



“十三五”普通高等教育本科规划教材

工程流体力学 实验教程

时连君 陈庆光 时慧喆 章军军 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

工程流体力学 实验教程

编著 时连君 陈庆光 时慧喆 章军军
主审 李志敏

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。全书分为流体静力学、流体动力学和流体运动学的基本原理三部分,包括雷诺实验、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9个实验项目。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

工程流体力学实验教程/时连君等编著. —北京:中国电力出版社,2017.9

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-1119-8

I. ①工… II. ①时… III. ①工程力学—流体力学—实验—高等学校—教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第216535号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址:<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:周巧玲(010-63412539)

责任校对:朱丽芳

装帧设计:赵姗姗

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2017年9月第一版

印 次:2017年9月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:4.5

字 数:103千字

定 价:10.00元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

编 委 会

主任 孙 静

副主任 时连君

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

前 言

工程流体力学是在人类同自然界的斗争和生产实践中逐步发展起来的。工程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，以及流体和固体壁间有相对运动时的相互作用和流动的规律。

工程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、饮水机的原理等。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、流体动力学、流体运动学基本原理，以及流体流量的测量等实验项目，内容编排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 2；时连君编写实验 3~实验 6，陈庆光编写实验 7，时慧喆编写实验 8 和实验 9，时连君承担本书的统稿工作，时慧喆负责全书的图表处理。本书由山东科技大学李志敏副教授担任主审。

在本书的编写过程中，山东科技大学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，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编 者
2017.7

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,“大众创业、万众创新”,不是一朝一夕的事情,而是要求学生把每一个实验项目当成一个课题进行设计、一个大赛的题目来做。这样通过实验不但可以巩固课堂知识,理论联系实际,而且能使学生提高实验技能、动手操作能力及创新能力。

(2) 实验前要复习课程有关内容,认真预习实验教程的相关内容,明确实验目的,掌握实验原理及测试方法,了解实验步骤,完成指导书中提出的各项要求,否则不允许进入实验室做实验。

(3) 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。

(4) 实验中遇到问题时,要结合课本与实验教程的相关内容认真思考,要多动脑、多动手,培养独立工作和分析问题与解决问题的能力。

(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。

2. 认真完成实验报告

(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) 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。

(3) 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。

(4) 要求学生独立完成报告,不准照抄,否则不得分。

(5) 实验报告要按时交给指导教师批阅、评分。

目 录

前言
实验须知

第 I 部分 流体静力学综合实验

实验 1 流体静力学综合实验	2
1.1 实验目的	2
1.2 实验原理	2
1.3 实验内容与方法	4
1.4 实验报告	5
实验 2 流体静力学设计与分析实验	10
2.1 设计性实验实验目的	10
2.2 生活中的应用实例分析	10

第 II 部分 流体动力学实验

实验 3 雷诺实验	13
3.1 实验目的	13
3.2 实验原理	13
3.3 实验步骤	15
3.4 实验注意事项	16
3.5 实验报告内容	16
实验 4 沿程阻力系数测定实验	19
4.1 实验目的	19
4.2 实验原理	19
4.3 实验步骤	21
4.4 实验数据及整理	21
4.5 实验注意事项	22
4.6 实验报告内容	22
实验 5 局部阻力系数的测定实验	25
5.1 实验目的	25
5.2 实验原理及实验装置	25
5.3 实验操作	28
5.4 实验报告内容	29

实验 6 伯努利 (Bernoulli) 方程实验	34
6.1 实验目的	34
6.2 实验原理	34
6.3 实验步骤	35
6.4 实验报告内容	36

第 III 部分 流体运动基本原理等实验

实验 7 流动现象分析综合实验	41
7.1 实验目的	41
7.2 实验装置与工作原理	41
7.3 实验说明	42
7.4 实验报告内容	47
实验 8 流量计综合测定实验	50
8.1 实验目的	50
8.2 文丘里流量计实验原理	50
8.3 孔板流量计的原理	52
8.4 实验步骤	53
8.5 实验报告内容	54
实验 9 皮托管测速实验	58
9.1 实验目的	58
9.2 实验原理	58
9.3 实验步骤	59
9.4 皮托管测速的特点	59
9.5 实验报告内容	60

参考文献	63
------	----

第 I 部分 流体静力学综合实验

流体静力学是研究流体处于静止状态时受力平衡规律及其在工程实际中的应用。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. 综合实验装置简图

本实验的装置如图 I-1 所示。

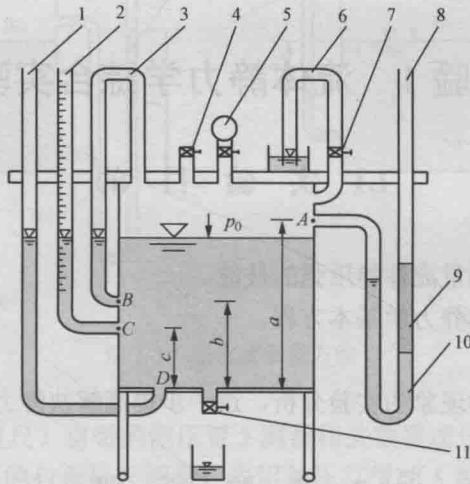


图 I-1 流体静力学综合实验装置

- 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

2. 装置说明

(1) 测压管：流体静压强的测量。

- 1) 流体流动的要素有压强、水位、流速、流量等。测量的仪器也有静态与动态之分。
- 2) 测量流体某一点压强的测压管属于机械式静态测量仪器。
- 3) 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。
- 4) 直管型测压管如图 I-1 中的管 2 所示，其测点压强 $p = \rho gh$ ，其中， h 为测压管液面至测点的竖直高度。U 形管见图 I-1 中的管 1 与管 8。
- 5) 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“-”。

6) 由于毛细管的影响, 测压管内径应大于 $8\sim 10\text{mm}$ 。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 8mm , 毛细高度仅为 1mm 左右。

(2) 连通管: 恒定液位测量方法之一。

1) 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 I-1 中的 3 所示。

2) 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 。

实验 1 流体静力学综合实验

1.1 实验目的

- (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 实验原理

1.2.1 在重力作用下不可压缩流体静力学基本方程

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

$$\text{或} \quad p = p_0 + \rho gh \quad (1-1)$$

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, 10^{-2}m 。

1.2.2 拓展实验

1. 油密度 ρ_o 测量原理 (公式要会推导)

对装有水和油 (见图 1-1) 的 U 形测压管, 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

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

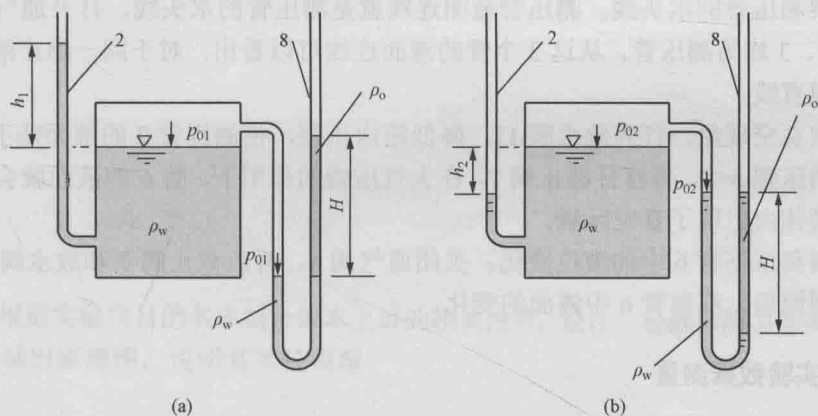


图 1-1 油密度测量方法

可用仪器 (不用另外直尺) 自带的测压管 2 测量相关数据通过计算得 ρ_o 。

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 中的水面与油、油交界面齐平, 如图 1-1 (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 1-1 (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), 得

$$\frac{\rho_o}{\rho_w} = \frac{h_1}{h_1 + h_2} \quad (1-5)$$

2. 测量测压管 6 插入小水箱中液面以下的深度

这个项目要求根据流体静水力学相关知识, 由实验装置上的测压管来完成实验, 不能用外部的尺子来进行测量, 分析说明实验测量原理。

1.3 实验内容与方法

1.3.1 实验项目分析

(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) 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。

(5) 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。

1.3.2 实验数据测量

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 。

1.3.3 实验操作步骤

(1) 设置 $p_0=0$ 条件: 打开通气阀 4, 此时实验装置內 $p_0=0$, 记录一组实验数据, 填入表 1-1。

(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, 可对实验装置內加压, 形成正压, 记录三组实验数据, 填入表 1-1。(注意: 加压时不应该使测压管內的液体溢出测压管)

(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, 可对装置內部减压, 形成真空, 读出三组实验数据, 填入表 1-1。(注意: 从容器底部阀门放出的水要从容器的注水口重新加到容器內)

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

1.3.3 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。本仪器中所有阀门旋柄均以顺着管轴线为开，垂直管轴线为关。
- (2) 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。

1.4 实验报告

1.4.1 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，设计一台流体静力学实验装置来达到实验目的，画出原理图，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。

1.4.2 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, 画图表示, 并得出其计算式。

(5) 测出真空测压管 6 插入小水箱液面以下的深度 (画图分析说明)。

$\nabla h_6 =$ _____ 10^{-2}m

分析:

表 1-1 流体静压强测量记录及计算表 10^{-2}m

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

注 表中基准面选在_____， $z_C =$ _____ 10^{-2}m ， $z_D =$ _____ 10^{-2}m

表 1-2 油密度测量记录及计算表 10^{-2}m

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

1.4.3 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? 测压管能测量何种压强?

测压管位置	测压管液面高度 h (mm)	水箱液面高度 H (mm)	相对压强 p_r (Pa)	绝对压强 p_a (Pa)	真空度 p_v (Pa)	管径 d (mm)	管长 L (mm)
1	100	100	0	101325	0	10	100
2	100	100	0	101325	0	10	100
3	100	100	0	101325	0	10	100
4	100	100	0	101325	0	10	100
5	100	100	0	101325	0	10	100
6	100	100	0	101325	0	10	100
7	100	100	0	101325	0	10	100
8	100	100	0	101325	0	10	100

(3) 当 $p_B < 0$ 时, 试根据记录数据确定水箱内的真空区域。

24) 实验数据记录表 (见图 1-1 装置)

测压管位置	测压管液面高度 h (mm)	水箱液面高度 H (mm)	相对压强 p_r (Pa)	绝对压强 p_a (Pa)	真空度 p_v (Pa)	管径 d (mm)	管长 L (mm)
1	100	100	0	101325	0	10	100
2	100	100	0	101325	0	10	100
3	100	100	0	101325	0	10	100
4	100	100	0	101325	0	10	100
5	100	100	0	101325	0	10	100
6	100	100	0	101325	0	10	100
7	100	100	0	101325	0	10	100
8	100	100	0	101325	0	10	100

(4) 如果测压管太细, 对测压管液面的读数将有何影响?

(5) 过图 1-1 所示装置 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?

(6) 用图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?



(7) 该仪器在加气增压后, 水箱液面将下降 δ 而测压管液面将升高 H , 实验时, 若以 $p_0=0$ 时的水箱液面作为测量基准, 试分析加气增压后, 实际压强 $(H+\delta)$ 与视在压强 H 的相对误差值。本仪器测压管内径为 0.8cm , 箱体内经为 20cm 。

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?



图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?

图 1-1 所示的装置能否演示变液位下的恒定流实验?