

中等专业学校试用教材

水力学与桥涵水文

天津铁路工程学校 宋广尧 主编

中国铁道出版社

中 等 专 业 学 校 试 用 教 材

水 力 学 与 桥 涵 水 文

天津铁路工程学校	宋广尧	主编
成都铁路工程学校	何以余	主审
天津铁路工程学校	王秉荪	

中 国 铁 道 出 版 社

1990年·北京

内 容 简 介

本书系按照铁道部颁发的铁路中等专业学校桥、隧、铁道工程《水力学与桥涵水文》教学大纲编写。主要叙述水力学基本知识与桥涵水文计算的主要方法。内容有：水静力学、水动力学、管流、明渠流、堰流、渗流等的水力计算以及大中桥与小桥涵的勘测程序、流量与孔径计算等。

本书着重从认识规律去分析问题，努力贯彻理论联系实际的原则。桥涵水文计算部分全部按照1987年颁布的〈桥渡勘测设计规范〉编写。

本书教材，适用于铁路桥梁、铁路隧道与铁道工程等专业，也可作为职工中专的教材以及土建类、相近专业的师生参考。本书还可供从事桥涵勘测设计的技术人员参考。

中等专业学校试用教材

水 力 学 与 桥 涵 水 文

天津铁路工程学校 宋广尧 主编

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 刘桂华 封面设计 翟 达

各 地 新 华 书 店 经 售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米1/16 印张：15.25 字数：379 千

1990年2月 第1版 第1次印刷

印数：1—8,000册 定价：2.75元

ISBN7-113-00667-1/TU·152

前 言

本书是根据1987年铁道部制订的铁路中等专业学校桥梁隧道专业（铁路局）与铁道工程专业（工程局）的《水力学与桥涵水文》教学大纲编写的。通过本课程的学习，使学生能获得水力学基本知识，并具有桥渡水文勘测与计算的基本技能。全书共分两篇，第一篇为水力学基础；第二篇为桥涵水文计算。按两专业所需学时数（总计约100学时）编写，因此，两专业可根据各自的教学时数酌情取舍。本书也可供相近的专业参考。

第一篇水力学基础属专业基础课的范畴，因此本书着重加强基本理论与基本概念，努力贯彻理论联系实际和少而精原则，在阐述和推理过程中，着重从感性到理性、从简到繁、从特殊到一般，尽量符合学生的认识规律，以便于学生自学，并且安排了较多的实例与习题。

第二篇桥涵水文计算属于专业技术课，由于桥涵水文是一门年轻的科学，半经验半理论公式甚多，但本书全部采用1987年7月颁布的《桥渡勘测设计规范》所推荐的公式，并结合该规范尽量用水力学基本原理阐述桥涵水文中的水力问题，同时应用该规范解决实际问题。

全书两篇中的各章连贯排列。第一篇中的第一、第七两章由成都铁路工程学校何以余编写，其余各章均由天津铁路工程学校宋广尧编写。由宋广尧主编，天津铁路工程学校王秉荪与成都铁路工程学校何以余主审。

编 者

1987年7月

目 录

第一篇 水力学基础

第一章 液体的物理性质与作用力	1
第一节 液体的主要物理性质	1
第二节 作用于液体上的力	2
第二章 水静力学	4
第一节 静水压强	4
第二节 测管水头与静止液体的能量方程式	10
第三节 作用在平面上的静水总压力	11
第四节 物体在液体中的浮沉与稳定	14
第三章 水动力学基础	21
第一节 液体运动的描述	21
第二节 稳定流的连续性方程式	24
第三节 稳定流的能量方程式(伯诺里方程式)	26
第四节 水流阻力与水头损失	34
第五节 能量方程式的应用举例	43
第六节 稳定流的动量方程式	45
第四章 有压管流的水力计算	53
第一节 概 述	53
第二节 长管水力计算	53
第三节 短管水力计算	58
第五章 明渠流水力计算	65
第一节 概 述	65
第二节 均匀流的水力特征与计算公式	65
第三节 渠道断面设计的水力计算	70
第四节 非均匀流的水力特征与其基本方程式	73
第五节 非均匀流的水力要素与形态特征	75
第六节 水跌与水跃	81
第八节 非均匀渐变流水面曲线的各种形状	85
第六章 泄水建筑物的水力计算	92
第一节 上下游水位衔接	92
第二节 闸孔出流的水力计算	94
第三节 堰流的水力计算	95

第四节	泄水建筑物的消能	99
第七章	渗流的水力计算	104
第一节	达西定律	104
第二节	管井的涌水量计算(井的渗流)	105
第三节	大口井(基坑)的涌水量计算	108
第四节	集水廊道的流量计算(渗沟排水)	108

第二篇 桥涵水文计算

第八章	桥涵水文与河流概述	111
第一节	桥涵水文的基本内容	111
第二节	河道洪水的补给与水情	112
第三节	河床演变的基本概念	113
第四节	河段分类	114
第九章	桥渡勘测与桥址选择	117
第一节	桥渡勘测的任务与程序	117
第二节	实地水文观测	118
第三节	洪水形态调查与计算	123
第四节	桥址的选择	127
第十章	大中桥设计流量计算	130
第一节	用数理统计法求设计流量的基本原理	130
第二节	设计流量的推求方法	143
第十一章	大中桥孔径计算	155
第一节	桥渡水流分析	155
第二节	桥下面积与桥孔长度计算	156
第三节	桥式拟定与冲刷系数检算	159
第四节	桥下河床冲刷计算	160
第五节	墩台基底埋置深度的确定	169
第六节	梁底标高及桥头引线路肩标高的决定	170
第七节	导治建筑物	174
第八节	算 例	177
第十二章	小桥涵流量计算	190
第一节	小桥涵的分布	190
第二节	小流域地面径流的物理现象	191
第三节	小流域地面径流的计算方法	194
第十三章	小桥涵孔径计算	205
第一节	小桥孔径计算	205
第二节	涵洞孔径计算	211
第三节	陡坡小桥涵水力计算特点	224
第四节	小桥涵的防护	225
第五节	小桥涵类型的选择	226

第十四章 既有桥涵孔径检算	229
第一节 桥涵检查与水文检算的内容	229
第二节 大中桥孔径检算	229
第三节 小桥涵孔径检算	232

第一篇 水力学基础

第一章 液体的物理性质与作用力

水力学是研究以水为代表的液体的平衡和机械运动的规律以及如何运用这些规律于工程实际的一门技术科学。

液体的静止和运动的规律，一方面和液体外部的作用条件有关，更主要的是决定于本身的内在性质。

自然界物质一般有固体、液体和气体三种状态。液体和固体的基本区别在于：固体有一定的形状，而液体没有一定的形状，很容易流动，它的形状随容器而异（因为液体几乎不能承受拉力，抵抗拉伸变形，静止时还不能承受切力，抵抗剪切变形），即液体具有易流动的性质。气体与液体一样，也具有易流动性，所以统称为流体。液体和气体的基本区别在于：气体易于压缩，并力求占据尽可能大的容积，能充满任何容器；而液体的体积有一定大小，还可能有自由表面，并且和固体一样能承受压力，对于压缩变形有很大的抵抗能力，很不容易压缩，即液体具有不易压缩性。

水力学不研究液体分子的微观运动，只研究液体的宏观机械运动，并把液体的质点作为最小的研究对象。液体的质点是由许多液体分子所组成，但它仍然非常微小，和所研究问题中的一般尺度相比可以忽略不计，而液体的质点之间可认为是无间隙的。因此液体可假定为连续介质，并认为这种连续介质是均质的和各向同性的，即各部分和各方向的物理性质是一样的。

总之，在水力学中研究的液体是容易流动的、不易压缩的、均匀等向的连续介质。以水为代表的一般液体和在某些情况下可以忽略压缩性影响的气体都具有上述的基本特征。

第一节 液体的主要物理性质

和机械运动有关的液体主要物理性质有密度和容重、粘滞性与压缩性等。

一、密度与容重

液体和固体一样，也具有质量与重力，通常用单位体积的质量与重力来表示。

匀质液体中，单位体积内所具有的质量称为密度 ρ ，即

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

式中 V —— 液体体积 (m^3)；

m —— 液体质量 (kg)。

密度的单位为 kg/m^3 。液体的密度随温度和压强而变化，但变化甚小，在水力学中一般把水的密度 $\rho_{\text{水}}$ 视为常数，采用在一个大气压下，温度为 4°C 时， $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$ 。而在相

同条件下,水银的密度 $\rho_{\text{汞}}=13600\text{kg/m}^3$ 。

匀质液体的容重 γ 是单位体积内所具有的重力,即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 V —— 液体体积 (m^3);

G —— 液体重力 (N)。

根据牛顿定律: $G = mg$ (g 为重力加速度,在水力学计算中一般采用 $g = 9.8\text{m/s}^2$), 于是

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-3)$$

容重的单位为 N/m^3 (kN/m^3)。液体的容重随压强和温度而变化,但水的变化甚微,一般工程中把水的容重 $\gamma_{\text{水}}$ 视为常数,即取一个大气压下,温度为 4°C 时之 $\gamma_{\text{水}} = \rho_{\text{水}}g = 1000 \times 9.8 = 9800\text{N/m}^3 = 9.8\text{kN/m}^3$ 。而在相同条件下水银的容重则为 $\gamma_{\text{汞}} = \rho_{\text{汞}}g = 13600 \times 9.8 = 133280\text{N/m}^3 = 133.28\text{kN/m}^3$ 。

二、粘 滞 性

当液体处在运动状态时,液体具有抵抗剪切变形的能力,这就是液体的粘滞性。

液体在静止时,不能承受切力和抵抗剪切变形,如果一旦发生剪切变形,静止状态即遭破坏。但液体在运动时,液体质点之间存在着相对运动,即相对变形,则质点间要产生一种内摩擦力来抵抗其相对运动,这种内摩擦力称为粘滞力,使相邻液层之间产生剪切力而形成剪切变形,从而影响液体的运动状况。

由于运动液体的内部存在内摩擦力,液体在流动过程中,为克服内摩擦力而不断消耗本身的机械能,这种能量消耗称为液流能量损失。因此,液体的粘滞性是引起液流能量损失的根源,而能量损失问题是水力学重要课题之一,以后在讲述能量损失时,再详细讨论液体的粘滞性问题。

三、压 缩 性

固体受外力作用要发生变形,当外力消除后(外力不超过弹性限度时),有恢复原状的能力,这种性质称为物体的弹性。

液体不能承受拉力,但可以承受压力。液体受压时体积减小,压力消除后仍能恢复原状,这种性质称为液体的压缩性或弹性。

水的压缩性很小,当温度不变,增加一百个大气压,水的体积只减小约 0.5% 。在一般情况下,水温变化对水体积的影响也可忽略不计。所以在一般工程中,认为水是不可压缩的。但在特殊情况下,例如研究有压管道中的水锤现象时,以及研究供热工程时,就要考虑水的体积减小或增大的影响。

第二节 作用于液体上的力

处于平衡或运动状态的液体,都受到各种力的作用。作用于液体上的力有质量力和表面力两种。

一、质 量 力

质量力是作用在液体每个质点上的力，其大小与液体的质量 m 成正比。对于匀质液体，质量的大小与体积的大小也成正比，所以匀质液体的质量力又称为体积力。属于这类的力有重力与惯性力。

地球对液体的引力称为重力，即 $G=mg$ ，其方向垂直向下；惯性力是液体改变速度与方向时所产生的力，即 $F=-ma$ ，负号表示惯性力的方向与液体加速度 a 的方向相反。

二、表 面 力

表面力作用于液体的表面上，其大小与作用面积成正比，故又称面积力。属于这类的力有固体边界对液体的摩擦阻力 T ，边界对液体的反作用力，一部分液体对相邻的另一部分液体在接触面上产生的压力 P 等。

表面力也常用单位面积上所受的力来度量。如表面力与被作用面垂直，称为压强或压应力 p ；如表面力与被作用面平行，称为切应力 τ 。

在水力学有关液体作用力的研究中，重点是讨论压力、压强与摩擦阻力的计算方法，这将在以后的各章中叙述。

作 业

- 1—1 水力学研究的对象是什么？
- 1—2 何谓质点及连续介质？水力学为什么要引入这两个概念？
- 1—3 何谓粘滞性？它在水流中有何作用？
- 1—4 在1标准大气压下4℃时水的密度 $\rho_{\text{水}}=1000\text{kg/m}^3$ ，水银的密度 $\rho_{\text{汞}}=13600\text{kg/m}^3$ ，试求 $\gamma_{\text{水}}$ 、 $\gamma_{\text{汞}}$ 各为若干？

第二章 水静力学

水静力学是研究液体处于相对平衡状态下的力学规律, 以及这些规律在工程实践中的应用。同时, 它也是水力学的基础部分。

在静止液体中, 它的速度为零, 没有惯性力, 在质量力中只有重力; 同时, 粘滞性也不显示, 故没有阻力。因此, 水静力学只研究重力作用下的静水压力问题。

第一节 静水压强

一、静水压强及其特性

静水内部各处是有压力的, 如图 2—1 所示的水箱中, 水对底板、侧壁以及水的内部质点之间都是有压力的, 水愈深, 静水压力愈大。若在水下深度 h 处取一点 A , 在 A 点处将底面积为 $\Delta\omega$ 、高为 h 的水柱体取出, 并以任一力 ΔR 代替水柱体对 $\Delta\omega$ 的压力, ΔR 可分解为 ΔP 与 ΔT , 由于液体静止 $\Delta T = 0$, 则 $\Delta R = \Delta P$, ΔP 称为静水总压力, 其单位为 kN , 比值 $\Delta P / \Delta\omega$ 称为静水压强, 即单位面积上的平均静水压力, 当受压面缩小为一点时, 即 $\Delta\omega \rightarrow 0$, 则比值 $\Delta P / \Delta\omega$ 的极限称为一点处的静水压强, 并用小写 p 表示, 即

$$p = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega} = \frac{dP}{d\omega}$$

p 称为点压强, 也就是以计算点为中心, 在它的周围一块极小面积上的平均静水压强, 其单位为 kPa 。应用点压强可以清楚地表示出水中任意点处静水压强大小。

静水压强的特性有二。

1. 静水压强与作用面垂直, 这已于图 2—1 中得到证明, 称之为压强的垂直性;
2. 液体内同一点处的静水压强在各个方向大小相等, 称之为压强的各向等值性。从图 2—2 中的 A 点来分析, 只要 A 点取定, 作用在 A 点处的静水压强就是一个定值, 即 $p_{A1} = p_{A2} = \dots = p_{An}$ 。如若不等, 则必然会破坏液体静止的平衡状态。

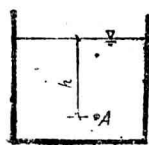


图 2—1

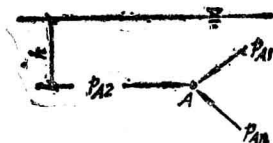
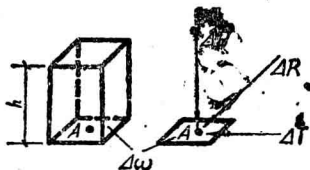


图 2—2

二、静水压强的大小

(一) 自由表面和表面压强

所谓自由表面是指液体与它上面的气体交界面,如水箱的水面即为自由表面。凡水在重力作用下的自由表面一般为水平面。

自由表面上的气体压强称为表面压强,一般用小写 p_0 表示。如果自由表面上是大气,则大气的质量对地面物体或对自由表面所产生的压强叫大气压强,用 p_a 表示。此时 $p_0 = p_a = 98 \text{ kPa}$ 。(注)

(注): 关于大气压强 $p_a = 98 \text{ kPa}$ 的说明:

海平面上的标准大气压强相当于 760 mm Hg (或 $10.336 \text{ m H}_2\text{O}$) 在其底部所产生的压强 (对真空面而言,称绝对压强), 即 $p_a = \gamma_{\text{汞}} h = 133.28 \times 0.76 = 101.293 \text{ kN/m}^2 = 101.293 \text{ kPa}$ (或 $P_a = \gamma_{\text{水}} h = 9.8 \times 10.336 = 101.293 \text{ kN/m}^2 = 101.293 \text{ kPa}$)。工程上为了计算方便,在一般情况下,均取1个大气压相当于 $10 \text{ m H}_2\text{O}$ 在其底部所产生的压强,即 $P_a = \gamma_{\text{水}} h = 9.8 \times 10 = 98 \text{ kN/m}^2 = 98 \text{ kPa}$ 。故在以后的水力计算中,凡大气压强的绝对压强统用 $P_a = 98 \text{ kN/m}^2 = 98 \text{ kPa} = 0.098 \text{ MPa}$ 。

(二) 静水压强的基本方程式

如图 2—3 所示,围绕 A 点作一个面积为 ω 的水平面,以 ω 为底,取高为 h 的垂直水柱体作为隔离体,来分析它的受力情况。作用在水柱上的力有

1. 质量力: 因液体静止无惯性力,质量力中只有重力。当液体容重为 γ 时,则重力 $G = \gamma V = \gamma h \omega$,其方向垂直向下;

2. 表面力: 因液体静止无粘滞力,故表面力中只有水柱上、下端和四侧的压力。因四侧的压力是对称的,互相抵消,故只考虑自由表面上的总压力 $P_0 = p_0 \omega$ (方向垂直向下) 和下端水柱底面上的静水总压力 $P_A = p_A \omega$ (方向垂直向上)。液体沿竖直轴的平衡方程,为

$$P_0 + G - P_A = 0$$

$$p_0 \omega + \gamma h \omega - p_A \omega = 0$$

将上式除以 ω ,整理得

$$p_A = p_0 + \gamma h \quad (2-1)$$

式(2-1)为静水压强的基本方程式。它表明:液体表面压强 p_0 将等值地传到静止液体中的每一点,由于 p_0 是定值,故静水压强与水深成正比。

(三) 压强的表示法

静水压强有两种表示方法。一是绝对压强 $p_{\text{绝对}}$,它是以设想没有大气存在的绝对真空作为零点计量的压强。二是相对压强 $p_{\text{相对}}$,它是以当地大气压作为零点计量的压强。相对压强与绝对压强只相差一个大气压强 p_a ,故二者的关系为

$$p_{\text{相对}} = p_{\text{绝对}} - p_a \text{ 或 } p_{\text{绝对}} = p_{\text{相对}} + p_a \quad (2-2)$$

现通过实例来说明。图 2—4 为一挡水的平面闸门,试分别求水深 h 处 A 点和自由表面上 B 点的绝对压强与相对压强。

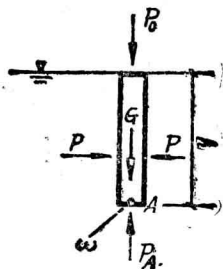


图 2—3

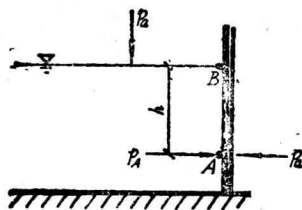


图 2—4

对于 A 点, 当自由表面暴露于大气中时, $p_0 = p_a$, p_a 将等值地传到水面下各点, 若以真空面为起算点, 连同大气压强一并考虑在内就是绝对压强, 即

$$p_{A\text{绝对}} = p_a + \gamma h \quad (2-3)$$

工程实践中, 闸门的背水侧仍有 p_a , 其与有水侧的 p_a 相抵消, 起作用的只是由于水深所产生的压强, 而作用在自由表面上的大气压强则因抵消而不计算。故有

$$p_{A\text{相对}} = p_{A\text{绝对}} - p_a = p_a + \gamma h - p_a = \gamma h \quad (2-4)$$

上式中, 以大气压强为零点起算的压强, 也就是说不计及 p_a 的压强称为相对压强, 它是指超出大气压强的那部分压强。

对于 B 点, 因在自由表面上, 水深为零, 则

$$p_{B\text{绝对}} = p_a + \gamma h = p_a = 98 \text{ kN/m}^2 = 98 \text{ kPa},$$

$$p_{B\text{相对}} = p_{B\text{绝对}} - p_a = p_a - p_a = 0$$

它说明: 当水面暴露于大气时, 水面某点的绝对压强就是大气压强, 相对压强为零。所以大气压强的绝对压强即为 $p_a = 98 \text{ kPa}$, 大气压强的相对压强为零。

实践中, 通常都是以相对压强表示压强值, 只有相对压强出现负值 (真空) 时, 用绝对压强表示才有实际意义, 故在讨论真空时才提及绝对压强。因此, 在以后的分析计算中, 如未特别注明是绝对压强则都是指相对压强, 而在脚注上不再加“相对”二字, 仍以 p 表示。

(四) 压强的量测与计算

在科学实验与工程实践中, 常需测算某点压强或两点的压强差, 因而广泛采用各种仪表来测定, 这种仪表可分为液体压力计与金属压力计两类。液体压力计就是根据静水压强的基本公式和等压面的概念进行测算的; 而金属压力计的构造与精度, 又是根据液体压力计的原理制作和检定的。

1. 等压面

从静水压强方程式中可以看出, 静止液体中水深相等的点, 压强相等, 把静水压强相等的点连接起来所组成的面叫等压面。首先, 静止液体的自由表面是等压面。由于重力作用下的自由表面是水平面, 因此水深相等的点所组成的等压面都是水平面。所以说, 凡是连通的同一液体, 同一水平面都是等压面, 如图 2-5 a 所示。两种互不渗混的静止液体的交界面, 如只在重力作用下也是水平的等压面, 如图 2-5 b 所示。 $N-N$ 面及其以下的水平面为等压面, $N-N$ 面以上的水平面 $N'-N'$ 面就不是等压面了, 因为这是两种容重不同的液体。

在研究液体平衡以测算某点压强时, 总是先从测定等压面开始, 然后推算各点的压强, 所以等压面是我们推算压强的重要“工具”。

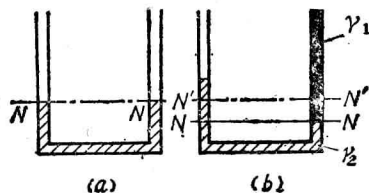


图 2-5

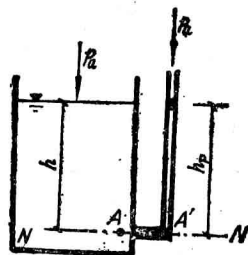


图 2-6

2. 量测仪表与压强推算

(1) 测压管: 这是一种最简单的液体压力计, 如图 2-6 所示。欲测 A 点压强, 可在此处连以测压管, 在 A 点压力作用下水会上升, 直至液柱高度 h_p 所产生的压强与 A 点压强

相等时,液柱便不再上升,这实际也是一个连通器,图中 $A-A'$ 的水平面即为等压面,下面用实例说明。

例 2-1 图 2-6 为一开式水箱,自由表面上作用着大气压强, A 点在水深 2 m 处,其压强为 $p_A = \gamma h = 9.8 \times 2 = 19.6 \text{ kN/m}^2 = 19.6 \text{ kPa}$,若在 A 点处连一测压管,测压管水面亦为大气压强,试求测管高度 h_P 为若干?

解: 为求 h_P , 先取 $N-N$ 为一等压面, 则

$$p'_A = p_A = \gamma h = 19.6 \text{ kN/m}^2$$

从而得

$$h_P = \frac{p_A}{\gamma} = \frac{19.6}{9.8} = 2 \text{ m}$$

由此得出结论:测管高度 h_P 完全反映了 A 点的相对压强,故压强的大小,可用液柱高度来表示,称测压管压强。这就说明,在同种液体的连通器内,表面压强相等时,液柱必等高。工程上广泛使用的水位计就是应用了这一原理。

例 2-2 某桥梁工地上用压力水箱供水,如图 2-7 所示。水箱封闭后,打入压缩空气,其表面压强 p_0 值将显著增大,如打入 $p_0 = 147 \text{ kPa}$,若在自由表面下深度 $h = 2 \text{ m}$ A 点处按一测压管与水箱连通,试求 A 点的压强,该点压强能使测管水位上升多少,求 h_P 。

解: 1. 求 A 点的相对压强 p_A

水箱打入压缩空气前,其自由表面上仍为大气压强,水箱封闭后,打入压缩空气所增加的 p_0 值仍是相对值,故按下式计算 p_A

$$p_A = p_0 + \gamma h = 147 + 9.8 \times 2 = 166.6 \text{ kN/m}^2 = 166.6 \text{ kPa}$$

2. 求测管高度 h_P

取等压面 $N-N$, 得 $p_A = p'_A = \gamma h_P = 166.6 \text{ kN/m}^2$ 于是得

$$h_P = \frac{p_A}{\gamma} = \frac{166.6}{9.8} = 17 \text{ m}$$

可见,测管高度 h_P 同样反映了 A 点的相对压强,这也说明当 A 点压强很大时,可供高处用水。

例 2-3 若将图 2-8 的测压管改为水银压力计,如图 2-8 所示。求测管高度 h_P 为若干? 水银的容重 $\gamma_{\text{汞}} = 133.28 \text{ kN/m}^3$ 。

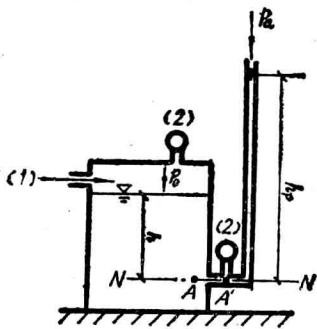


图 2-7

(1) 打入压缩空气 (2) 压力表

解: 取等压面 $N-N$, 得 $p_1 = p_2$

$$p_1 = \gamma_{\text{汞}} h_P;$$

使二式相等,并代入数据,得

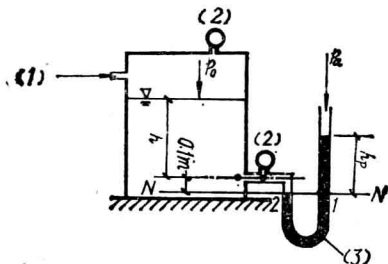


图 2-8

(1) 打入压缩空气 (2) 压力表 (3) 汞(水银)

$$p_2 = p_0 + \gamma_{\text{水}} (2 + 0.1)$$

$$h_p = \frac{p_0 + \gamma_{\text{水}}(2+0.1)}{\gamma_{\text{汞}}} = \frac{147 + 9.8 \times (2+0.1)}{133.28} = 1.26\text{m}$$

这就说明,使用水银压力计可使测管高度大为减短,从而可以扩大压强的量测范围,便于测更大的压强值。

(2) 比压计:图2-9为一文丘里管,为量测该管通过的流量,需求出A、B两点的压强差。为量测A、B两点的压强差,在其下安装了水银比压计,若测得 $\Delta h_p = 0.1\text{m}$,求A、B两点的压强差为若干?

求A、B两点的压强差时,可取N-N为一等压面,使 $p_1 = p_2$,则

$$p_1 = p_A + (z + \Delta h_p)\gamma_{\text{水}}; \quad p_2 = p_B + z\gamma_{\text{水}} + \Delta h_p\gamma_{\text{汞}}$$

使二式相等,整理得

$$p_A - p_B = (\gamma_{\text{汞}} - \gamma_{\text{水}}) \times \Delta h_p = (133.28 - 9.8) \times 0.1 = 12.348\text{kN/m}^2 = 12.348\text{kPa}$$

(3) 金属压力表:上面介绍的液体压力计,优点是准确度高,缺点是量测范围有限,携带不便,故多在实验室内使用。

测量较高的压强时,通常采用金属压力表,压力表装置简单,使用方便,在工程实际中被广泛采用。由于压力表与大气连通时,压力表指针正好指零,所以刻度盘上的压强读数是指相对压强(一般称表压),其单位为kPa

(或MPa)。现今使用的压力表读数,有的仍沿用工程单位制 kgf/cm^2 ,因此应用时要注意换算。

在水力学上,由于压强 $p = \gamma h$,因而压强可以用液柱高度来表示,即 $h = p/\gamma$,这一高度随着所取 $\gamma_{\text{水}}$ 与 $\gamma_{\text{汞}}$ 的不同,故可用 mH_2O 与 mmHg 表示。压强与液柱高的换算关系以及法定计量单位与工程制单位的换算关系一并列入表2-1,供查阅。

单位换算

表2-1

帕 (Pa)	千帕 (kPa)	兆帕 (MPa)	工程大气压 (at) (kgf/cm^2)	标准大气压 (atm)	米水柱 (mH_2O)	毫米汞柱 (mmHg)
1	10^{-3}	10^{-6}	0.102×10^{-4}	0.987×10^{-5}	0.101×10^{-3}	7.5×10^{-3}
10^3	1	10^{-3}	0.102×10^{-1}	0.987×10^{-2}	0.10197	7.5
10^6	10^3	1	10.197162	9.86923	101.97162	7500.64
9.8×10^4 *	98*	0.098*	1	0.968	10	735.6
101325	101.325	0.101325	1.033	1	10.33	760
9806.55	9.80655	0.00981	10^{-1}	0.968×10^{-1}	1	7.356
133.332	0.133332	0.000133	1.36×10^{-3}	1.316×10^{-3}	1.36×10^{-2}	1

* 取近似值。

(五) 真空

前面所谈到的均为某点相对压强为正值的情况,当某点的相对压强出现负值时,即以真空值表示。为了理解真空值,先举一实例说明。图2-10为一封闭水箱,封闭时(图a)表面压强为大气压强,封闭后将部分空气抽出(图b),此时水箱自由表面上即为部分真空,

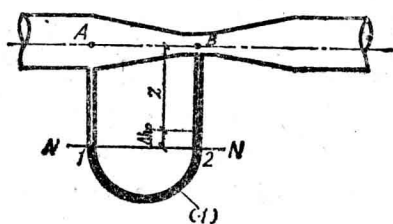


图 2-9
(1) 汞(水银)

于是 $p_0 < p_a$ ，显然在水深2m处A点的测压管内水位会受到吸力作用，若测压管水位降至A点下1m（图b），试求 p_0 、 p_A 两点处的压强各为多少？

求表面压强时，取N-N为一等压面，使 $p_1 = p_2$ ，得

$$p_1 = 0; \quad p_2 = p_0 + \gamma_{\text{水}}(2+1)$$

使二式相等，整理得

$$p_0 = -9.8 \times 3 = -29.4 \text{ kN/m}^2 = -29.4 \text{ kPa}$$

A点压强按下式计算

$$p_A = p_0 + \gamma h = -29.4 + 9.8 \times 2 = -9.8 \text{ kN/m}^2 = -9.8 \text{ kPa}$$

由此可以看出： p_0 与 p_A 的相对压强均出现负值，也可以说 p_0 、 p_A 产生吸力作用，亦即出现部分“负压”，我们称它为部分真空。在工程上，用负的相对压强的绝对值来表示该点之压强，称为真空压强或真空值，以 $p_{\text{真空}}$ 表示，即 $p_{\text{真空}} = |-p|$ 。绝对压强、相对压强与真空值三者的关系，可用图2—11来表示。现分析图中A、B两点的压强，从图中可以看出：以完全真空面算起的压强为绝对压强，以大气压强面算起的压强为相对压强。由于所取基准面不同，A、B两点的绝对压强均为正值，A点的相对压强因在大气压强面之上故为正值，而B点的相对压强因在大气压强面之下则为负值。可见，绝对压强无负值，相对压强有正有负。从图上可以看出真空值的大小为

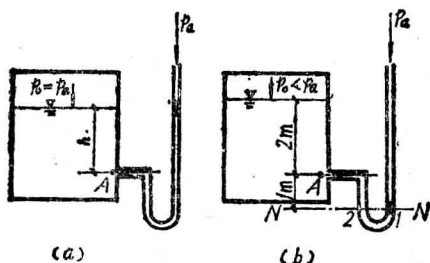


图 2—10

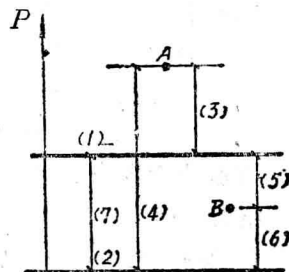


图 2—11

(1) 大气压强面 (2) 完全真空面 (3) p_A 相对 (4) p_A 绝对 (5) $|-p_B| = p_{B\text{真空}} = p_a - p_B$ 绝对 (6) p_B 绝对 (7) p

$$p_{\text{真空}} = |-p| = p_a - p_{\text{绝对}} \quad (2-5)$$

所以真空值 $p_{\text{真空}}$ 是指某点的绝对压强不足一个大气压强的差值。某点的真空值愈大，说明它的绝对压强愈小，当该点的绝对压强为零时，则处于完全真空状态，此时真空值可达最大值，即 $p_{\text{真空}} = p_a - 0 = 98 \text{ kPa}$ 。某点的真空值愈小，直至该点的真空值为零时，说明该点的绝对压强接近和正好在一个大气压强下，可见，真空值 $p_{\text{真空}}$ 在 $0 \sim 98 \text{ kPa}$ 的范围内变动。

例2—4 仍以图2—10b为例，求自由表面 p_0 真空与 p_A 真空的真空值各为若干？

解：因为是求真空值，故在求等压面时用绝对压强来求解。

1. 求 p_0 真空 取等压面N-N，使 $p_1 \text{ 绝对} = p_2 \text{ 绝对}$

$$p_1 \text{ 绝对} = p_a = 98 \text{ kPa}; \quad p_2 \text{ 绝对} = p_0 \text{ 绝对} + \gamma(2+1)$$

使二式相等，整理得

$$p_0 \text{ 绝对} = p_a - \gamma(2+1) = 98 - 9.8 \times 3 = 68.6 \text{ kN/m}^2 = 68.6 \text{ kPa}$$

$$\therefore p_0 \text{ 真空} = p_a - p_0 \text{ 绝对} = 98 - 68.6 = 29.4 \text{ kPa}$$

2. 求 p_A 真空 因 $p_A \text{ 绝对} = p_a + p_A = 98 + (-9.8) = 88.2 \text{ kN/m}^2$ ，

$$\text{故 } p_A \text{ 真空} = p_a - p_A \text{ 绝对} = 98 - 88.2 = 9.8 \text{ kN/m}^2。$$

从该例可以看出：真空值与前述负的相对压强完全相等。工程实践中，管流的某些局部

地区,必须发生真空值才能起到应有的效果,例如水泵的吸水管和工程上的虹吸管常会遇到真空值的计算问题。

例 2—5 图 2—12 为离心泵吸水管处安装的 U 形测压管与真空表,当水泵高速运转时,使水泵的吸水管产生部分真空(这样水面在大气压强的作用下,水被抽出)。若测得 $h_K = 4\text{ m}$,求吸水管 K 断面处的真空值为若干?若在此处放一真空表,求真空表的读数为若干?测量真空值的压力表称为真空表,其作用原理与压力表相同,其真空值在 $0 \sim p_a$ 间变动,故真空表表盘读数单位用 $(0 \sim 98)\text{ kPa}$ (或 $0 \sim 0.098\text{ MPa}$)。现今使用的真空表有的仍沿用工程制单位 mmHg ,应用时可按表 2—1 换算。

解:当水泵运转稳定后,测压管内的水是静止的,故可用静水压强的规律来求 p_K 。

取等压面 N—N,使 $p_1\text{绝对} = p_2\text{绝对}$

$$p_1\text{绝对} = p_a = 98\text{ kPa}; \quad p_2\text{绝对} = p_K\text{绝对} + \gamma h_K$$

使二式相等,整理得

$$p_K\text{绝对} = p_a - \gamma h_K = 98 - 9.8 \times 4 = 58.8\text{ kN/m}^2 = 58.8\text{ kPa}$$

∴

$$p_K = p_a - p_K\text{绝对} = 98 - 58.8 = 39.2\text{ kPa}$$

或

$$p_K = \gamma h_K = 9.8 \times 4 = 39.2\text{ kN/m}^2 = 39.2\text{ kPa}$$

可见, h_K 反映了吸水管内的真空值,因用高度反映,故称之为真空度, h_K 愈大, p_K 愈大。

K 点处真空表的读数为 39.2 kPa ,若真空表的读数单位为兆帕,则为 0.0392 MPa 。倘使用的是工程单位制的真空表,其读数为 $39.2 \times 7.5 = 294\text{ mmHg}$ 。

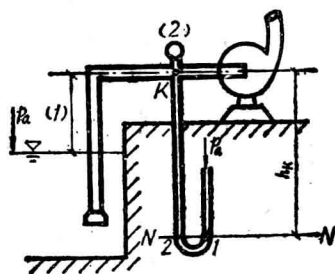


图 2—12
(1) h_K (2) 真空表

第二节 测管水头与静止液体的能量方程式

静水是有能量的。从图 2—13 所示的水塔与管道系统中可以看出:如在 1~5 点处各插入一测压管,则测压管内的水会上升一定的高度,此高度即反映该点的压强,这说明压强是有能量的。因此,在水力学中把压强所反映的测管水位高度,即 $h = p/\gamma$,称为压强水头。

工程实践中,水塔的输水能力,不仅与水塔系统内各点的测管高度有关,还与水塔的位置高度与各测点的位置高度有关。如对基准面 0—0 而言,1 点的压强为零,但位置高度 z_1 最大,2 点压强增加,但 z_2 小了,直到 3 点, $z_3 = 0$,压强达最大值,到了 4 点,因管道抬高到 z_4 ,压强又减少。因此,只考虑某点的压强而不考虑该点由于位置高度而具有做功的能力是不确切的。所以为了表示整个水塔所具有的能量必须把测管高度 p/γ 与位置高度 z 联系起来一并考虑,形成一个测管水头的概念。因此测管水头应包括两部分,即

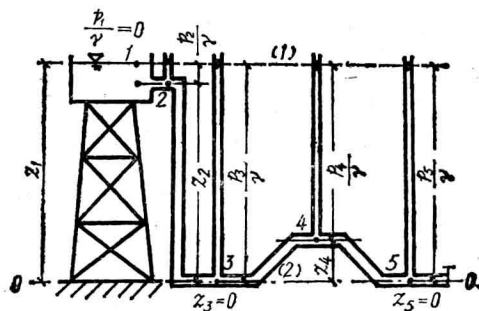


图 2—13
(1) 静止液体的测管水头线(水平线) (2) 基准面 0—0 (水平面)