

中等专业学校教材

水力学与桥渡水文

天津铁路工程学校 宋广尧 主编
武汉铁路桥梁学校 马福周 主审

中国铁道出版社

1999年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书主要叙述水力学基本知识与桥渡水文计算的主要方法。内容包括:水静力学、水动力学基础,管流、明渠流、堰流、渗流等的水力计算;河流概述、大中桥与小桥涵的勘测程序、流量与孔径计算、特殊情况的水文计算以及既有桥涵孔径检算等。每章附有小结,复习思考题和作业,最后附有有关实验。

本书为中等专业学校铁道工程,桥梁与隧道专业教材,亦可作为职工中专教材,并为相关专业的师生提供参考;还可供从事桥涵勘测设计和工务系统搞既有线水文检算工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水力学与桥渡水文/宋广尧主编.—北京:中国铁道出版社,1999

中等专业学校教材

ISBN 7-113-03354-7

水... 宋... . 水力学-专业学校-教材 桥渡工程-水文计算-专业学校-教材 . TV13 U442.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 14514 号

书 名:水力学与桥渡水文

著作责任者:宋广尧

出版·发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:刘桂华

封面设计:李艳阳

印刷:中国铁道出版社印刷厂

开 本:787×1092 1/16 印张:21.5 字数:538千

版 本:1999年9月第1版 1999年9月第1次印刷

印 数:1—5000册

书 号:ISBN7-113-03354-7 TV·3

定 价:27.00元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

本书是在 1987 年出版的中等专业学校试用教材《水力学与桥涵水文》基础上重新编写的。在编写过程中努力贯彻“打好基础、追求实用、精选内容、利于教学”的原则,其教学时数随专业要求有所不同,约为 90~100 学时。考虑到本教材既能满足中专教材的需要,又可作为现场培训教材,内容较前略有增加。根据现场需要和科技的发展,加强了既有桥涵水文检算的具体方法与实例,增加了特殊情况下的水文计算,用微机程序进行水文计算以及附录(水力学实验)等。因此,各校在使用教材时,可根据需要酌情删减。本书分为两篇:第一篇为水力学基础,使学生能够按设计、施工的技术要求,掌握水力学的基础知识;第二篇为桥渡水文,系按照 1999 年颁布实施的《铁路工程水文勘测设计规范》、《桥梁检定规范》、标准设计图以及桥渡水文技术手册的内容,系统地讲述基本原理与计算方法,使学生能够具有水文勘测与计算的基本技能,并在学完本书后,能较顺利地查阅各种有关规范和手册。全书各章中均提供了不少计算实例,还对各章进行了小结,以便于学生更好地复习和运用。

本书分两篇,共十五章,第一、三、五、六章由天津铁路工程学校向群编写,第二、四章由天津铁路工程学校侯云芳编写,第十二、十三章由天津铁路工程学校勘测设计所朱连海编写,第十四章由北京铁路局桥梁检定队弓季宗编写,第七、八、九、十、十一、十五章由天津铁路工程学校宋广尧编写,附录由天津铁路工程学校水力实验室颜炳君编写,有关各章的微机程序和算例由天津铁路工程学校梁学忠编写。全书由宋广尧统稿并主编,向群、侯云芳协编,武汉桥梁学校马福周主审。

在编写过程中,有关兄弟学校曾提出宝贵意见,现场单位又提供了重要资料,天津铁路工程学校桥隧专业的薛继飞、陈宜、侯建平、周磊、赵勇等学生参加了绘图并协助整编资料,在此一并感谢。由于时间仓促和编者水平所限,问题和错误在所难免,敬请读者提出宝贵意见,以便再版时修改。

编 者

1998 年 11 月

目 录

第一篇 水力学基础

第一章 液体的物理性质及作用在液体上的力.....	1
第一节 水力学的性质和任务.....	1
第二节 液体的主要物理、力学性质	1
第三节 作用在液体上的力.....	3
第四节 水力学的研究方法.....	4
小 结.....	4
复习思考题与作业.....	4
第二章 水静力学.....	6
第一节 静水压强.....	6
第二节 测管水头与静止液体的能量方程	12
第三节 水静力学在工程实践中的应用	15
小 结	19
复习思考题与作业	20
第三章 水动力学基础	23
第一节 液体运动描述	23
第二节 稳定流的连续性方程	26
第三节 稳定流的能量方程	28
第四节 水流阻力与水头损失	35
第五节 稳定流的动量方程式	42
第六节 三大方程在工程实践中的应用举例	45
小 结	48
复习思考题与作业	49
第四章 有压管流的水力计算	53
第一节 概 述	53
第二节 短管水力计算及其应用	53
第三节 长管水力计算及其应用	60
第四节 给水管网水力设计计算算例	66
小 结	67
复习思考题与作业	67
第五章 无压明渠流水力计算	69
第一节 概 述	69
第二节 明渠均匀流水力计算	70

第三节	明渠非均匀流	79
第四节	非均匀流四种水面现象的初步分析	86
小 结	.....	97
复习思考题与作业	.....	98
第六章	泄水建筑物的水力计算.....	100
第一节	概 述.....	100
第二节	上下游水位衔接.....	101
第三节	闸孔出流的水力计算.....	103
第四节	堰流的水力计算.....	104
第五节	桥涵水力计算.....	108
第六节	泄水建筑物的消能.....	110
小 结	.....	113
复习思考题与作业	.....	114
第七章	渗流的水力计算.....	116
第一节	概 述.....	116
第二节	达西定律.....	116
第三节	管井的涌水量计算(井的渗流).....	118
第四节	大口井(基坑)的涌水量计算.....	121
第五节	集水廊道的流量计算(渗沟排水).....	122
小 结	.....	123
复习思考题与作业	.....	123

第二篇 桥 渡 水 文

第八章	桥渡水文与河流概述.....	125
第一节	桥渡水文勘测设计的基本内容.....	125
第二节	河道洪水的补给与水情.....	127
第三节	河床演变的基本概念.....	128
第四节	河段分类.....	129
小 结	.....	132
复习思考题与作业	.....	132
第九章	桥渡勘测与桥址选择.....	133
第一节	桥渡勘测的任务与程序.....	133
第二节	实地水文观测.....	134
第三节	洪水调查与计算.....	139
第四节	桥址选择概述.....	143
小 结	.....	144
复习思考题与作业	.....	144
第十章	大中桥设计流量计算.....	146
第一节	用数理统计法求设计流量的基本原理.....	146
第二节	设计流量的推求方法.....	162

第三节	桥址断面处设计流量与设计水位的推求.....	171
	大中桥流量计算程序.....	172
	小 结.....	187
	复习思考题与作业.....	188
第十一章	大中桥孔径计算.....	189
第一节	桥渡泄洪要求与水流分析.....	189
第二节	桥下面积与桥孔长度计算.....	190
第三节	桥式拟定与冲刷系数检算.....	192
第四节	桥下河床冲刷计算.....	193
第五节	墩台基底埋置深度的确定.....	205
第六节	梁底标高与桥头引线路肩标高的确定.....	206
第七节	导治建筑物.....	212
第八节	大中桥设计算例.....	215
	大中桥孔径计算程序.....	224
	小 结.....	243
	复习思考题与作业.....	243
第十二章	小桥涵流量计算.....	244
第一节	沿线小桥涵的分布与测设.....	244
第二节	小流域暴雨径流计算的基本原理.....	245
第三节	小流域暴雨径流的计算方法.....	249
	三院法流量计算程序.....	256
	小 结.....	262
	复习思考题与作业.....	262
第十三章	小桥涵孔径计算.....	263
第一节	小桥孔径计算.....	263
第二节	涵洞孔径计算.....	268
第三节	陡坡小桥涵水力计算特点.....	279
第四节	小桥涵的防护.....	280
第五节	小桥涵类型的选择.....	281
	小 结.....	282
	复习思考题与作业.....	284
第十四章	特殊情况下的水文计算(简介).....	286
第一节	水库地区桥梁.....	286
第二节	大河倒灌.....	292
第三节	一河多桥.....	294
第四节	泥石流.....	296
	小 结.....	299
	复习思考题与作业.....	300
第十五章	既有桥涵水文检算.....	301
第一节	水文检算的意义、内容与一般规定.....	301

第二节	水位流量计算.....	304
第三节	过洪能力检算.....	313
第四节	抗冲能力检算.....	317
第五节	受水库影响的桥梁检算.....	318
小 结	.....	326
	复习思考题与作业.....	326
附录	水力学实验.....	327
实验一	静水压强实验.....	327
实验二	能量方程实验.....	329
实验三	雷诺实验.....	330
实验四	沿程水头损失实验.....	331
实验五	局部水头损失实验.....	332
实验六	宽顶堰实验.....	334
实验七	小桥、涵洞过水实验	335
参考文献	.....	336

第一篇 水力学基础

第一章 液体的物理性质及作用在液体上的力

内容提要:本章概略地阐述了水力学的性质和任务,重点讲述液体的物理性质与作用力。

第一节 水力学的性质和任务

水力学所研究的是以水为代表的液体的平衡和机械运动的规律,其任务是运用这些规律解决工程实践中的一系列技术问题。

工程实践中的给水、排水、热水采暖、渠道和桥涵的过水能力以及洪水对铁路路基与桥涵的冲刷,都是水流运动做功的结果,而这些水流运动一方面和液体的外部条件有关,更主要的是液体本身的物理、力学性质本能的反映。

自然界物质的基本存在形态为固体、液体和气体三种。从宏观特性看,液体同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,它的形状随容器而异;液体几乎不能承受拉力和抵抗拉伸变形;在相对静止状态下,液体不能承受剪切力,即液体具有流动性。气体与液体一样,也具有流动性,故统称为流体,所以水力学是流体力学的一个分支。液体和气体的区别在于液体的体积有一定大小,能形成自由表面,能承受压力,对于压缩变形有较大的抵抗能力,即液体具有不易压缩性;而气体具有很大的压缩性和膨胀性,没有固定的体积,不能保持固定的形状。

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,即研究大量液体分子运动的统计平均特性和统计平均运动规律,把液体作为连续介质研究,认为液体是由本身质点完全充满所占空间,各质点之间毫无空隙、连续不间断排列,并认为这种连续介质是匀质的和各向同性的,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,因此在水力学中可用连续函数研究水流运动的规律。

第二节 液体的主要物理、力学性质

一、引力特性与重力、密度与容重

液体是有质量的,对质量为 m 的液体,在引力作用下,根据牛顿定律,其重力为 $G(=mg)$,水的质量与重力常用单位体积来量度,在匀质液体中,单位体积内所具有的质量称为密

度,即

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

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。工程中一般将水的密度视为常数,采用在 0.1MPa 压力下,温度为 4°C 时, $\rho_{\text{水}} = 1000\text{kg/m}^3$,而在相同条件下,水银(汞)的密度 $\rho_{\text{汞}} = 13600\text{kg/m}^3$ 。

在匀质液体中,单位体积内所具有的重力称为容重,即

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

根据牛顿定律, $G = mg$ (g 为重力加速度,在水力学计算中,一般取 $g = 9.8\text{m/s}^2$),于是式(1-2)可写成:

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

容重的单位为 N/m^3 (或 kN/m^3),在工程实践中,同样在 0.1MPa 压力下,温度为 4°C 时,把水的容重视为常数,即:

$$\gamma_{\text{水}} = \rho_{\text{水}} g = 1000 \times 9.8 = 9800\text{N/m}^3 = 9.8\text{kN/m}^3$$

而在相同条件下水银的容重为

$$\gamma_{\text{汞}} = \rho_{\text{汞}} g = 13600 \times 9.8 = 133280\text{N/m}^3 = 133.28\text{kN/m}^3$$

ρ 与 γ 是液体的重要物性指标,必须牢记。

二、惯性与惯性力

物体保持静止状态或匀速直线运动状态的性质叫物体的惯性,对液体也同样适用,当液体的运动速度改变或方向改变,会产生惯性力,根据牛顿定律,惯性力(F)的大小用质量 m 来量度,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,惯性力突出表现在边界条件的改变上。

三、粘滞性与粘滞力

液体具有流动性,在运动状态时,具有抵抗剪切变形的能力,在流层间产生内摩擦力,这种特性称为粘滞性。这种内摩擦力称为粘滞力。液体在运动时,质点之间存在着相对运动,而质点间要产生一种内摩擦力来抵抗其相对运动,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体能量损失的根源,是内因,而能量损失问题是水力学重要课题之一,在以后讲述能量损失时,再详细讨论液体的粘滞性问题。

在水力学中,为了简化分析,可对液体的粘滞性暂不考虑,从而引出理想液体的概念,但对有粘性的实际液体,须再做必要的理论补充与实验修正。

四、弹性、表面张力与毛细现象

弹性是指液体受到压力或温度变化时而产生的液体体积变化的性质。

当温度不变,仅使作用在液体上的压力增加而使液体体积减小的特性,称为“压缩性”。对于水,它能承受压力且对压缩变形有很大的抵抗力。试验证明:每增加 0.1MPa 压力时,水的体积只改变万分之零点五。与水相似,其它液体的压缩性也极小,故可认为液体是不可压缩的,液压机械的传动就是利用了液体的这一重要性质。

当压力不变,仅使液体的温度增高而使液体体积增加的特性,称为“膨胀性”。水受温度的影响而膨胀的数值也很小,试验表明:在 10~20℃ 时,温度每增加 1℃,水的体积只改变万分之一点五,水温从 4℃ 增加到 50℃,其体积相对增大约 1%。

在铁路工程中,水的压力和温度变化的幅度很少超过上面举例的范围,因而水的体积的微小变化实际上是完全可以忽略不计的。所以一般可认为水是不可压缩的,也不考虑其膨胀性。把水的容重和密度视为不变的常量,即取 $\gamma = 1000\text{kg/m}^3$, $\rho = 9.8\text{kN/m}^3$ 。但在特殊情况下,例如研究有压管路中的水锤现象时,就要考虑水的压缩性;研究供热工程时,才考虑水的膨胀性。

表面张力能使水滴悬在水龙头口上,水面稍高出碗口而不外溢,铁针能浮在液面上而不下沉。所有这些现象都是液体在和另一种不相混和的液体或气体的分界面上分子间内聚力作用的结果。液面好像是一张均匀受力的弹性膜,表面张力有使液体表面积尽量缩小的趋向,从而使液面上的和空中的水滴近似地成为圆形。所以表面张力是液体自由表面在分子作用半径一薄层内由于分子引力大于斥力在表层沿表面方向而产生的拉力。

表面张力很小,在水力学中一般不考虑它的影响。但在水力学实验中,经常使用盛水或水银的细玻璃管做测压管,由于表面层内液体分子与固体壁分子的相互作用,而发生毛细管现象,如图 1—1 所示。

对 20℃ 的水,玻璃管中的水面高出容器水面的高度 $h = \frac{29.8}{d}$ (mm);对水银,玻璃管中汞面低

于容器汞面的高度 $h = \frac{10.15}{d}$ (mm)。上面二高度

h 的公式中, d 为玻璃管的内径,以 mm 计。由于

毛细管现象的影响,使测压管读数产生误差。因此,通常测压管的直径不小于 1cm。

图 1—1

第三节 作用在液体上的力

液体的运动或相对平衡状态是由各种力的作用引起的,其中重力或外加力而产生的压力以及边界条件改变而产生的惯性力的作用是液体运动的外因,液体的物理、力学性质是液体运动的内因,因此,汇总这些力有重力、压力、惯性力、粘滞力等,水力学就是研究这些力的相互作用关系。为了分析方便,将作用在液体上的力分为质量力和表面力两种。

一、质量力

作用于所研究的液体体积内所有质点上的力称为质量力。质量力的大小与液体质量成正比,对匀质液体亦与体积成正比,故又称体积力。

在水力学中,常见的质量力有两种类型:一类是重力,即地球对液体的每个质点的引力,大小用 $G = mg$ (或 $G = \gamma V$)表示,方向垂直向下;另一类为惯性力,即液体改变速度与运动方向时所产生的力,用 $F = -ma$ 计算,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

作用于液体表面上的力称表面力,其大小与作用面积成正比,故又称面积力。水力学中常见的表面力有固体边界对液体的摩擦阻力 T ; 作用于液体自由表面上的大气压力; 一部分液体对相邻的另一部分液体在接触面上的作用力等。

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; 如表面力与被作用面平行,称为切应力。

有质量力的地方,必然有重力、压力(压强)或惯性力存在。它们促使水流运动,因而综合反映出液体的流动性,而液体运动时所产生的边界阻力与内摩擦力,又综合反映出液体的粘滞性,二者刚好构成液体运动的矛盾统一体。它们既相矛盾又相依存,其对立统一的结果,使液体产生运动与相对平衡,这正是水力学所要分析水流运动的基本指导思想。

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。

第四节 水力学的研究方法

现代水力学要运用经典力学的基本原理,如牛顿力学三大定律、质量守恒定律、动能定律、动量定律等进行理论分析,以建立水流运动的基本方程,同时还要结合量纲分析、科学实验等方法验证理论的完整性。研究水流运动原则上应从三维空间来分析,但从工程水力学的角度考虑,常将三维(三元)流动简化为一维(一元)流动水力学基本方程,就可方便地解决许多液体流动问题。

小 结

水力学主要研究液体(主要是水)的平衡和机械运动规律,现将有关内容归纳如下:

一、液体的主要物理力学性质

1. 引力特性: 从而引出重力 $G = mg$, 密度 $\rho = \frac{m}{V}$ 与容重 $\gamma = \frac{G}{V}$, 其关系为 $\gamma = \rho g$ 。
2. 惯性: 从而引出惯性力 $F = -ma$ 。
3. 粘滞性: 从而引出粘滞力(内摩擦力), 它是导致能量损失的根源。
4. 弹性: 从而引出表面张力、膨胀、压缩等一系列问题, 重点是不易压缩性。

二、从质量力与表面力描述液体运动的基本概念。

三、从宏观上看液体连续介质的概念、理想液体的概念和意义。

复习思考题与作业

- 1—1 水力学研究的对象及任务是什么?
- 1—2 液体的基本特征是什么? 它同气体、固体的主要区别是什么?
- 1—3 何谓连续介质? 为什么要引用连续介质的概念? 它对于研究液体运动(或相对静止)规律的意义何在?

1—4 什么叫液体的粘滞性？在什么条件下才能显示粘滞性？

1—5 理想液体和实际液体有何区别？为什么要提出理想液体？

1—6 已知油的容重 $\gamma = 8.4 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ ，求油的密度。

1—7 已知 0.5 m^3 水银的质量为 6795 kg ，试求水银的容重和密度。

1—8 1 m^3 水的质量是多少？其所受的重力是多少？应怎样理解质量与重量、重量与重力的区别？试用国际单位制与工程单位制进行分析并说明。

1—9 水的密度 $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ，海水密度 $\rho_{\text{海水}} = 1020 \text{ kg/m}^3$ ，油的密度 $\rho_{\text{油}} = 800 \text{ kg/m}^3$ ，水银的密度为 $\rho_{\text{汞}} = 13600 \text{ kg/m}^3$ ，分别求水、海水、油、水银的容重（ $\gamma_{\text{水}}$ ， $\gamma_{\text{海水}}$ ， $\gamma_{\text{油}}$ ， $\gamma_{\text{汞}}$ ）各为多少？

第二章 水静力学

内容提要:水静力学是研究液体处于相对静止或相对平衡状态(液体质点间不存在相对运动)下的力学规律,以及这些规律在工程实践中的运用。

人的认识规律总是:认识从实践始,认识应从特殊到一般。水流运动是绝对的,而静止则是相对的、特殊的,为此水力学先从水静力学谈起。

第一节 静水压强

对于水静力学,液体质点间没有相对运动时,粘滞性不起作用,没有剪切力,没有惯性力,质量力中只有重力。液体几乎不能承受拉应力,所以水静力学是研究重力作用下的静水压强问题。

一、静水压强及其特性

(一)静水压力

如图 2—1 所示,为一输水涵洞,在涵洞进水口 A 点设有铰的闸门,在 B 点施加力 T 可将闸门拉开。拉开闸门时所需的拉力很大,因为水体对闸门有很大的静水压力。

静止水体对与水接触的壁面以及水体内部质点之间都有压力的作用,这个压力叫静水压力。静止液体对一个受压面上所作用的全部压力,称为静水总压力,也简称为静水压力。静水压力用大写 P 表示,它的单位是 N 或 kN。

(二)静水压强

单位面积上的静水压力称为平均静水压强。

图 2—1

如图 2—1 所示,在闸门平面上取微小面积 dA ,该面积所受的静水总压力为 P ,则面积 dA 上所受的静水压强为 $p = \frac{P}{dA}$,当受压面面积无限缩小而趋近于 0 时,即 $dA \rightarrow 0$, $\frac{P}{dA}$ 的极限值称为一点的静压强,简称点压强

$$p = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{P}{dA} = \frac{dP}{dA}$$

静水压强用符号小写 p 表示,单位为 kPa。应用点压强可以清楚地表示出任意点处静水压强的分布大小。

(三)静水压强的特性

1. 静水压强的垂直性

静水压强垂直并指向作用面(受压面)。因为静止液体不能承受剪切力,若静水压强与作用面不垂直,水体必然会受到剪切力而产生流动;静止液体也不能承受拉力,所以静水压强的方向只能是垂直并指向作用面。

2. 静水压强的各向等值性

如图 2—2 所示,在静止水体中取定一点 A ,作用于 A 点的静水压强就是个定值,即 $p_{A_1} = p_{A_2} = \dots = p_{A_n}$,如果不等,液体的静止状态必然受到破坏。

二、静水压强的大小

(一) 自由表面和表面压强

液体与它上面的气体的交界面称为自由表面。水在重力作用下的自由表面为水平面。

图 2—2

自由表面上的气体压强称为表面压强,用 p_0 表示。通常自由表面上是大气,大气的质量对物体或对自由表面产生的压强叫大气压强,用 p_a 表示。此时, $p_0 = p_a = 98\text{kPa}$ 。

(二) 静水压强的基本方程式

如图 2—3 所示,表面压强为 p_0 的静止水体,水深 h 处有一点 A ,现找出 A 点的压强。

围绕 A 点作一个面积为 S 的水平面,取以 S 为下底,高为 h 的等截面垂直水柱体,来分析水柱体的受力情况:

1. 质量力

水柱体静止,无惯性力,质量力中只有重力。若水体容重为 γ ,重力 $G = \gamma V = \gamma h S$,方向垂直向下,作用于水柱体重心处。

2. 表面力

水柱体静止,无粘滞力,表面力中只有水柱体上、下端和侧面的压力。

图 2—3 因侧面压力对称,互相抵消,故可只考虑竖直方向的力。

水柱体上表面的总压力 $P_0 = p_0 S$,方向垂直向下;下底的静水总压力 $P = p S$,方向垂直向上。水柱体沿竖直轴力的平衡方程(向下为正):

$$\begin{aligned} P_0 + G - P &= 0 \\ p_0 S + \gamma h S - p S &= 0 \\ p &= p_0 + \gamma h \end{aligned} \quad (2-1)$$

式(2—1)为静水压强的基本方程式。从该式可以看出:

1. 表面压强 p_0 将等值地传递到静止液体的每一点,这也是液压传动的基本原理;
2. 当 $p_0 = 0$ 时,静水压强与水深成正比。

三、静水压强的表示法——绝对压强、相对压强、真空值

工程实践中压强大小的计算,根据起算点的不同,分别以绝对压强、相对压强与真空值来表示。

(一) 绝对压强、相对压强

通常以没有空气的绝对真空(即压力为零)作基准算起的压强称为绝对压强,用 $p_{\text{绝对}}$ 表示。

以大气压强为基准算起的压强称为相对压强,用 $p_{\text{相对}}$ 表示。

任一点的相对压强与绝对压强总相差一个大气压强值,即:

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

下面以一个挡水的闸门为例,说明绝对压强与相对压强的关系。

如图 2—4 所示的闸门, A 点在水面下深度为 h 处, B 点在自由表面上。

对于 A 点, 以真空作为基准计算的压强为绝对压强

$$p_{\text{绝对}} = p_0 + \rho g h = p_a + \rho g h$$

以大气压强为基准计算的压强为相对压强

$$p_{A\text{相对}} = p_{A\text{绝对}} - p_a = p_a + \rho g h - p_a = \rho g h$$

实际上, 闸门 A 点的背面也有大气压强 p_a 存在, 这个 p_a 与 A 点的 p_a 相抵消, 所以, 对闸门起作用的只是相对压强。

图 2—4

对于 B 点, 因为 B 点在自由表面上, 水深为零, 所以

$$p_{B\text{绝对}} = p_a + \rho g h = p_a = 98\text{kPa} (\text{kN/m}^2)$$

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

注: 通常建筑物表面和液面都作用着大气压强, 而大气压强一般是随海拔高程及气温的变化而变化。在物理学上, 海平面上的标准大气压强 (P_{atm}) 相当于 760mmHg (或 10.336mH₂O) 在其底部所产生的压强 (是对完全真空面而言, 称绝对大气压强), 即

$$p_{atm} = \rho_{\text{汞}} h_{\text{汞}} = 133.28 \times 0.76 = 101.293\text{kN/m}^2 = 101.293\text{kPa}$$

$$(\text{或 } p_{atm} = \rho_{\text{水}} h_{\text{水}} = 9.8 \times 10.336 = 101.293\text{kN/m}^2 = 101.293\text{kPa})$$

工程上为了计算方便, 在一般情况下, 均取一个绝对大气压相当于 10mH₂O 在其底部所产生的压强 (或 736mmHg), 即

$$p_a = \rho_{\text{水}} h_{\text{水}} = 9.8 \times 10 = 98\text{kN/m}^2 = 98\text{kPa} = 0.098\text{MPa}$$

$$(\text{或 } p_a = \rho_{\text{汞}} h_{\text{汞}} = 133.28 \times 0.736 = 98\text{kN/m}^2 = 98\text{kPa})$$

在以后的水力计算中, 凡大气压强的绝对值统用 $p_a = 98\text{kN/m}^2 = 98\text{kPa}$ 表示。由于建筑物表面和液面都作用着大气压强, 这就是说以地方大气压面为计量面, 这些大气压强相互抵消, 不起任何作用, 称地方大气压强, 故大气压强的相对值 $p_{a\text{相对}} = 0$ 。

上述结果表明, 当水面暴露于大气中时, 水面某点的绝对压强就是大气压强, 其绝对值为 98kPa, 而大气压强的相对压强为零。

在工程实践中, 压强通常都是以相对压强表示, 在以后的章节中, 如未注明者均指相对压强, 而不再加角标, 仍以 p 表示。

(二) 真空值

在工程实践中, 压强都是以相对压强表示, 只有相对压强出现负值时, 提绝对压强才有实际意义。例如水泵的吸水管中、虹吸管中都会出现相对压强为负值的情况 (即负压), 负压就是该点压强小于大气压强的数值, 或者说该点绝对压强小于大气压强而形成部分“真空”。工程

上不用负压表示压强, 而是用大气压强与该点绝对压强的差值表示压强, 特称之为真空值, 也可用负的相对压强的绝对值表示真空值 (p_v), 即 $|p_{\text{相对}}| = p_v$, 它们的关系如图 2—5 所示。图中 0—0 为完全真空面, $p_a - p_a$ 为地方大气压面, 二者之间的差值为绝对值 98kN/m^2 。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称相对压强, 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, 用公式表

图 2—5

可见绝对压强无负值, 相对压强有正有负, 用公式表

示负压时则为

$$p_v = |p_{\text{绝对}} - p_a| = |p_{\text{相对}}| \quad (2-3)$$

某点的真空值越大,则绝对压强越小。从理论上讲,绝对压强小到零时,真空值最大,为 $p_v = |0 - p_a| = 98\text{kPa}$,这种状态称为绝对真空,可见真空值 p_v 在 $0 \sim 98\text{kPa}$ 范围内变动,实际上绝对真空是不可能存在的。

四、静水压强的计量单位

(一)以单位面积上的压力表示

压强用单位面积上所受压力的大小,即应力单位表示,单位为 N/m^2 、 kN/m^2 、Pa 或 kPa。这种表示方法是最基本的。

(二)以液柱高度表示

因为水和汞的容重均为常数,水柱高度和汞柱高度的数值就可以代表压强的大小,常用米水柱高度(mH_2O)和毫米汞柱高度(mmHg)表示。

液柱的高度可从静水压强基本方程式 $p = p_0 + \rho h$ 导出,取 $p_0 = 0$,则 $h = \frac{p}{\rho}$ 。

(三)以工程大气压 倍数表示

海平面上的平均大气压为一个标准大气压,一个标准大气压对真空面而言相当于 760mm 汞柱(或 10.336m 水柱)在其底部所产生的压强,数值为

$$\text{汞 } h_{\text{汞}} = 133.28 \times 0.76 = 101.293\text{kN/m}^2 = 101.293\text{kPa}$$

$$\text{或 } \text{水 } h_{\text{水}} = 9.8 \times 10.336 = 101.293\text{kN/m}^2 = 101.293\text{kPa}$$

大气压强随海拔高度不同而有所差异,工程中常用工程大气压,一个工程大气压数值相当于 10m 水柱。即:

$$\text{水 } h_{\text{水}} = 9.8 \times 10 = 98 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ 工程大气压} = 98 \text{ kPa}$$

压强的各种单位之间的换算关系见表 2—1。

表 2—1 单位换算

帕 (Pa)	千帕 (kPa)	兆帕 (MPa)	米水柱 (mH_2O)	毫米汞柱 (mmHg)
1	10^{-3}	10^{-6}	0.101×10^{-3}	7.5×10^{-3}
10^3	1	10^{-3}	0.101 97	7.5
10^6	10^3	1	101.971 62	7 500.64
9.8×10^4	98	0.098	10	735.6
101 325	101.325	0.101 325	10.33	760
9 806.55	9.806 55	0.009 81	1	73.56
133.332	0.133 332	0.000 133	1.36×10^{-2}	1

五、静水压强的量测与计算

(一)等压面

从式(2—1)可以看出,静止水体中,深度 h 相等的各点,静水压强都相等。压强相等的点

组成的面称为等压面。静止液体中的自由表面因各点水深均为零而形成等压面。重力作用下的静止液体中,等压面是水平面。连通的同种静止液体,同一水平面都是等压面,重力作用下两种互不混杂的静止液体的交界面也是等压面。如图 2—6(a)所示,连通器内装水, $N-N$ 面及其以下的水平面均为等压面。如图 2—6(b)所示,为装有两种不同液体的连通器, $N-N$ 面及其以下的水平面均为等压面, $N-N$ 面以上的水平面均不是等压面。等压面的认定是很重要的,它是推算压强的重要工具。

(二) 压强量测仪表与压强推算

测量压强的仪器种类很多,量程的大小和计量的精度也各有不同。按作用原理可分为液体测压计和金属压力计两大类。液体测压计有测压管、水银测压计、水银差压计等。液体测压计精度高,但携带不便,量测范围有限,主要用于实验室中。

图 2—6

1. 测压管

测压管是直接利用同种液体的液柱高度来测量液体中静水压强的仪器,如图 2—7 所示,测压管是一支两端开口的玻璃管,下端与所测液体相连,上端与大气相通,在液体相对压强的作用下,测压管的液面将上升,直到 A 点压强与 A 点压强相等,也即测压管水面与容器水面同高时为止。

例 2—1 如图 2—7 所示为一水箱,水箱的自由表面上作用着大气压强, A 点在水深 4m 处,若在 A 点处连一测压管,测压管水面与大气相通,求测压管高度 h_p 。

解 取 $N-N$ 为等压面,

$$p_A = p_A = \rho g h = 9.8 \times 4 = 39.2 \text{ kPa}$$

$$p_A = \rho g h_p$$

$$h_p = \frac{p_A}{\rho g} = \frac{39.2}{9.8} = 4 \text{ m}$$

图 2—7

结论:测压管高度 h_p 反映 A 点的相对压强。同种液体的连通器,表面压强相等时,液柱必等高。

例 2—2 如图 2—8 所示的水箱,水箱封闭后由 A 口打入压缩空气,测压管内水面将上升,若图中 $h = 3 \text{ m}$,求水箱内水面与水面下 B 点的绝对压强和相对压强。

解 沿水箱内水面取等压面 $N-N$,

水箱内水面的绝对压强:

$$p_{0\text{绝对}} = p_a + \rho g h = 98.0 + 9.8 \times 3 = 127.4 \text{ kN/m}^2 = 127.4 \text{ kPa}$$

水箱内水面的相对压强:

$$p_{0\text{相对}} = p_{0\text{绝对}} - p_a = 127.4 - 98.0 = 29.4 \text{ kPa}$$

水面下 B 点的绝对压强:

$$p_{B\text{绝对}} = p_{0\text{绝对}} + \rho g h = 127.4 + 2 \times 9.8 = 147.0 \text{ kPa}$$

水面下 B 点的相对压强:

$$p_{B\text{相对}} = p_{B\text{绝对}} - p_a = 147.0 - 98.0 = 49.0 \text{ kPa}$$

图 2—8