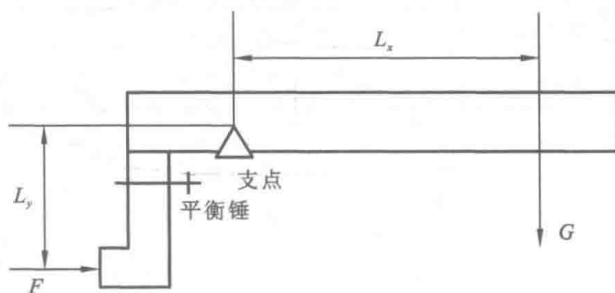


图 1-4 力矩平衡原理图

力矩平衡方程

$$FL_y = GL_x, \quad F = \frac{GL_x}{L_y} \quad (1-10)$$

式中: F 为射流作用力; L_y 为作用力力臂; G 为砝码重量; L_x 为砝码力臂。

恒定总流的动量方程为

$$\sum F = \rho Q (\alpha'_2 V_2 - \alpha'_1 V_1) \quad (1-11)$$

若令 $\alpha'_2 = \alpha'_1 = 1$, 且只考虑其中水平方向作用力, 则可求得射流对平板或曲面板的作用力公式为

$$F = \rho Q V (1 - \cos \alpha) \quad (1-12)$$

式中: Q 为管嘴的流量; V 为管嘴流速; α 为射流射向平板或曲面板后的偏转角度。

(1) $\alpha = 90^\circ$ 时, $\cos 90^\circ = 0$, $F_{\mp} = \rho Q V$;

(2) $\alpha = 135^\circ$ 时, $F = \rho Q V (1 - \cos 135^\circ) = 1.707 \rho Q V = 1.707 F_{\mp}$;

(3) $\alpha = 180^\circ$ 时, $F = \rho Q V (1 - \cos 180^\circ) = 2 \rho Q V = 2 F_{\mp}$ 。

(1)~(3)中: ρ 为水的密度; Q 为流量; V 为喷嘴出口断面的平均流速; F_{\mp} 为水流对平板的冲击力。

【实验设备】

实验设备及各部分名称见图 1-5, 实验中配有 $\alpha = 90^\circ$ 的平板一块和 $\alpha = 135^\circ$ 及 $\alpha =$

180°的曲面板各一块,50g的砝码一个。

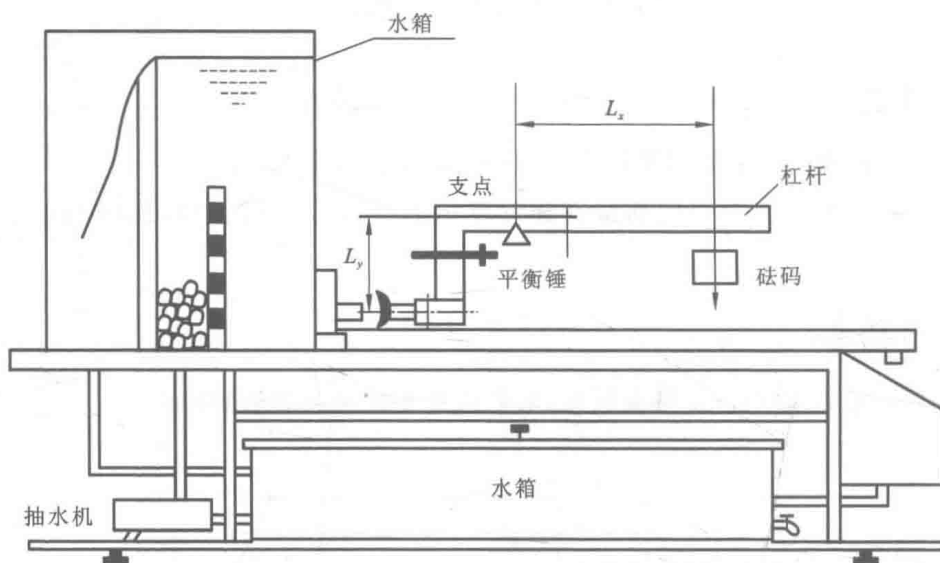


图 1-5 动量方程实验仪

【实验步骤】

- (1) 记录管嘴直径和作用力力臂。
- (2) 安装平面板,调节平衡锤位置,使杠杆处于水平状态(杠杆支点上的气泡居中)。
- (3) 启动抽水机,使水箱充水并保持溢流。此时水流从管嘴射出,冲击平板中心,标尺倾斜。然后调节砝码位置,使杠杆处于水平状态,达到力矩平衡。记录砝码质量和力臂 L_x ,计算实测冲击力 $F_{实}$,填入表 1-4。
- (4) 用体积法测量流量 Q ,用以计算理论冲击力 $F_{理}$ 。
- (5) 将平面板更换为曲面板($\alpha = 135^\circ$ 及 $\alpha = 180^\circ$),测量水流对曲面板的冲击力并重新测量流量。
- (6) 关闭抽水机,排空水箱,取下砝码,结束实验。

【注意事项】

- (1) 量测流量后,量筒内的水必须倒进接水器,以保证水箱循环水充足。
- (2) 体积法测流量时,计时与量筒接水一定要同步进行,以减小流量的量测误差。
- (3) 测流量一般测两次取平均值,以消除误差。

【数据处理】

(1) 有关常数:管嘴直径 $d =$ _____ cm,作用力力臂 $L_y =$ _____ cm,实验装置台号:_____。

- (2) 数据记录及计算。

表 1-4 记录及计算

测次	体积 W / cm^3	时间 / s	流量 / (cm^3/s)	平均流量 / (cm^3/s)	流速 / (cm/s)	冲击板 角度 α / $(^\circ)$	砝码 重量 G/g	作用力 力臂 L_x/cm	实测冲 击力 $F_{\text{实}}/\text{N}$	理论计算 冲击力 $F_{\text{理}}/\text{N}$	相对 误差 / $\%$
1											
2											
3											
4											
5											
6											

(3) 结果分析:将实测的水流对挡板的冲击力与由动量方程计算出的水流对挡板的冲击力进行比较,计算出其相对误差,并分析产生误差的原因。

【思考题】

- (1) $F_{\text{实}}$ 与 $F_{\text{理}}$ 有差异,除实验误差外还有什么原因?
- (2) 实验中,平衡锤产生的力矩没有加以考虑,为什么?

1.5 文丘里流量计及孔板流量计实验

【实验目的】

- (1) 了解文丘里流量计和孔板流量计的原理及其实验装置。
- (2) 绘出压差与流量的关系曲线,确定文丘里流量计和孔板流量计的流量系数 μ 值。

【实验原理】

文丘里流量计是在管道中常用的流量计,它包括收缩段、喉管、扩散段三部分。由于喉管过水断面的收缩,该断面水流动能加大,势能减小,造成收缩段前后断面压强不同而产生势能差,此势能差可由压差计测得。实验设备如图 1-6 所示。

孔板流量计原理与文丘里流量计相同,根据能量方程及等压面原理可得出不计阻力作用时的文丘里流量计(孔板流量计)的流量计算公式如下:

$$Q_{\text{理}} = K \sqrt{\Delta h} \quad (1-13)$$

$$\text{式中} \quad K = \frac{\pi}{4} \frac{D^2 d^2}{\sqrt{D^4 - d^4}} \sqrt{2g} \quad (1-14)$$

$$\Delta h = \left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right) \quad (1-15)$$

对于文丘里流量计: $\Delta h_{\text{文}} = h_1 - h_2$; 对于孔板流量计,由等压面原理可得: $\Delta h_{\text{孔}} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$ 。其中: d 为收缩段直径; D 为扩散段直径; h_1 为流场中点 1 的高度; h_2 为流场中点