



石油高等教育“十二五”规划教材

流体力学实验教学指导书

A GUIDEBOOK TO FLUID MECHANICS EXPERIMENT

史宝成 付在国 宋建平 黄芬霞 刘 云 编著



中国石油大学出版社



石油高等教育“十二五”规划教材

流体力学实验教学指导书

史宝成 付在国 宋建平 编著
黄芬霞 刘 云

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

流体力学实验教学指导书/史宝成等编著. —东营: 中国石油大学出版社, 2011. 12

ISBN 978-7-5636-3662-4

I. ①流… II. ①史… 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(2011)第 276067 号

书 名: 流体力学实验教学指导书
作 者: 史宝成 付在国 宋建平 黄芬霞 刘 云

责任编辑: 袁超红 (电话 0532—86981532)

封面设计: 赵志勇

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

印 刷 者: 青岛锦华信包装有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社 (电话 0532—86983437, 86981532)

开 本: 180 mm×235 mm 印张: 6.5 字数: 130 千字

版 次: 2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 12.00 元

前言

PREFACE

流体力学主要研究流体的力学运动规律及其应用,许多工程专业都将流体力学课程作为人才培养的基础必修课程之一。作为一门技术科学,实验方法是促进流体力学发展的重要手段,也是检验与深化研究成果的重要方式。理论分析、实验研究和数值计算相结合,始终是流体力学的主要研究方法,它们之间是一种互相补充、互相验证,但又不能互相取代的关系。由此可知,实验环节在流体力学教学中占有非常重要的位置。

以往流体力学理论教学往往与实验环节分开进行,这种模式的欠缺之处是不利于学生的学习,学生容易对某些抽象概念和水流运动规律发生时段上的理解存在困难。另外,某些专业课程设置的实验学时相对偏少,不便使学生了解比较全面的流体力学实验知识。基于此,本学科教师在理论课程教学过程中通常会结合流体力学实验课程,合理安排理论授课与实验教学的学时分配,以营造出理论分析与实验研究有机结合的良好环境,达到培养和提高学生实际应用能力的目的。本实验指导书就是为流体力学理论课程的配套实验课程编写的。

本实验指导书分为5章,主要包括水静力学、水动力学、阻力量测、紊流等方面的实验内容,共20个实验。本书可用作石油工程、油气储运、给排水和水文专业流体力学实验课程的教材,其他相关专业亦可根据实际教学需求选用。

本实验指导书是在长江大学石油工程学院油气储运系付在国、宋建平、史宝成、黄芬霞、刘云等的协作及教研室同仁们的支持和帮助下完成的,由史宝成执笔,由宋建平高级工程师审核定稿。

书中不妥之处,恳请读者提出宝贵意见。

作者

2011年7月

目 录

CONTENTS

第一章 水静力学实验.....	1
实验一 静水压强量测实验.....	1
实验二 平面上的静水总压力实验.....	4
第二章 水动力学实验.....	9
实验三 各种边界条件流动演示实验.....	9
实验四 流谱流线演示实验	13
实验五 能量方程验证实验	15
实验六 虹吸原理实验	21
实验七 文丘里流量系数测定实验	24
实验八 离心泵性能实验	27
实验九 动量方程验证实验	31
第三章 阻力量测实验	34
实验十 管路沿程水头损失实验	34
实验十一 管路局部水头损失实验	38
第四章 紊流实验	41
实验十二 雷诺实验	41
实验十三 平板边界层实验	46
实验十四 紊流射流实验	52

实验十五 圆柱状物体绕流阻力实验	55
实验十六 弯道压强分布量测实验	61
第五章 其他实验	65
实验十七 孔口与管嘴流量系数验证实验	65
实验十八 水击现象演示实验	68
实验十九 电拟渗流模型实验	71
实验二十 明渠非均匀流水面曲线实验	77
附录 I 实验数据分析处理	82
附录 II 实验报告及要求	93
附录 III 常用单位换算	96
参考文献	98

第一章 水静力学实验

实验一 静水压强量测实验 (Experiment of Hydrostatic Pressure Test)

一、实验目的与要求

1. 掌握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. 测定某种未知液体的重度；
4. 掌握 U 形管和连通管的测压原理,学习运用等压面概念分析问题。

二、实验装置

静水压强量测实验装置如图 1-1 所示。

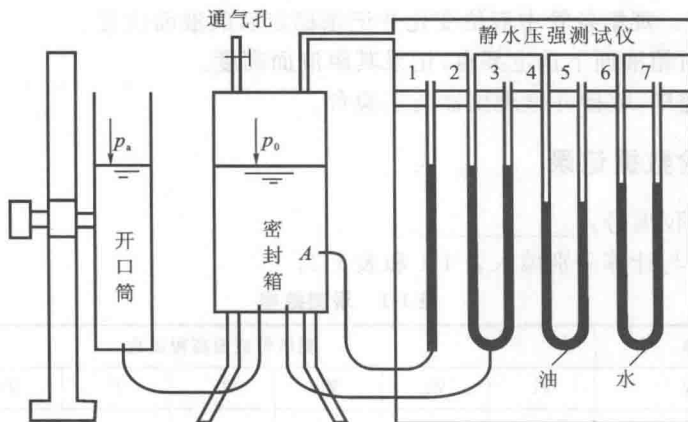


图 1-1 静水压强量测实验装置示意图

三、实验原理

若密封箱与大气相通,则密封箱中表面压强 p_0 等于大气压强 p_a ,开口筒水面与

密封箱水面应齐平,连通管水面亦应齐平。关闭通气孔后,密封箱中空气的体积减小而压强增大,待稳定后,开口筒与密封箱两液面的高差即为压强差 $p_0 - p_a = \gamma h$ (γ 为重度),这个水柱高度 h 也等于液面高程差 $\nabla_1 - \nabla_2$ 及 $\nabla_3 - \nabla_2$,而 U 形管两液面的压强差应等于 $p_0 - p_a$ 。密封箱中空气的体积增大而压强减小,此时 $p_0 < p_a$,待稳定后,其压强差称为真空压强,以水柱高度表示即为真空度:

$$\frac{p_a - p_0}{\gamma} = \nabla_2 - \nabla_1 = \nabla_2 - \nabla_3$$

按照以上原理,可以求得密封箱液体中任一点 A 的绝对压强 p'_A 。设点 A 在密封箱水面以下的深度为 h_{0A} ,在 1 号管和 3 号管水面以下的深度为 h_{1A} 和 h_{3A} ,则:

$$p'_A = p_0 + \gamma h_{0A} = p_a + \gamma(\nabla_1 - \nabla_2) + \gamma h_{0A} = p_a + \gamma h_{1A} = p_a + \gamma h_{3A}$$

由于连通管和 U 形管反映同一压差,故有:

$$p_0 - p_a = \gamma(\nabla_3 - \nabla_2) = \gamma'(\nabla_5 - \nabla_4) = \gamma(\nabla_7 - \nabla_6)$$

由此可以求得另一种液体的重度 γ' :

$$\gamma' = \gamma \frac{\nabla_3 - \nabla_2}{\nabla_5 - \nabla_4} = \gamma \frac{\nabla_7 - \nabla_6}{\nabla_5 - \nabla_4}$$

四、实验步骤

1. 熟悉实验仪器,打开通气孔,使密封箱与大气相通。
2. 关闭通气孔,将开口筒向上提升到一定高度。水由开口筒流向密封箱,并影响其他测压管。观察各管中液位变化并记录稳定后的液面位置。
3. 将开口筒向下降到一定高度,使其水面低于密封箱中的水面,则密封箱中的水流向开口筒。观察各管中液位变化并记录稳定后的液面位置。
4. 在密封箱液面下选定某点,记录其距液面高度。
5. 实验完毕,收拾并整理仪器与实验台。

五、实验数据记录

静水压强仪编号:_____。

实验数据与计算分别填入表 1-1 和表 1-2。

表 1-1 观测数据

名 称		测压管液面高程读数						
液面高程		∇_1	∇_2	∇_3	∇_4	∇_5	∇_6	∇_7
单 位		cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
$p_0 > p_a$	测次 1							
	测次 2							
$p_0 < p_a$	测次 1							
	测次 2							

表 1-2 实验数据计算

算序	项 目	$p_0 > p_a$		$p_0 < p_a$	
		测次 1	测次 2	测次 1	测次 2
1	$\nabla_1 - \nabla_2 = \nabla_3 - \nabla_2 = \nabla_7 - \nabla_6$				
2	$p_0 = p_a + \gamma(\nabla_7 - \nabla_6)$				
3	$p_A = \gamma[(\nabla_1 - \nabla_2) + h_{0A}]$				
4	$p'_A = p_a + p_A$				
5	$p_0 - p_a = \gamma(\nabla_7 - \nabla_6) = \gamma'(\nabla_5 - \nabla_4)$				
6	γ'				

注：设点 A 在密封箱水面以下的深度 $h_{0A} =$ _____ cm。

六、注意事项

1. 首先检查密封箱是否漏气(检查方法请自己考虑)。
2. 开口筒向上提升时不宜过高,在升降开口筒后一定要拧紧左边的固定螺丝,以免开口筒向下滑动。

七、思考题

1. 第 1,2,3 号管和 4,6 号管可否取等压面? 为什么?
2. 第 1,4,6 号管和 1,3 号管中的液面是不是等压面? 为什么?

实验二 平面上的静水总压力实验 (Experiment of Total Hydrostatic Pressure on Plane)

一、实验目的与要求

1. 测定矩形平面上的静水总压力；
2. 验证静水总压理论。

二、实验装置

静水总压力实验装置如图 2-1 所示。一个扇形体连接在杠杆上,再以支点连接的方式放置在容器顶部。杠杆上还装有平衡锤和天平盘,用于调节杠杆的平衡及测量。容器中放水后,扇形体浸没在水中,由于支点位于扇形体圆弧面的中心线上,故除了矩形端面上的静水压力之外,其他各侧面上的静水压力对支点的力矩都为零。利用天平测出力矩,可推算出矩形面上的静水总压力。

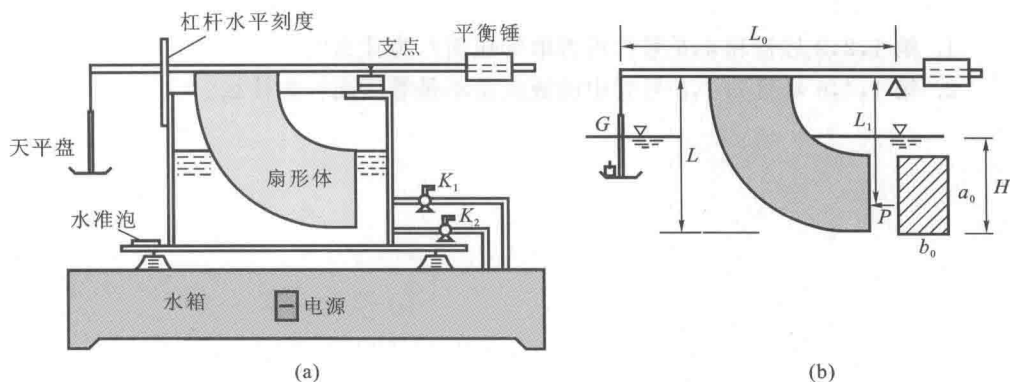


图 2-1 静水总压力实验装置示意图

三、实验原理

已知静止液体中的压强分布后,求解物体表面 A 上的矢量积分 $-\int_A p \mathbf{n} dA$ 可得到总压力。完整的总压力求解包括大小、方向和作用点。

1. 图 2-2 所示为一种比较简单的情况,是平行力系的合成,即:

$$-\int_A p \mathbf{n} dA = -\mathbf{n} \int_A p dA$$

作用力垂直于作用面,绕轴翻转后作用力方向垂直纸面向外。

(1) 分布是不均匀的,沿铅垂方向呈线性分布,其平均值为作用面(平面图形)形心处的压强。总压力的大小等于作用面形心 C 处的压强 p_c 乘作用面的面积 A ,即:

$$\int_A p dA = p_c A$$

(2) 如果平面上作用均匀分布力,其合力的作用点将是作用面的形心,而静压强分布是不均匀的,浸没在液面下越深处压强越大,所以总压力作用点 D 位于作用面形心以下。

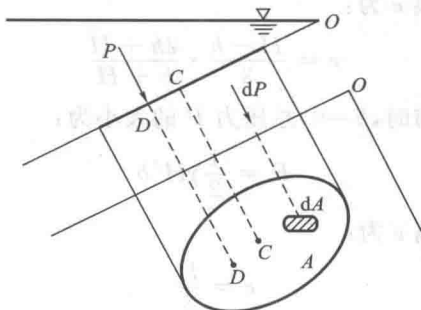


图 2-2 静水中平面压心与形心示意图

2. 图 2-3 所示为一种更加简单的情况,只要画出压强分布图就可以求出总压力的大小和作用点。单位厚度作用面上的总压力大小等于压强分布图的面积,总压力的作用线过压强分布图的形心。

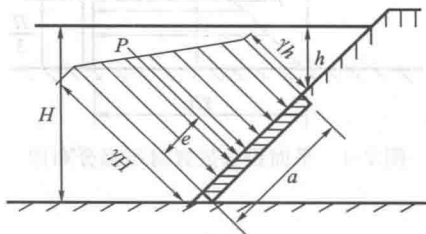


图 2-3 平面上静水压强分布示意图

如果压强为梯形分布,则总压力 P 的大小为:

$$P = \frac{1}{2} \gamma (h + H) ab$$

合力作用点距底部的距离 e 为:

$$e = \frac{a}{3} \cdot \frac{2h + H}{h + H}$$

上述两式中, γ 为液体的重度; h, H 分别为梯形压强分布图上、下底的压强水头; a, b 分别为作用面的长度和宽度。

如果压强为三角形分布,则 $h=0$,总压力 P 的大小为:

$$P = \frac{1}{2} \gamma H a b$$

合力作用点距底部的距离 e 为:

$$e = \frac{a}{3}$$

3. 如图 2-4 所示,若作用面铅垂放置,则 $a = H - h$,于是总压力 P 的大小为:

$$P = \frac{1}{2} \gamma (H^2 - h^2) b$$

合力作用点距底部的距离 e 为:

$$e = \frac{H-h}{3} \cdot \frac{2h+H}{h+H}$$

当压强为三角形分布时, $h=0$,总压力 P 的大小为:

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 b$$

合力作用点距底部的距离 e 为:

$$e = \frac{H}{3}$$

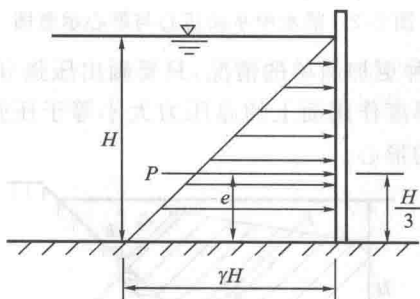


图 2-4 平面铅垂放置时压强分布图

四、实验步骤

1. 熟悉仪器,记录有关常数。
2. 调节底脚螺丝,使水准泡居中。
3. 调节平衡锤,使杠杆处于水平状态,此时扇形体的矩形端面处于铅垂位置。
4. 打开进水阀门 K_1 ,将水放入水箱,待水流上升到一定高度后关闭 K_1 。
5. 在天平盘上添加砝码,使杠杆恢复到水平状态。如不行,则加水或放水至平衡为止。
6. 测记砝码质量,记录水位刻度数。
7. 根据公式计算受力面积、静水总压力作用点至底部距离以及作用点至支点垂直距离。

8. 根据力矩平衡公式计算静水总压力。

9. 重复步骤 4~8, 水位读数在 100 mm 以下, 三角形压强分布测量 4 次, 梯形压强分布测量 4 次。

五、实验数据记录

仪器编号: _____;

相关参数: $\gamma = 9.8 \times 10^{-3} \text{ N/cm}^3$;

天平臂距离 $L_0 =$ _____ cm;

扇形体宽 $b_0 =$ _____ cm;

扇形体垂直距离(扇形半径) $L =$ _____ cm;

矩形端面高 $a_0 =$ _____ cm。

实测数据与计算分别填入表 2-1 和表 2-2。

表 2-1 测量数据记录

压强分布形式	测次	水位读数 H/cm	水位读数 h/cm	砝码质量 m/g
三角形分布	1			
	2			
	3			
	4			
梯形分布	1			
	2			
	3			
	4			

注: 若 $H < a_0$, 则 $h = 0$; 若 $H \geq a_0$, 则 $h = H - a_0$ 。

表 2-2 实验数据计算

压强分布形式	测次	作用点至底部距离 e/cm	作用点至支点垂直距离 L_1/cm	实测力矩 $M_0/(\text{N} \cdot \text{cm})$	实测静总压 $P_{\text{实}}/\text{N}$	理论静总压 $P_{\text{理}}/\text{N}$	相对值 $P_{\text{实}}/P_{\text{理}}$
三角形分布	1						
	2						
	3						
	4						
梯形分布	1						
	2						
	3						
	4						

注: $e = \frac{H-h}{3} \cdot \frac{2h+H}{h+H}$; $L_1 = L - e$; $M_0 = mgL_0$; $P_{\text{实}} = \frac{M_0}{L_1}$; $P_{\text{理}} = \frac{\gamma}{2} (H^2 - h^2) b_0$ 。

六、注意事项

1. 砝码质量要读准。
2. 加水或放水时要仔细观察杠杆所处状态。
3. 砝码每套专用,不能混用。

七、思考题

1. 作用在液面下平面图形上绝对压强的压力中心和相对压强的压力中心,哪个在液面下更深处?为什么?
2. 分析产生测量误差的原因,并指出在实验仪器的设计、制作和使用中哪些问题是关键的。

实验名称	实验目的	实验原理	实验步骤	实验数据
液体静力学实验	验证帕斯卡原理	帕斯卡原理:在密闭液体中,任一点所受的压力,能等值地传递到液体中各个方向。	1. 将液体注入连通器。 2. 观察液面高度。 3. 记录数据。	实验数据表
液体静力学实验	验证阿基米德原理	阿基米德原理:浸在液体中的物体受到向上的浮力,浮力的大小等于它排开的液体所受的重力。	1. 称量物体重量。 2. 将物体浸入液体。 3. 称量物体重量。 4. 记录数据。	实验数据表

实验名称	实验目的	实验原理	实验步骤	实验数据
液体静力学实验	验证帕斯卡原理	帕斯卡原理:在密闭液体中,任一点所受的压力,能等值地传递到液体中各个方向。	1. 将液体注入连通器。 2. 观察液面高度。 3. 记录数据。	实验数据表
液体静力学实验	验证阿基米德原理	阿基米德原理:浸在液体中的物体受到向上的浮力,浮力的大小等于它排开的液体所受的重力。	1. 称量物体重量。 2. 将物体浸入液体。 3. 称量物体重量。 4. 记录数据。	实验数据表

第二章 水动力学实验

实验三 各种边界条件流动演示实验 (Experiment of Flow Display with Various Boundary Conditions)

一、实验目的与要求

1. 观察各种边界条件下的流动形态；
2. 了解工程上易出现各种相似流动形态的情况。

二、实验装置

流动演示仪结构如图 3-1 所示。

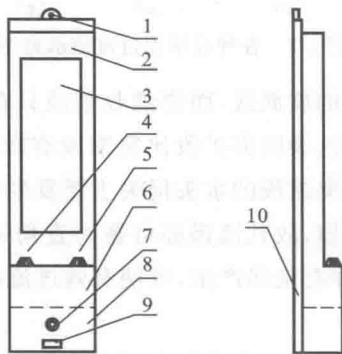


图 3-1 流动演示仪结构示意图

- 1—挂孔；2—彩色有机玻璃面罩；3—不同边界条件的流动显示面；4—加水孔孔盖；
5—掺气量调节阀；6—蓄水箱；7—可控硅无级调速旋钮；8—电器、水泵室；
9—标牌；10—铝合金框架后盖

三、实验原理

1. ZL-1 型(图 3-2a)。用以显示逐渐扩散、逐渐收缩、突然扩大、突然收缩、壁面

冲击、直角弯道等平面上的流动图像,模拟串联管道纵剖面流谱。

在逐渐扩散段,可看到由边界层分离而形成的旋涡,且靠近上游喉颈处,流速越大,涡旋尺度越小,紊动强度越高;在逐渐收缩段,无分离,流线均匀收缩,亦无旋涡。由此可知,逐渐扩散段的局部水头损失大于逐渐收缩段的。

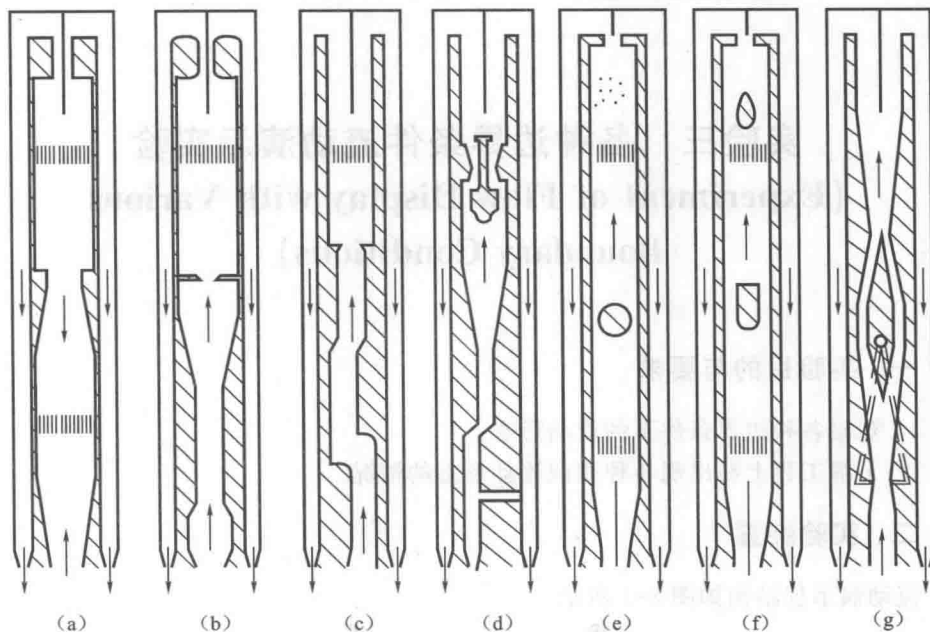


图 3-2 各种显示面过流道示意图

在突然扩大段出现较大的旋涡区,而突然收缩段只在死角处和收缩断面后的进口附近出现较小的旋涡区。这表明突扩段比突缩段有较大的局部水头损失(缩扩的直径比大于 0.7 时例外),且突缩段的水头损失主要发生在突缩断面后部。

由于实验仪器的突缩较短,故其流谱亦可视为直角进口管嘴的流动图像。在管嘴进口附近,流线明显收缩并有旋涡产生,致使有效过流断面减小,流速增大,从而在收缩面出现真空。

在直角弯道和壁面冲击段也有多处旋涡区出现。尤其是在弯道流中,流线弯曲更加剧烈,越靠近弯道内侧,流速越小。近内壁处出现明显的回流,所形成的回流范围较大,与 ZL-2 型的圆角转弯流动相比,其直角弯道旋涡大,回流更加明显。

2. ZL-2 型(图 3-2b)。用以显示文丘里流量计、孔板流量计、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,文丘里流量计的过流顺畅,流线顺直,无边界层分离和旋涡产生。在孔板前,流线逐渐收缩,汇集在孔板的孔口处,只在拐角处有小旋涡出现;孔板后的

水流逐渐扩散,并在主流区的周围形成较大的旋涡区。由此可知,孔板流量计的过流阻力较大;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旋涡产生;在圆形弯道段,边界层分离现象及分离点明显可见,与直角弯道相比,其流线较顺畅,旋涡发生点少。

3. ZL-3 型(图 3-2c)。用以显示 30° 弯头、直角圆弧弯头、直角弯头、 45° 弯头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边界层分离而产生旋涡。转弯角度不同,旋涡大小、形状各异。在圆弧转弯段,流线较顺畅。该串联管道上还显示了局部水头损失叠加影响的图谱。在非自由射流段,射流离开喷口后不断卷吸周围的流体,形成射流的紊动扩散。在此流段上,还可看到射流的“附壁效应”现象。

4. ZL-4 型(图 3-2d)。用以显示 30° 弯头、分流、合流、 45° 弯头、YF 溢流阀、闸阀及蝶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;蝶阀活动可调。

由显示可见,在转弯、分流、合流等过流段上有不同形态的旋涡出现。合流涡旋较为典型,明显干扰主流,使主流受阻。闸阀半开,尾部旋涡区较大,水头损失也大。蝶阀全开时过流顺畅,阻力小;半开时尾涡紊动激烈,表明阻力大且易引起振动。蝶阀通常用于检修,故只允许全开或全关。

5. ZL-5 型(图 3-2e)。用以显示明渠逐渐扩散、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。

6. ZL-6 型(图 3-2f)。用以显示明渠渐扩、桥墩形钝体绕流、流线体绕流、直角弯道和正反流线体绕流等流段上的流动图谱。

7. ZL-7 型(图 3-2g)。这是一只“双稳放大射流阀”流动原理显示仪。该装置既是一个射流阀,又是一个双稳射流控制元件。只要给一个小信号(气流),便能输出一个大信号(射流),并能将脉冲小信号保持记忆下来。

四、实验步骤

1. 启动。打开旋钮,关闭掺气量调节阀,在最大流速下使显示面两侧下水道充满水。

2. 掺气度调节。旋动掺气量调节阀可改变掺气度(ZL-7 型除外)。注意调节具有滞后性,应缓慢、逐次进行,以达到最佳显示效果。掺气量不宜过大,否则会阻断水流或产生振动。

3. 记录实验现象。

4. 实验结束后关闭仪器,拔掉电源插头。