

■ 高等学校理工科土木工程类规划教材

水利水电工程实验教程

HYDRAULIC & HYDROELECTRIC ENGINEERING EXPERIMENT

王溢波 主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

■ 高等学校理工科土木工程类规划教材

水利水电工程实验教程

HYDRAULIC & HYDROELECTRIC ENGINEERING EXPERIMENT

主编 王溢波

编者 陈婧 许青 张宏战



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

林姓设赋类野工木土样工野对学等高 ■

图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程实验教程 / 王溢波主编. —大连: 大连理工大学出版社, 2007. 3

ISBN 978-7-5611-3534-1

I. 水… II. 王… III. ①水利工程—实验—高等学校—教材②水力发电工程—实验—高等学校—教材 IV. TV-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第039478号

站宏光 青 刊 鼓 剂 香融

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路80号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84708842 邮购: 0411-84703636 传真: 0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm 印张: 6 字数: 123千字
2007年3月第1版 2007年3月第1次印刷

责任编辑: 梁 锋 范业婷 责任校对: 宜 呈
封面设计: 宋 蕾

ISBN 978-7-5611-3534-1

定 价: 10.00元

大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS



本书编写已参考许多教材，在编写过程中，参考了有关文献，

并吸收了国内外许多优秀成果编写而成。全书涵盖了实

验相似关系、实验设计、主要实验设备与仪器、数据的计

算机采集与处理等基本理论，并详细介绍了水利水电工程

前 言

专业的若干重要实验，包括重力坝泄流实验、重力坝静力实

验、泄洪消能和下游防冲刷实验、压力管道水击实验（不

稳定流或过渡过程）、调压室水力学实验、水轮机效率实验

以及若干水利水电工程仿真模型的演示性实验。对实验目

标、实验原理、实验目的、实验设备与仪器、实验步骤、实

验数据记录、实验结果分析、实验结论等进行了详细的说

明。本书可作为水利水电工程专业及相关专业本科生的实

验教材，也可供从事水利水电工程实验工作的工程技术人员

参考。本书在编写过程中，得到了许多同行专家的指导和

帮助，在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中不

免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。本书由王

建明、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、王健、

的、实验原理、实验步骤与方法、实验资料整理与实验报告要求等,系统地加以归纳,便于学生掌握和运用。

本书第1章及实验1~实验3由许青编写,第2章~第4章及实验7、实验8由王溢波编写,实验4~实验6由王溢波、陈婧编写,实验9由张宏战编写。王溢波担任主编。马震岳教授审阅了全书。

由于作者水平有限,本书的缺点和不足在所难免,敬请相关专家学者指正,也请同学们在学习和使用中对需要完善和补充的地方提出切实的意见,以达到教学相长的目的。大家有任何意见或建议,请通过以下方式与我们联系:

邮箱: jcyj@dutp.cn

电话: 0411-84707962 84708947

作者

2007年3月

第1篇 目录

第1篇 理论部分 / 1

第1章 模型实验的基本理论 / 1

1.1 相似特征 / 1

1.2 模型相似准则 / 2

第2章 水位、浪高和压力测量 / 5

2.1 自动跟踪式水位仪 / 5

2.2 电容式水位仪 / 8

2.3 其他水位计 / 11

2.4 水位传感器的标定 / 12

2.5 水压力测量 / 13

2.6 其他压力传感器 / 13

第3章 流速和流量测量 / 16

3.1 光电式旋桨流速仪 / 16

3.2 热线流速仪 / 19

3.3 激光流速仪 / 21

3.4 超声多普勒流速仪 / 22

3.5 差压式流量计 / 23

3.6 电磁流量计 / 25

第4章 计算机数据采集与分析 / 27

4.1 数字信号分析 / 27

4.2 快速傅立叶变换 / 38

第2篇 实验部分 / 44

实验1 溢流坝泄流模型实验 / 44

实验2 溢洪道泄流能力、泄槽水流流态模型实验 / 48

实验3 泄水建筑物消能及下游河道冲刷影响模型实验 / 51

实验4 水轮机模型效率实验 / 55

实验 5 压力管道水击实验 / 62

实验 6 水电站调压室水力学实验 / 67

实验 7 水轮机及水电站建筑物演示实验 / 73

实验 7.1 水轮机演示实验 / 73

实验 7.2 水电站压力管道模型参观 / 74

实验 7.3 水电站厂房模型参观 / 74

实验 8 水利枢纽综合运行演示实验 / 75

实验 9 混凝土重力坝模型实验 / 78

附录 水电站仿真模型原型工程背景 / 82

参考文献 / 90

实验 6 水电站调压室水力学实验

【实验目的与要求】

(1)通过观察调压室内水位波动现象,以及测量使用调压室前后水击压强增量的变化情况,了解调压室消减水击压强的作用。

(2)通过对不同类型调压室水位波动现象的观察与测量,初步了解不同类型调压室的功用和效果。

【实验设备与仪器】

电站调压室水力学实验的设备如图 2-6-1 所示。供水箱有溢流和平水装置,可保证实验水流为恒定流。采用有机玻璃管道作为实验管段,易于观察水击波传播过程。在实验管路上分别安装了圆筒式调压室和阻抗式调压室,通过连通开关的控制,可实现不同的工作状况。在实验管段的下游末端装有快速阀门,在阀门前以及调压室底部装设压力传感器;压力传感器的另一端连接压力测量仪和计算机控制分析系统,用来测量、显示不同情况下的压强随时间变化曲线。

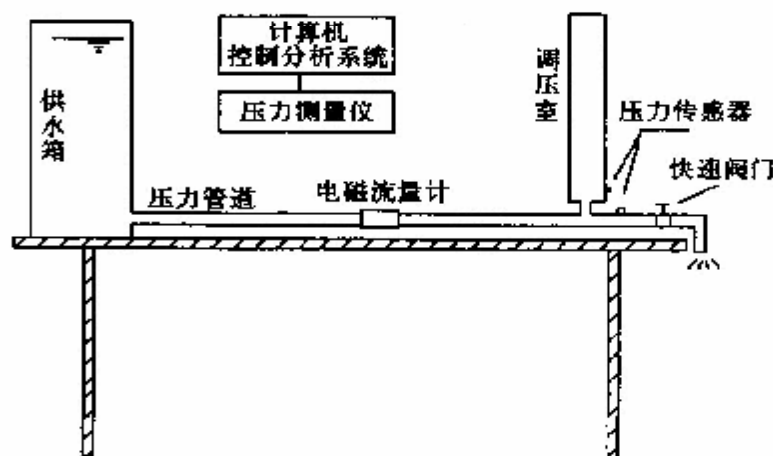


图 2-6-1 水电站调压室水力学实验台

【实验原理】

(1)水击现象

当关闭水电站压力管道上的阀门或水轮机导水叶时,在关闭过程中,随着阀门开度的减小,管道中的流速逐渐降低,由于水流的惯性作用,在阀门上游部分的管道中将产生压力升高;而在下游部分的管道中(如在尾水管中)将产生压力降低。当开启阀门或水轮机导水叶时,则与上述情况相反,管道中的流速逐渐增大,也是由于水流的惯性作用,在阀门上游部分的管道中将产生压力降低,而在下游部分的管道中将产生压力升

高。这种现象称之为水击现象。

(2) 调压室的功用

减小水击压强的最有效措施就是设置调压室。根据地形和地质条件,调压室设置在地面上的称为调压塔,设置在地面以下的称为调压井。设置了调压室之后,利用调压室扩大的断面积和自由水面,水击波就会在调压室反射到下游去。这样就相当于把引水系统分为两段,调压室以前这段引水管道,基本上可以避免水击压力的影响;调压室以后这段压力管道,由于缩短了水击波的传递路程,从而减小了压力管道中的水击压力,改善了机组运行条件和供电质量。

根据以上的分析,调压室的功用,可归纳为以下3点:

- ① 防止过大的水击压力传播到压力引水管道中去;
- ② 减小压力管道中的水击压力;
- ③ 当机组负荷变化时改善机组的运行条件,并促进系统加快恢复稳定。

(3) 调压室内水位波动现象

如图 2-6-2 所示的设有圆筒式调压室的压力引水系统。当水电站在某一固定负荷运行时,水轮机引用流量和通过引水管道的流量均为固定的常数 Q_0 ,调压室内的水位为某一固定水位,其比上游水位低 h_{w0} (通过流量 Q_0 时,引水管道中的水头损失)。当电站负荷发生变化时,水轮机的引用流量将随着变化,因而通过引水管道的流量亦将随着变化,调压室内的水位亦将发生波动。

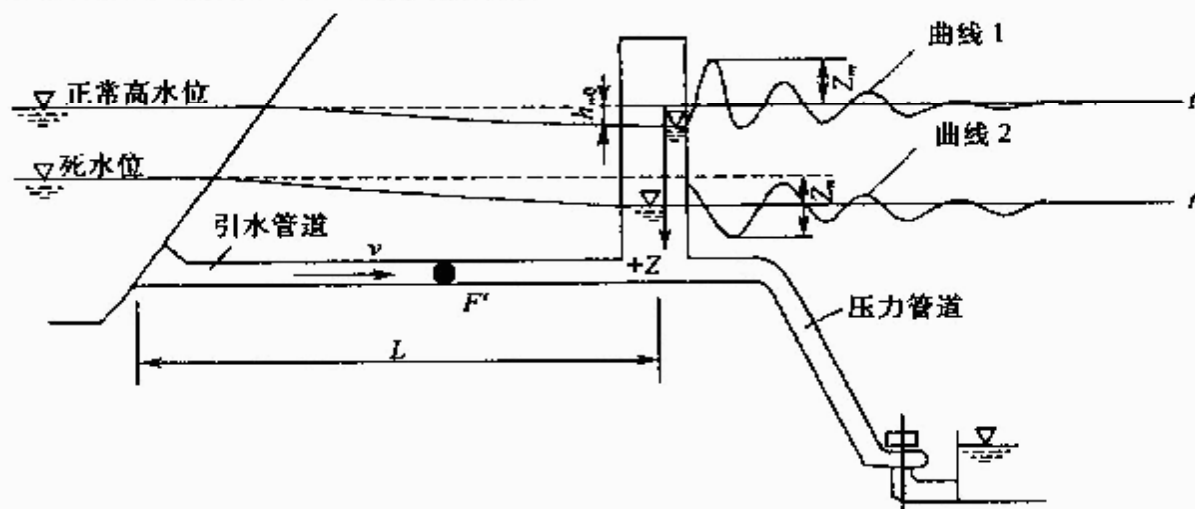


图 2-6-2 调压室内水位波动现象

当水电站丢弃全部负荷时,水轮机导水叶关闭,水轮机的引用流量为零,压力管道中的水流停止,发生水击现象。但是,当负荷刚丢弃时,引水管道中的水因惯性作用仍会以原速流动。流入调压室后,引起调压室内水位的升高,使引水管道首尾两端的水位差减小,引水管道中水流速度随之减慢。当调压室内水位达到库水位时,引水管道两端的水位差虽然等于零,但引水管道中水流由于惯性作用仍继续向调压室充水,水位继续升高,一直到引水管道中水流速度等于零时,调压室内水位达到最高。这时,由于调压室中水位高于库水位,在引水管道首尾两端形成新的水位差,水开始由调压室流向水库,调压室内水位开始下降。如此往复波动,如图 2-6-2 中曲线 1 所示。由于摩擦损

失,调压室内的水位波动逐渐衰减,最终停止在静水位上。

当增加负荷时,调压室内水位的波动过程与丢弃负荷时的正好相反。水轮机需要增加的流量首先由调压室供给,调压室内水位开始下降,使引水管道首尾两端的水位差增大,引水管道内水流速度随之增加。当调压室内水位降到某一最低水位时,由引水管道来的流量已超过水轮机的引用流量,多余的水量储存在调压室中,调压室内水位开始升高。经过多次波动后,最终停止在某一相应流量的调压室水位上。其波动曲线如图 2-6-2 中的曲线 2 所示。

(4) 对调压室的基本要求

根据调压室的功用,在水力学上对调压室有以下基本要求:

①调压室应充分反射水击波,以便将传至引水管道中的水击压力控制在合理的范围内,并尽量减小压力管道中的水击压力;

②调压室的水平断面必须满足稳定要求,即当负荷变化时,室内水位波动应迅速衰减,尽快达到新的稳定状态;

③调压室的高度应足够大,根据水位升高振幅的大小,计入安全超高,确定室顶高程;根据水位降低振幅再计入安全深度,定出与调压室相连接的引水管道和压力管道的顶高程,从而确定调压室的底高程;

④在正常运行中,调压室与引水管道连接处,水头损失应尽量小。

(5) 调压室的基本布置方式

根据调压室与厂房的相对位置不同,调压室可以归纳为以下 4 种基本布置方式:

① 上游调压室

调压室位于厂房上游的引水管道上,如图 2-6-3(a)所示,这种布置方式应用得最普遍。

② 下游调压室(尾水调压室)

当厂房下游具有较长的有压尾水隧洞时,需设置尾水调压室以减小水击压力,特别是防止在甩负荷时产生过大的负水击。尾水调压室应尽可能地接近水轮机,如图 2-6-3(b)所示。

③ 上、下游双调压室系统

在某些地下式水电站中,由于布置上的原因,厂房的上、下游均有比较长的有压管道。为了减少水击压力,改善机组运行条件,在厂房的上、下游均设置调压室而成为双调压室系统,如图 2-6-3(c)所示。

④ 上游双调压室系统

如果上游有压引水管道较长,也可设两个调压室,如图 2-6-3(d)所示。靠近厂房的调压室对于反射水击波起主导作用,称为主调压室;靠近上游的调压室用来帮助衰减引水系统的波动,降低主调压室的高度,称为辅助调压室。引水系统水位波动的衰减由两个调压室共同保证。

(6) 调压室的基本类型

调压室在满足水击反射条件及尽快恢复稳定的前提下,根据地形地质情况和水电站参数来选择类型,其目的是寻求调压室的容量最小,以节省工程量和加快施工进度。

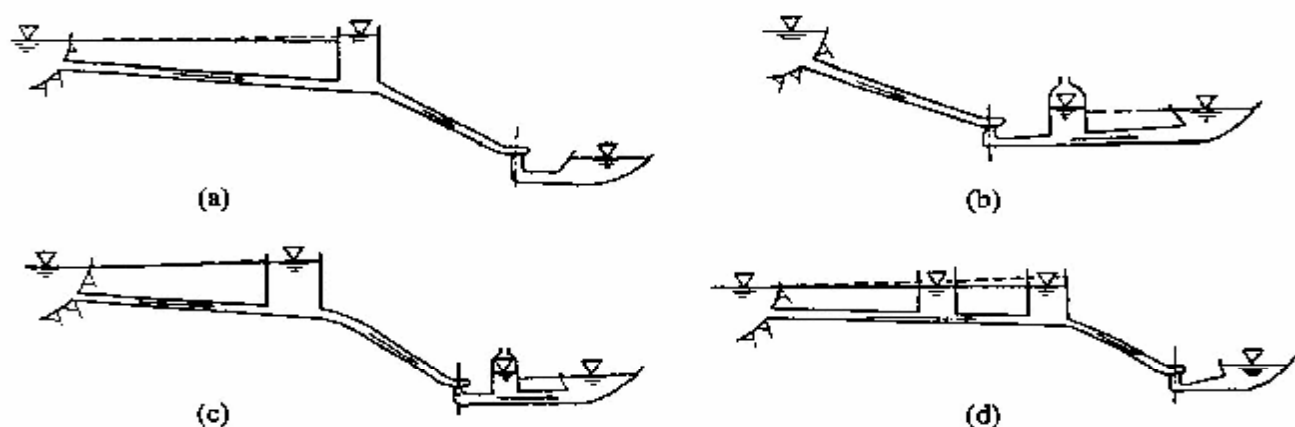


图 2-6-3 调压室的基本布置方式

根据工作特点和结构形式,调压室的基本形式可归纳为:

①圆筒式(简单式)调压室

其特点是自上而下具有相同的断面,如图 2-6-4(a)所示,结构简单,反射水击波好,但水位波动振幅大,衰减慢,且正常运行时水流通过调压室底部的水头损失较大,故调压室底部亦常用连接管与引水管道连接,如图 2-6-4(b)所示。连接管的直径常取上游引水管道的直径。

②阻抗式调压室

将圆筒式调压室的底部,用断面较小的孔口或孔口尺寸较小的隔板与引水管道连接起来,这种孔口或隔板相当于局部阻力,即为阻抗式调压室,如图 2-6-4(c)和图 2-6-4(d)所示。阻抗式调压室在同样条件下比圆筒式调压室的波动振幅小,衰减快,但对水击波的反射效果不如圆筒式调压室。

③双室式调压室

由一个断面较小的竖井和上、下两个断面扩大的储水室组成的调压室,如图 2-6-4(e)所示。上室供甩负荷时蓄水之用,并起到减小调压室水位波动振幅的作用;下室供增加负荷和上游低水位甩负荷的第二振幅时补充水量之用。双室式调压室适用于水头较高、要求的稳定断面较小、水库水位变化较大的水电站,并宜做成地下结构。

④溢流式调压室

溢流式调压室顶部设有溢流堰,用以限制甩负荷时的最大水位升高。从溢流堰溢出的水量可排至下游河道,亦可在上室储存,待水位下降时经底部回流孔返回竖井,如图 2-6-4(f)所示。溢流式调压室常由双室式调压室加溢流堰组成。

⑤差动式调压室

差动式调压室由大、小两个竖井组成。两个竖井可以布置成同心结构,如图 2-6-4(g)所示,也可将小井置于大井的一侧或置于大井之外成双井式,如图 2-6-4(h)和图 2-6-4(i)所示。同心结构的大、小井之间需设较多支撑,结构复杂,已逐渐为后两种结构形式所代替。

⑥气垫式调压室

气垫式调压室又称气压式、空气制动式、封闭式调压室,是一种利用封闭气室中的

空气压力约制水位高度及其振幅的调压室,如图 2-6-4(j)所示。室内气压一般高于一个大气压,故能压低调压室内的稳定水位,降低调压室的高度。在调压室水位变化过程中,室内气压随水位的升降而增减,故气室的存在又能抑制水位波动的振幅。气垫式调压室适于做成深埋的地下结构。

⑦ 组合式调压室

组合式调压室是指根据水电站的具体情况,吸取上述两种或两种以上基本类型调压室的特点组成的调压室。组合式调压室的结构形式和水位波动过程一般较为复杂,多用于要求波动衰减比较快的抽水蓄能电站。如图 2-6-4(k)所示为组合式调压室的一例。

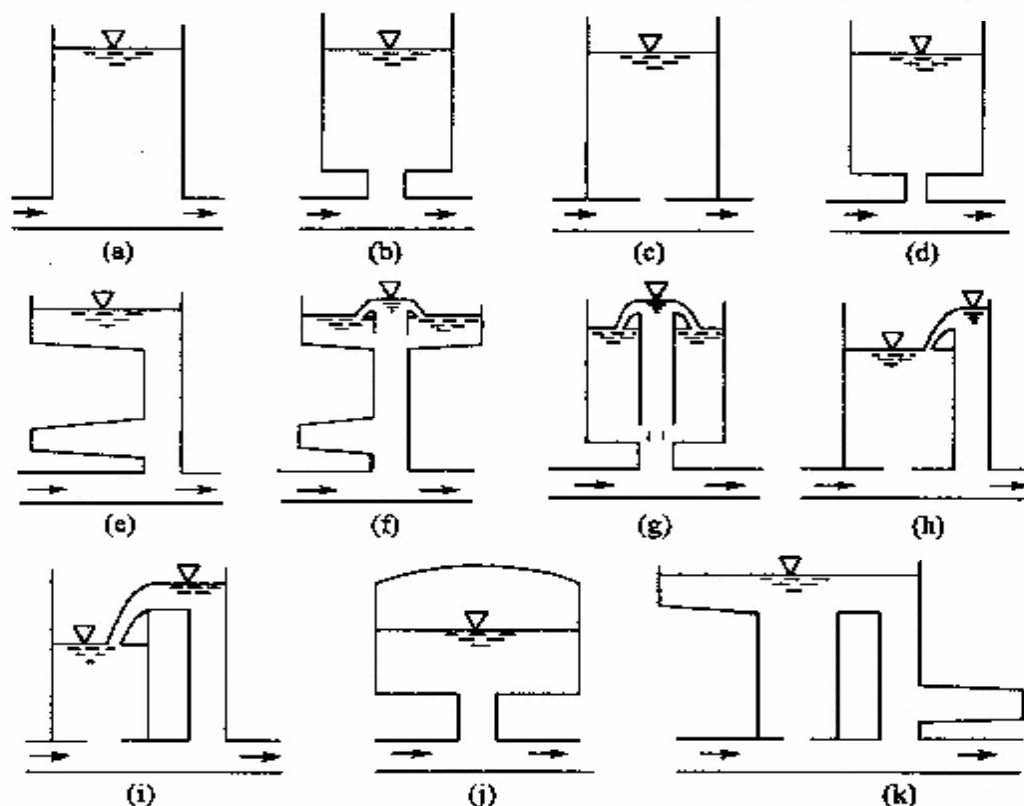


图 2-6-4 调压室的基本类型

(7) 圆筒式和阻抗式调压室最高水位波动幅值的计算公式

根据反映水库—引水道—调压室系统内水流运动规律的基本方程,即连续方程和运动方程可以得出圆筒式和阻抗式调压室最高水位波动幅值 $Z_{\max}$ 的计算公式为

$$Z_{\max} = X_{\max} S \quad (2-6-1)$$

其中

$$S = \frac{LF'v_0^2}{2gFh_{u0}} \quad (2-6-2)$$

$X_{\max}$ 则由下面两式通过试算法求得

圆筒式

$$\ln(1 + X_{\max}) - X_{\max} = -X_0 \quad (2-6-3)$$

阻抗式

$$\ln[1 + (1 + \epsilon) X_{\max}] - (1 + \epsilon) X_{\max} = \ln[1 - (1 + \epsilon) \epsilon X_0] - (1 + \epsilon) X_0 \quad (2-6-4)$$

上面各式中, L 为引水管道的长度; F 为引水管道的过流断面面积; v_b 为引水管道中水流的流速; F 为调压室的过流断面面积; h_{w0} 为引水管道中的水头损失; ξ 为阻抗系数; $X_0 = \frac{h_{w0}}{S}$ 。

【实验方法与步骤】

- (1) 了解实验目的与要求、实验原理和注意事项。
- (2) 记录已知数据。
- (3) 将测量仪器接好, 打开电源, 预热 15 min。
- (4) 对照实物了解仪器设备的使用方法和操作步骤, 做好准备工作后, 启动水泵, 打开进水开关, 使供水箱充水, 并保持溢流状态, 使水位恒定。
- (5) 在压力测量仪上, 设置好各压力传感器的采集参数, 使测量结果达到最佳值。
- (6) 设置各阀门的开关状态, 使水流通过圆筒式调压室。
- (7) 记录水流稳定后管道中的流量及水头损失。
- (8) 将管端快速阀门突然关闭, 产生水击现象, 调压室内水位波动, 与此同时由计算机控制的压力测量仪开始采集、测量压力信号, 并将各测点的压强过程线显示在屏幕上。
- (9) 记下各测点的压强特征值。
- (10) 设置各阀门的开关状态, 使水流通过阻抗式调压室, 待水流恒定后, 重复步骤(7)、(8)和(9)。
- (11) 将调压室去掉, 形成不设调压室的情况, 待水流恒定后, 重复步骤(7)、(8)和(9)。

【实验资料整理】

(1) 已知数据

管道内径	_____ mm	调压室内径	_____ mm
阻抗孔内径	_____ mm	管道糙率	_____
调压室前管道长度	_____ mm	阀门前管道长度	_____ mm

(2) 测量数据

型式	流量 m ³ /h	水头损失 mm	调压室底部压强/kPa			阀门前压强/kPa		
			最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值
圆筒式调压室								
阻抗式调压室								
不设调压室								

【思考题】

- (1) 调压室的功用和基本要求是什么?
- (2) 根据所学知识计算圆筒式调压室的最高水位波动幅值, 并与实测值比较, 说明引起误差的主要原因。
- (3) 根据实验结果, 对比说明圆筒式调压室与阻抗式调压室的工作特点?

【注意事项】

- (1) 实验中注意保护仪器, 切勿将水溅到电子仪器上。
- (2) 实验结束后, 关闭各仪器开关及供水水泵, 切断电源。