

# 水力学实验

## HYDRAULICS EXPERIMENT

张艳杰 李家春 主编  
田伟平 主审



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 水力学实验

张艳杰 李家春 主编  
田伟平 主审



1032582



T1032582

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书主要介绍道路与铁道工程及相关专业水力学实验原理与方法。目的是使学生掌握水力学实验的基本技能和方法,培养学生分析问题、解决问题以及理论联系实际的能力。本书内容包括水力学基本实验原理、实验设备与实验步骤、实验中的数据处理、误差分析等。

### 图书在版编目(CIP)数据

水力学实验/张艳杰,李家春主编. —北京:国防工业出版社, 2012. 10  
ISBN 978-7-118-08441-2

I. ①水... II. ①张...②李... III. ①水力实验  
IV. ①TV131

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 245326 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 203 千字

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 20.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

水力学是一门重要的技术基础课,是高等学校许多理工科专业的必修课,在水利工程、建筑工程、机械工程、环境工程、化学工程、交通运输工程等诸多工程领域有着广泛的应用。它的主要任务是使学生掌握水力学的基本概念、基本理论和解决水力学问题的基本方法,具备一定的实验技能,为学习专业课程、从事专业工作和科学研究打好基础。

水力学实验在水力学学科发展及教学工作中占有重要地位。为了适应近些年实验室建设快速发展的形势,编写出版实验教材,满足教学和学生学习的需要。

本实验教材是在多年水力学教学的基础上编写,包括 11 个实验内容。分水力学实验指导和报告集两部分。水力学实验指导主要介绍实验原理、实验设备、实验目的和要求、实验方法和步骤、实验成果要求、实验注意事项等。报告集用于学生实验数据量测、记录、数据处理和分析。

全书在拟定编写大纲以及编写过程中,曾得到长安大学田伟平教授、西安理工大学张志昌教授的关心支持,提供了许多宝贵的经验和建议,在此特表鸣谢。书中如有欠妥之处,敬请读者指正。



# 目 录

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 水力学实验要求 .....                                  | 1   |
| 第1章 水静力学基本方程实验 .....                           | 4   |
| 第2章 壁挂式自循环流动演示实验 .....                         | 8   |
| 第3章 能量方程演示实验 .....                             | 15  |
| 第4章 能量方程应用实验 .....                             | 19  |
| 第5章 雷诺实验 .....                                 | 29  |
| 第6章 管道沿程阻力系数测定 .....                           | 34  |
| 第7章 管道局部阻力系数测定 .....                           | 39  |
| 第8章 明渠水跃实验 .....                               | 44  |
| 第9章 明渠水面曲线演示实验 .....                           | 49  |
| 第10章 堰流实验 .....                                | 57  |
| 第11章 小桥、涵洞水流实验 .....                           | 63  |
| 附录1 水流参数的测量 .....                              | 66  |
| 附录2 误差分析 .....                                 | 72  |
| 附录3 实验数据处理 .....                               | 77  |
| 附录4 水的运动黏滞系数 $\nu(\text{cm}^2/\text{s})$ ..... | 83  |
| 报告集 .....                                      | 85  |
| 参考文献 .....                                     | 137 |

# 水力学实验要求

## 0.1 水力学教学实验要求

《水力学》是重要的专业技术基础课程,在交通土建、市政工程、水利、环境保护、机械制造、石油工业、金属冶炼、化学工业等方面都有广泛的应用。在以上专业的本科生教学中都开设了《水力学》课程,不同专业对课程学习内容和学时安排略有不同。

《水力学》属于物理学中力学的一个分支。它的任务是以水为模型研究液体平衡与运动规律,侧重于演绎推导及原理方法的学习和应用。《水力学》的研究方法包括理论分析,实验验证与补充,以及利用现代化的电子技术快速求解等。从《水力学》学科发展来看,由于它是一门技术科学,实验方法是促进其发展的重要手段。

近年来,随着现代实验技术的迅猛发展,促进了现代水力学的蓬勃发展。因而,《水力学实验》成为《水力学》课程中一个不可缺少的重要教学环节。在《水力学》教学中,要重视实验环节,不断加强教学实验的内容与深度,创造条件使学生逐步学会独立操作实验和分析实验成果,培养学生的动手能力和进行科学实验研究的初步能力。

水力学实验应满足以下教学要求:

- (1) 观察水流现象,增强感性认识,提高理论分析的能力。
- (2) 验证水力学原理,测定实验系数值,巩固理论知识的学习。
- (3) 学会量测水力要素和使用基本水力仪器的方法,掌握一定的实验技能,了解现代量测技术。
- (4) 培养分析实验数据,整理实验成果,编写实验报告的能力。

## 0.2 水力学教学实验内容

为保证《水力学》教学实验的进行,满足教学实验的要求,可以采取三个层次的教学实验。

### 1. 基本教学实验

按《水力学》课程的基本要求,结合讲课进度或单独开设实验课来安排实验内容。《水力学》演示实验与量测实验课时一般占课程总学时数的 10% ~ 15%。

实验内容包括以下两个部分。

#### 1) 基础水力学部分

包括物理性质实验、静水压强、流线与迹线、总流三大方程、流动型态、沿程与局部阻力系数、水击现象、孔口、管嘴出流等实验内容。其中可选取沿程阻力系数和局部阻力系数测定作为量测实验项目,让学生分组独立进行实验和数据处理。

## 2) 专门水力学部分

该部分实验因专业的不同而不同。例如：对于水工建筑专业，实验内容包括明渠水流量测、闸孔出流、实用堰及宽顶堰溢流、消能方式、明渠流速分布及达西渗透实验、闸基渗透实验等。道路与铁道工程专业，实验内容包括堰流实验、水跃实验、明渠水面线实验以及小桥涵水力实验等。根据专业特点选择一个或几个作为量测实验，锻炼学生的动手能力和独立进行实验的能力。也可以将明渠闸堰流动与水跃实验作为综合实验项目。

## 2. 选修实验

挑选学有余力的学生参加水力学科技兴趣小组。在教师指导下，开展参考书、专业文献的阅读和讨论，并组织學生进行选修实验，使之了解一些现代量测技术，提高其实验技能。实验内容与教学内容紧密联系，使之通过实验加深与巩固课堂教学的理论知识，培养学生具有初步进行科学实验的能力。

## 3. 科研专题性实验

利用一定时间组织学生参加生产任务研究与科研专题中的水力学实验研究工作。研究任务大致包括：

(1) 生产性与科研基金性专题实验研究，应用常规仪器或现代量测技术，在教师指导下进行实验量测与成果分析。

(2) 新仪器、新技术开发研究实验，如对激光测速仪、波高仪、热膜测速仪等的开发研究。

(3) 为改进、扩充教学实验项目所作的研究，如新安装仪器设备的率定实验、实验数据微机处理程序的研发等。

# 0.3 水力学实验室基本要求

完成水力学教学实验任务，提高学生的实验技能，必须具有一定的物质条件和实验人员。

水力学实验室需要拥有足够的实验面积、场地和设备。每项实验设备应该有足够的套数，满足分组实验的要求。每套设备应具备较高的精度，使能获得准确的实验结果。同时，实验室应配备相应的人力，包括教师、实验技术人员与技工。

# 0.4 水力学实验室主要设备

(1) 教学实验设备与仪器。一般情况下，每种演示实验设备可设1套~2套；每种定量量测实验设备应设4套~6套，以便40人左右的小班能分成8个小组，分别作两种实验。每小组4人~5人，便于人人动手作实验。如条件允许，重点实验设备套数还可增加，小组人数还可减少。

如果水力学实验是单独设课，由于可同时进行几种不同实验，则同一种实验的设备套数可减少。

(2) 水流循环系统。为实验设备提供恒定水头条件下的水源,以便获得稳定的实验条件与可靠的实验数据。一般为节省水源,多设计成水流循环系统,包括蓄水池或水箱、水泵、平水箱、供水管路、回水渠管等。多用自来水。

(3) 量测仪器及率定设备。量测水力要素如水位、流速、压强与流量的仪器,应视需要决定购置套数。自制的或购置的仪器设备在使用前或使用一段时间后,均需进行率定以校验其精度。必要的现代量测仪器、计算机等,需设专用仪器间存放、维护及使用。

(4) 必要的维修与加工机具与设备。

(5) 小型仓库以存放实验器材和旧设备等。

# 第1章 水静力学基本方程实验

## 1.1 实验目的

- (1) 加深理解重力作用下水静力学基本方程的物理意义和几何意义。
- (2) 学习使用测压管测量静水压强的方法。
- (3) 观察在重力作用下静止液体中任意点的位置水头 $z$ 、压强水头 $p/\gamma$ 和测压管水头 $z+p/\gamma$ ,验证不可压缩静止液体水静力学的基本方程。
- (4) 巩固绝对压强、相对压强和真空的概念。
- (5) 学习测量液体容重的方法。

## 1.2 实验要求

- (1) 观察在重力作用下,静止液体中任意两点的位置高度(水头) $z$ 、压强 $p/\gamma$ 和测压管水头 $z+p/\gamma$ ,验证水静力学基本方程。
- (2) 量测当 $p_0 = p_a$ 、 $p_0 > p_a$ 、 $p_0 < p_a$ 时静水中某一点的压强,分析各测压管水头的变化规律,加深对绝对压强、相对压强、表面压强、真空压强的理解。
- (3) 测量其他液体的容重(设水的容重为已知)。

## 1.3 实验原理

水静力学讨论静水压强的特性、分布规律及如何根据静水压强的分布规律来确定静水总压力等问题。

### 1. 静水压强的特性

流体静止时不承受切应力,一旦受到切应力就产生变形,这就是流体的定义。从这个定义出发,可以认为在静止的液体内部,所有的应力都是正交应力。因此,静水压强具有两个特性。

- (1) 静水压强的方向与受压面垂直并指向受压面。
- (2) 任一点静水压强的大小和受压面的方向无关,或者说作用于同一点上的各方向的静水压强大小相等。

### 2. 静水压强的基本方程

在重力作用下,处于静止状态不可压缩的均质液体,其基本方程为

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} = \cdots = C \quad (1-1)$$

式中:  $z$  为单位重量液体相对于基准面的位置高度,或称位置水头;  $p/\gamma$  为单位重量液体的压能,或称压强水头;  $p$  为静止液体中任意点的压强;  $\gamma$  为液体的容重;  $z + p/\gamma$  称为测压管水头。

式(1-1)的物理意义:静止液体中任意一点的单位位能和单位压能之和是一个常数。几何意义:静止液体中在任意一点的位置高度  $z$  与压强高度  $p/\gamma$  之和为一常数,即测压管水头相平。

静水压强的基本方程也可以写为

$$p = p_0 + \gamma h \quad (1-2)$$

式中:  $p_0$  为作用在液体表面的压强;  $h$  为由液面到液体中任一点的深度。

式(1-2)说明,在静止液体中,任一点的静水压强  $p$ ,等于表面压强  $p_0$  加上该点在液面下的深度  $h$  与液体容重  $\gamma$  的乘积。表面压强遵守巴斯加原理,等值地传递到液体内部所有各点上,所以当表面压强  $p_0$  一定时,由式(1-2)可知,静止液体中某一点的静水压强  $p$  与该点在液面下的深度  $h$  成正比。

如果作用在液面上的表面压强是大气压强  $p_a$  时,则式(1-2)可写为

$$p = p_a + \gamma h \quad (1-3)$$

式(1-3)说明,当作用在液面上的压强为大气压强时,其静水压强等于大气压强  $p_a$  与液体容重  $\gamma$ 、水深  $h$  乘积之和。这样所表示的一点压强叫做绝对压强(当液面上压强不等于大气压强时以  $p_0$  表示)。绝对压强是以没有气体存在的绝对真空为零来计算的压强。如果以当地大气压强为零来计算的压强称为相对压强,可以表示为

$$p = \gamma h \quad (1-4)$$

相对压强也叫表压强,所以表压强是以大气压强为基准算起的压强,它表示一点的静水压强超过大气压强的数值。

如果某点的静水压强小于大气压强,就说“这点具有真空”。其真空压强  $p_v$  的大小以大气压强和绝对压强之差来量度,即

$$p_v = \text{大气压强} - \text{绝对压强} \quad (1-5)$$

当某点发生真空时,其相对压强必然为负,故把真空又称为负压,真空度也就等于相对压强的绝对值。

## 1.4 实验设备和仪器

静水压强实验仪由盛水密闭圆筒容器、连通管、测压管、U形管、气门、调压筒和底座组成,如图1-1所示。U形管中可以装入不同种类的液体,以测定不同种类液体的容重。

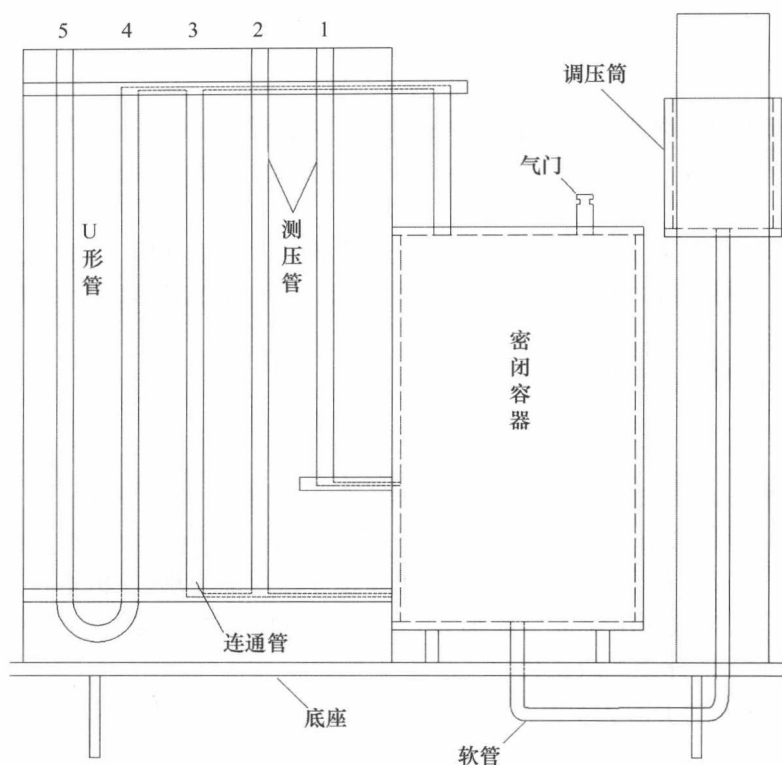


图 1-1 静水压强实验仪

## 1.5 实验步骤

- (1) 在 U 形管中装入需要量测容重的液体,可以是油或者是其它液体。
- (2) 了解仪器组成及其用法,包括加压方法、减压方法。检查仪器是否密封,检查的方法是关闭气门,在调压筒中盛以一定深度的水,将调压筒上升高于密闭圆筒容器,待水面稳定后,看调压筒中的水面是否下降,若下降,表明漏气,应查明原因加以处理。
- (3) 记录仪器编号及各测压管编号,选定基准面,记录基准面到各测压点的高度。
- (4) 打开密闭圆筒容器上的气门,使箱内液面压强  $p_0 = p_a$ ,记录 1、2、3、4、5 点测压管水面高度,找出等压面。
- (5) 关闭气门,升高调压筒,使箱内液面压强  $p_0 > p_a$ ,待水面稳定后,观测 1、2、3、4、5 点测压管水面高度。
- (6) 降低调压筒,使箱内液面压强  $p_0 < p_a$ ,待水面稳定后,观测 1、2、3、4、5 点测压管水面高度。
- (7) 实验完后将仪器恢复原状。

## 1.6 数据处理和成果分析

实验设备名称: \_\_\_\_\_ 仪器编号: \_\_\_\_\_  
 同组学生姓名: \_\_\_\_\_

已知数据: $z_1 =$             cm            ;             $z_2 = z_3 =$             cm。

(1) 实验数据记录及计算成果。

| 项 目                                                                                  | $\frac{p_1}{\gamma}$<br>/cm | $\frac{p_2}{\gamma}$<br>/cm | $\frac{p_3}{\gamma}$<br>/cm | $\frac{p_4}{\gamma}$<br>/cm | $\frac{p_5}{\gamma}$<br>/cm | $\Delta h_1$<br>/cm | $\Delta h_2$<br>/cm | $\frac{p_0}{\gamma}$<br>/cm | $z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$<br>/cm | $z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$<br>/cm | $\gamma_{\text{油}}$<br>/( kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| $p_0 = p_a$                                                                          |                             |                             |                             |                             |                             |                     |                     |                             |                                   |                                   |                                               |
| $p_0 > p_a$                                                                          |                             |                             |                             |                             |                             |                     |                     |                             |                                   |                                   |                                               |
|                                                                                      |                             |                             |                             |                             |                             |                     |                     |                             |                                   |                                   |                                               |
| $p_0 < p_a$                                                                          |                             |                             |                             |                             |                             |                     |                     |                             |                                   |                                   |                                               |
|                                                                                      |                             |                             |                             |                             |                             |                     |                     |                             |                                   |                                   |                                               |
| 指导教师签名:                                                                              |                             |                             |                             |                             |                             | 实验日期:               |                     |                             |                                   |                                   |                                               |
| 注: $\Delta h_1 = \frac{p_2 - p_3}{\gamma}$ ; $\Delta h_2 = \frac{p_5 - p_4}{\gamma}$ |                             |                             |                             |                             |                             |                     |                     |                             |                                   |                                   |                                               |

(2) 由表中计算的  $z_1 + \frac{p_1}{\gamma}$  和  $z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$ , 验证静水压强方程。

(3) 由表中的  $\frac{p_0}{\gamma}$  计算圆筒容器内水的表面压强, 即  $p_0 = \gamma \times \frac{p_0}{\gamma}$ 。

(4) 计算当  $p_0 > p_a$  时 1#和 2#测点的绝对压强和  $p_0 < p_a$  时容器内的真空度。

(5) 计算 U 形管中油的容重  $\gamma_{\text{油}}$ 。

设在  $p_0 > p_a$  时, 2#测压管和 3#测压管的水面差为  $\Delta h_1$ , U 形测压管的水面差为  $\Delta h_2$ , 则

$$p_0 = \gamma \Delta h_1 = \gamma_{\text{油}} \Delta h_2$$

由上式可得

$$\gamma_{\text{油}} = \gamma \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}$$

## 1.7 注意事项

容器的密闭性能要保持良好状态, 实验时仪器底座要水平。

## 1.8 思考题

- (1) 表面压强  $p_0$  的改变, 对 1、2 两点的压强水头有什么影响, 对真空度有什么影响?
- (2) 相对压强与绝对压强、相对压强与真空度有什么关系?
- (3) U 形管中的压差  $\Delta h$  与液面压强  $p_0$  的变化有什么关系?
- (4) 如果在 U 形管中装上与密闭容器相同的水, 则当调压筒升高或降低时, U 形管中  $\Delta h_2$  的变化与  $\Delta h_1$  的变化是否相同?

## 第2章 壁挂式自循环流动演示实验

### 2.1 实验目的和要求

- (1) 观察液体流动的迹线和流线(恒定流)。
- (2) 观察液体沿不同形状的物体表面绕流的各种水流现象。

### 2.2 仪器简介和工作原理

壁挂式自循环流动演示仪由彩色有机玻璃面罩、不同边界的流动显示面、加水孔孔盖、掺气量调节阀、蓄水箱、晶闸管无极调速旋钮、水泵室、日光灯、铝合金框架后盖和回水道组成,如图2-1所示。

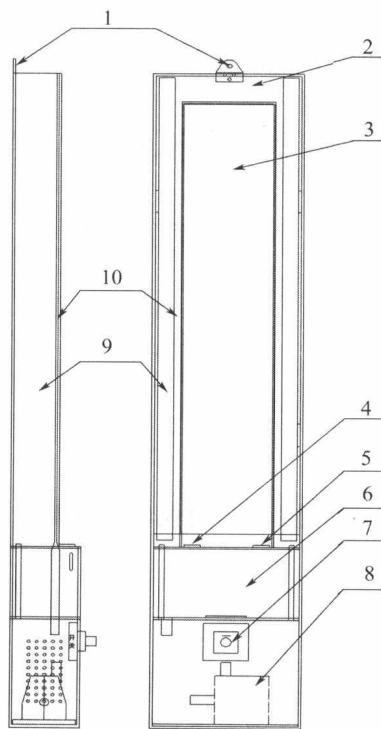


图2-1 壁挂式自循环流动演示仪结构示意图

- 1—挂孔; 2—彩色有机玻璃罩; 3—流动显示面; 4—加水孔孔盖; 5—掺气量调节阀;  
6—蓄水箱; 7—晶闸管无极调速旋钮; 8—水泵; 9—灯管; 10—回水道。

该仪器以气泡为示踪介质,狭缝流道中设有特定的边界流场,用以显示不同边界条件下的内流,外流,射流元件等多种流动图谱。由图 2-1 可以看出,当工作液体(水)由水泵驱动到流动显示面,通过两边的回水流道流入蓄水箱时,水流中掺入了空气。空气的多少可以由掺气量调节阀调节。掺气后的水流再经水泵驱动到流动显示面时,形成了无数的小气泡随水流流动,在仪器内的日光灯照射和显示面底板的衬托下,小气泡发出明亮的折射光,清楚的显示出各种不同流场水流流动的图像。由于流动显示面设计成多种不同的形状边界,流动图像可以形象地显示出不同边界包括分离、尾流、漩涡等多种流动形态及其水流内部质点运动的特性。整个仪器由 7 个单元组成,每个单元都是一套独立的装置,可以单独使用,也可以同时使用,如图 2-2 所示。

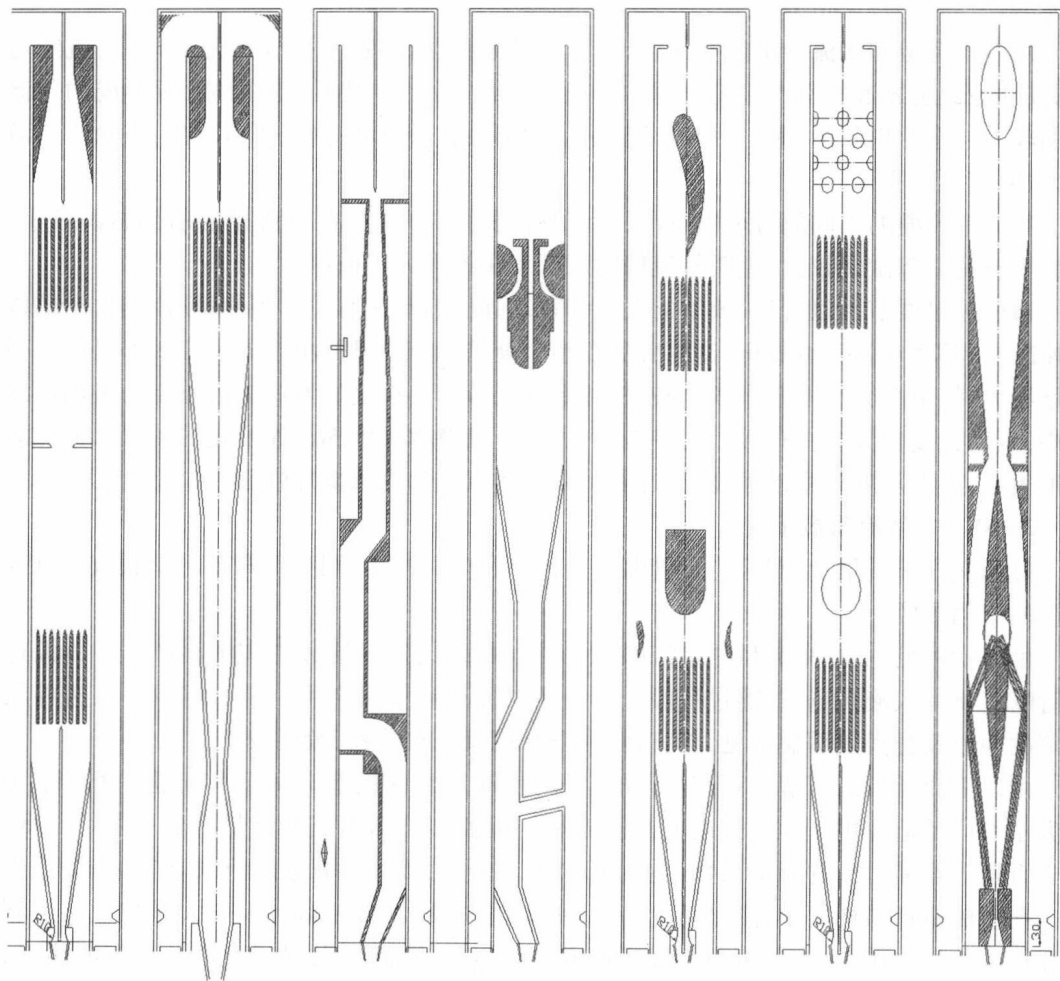


图 2-2 流动演示仪过流道示意图

## 2.3 实验指导

### 1. SL-1 型流动显示仪

用以显示逐渐扩散、逐渐收缩、水流通过孔板时的流态、壁面冲击、直角弯道、整流栅

的不同放置等平面上的流动现象,模拟串联管道纵剖面流谱。

在逐渐扩散段可以看到由边界层分离而形成的漩涡,在靠近上游喉颈处,流速越大,漩涡尺度越小,紊动强度越高;而在逐渐收缩段,水流无分离,流线均匀收缩,无漩涡,由此可知,逐渐扩散段局部水头损失大于逐渐收缩段。所以在工程设计中,一般取逐渐收缩的喇叭型取水口,这是因为喇叭型取水口更符合流线形的要求,水头损失小。

在孔板前,流线逐渐收缩,汇集于孔板的过流孔口处,孔板后的水流并不是马上扩散,而是继续收缩至一最小断面,称为收缩断面。在收缩断面以前,只在拐角处和收缩断面后的出口附近有小漩涡出现。在收缩断面后,水流才开始扩散。扩散后的水流犹如突然扩大一样,在主流区周围形成强烈的漩涡回流区。由此可知,孔板流量计有较大的水头损失。

在直角弯道和水流冲击的壁面段,也有多处漩涡区出现,尤其在弯道流动中,流线弯曲更加剧烈,越靠近弯道内侧流速越小。在靠近内壁处,出现明显的回流,所形成的回流范围较大。将此现象与 SL-2 型流动显示仪的圆角转弯流动对比,可以看出,直角弯道漩涡大,回流更加明显。

对比整流栅的不同放置可以看出,不管整流栅怎样放置,在整流栅的前部漩涡较小,在整流栅的后部漩涡较大,说明整流栅的后部水头损失大于前部。

通过流量调节可以看出,漩涡的大小和紊动强度与流速有关。当流量减小时,渐扩段流速减小,其紊动强度也减小,这时看到在整个渐扩段有明显的单个大尺度漩涡;反之,当流量增大时,单个大尺度漩涡随之破碎,并形成无数个小尺度的漩涡,流速越高,漩涡尺度越小,紊动强度越大。在孔板后的突扩段,也可看到漩涡尺度随流速变化的情况。据此清楚地表明:漩涡尺度随紊动强度增大而变小,水质点间的内摩擦加强,水头损失增大。

## 2. SL-2 型流动显示仪

显示文丘里流量计、圆弧进口管嘴流量计以及壁面冲击、圆弧形弯道等串联流道纵剖面上的流动图像。

由显示可见,文丘里流量计过流顺畅,流线顺直,无边界层分离和漩涡产生。圆弧进口管嘴流量计入流顺畅,管嘴过流段上无边界层分离和漩涡产生;在圆形弯道路段,边界层分离的现象及分离点明显可见,与直角弯道比较,流线较顺畅,漩涡较小。

由以上流动可以了解三种流量计的结构、优缺点及其用途。文丘里流量计由于水头损失小而广泛地应用于工业管道上测量流量。圆弧型管嘴出流的流量系数(约为 0.98)大于直角形管嘴出流的流量系数(约为 0.82),说明圆弧型管嘴进口流线顺畅,水头损失小。孔板流量计结构简单,测量精度高,但水头损失很大,做流量计损失大是缺点。但利用孔板消能又是优点,例如黄河小浪底水电站,在有压隧洞中设置了五道孔板式消能工,其消能机理就是利用了孔板水头损失大的原理,使泄洪的余能在隧洞中消耗,从而解决了泄洪洞口缺乏消能条件的工程问题。

## 3. SL-3 型流动显示仪

显示 30°弯头、直角圆弧弯头、直角弯头、45°弯头、闸阀、蝶阀以及非自由射流等流段纵剖面上的流动图像。

由显示可见,在每一转弯的后面,都因为边界条件的改变而产生边界层的分离,从而

产生了漩涡。转弯角度不同,漩涡大小、形状各异,水头损失也不一样。在圆弧转弯段,由于受离心力的影响,凹面离心力较大,流线较顺畅,凸面流线脱离边壁形成回流。该流动还显示了局部水头损失叠加影响的图谱。

闸阀半开时,尾部漩涡区较大,水头损失也较大。蝶阀全开时,过流顺畅,阻力小;半开时,在蝶阀的尾部产生尾涡区,水流剧烈的紊动,表明蝶阀半开时阻力大且易引起振动。蝶阀通常作检修用,故只允许全开或全关。

在非自由射流段,射流离开喷口后,不断卷吸周围的液体,形成射流的紊动扩散。和自由射流不同的是,非自由射流离开喷口后在出口形成两个较大的漩涡,产生强烈的紊动,使射流向外扩散。在漩涡的两侧由于边壁的影响,可以看到射流的“附壁效应”现象。此“附壁效应”对壁面的稳定性有着重要的作用。若把喷口后的中间导流杆当作天然河道里的一侧河岸,则由水流的附壁效应可以看出,主流沿河岸高速流动,该河岸受到水流的严重冲刷;而在主流的外侧,水流产生高速回旋,使另一侧河岸也受到局部淘刷;在喷口附近的回流死角处,因为流速小,紊动强度小,则可能出现泥沙的淤积。

另外从弯道水流观察分析可知,在急变流段测压管水头不按静水压强的规律分布,其原因:①离心惯性力的作用;②流速分布不均匀(外侧大,内侧小并产生回流)等原因所致。

#### 4. SL-4 型流动显示仪

显示转弯、分流、合流、45°弯头、YF 溢流阀等流段纵剖面上的流动图谱。其中 YF 溢流阀固定,为全开状态。

由显示可见,在转弯、分流、合流等过流段上,有不同形态的漩涡出现。合流漩涡较为典型,明显干扰主流,使主流受阻。

YF 溢流阀是压力控制元件,广泛用于液压传动系统。其主要作用是防止液压系统过载,保护泵和油路系统的安全,以及保持油路系统的压力恒定。

YF 溢流阀的流动介质通常是油,本装置流动介质是水。该装置能十分清晰地显示阀门前后的流动形态:高速流体经过阀口出口后,在阀芯的大反弧段发生边界层的分离,出现一圈漩涡带;在射流与阀芯的出口处,也产生较大的漩涡环带。在阀后,尾迹区大而复杂,并有随机的卡门涡街产生。经阀芯流出的流体也在尾部区产生不规则的左右扰动,调节过流量,漩涡的形态仍然不变。

该阀门在工作中,由于漩涡带的存在,必然会产生较激烈的振动,尤其是阀芯反弧段上的漩涡带,影响更大。由于高速紊动流体的随机脉动,必然要引起漩涡区真空度的脉动,这一脉动压力直接作用在阀芯上,引起阀芯的振动,而阀芯的振动又作用于流体的脉动和漩涡区的压力脉动,因而引起阀芯更激烈的振动。显然这是一个很重要的振源,而且这一漩涡带还可能引起阀芯的空蚀破坏。

#### 5. SL-5 型流动显示仪

显示明渠逐渐扩散、桥墩型柱体绕流、机翼体绕流、直角弯道和正、反机翼体绕流等流段上的流动图谱。

桥墩形柱体绕流。该绕流体为圆头方尾的钝形体,水流脱离桥墩后,在桥墩的后部形成尾流漩涡区,在尾流区两侧产生旋向相反且不断交替的漩涡,即卡门涡街。与 SL-6 型

圆柱绕流体不同的是,圆柱绕流体的涡街频率 $f$ 在雷诺数 $Re$ 不变时它也不变;而非圆柱绕流体则不同,涡街的频率具有明显的随机性,即使 $Re$ 不变频率 $f$ 也随机变化。

绕流体后的卡门涡街会引起绕流体的振动,绕流体的振动问题有可能引起建筑物的破坏,该问题是工程上极为关心的问题。解决绕流体振动问题的主要措施有:改变水流的速度;或者改变绕流体的自振频率;或者改变绕流体的结构形式,以破坏涡街的固定频率,避免共振。

机翼绕流。当水流通过机翼时,在机翼的凸面,流线较顺畅;在机翼的凹面,主流与壁面之间形成一回流区。在机翼的尾部发生边界层的分离,形成尾流区。对比正放、反放机翼绕流体的流动可见,当绕流体倒置时,在其尾部同样会出现卡门涡街。

## 6. SL-6 型流动显示仪

显示明渠逐渐扩散、单圆柱绕流、多圆柱绕流及直角弯道等流段的流动图像。圆柱绕流是该型演示仪的特征流谱。

在该流动装置上可以清楚地显示流体在驻点的停滞现象、边界层分离状况、卡门涡街的产生与发展过程以及多圆柱绕流时的流体混合、扩散、组合漩涡等流谱。

(1) 驻点。观察流经圆柱前端驻点处的小气泡,可以看出,流动在驻点上明显停滞,可见驻点处的流速等于零,在此处,动能完全转换为压能。

(2) 边界层分离。水流在驻点受阻后,被迫向两边流动,此时水流的流速逐渐增大,压强逐渐减小,当水流流经圆柱的轴线时,流速达到最大,压强达到最小;当水流继续向下游流动时,在靠近圆柱体尾部的边界上,水流开始与圆柱体分离,称为边界层的分离。边界层分离后,在分离区的下游形成回流区,称为尾涡区。尾涡区的长度和紊动强度与来流的雷诺数有关,雷诺数越大,紊动越强烈。

边界层分离常伴随着漩涡的产生,引起较大的能量损失,增加液流的阻力。边界层分离后还会产生局部低压,以至于有可能出现空化和空蚀破坏现象。因此边界层分离是一个很重要的现象。

(3) 卡门涡街。边界层分离以后,如果雷诺数增加到某一数值,就不断交替的在两侧产生漩涡并流向下游,形成尾流中的两条涡列,一列中某一漩涡的中心恰好对着另外一列中两个漩涡之间的中点,尾流中这样的两列漩涡称作“涡街”,也叫冯卡门(Von karman)“涡街”。漩涡的能量由于流体的黏性而逐渐消耗掉,因此在柱体后面一个相当长距离以后,漩涡就逐渐衰减而终于消失了。

对卡门涡街的研究,在工程中有着重要的意义。卡门涡街可以使柱体产生一定频率的横向振动。若该频率接近柱体的自振频率,就可能产生共振。例如在大风中电线发出的响声就是由于振动频率接近电线的自振频率,产生共振现象而发出的。潜艇在行进中,潜望镜会发生振动;高层建筑(高烟囱等)、悬索桥等在大风中会发生振动,其根源概出于卡门涡街。为此在设计中应该考虑这种现象的破坏性,采取措施加以消除或减小。

卡门涡街的频率与管流的过流量有关。可以利用卡门涡街频率与流量之间的关系,制成涡街流量计。其方法是在管路中安装一漩涡发生器和检测元件,通过检测漩涡的信号频率,根据频率和流量的关系就可测出管道的流量。

(4) 多圆柱绕流。被广泛用于热工传热系统的“冷凝器”及其它工业管道的热交换器等。流体流经圆柱时,边界层内的流体和柱体发生热交换,柱体后的漩涡则起混掺作