



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

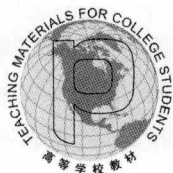
高等学校教材

流体力学· 实验指导书

LIU TI LI XUE SHI YAN ZHI DAO SHU

曹文华 李春兰 于达 编著

中国石油大学出版社



TEACHING MATERIALS FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

流体力学实验指导书

《流体力学实验指导书》是针对基础流体力学实验、地下流体渗流实验、工业管流实验所编写的本科生教材。
曹文华 李春兰 于 达 编著

流体力学是一门重要的技术基础课,在流体力学学科的教学占有重要的地位,尤其在石油高校中其重要性更加突出。它是石油工程专业、储运工程专业、石油工程专业及石油机械专业的必修课,是连接前期基础课和后续专业课的桥梁,是配合理论课程进行实践的重要环节。通过实验,力求使学生掌握水力要素量测的基本方法,培养科学实验的严谨作风和分析问题、解决问题的能力。

渗流力学实验是运用水电相似原理,利用电场模拟渗流场。随着油田开发难度的不断加大,井型越来越复杂,从直井到定向井、水平井、分支井、丛式井、多底井、鱼骨刺井等,组合成各种复杂的井网,流体的流场、压力场分布,产量的预测等变得异常复杂,得到其数学解析解非常困难甚至根本不可能。而通过水电模拟实验,用电场来模拟渗流场就非常容易实现,很容易获得各种复杂井型、复杂边界条件下的流场分布和产量。水电模拟实验是解决油田复杂渗流问题的一项非常有效的手段。

工业管流实验主要针对输油管道设计与运行、输油管道腐蚀与防护、流态学基础及应用、油气集输四门本科生课程开设。实验既有实际操作也有仿真模拟操作。输油管道的仿真操作实验可以让学生较充分地了解输油管道的设计、运行、维护及管道的操作方法和并能较直观地观察到管内流动过程。原油流变性测试实验主要评价原油流变性的主要指标的测试方法和原理。通过气-液两相流动实验,学生可以观察到在不同流动参数下管道内形成的气液两相流型,以及各种流型的转变过程,对集输管道的混相输送的流动过程进行定性描述。

中国石油大学出版社

为了提高实验课质量和教学效率,我们编写了这本《流体力学实验指导书》。该书在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,

图书在版编目(CIP)数据

流体力学实验指导书/曹文华,李春兰,于达编著.
东营:中国石油大学出版社,2007.6

ISBN 978-7-5636-2417-1

I. 流… II. ①曹…②李…③于… III. 流体力学—实验
IV. O35-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 099511 号

中国石油大学(北京)规划教材

书 名: 流体力学实验指导书

作 者: 曹文华 李春兰 于 达

责任编辑: 刘 洋(电话 0546—8392860)

封面设计: 九天设计

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

排 版 者: 中国石油大学出版社排版中心

印 刷 者: 东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791, 8392563)

开 本: 180×235 印张: 5.5 字数: 110 千字

版 次: 2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 8.00 元

前言

Foreword

第一《流体力学实验指导书》是针对基础流体力学实验、地下流体渗流实验、工业管流实验所编写的本科生实验教材。

流体力学是一门重要的技术基础课,在流体力学学科的教学占有重要的地位,尤其在石油高校中其重要性更加突出。它是石油工程专业、储运工程专业、石油化工专业及石油机械专业的必修课,是连接前期基础课和后续专业课程的桥梁,是配合理论课程进行实践的重要环节。通过实验,力求使学生掌握水力要素量测的基本方法,培养科学实验的严谨作风和分析问题、解决问题的能力。

渗流力学实验是运用水电相似原理,利用电场模拟渗流场。随着油田开发难度的不断增大,井型越来越复杂,从直井到定向井、水平井、分支井、丛式井、多底井、鱼骨刺井等,组合成各种复杂的井网,流体的流场、压力场分布,产量的预测等变得异常复杂,得到其数学解析解非常困难甚至根本不可能。而通过水电模拟实验,用电场来模拟渗流场就非常容易实现,很容易获得各种复杂井型、复杂边界条件下的场分布图和产量。水电模拟实验是解决油田复杂渗流问题的一项非常有效的手段。

工业管流实验主要针对输油管道设计与管理、输油管道瞬变流、流变学基础及应用、油气集输四门本科生课程开设。实验既有实际操作,也有仿真模拟操作。输油管道的仿真操作实验可以让学生较充分地了解到现代长距离输油管道的主要工艺流程和操作方法,并能较直观地观察到密闭输送管道运行过程中的水力变化特点,以及管道的水击过程和控制方法。原油流变性测试实验可以使学生基本掌握用于评价原油流变性的主要指标的测试方法和原理。通过气/液两相流动实验,学生可以观察到在不同流动参数下管道内形成的气液两相流型,以及各种流型的转变过程,对集输管道的混相输送的流动过程建立感性认识。

为了提高实验课质量和教学效率,我们编写了这本《流体力学实验指导书》。该书在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,

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳切希望读者指正。

28	第四章
28	第五章
28	第六章
28	第七章
28	第八章
28	第九章
28	第十章
28	第十一章
28	第十二章
28	第十三章
28	第十四章
28	第十五章
28	第十六章
28	第十七章
28	第十八章
28	第十九章
28	第二十章
28	第二十一章
28	第二十二章
28	第二十三章
28	第二十四章
28	第二十五章
28	第二十六章
28	第二十七章
28	第二十八章
28	第二十九章
28	第三十章
28	第三十一章
28	第三十二章
28	第三十三章
28	第三十四章
28	第三十五章
28	第三十六章
28	第三十七章
28	第三十八章
28	第三十九章
28	第四十章
28	第四十一章
28	第四十二章
28	第四十三章
28	第四十四章
28	第四十五章
28	第四十六章
28	第四十七章
28	第四十八章
28	第四十九章
28	第五十章
28	第五十一章
28	第五十二章
28	第五十三章
28	第五十四章
28	第五十五章
28	第五十六章
28	第五十七章
28	第五十八章
28	第五十九章
28	第六十章
28	第六十一章
28	第六十二章
28	第六十三章
28	第六十四章
28	第六十五章
28	第六十六章
28	第六十七章
28	第六十八章
28	第六十九章
28	第七十章
28	第七十一章
28	第七十二章
28	第七十三章
28	第七十四章
28	第七十五章
28	第七十六章
28	第七十七章
28	第七十八章
28	第七十九章
28	第八十章
28	第八十一章
28	第八十二章
28	第八十三章
28	第八十四章
28	第八十五章
28	第八十六章
28	第八十七章
28	第八十八章
28	第八十九章
28	第九十章
28	第九十一章
28	第九十二章
28	第九十三章
28	第九十四章
28	第九十五章
28	第九十六章
28	第九十七章
28	第九十八章
28	第九十九章
28	第一百章

目 录

Contents

第一章 基础流体力学实验	1
第一节 静水压强测量实验	1
第二节 能量方程(伯诺里方程)实验	4
第三节 动量定律实验(一)	7
第四节 动量定律实验(二)	9
第五节 雷诺实验	12
第六节 文透里流量计实验	15
第七节 毕托管测速实验	19
第八节 局部水头损失实验	21
第九节 沿程水头损失实验	27
第十节 孔口和管嘴出流实验	32
第十一节 流体粘度测定实验	35
第二章 渗流力学实验	38
第一节 相似三定理	38
第二节 水电模拟的基本原理	40
第三节 水电模拟实验装置	43
第四节 平面径向稳定渗流实验	45
第五节 镜像反映实验	49
第六节 直井井网系统实验	51
第七节 底水锥进实验	54
第八节 水平井及直井-水平井联合井网实验	55
第三章 流变学基础与应用实验	59
第一节 原油凝点的测定	59
第二节 原油屈服应力、触变性、流变曲线的测定	62

第四章 输油管道设计与管理实验	65
第一节 输油管道流程与控制参数	65
第二节 原油长输管道模拟操作	67
第五章 油气集输实验	70
第一节 气/液两相流型观测实验	70
第二节 气/液两相流管线清管实验	77
第六章 输油管道瞬变流实验	80
输油管道水击过程及控制实验	80

第一章

基础流体力学实验

第一节 静水压强测量实验

一、实验目的和要求

(1) 通过测量静止液体点的静水压强,加深理解位置水头、压强水头及测管水头的基本概念。

(2) 验证静水中同一基准面任意两点的测压管水头 $z + \frac{p}{\gamma}$ 为一常数。

(3) 熟悉掌握静水压强的测量方法和不可压缩流体静力学基本方程。

(4) 观察真空现象,加深对真空度的理解。

(5) 测量油的重度。

二、实验原理

根据流体平衡规律,在重力作用下不可压缩流体静力学基本方程为:

$$z + \frac{p}{\gamma} = C$$

或

$$p = p_0 + \gamma h$$

式中, p ——被测点的静水压强;

p_0 ——液面的表面压强;

z ——被测点在基准面以上的位置高度;

C ——常数;

γ ——液体重度;

h ——被测点液体垂直深度。

上式表明,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。

利用液体的平衡规律,可测量和计算出连通的静止液体中任意一点的压强,这就是测压管测量静水压强的原理。

压强水头 $\frac{p}{\gamma}$ 和位置水头 z 之间的互相转换, 决定了液柱高和压差的对应关系:

$$\Delta p = \gamma \Delta h$$

在压差相同的情况下, 利用互相连通的同种液体的等压面原理, 可以测定液体的重度。

三、实验装置

实验装置如图 1-1 所示, 在透明密封的有机玻璃箱内注入适量的水, 由一乳胶管将水箱与调压筒相连, 调压筒的顶部与大气连通。水箱顶部装有排气阀 K_1 , 截止阀 K_2 与测压排中的三个 U 形比压计中的测管 1, 3, 5 相通, U 形管 1-2 与水箱不连通, 内装液体为油, U 形管 3-4, 5-6 通过测点 A 和 B 与水箱接通。截止阀 K_3 与另一容器连通。

打开 K_1 时, 水箱内液体的表面压强为大气压, 当 K_1 关闭时, 可通过升降调压筒调节水箱内液体的表面压强, 使其大于或小于大气压强。

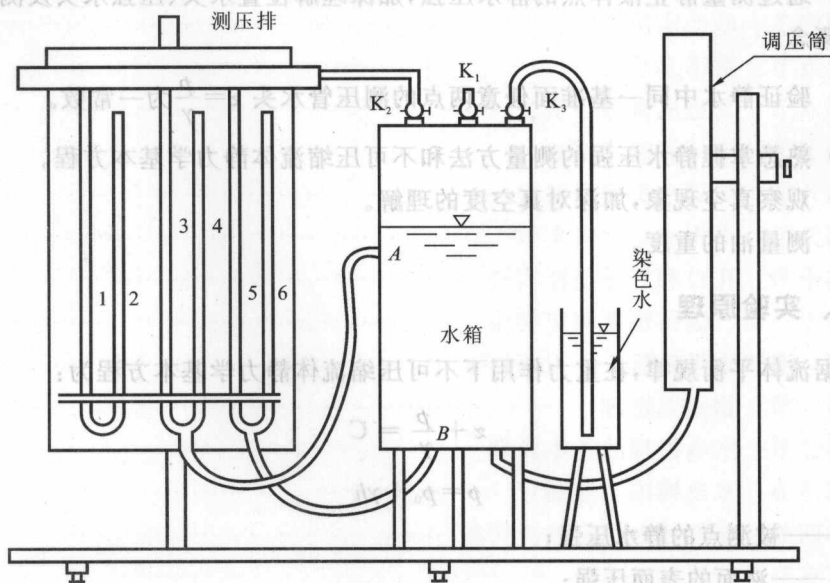


图 1-1 静水压强测量实验装置

四、实验步骤

- (1) 熟悉装置结构, 记录有关常数。
- (2) 读 A 点和 B 点的标高读数 ∇_A, ∇_B 。
- (3) 打开排气阀 K_1 , 使容器的液面与大气相通, 此时容器液面压强 $p_0 = p_a$ 。把调压筒内水面高度调在中间位置, 待水面稳定后, 观察各测管中的液面位置, 以验证

等压面原理。

(4) 容器液面压强 $p_0 > p_a$ 时, 关闭排气阀 K_1 , 将调压筒上升一定高度, 观察各测点压差计的压差变化, 待水面稳定后, 记录各测管的液面标高。

(5) 在保持容器液面压强 $p_0 > p_a$ 的条件下, 改变调压筒的高度, 重复两次实验, 并记录各测管的液面标高。

(6) 容器液面压强 $p_0 < p_a$ 时, 关闭排气阀 K_1 , 将调压筒下降一定高度。观察各测点压差计的压差变化, 待水面稳定后, 记录各测管的液面标高。

(7) 在保持容器液面压强 $p_0 < p_a$ 的条件下, 改变调压筒的高度, 再做 2 次实验, 并测记各测压管的液面标高。

五、实验数据记录

(1) 有关常数。

实验台号:

A 点高程 $\nabla_A =$ _____ cm, B 点高程 $\nabla_B =$ _____ cm, $\gamma_{\text{水}} = 9.8 \times 10^{-3} \text{ N/cm}^3$

(2) 测管液面高程读数记录表。

工 况	测 次	∇_1/cm	∇_2/cm	∇_3/cm	∇_4/cm	∇_5/cm	∇_6/cm
$p_0 > p_a$	1						
	2						
	3						
$p_0 < p_a$	1						
	2						
	3						

六、实验结果

工 况	测 次	$p_0 = \gamma_{\text{水}} (\nabla_6 - \nabla_5)$ $/(\text{N} \cdot \text{cm}^{-2})$	$p_A = \gamma_{\text{水}} (\nabla_6 - \nabla_A)$ $/(\text{N} \cdot \text{cm}^{-2})$	$p_B = \gamma_{\text{水}} (\nabla_6 - \nabla_B)$ $/(\text{N} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\gamma_{\text{油}} = \gamma_{\text{水}} \frac{\nabla_6 - \nabla_5}{\nabla_2 - \nabla_1}$ $/(\text{N} \cdot \text{cm}^{-2})$
$p_0 > p_a$	1				
	2				
	3				
$p_0 < p_a$	1				
	2				
	3				

七、注意事项

- (1) 升降调压筒时,要用手拿好调压筒,稳定上升或下降。
- (2) 在读取测压管数据时,应该在液面稳定的情况下进行。
- (3) 在读取测压管数据时,视线必须与液面最低点在同一水平面上。
- (4) 如果发现测压管中水位不断改变,说明容器或测压管漏气,应采取止漏措施。

八、思考题

- (1) 什么情况下 3,4 两测压管的高度相等?
- (2) 如何利用测压管测量静止液体中任意一点的压强?
- (3) 相对压强与绝对压强、相对压强与真空是什么关系?
- (4) 试从实验记录数据中,证明 $z + \frac{p}{\gamma}$ 为常数。
- (5) 调压筒的上升与下降为什么能改变容器的液面压强?
- (6) 分析在实验测量过程中产生测量误差的原因,应该采取哪些措施尽量减少误差。

第二节 能量方程(伯诺里方程)实验

一、实验目的和要求

- (1) 观察恒定流条件下管道断面发生改变时,水流的位置势能、压强势能和动能的沿程转化规律。
- (2) 考察均匀流、渐变流、急变流及水流的特征。
- (3) 验证流体恒定总流的能量方程。
- (4) 学习掌握流速、流量、压强、测压管、总压管测水头的实验技能。
- (5) 绘制测压管的水头线和总水头线。

二、实验原理

液体在流动过程中,液体的各种机械能(单位位能、单位压能和单位动能)是可以相互转化的。

在恒定流、渐变流断面条件下,于实验管路中沿水流方向取 n 个断面,对任意过水断面的能量方程如下:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g} + h_{w1-i}$$

式中, z ——位置水头;

$\frac{p}{\gamma}$ ——压强水头;

$\frac{\alpha v^2}{2g}$ ——流速水头;

h_w ——任意两断面的水头损失;

α ——动能修正系数。

取 $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n = 1$, 从各断面的测压管中测出 $z + \frac{p}{\gamma}$ (测压管水头) 值, 再测出流过管路的流量, 就可计算出断面平均流速和流速水头, 从而计算出总水头。

通过毕托管, 可测量毕托管探头对准点的总水头。

通过测压管, 可测量相对应的测点的测压管水头。

三、实验装置

实验装置如图 1-2 所示。

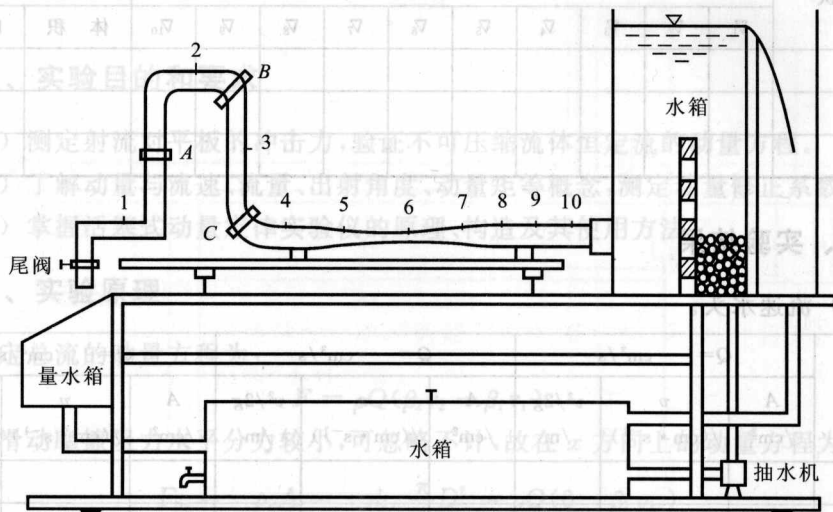


图 1-2 伯诺里方程实验装置图

四、实验步骤

- (1) 认识和分辨测压管和毕托管及其功能, 了解它们与各待测值的对应关系。
- (2) 打开电源开关供水, 使水箱充水, 保持水箱溢流状态, 使水位稳定。关闭下游出水阀门, 观察测压管水面是否齐平, 若不齐平则进行排气调平。
- (3) 打开下游出水阀门, 观察测压管线和总水头线的变化趋势, 以及位置水头、压强水头之间的相互关系, 观察均匀流断面 A、急变流断面 B 及 C 上的压力分布规

律。

(4) 调节下游出水阀门,待流量稳定后,选好基准面,记录测压管数据。

(5) 用体积法测量流量,并记录其数据。

(6) 调节出水阀门,改变出水流量 2 次,重复上述测量方法,其中一次使阀门开度最大(以液面降到标尺最低点为限)。

五、实验数据记录

(1) 有关常数。

实验台号: 水箱水面读数: _____ cm

测压管号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
管 径										

(2) 测压管水头实验数据记录表。

测 次	测压管水位 $(z + \frac{p}{\gamma})/\text{cm}$										实验流量	
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	体 积	时 间
1												
2												
3												

六、实验结果

(1) 流速水头。

管径 d /cm	$Q = \text{cm}^3/\text{s}$			$Q = \text{cm}^3/\text{s}$			$Q = \text{cm}^3/\text{s}$		
	A	v	$v^2/2g$	A	v	$v^2/2g$	A	v	$v^2/2g$
	/cm ²	/(cm · s ⁻¹)	/m	/cm ²	/(cm · s ⁻¹)	/m	/cm ²	/(cm · s ⁻¹)	/m

(2) 总水头 $z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ 。

测压管号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	实验流量

(3) 绘制上述结果中最大流量下的总水头线和测压管水头线。

七、注意事项

(1) 阀门开启时速度要缓慢,不要使测压管水位下降太多,以免装置吸入气体,影响测量结果。

(2) 实验时流量不宜太小,以保证测量精度。

(3) 当改变流量时,必须在流量稳定后再进行测量。

八、思考题

(1) 测压管水头线和总水头线的变化趋势有何不同?为什么?

(2) 当流量增加或减少时,测压管水头有什么变化?

(3) 在各测压管中,哪个测压管的水面下降最大?

第三节 动量定律实验(一)

一、实验目的和要求

(1) 测定射流对平板的冲击力,验证不可压缩流体恒定流的动量方程。

(2) 了解动量与流速、流量、出射角度、动量矩等概念,测定动量修正系数。

(3) 掌握活塞式动量定律实验仪的原理、构造及其使用方法。

二、实验原理

恒定总流的动量方程为:

$$F = \rho Q (\beta_2 v_2 - \beta_1 v_1)$$

因滑动摩擦阻力水平分力较小,可忽略不计,故在 x 方向上的动量方程为:

$$F_x = -p_c A = -\gamma h_c \frac{\pi}{4} D^2 = \rho Q (0 - \beta_1 v_{1r})$$

即:

$$\beta_1 \rho Q v_{1r} - \frac{\pi}{4} \gamma h_c D^2 = 0$$

式中, h_c ——作用在活塞圆心处的水深;

D ——活塞的直径;

Q ——射流流量;

β_1 ——动量修正系数;

v_{1r} ——射流的速度。

在平衡状态下,只要测量出流量 Q 和测管液柱高度 h_c ,连同给定的喷嘴直径 d 和活塞直径 D ,便可验证动量方程并确定射流的动量修正系数 β 。其中,测压管的标尺零点已固定在活塞的圆心处,标尺的液面读数即为作用在活塞圆心处的水深。

三、实验装置

实验装置如图 1-3 所示。为了自动调节测压管内的水位,使活塞的平板受力平衡,以及减少摩擦阻力对活塞的作用,实验装置应用了自动控制的反馈原理和动摩擦减阻技术。活塞中心设有一细导水管,进口端位于平板中心,出口方向与轴向垂直。在平板上设有翼片,在活塞套上设有窄槽。工作时,在射流冲击力作用下,水流经导水管加入到测压管内。当射流冲击力大于测压管内水柱对活塞的压力时,活塞内移,窄槽关小,水流外溢减少,测压管内水位升高,水压力增大。反之,活塞外移,窄槽开大,水流外溢增多,测压管内水位降低,水压力减少。在恒定射流冲击下,经短时间的自动调整,活塞就会处在半进半出、窄槽部分开启、射流冲击力和水压力的平衡状态。

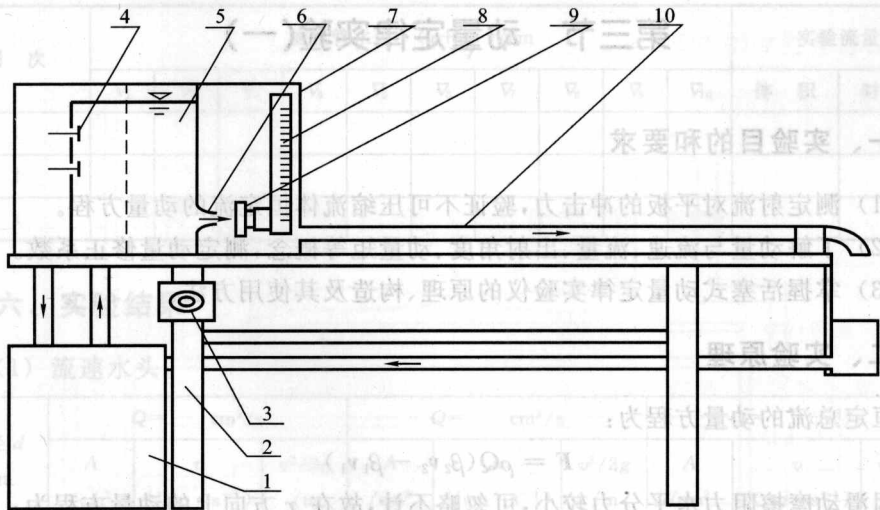


图 1-3 动量定律实验装置图

- 1—自循环供水器;2—实验台;3—可控硅无级调速器;4—水位调节阀;5—恒压水箱;
6—管嘴;7—集水箱;8—带活塞的测压管;9—带活塞和翼片的抗冲平板;10—上回水管

四、实验步骤

- (1) 熟悉实验装置各部分的名称、结构特征和作用性能,记录有关常数。
- (2) 实验开始前先调整测压管位置,要求测压管垂直,螺丝对准十字中心,使活塞转动松快,然后旋转螺丝固定好。
- (3) 打开电源,开启调速器开关,调整上水流量,使水泵正常运行,水箱充水,保

持恒定水箱溢流状态,使水位稳定。

(4) 在恒定水箱溢流状态下,当恒定水箱的水位及测压管内液面稳定后,测读水位,记录测压管内液面的标尺读数,即 h_c 值。

(5) 用体积法测量流量,使用量筒容器和秒表进行测量,测量流量的时间尽量长些(亦可用重量法测量)。

(6) 改变水头高度,重复实验,逐次打开不同高度上的溢水孔盖,改变管嘴的作用水头。待水头稳定后,按以上步骤重复进行 3 次实验。

五、实验数据记录与处理

(1) 记录有关常数。

实验台号:

管嘴内径 $d =$ _____ cm, 活塞直径 $D =$ _____ cm

(2) 实验数据表格。

测次	体积 V/cm^3	时间 t/s	管嘴作用水头 H_0/cm	活塞作用水头 h_1/cm	流量 $Q/(\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	流速 $v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	动量 $F/(\text{N} \cdot \text{s})$	动量修正系数 β_1
1								
2								
3								

六、注意事项

(1) 顺时针方向打开调速器旋钮。

(2) 停止实验时,必须逆时针转动调速器旋钮关掉电源。顺时针转到底也可以使水泵停转,但电流并未切断,不可久置。

七、思考题

(1) 带翼片的平板在射流作用下获得力矩,这对分析射流冲击无翼片的平板沿 x 方向的动量方程有无影响? 为什么?

(2) 通过细导水管的分流,其出流角度与 v_2 相同,对以上受力分析有无影响?

第四节 动量定律实验(二)

一、实验目的和要求

由喷嘴射出的水射流冲击平板或者曲板,测出射流流量与冲击实验板的作用力。

对实测力和按动量方程计算出的作用力进行比较,以验证恒定总流的动量方程。

二、实验原理

若不考虑能量损失及其他影响因素,只考虑重力减速作用,射流冲击实验板的理论值为:

$$F_T = \rho Q(1 - \cos\beta) \sqrt{v_0^2 - 2gz}$$

式中, Q ——射流流量;

z ——射流喷嘴高程;

v_0 ——喷嘴出口流速;

β ——射流入口流速与出口流速夹角;

ρ ——水的密度。

理论值 F_T 与实测值 F_E 进行比较,其误差为:

$$\Delta = \frac{F_T - F_E}{F_T} \%$$

三、实验装置

实验装置如图 1-4 所示。

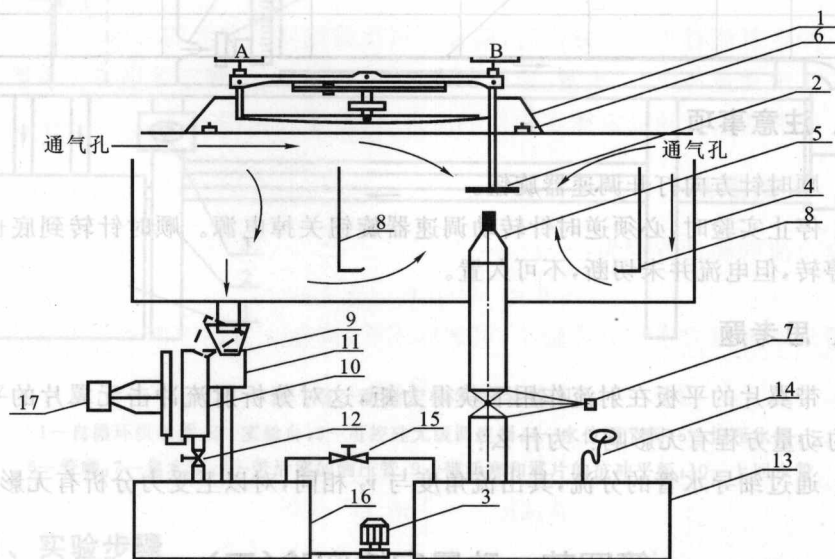


图 1-4 动量定律实验装置图

1—天平;2—实验板;3—水泵;4—实验箱;5—喷嘴;6—定位件;7—调节阀;

8—挡水板;9—分流器;10—量水箱;11—泄水槽;12—泄水阀;13—压力箱;

14—压力表;15—调压阀;16—水箱;17—流量测量接口