



高等学校应用基础型人才培养规划教材

实验实训

流体力学实验教程

时连君 陈庆光 李志敏 章军军 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



高等学校应用基础型人才培养

实验实训

流体力学实验教程

编著 时连君 陈庆光 李志敏 章军军

内 容 提 要

本书为高等学校应用基础型人才培养规划教材。全书共包括 9 个实验项目。实验内容有流体静力学、流体运动学的基本原理、雷诺实验、伯努利方程、流动阻力系数测定实验、流量计与流量系数测定实验等。静水力学实验及流线演示仪演示实验均采用浙江大学设计生产的实验设备,其他实验项目采用流体力学综合实验台来完成。

本书可供高等院校机械设计制造及自动化、机械电子工程、能源与动力工程、过程装备与控制工程、材料成型工程、土木工程、工程力学、建筑环境与设备、安全工程、理论与应用力学、工业工程等专业的师生使用,也可以作为其他工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学实验教程 / 时连君等编著. —北京: 中国电力出版社, 2015.3

高等学校应用基础型人才培养规划教材. 实验实训

ISBN 978-7-5123-7290-0

I. ①流… II. ①时… III. ①流体力学—实验—高等学校—教材 IV. ①O35-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 040449 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 3 月第一版 2015 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 4.75 印张 106 千字

定价 9.50 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

编 委 会

主 任 魏绍亮

副主任 韩宝坤 时连君 孙 静

委 员 万殿茂 郭春芬 梁慧斌

陈庆光 李志敏 王京生

邓 昱 刘 梅 高 峰

序

山东特色名校工程,是山东省为解决省内高等学校面临的办学模式单一、同质化倾向明显、学科专业结构不能够适应经济社会发展等问题而实施的教育改革,即在省内地方高校中遴选一批不同类型的人才培养特色名校,进行重点建设。山东特色名校工程被誉为“山东省版 211 工程”或“鲁版 211 工程”。名校工程突出“分类指导、内涵发展、强化特色、提高质量”的主题,推动高校科学发展,建设一批在深化教育教学改革、创新人才培养模式、提高人才培养质量、增强社会服务能力等方面发挥示范带动作用的高校,形成层次类别清晰、具有山东特色的高等教育体系。

山东科技大学作为第一批重点建设的应用基础型特色名校之一,紧紧把握机遇,全面启动名校建设工作。机械设计制造及其自动化、土木工程、采矿工程等专业是特色名校建设的重点专业,学校计划通过 3 年名校工程重点专业建设,将重点建设的专业建设成为在工程领域中专业特色鲜明、办学优势突出,人才培养、科学研究、社会服务、管理水平和毕业生质量均达到国内先进水平且具有较高知名度的特色专业。要培养具有“宽口径、厚基础、强能力、高素质”特征的具有创新意识的人才。要培养具有创新意识的人才,实践教学所占的地位十分重要。众多发明创造都来自于实验。因此,营造一个较好的实验、实践环境,建立一套完善的实践体系,因此编写一套高质量的实验、实践教材是基本的保证。

按照山东省特色名校建设的要求,学校组织以实验室教师为主,任课教师积极参与,制订了一套具有创新意识的实验、实践教改方案。经过有关专家论证,结合一线实验教师、任课教师的多年实践教学经验,组织编写了这套高等学校应用基础型人才培养规划教材·实验实训系列教材,包括流体力学实验教程、机械原理实验教程、传感器系统实验教程、汇编语言与接口技术实验教程、互换性与测量技术实验教程。

该套教材主要特点如下:

- (1) 注重学生动手能力培养,加强实践、培养兴趣、积极创新的理念。
- (2) 符合教学规律,实现了循序渐进,实验分为验证性实验、综合性实验、创新性实验和设计性实验 4 个层次。
- (3) 实现了内容的优化组合,突出了先进性和实用性。

该套教材可以作为本校或者外校相同、相近专业学生的实验指导教材,也可以作为教师和工程技术人员的设计参考书。

2014 年 12 月

前 言

流体力学是在人类同自然界做斗争和在生产实践中逐步发展起来的。流体力学是研究流体的平衡和力学运动规律及其应用的学科,是研究在各种力的作用下,流体(液体、气体)本身的状态,以及流体和固体壁面、流体和流体间、流体与其他运动形态之间的相互作用的力学分支,也是力学的一个重要分支。流体力学主要研究流体本身的静止状态和运动状态,以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律。

流体力学的特点是从实践中来又到实践去,是理论与实践紧密结合的一门科学,在人们的生活和生产活动中经常会遇到流体,所以流体力学是与人类日常生活和生产事业密切相关的,例如医院输液的原理、饮水机的原理。古时中国有大禹治水疏通江河的传说;秦朝李冰父子带领劳动人民修建的都江堰河道,这个是集灌溉、防洪、提供生活用水和工业用水多方面功能为一体的水利枢纽工程,它是由鱼嘴、飞沙堰、宝瓶口三大主体工程等共同组成起到分水、排沙及引水的三大功能,使岷江的水力资源得到充分的利用,至今还在发挥着作用,使川西平原成为“水旱从人”的“天府之国”。

本书主要包括流体静力学、流体运动学、流体流量的测量等实验项目,从理论学习到综合运用,旨在提高学生分析问题、解决问题的能力。

本书由山东科技大学组织编写,具体分工如下:章军军编写实验1~实验3;时连君、李志敏编写实验4~实验9。时连君承担本书的统稿工作。

在本书的编写过程中,山东科技大学陈庆光教授、韩宝坤教授提出了很多宝贵的意见和建议,在此表示感谢。

鉴于编者水平所限,书中难免有错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编者 时连君

2014.12

实 验 须 知

1. 实验注意事项

(1) 实验教学是课程学习的重要环节之一，通过实验不但可以巩固课堂知识，理论联系实际，而且能使提高学生实验技能和动手操作能力。

(2) 学生进入实验室需要签到，实验结束须经指导老师允许后才可以签名离开。对于迟到、早退、代签名字的学生其实验成绩要酌情扣分。

(3) 实验前要复习课程有关内容，认真预习实验指导书，明确实验目的，完成指导书中提出的各项要求。

(4) 实验时要多动脑、亲自动手，培养独立工作和分析问题能力。

(5) 爱护实验设备，正确使用设备器具，注意人身、设备安全，设备损坏要赔偿。实验中遇有故障要及时向指导教师报告，妥善处理。

(6) 注意卫生，实验室内不准吸烟，不准随地吐痰，不准乱扔纸屑；保持良好的秩序、实验完毕要清扫实验设备和现场，禁止穿拖鞋进入实验室。

(7) 认真完成实验报告，按时交给指导教师批阅、评分。

2. 实验报告要求

(1) 实验报告是对实验成果的归纳、总结，必须以严肃认真、实事求是的态度完成。

(2) 进实验室前要对实验材料的内容进行预习，填写实验报告的相关内容，否则不准进入实验室做实验。

(3) 对实验所需已知参数应主动查询，对测试参数和现象要如实记录。

(4) 实验报告中的思考题，可由指导教师提出，也可由学生自行提出和回答。

(5) 要求学生独立完成报告。

目 录

序	
前言	
实验须知	
实验 1 流体静力学实验	1
1.1 实验目的要求	1
1.2 实验装置	1
1.3 实验原理	2
1.4 实验内容与方法	3
1.5 实验报告内容	5
实验 2 流体静力学设计性实验	11
2.1 设计性实验目的	11
2.2 实验要求	11
实验 3 流体流动现象演示实验	15
3.1 实验目的	15
3.2 实验装置与工作原理	15
3.3 实验说明	16
3.4 实验报告内容	21
实验 4 雷诺实验	25
4.1 实验目的	25
4.2 实验原理	26
4.3 实验步骤	28
4.4 实验注意事项	28
4.5 实验报告内容	29
实验 5 沿程阻力系数测定实验	33
5.1 实验目的	33
5.2 实验原理	33
5.3 实验步骤	34
5.4 实验数据及整理	35
5.5 实验注意事项	35
5.6 实验报告内容	36

实验 6 局部阻力系数的测定实验 39

6.1 实验目的39

6.2 实验原理及实验装置39

6.3 实验操作41

6.4 实验报告内容.....42

实验 7 伯努利（Bernoulli）方程实验 45

7.1 实验目的45

7.2 实验原理45

7.3 实验步骤46

7.4 实验报告内容.....47

实验 8 流量计流量系数的测定实验 51

8.1 实验目的51

8.2 文丘里流量计实验原理51

8.3 孔板流量计的原理.....53

8.4 实验步骤54

8.5 实验报告内容.....55

实验 9 皮托管测流速及流量的方法 59

9.1 实验目的59

9.2 实验原理59

9.3 实验步骤60

9.4 皮托管测速的特点.....60

9.5 实验报告内容.....61

参考文献..... 64

实验 1 流体静力学实验

流体静力学是研究流体处于静止状态时在外力作用下的平衡规律及其在工程中的应用。流体的静止状态是一个相对概念，指流体质点之间不存在相对运动，流体质点相对于参考坐标系没有相对运动，处于相对平衡的状态。本实验内容包含流体静力学基本方程、流体静压强、流体密度及一些定性的分析实验，目的在于加深学生对于流体静力学基本概念的理解，以及提高学生观察问题、分析问题及解决问题的能力。

1.1 实验目的要求

- (1) 掌握使用测压管测量流体静压强的技能。
- (2) 验证不可压缩流体静力学基本方程。
- (3) 测定油的密度。
- (4) 通过对诸多流体静力学现象的实验分析，进一步提高解决静力学实际问题的能力。

1.2 实验装置

1.2.1 实验装置简图

本实验的装置如图 1-1 所示。

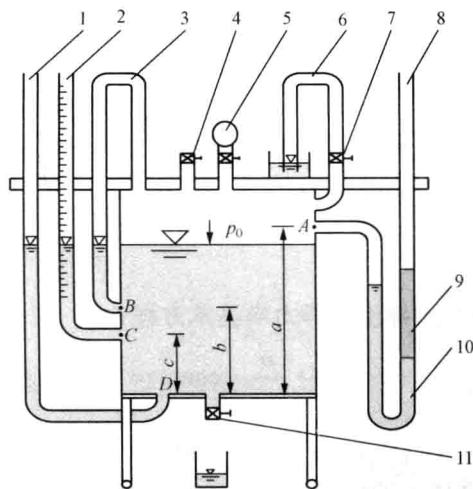


图 1-1 流体静力学实验装置

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

1.2.2 装置说明

- (1) 流体测点静压强的测量：测压管。

流体流动的要素有压强、水位、流速、流量等。其中，压强的测量方法有机械式测量法与电测法，测量的仪器也有静态与动态之分。测量流体某一点压强的测压管属于机械式静态测量仪器。测压管是一端连通流体的被测点，另一端开口与大气相通的透明管，适用于测量流体测点低压范围的相对压强，测量精度为 1mm。测压管分为直管和 U 形管。

直管型测压管如图 1-1 中的管 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 形管如图 1-1 中的管 1 与管 8 所示。一般 U 形管中为单一液体，本装置因测量油密度的需要，在管 8 中可以装入油和水，测点的压强为 $p = \rho g \Delta h$ ， Δh 为 U 形管两液面的高度差。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“-”。

由于毛细管的影响，测压管内径应大于 8~10mm。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 8mm，毛细高度仅为 1mm 左右。

(2) 恒定液位测量方法之一：连通管。

测量液体恒定水位的连通管属于机械式静态测量仪器。连通管是一端连接被测液体，另一端开口位于被测液体表面的空腔透明管，如图 1-1 中的 3 所示。敞口容器中的测压管也是测量液位的连通管。连通管中液体的高度直接显示了容器中的液位，用毫米刻度尺即可测读水位值。本装置的连通管与测压管同为等径透明有机玻璃管。液位的测量精度为 1mm。

(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 的位置高程的标尺读数均以 ∇_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 也写作 z_B 、 z_C 、 z_D 。

(5) 本仪器中所有阀门旋柄均以顺着管轴线为开。

1.2.3 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 $p_0=0$ 。

(2) 设置 $p_0>0$ 条件：关闭通气阀 4、放水阀 11、通过加压球 5 对实验装置打气，可对实验室内加压，形成正压。（注意：加压时不应该使测压管内的液体溢出测压管）

(3) 设置 $p_0<0$ 条件：关闭通气阀 4、加压打气球 5 底部阀门，开启放水阀 11，可对装置内部减压，形成真空。（注意：从阀门放出的水要重新加到容器内）

(4) 水箱液位的测量：在 $p_0=0$ 条件下读出测压管 2 的液位值，即为水箱液位值。

1.3 实验原理

1.3.1 在重力作用下不可压缩流体静力学基本方程

$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{const}$$

或

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

式中 z ——被测点在基准面以上的位置高度；

p ——被测点的静水压强， 10^{-2}m （用相对压强表示，以下同）；

p_0 ——水箱中自由液面压强， 10^{-2}m ；

ρ ——液体的密度， kg/m^3 ；

h ——被测点的液体深度， m 。

1.3.2 油密度测量原理

对装有水和油（见图 1-2）的 U 形测管，应用等压面可得油的密度 ρ_o 有下列关系：

$$\frac{\rho_o}{\rho_w} = \frac{h_1}{h_1 + h_2} \quad (1-2)$$

即油的密度为

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

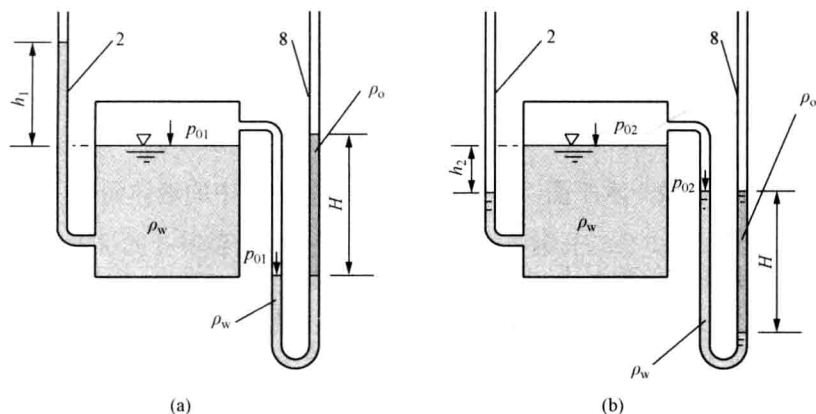


图 1-2 油密度测量方法

据此可用仪器（不用另外直尺）直接测得 ρ_o 。只利用图 1-1 中测压管 2 的自带标尺测量。先用加压打气球 5 加压使 U 形测压管 8 中的水面与水、油交界面齐平，如图 1-2 (a) 所示，可得

$$p_{01} = \rho_w g h_1 = \rho_o g H \quad (1-3)$$

再打开减压放水阀 11 降压，使 U 形测压管 8 中的水面与油面齐平，如图 1-2 (b) 所示，则有

$$p_{02} = -\rho_w g h_2 = \rho_o g H - \rho_w g H \quad (1-4)$$

由式 (1-3) 与式 (1-4) 可得

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

思考：如果用外直尺怎么测量，写出其测量公式。

1.4 实验内容与方法

1.4.1 定性分析实验

(1) 测压管与连通管的判定。按照测压管与连通管的定义，实验装置中 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化，位置水头 z 和测压管水头 $z + \frac{p}{\rho g}$ 随着基准面的选择而变化。

(3) 观察测压管的水头线。测压管液面连线就是测压管的水头线。打开通气阀 4，此时 $p=0$ ，管 1、2、3 均为测压管，从这 3 个管的液面连线可以看出，对于同一静止液体，测压管水头线是一根直线。

(4) 判断等压面。关闭通气阀 4，打开截止阀 7，用加压球 5 稍微加压，使 $\frac{p_0}{\rho g}$ 为 0.02m 左右，判断下面几个面是否为等压面：

- 1) 过 C 点做一水平面，相对管 1、2、8 及水箱液面而言，这个水平面是不是等压面？
- 2) 过 U 形管 8 中的油、水分界面做一水平面，对管 8 中的液体而言，这个面是不是等压面？
- 3) 过管 6 中的液面做一水平面，对管 6 中的液体和方盒中的液体而言，该水平面是不是等压面？

根据质量力只有重力的情况下，等压面应满足的条件——静止、连续、均质、同一水平面，可以判断上述 (2)、(3) 是等压面。在 (1) 中，相对于管 1、2 及水箱液体而言，它是等压面，但相对于管 8 中的水或油来讲，都不是同一等压面。

(5) 观察真空现象。打开放水阀 11，降低箱内压强，使测压管 2 的液面低于水箱液面，这时箱体內的压强 $p < 0$ ，再打开截止阀 7，在大气压强的作用下，管 6 的液面就会上升一定的高度，说明箱体內出现了真空区域。

(6) 观察负压下管 6 中的液位变化。关闭通气阀 4，开启截止阀 7 和放水阀 11，待空气自管 2 进入圆筒后，观察管 6 中液面的变化。

1.4.2 定量的分析测量

测点静压强的测量。根据基本的操作方法，分别在 $p=0$ 、 $p>0$ 、 $p<0$ 与 $p_B<0$ 的条件下测量水箱液面的标高 ∇_0 和测压管 2 的液面标高 ∇_H ，分别确定测点 A、B、C、D 的压强 p_A 、 p_B 、 p_C 、 p_D 。

1.4.3 拓展实验

- (1) 油密度的测定。根据实验原理，不借助于外部尺子测量油密度。
- (2) 测量 4 号测压管插入小水杯中的深度。

1.4.4 实验注意事项

掌握仪器组成及其用法，包括以下几项内容：

- (1) 各阀门的开关（阀门手柄处于水平方向时阀关闭，反之为开）。
- (2) 加压方法：关闭所有阀门（包括截止阀），然后用打气球充气加压（一定注意加压时液体不得从测压管中溢出）。
- (3) 减压方法：开启筒底放水阀 11。注意：由于实验采用的水为纯净水，所以放出来的水要通过注水口倒回去。
- (4) 检查仪器是否密封：加压后检查测管 1、2、8 液面高程是否恒定。若下降，表明漏气，应查明原因并加以处理。

1.5 实验报告内容

1.5.1 实验前的预习内容（到实验室前完成）

（1）实验目的。

（2）根据实验项目的名称结合课本上讲的相关内容，设计一台实验装置来达到实验目的，画出其原理图，说明其实验原理。

（3）预习报告，列举出本实验工程实践及生活应用案例。

1.5.2 实验成果及要求

(1) 记录有关信息及常数。

实验设备的名称 _____ 实验装置台号 No. _____

同组实验者: _____ 实验日期 _____

各测点的高程: $\nabla_B =$ _____ 10^{-2}m , $\nabla_C =$ _____ 10^{-2}m , $\nabla_D =$ _____ 10^{-2}m

(2) 基准面选在 _____

$z_C =$ _____ 10^{-2}m , $z_D =$ _____ 10^{-2}m

(3) 实验数据记录及结果计算 (见表 1-1 和表 1-2)。

(4) 求出油的密度 $\rho_0 =$ _____ kg/m^3

说明用直尺法测量油密度的方法, 画图说明, 并得出其计算式。

(5) 测出 4 号测压管插入小水杯水中深度 (画图分析说明)。

$\nabla_{h4} =$ _____ 10^{-2}m

分析:

表 1-1

流体静压强测量记录及计算表

10⁻²m

实验 条件	序号	压强水头						测压管水头	
		水箱液 面 ∇_0	测压管液 面 ∇_H	$\frac{p_A}{\rho g} = \nabla_H - \nabla_0$	$\frac{p_B}{\rho g} = \nabla_H - \nabla_B$	$\frac{p_C}{\rho g} = \nabla_H - \nabla_C$	$\frac{p_D}{\rho g} = \nabla_H - \nabla_D$	$z_C + \frac{p_C}{\rho g}$	$z_D + \frac{p_D}{\rho g}$
$p_0=0$	1								
$p_0>0$	1								
	2								
	3								
$p_0<0$	1								
	2								
	3								

注 表中基准面选在_____， $z_C =$ _____10⁻²m， $z_D =$ _____10⁻²m

表 1-2

油密度测量记录及计算表

10⁻²m

条件	次序	水箱液面 标尺读数 ∇_0	测压管 2 液面 标尺读数 ∇_H	$h_1 = \nabla_H - \nabla_0$	$\bar{h}_1$	$h_2 = \nabla_0 - \nabla_H$	$\bar{h}_2$	油密度计算
$p_0 > 0$ 且 U 形管水面与 油水交界面齐平	1							$\frac{\rho_o}{\rho_w} = \frac{\bar{h}_1}{\bar{h}_1 + \bar{h}_2}$
	2							
	3							
$p_0 < 0$ 且 U 形管中水面 与油面齐平	1							
	2							
	3							

1.5.3 实验分析与讨论

(1) 同一静止液体内的测压管水头线是什么线？

(2) 相对压强与绝对压强、相对压强与真空度之间有什么关系？测压管能测量的是何种压强？

(3) 当 $p_B < 0$ 时，试根据记录数据确定水箱内的真空区域。

(4) 如测压管太细，对测压管液面的读数将有何影响？

(5) 过 C 点作一水平面，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？哪一部分液体是同一等压面？