



21世纪

高等学校精品规划教材

水力机械测试技术

刘在伦 李琪飞 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高等学校精品规划教材

水力机械测试技术

刘在伦 李琪飞 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书着重叙述了水力机械工作参数的测量原理和方法,介绍了泵和水轮机模型的基本试验。全书共分9章:第1章介绍了水力机械基本工作参数与试验装置;第2~5章介绍了压力,流量,转速、转矩及功率,液流速度的测量;第6、7章介绍了振动和噪声的测量;第8、9章介绍了离心泵基本试验和水轮机模型试验,包括能量性能试验、气蚀试验、泵振动与噪声测量。

本书主要作为高等院校流体机械及工程专业的教学用书,亦可作为从事相关工作的研究生及工程技术人员参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

水力机械测试技术 / 刘在伦, 李琪飞编著. — 北京
: 中国水利水电出版社, 2009.10

21世纪高等学校精品规划教材
ISBN 978-7-5084-6913-3

I. ①水… II. ①刘… ②李… III. ①水力机械—测试技术—高等学校—教材 IV. ①TK730.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第190602号

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 水力机械测试技术
作 者	刘在伦 李琪飞 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 8.25 印张 196 千字
版 次	2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	16.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本着提高读者职业能力的目标，突出实践环节，我们于2005年编写了一本《水力机械测试技术》教材，并于同年印成了讲义。该讲义经过4届学生的使用，听取了各方面的意见，在此基础上，对讲义的内容进行了增删与修改，进一步贯彻了“理论够用为度，要为应用服务”的教材编写原则。

本书的第一作者大学毕业后，在泵厂和高校工作20余年，先后从事过产品设计、制造、测试等方面的科研与教学工作。本书是在总结这些工作的基础上编写而成的。通过本书，作者愿将自己在工作中积累的经验、收集到的资料介绍给大家，望可为从事水力机械的研究、设计和测试工作的同仁，在工作中参考。

全书共分9章：第1章介绍了水力机械基本工作参数与试验装置；第2~5章介绍了压力，流量，转速、转矩及功率，液流速度的测量；第6、7章介绍了振动和噪声的测量；第8、9章介绍了离心泵基本试验和水轮机模型试验，包括能量性能试验、气蚀试验、泵振动与噪声测量。

本书由齐学义教授、李仁年教授审核。

书中引用了许多专家、学者的资料，在此深表敬意。由于本书涉及的知识面较广，作者在编写过程中资料收集的深度和广度还做得不够，虽尽了最大的努力，但限于水平，书中难免有不少的缺点和错误，恳请读者给予批评、指正，作者将不胜感谢。

编者

2009年8月

前言

第 1 章 水力机械基本工作参数与试验装置	1
1.1 水力机械的基本工作参数	1
1.2 水力机械的特性曲线	2
1.3 水力机械的基本试验装置	4
第 2 章 压力测量	8
2.1 概述	8
2.2 液柱式压力计	11
2.3 弹性式压力计	14
2.4 压力信号的电变送方法	17
第 3 章 流量测量	31
3.1 概述	31
3.2 涡轮流量计	33
3.3 电磁流量计	35
3.4 超声波流量计	38
3.5 其他流量计	41
第 4 章 转速、转矩及功率的测量	47
4.1 转速的测量	47
4.2 功率的测量	49
4.3 测功器	51
4.4 转矩仪	56
4.5 三相电功率测量	61
第 5 章 液流速度的测量	65
5.1 动压管	65
5.2 二元测压管	66
5.3 三元测压管	69
5.4 热线热膜风速仪	72

5.5 激光多普勒流速仪	76
5.6 粒子图像速度场仪	81
第 6 章 振动测量	85
6.1 概述	85
6.2 振动量的电测系统	86
6.3 振动传感器	87
第 7 章 噪声测量	94
7.1 噪声的量度	94
7.2 噪声测量仪器	102
7.3 噪声测量技术	104
第 8 章 离心泵基本试验	106
8.1 离心泵性能试验	106
8.2 离心泵气蚀试验	109
8.3 泵的振动测量	112
8.4 泵的噪声测量	115
第 9 章 水轮机模型试验	119
9.1 水轮机模型能量试验	119
9.2 水轮机气蚀试验	123
参考文献	126

第 1 章 水力机械基本工作参数与试验装置

1.1 水力机械的基本工作参数

泵和水轮机都属于水力机械。所谓水力机械,是指在流体具有的机械能和机械所做的功之间进行能量交换的机械,可用水力机械的基本工作参数表征这一过程的特性,其基本工作参数有扬程(水头)、流量、转速、轴功率(出力)、效率。

1.1.1 扬程(水头)

水泵扬程是泵抽送的单位重量液体从泵的进口(泵的进口法兰)至出口(泵的出口法兰)能量的增加值,扬程的计算公式为

$$H = \left(Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \right) - \left(Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) = \left(\frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} \right) + \left(\frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} \right) + (Z_2 - Z_1) \quad (1.1)$$

式中: H 为扬程, m; Z 为位置水头, m; p 为压力, Pa; v 为速度, m/s; ρ 为液体的密度, kg/m³; g 为重力加速度, m/s²; 下标 1 表示泵进口; 下标 2 表示泵出口。

水轮机水头是水轮机进口(涡壳进口断面)和出口(尾水管出口断面)上的单位重量水具有的能量差值,水头的计算公式为

$$H = \left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \right) = \left(\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} \right) + \left(\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) + (Z_1 - Z_2) \quad (1.2)$$

式中: H 为水头, m; Z 为位置水头, m; p 为压力, Pa; v 为速度, m/s; 下标 1 表示水轮机进口; 下标 2 表示水轮机出口。

1.1.2 流量

水泵流量是单位时间内水泵输送出去的液体体积的数量,用符号 Q 表示,单位 m³/s。

水轮机流量是单位时间内流过水轮机过流通道的水的体积数量,用符号 Q 表示,单位 m³/s。

工程上常用的流量单位有 m³/h 和 L/S, 1L/S=3.6m³/h。这主要是专业习惯,因泵流量一般较小,采用 m³/h,水轮机流量大,用 L/S,国际单位用 m³/s。

1.1.3 转速

水泵和水轮机转速是指它们的轴每分钟转动的次数,用符号 n 表示,单位 r/min。

1.1.4 功率

水泵的功率分为输出功率和输入功率。

水泵的输出功率是指单位时间内流过水泵的液体从水泵那里所得到的能量,又称为有效功率,计算公式为

$$P_u = \frac{\rho g Q H}{1000} \quad (1.3)$$

式中： P_u 为泵的输出功率，kW； ρ 为水泵输送液体的密度， kg/m^3 ； $\rho_{\text{水}}=1000\text{kg}/\text{m}^3$ ； Q 为流量， m^3/s ； H 为扬程，m。

水泵的输入功率是驱动机传递给水泵轴上的功率，又称为泵的轴功率，用符号 P 表示，单位 kW。

水轮机功率也分为输入功率和输出功率。

输入功率是水流对水轮机单位时间内付出的机械能量，计算公式为

$$P_d = \frac{\rho g Q H}{1000} \quad (1.4)$$

式中： P_d 为水轮机输入功率，kW； Q 为水轮机的过水量， m^3/s ； H 为水头，m。

水轮机输出功率是水轮机主轴端输出的功率，又称为水轮机的出力，用符号 P_i 表示，单位 kW。

1.1.5 效率

水力机械的输入功率和输出功率之差为水力机械损失的功率，其大小用水力机械的效率来计量。把水力机械的输出功率和输入功率之比称为效率，用符号 η 表示，即

泵效率为

$$\eta = \frac{P_u}{P} \times 100\% \quad (1.5)$$

水轮机效率为

$$\eta = \frac{P_i}{P_d} \times 100\% \quad (1.6)$$

1.2 水力机械的特性曲线

液体在水力机械中的流动十分复杂，是一种非定常的三维湍流，至今还不能用完全解析的方法确定水力机械的性能特性，只有通过试验确定水力机械的特性曲线。水力机械的特性曲线对水力机械的研究、开发、设计、生产和使用具有重要的意义。

1.2.1 离心泵性能曲线

泵性能参数有流量、扬程、转速、轴功率、效率和气蚀余量，这些参数之间有着一定的相互关系，反映这些性能参数间变化关系的曲线称为性能曲线。性能曲线通常是指在规定的转速下，以流量为横坐标，以扬程、轴功率、效率和气蚀余量为纵坐标，在一张图上绘制出 $H=f(Q)$ 、 $P=f(Q)$ 、 $\eta=f(Q)$ 和 $NPSN_3=f(Q)$ 曲线，如图 1.1 所示。这些曲线全面、综合、直观地反映了泵的性能，性能曲线对泵的选型、经济合理的运行都起着十分重要的作用。

1.2.2 水轮机模型综合特性曲线

根据相似理论可知，同系列水轮机在相似工况下其单位流量 Q'_1 和单位转速 n'_1 分别相等，一定的 Q'_1 、 n'_1 值决定了一个相似工况。所以，在水轮机模型综合特性曲线图中，是转轮直径 $D_1=1\text{m}$ 、水头 $H=1\text{m}$ 时，在相似工况下其单位流量和单位转速分别相等。以单位流量为横坐标，以单位转速为纵坐标，绘制出一系列的等开度线 $a_0=f(Q'_1, n'_1)$ 、等效率线

1.2 水力机械的特性曲线

$\eta=f(Q',n'_1)$ 、等气蚀系数线 $\sigma=f(Q',n'_1)$ 。对混流式水轮机，还有表示5%功率储备的功率限制线 $5\%P'_{1\max}=f(Q',n'_1)$ ；对轴流转桨式水轮机还有等叶片转角线。这些等值曲线反映了同系列水轮机的主要性能（能量、气蚀等），故称为水轮机模型综合特性曲线。这些综合特

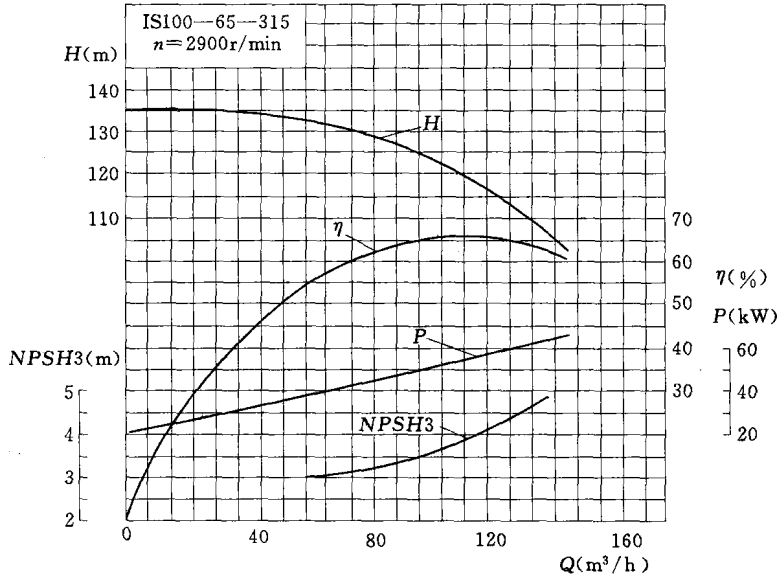


图 1.1 离心泵性能曲线

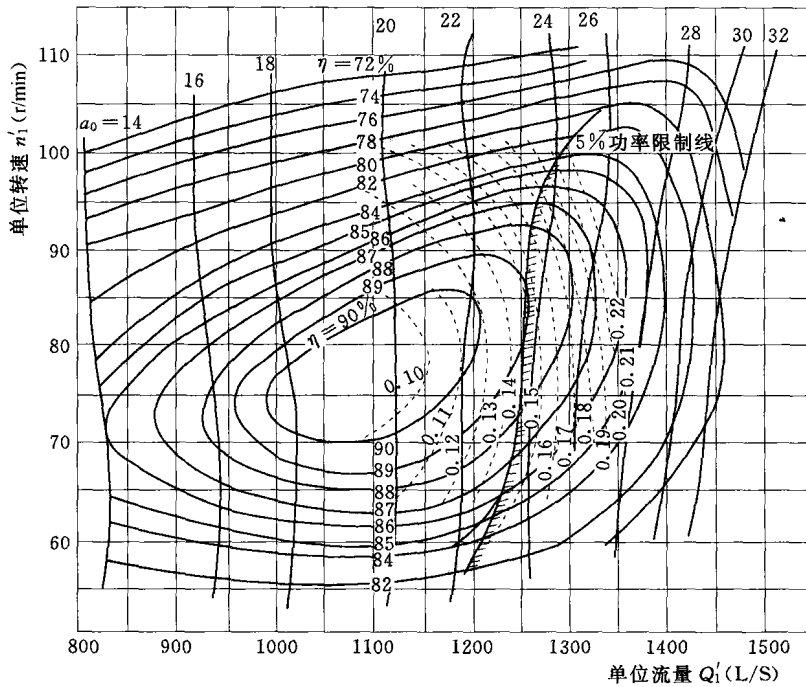


图 1.2 混流式水轮机模型综合特性曲线

性曲线一般由模型试验方法获得。在综合特性曲线图上还应标注模型试验条件,包括模型的转轮直径,模型的水力通道的图形、几何尺寸以及试验水头等。水轮机模型综合特性曲线对于水电站的建设和设计单位进行选型计算提供了方便,因此应用极为广泛。图 1.2 是混流式水轮机模型综合特性曲线,图 1.3 是轴流转桨式水轮机模型综合特性曲线。

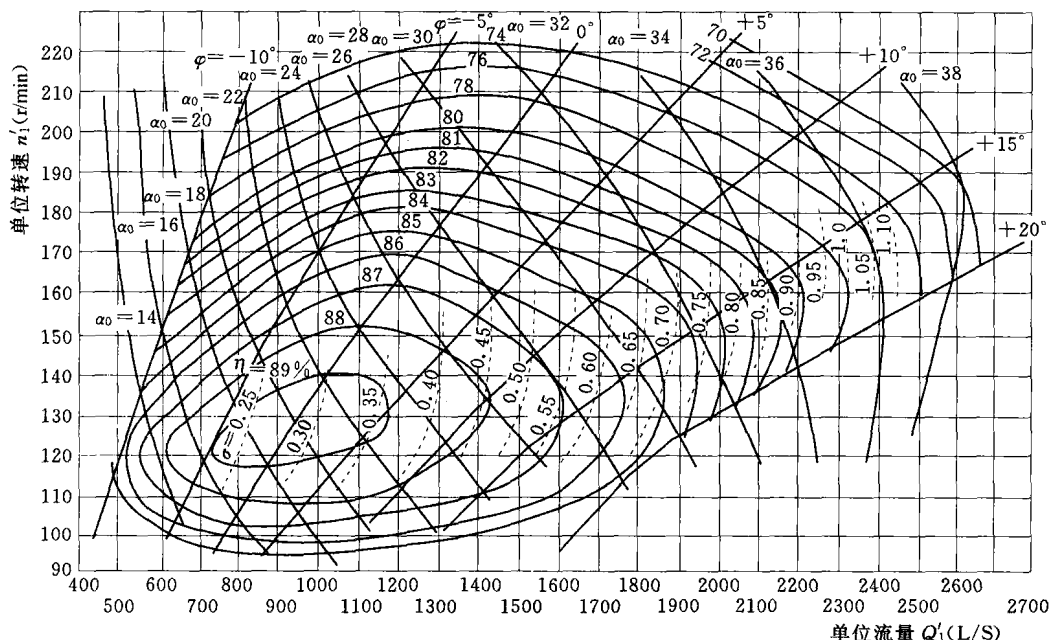


图 1.3 轴流转桨式水轮机模型综合特性曲线

1.3 水力机械的基本试验装置

水力机械的试验装置通常按循环管路系统分为 2 种,即开式试验台、闭式试验台。水力机械开式试验台的主要特点是上、下游水面是敞开的,并和大气直接接触,这种试验台主要用于水力机械的能量特性试验,即效率特性试验;水力机械闭式试验台的主要特点是试验液体不与外界大气直接接触,自成一个闭合循环系统,这种试验台既可进行能量特性试验又可进行气蚀特性试验。无论开式试验台还是闭式试验台,都可进行力特性试验以及过流部件结构等试验研究。

1.3.1 开式试验台

1. 水轮机开式试验台

水轮机模型的能量试验装置一般采用开式试验台,图 1.4 为典型的水轮机开式试验台。在该循环系统中,轴流泵自水池将水抽到压力水箱,压力水箱的水通过水轮机模型流至尾水箱,经测流槽而排至水池,经稳定后,再由轴流泵抽吸,形成试验过程中往复循环的水流。

轴流泵做成可以手动调节轮叶的角度或通过出口管路的闸阀控制水泵的流量。

压力水箱是一个大容积的蓄水箱,其作用是在试验过程中保持一定的上游水位以形成

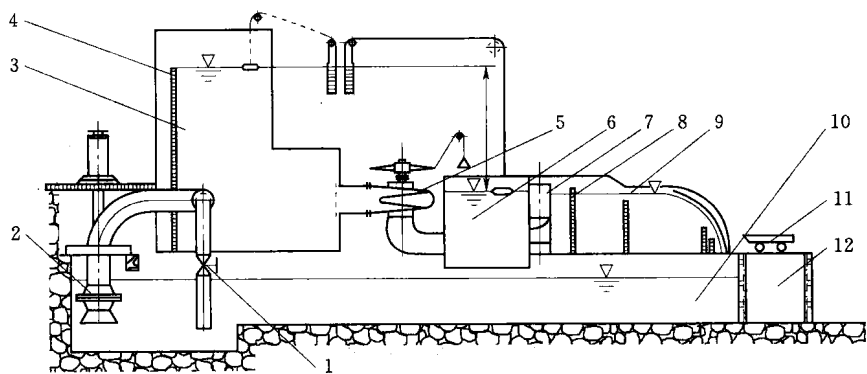


图 1.4 水轮机开式试验台

- 1—旁通阀；2—轴流泵；3—压力水箱；4—溢流板；5—水轮机模型；6—尾水箱；
7—调节栅；8—稳流栅；9—测流槽；10—水池；11—截流小车；12—流量率定池

试验水头。在压力水箱上部侧面装置有溢流堰板和排水隔层，水箱的下部装置旁通阀，利用它们来控制箱内水位恒定于一定的高度，多余的水流经溢流板及旁通阀排至集水池。为了保证进入模型水轮机的水流流速分布均匀与稳定，在箱内出水部分还设置静水栅。

在尾水箱的侧面也装置了溢流板，同时在后部设置调节栅。试验时可根据流量大小来改变调节栅的开口，以保持下游水位在试验过程中为一恒定值。通过溢流板及调节栅的水流均汇到测流槽。

由于在压力水箱及尾水箱中采取了上述措施，不仅实现了水位的稳定，保证了试验过程中的水头恒定，而且简化了调整操作。

为了保证流经测流槽的水流高度稳定以提高量水堰的精确度，在槽的入口处设置稳流栅，同时还要求槽身有足够的长度。由于测流槽的量水堰在使用前需进行校正，为此设置了专门的流量率定池，以便在必要时用高精度的容积法校正量水堰。

2. 水泵开式试验台

图 1.5 为典型的水泵开式试验装置，又称为开式试验台。开式试验装置是由水池、进

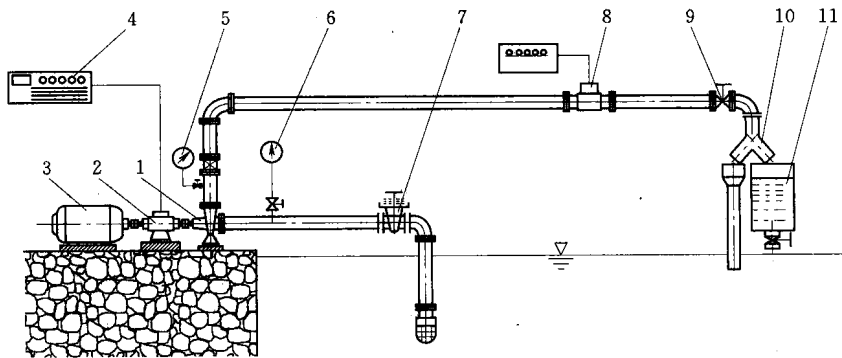


图 1.5 水泵开式试验台

- 1—被试泵；2—转速转矩传感器；3—电动机；4—转速转矩仪；5—压力表；6—真空表；
7—水封闸阀；8—流量计；9—调节阀；10—换向器；11—量桶

水管路、水封闸阀、出口管路、流量计、调节阀、被试泵、转速转矩传感器、测试仪表、换向器和量筒等组成。

开式试验台结构简单、使用方便、散热条件和稳定性条件好，主要用于泵性能试验。也可用于气蚀试验，常采用调节水封闸阀的开度来增加吸入管路阻力的方法进行，这样会造成泵的进口流动不稳定，且不宜准确控制试验工况。特别是调节水封闸阀在较小的开度，阀板后面会产生气蚀现象，影响气蚀试验的精度。

1.3.2 闭式试验台

1. 水轮机闭式试验台

图 1.6 为典型的水轮机闭式试验台。主要由水泵、空气溶解箱、文吐里流量计、压力水箱、转速传感器、测功电机、水头计、水轮机模型、尾水箱、真空计等组成。

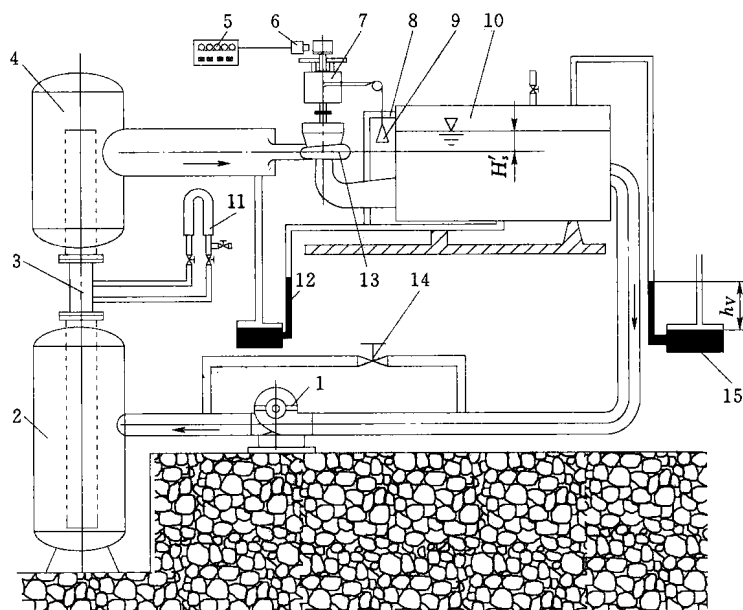


图 1.6 水轮机闭式试验台

- 1—水泵；2—空气溶解箱；3—文吐里流量计；4—压力水箱；5—数字频率计；6—转速传感器；
7—测功电机；8—联通式水位计；9—砝码盘；10—尾水箱；11—倒 U 形管差压计；
12—水头计；13—模型机组；14—旁通阀；15—真空计

在闭式试验台中，整个水流循环均在密闭的流道中进行。在启动前此循环系统充满了水，除尾水箱以外，任何部分均没有自由水面。首先，水泵把水打入空气溶解箱，此箱是一个巨大体积的箱体，箱内用隔板隔成若干层。溶解箱的主要作用是使水流减速，使之有足够的时间把在低压部分从水中析出的空气重新溶解到水中去，以便在试验过程中水中的空气含量保持不变。因为含气量的变化对气蚀试验的结果有较大的影响。例如自然界中的水在温度 20°C 时汽化压力为 $0.24\text{mH}_2\text{O}$ ，但经过除氧与净化后的纯水，气蚀初生的压力要求达 $-(4\sim 10)\text{mH}_2\text{O}$ 。可见，为了得到正确的试验结果，保持水中的空气含量是十分重要的。

从溶解箱出来的水流过文吐里流量计进入压力水箱，在压力水箱中消除了水流中由于

管道弯曲所引起的涡流，使水流流速趋于均匀分布，从而平稳地进入水轮机模型。在一般情况下，压力水箱的上部空间充满压缩空气，以增加稳压效果。从水泵出口到压力水箱之间的循环段是试验台的高压部分。

由水轮机模型排出的水流入尾水箱，又回到水泵的吸水口，形成水流的封闭循环。

在模型气蚀试验过程中，尾水箱内保持必要的下游水位，并用真空泵抽气改变箱内水面的压力，形成不同的真空值，使模型转轮发生气蚀。从尾水箱到水泵吸水口之间是气蚀试验台的低压部分，此部分要求有良好的气密性，不允许有漏气现象存在，否则真空性能不佳。气密性是检验气蚀试验台的质量标准之一。

为了使模型转轮发生气蚀，则需要尾水箱中形成高度的真空。此时水流如直接进入水泵的吸水口，必然是水泵也发生气蚀。为防止水泵气蚀，一般将气蚀试验台做成双层布置，水轮机在上层，水泵在下层，相距约 5~10m，这样可利用水柱的高度在水泵进口形成一定的压力。

2. 水泵闭式试验台

水泵闭式试验台结构型式多种多样，它的基本型式如图 1.7 所示。由气蚀罐、进口管路、水封闸阀、出水管路、调节阀、流量计、转速转矩传感器、被试泵和测试仪表等组成。试验台可进行泵性能试验和气蚀试验。进行气蚀试验时，用真空泵从气蚀罐的上部抽气，使罐内的压力下降，从而使泵的进口压力逐渐下降而出现气蚀现象。调节阀用来控制试验泵的流量。

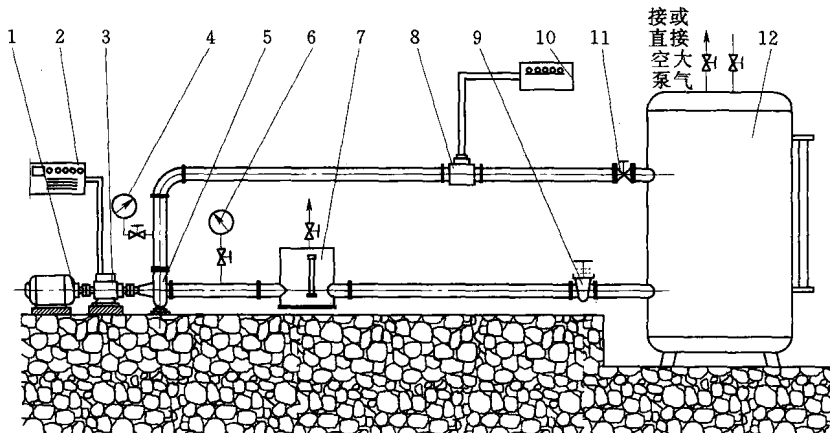


图 1.7 水泵闭式试验台

1—电动机；2—转速转矩仪；3—转速转矩传感器；4—压力表；5—试验泵；6—真空表；
7—稳流器；8—流量计；9—水封闸阀；10—流量显示仪；11—调节阀；12—气蚀罐

由于这种回路做气蚀试验时，靠改变气蚀罐水面上的压力（真空度）来达到改变泵入口压力的目的，所以泵入口流动状况好，受装置的干扰极少，气蚀试验的重复性好，试验精度高，特别适用于低气蚀余量的泵。其缺点是泵安装困难。由于这种回路的入口管路系统和出口管路系统必须按规定尺寸连接，常会出现装不上泵或管路系统漏水、漏气等情况，没有像开式试验台那样的任意性，所以给泵安装带来许多麻烦。

第2章 压力测量

压力测量是水力机械经常用到的而且是很重要的一类测量。压力测量指的是总压测量和静压测量。

2.1 概述

2.1.1 压力的定义及测量方法

液体、气体的压力是指单位面积上所承受的垂直方向的表面力，工程技术上的压力对应物理学中的压强。在静止的流体中，由于不存在切向力，任何一点的压力与在该点所取的面的方向无关，在所有方向上压力大小相等，这种具有各向同性的压力称为静压。对于运动的流体而言，任何一点的压力是所取平面的方向函数。当所取平面的法向与流动方向一致时，所取得的压力最大，这个压力的最大值称为该点的总压。作用在与流体流动方向平行的面上的压力称为静压。总压与静压之差称之为动压，动压是流速的函数。

静压是液体在流动过程中实际存在的一种压力，它应该是压力的感受元件随液流一起运动时（即与液流无相对运动）所测出的压力。但实际上压力感受元件并不可能随液流一起运动。理论和实践都证明，在顺着液流方向的管壁或模型表面沿法向方向开小孔就可以感受当地的静压（图 2.1）。要准确测量壁面上该点处的局部静压，一般要求是测压孔直径 $d=0.5\sim 2\text{mm}$ ， $h\geq 2d$ ，测压孔的轴线与壁面垂直，孔内壁光滑，孔口无毛刺，无倒角保持尖锐，孔口附近的物面光滑无凹坑和凸出物，顺流的方向物面上压力梯度不能太大等。

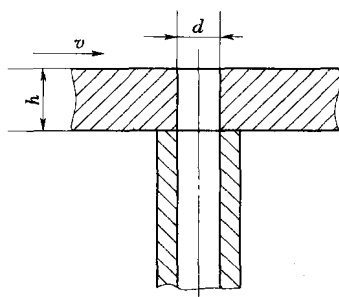


图 2.1 壁面开孔结构示意图

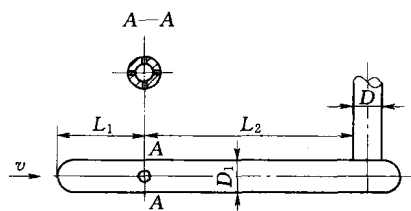


图 2.2 静压管

用静压管可以测量流场空间某一点的静压，静压管的结构如图 2.2 所示。它是一根前端封闭并呈半球形的管子，在顺流方向的壁面上开 4~8 个静压孔。静压孔的直径通常取 0.3~0.5mm，它的要求与上述壁面开静压孔相同， $L_1=(2\sim 8)D_1$ ， $L_2=(3\sim 8)D$ 。影响静压管测量准确度的因素主要有静压管的几何形状、开孔的位置、加工误差、流体的黏性和液流的偏角等。

测量流场空间某一点的总压，可在该点放置一总压管。最简单的总压管是一根开口端正对着液流方向的圆管。图 2.3 为 L 形总压管及其不同的头部形状示意图，孔的直径取不小于 0.5mm， $L\geq 3D$ ，以减少支杆部分对孔口的干扰。孔口不允许有毛刺和凹凸不平缺陷并形成尖边。

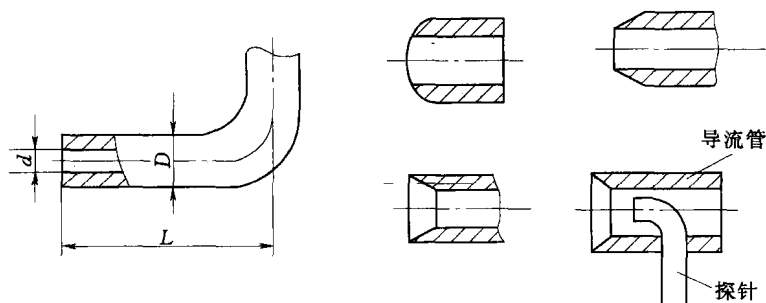


图 2.3 L 形总压管及其不同的头部形状示意图

2.1.2 压力的三种量度单位

第一种单位是从压强的基本定义出发，用单位面积上所承受的垂直方向的表面力表示。国际度量系统规定的压力的单位是帕斯卡（Pascal），用符号 Pa 表示。1 帕斯卡等于 1 牛顿的力作用在 1 平方米平面上形成的压力，即

$$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$$

由于帕斯卡太小，在使用中常采用兆帕（MPa）、千帕（kPa）作为压力的单位。换算关系为

$$1\text{MPa}=10^3\text{kPa}=10^6\text{Pa}$$

第二种单位是用标准大气压的倍数来表示。国际上标准大气参数规定，在纬度 45° 的海平面处，当温度为 0℃ 时，重力加速度为 $9.80665\text{m}/\text{s}^2$ ，水银密度为 $13595.1\text{kg}/\text{m}^3$ 时，760mmHg 所产生的压力为 101325Pa，此压力称为标准大气压力，用 atm 表示。一般说的大气压并不等于标准大气压。例如某点的绝对压力为 303.975kPa，则绝对压力为三个标准大气压，或相对压力为两个标准大气压。

第三种单位是用液柱高度来表示，常用水柱的高度或汞柱的高度，其单位为米水柱（mH₂O）、毫米水柱（mmH₂O）或毫米汞柱（mmHg）。

为了掌握上述单位的换算关系，兹将国际单位制和工程单位制中的各种压力的换算关系列表 2.1，以供换算使用。

表 2.1 各种压力单位换算表

公斤力/厘米 ² [at (kg/cm ²)]	兆帕 (MPa)	巴 (bar)	标准大气压 (atm)	毫米水柱 (mmH ₂ O)	毫米汞柱 (mmHg)
10.2	1	10	9.869	1.02×10 ⁵	7.50×10 ³
1.02	0.1	1	0.9869	10.2×10 ³	750
1	0.0981	0.981	0.9678	10 ⁴	735.6
1.0332	0.1013	1.0133	1	1.0332×10 ⁴	760
10 ⁻⁴	9.81×10 ⁻⁶	98.1×10 ⁻⁶	0.9678×10 ⁻⁴	1	73.56×10 ⁻³
1.36×10 ⁻³	1.33×10 ⁻⁴	1.333×10 ⁻³	1.316×10 ⁻³	13.6	1

注 1. 1 工程大气压 (at) = 1kg/cm²。
2. 毫米水柱是指 4℃ 状态的水柱高度，毫米汞柱是指 0℃ 状态的汞柱高度。

2.1.3 绝对压力、相对压力和真空度的含义及相互关系

在工程技术测量中，为了区别不同的测试目的，常用以下压力名词术语。

1. 绝对压力

绝对真空下的压力称为绝对零压，以绝对零压为基准来表示的压力叫绝对压力，用符号 p_{abs} 表示， $p_{abs} \geq 0$ 。

2. 大气压力

大气压力是地球表面上的空气柱重量所产生的力，即围绕地球的大气层，由于它本身的重力对地球表面单位面积上所产生的力。它随着某一地点离海平面的高度、所处的纬度和气象情况而变化，并且随着时间、地点的不同而变化，用符号 p_a 表示。

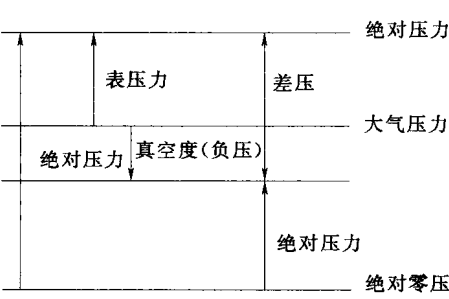
3. 相对压力

相对压力是以大气压力为零开始计量的压力，即为绝对压力与大气压力之差，用符号 p_r 表示。为了方便，以无角标符号 p 表示。

在许多工程设备中，由于其内外受大气压相互抵消而不显示其作用，因而大多数压力计算都是以大气压为零开始计量。例如在开口容器、在不可压液体的静压力计算问题中，一般都采用相对压力。

4. 真空度

工程上有绝对压力大于大气压的情况，也有绝对压力小于大气压力的情况，例如泵的吸入管中，其压力低于大气压，吸入管中的相对压力为负值。把绝对压力不足大气压的差值称为真空度。所以，真空度是指液体绝对压力小于大气压而形成的真空程度，用符号



$$p_v = p_a - p_{abs}$$

真空度常用液柱高度表示，上式可写为

$$h_v = \frac{p_v}{\rho g} = \frac{p_a}{\rho g} - \frac{p_{abs}}{\rho g}$$

真空度与相对压力的关系为

$$p_v = p_a - p_{abs} = -(p_{abs} - p_a) = |p|$$

为了区别以上几种压力，特将它们的关系表示在图 2.4 上。

图 2.4 各种压力之间的关系

从零压线计起的压力为绝对压力，绝对压力高于大气压时，相对压力为正值；绝对压力低于大气压时，相对压力为负值。相对压力为负值时，其绝对值就是真空度。

2.2 液柱式压力计

2.2.1 U形管压力计

U形管压力计是最普通的液柱式压力计，它是利用液柱所产生的静压力与被测的压力平衡，并根据液柱高度来确定被测压力大小的压力计。U形管压力计是一个两端开口的U形玻璃管，U形管中充有密度为 ρ_2 的工作液体（常用的有水、水银、酒精），其高度为U形管高度的1/2或1/3。当测量气体的压力时，U形管中可装入水或酒精；当测量液体压力时，可装入水银或其他重液。为了减少毛细现象造成的误差，一般采用加大U形管管径的办法，要求充水银 $d \geq 8\text{mm}$ ，充酒精 $d \geq 3\text{mm}$ 。压力计的一端与被测管路中密度为 ρ_1 、压力为 p 的液体相通，另一端通大气 p_a 。由于液柱式压力计直观、方便和经济，因而在工程上得到了广泛的应用。

其测量原理为当被测压力 p 未接入压力计时，管中两侧的液面处在同一高度的水平面（0—0）上。压力接通后，U形管中工作液体会出现下列两种现象中的一种。

第一种现象，当被测的相对压力 p 接通后，且 $p > p_a$ ，如图2.5所示，与测压点联通一侧液面下降，说明测压点的压力为正压。

根据流体静力学原理得

$$p + \rho_1 g Z + \rho_1 g \frac{\Delta h}{2} = \rho_2 g \Delta h$$

由此得相对压力

$$p = \rho_2 g \Delta h - \rho_1 g \frac{\Delta h}{2} - \rho_1 g Z$$

上式两边同除以 $\rho_1 g$ （即用被测液体的液柱高度来表示）得

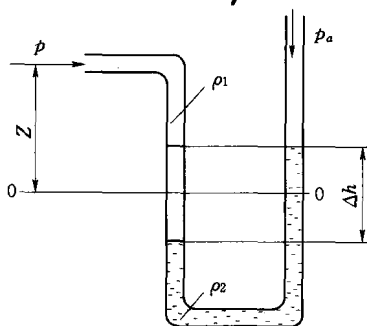


图 2.5 U形管压力计测正压

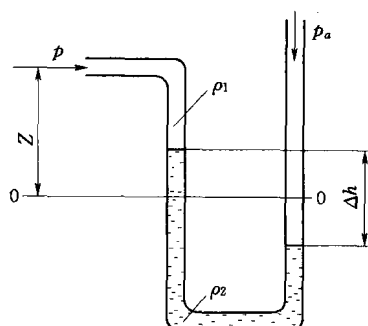


图 2.6 U形管压力计测负压

$$\frac{p}{\rho_1 g} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - \frac{1}{2} \right) \Delta h - Z \quad (2.1)$$

当 $\rho_2 = \rho_{\text{水银}} = 13.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_1 = \rho_{\text{水}} = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 时，代入上式得