

交通中等专业学校统编教材

桥涵水力水文

Qiaohan Shuili Shuiwen

(公路与桥梁工程专业用)

俞高明 主编

张润虎 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

全书包括水力学基础、桥涵水文、桥位设计与小桥涵孔径选择等主要内容。主要叙述水静力学、水动力学基础、明渠均匀流、明渠非均匀流; 河流概论、水文调查与形态勘测、大中桥设计流量、小桥涵设计流量、大中桥桥孔和桥面标高、桥下冲刷、小桥涵孔径等, 并附有复习思考题、习题和实验(实习)指导书。

本书为中等专业学校公路与桥梁工程专业教材, 也可供有关专业工程技术人员参考。

交通中等专业学校统编教材

桥 涵 水 力 水 文

(公路与桥梁工程专业用)

俞高明 主编

张润虎 主审

插图设计: 高静芳 版式设计: 刘晓方 插页: 2 责任校对: 刘高彤

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

印刷

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 字数: 千

199 年 月 第 版

199 年 月 第 版 第 次印刷

印数: 册 定价: 元

ISBN 7-114- -

前 言

本书是根据交通部教育司颁发的中等专业学校公路与桥梁工程专业的第三轮教学计划及教学大纲,在1988年编《桥涵水力水文》教材基础上重新编写的。教学总时数为90学时。

全书共分十一章。其中绪论第二节,第二章、第三章、第四章由浙江交通学校莫依华编写;第一章由新疆交通学校杜月皎编写;绪论第一节、第五章至第十一章(包括附图1至附图4)由安徽交通学校俞高明编写。

全书由安徽交通学校俞高明主编,贵州交通学校张润虎主审。

本书在编审过程中,得到了南京、四川、吉林、河南交通学校以及其他兄弟学校有关教师的大力支持;1997年1月在南京交通学校召开的审稿会,参加人员除主编、主审、参编外,还有:谢兴黄、沈秋雁、李辅元、汪新梅等,对书稿提出了有益的建议,并对大部分例题计算进行了校核,在此一并表示谢意。

由于编者水平有限,敬请读者提出宝贵意见,以便再版时修改。

目 录

绪论.....	1
第一节 本课程的学习目的与任务.....	1
第二节 液体的主要物理性质.....	1
复习思考题.....	5
第一章 水静力学.....	6
第一节 静水压强.....	6
第二节 静水压强的分布规律.....	9
第三节 静水总压力	14
第四节 静水压强实验	18
复习思考题	20
习题	21
第二章 水动力学基础	24
第一节 概述	24
第二节 恒定流的连续性方程	29
第三节 恒定流的伯诺里方程	30
第四节 伯诺里方程的应用	44
第五节 恒定流的动量方程	49
第六节 水动力学实验	52
复习思考题	58
习题	59
第三章 明渠均匀流	63
第一节 明渠均匀流的水力特性和基本公式	63
第二节 渠道的水力计算	69
第三节 管中均匀流	72
复习思考题	75
习题	76
第四章 明渠非均匀流	77
第一节 断面比能及临界水深	77
第二节 明渠非均匀流方程	84
第三节 水面曲线的计算与绘制	90
第四节 水跌与水跃	92
第五节 陡坡过水构造物.....	102
第六节 明渠非均匀流的基本水力现象演示.....	114
复习思考题.....	115

习题.....	116
第五章 河流概论.....	118
第一节 河川径流.....	118
第二节 泥沙运动.....	122
第三节 河段分类.....	124
复习思考题.....	128
第六章 水文调查与形态勘测.....	129
第一节 河床断面测量和水文观测.....	129
第二节 形态调查.....	133
第三节 实测流量计算.....	141
水文测流及河段分类认识实习指导书.....	144
复习思考题.....	146
习题.....	147
第七章 大中桥设计流量推算.....	148
第一节 水文统计基本知识.....	148
第二节 经验频率曲线.....	150
第三节 理论频率曲线.....	154
第四节 各种流量间的关系.....	168
第五节 有观测资料的规定频率流量计算.....	169
第六节 缺乏观测资料的规定频率流量推算.....	185
复习思考题.....	194
习题.....	195
第八章 小桥涵设计流量推算.....	196
第一节 暴雨推理法.....	196
第二节 直接类比法.....	204
第三节 形态调查法.....	214
第四节 小桥涵位设计流量推算和各种流量计算方法的比较.....	219
复习思考题.....	221
习题.....	221
第九章 大中桥桥孔和桥面标高.....	222
第一节 桥位选择与桥位调查.....	222
第二节 桥孔长度确定和桥孔布设.....	225
第三节 桥面中心和引道路堤最低设计标高的确定.....	230
复习思考题.....	244
习题.....	244
第十章 桥下冲刷.....	246
第一节 桥下一般冲刷.....	246
第二节 桥墩局部冲刷.....	249
第三节 确定墩台基底最浅埋置深度.....	254
第四节 调治构造物.....	260

复习思考题.....	263
习题.....	263
第十一章 小桥涵孔径.....	264
第一节 小桥孔径计算.....	264
第二节 涵洞孔径的确定.....	274
第三节 小桥涵进出水口及处理方法.....	285
复习思考题.....	290
习题.....	290
附图	插页
主要参考书目.....	293

绪 论

第一节 本课程的学习目的与任务

公路路线上的桥梁和涵洞,不仅是用来跨越河流、沟壑和承受车辆及人群荷载的承重构造物,同时又是在河流上担负着泄洪输沙,保证道路畅通无阻、安全使用的泄水建筑物。因此,在公路桥涵设计中,除按承受车辆荷载为主进行的结构设计外,还必须首先按满足泄水要求进行总体设计。前者在《桥梁工程》课中讲述,后者则属本课程研讨的问题。

公路桥涵的总体设计中,包含有选择桥涵的位置、孔径、桥面中心标高和基础底面埋置深度,以及相应配置的调治构造物和陡坡过水建筑物等。为了解决这些专业技术问题,必须了解和掌握有关河床演变的发展趋势、洪水情况,水流自身以及对结构物的作用规律等专业基础知识;同时还必须掌握诸如设计流量、洪水位和流速等水力水文要素的分析和计算方法,本课程正是围绕这些问题而设置的。由此可见,本课程是一门由技术基础与专业紧密结合的课程。

本课程的内容结构由三大部分组成。按编排顺序第一部分为水力学,主要包括水静力学、水动力学基础知识、明渠均匀流、非均匀流以及陡坡消能设施的水力计算。第二部分为桥涵水文,主要包括河流概论、水文调查与形态勘测、大中桥和小桥涵的各种设计流量推算方法。第三部分为水力水文知识在公路桥涵设计中的具体应用,主要介绍各种大中桥桥位布置、桥孔确定、桥面设计标高、桥下冲刷深度及小桥涵孔径等确定方法。

本课程的学习目的是:学会运用水力水文的有关知识,进行综合分析,为路基排水、小桥涵设计和施工,提供必要的水力水文方面的数据和结论,同时对一般大中桥会进行桥位设计。

本课程的任务,是研究水体平衡、水流运动和水文现象等规律,以及结合公路桥涵的总体设计,进行水力水文计算的基本理论和方法。具体的要求是:会确定公路过水建筑物结构的水力荷载,输水能力计算及陡坡消能设施水力验算;会进行野外水文调查与形态勘测,并且运用资料推求桥涵断面的设计流量;会合理选择桥位,确定桥梁跨径和桥面标高,确定最大冲刷线标高及墩台基底埋置深度,同时配置相应的调治构造物;会通过查表或计算确定小桥涵洞孔径,并合理选择进出水口处理方法。

第二节 液体的主要物理性质

外因是变化的条件,内因是变化的根据。液体受力而作机械运动,一方面与作用于液体的外部因素和条件有关,但主要是决定于液体本身的内在物理性质。从宏观角度来探讨液体的物理性质是研究液体运动的出发点,为此,先讨论液体(主要是水)的几个主要物理性质。

一、液体的密度和重度

液体和固体一样,也具有质量和重力,质量单位为 kg、t,重力单位为 N、kN。

单位体积液体的质量称为液体的密度,以符号 ρ 表示,其单位为 kg/m^3 、 t/m^3 。对于均质液体,设其体积为 V ,液体的质量为 m ,则

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (0-1)$$

质量为 m 的液体,其所受的重力 G 的大小为

$$G = mg \quad (0-2)$$

式中: g ——重力加速度(本书 $g = 9.8\text{m}/\text{s}^2$)。

单位体积液体的重力称为液体的重度(或容重),以 γ 表示,其单位为 N/m^3 、 kN/m^3 。对于均质液体,设其体积为 V ,重力为 G ,则

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (0-3)$$

将式(0-2)代入式(0-3)得:

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (0-4)$$

或
$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (0-5)$$

在一个标准大气压强条件下,清水的密度和重度随温度的变化见表 0-1,几种常见液体的重度见表 0-2。

水的密度和重度

表 0-1

温度()	0°	4°	10°	20°	30°
密度(kg/m^3)	999.87	1000.00	999.73	998.23	995.67
重度(N/m^3)	9798.73	9800.00	9797.35	9782.65	9757.57
温度()	40°	50°	60°	80°	100°
密度(kg/m^3)	992.24	988.07	983.24	971.83	958.38
重度(N/m^3)	9723.95	9683.09	9635.75	9523.94	9392.12

几种常见液体的重度

表 0-2

液体名称	水 银	汽 油	酒 精	四 氯 化 碳	海 水
重度(kN/m^3)	133.280	6.664 ~ 7.350	7.7783	15.600	9.996 ~ 10.084
测定温度()	0°	15°	15°	20°	15°

二、液体的膨胀性和压缩性

液体随温度升高体积膨胀的性质称为液体的膨胀性。液体的宏观体积,在温度升高时膨胀,其密度则减小。从表 0-1 可以看出,在常温下水的密度变化幅度是很小的。例如,温度由 0 到 30 ,密度只减小 0.4%,故工程上一般可将水的密度看作常数。值得注意的是,当水结冰时,密度只有 $917\text{kg}/\text{m}^3$,冰的体积要比水的体积增大 10%,故水管、水泵及公路路基等要注意防冻。

液体的体积随所受压力的增大而减小的特性称为液体的压缩性。当液体承受正向压力时,其宏观体积将有所减小,密度有所增大,除去正向压力后,液体的体积能消除变形,恢复原状,

这就是液体的弹性。

液体的压缩性和弹性,可分别用体积压缩系数 β 和体积弹性系数 k 来度量。液体的压缩系数 β 是液体相对压缩值 $\frac{dv}{v}$ 与液体压强增量 dp 的比值,即

$$\beta = - \frac{dv/v}{dp} \quad (0-6)$$

值越大,表示越易压缩。液体的体积总是随压强增大而减小,即 dv 有负值, dv 与 dp 的符号相反。为使 β 为正,故式(0-6)右端取负号。 β 的单位为 m^2/N 。

β 的倒数为弹性系数 k , 即

$$K = - \frac{dp}{dv/v} \quad (0-7)$$

k 值越大,表示越不易压缩, k 的单位为 N/m^2 。

不同种类的液体具有不同的 β 值和 k 值,同一种液体的 β 值和 k 值也随压强和温度的变化而略有变化。例如,在普通水温和压强在 50MPa 内,水的平均 k 值均为 $2.06 \times 10^9 N/m^2$, β 的平均值约为 $0.485 \times 10^{-9} m^2/N$, 即每增加 100kPa, 水的体积比原来体积只缩小约为二万分之一。在实用中,一般认为液体是不可压缩的,即认为液体的体积和密度不随压力而变化。但讨论压强变化很大的水力现象(如水中爆炸或水击问题)时,就必须考虑液体的压缩性。

综上所述,均质液体的重度和密度均随液体温度和压力的变化而有微小的变化,但实用上亦看作常数。对于水,常以 100kPa 下,温度为 4℃ 时的重度 $\gamma = 9800 N/m^3$, 密度 $\rho = 1000 kg/m^3$ 作为计算值。

三、液体的流动性和粘滞性

液体与固体的主要区别,在于它们对外力的抵抗能力。固体的分子作用力较强,能维持一定体积和形状,静止时可以承受切向应力。与此相反,液体由于分子之间的距离较大(水分子之间的距离约为 $3.07 \times 10^{-8} cm$), 分子之间的引力(表现为内聚力)很小,分子可以结群游动,不能维持一定的形状;静止时不能承受切向应力。一旦受到无论多么小的拉力或剪力,都能使液体发生很大的变形,外力不去,变形不止。因此,液体在静止时,只有法向应力而没有切向应力。液体这种宏观性质称为流动性或易流性。例如河道坡降虽小,河流却日夜川流不息;又如静止液体不可能维持倾斜的自由表面等,都是液体易流性的例证。

液体的流动性说明液体在静止状态下不能承受剪力作用,然而流动一经发生,在液体内部相对运动的液层间便出现成对的切力(亦称内摩擦力),并阻碍着液体内部的相对运动(即变形)。就是说,液体具有运动状态下抵抗剪切变形的能力,称为液体的粘滞性或简称为粘性。相对运动的液层间出现的成对切力(内摩擦力)称为粘滞力,以 T 表示,如图 0-1b)所示。

液体的粘滞性的存在可用牛顿平板实验来阐明,如图 0-1a)所示,在两块水平放置的相距为 H 的平板之间充满液体,下板固定不动,上板面积为 A ,用 F 力拖动上板以 v 的速度向右作匀速运动。这样,粘附于上板的液体速度为 v ,粘附于下板液体的速度为零,其余液体则象薄纸片一样,作层状运动。如果通过任意点 c 作水平面,取上部作隔离体,如图 0-1c)所示,分析它在水平方向受力情况。很显然,拖动上板所需的力 F , 必等于液层接触面上的粘滞力 T , 即 $F = T$ 。实验表明,液体质点在不混杂分层运动时,液体内的粘滞力 T 与平板面积 A 和流速梯度 $\frac{du}{dn}$ (沿 n 轴方向单位距离的流速变化值)成正比,并与液体的粘滞性有关,而与接触面上的压力无关。

这一结论称为牛顿内摩擦定律;其表达式为:

$$T = \mu \frac{du}{dn} \quad (0-8)$$

式中: μ ——动力粘滞性系数,反映液体粘滞性大小的系数,单位为 Pa · S。

在水力计算中,液体动力粘滞性系数 μ 和密度常以比值形式出现,以 ν 表示,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (0-9)$$

亦反映液体粘滞性大小,因其量纲中含有运动学的量纲,故称为运动粘滞性系数,单位为 cm^2/s 、 m^2/s 。

液体的 μ 和 ν 值与液体的种类和温度有关。一个标准大气压下,水在不同温度时的粘滞性系数见表 0-3。

图 0-1

水的粘滞系数

表 0-3

温 度 ()	$\mu \times 10^3$ (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ m/s ²	温 度 ()	$\mu \times 10^3$ (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ m/s ²	温 度 ()	$\mu \times 10^3$ (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ m/s ²
0	1.781	1.785	25	0.890	0.893	70	0.404	0.413
5	1.518	1.519	30	0.798	0.800	80	0.354	0.364
10	1.307	1.306	40	0.653	0.658	90	0.315	0.326
15	1.139	1.139	50	0.547	0.553	100	0.282	0.294
20	1.002	1.003	60	0.466	0.474			

液体在流动过程中,粘滞力作功而不断消耗机械能,这种液流机械能的消耗称为液流的能量损失。因此,粘滞性是引起液体能量损失的主要根源。能量损失是水力学中一个重要问题,将在第二章中论述。

在分析水力学问题时,为了简化起见,有时不考虑液体粘滞性的影响,这种假想无粘滞性的液体称为理想液体,而具有粘滞性的液体则称为实际液体。分析理想液体所获得的研究成果可作为进一步探讨实际液体运动规律的手段。

四、表面力与质量力

液体总是与周围介质(包括固体、液体和气体)相接触,其中液体和气体的交界面,称为自由面。凡通过这种接触面而起作用的力,称为表面力,其大小与接触面的面积有关。例如,以整个水箱中的水作为隔离体,它所受的表面力,一是作用于上部自由表面的大气压力,二是水箱边壁对液体的反作用力。

作用于每个液体质点并通过液体的质量而起作用的力,称为质量力,其大小与质量成正比。在均质液体中,质量与体积成正比,故质量力又可称体积力。重力与惯性力均属于质量力。

以上讨论了液体的主要物理性质:密度和重度、膨胀性和压缩性、流动性和粘滞性。表面力和质量力。此外,还有其它方面的物理性质,例如表面张力、毛细现象、热传导等,因与本课程关

系不大,不再一一介绍。

复习思考题

1. 学习本课程目的与任务是什么?
2. 液体有哪些主要物理性质? 研究液体运动,一般主要考虑哪些物理性质? 对水来说,衡量这些物理性质的各种系数值为多少?
3. 何谓液体的粘滞性;液体的粘滞力的大小与哪些因素有关?
4. 何谓理想液体? 理想液体运动的切应力 $\tau = ?$ 静止液体的切应力 $\tau = ?$
5. 理想液体与实际液体有何区别? 引用理想液体概念有什么作用和问题?

第一章 水静力学

水静力学的任务是研究液体平衡规律及其在实际中的应用。液体的平衡状态,是指液体质点间以及液体与固体壁面之间不存在相对运动,而处于相对平衡的状态。

研究水静力学的一个重要目的,就是要确定液体对边界作用面的作用力。许多水工建筑物的表面直接与液体接触,如坎、闸门等,要进行这些建筑物的设计,首先必须计算作用于这些边界作用面上的水压力。

本章主要讨论静水压强的特性,建立静水压强方程,进而研究静水压强的分布规律,并计算作用在平面上的静水总压力。

第一节 静水压强

一、静水压强及其特性

1. 静水压强

由液体的物理性质可知,液体在平衡状态,即当液体质点之间没有相对运动时,液体的粘滞性便不起作用,因而静止液体不呈现切向应力,且液体几乎不能承受拉应力,所以,静止液体质点间的相互作用只能通过压应力形式表现出来。

如设置在泄洪涵洞前的平板闸门,当提起闸门时,需要很大的拉力,其主要原因是水库中的水体对闸门作用了很大的压力所造成。这说明,静止液体对与之相接触的固体边界作用有压力。并由此可知,就是在液体内部,一部分液体对相邻的另一部分液体也作用有压力。由静止液体对与之相邻的接触面(受压面)所作用的水压力称为静水压力,常以 P 表示。如图 1-1a) 所示为液体内部相互作用着水压力, b) 所示为液体对固体壁面作用着水压力。

设在受静水压力作用的平板闸门上,作用的静水总压力为 P , 受压面面积为 A , 则受压面上单位面积所受的平均静水压力为

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

\bar{p} 称为受压面 A 上的平均静水压强。它只反映均匀受力情况下受压面上各点的压强,不能代表非均匀受力情况下任意点的静水压强,因此,还必须建立点压强的概念。

若要求受静止液体作用的闸门上任意点 K 的静水压强,可围绕 K 点取一微小面积 ΔA , 作用在微小面积 ΔA 上的静水压力为 ΔP , 可认为在微小面积上各点压强均相等,则微小面积 ΔA 上的平均静水压强为

图 1-1

$$\bar{p} = \frac{P}{A}$$

当微小面积无限缩小至趋于 K 点时, 比值 $\frac{P}{A}$ 的极限值定义为该点的静水压强。即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{P}{\Delta A} \quad (1-2)$$

式(1-2)即反映出非均匀受力时受压面上任意点的静水压强。

静水压力 P 的单位为 N 或 kN, 静水压强 p 的单位为 Pa 或 kPa, 其中 1Pa = 1N/m²。

2. 静水压强的特性

静水压强具有两个重要特性:

1) 垂直性 静水压强的方向与作用面垂直, 并指向作用面。

2) 各向相等 静止液体中任一点处各方向的静水压强大小均相等。即静水压强的大小与其作用面的方向无关。

下面分别论证静水压强的这两个重要特性。

设想用任意曲面 ab 将容器中的静止液体分割为上下两部分(图 1-2a), 取出下部液体作为隔离体(图 1-2b)。

分析 ab 曲面的受力情况: 该曲面受到上部液体的作用力, 它属于表面力。由于上下两部分液体之间并无相对运动, 流速梯度为零, 因此, 在 ab 曲面上, 不可能

图 1-2

存在拉应力和切向应力, 那么只有存在沿着内法线方向的垂直应力。这个垂直应力, 就是我们所定义的静水压强, 即证明了第一个特性。

第二个特性用单元体的平衡条件来证明。

如图 1-3 所示, 从平衡液体中分离出一单元体, 表示斜面与铅垂面的夹角, dx 表示单元体顶面水平宽度, 则铅垂面与斜面的长度分别为 dx/tan 和 dx/sin, 单元体的厚度(垂直于图面方向)按单位 1 计。p_y、p_x、p_n 分别表示水平面、铅垂面及斜面上的静水压强, 这样, 单元体在水平面、铅垂面和斜面上所受的水压力分别为 p_ydx、p_xdx/tan 和 p_ndx/sin。因为单元体尺寸很小, 其自重可略去不计。按照平衡条件, 有 F_x = 0 和 F_y = 0,

图 1-3

即

$$F_x = \frac{p_x dx}{\tan} - \frac{p_n dx}{\sin} \cos = 0$$

可得

$$p_x = p_n$$

$$F_y = p_y dx - \frac{p_n dx}{\sin} = 0$$

可得

$$p_y = p_n$$

所以

$$p_x = p_y = p_n \quad (1-3)$$

故上式表明了静止液体中任一点处各方向的静水压强大小均相等。

静水压强的以上两个特性,对分析静水压强的分布规律和计算静水总压力具有重要意义。

二、等压面及静水压强的表示

1. 等压面

液体中由压强相等的点构成的几何面称为等压面。例如,液体与气体的交界面(自由表面)就是等压面。因自由表面上各点的压强都等于大气压强。

等压面具有两个重要的性质:

- 1) 在平衡液体中,等压面上各点的压强相等;
- 2) 等压面恒与质量力正交。

如果液体处于静止状态,则作用于液体上的质量力只有重力。于是,由已知质量力的方向,便可求得等压面的方向。即在重力作用下的液体,其等压面应是重力垂直的面。由此可知,就一个局部范围而言,静止液体的等压面必定是水平面。如平衡液体的自由表面、处于平衡状态的两种液体的交界面都是等压面,它们也必然是水平面。

需要指出,在应用有关等压面特性分析问题,时必须保证所讨论的介质是同一种连续介质。对于不连续的液体,如液体被阀门隔开,或者一个水平面穿过了两种不同介质,则虽位于同一水平面上的各点,压强也不一定相等。即水平面不一定是等压面,例如图 1-4 所示的情况。

图 1-4

等压面的概念非常重要,利用等压面的特性,对分析静水压强的变化规律有很大帮助,还可以据此量测静水压力的大小。

2. 静水压强的表示

1) 绝对压强与相对压强

在静水压强的计算中,根据计算起点的不同,分为绝对压强和相对压强。

以设想没有大气存在的绝对真空状态作为零点计量的压强,称为绝对压强,常以 p 表示。其数值总是正数。

把当地大气压作为零点计量的压强,称为相对压强,常以 p 表示。其数值可正可负。地球表面的大气压强因海拔高程的不同而有所差异。在国际单位制中,把 98223.4N/m^2 称为一个标准大气压。在工程上习惯用 98kN/m^2 作为大气压强,称为工程大气压,常以 p_a 表示。即 1 工程大气压等于 98kN/m^2 。如果把一个压力表放在大气中,指针的读数若为零,那么用此压力表所测读的压强则为相对压强。

绝对压强和相对压强,是按两种不同的基准(即零点)计量的压强,它们之间相差一个当地大气压强值。两者的关系为

$$p = p - p_a \quad (1-4)$$

2) 真空及真空值

如果液体中某点的绝对压强 p 小于当地大气压强 p_a , 或者说相对压强为负值时, 就称该点出现了真空。把大气压强与该点绝对压强的差值称为真空值, 以 p_k 表示, 即

$$p_k = p_a - p \quad (1-5)$$

由上式可知, 真空值 p_k 越大, 意味着绝对压强 p 越小。最大的真空值为大气压强, 最小的真空值为零。实际上, 对于水的真空值, 只能达到 60 ~ 70kPa, 再大水就汽化了。

比较式(1-4)和式(1-5)可知, 真空值与负相对压强的绝对值相等, 真空值始终是一个正值。

绝对压强、相对压强及真空值三者之间的关系如图 1-5 所示。

很显然, 描述静水压强的大小, 可以采用相对压强, 也可以采用绝对压强, 但在大多数情况下, 采用前者比较简便。压力表及大部分测压仪器的读数都是相对压强。

图 1-5

例 1-1 若离心水泵的吸水管中某点的绝对压强为 40kPa, 试将其换算成相对压强和真空值。

解: 由式(1-4), 其相对压强为

$$\begin{aligned} p &= p - p_a \\ &= 40 - 98 = -58.0\text{kPa} \end{aligned}$$

由式(1-5), 其真空值为

$$\begin{aligned} p_k &= p_a - p \\ &= 98 - 40 = 58.0\text{kPa} \end{aligned}$$

第二节 静水压强的分布规律

一、静水压强基本方程

图 1-6 所示为仅在重力作用下处于静止状态的水体, 水表面受压强 p_0 的作用, p_0 称为表面压强。在静止液体中任取一点 M, 该点在液面以下的深度为 h , 求 M 点的静水压强。

围绕 M 点取一微面铅垂液柱, d 、 h 分别表示底面积和高。作用于这一液柱上的力有:

- 1) 液面上的压力 $P_0 = p_0 d$, 方向铅垂向下;
- 2) 液柱底面上的压力 $P = p d$, 方向铅垂向上;
- 3) 液柱侧面上的压力 P_1, P_2, \dots 等, 它们都是水平方向的, 且方向对称, 每一对大小相等, 相互平衡;
- 4) 液柱的自重 $dG = \gamma h d$, 方向铅垂向下。

列出液柱沿铅垂方向的平衡方程, 得

$$p_0 d - p d + \gamma h d = 0$$

上式除以 d , 整理得

$$p = p_0 + \rho h \quad (1-6)$$

上式就是重力作用下静水压强的基本方程,也称为水静力学基本方程。静水中任意一点的静水压强大小,可由水静力学基本方程求得。由上式得到的压强即为绝对压强。

水静力学基本方程式(1-6)表明:

1) 静止液体内任意点的静水压强由两部分组成。一部分是液面压强 p_0 , p_0 等值地传递到液体内部各点,即帕斯卡原理;另一部分是重力产生的压强 ρh 。

2) 公式中的 p_0 和 ρ 都是常数,压强 p 仅随水深呈线性规律变化。

3) 在连通的同一种类静止液体中,水平面上各点的静水压强相等。

水静力学的基本方程还可以表达为另一种形式。如图 1-7 所示,一封闭容器内盛有静止液体,其重度为 γ ,表面压强为 $p_0(p_0 > p_a)$ 。在液体内任取两点 1 与 2,它们在液面以下的深度分别为 h_1 和 h_2 ,与基准面 0-0 的铅垂距离分别为 z_1 与 z_2 。

根据水静力学基本方程,可得 1、2 两点的静水压强为

$$p_1 = p_0 + \rho h_1$$

$$p_2 = p_0 + \rho h_2$$

两式相减得这两点的压强差为

$$p_1 - p_2 = \rho (h_1 - h_2) = \rho h \quad (1-7)$$

$$p_1 = p_2 + \rho h \quad (1-8)$$

以上两式表明:

1) 在相连通的同一种液体中, ρ 为常数,因此任意两点的压强差只与这两点的铅垂高度差 h 有关,与容器的形状无关。如果位于同一高程的两点,其压强相等,则表明在此情况下,同一水深的水平面是等压面。

2) 在静止液体内,任一点的静水压强 p_1 可以用另一点的压强 p_2 与两点之间的铅垂液柱产生的压强之和表示。但若点 1 位于点 2 之上,则上式右端第二项为负。

又由图 1-7 可知:

$$h_1 - h_2 = z_2 - z_1$$

则有

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

上式除以 ρ , 整理得

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho} = z_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-9)$$

由于 1、2 两点是任意的,因此

$$z + \frac{p}{\rho} = C \quad (1-10)$$

式(1-10)就是水静力学基本方程的另一种表达形式。该方程表明:在静止液体中,任何一点的

$z + \frac{p}{\rho}$ 总是一个常数。

例 1-2 求淡水自由表面下 2m 深度处的绝对压强和相对压强(认为自由表面的绝对压强为 98kPa)。

解: 因此时的表面压强 $p_0 = p_a$, 所以绝对压强由式(1-6)得

$$\begin{aligned} p &= p_0 + \rho h = p_a + \rho h \\ &= 98 + 9.8 \times 2 \\ &= 117.6 \text{kPa} \end{aligned}$$

相对压强为

$$\begin{aligned} p_1 &= p - p_a = (p_0 + \rho h) - p_a \\ &= \rho h \\ &= 9.8 \times 2 = 19.6 \text{kPa} \end{aligned}$$

例 1-3 设密封水箱(图 1-8)的自由表面压强 $p_0 = 78.4 \text{kPa}$, 1 点在水面下的深度 $h_1 = 0.5 \text{m}$ 。(1) 求 1 点的绝对压强、相对压强及真空值; (2) 若 2 点的相对压强为 4.9kPa 时, 求 2 点应在水面下的深度为多少?

解: (1) 由水静力学基本方程 $p = p_0 + \rho h$ 可得 1 点的绝对压强为

$$\begin{aligned} p_1 &= p_0 + \rho h \\ &= 78.4 + 9.8 \times 0.5 = 83.3 \text{kPa} \end{aligned}$$

由式(1-4)得相对压强为

$$\begin{aligned} p_1 &= p_1 - p_a \\ &= 83.3 - 98 = -14.7 \text{kPa} \end{aligned}$$

由式(1-5)得真空值为

$$\begin{aligned} p_k &= p_a - p_1 \\ &= 98 - 83.3 = 14.7 \text{kPa} \end{aligned}$$

图 1-8

(2) 因为 $p = p - p_a = (p_0 + \rho h) - p_a$

故

$$\begin{aligned} h_2 &= \frac{p + p_a - p_0}{\rho} = \frac{4.9 + 98 - 78.4}{9.8} \\ &= 2.5 \text{m} \end{aligned}$$

二、静水压强的分布规律

1. 水静力学基本方程式的意义

由前已知式(1-9) $z_1 + \frac{p_1}{\rho} = z_2 + \frac{p_2}{\rho}$ 为水静力学基本方程的另一重要形式, 现来讨论其方程的意义。

由图 1-7 可知, 式中的 z_1 是空间点 1 的位置高度, 从能量观点看, 质量为 M 的质点在点 1 所具有的位势能为 Mgz_1 , 从式 $\frac{Mgz_1}{G} = z_1$ 可知, z_1 又是单位重量液体所具有的位势能, 故称 z_1 为比位能, 也称位置水头。水头也是能量的意思。再看 $\frac{p_1}{\rho}$, 由于在 1 点的压强 p_1 作用下, 测压管中产生的水柱高度为 h , 固 $\frac{p_1}{\rho} = h$, 故