

最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南

低压水轮发电机组 运行与维修

《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》编写组 编

桂家章 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南

低压水轮发电机组 运行与维修

《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》编写组 编

桂家章 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》中的《低压水轮发电机组运行与维修》分册,主要针对小型机组和微型机组,参考水利和电力系统工人职业技能鉴定的内容,从培训和学习角度出发,精心编写而成。

本书总共十四章,内容包括:水力学基础知识、电工与电子基础知识、金属材料及其热处理基础知识、机械识图基础知识、水轮机、水轮发电机组、低压水轮发电机组辅助设备、水轮机调速器、电气一次设备、电气二次设备、水轮发电机组机械部分的运行与维护、水轮发电机组电气部分的运行与维护、水轮发电机组的检修、水电站的安全运行。本书在编写过程中,密切结合当前我国小水电发展技术水平的实际,力求图文并茂、语言精练、通俗易懂,着重说明概念和应用,对理论公式不作深入推导,重点揭示公式、参数和概念的物理意义及其应用中需要解决的问题。

本书可作为小型水电站在职职工和新上岗职工的岗位技术培训、等级考试教材及日常工作的必备工具书,并且可作为中专及高职高专水电类相关专业的参考教材,也可供初中以上文化水平的技术工人学习、阅读,还可供有关技术人员查阅、参考。

图书在版编目(CIP)数据

低压水轮发电机组运行与维修/桂家章主编;《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》编写组编.
北京:中国水利水电出版社,2006

最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南
ISBN 7-5084-2325-9

I. 低... II. ①桂...②最... III. ①低电压—水轮
发电机—机组—运行—技术培训—教材②低电压—水轮
发电机—机组—维修—技术培训—教材 IV. TM312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 085948 号

书 名	最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南 低压水轮发电机组运行与维修
作 者	《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》编写组 编 桂家章 主编
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales @ waterpub. com. cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心) 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
经 售	
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 21.25印张 504千字 1插页
版 次	2006年7月第1版 2006年7月第1次印刷
印 数	0001—5100册
定 价	36.00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

序

党中央、国务院十分重视农村水电及电气化事业。上世纪八十年代初，在邓小平同志亲自倡导下，国务院决定在农村水电资源丰富的地区，开发农村水电，推动具有中国特色的农村电气化建设。“七五”至“九五”期间全国共建成了653个农村水电初级电气化县，有力地促进了农村经济发展和社会进步。2001年国务院批准在农村初级电气化县建设的基础上，建设更高标准的水电农村电气化县。“十五”期间，全国共建成410个水电农村电气化县，累计完成投资1151亿元，新增农村水电装机1060万千瓦，占同期全国农村水电新增装机的2/3。在电气化建设的带动下，农村水电快速发展，截至2005年底，全国农村水电装机容量达到4309万千瓦，占全国水电装机的37%，年发电量1357亿千瓦时，占全国水电发电量的34%。四川、云南、湖南、广西等省区，农村水电发电装机和年发电量均占所在省区电力总量的1/4以上。全国共建成了近800个县级电网和40多个区域性电网，近1/2的地域、1/3的县、1/4的人口主要靠农村水电供电。农村水电累计解决了3亿多无电人口的用电问题。

通过电气化建设，开发农村水电资源，形成了广大山区农村的发电和供电生产力，带动了其他资源的开发以及农村产品加工业、山区特色产业的发展，把山区的资源优势变成了经济优势；引导了农村劳动力的转移，增加了农民收入，促进了农村产业结构优化调整；带动了乡村公路、防洪灌溉设施、人畜用水设施以及广播、电视设施的建设，改善了农村基础设施、公共设施和生产生活条件，提高了农民的生活质量，促进了农村经济与人口、资源、环境协调发展。因此，水电农村电气化建设在水能资源丰富的广大山区、贫困地区的社会主义新农村建设中具有不可替代的作用。

在全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化建设新的历史时期，党中央、国务院将农村水电列为覆盖千家万户、促进农民增收效果更显著的农

村中小型基础设施和公共设施，并要求放在更加重要的位置，增加投资规模，充实建设内容，扩大建设范围。根据全国“十一五”水利发展规划和农村水电“十一五”及2020年发展规划，“十一五”期间将继续建设400个水电农村电气化县，扩大小水电代燃料生态工程建设的规模和范围，实施农村水电扶贫解困工程等，到2010年全国农村水电装机将达到5900万千瓦左右，再经过10年的努力，全国农村水电装机容量将达到1亿千瓦左右。

发展农村水电人才是关键。要保证农村水电事业的快速、健康发展，离不开成千上万的各类专业技术人才和管理人才。随着科学技术的迅猛发展，农村水电技术进步进一步加快，单机容量、变压器容量的不断增大，新技术、新产品的大量采用，特别是计算机自动化技术和网络技术的广泛应用，都给广大水电职工提出了新的更高的要求。为适应新时期加速培养水电专业人才，满足农村水电各专业、各层次职工的岗位培训需要，中国水利水电出版社组织全国小水电领域的专家学者，编写、出版了这套《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》（一套五本）。我希望全国农村水电行业以科学发展观为指导，认真贯彻落实中央关于建设社会主义新农村的战略部署，下大力气抓好职工的岗位培训工作，不断提高职工队伍的整体素质，保障农村水电及电气化事业的健康发展，为建设社会主义新农村做出新贡献。

水利部副部长

2006年7月

《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》

编写组成员名单

水轮发电机组及辅助设备运行与维修

主编 单文培 刘孟桦 洪余和

参编 单欣安 王 兵 艾水平 罗雪斌 王善书 孙玉民

水电站电气设备运行与维修

主编 陈化钢

参编 汪永华 储成流 彭 伟

水电站运行规程与设备管理

主编 刘洪林 肖海平

参编 秦 云 章香保 蔡华平 黎晓莉

水电站计算机监控技术

主编 谢云敏

参编 胡孝贵 孙振辉 吴永辉

低压水轮发电机组运行与维修

主编 桂家章

参编 尹学勇 文红民 洪余和

前 言

随着改革开放以来,我国的小水电事业得到了迅速发展,为我国广大农村,特别是边远山区提供了清洁、廉价的能源,有力地促进了这些地区的经济发展和两个文明建设,极大地改变了当地的经济和社会生活的落后状况。尤其是20世纪90年代末期以来,我国小水电投资的体制发生了根本变化,实现了多元化,进一步促进了小水电事业的蓬勃发展,可以说是新中国成立50多年来第二个建设高峰时期,对促进我国水力资源的开发和充分利用,缓解电力能源的紧张局面,改善农村生态环境和流域水土条件,发展当地经济等,都起到了积极的推动作用。

原全国政协副主席钱正英同志曾指出:“发展小水电的关键是培训人才”。如何把已建和在建的水电站管理好、用好,使其充分发挥作用,提高利用率和保证安全经济运行,是我国小水电事业的一项艰巨而长期的任务。由于小水电事业的迅速发展和水电技术水平的不断提高,对职工技能的要求也越来越高,因此急需对大批在职职工和新上岗职工进行技术培训。

为适应我国小水电发展新形势的需要,大力加强对小水电运行维护和管理人员的培训,中国水利水电出版社组织编写了这套《最新统一编写小水电培训教材暨岗位必备指南》。本套教材内容简明扼要、图文并茂、实用性强,并采用了我国当前执行的最新规程、规范、标准与名词、术语,力争反映我国21世纪初小水电行业的新技术和新水平。

这本《低压水轮发电机组的运行与维修》主要针对小型机组和微型机组,参考水利和电力系统工人职业技能鉴定的内容,从培训、学习的角度出发进行编写,便于系统学习和培训。

本书在编写过程中,力求语言精练、通俗易懂,着重说明概念和应用,对理论公式不作深入推导,重点揭示公式、参数和概念的物理意义及其应用中需要解决的问题。对设备的结构和组成,在编写中尽量多配置插图,便于

读者阅读，建立实物的空间概念。

本书可作为小型水电站在职职工和新上岗职工的岗位技术培训、等级考试教材及日常工作的必备工具书，并且可作为中专及高职高专水电类相关专业的参考教材，也可供初中以上文化水平的技术工人学习、阅读、还可供有关技术人员查阅、参考。

本书由桂家章和尹学勇等共同编写。电气部分即第二章、第九章、第十章和第十二章由尹学勇编写。此外，文红民和洪余和提供了大量资料，并参加了部分章节的编写和修订工作。其余部分由桂家章编写。桂家章担任主编并统稿。

本书在编写过程中，查阅了大量的文献、资料，参考和引用了有关书籍的部分内容，并且得到了各级水电管理部门和一些科研、设计、设备及运行单位的指导和大力支持，在此一并表示衷心地感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2006年5月

目 录

序

前 言

第一章 水力学基础知识	1
第一节 静水力学.....	1
第二节 水流运动的基本原理	5
第三节 水流形态和水头损失	11
第四节 压力管道中的水锤简介	16
复习思考题	20
第二章 电工与电子基础知识	23
第一节 电路常用物理量.....	23
第二节 正弦交流电的参数	26
第三节 单一参数和多种参数交流电路	28
第四节 三相交流电路	34
第五节 电子技术基础知识	36
第六节 晶闸管可控整流电路及其门极触发电路	41
第七节 滤波电路	44
复习思考题	46
第三章 金属材料及其热处理基础知识	47
第一节 金属材料的主要性能	47
第二节 常用金属材料	50
第三节 有色金属及合金和非金属	53
第四节 热处理基础知识.....	56
复习思考题	58
第四章 机械识图基础知识	59
第一节 制图的基本知识.....	59
第二节 三视图	61
第三节 基本要素的投影.....	64
第四节 基本形体的投影.....	67
第五节 组合体视图的分析和阅读	70

第六节 其它视图和剖视图	72
第七节 装配图	74
复习思考题	76
第五章 水轮机	79
第一节 水轮机的基本工作参数	79
第二节 水轮机的类型和型号	81
第三节 反击型水轮机的结构与组成	85
第四节 冲击型水轮机的结构	106
第五节 水轮机工作原理	112
第六节 水轮机的气蚀	116
第七节 水轮机特性	124
第八节 水轮机选型	129
复习思考题	135
第六章 水轮发电机组	137
第一节 水轮发电机组的组成与布置方式	137
第二节 小型立式机组的结构	145
第三节 卧式机组的结构	150
复习思考题	153
第七章 低压水轮发电机组辅助设备	154
第一节 油系统	154
第二节 压缩空气系统	158
第三节 水系统	160
第四节 水轮机主阀	164
复习思考题	171
第八章 水轮机调速器	172
第一节 水轮机调节的任务和途径	172
第二节 水轮机调节系统的组成	173
第三节 调速器的结构组成和动作原理	176
第四节 水轮机调节保证概述	185
复习思考题	188
第九章 电气一次设备	189
第一节 低压水轮发电机	189
第二节 电力变压器	195
第三节 高低压开关设备	199
第四节 其它常用电气设备和成套配电装置	210
第五节 小型水电站电气主接线	216
第六节 水电站的防雷保护和接地装置	218
复习思考题	224

第十章 电气二次设备	226
第一节 概述	226
第二节 常用电工仪表与测量	226
第三节 常用继电器	239
第四节 其它二次设备及控制电路	242
第五节 低压机组继电保护装置	247
第六节 同期装置	251
第七节 低压水轮发电机励磁系统	254
第八节 电气二次图编制与阅读方法	257
复习思考题	271
第十一章 水轮发电机组机械部分的运行与维护	273
第一节 低压水轮发电机组的运行参数及许可范围	273
第二节 机组投入运行前的准备工作	274
第三节 水轮发电机组正常运行的操作与维护 and 监视	276
第四节 调速器的运行与维护	279
第五节 机组机械部分的异常运行与事故处理	281
复习思考题	284
第十二章 水轮发电机组电气部分的运行与维护	285
第一节 水轮发电机的正常运行与操作	285
第二节 机组电气部分的异常运行与事故处理	289
第三节 水轮发电机组的事故停机	295
第四节 机组设备消防	296
复习思考题	297
第十三章 水轮发电机组的检修	298
第一节 机组检修概述	298
第二节 混流式水轮机的检修	301
第三节 水轮发电机的检修	303
第四节 卧式机组发电机转子串芯	306
第五节 卧式机组轴线找正	309
复习思考题	315
第十四章 水电站的安全运行	316
第一节 概述	316
第二节 安全技术与管理	317
第三节 安全作业	320
第四节 触电和火灾的防范及急救	323
复习思考题	327
参考文献	328

第一章 水力学基础知识

教学要求 掌握液体的性质和静水压强的基本规律以及压强的单位和工程上压强的各种表达方式；掌握水流运动的基本原理包括流线的概念、水流运动的连续性原理、恒定流的能量原理和动量定理；掌握水流的型态和水头损失以及水击现象。

本章教学内容初级工和中级工必须掌握，高级工在了解的基础上，不作具体教学要求。

第一节 静 水 力 学

水力学的任务是研究液体运动的规律，并应用这些规律解决实际问题。液体的运动规律，一方面与液体外部的作用条件有关，更主要的是决定于液体本身的内在性质。

一、液体的性质

(一) 基本性质

自然界的物质有固体、液体和气体三种存在形式。液体和气体统称流体。流体没有固定的形状，很容易流动，它的形状随容器而定。液体与气体的区别为：液体具有不可压缩性，能保持一定的体积，还可能有自由表面。

液体是由运动着的分子组成的。液体的质点是由液体分子组成的实体。液体是质量均匀、各向同性的连续介质。

(二) 物理力学性质

1. 密度

液体单位体积中所具有的质量称为液体的密度 ρ 。如有一质量为 m 的均质流体，其体积为 V ，则其密度 ρ 可表示为： $\rho = \frac{m}{V}$ 。在国际单位制中，质量的单位为千克 (kg)，长度单位为米 (m)，则密度的单位为千克/米³ (kg/m³)。在一个标准大气压 (1atm $\approx$ 0.1MPa) 下，温度为 4℃ 时，水的密度为 1000 kg/m³。液体的密度随温度和压强的变化很小，一般可视为水的密度为常数。

2. 容重

液体单位体积中所具有的重量 G 称为容重 γ 。对于某一重量为 G ，体积为 V 的均质液体，其容重 γ 可表示为： $\gamma = \frac{G}{V}$ 。因 $G = mg$ ，所以， $\gamma = \rho g$ 或 $\rho = \gamma/g$ 。容重的单位为牛顿/米³ (N/m³)。水的容重在一个大气压下和 4℃ 时为

$$\gamma = \rho g = 1000 \times 9.8 = 9800 \text{ (N/m}^3\text{)}$$

【例 1-1】 求在一个大气压下，4℃时一升水的重量和质量。

解：已知体积 $V = 1\text{L (升)} = 0.001\text{ m}^3$

水的容重为 $\gamma = 9800\text{ N/m}^3$ ，于是可得 1 升水的重量为

$$G = \gamma V = 9800 \times 0.001 = 9.80\text{ (N)}$$

水的密度为 $\rho = 1000\text{ kg/m}^3$ ，于是可得 1 升水的质量为

$$m = \rho V = 1000 \times 0.001 = 1\text{ (kg)}$$

3. 粘滞性

液体运动时若质点之间存在着相对运动，则质点之间就要产生一种内摩擦力来抵抗相对运动，这种性质称为液体的粘滞性，此内摩擦力称为粘滞力。粘滞性是液体固有的物理属性。

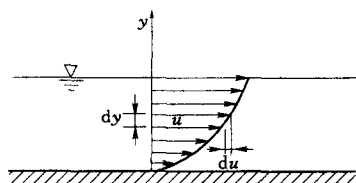


图 1-1 渠道断面流速分布

如图 1-1 所示，某渠道端面水流速度的分布情况，靠近底层的第一层极薄水层贴附于壁面上不动，第一层将通过摩擦作用影响第二层的流速，而第二层又通过摩擦作用影响第三层的流速，依此类推，相距渠底的距离愈大，壁面对流速的影响愈小。于是，靠近渠底壁面的流速较小，远离壁面的流速较大。由于各层流速不同，它们之间就有相对运动，两液层之间就产生内摩擦力。所产生的内摩擦力总是抵抗其相对运动的。

由于运动液体存在内部粘滞力，于是液体在运动过程中为克服内摩擦阻力就要不断地消耗液体的能量。所以粘滞性是引起液体能量损失的根源。

二、静水压强

水处于静止状态时的压力叫静水压力，水在流动时的压力叫动水压力。

静止液体内的压力状况，常用单位面积上静水的压力——静水压强来表示。其数学表达式为

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-1)$$

式中 P ——静止液体作用于某受压面上的总压力，叫静水总压力，N；

A ——受压面积， m^2 ；

p ——静水压强， N/m^2 ， $1\text{N/m}^2 = 1\text{Pa}$ （帕斯卡）。

静水内部任何一点各方向的压强大小相等，且静水压强的方向永远垂直指向作用面（也叫受压面）。

三、静水压强的基本定律

由生活常识可知，水的深度越深，压强越大，因此，静水压强是随水深的增加而增大的。如图 1-2 所示，静止状态具有自由表面的水体仅在重力作用下，其表面所受压强为大气压 p_a ，则水下距离自由表面的距离为 h_1 、 h_2 处的压强可表示为

$$\begin{aligned} p_1 &= p_a + h_1 \gamma & p_2 &= p_a + h_2 \gamma \\ \Delta p &= p_2 - p_1 = (p_a + h_2 \gamma) - (p_a + h_1 \gamma) \\ &= (h_2 - h_1) \gamma = \Delta h \gamma \end{aligned} \quad (1-2)$$

上式表明：在水中深处的静水压强比浅水处大。向下每增加 1m 深度，静水压强就增

大为 $\Delta h\gamma = 9.8 \times 1 = 9.8 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ 。

若某一封闭容器中的水体具有自由表面, 如图 1-3 所示, 其表面压强为 p_0 (p_0 可以大于或小于大气压强), 则可推算水体表面下深度为 h 的任一点处的静水压强 p 为

$$p = p_0 + h_2\gamma \quad (1-3)$$

式 (1-3) 是常见的静水压强基本方程式。它表明: 仅在重力作用下, 液体中某一点的静水压强等于表面压强加上液体的容重与该点淹没深度的乘积。

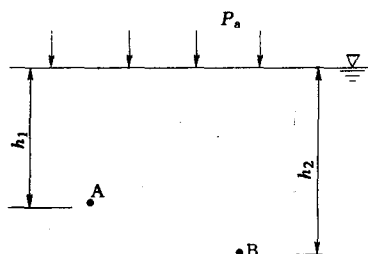


图 1-2 静水压强

由此可见, 深度为 h 处的静水压强 p 是由两部分组成, 即从液体表面传递来的表面压强 p_0 及单位面积上高度为 h 的液柱重量。

由上述可推知, 在静止液体中, 若表面压强 p_0 由某种方式使之增大, 则此压强可大小不变地传至液体中的各个部分。这就是帕斯卡原理。静止液体中的压强传递特性是制作液压千斤顶、水压机等很多机械的原理。

在上述静水压强计算中, 任一点的位置是从水面往下计算的, 用水深 h 表示。若取同一的水平面 0-0 为计算基准面, 任意一点距离基准面的高度称为某点的位置高度 z , 则可把公式 (1-2) $\Delta p = p_2 - p_1 = \Delta h\gamma$ 变换成另一表示形式。即

$$p_2 - p_1 = (z_1 - z_2)\gamma$$

把上式两边同时除以 γ , 移项后可得

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 为静水压强分布规律的另一表达式。它表明在静止的液体中, 位置高度 z 越大, 静水压强越小; 反之, 静水压强越大。

【例 1-2】求水库中水深为 5m、10m 处的静水压强。

解: 已知水库表面的压强为大气压强, 水的容重 $\gamma = 9.8 \text{ kN/m}^3$ 。

水深为 5m 处 $p = \gamma h = 9.8 \times 5 = 49 \text{ (kPa)}$

水深为 10m 处 $p = \gamma h = 9.8 \times 10 = 98 \text{ (kPa)}$

在水力学中, 常把 z 称为位置高度 (单位: m), $\frac{p}{\gamma}$ 称为压强水头 (单位为 m)。由物理学可知, 质量为 m 的物体在高度 z 的位置时具有位置势能 mgz (简称位能); 而液体除了位置势能外, 其液体内部的压力还有做功的能力, 即压力势能。质量为 m 的水体质点所具有的压力势能为 $mg \frac{p}{\gamma}$ 。则, 静止水体中某一质点所具有的全部势能为

$$mgz + mg \frac{p}{\gamma} = mg \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)$$

一般在研究分析时常用单位重量水体所具有的势能即单位势能的概念, 单位势能以 E 表示, 即

$$E = z + \frac{p}{\gamma}$$

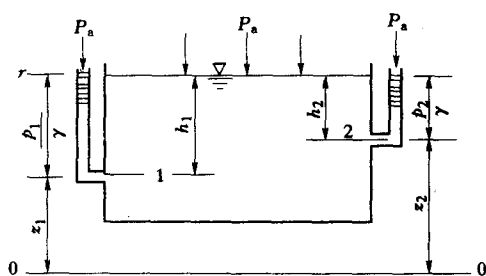


图 1-3 测压管水头

如图 1-3 所示的容器中，若在位置高度为 z_1 和 z_2 的边壁上开有小孔，孔口处连接一垂直向上的开口玻璃管，通称测压管，可发现各测压管中均有水柱升起。测压管液面上为大气压。测压管中水面上升高度表征静水中各点压强的大小。通常称 $h_1 \left(\frac{p_1}{\gamma} \right)$ 、 $h_2 \left(\frac{p_2}{\gamma} \right)$ 为压强水头或测压管高度。这说明在水的容重 γ 为一定值时，一定的液柱高度 h 就相当于确定的静水压强值。

在水力学中，通常把某点的位置高度和压强水头之和 $z + \frac{p}{\gamma}$ 叫做该点的测压管水头。连接各点测压管中水面的线，称为测压管水头线。静止状态的水仅受重力作用，其测压管水头线必然为水平线。

四、静水压强的表示方法

(一) 压强的单位

1. 以应力单位表示

压强用单位面积上受力的大小，即应力单位表示，是压强的基本表示方法，单位为 Pa (帕斯卡) 或 N/m^2 。

2. 以大气压表示

物理学中规定：以黄海平面的平均大气压 760mm 高的水银柱的压强为一标准大气压 (代号 atm)，其数值为

$$1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 101.3 \text{ kPa}$$

工程中，为了计算简便，规定了另一概念：工程大气压

$$1 \text{ 工程大气压} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2 = 98.0 \text{ kPa}$$

3. 以水柱高度表示

由于水的容重 γ 为一常数，水柱高度 $h (= p/\gamma)$ 的数值就反映压强的大小，工程上常用这种表示方法。

1 工程大气压相当于 10m 水柱高度。即

$$1 \text{ 工程大气压} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2 = 98.0 \text{ kPa}。$$

1 标准大气压 (1atm) 相当于 10.33m 水柱高度。

(二) 绝对压强与相对压强

对于同一压强，由于采用不同的起算基准，会有不同的压强数值。

高度总是相对某一基准而言的。例如某闸的闸前水位为 82.8m，意思是说高出黄海平均海平面 82.8m。因为我国规定是从黄海平均海平面的高程作为 0 的。

物理学中通常以没有空气的绝对真空，即压力为零作基准算起的，这种压强称为绝对压强，以 $p_{\text{绝}}$ 表示。

工程实践中，水流表面或建筑物表面多为大气压 p_a ，为了简化计算，采用以大气压为零作为计算的起始点。这种以大气压强为零算起的压强称为相对压强。以 $p_{\text{相}}$ 表示。如

压力表的读数即为相对压强。所以， $p_{\text{绝}} = p_{\text{相}} + p_a$ ，或 $p_{\text{相}} = p_{\text{绝}} - p_a$ 。显然，相对压强是指超过大气压的压强数值。

(三) 真空压强

工程实践中常会遇到压强小于大气压的情况，这时称为发生了真空，即 $p_{\text{绝}} < p_a$ 。规定为：真空压强 $p_{\text{真}}$ 是绝对压强不足一个大气压的差值，简称真空值。这时，真空值 $p_{\text{真}}$ 与相对压强和绝对压强的关系可表示为

$$p_{\text{真}} = p_a - p_{\text{绝}} = -p_{\text{相}} \quad (1-5)$$

真空值的大小用所相当的水柱高度表示，称为真空高度

$$h_{\text{真}} = \frac{p_{\text{真}}}{\gamma}$$

水泵能把水从低处吸入并压到一定的高度，就是利用真空这个道理。

大气压强、相对压强、绝对压强和真空压强的表示如图 1-4 所示。

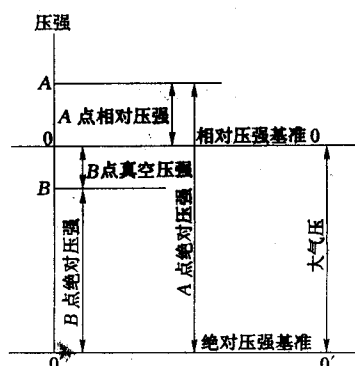


图 1-4 各种压强示意图

第二节 水流运动的基本原理

一、水流运动的概念

1. 流线与迹线

由于水流运动相当复杂，人们对其运动规律的分析带来了很大的困难，但为了利用其能量资源，必须了解、掌握其运动规律，需要采用一定的方法来研究其运动规律。

一种方法是拉格朗日法，它是用迹线来描述水流运动的。迹线是指一个液体质点在一段时间内的运动轨迹线。由于质点的运动轨迹十分复杂，而且水流中又有很多的质点，用这种方法来研究水流运动是非常困难的。

另一种方法是欧拉法，它是用流线来描述水流运动的。流线是指绘于流动区域内的曲线，它能表示位于曲线上所有水流质点某一瞬间时的流速方向。即位于流线上的各水流质点，其流速方向都与曲线在该点相切，如图 1-5 所示。

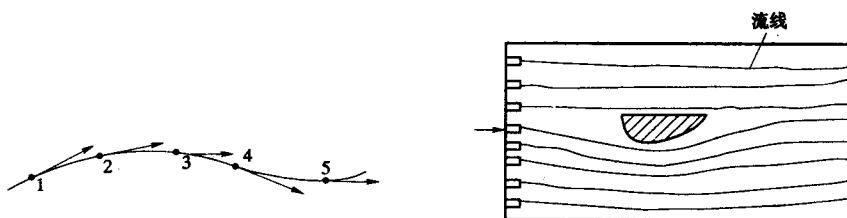


图 1-5 流线

流线具有以下性质：一般情况下，流线不是折线，也不能相交；流线上的水流质点，都不可能有横越流线的流动；流线上任一点的切线方向就是该点的流速方向。

工程上常用流线概念来描述水流现象，图 1-6 表示水流经过溢流坝和水闸时用流线

描绘的流动情况。从图形可以看出：流线的疏密程度反映了流速的大小，流线密的地方流速大，流线稀的地方流速小；这是因为端面小的地方流线密，要通过同样多的流量必须流得快些；相反端面大的地方流线稀，流速慢些。其次，流线的形状和固体边界的形状有关。离边界越近，边界的影响越大，流线的形状越接近边界的形状。在边界较平顺处，紧靠边界的流线形状与边界形状完全相同。在边界形状变化急剧的地方（流速很小除外），边界附近的液体质点不可能完全沿着边界运动，因此流线与边界脱离，即产生脱流，在主流区和边界之间形成旋涡区。

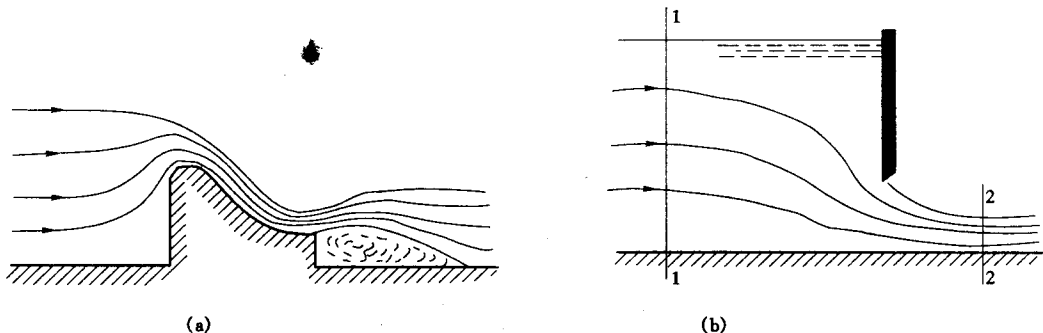


图 1-6 边界与流线
(a) 溢流坝；(b) 水闸

2. 恒定流与非恒定流

如图 1-7 所示，水从水箱的孔中流出，图 1-7 (a) 保持水箱中的水位不变，则小孔中的射流也将保持不变，射流各点上的速度也不随时间变化，这种运动要素不随时间变化的水流称为恒定流。恒定流时流线与迹线重合。而在图 1-7 (b) 中，水箱中的水位随着时间的推移水位将逐渐下降，从而小孔中的射流也会越来越远，在不同的时间，射流的位置和各点的流速都随着时间的推移而发生变化。这种运动要素随着时间不断变化的水流称为非恒定流。在恒定流中，流线与迹线就不会重合。可见非恒定流比较复杂，以后除了特殊情况外，我们主要研究恒定流。

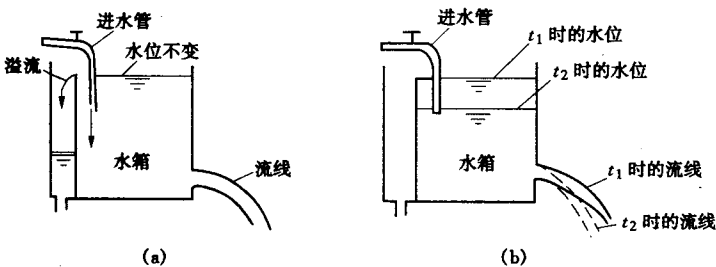


图 1-7 恒定流与非恒定流
(a) 恒定流；(b) 非恒定流

3. 过水端面、流量和断面平均流速

在水流中取一垂直于水流方向（即垂直于流线）的横断面，它过水的那部分面积称为