



同济大学本科教材出版基金资助



流体力学和水力学实验

(第二版)

俞永辉 赵红晓 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济大学本科教材出版基金资助

流体力学和水力学实验

(第二版)

俞永辉 赵红晓 编著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是为“流体力学与流体机械”“流体力学”和“水力学”的课程实验编著的教材,分绪论和实验内容两大部分。实验内容中有 15 项演示性实验项目和 10 项可操作性实验项目。实验项目中流体介质主要为液体和少量的气体。主要实验内容是流体静力学实验、伯努利方程实验、动量方程实验、流动阻力(沿程和局部)实验、孔口与管嘴实验、明渠堰流实验、达西渗流实验、空气动力学实验、离心式水泵和风机性能曲线实验,以及机翼的性能曲线实验等。

本书适用于高等院校的环境工程、给排水、机械、建筑环境与设备、土木工程、工程力学、飞行器制造等理工科专业的师生,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学和水力学实验/俞永辉,赵红晓编著. —2 版.

—上海:同济大学出版社,2017. 7

ISBN 978-7-5608-7165-3

I. ①流… II. ①俞…②赵… III. ①流体力学—实验—高等学校—教材②水力实验—高等学校—教材
IV. ①O35-33②TV131-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 163452 号

流体力学和水力学实验(第二版)

俞永辉 赵红晓 编著

责任编辑 马继兰 责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65085622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 江苏句容排印厂
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 8.25
字 数 206 000
版 次 2017 年 7 月第 2 版 2017 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-7165-3



定 价 25.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

本书根据高等学校工科基础课程“流体力学与流体机械”“流体力学”和“水力学”教学大纲中对实验的要求而编写的。全书共分绪论和实验内容两部分,可作为高等学校环境工程、给水与排水、土木工程、建筑环境与设备、交通工程、力学等专业“流体力学与流体机械”“流体力学”和“水力学”课程的实验教材。

本书是“流体力学与流体机械”“流体力学”和“水力学”课程的配套教材,通过实验来揭示和演示流体运动的基本规律,学生在学习“流体力学和水力学实验”课程时,对加深“流体力学与流体机械”“流体力学”和“水力学”课程中基本概念的理解具有很大的帮助。

2012年,流体力学实验室从实验环境到实验设备都做了很大的改善和升级,本书是在2003年3月第一版《流体力学和水力学实验》基础上做了较大幅度的修改,所列的实验内容是同济大学各多学时和少学时专业“流体力学与流体机械”“流体力学”和“水力学”课程中所开设的实验内容,共25个实验,其中,10个实验要求学生自己动手进行操作,15个实验则为演示内容,每个实验基本包含:实验目的、实验基本原理、实验装置、实验步骤及思考题。对于少学时专业可根据不同专业的要求进行选做。书中所介绍的实验用仪器是同济大学力学中心实验室目前所拥有的。

本书中所涉及的名词、术语和符号,原则上以国家标准为依据。鉴于目前国内《流体力学与流体机械》《流体力学》和《水力学》教材中所用符号存在较大差异,为此对其中的名词、术语和符号都进行注解说明。

参加本书编写的人员有俞永辉[第1章、第2章中的(实验1—实验5,实验7—实验8,实验10—实验12,实验14—实验25)],赵红晓(第2章中的实验6,实验9,实验13及书中的部分插图)。

全书由朱立明和柯葵审阅。由于编者水平有限,书中缺陷和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2017年6月于同济大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
第 2 章 实验内容	8
实验 1 静水压强实验	8
实验 2 流谱流线演示实验	12
实验 3 液体相对平衡实验	15
实验 4 毕托管测速与修正因数标定实验	18
实验 5 能量方程(伯努利方程)实验	23
实验 6 文丘里实验	29
实验 7 动量方程实验	37
实验 8 流态演示实验	38
实验 9 雷诺演示实验	43
实验 10 紊动机理演示实验	47
实验 11 沿程阻力实验	50
实验 12 局部水头损失实验	55
实验 13 孔口与管嘴出流实验	60
实验 14 水击演示实验	65
实验 15 空化机理实验	68
实验 16 水面曲线演示实验	73
实验 17 堰流实验	76
实验 18 达西渗流实验	83
实验 19 离心泵性能及串并联运行实验	88
实验 20 离心式风机性能实验	94
实验 21 矩形弯管内的流动实验	99
实验 22 平板附面层实验	102
实验 23 流体横向绕流圆柱体实验	108
实验 24 紊流射流实验	112
实验 25 机翼的空气动力特性曲线实验	117

第1章 绪 论

一、实验的意义和目的

流体力学和水力学实验是“流体力学和水力学”课程的组成部分之一。流体力学和水力学问题是错综复杂的,它的复杂性在于影响它的因素很多。由于人们对流体运动规律认识的局限性,因此有很多问题,不只是由理论分析所能解决的。在某些场合,实验成为解决问题的主要途径。有不少流体运动规律和公式都是通过实验而总结出来的。在工程中,利用模型实验研究流体运动现象、修改设计方案也是非常普遍的。因此,流体力学和水力学实验,无论对从事理论研究或对解决工程实际问题,都具有极其重要的意义。

流体力学和水力学教学实验课的目的主要有以下几个方面:

- (1) 观察流动现象,扩大感性认识,提高理论分析的能力。
- (2) 验证流体力学和水力学的原理,测定经验系数值,以巩固所学的理论知识。
- (3) 学会使用实验室的基本量测仪器,掌握一定的实验技能。
- (4) 培养分析实验数据、整理实验成果及编写实验报告的能力。
- (5) 培养严谨踏实的科学作风。

二、实验须知

1. 实验前认真进行预习

预习时应仔细阅读实验指导书及有关的教材资料,明确实验的目的要求和有关的实验原理,了解操作步骤以及相关的仪器设备,做到心中有数,平列出实验需要的表格。

2. 严肃认真地进行实验

进入实验室后必须保持安静,不得谈笑喧哗,不准吸烟,不准乱动与本实验无关的设备。在实验时,应按指导书的要求,全神贯注地按步骤进行实验操作,注意多观察水流现象,多思考分析问题,及时记录实验原始数据。

3. 保持良好的科学作风

实验时应尊重原始数据,不得任意更改实验数据。实验后,应进行必要的检查和补充,经教师同意后,方可离开实验室。完成实验后,应及时整理实验数据,绘制所要求的关系曲线,认真编写实验报告。

4. 遵守规章制度

在进行实验时,必须遵守实验室各项规章制度,严格遵守操作规程,如发生事故或损坏设备,应立即报告教师,查清责任,按学校有关规定处理。

三、实验报告要求

(1) 实验报告一般应包括以下内容:

实验的目的和要求;实验设备简图;水流现象描述及实验原始记录;实验成果的整理计算和按要求绘制关系曲线图;分析讨论回答思考题并提出结论和问题。

(2) 按上述内容要求认真编写实验报告。实验指导书上所写的原理,仪器设备说明及注意事项不必重新抄写。

(3) 实验报告必须自己独立完成,并按时上交。报告书应按书中实验报告要求书写。

(4) 实验报告经教师批改后,应认真阅读及时改正。不合格的需要重写实验报告或重做实验。

四、实验室总体简介

实验室是教学和科研的重要基地。本实验室除了拥有满足教学和科研的整套仪器外,还有一套基本设备,主要是一供水系统,这套供水系统是由水池、水泵、水塔和有关的附属设备构成。

本实验室供水系统采用循环水系,即水由水泵自室外水池中抽取,送至水塔,然后由水塔中的输出管分送到各个仪器以供实验,经过各个实验仪器流出之水,则由室内地下回水沟排入水池,构成水流不断循环的系统。因此,在一般实验过程中,并不损失水量,而仅是电能的消耗。

五、基本要素的量测简介

1. 水位的量测

(1) 可采用水位测针仪,测针杆能上下移动,此方法简洁明了。

(2) 除使用超声波水位仪外,还可以用电测法来测量水位,常用的有电阻式水位仪、电容式水位仪以及数字编码自动跟踪水位仪,等等。

2. 压强的量测

(1) 金属压力表:金属压力表是量测较大的压强。压力表所测压强为相对压强,又称表压。另有一种金属真空表,所测数值为真空度。

(2) 测压管:测压管是用来测量对应点上的压强水头。测压管一般多用玻璃管,管内充满已知容重的液体。

(3) 比压计:比压计是用来测量两个不同点的压强水头差值的。若两点的高程不同,该差值就是两点的测压管水头差值,如将高程减去,即为两点的压强差值。常用比压计有水比压计和水银比压计等。

(4) 压力变送器:压力变送器是利用半导体扩散硅压力传感器及专用放大线路组成,具有精度高、电路调试方便、可靠性高、抗干扰能力强等特点。适用于各种非腐蚀性流体的压力测量和控制,量程范围宽。

3. 流速的量测

(1) 毕托管:毕托管是实验室最常用的测速设备,它由测压管(静压管)和测速管(动压管)两部分组成。测速时,将毕托管置于被测流体的相应点,动压孔对准来流方向,根据 $v = K\sqrt{2g\Delta h}$ 就能通过比压计上的差值 Δh 而计算出该点的流速。 K 为毕托管修正系数,可由实验确定。

毕托管不能自动调整方向,量测时需使毕托管的方向与水流方向一致,此时读数最大,否则测得的数值就不正确。毕托管使用前应将其放入静水闸,观察其两个管子内液面是否处于同一水平面,以鉴别毕托管内是否有气泡,如有积气,应设法将其排走。使用时也需注意勿使毕托管露出水面,以免漏进空气。当被测介质为气体时,可直接与微压计连接测读。

毕托管不宜量测过小流速,当流速小于 10 cm/s 时,测量结果误差较大。另外,毕托管量测的流速是时间平均值,仪器本身对流场有一定干扰。

(2) 微型旋桨式流速仪:微型旋桨式流速仪主要用于测量明渠水流等的流速,是目前国内外实验室常用的量测仪器。它是由旋桨传感器、计数器及有关配套仪表组成。使用时,将旋桨传感器固定于被测点,使旋桨正对流动方向,由于流速作用使旋桨转动,流速越大,转动越快。由于流速与旋桨的转速呈线性关系,可根据转速计算出流速。

实验室除上述两种测量仪器外,目前还有较为先进的测试手段,如激光测速仪、热线流速仪和超声波流速仪等。

4. 流量的量测

(1) 体积法:用体积法测流量时,以停表计时间,以量筒或水箱测出相应时间内液体

的体积。体积法一般用于量测较小的流量。

(2) 重量法:重量法测流量与体积法基本一致,所得结果为重量流量。

(3) 堰板法:堰板法测流量,简便易行,精度也较高,目前被广泛用于实验研究中。堰板法也可分为三角堰、矩形堰和梯形堰,适用于不同流量范围。

(4) 文丘里管法:文丘里管是有压管道上量测流量的一种仪器,它是由圆锥形收缩段、圆柱形喉管和圆锥形扩散段三部分结合比压计而组成的。由于喉管断面收缩,断面流速加大,动能变大,势能变小,喉管断面的测压管水头和收缩段进口断面的测压管水头就有一差值 Δh ,由能量方程和连续性原理,可推导出文丘里管的流量公式:

$$Q = \frac{\pi}{4} \frac{D^2 d^2}{\sqrt{D^4 - d^4}} \sqrt{2g\Delta h} \quad (1)$$

式中 D ——管道直径;

d ——喉管直径。

与文丘里管相类似的测流量仪器还有孔板流量计和喷嘴流量计。这两种流量计的工作原理与文丘里管相同。

5. 电磁流量计

LD-F 型电磁流量变送器是根据法拉第电磁感应原理制成的,它与 LDZ-3 型或 LDZ-1A 型电磁流量转换器配套组成电磁流量计,用来测量各种导电液体或液固两相介质的体积流量。

LD-F 型电磁流量计工作原理:

LD-F 型电磁流量变送器是根据法拉第电磁感应原理工作的,如图 1 所示。

当导电液体沿测量管在交变磁场中作与磁力线垂直方向运动时,导电液体切割磁力线而产生感应电势。在与测量管轴线和磁场磁力线相互垂直的管壁上安装了一对检测电极,把这个感应电势检出,若感应电势为 E ,则有:

$$E = K_0 B \bar{V} D \quad (2)$$

式中 B ——磁感应强度($T = Wb/m^2$);

D ——电极间的距离,近似与测量管内径相等(m);

$\bar{V}$ ——测量管内被测流体在横截面上的平均流速(m/s);

K_0 ——与磁场分布及轴向长度有关的系数。

瞬时流量 $Q(m^3/h)$ 与流速 $\bar{V}$ 的关系为

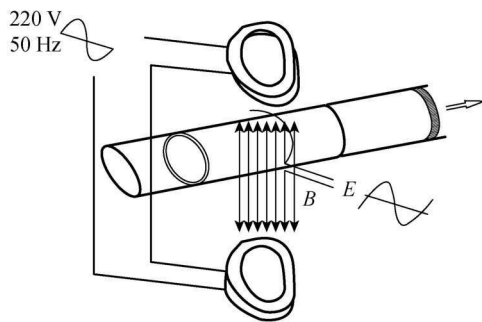


图 1 电磁流量计原理图

$$Q = 3\,600 \bar{V}A = 3\,600 \frac{E}{BDK_{\sigma}} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \frac{900\pi D}{BK_{\sigma}} \cdot E = K \cdot E \quad (3)$$

式中 A ——测量管横截面；

K ——仪表常数。

6. 超声波流量计(有压流)

超声波流量计根据测量原理的不同,大致可分为以下几类:

- (1) 传播速度法(时差法、相位差法和频差法)。
- (2) 多普勒法。
- (3) 相关法。
- (4) 波速偏移法。

但是目前最常用的测量方法主要有两类:时差法和多普勒法。

力学实验中心有用于测量管道流的 TDS-100 超声波流量计(采用时差法,测量纯净单一液体)和 LDZ-1J 多普勒流量计(采用多普勒法,测量混合液体)两种流量计。

1) 时差法工作原理

时差法是通过测量超声波脉冲顺流传播和逆流传播的时间差进行流量测定的方法,其基本原理如图 2 所示。

在被测流体介质中存在两个超声波发射器 T_1 和 T_2 ,一个是顺流发射超声波,另一个是逆流发射超声波,在超声波发射器与换能器相同距离处,分别装有两个接收换能器 R_1 和 R_2 ,这两组发射器与换能器组成了两个通道。当被测介质处于静止状态时,两个通道中的超声波速度是相同的,两个接收换能器接收到的声信号没有任何差别。但是当流体流动的时候,情况就发生了变化:在顺流通道 $T_1 \rightarrow R_1$ 中,由于叠加了流体的速度,超声波在声道上的顺流声速为

$$C_{TR1} = c + u$$

同样,在逆流通道上 $T_2 \rightarrow R_2$ 中,逆流声速为

$$C_{TR2} = c - u$$

式中 c ——声波在静止流体中的声速;

u ——被测流体的流速。

两个接收换能器接收到的信号之间就产生了与流速有关的差别。假定声道(即发射换能器与接收换能器之间的实际距离)长度为 L ,则超声波的顺、逆流传播时间分别为

$$t_{TR1} = \frac{L}{c + u} \quad (4a)$$

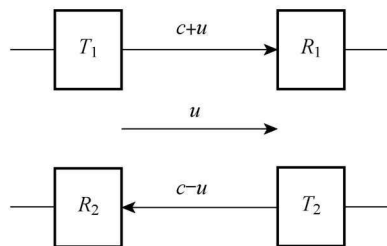


图2 时差法测速示意图

$$t_{\text{TR2}} = \frac{L}{c - u} \quad (4b)$$

将式(4a)和式(4b)联立求解,得:

$$u = \frac{L}{2} \cdot \frac{\Delta t}{t_{\text{TR1}} \cdot t_{\text{TR2}}} \quad (5)$$

由式(5)可以看出当声道长度固定时,流体的流速与声波在顺、逆流声道中传播的时间差 Δt 成正比,而与顺、逆流传播时间的乘积 $t_{\text{TR1}} \cdot t_{\text{TR2}}$ 成反比。如果我们能够测得声波在顺流、逆流声道中的传播时间,根据式(5)就可以求出当前流体沿声道的平均流速。再根据流速与体积流量之间的关系式(6),就可以得到体积流量:

$$Q = k \frac{\pi D^2}{4} u \quad (6)$$

式中 Q ——体积流量(m^3/s);

k ——流速修正系数;

D ——管道内径(m);

u ——沿声道上的流速(m/s)。

2) 多普勒法工作原理

多普勒法是一种利用声学多普勒效应进行流量测量的方法。它要求被测介质当中含有一定量的悬浮颗粒或气泡。多普勒效应指:假定声源、观察者(超声换能器)与介质之间是相对运动的,在这种情况下观察到的超声频率与声源的发射频率有所不同的声学现象。根据这一效应,当向流体中的悬浮粒子发射频率为 f_{T} 的连续超声波时,假设被悬浮粒子所反射的超声波的频率为 f_{R} , f_{T} 与 f_{R} 将服从多普勒关系。假设粒子的移动速度为 u , 超声束与粒子移动速度方向间的夹角为 θ , 则 $u \cos \theta$ 可以看作是声源的移动速度,如图3所示。这时多普勒关系可以写成下面公式:

$$f_{\text{R}} = \frac{c + u \cos \theta}{c - u \cos \theta} \cdot f_{\text{T}} \quad (7)$$

$$\text{近似可得: } f_{\text{R}} = \left(1 + \frac{2u \cos \theta}{c}\right) f_{\text{T}} \quad (8)$$

所以多普勒频移 $\Delta f = f_{\text{R}} - f_{\text{T}}$ 和流速 u 之间的关系为

$$\Delta f = f_{\text{R}} - f_{\text{T}} = f_{\text{T}} \cdot \frac{2u \cos \theta}{c} \quad (9)$$

即

$$u = \frac{c}{2 \cos \theta} \cdot \frac{\Delta f}{f_{\text{T}}} \quad (10)$$

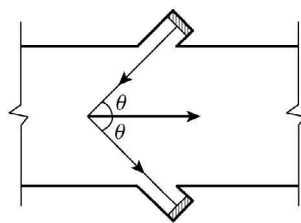


图3 超声波多普勒效应

在这里,流速 u 与多普勒频移成正比。

体积流量:

$$Q = k \frac{\pi D^2}{4} u = k \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{c}{2 \cos \theta} \cdot \frac{\Delta f}{f_T} \quad (11)$$

即体积流量也与多普勒频移 Δf 成正比关系。

注: 在上面的推导中,假定被测流体中悬浮粒子的运动速度和流体的流速相同。

第2章 实验内容

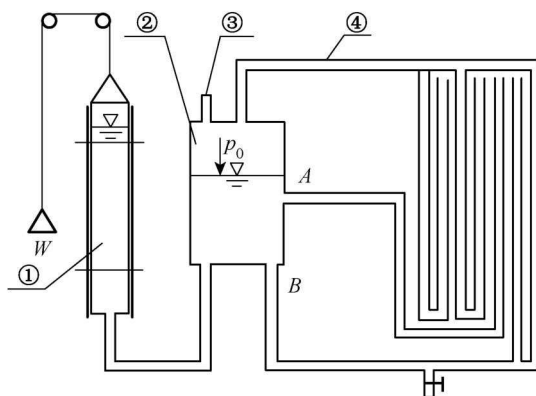
实验1 静水压强实验

一、实验目的

- (1) 测定静止液体内部各点的静水压强,加深对静压公式 $p = p_0 + \gamma h$ 的理解。
- (2) 测定有色液体的重度。通过该实验加深理解位置水头、压力水头及测压管水头的基本概念,观察静水中任意两点测压管的水头 $z + \frac{p}{\gamma} = \text{常数}$ 。

二、实验装置

实验装置如图1所示。



①—水位调节管(通过该管的升降,调节密闭容器中的压力);②—密闭容器;
③—气阀;④—测压管系统(由密闭容器自左向右顺序编号①—④)

图1 静水压力实验装置图

三、实验基本原理

根据静水力学基本方程式:

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

式中 p ——静水压强;

p_0 ——表面压强;

γ ——水的容重, $\gamma_{\text{水}} = 9.8(\text{kN}/\text{m}^3)$;

h ——计算点在自由表面以下的垂直深度。

由此可知,在静止液体内部某一点的静水压强等于表面压强加上液体重度乘该点在自由表面下的垂直深度。

四、实验步骤

- (1) 读取 A 点、B 点的标高读数 ∇_A , ∇_B 。
- (2) 打开容器上的气阀,此时容器内水面上的压力 $p_0 = p_a$ (大气压)。
- (3) 关闭气阀,上升水位调节管,使容器内水面升高(此时密闭容器内水的表面压强 $p_0 > p_a$)。读各测压管中的水位标高 $\nabla_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 记入表中。
- (4) 在保持 $p_0 > p_a$ 的条件下,改变容器中水位,重复进行三次。
- (5) 打开气阀,使容器内水面上升并达到平衡,然后关闭气阀,下降水位调节管(此时 $p_0 < p_a$)。
- (6) 在 $p_0 < p_a$ 的条件下,改变容器中的水位,重复进行三次。

五、实验注意事项

- (1) 读取测压管标高时,视线必须和液面同在一个水平面上,避免发生误差。
- (2) 读取测压管水位时,应在水位稳定情况下进行(一般在移动水位调节管后 1 分钟左右)。
- (3) 如发现测压管中水位不断改变,说明容器或测压管漏气,此时应采取止漏措施。
- (4) 移动水位调节管时,应一手持重锤 W,一手拿水位管 $\hookrightarrow$,徐徐移动,注意勿使重锤碰碎玻璃管。
- (5) 根据各测压管的水面读数,求出各测压管水位差,然后计算出各点压强。

六、实验成果及要求

1. 记录有关常数(表 1)

$\nabla_A = \text{_____} \times 10^{-2} \text{m}; \nabla_B = \text{_____} \times 10^{-2} \text{m}$

表 1 记录表格

实验次数		测压管水位读/($\times 10^{-2} \text{m}$)						
		∇_1	∇_2	∇_3	∇_4	∇_5	∇_6	∇_7
$p_0 > p_a$	1							
	2							
	3							
$p_0 < p_a$	1							
	2							
	3							

2. 计算表格(表 2)

表 2 计算表格

计算项目			p_0 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	p_A /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	p_B /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	有色液体容重 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
			$\gamma(\nabla_2 - \nabla_1)$	$\gamma(\nabla_5 - \nabla_A)$	$\gamma(\nabla_6 - \nabla_B)$	$p_0/(\nabla_4 - \nabla_3)$
计算 结果	$p_0 > p_a$	1				
		2				
		3				
	$p_0 < p_a$	4				
		5				
		6				

七、思考题

- (1) 试从实验记录数据中,证明 $z + \frac{p}{\gamma} = \text{常数}$ 。
- (2) 实验数据中 $\nabla_6 - \nabla_7$, $\nabla_5 - \nabla_7$, $\nabla_2 - \nabla_1$ 这三者是否相等?是否合理?为什么?
- (3) 实验中 $\nabla_1, \dots, \nabla_7$ 水位调节管水面、密闭容器中水面,这 9 个水位之间,哪些应同高?它们间的相互关系如何?说明理由。

实验 2 流谱流线演示实验

一、实验目的

- (1) 了解电化学法流动显示方法。
- (2) 观察流体在势流状态下的流动轨迹,了解流线和迹线的定义与性质。

二、实验装置

实验装置如图 1 所示。

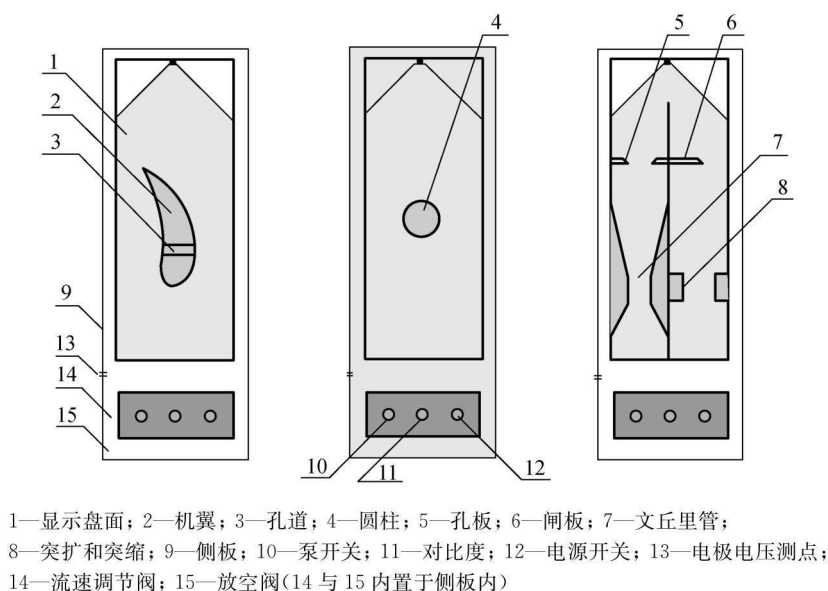


图 1 流谱流线实验装置图

三、实验原理

本装置采用电化学法电极染色显示流线技术,以平板间狭缝式流道为流动显示面。图中显示盘面 1 由两块透明有机玻璃平板粘贴而成,平板之间留有狭缝过流通道。工作液体在微型水泵驱动下,自仪器下部的蓄水箱流出,自下而上流过狭缝流道显示盘面 1,再经顶端的汇流孔流回到蓄水箱中。在显示面底部的起始段流道内设有两排等间距的