



石油高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学实验

• 李成华 倪玲英 张洋洋 主编 •



中国石化大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



石油高等教育“十二五”规划教材

工程流体力学实验

Experiment of Engineering Fluid Mechanics

李成华 倪玲英 张洋洋 主编

科学出版社“十二五”规划教材

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学实验/李成华,倪玲英,张洋洋主编

—东营:中国石油大学出版社,2015.8

ISBN 978-7-5636-4924-2

I. ①工… II. ①李…②倪…③张… III. ①工程力学—流体力学—实验 IV. TB126-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 210932 号

石油高等教育教材出版基金资助出版

书 名:工程流体力学实验

作 者:李成华 倪玲英 张洋洋

责任编辑:高 颖(电话 0532—86983568)

封面设计:青岛友一广告传媒有限公司

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:shiyoudiaoyu@126.com

印 刷 者:沂南县汇丰印刷有限公司

发 行 者:中国石油大学出版社(电话 0532—86981531,86983437)

开 本:185 mm×260 mm 印张:6.75 字数:164 千字

版 次:2015 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:16.00 元

前言

Preface

工程流体力学是工科类高等院校的一门重要专业基础课程,在石油高等院校中其重要性尤为突出。它是石油工程、海洋油气工程、船舶与海洋工程、油气储运、工程力学、能源与动力工程、建筑环境与能源应用工程、土木工程、过程装备与控制工程、环保设备工程、测控技术与仪器等专业的必修课,是连接前期基础课和后续专业课的桥梁。

工程流体力学课程包括理论和实验两部分。工程流体力学实验在流体力学学科的发展及教学工作中占有重要的地位。近年来,流体力学与其他学科的结合日益密切,理论分析、实验研究和数值计算已成为流体力学的主要研究方法。它们相互补充和验证,但又不能互相取代,实验研究仍是检验与深化研究成果的重要手段。工程流体力学实验教学的目的在于:加强学生对流动现象的感性认识,验证所学理论,提高学生的理论分析能力;培养学生的基本实验技能,使学生了解现代测量技术;培养学生严谨踏实的科学作风。

本书是在中国石油大学(华东)工程流体力学课程组多年教学实践经验及原有讲义的基础上,广泛吸收国内外实验教材的优点,结合工程流体力学实验课程的具体情况以及编者自身实验工作的体会编写而成的,其内容涵盖了工程流体力学教学大纲所要求的所有实验。在编写过程中,始终贯彻理论联系实际,注重实践环节,结合工程流体力学开放实验的特点,力求符合学生的认知规律,坚持便于学生独立操作的原则。

本书内容包括四个部分:第一部分为操作性实验,目的是使学生掌握操作技能和测量方法,培养学生分析实验数据、整理实验成果以及编写实验报告的能力。第二部分为演示性实验,目的是使学生通过观察各种形式的水流现象,增强对流体运动现象的认识,加深对工程流体力学基本概念、基本规律和基本理论的理解。第三部分为英语版的操作性实验,主要是为双语教学及相关专业的留学生编制的。第四部分为附录,介绍流体力学参数的测量方法,主要针对水位、流速、流量、压强及流场介绍常用的测量方法。

本书在编写过程中得到了工程流体力学课程组王晓璞等老师的协助,在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促,作者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者
2015年7月



Contents

第一部分 操作性实验

实验一	流体静力学实验	2
实验二	能量方程(伯努利方程)实验	7
实验三	流量计实验	11
实验四	皮托管测速实验	16
实验五	动量定律实验	20
实验六	流动状态实验	24
实验七	沿程阻力实验	28
实验八	局部阻力实验	32
实验九	孔口与管嘴出流实验	36

第二部分 演示性实验

演示实验一	液体旋转相对平衡实验	42
演示实验二	静压传递自动扬水实验	44
演示实验三	流谱流线显示实验	46
演示实验四	流动演示实验	48
演示实验五	自循环虹吸原理实验	52
演示实验六	紊动机理实验	55
演示实验七	雷诺演示实验	58
演示实验八	水击综合实验	60

第三部分 Operational Experiment

Experiment I	Hydrostatics Experiment	64
Experiment II	Flowmeter Experiment	69
Experiment III	Flow Regime Experiment	73
Experiment IV	Friction Head Loss Experiment	76
Experiment V	Bernoulli Equation Experiment	80
Experiment VI	Local Head Loss Experiment	84

第四部分 附 录

附录 A	流动要素测量方法	90
附录 B	水的密度和黏度表	100
参考文献	.....	101

5	.....	.....
7	.....	.....
11	.....	.....
81	.....	.....
02	.....	.....
13	.....	.....
85	.....	.....
22	.....	.....
06	.....	.....

附录 A 示波 实验二章

21	.....	.....
14	.....	.....
84	.....	.....
84	.....	.....
27	.....	.....
22	.....	.....
17	.....	.....
20	.....	.....

一、实验

实验报告

第一部分

实验报告

操作性实验



说明:

(1) 所有测压管液面标高均以标尺(测压管 2)零读数为基准。

(2) 仪器铭牌所注 $\nabla_B, \nabla_C, \nabla_D$ 系测点 B, C, D 的标高。若同时取标尺零点作为静力学基本方程的基准, 则 $\nabla_B, \nabla_C, \nabla_D$ 亦为 z_B, z_C, z_D 。

(3) 本仪器中所有阀门旋柄均以顺管轴线为开。

三、实验原理

1. 在重力作用下不可压缩流体静力学基本方程。

形式一:

$$z + \frac{p}{\gamma} = \text{const} \quad (1-1-1a)$$

形式二:

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

式中 z ——测点在基准面以上的位置高度;

p ——测点的静水压强(用相对压强表示, 以下同);

p_0 ——水箱中液面的表面压强;

γ ——液体的重度;

h ——测点的液体深度。

2. 油密度测量原理。

当 U 形管中水面与油水界面齐平(见图 1-1-2), 取油水界面为等压面时, 有:

$$p_{01} = \gamma_w h_1 = \gamma_o H \quad (1-1-2)$$

当 U 形管中水面与油面齐平(见图 1-1-3), 取油水界面为等压面时, 有:

$$p_{02} + \gamma_w H = \gamma_o H$$

即

$$p_{02} = -\gamma_w h_2 = \gamma_o H - \gamma_w H \quad (1-1-3)$$

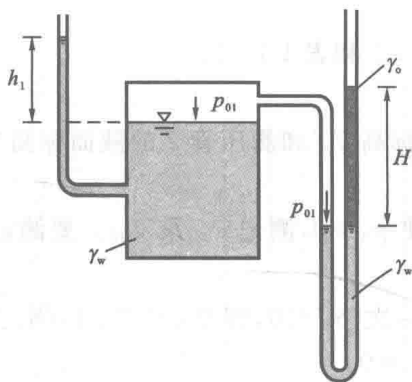


图 1-1-2

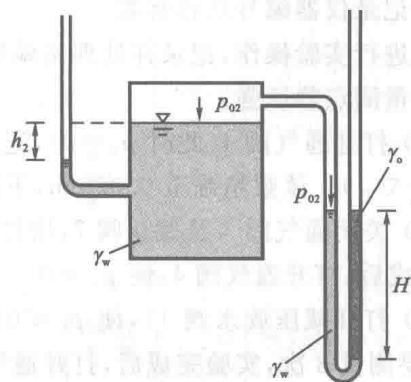


图 1-1-3

由式(1-1-2)、式(1-1-3)两式联立可解得:

$$H = h_1 + h_2$$

代入式(1-1-2)可得油的相对密度 d_o 为:

$$d_o = \frac{\gamma_o}{\gamma_w} = \frac{h_1}{h_1 + h_2} \quad (1-1-4)$$

根据式(1-1-4),可以用仪器(不用额外尺子)直接测得 d_o 。

四、实验要求

1. 记录有关常数。

实验装置编号: No. _____

各测点的标尺读数为:

$\nabla_B = \text{_____} \times 10^{-2} \text{ m}; \nabla_C = \text{_____} \times 10^{-2} \text{ m}; \nabla_D = \text{_____} \times 10^{-2} \text{ m}。$

基准面选在 _____, 则 $z_C = \text{_____} \times 10^{-2} \text{ m}; z_D = \text{_____} \times 10^{-2} \text{ m}。$

2. 分别求出各次测量时 A, B, C, D 点的压强, 并选择一基准面验证同一静止液体内的任意两点 C, D 的 $\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)$ 是否为常数。

3. 求出油的重度。

$\gamma_o = \text{_____} \text{ N/m}^3。$

4. 测出管 6 插入小水杯中水的深度。

$\Delta h_6 = \text{_____} \times 10^{-2} \text{ m}。$

五、实验步骤

1. 了解仪器的组成及其用法, 包括:

(1) 各阀门的开关旋柄顺管轴线为开, 垂直管轴线为关。

(2) 加压方法: 打开阀 5, 关闭通气阀 4 和截止阀 7, 然后用打气球充气。

(3) 减压方法: 关闭阀 4, 5, 7, 开启箱底减压放水阀 11 放水。

(4) 检查仪器是否密封: 加压后检查测压管 1, 2, 8 的液面高程是否恒定。若下降, 则表明漏气, 应查明原因并进行处理。

2. 记录仪器编号及各常数。

3. 进行实验操作, 记录并处理实验数据(见表 1-1-1 和表 1-1-2)。

4. 量测点静压强。

(1) 打开通气阀 4(此时 $p_0 = 0$), 记录水箱液面标高 ∇_0 和测压管 2 的液面标高 ∇_H (此时 $\nabla_0 = \nabla_H$)。读数精确至 0.05 cm, 下同。

(2) 关闭通气阀 4 及截止阀 7, 用打气球加压, 使 $p_0 > 0$, 测记 ∇_0 及 ∇_H 。要测记 2 次, 测量完成后, 打开通气阀 4, 使 $p_0 = 0$ 。

(3) 打开减压放水阀 11, 使 $p_0 < 0$ (要求其中一次 $p_B < 0$, 即 $\nabla_H < \nabla_B$), 测记 ∇_0 及 ∇_H 。要测量 3 次, 实验完成后, 打开通气阀 4, 使 $p_0 = 0$ 。

5. 测出测压管 6 插入小水杯中水的深度。

打开阀 5, 7, 关闭阀 4, 加压直至管 6 末端有气泡出现, 测记 ∇_H 与 ∇_0 , 测量完成后打开阀 4, 使 $p_0 = 0$ 。

表 1-1-1 流体静压强测量记录及计算表

实验条件	实验次数	水箱液面 $\nabla_0/(10^{-2}\text{ m})$	测压管 2 液面 $\nabla_H/(10^{-2}\text{ m})$	压力水头				测压管水头	
				$\frac{p_A}{\gamma} = \nabla_H - \nabla_0$ $/(10^{-2}\text{ m})$	$\frac{p_B}{\gamma} = \nabla_H - \nabla_B$ $/(10^{-2}\text{ m})$	$\frac{p_C}{\gamma} = \nabla_H - \nabla_C$ $/(10^{-2}\text{ m})$	$\frac{p_D}{\gamma} = \nabla_H - \nabla_D$ $/(10^{-2}\text{ m})$	$\frac{p_C}{\gamma} + z_C$ $/(10^{-2}\text{ m})$	$\frac{p_D}{\gamma} + z_D$ $/(10^{-2}\text{ m})$
$p_0 = 0$	1								
	1								
	2								
$p_0 < 0$ (其中一次 $p_B < 0$)	1								
	2								
	3								

表 1-1-2 油相对密度测量记录及计算表

实验条件	实验次数	水箱液面 $\nabla_0/(10^{-2}\text{ m})$	测压管 2 液面 $\nabla_H/(10^{-2}\text{ m})$	$h_1 = \nabla_H - \nabla_0$ $/(10^{-2}\text{ m})$	$\bar{h}_1$ $/(10^{-2}\text{ m})$	$h_2 = \nabla_0 - \nabla_H$ $/(10^{-2}\text{ m})$	$\bar{h}_2$ $/(10^{-2}\text{ m})$	$d_o = \frac{\gamma_o}{\gamma_w} = \frac{\bar{h}_1}{\bar{h}_1 + \bar{h}_2}$
$p_0 > 0$ 且 U 形管 中水面与油水面 面齐平	1							
	2							
	3							
$p_0 < 0$ 且 U 形管 中水面与油面齐 平	1							
	2							
	3							

6. 测定油的相对密度 d_o 。

(1) 关闭通气阀 4, 用打气球加压 ($p_0 > 0$), 微调放气螺母使 U 形管中水面与油水界面齐平 (见图 1-1-2), 测记 ∇_0 及 ∇_H (此过程反复进行 3 次)。测量完成后, 打开阀 4, 使 $p_0 = 0$ 。

(3) 关闭阀 4, 5, 7, 然后开启减压放水阀 11 降压 ($p_0 < 0$), 使 U 形管中的水面与油面齐平 (见图 1-1-3), 测记 ∇_0 及 ∇_H (此过程亦反复进行 3 次)。测量完成后, 打开阀 4, 使 $p_0 = 0$ 。

六、注意事项

1. 用打气球加压、减压需缓慢, 以防液体溢出及油珠吸附在管壁上。打气后务必关闭加压打气球下端的阀门, 以防漏气。
2. 在实验过程中, 装置的气密性要求保持良好。
3. 打开阀 4 时, 不要完全打开。

七、问题分析

1. 同一静止液体内的测压管水头线是一条什么线?
2. 当 $p_B < 0$ 时, 试根据记录数据确定装置中的真空区域。
3. 若再备一根直尺, 如何用最简便的方法测定 d_o 。
4. 如果测压管太细, 对测量结果将有何影响?
5. 过 C 点作一水平面, 相对管 1, 2, 8 及水箱中的液体而言, 这个水平面是不是等压面? 哪一部分液体是同一等压面?
6. 该仪器在加气增压后, 水箱液面将下降 Δh , 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 ($H + \Delta h$) 与视压强 H 的相对误差值。本仪器测压管内径为 0.8×10^{-2} m, 箱体内径为 20×10^{-2} m。
7. 测压管和液面计有何区别?
8. 绝对压强与相对压强、真空度的关系是什么? 试将 $p = -4.9 \times 10^4$ Pa 的相对压强用真空度表示出来。

八、课外拓展

1. 水罐、油罐液位高度检测方案设计。
可借用硬件设备: 水、油、U 形管、管线、标尺、压缩空气。
2. 应用静力学平衡原理证明空气具有可压缩性实验方案设计。
可借用硬件设备: 水、小试管、可增压或减压的可密封盛水大容器和打气球。
3. 应用静力学平衡原理进行喂食式鱼缸设计。
有一鱼缸, 其水位高于敞开于大气中的喂食口, 水不能从喂食口溢出, 但人可以将手由喂食口伸入鱼缸内给鱼儿喂食。

实验二

能量方程(伯努利方程)实验

一、实验目的

1. 验证实际流体稳定流的能量方程。
2. 通过对动水力学诸多水力现象的实验分析,理解能量转换特性。
3. 掌握流速、流量、压强等水力要素的实验量测技能。

二、实验装置

能量方程实验装置如图 1-2-1 所示。

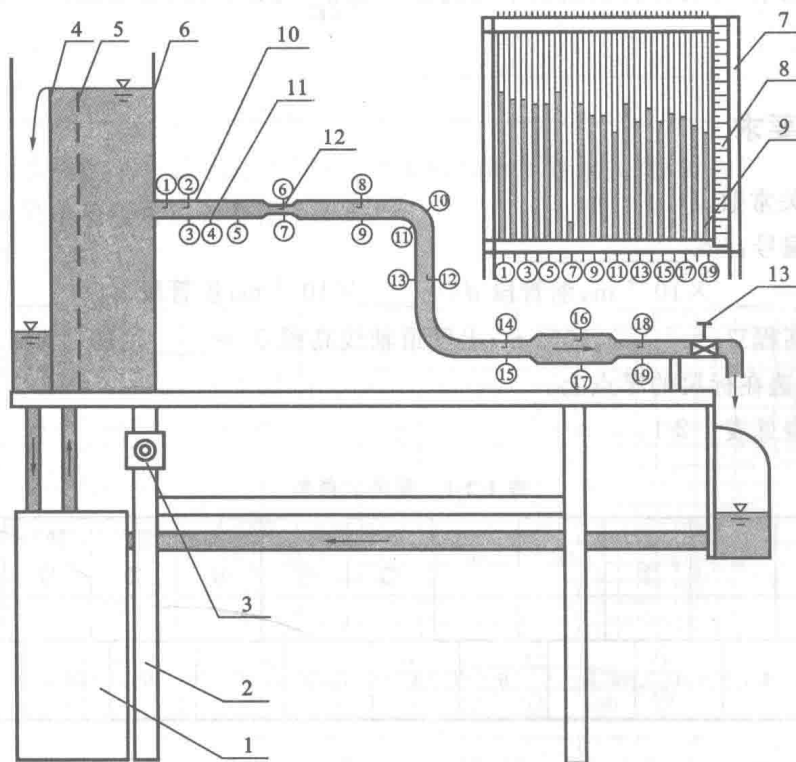


图 1-2-1 自循环伯努利方程实验装置

1—自循环供水器; 2—实验台; 3—可控硅无级调速器; 4—溢流板; 5—稳水孔板; 6—恒压水箱;
7—测压计; 8—滑动测量尺; 9—测压管; 10—实验管道; 11—测压点; 12—皮托管; 13—实验流量调节阀

说明：

本仪器的测压管有两种：

(1) 皮托管测压管(表 1-2-1 中标 * 的测压管),用以测读皮托管探头对准点的总水头 H' ($H'=z+\frac{p}{\gamma}+\frac{u^2}{2g}$)。须注意,在一般情况下 H' 与断面总水头 H ($H=z+\frac{p}{\gamma}+\frac{v^2}{2g}$) 不同(因为一般 $u\neq v$),它的水头线只能定性表示总水头的变化趋势。

(2) 普通测压管(表 1-2-1 中未标 * 的测压管),用来定量量测测压管水头。

实验流量用调节阀 13 调节,流量由体积时间法(量筒、秒表另备)、质量时间法(电子秤另备)或电测法测量(以下实验类同)。

三、实验原理

在实验管路中沿管内水流方向取 n 个过水断面,在恒定流动时,可以列出进口断面(1)至另一断面(i)的能量方程式:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_i + \frac{p_i}{\gamma} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g} + h_{w_{1-i}} \quad (i=2,3,\cdots,n) \quad (1-2-1)$$

取 $\alpha_1=\alpha_2=\cdots=\alpha_n=1$,选好基准面,从已设置的各断面的测压管中读出 $(z+\frac{p}{\gamma})$ 值,测出通过管路的流量,即可计算出断面平均流速 v 及 $\frac{\alpha v^2}{2g}$,从而得到各断面测压管水头和总水头。

四、实验要求

1. 记录有关常数。

实验装置编号:No. _____

均匀段 $d_1=$ _____ $\times 10^{-2}$ m;缩管段 $d_2=$ _____ $\times 10^{-2}$ m;扩管段 $d_3=$ _____ $\times 10^{-2}$ m;

水箱液面高程 $\nabla_0=$ _____ $\times 10^{-2}$ m;上管道轴线高程 $\nabla_z=$ _____ $\times 10^{-2}$ m。

注:基准面选在标尺的零点上。

管径记录表见表 1-2-1。

表 1-2-1 管径记录表

测点编号	①*	② ③	④	⑤	⑥* ⑦	⑧* ⑨	⑩ ⑪	⑫* ⑬	⑭* ⑮	⑯* ⑰	⑰* ⑱
管径/(10 ⁻² m)											
两点间距 /(10 ⁻² m)	4	4	6	6	4	13.5	6	10	29.5	16	16

2. 量测 $(z+\frac{p}{\gamma})$ 并记录到表 1-2-2 中。

3. 计算流速水头和总水头。

流速水头和总水头的计算处理表见表 1-2-3 和 1-2-4。

表 1-2-2 数据记录表

实验次数	h_2	h_3	h_4	h_5	h_7	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{13}	h_{15}	h_{17}	h_{19}	$V/(10^{-6} \text{ m}^3)$	t/s
1														
2														
3														

注： $h_i = z_i + \frac{p_i}{\gamma}$ ，为测压管水头，单位为 10^{-2} m ； i 为测点编号。

表 1-2-3 流速水头计算处理表

管径 $/ (10^{-2} \text{ m})$	$Q_1 = \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$			$Q_2 = \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
	A	v	$v^2/(2g)$	A	v	$v^2/(2g)$
	$/ (10^{-4} \text{ m}^2)$	$/ (10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	$/ (10^{-2} \text{ m})$	$/ (10^{-4} \text{ m}^2)$	$/ (10^{-2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	$/ (10^{-2} \text{ m})$

注： A 为管的截面积。

表 1-2-4 总水头计算处理表

实验次数	H_2	H_3	H_4	H_5	H_7	H_9	H_{10}	H_{11}	H_{13}	H_{15}	H_{17}	H_{19}	$Q/(10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
1													
2													
3													

4. 绘制上述实验结果中最大流量下的总水头线和测压管水头线(轴向尺寸参见图 1-2-2, 总水头线和测压管水头线可以绘在图 1-2-2 上)。

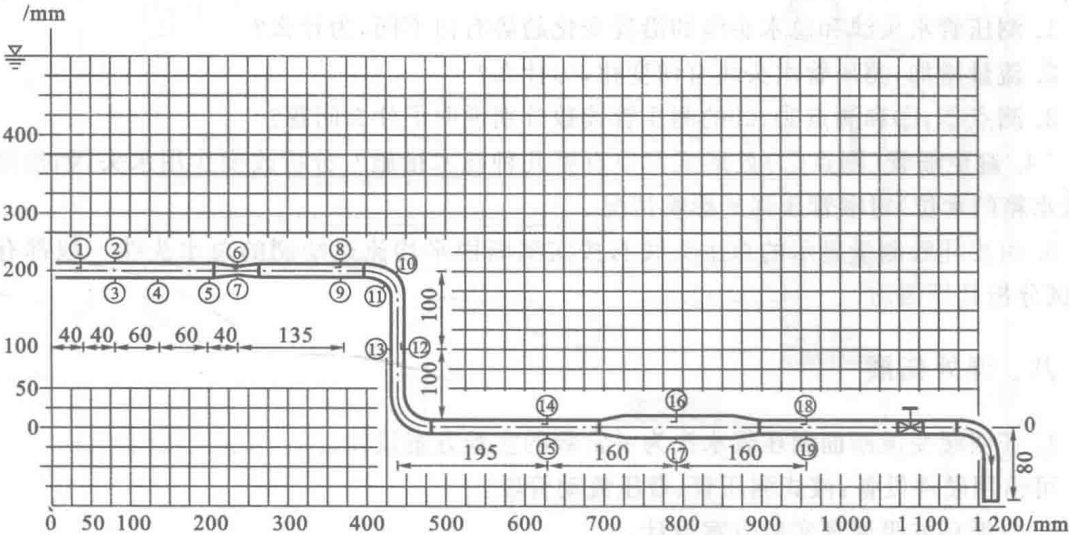


图 1-2-2 水头线绘制坐标图

五、实验步骤

1. 熟悉实验设备,分清哪些测压管是普通测压管,哪些是皮托管,弄清两者功能上的区别。

2. 打开开关供水,使水箱充水。待水箱溢流时,检查调节阀关闭后所有测压管水面是否齐平。如果不齐平,则需查明故障原因(例如连通管受阻、漏气或夹气泡等)并加以排除,直至调平。验证同一静止液体的测压管水头线是一条水平线。

3. 打开调节阀 13,观察并思考以下问题:

(1) 不同流速下,同一断面上测压管水头和总水头的变化规律。

(2) 测点②,③的测压管水头是否相同,为什么?

(3) 测点⑩,⑪的测压管水头是否不同,为什么?

(4) 沿程总水头和测压管水头的变化规律。

(5) 管道内有没有负压区?

4. 改变调节阀 13 的开度,待流量稳定后,测记各测压管液面的读数,同时测记实验流量(皮托管供演示用,不必测记读数)。

5. 改变流量 2 次,重复上述测量。其中一次阀门开度大到使⑬号测压管液面接近标尺零点。

六、注意事项

自循环供水实验均需注意:计量后的水必须倒回原实验装置的回水漏斗内,以保持自循环供水。

七、问题分析

1. 测压管水头线和总水头线的沿程变化趋势有何不同,为什么?

2. 流量增加,测压管水头线有何变化,为什么?

3. 测点②,③和测点⑩,⑪的测压管读数分别说明了什么问题?

* 4. 避免喉管(测点⑦)处形成真空有哪几种技术措施?分析改变作用水头(如抬高或降低水箱的水位)对喉管压强的影响情况。

5. 由皮托管测量显示的总水头线与按实测断面平均流速绘制的总水头线一般都有差异,试分析其原因。

八、课外拓展

1. 证明缓变流断面测压管水头为一常数的实验方案设计。

可借用硬件设备:液式测压管、带压流动管段。

2. 自循环虹吸原理实验方案设计。

可借用硬件设备:自循环伯努利方程实验装置、压力表及管子(若干米)、标尺等。