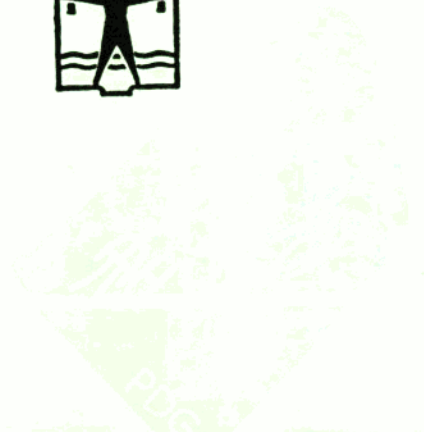


中等专业学校教材

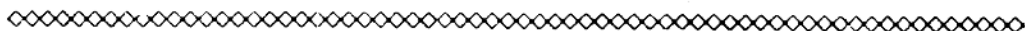


电力生产概论

大连电力经济管理学校 王升晨 主编



中等专业学校教材



电力生产概论

大连电力经济管理学校 王升晨 主编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书较全面地讲述了电力生产过程,紧紧围绕着发、输、变、配、售五大环节,介绍了有关电力生产的基本原理及运行维护的基本知识。

全书共分四部分(十五章)。第一部分(一、二、七章)讲述流体力学、热工学和电工学的基础知识,为讲述电力生产过程奠定基础。第二部分(三~六章及八、九章)讲述发电厂的动力设备(锅炉、汽轮机、水轮机和电机)的结构和工作原理。第三部分(十~十三章)讲述电能传输、分配、使用及电压变换等。最后(十四、十五章)讲述电能的销售、电力系统电能质量控制及电力系统调度的有关原则。

本书系电力中专管理类各专业的《电力生产概论》课教材,也可作为电力企业管理人员的培训教材和参考书。

中等专业学校教材

电 力 生 产 概 论

大连电力经济管理学校 王升晨 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

184×260毫米 16开本 18.25印张 410千字

1993年6月第一版 1993年6月北京第一次印刷

印数 0001—6690 册

ISBN 7-120-01678-4/TK·295

定价: 4.40 元

前 言

《电力生产概论》是依据《1989~1993年电力中专学校教材建设规划(试行)》编写的。本书是电力中专学校管理类专业的技术基础课教材。为了适应电力企业由生产型向生产经营型转变,《电力生产概论》以电力系统的整体观点为撰写主题,以电力生产的发、输、变、配、售五大环节为主要内容,重点讲述电力生产过程的连续性、整体性和统一性。

《电力生产概论》的教学目的是:使学生掌握流体力学、热工学和电工学的基础知识和基本理论;重点掌握电力生产过程,并能用安全、经济的观点去分析、解决电力生产实践的一些具体问题。为了突出实用的特点,本书适当地选择了例题,并于每章后附有适量的思考题与习题。

本书由王升晨任主编,并编写了绪论、第七~十五章;刘力祥编写了第一~第六章。宋文复任主审。

电力中专管理类专业研究会认真讨论了《电力生产概论》初稿,为本书能成为一本适用的教材奠定了基础。在编写过程中,东北电业管理局孙景明对《电力生产概论》曾提出许多有益的意见,在此一并表示感谢。

电力生产过程既简单又复杂。所谓简单,是指产品单一、市场固定;所谓复杂,则指生产过程是连续统一的,又是瞬息万变的。因此,要在四十余万字的《电力生产概论》中,深入浅出地讲述电力生产过程实属难题。限于作者水平,书中错误难免,诚恳地希望读者批评指正。

编者

1992年2月于大连

目 录

前言	
绪论	1
第一章 流体力学基本知识	5
第一节 流体的主要物理性质	5
第二节 流体静力学	8
第三节 流体动力学	13
第四节 水力阻力	17
思考题与习题	21
第二章 热工学基础知识	22
第一节 工质及其基本状态参数	22
第二节 理想气体状态方程式	25
第三节 热力学第一定律	25
第四节 气体的基本热力过程	29
第五节 热力学第二定律	31
第六节 水蒸气	34
第七节 蒸汽的流动过程及节流	39
第八节 蒸汽动力循环	42
第九节 传热学基本知识	47
思考题与习题	55
第三章 锅炉设备	56
第一节 电站锅炉概述	56
第二节 锅炉的燃料及其燃烧	59
第三节 煤粉制备	63
第四节 自然循环锅炉	68
第五节 强制循环锅炉和直流锅炉简介	72
第六节 锅炉的主要经济指标	76
第七节 锅炉机组的主要辅助设备	80
第八节 水处理	83
思考题与习题	85
第四章 汽轮机设备及热力系统	86
第一节 汽轮机概述	86
第二节 汽轮机的工作原理	88
第三节 多级汽轮机	93
第四节 汽轮机的效率与经济指标	96

第五节 汽轮机主要部件的结构	39
第六节 汽轮机的调节	103
第七节 汽轮机的保护装置及供油系统	106
第八节 凝汽设备	107
第九节 发电厂的热力系统	111
第十节 发电厂的经济指标	115
思考题与习题	118
第五章 核电站的基本知识	120
第一节 核能和核反应	120
第二节 核电站	121
思考题	125
第六章 水力发电站	126
第一节 概述	126
第二节 水电站的水工建筑物	128
第三节 水库	131
第四节 水轮机	133
第五节 水轮机的辅助系统	138
思考题	140
第七章 电工基础知识	141
第一节 直流电路	141
第二节 电磁的基本知识	145
第三节 正弦交流电	148
第四节 正弦交流电路	154
第五节 正弦交流电路的分析和计算	165
第六节 三相正弦交流电路	170
第七节 对称三相正弦交流电路的分析和计算	178
习 题	181
第八章 同步电机	184
第一节 概述	184
第二节 同步发电机	186
第三节 同步发电机的并联运行	190
第四节 发电机功率的调节	192
第五节 同步电动机和同步调相机	193
思考题	196
第九章 异步电动机	197
第一节 异步电动机的构造和主要技术参数	197
第二节 异步电动机的工作原理	199
第三节 异步电动机的工作特性	201
思考题与习题	204
第十章 电压变换及变电站	205

第一节 概述	205
第二节 电力变压器	207
第三节 变压器的主要技术参数	209
第四节 变压器的连接组和并联运行	211
第五节 变电站的主要设备	215
第六节 变电站的技术管理和设备管理	224
思考题	226
第十一章 发电厂和变电站的电气主接线与自用电	227
第一节 概述	227
第二节 电气主接线的典型设计	228
第三节 发电厂和变电站的自用电	230
思考题	233
第十二章 电能的输送及送电线路	234
第一节 概述	234
第二节 高压架空送电线路	235
第三节 送电网络的改造与建设	243
思考题与习题	246
第十三章 电能的分配与低压供电	247
第一节 高压架空配电线路	247
第二节 配电变压器的经济运行	251
第三节 低压供电系统	255
第四节 配电装置	259
思考题与习题	261
第十四章 电能的销售——营业管理	262
第一节 概述	262
第二节 营业管理工作	263
第三节 电价与电费计算	267
思考题	268
第十五章 电力系统	269
第一节 概述	269
第二节 电能质量与质量控制	271
第三节 电力系统调度	274
思考题	278
附录	279
表一 饱和水与饱和蒸汽性质表(按压力排列)	279
表二 饱和水与饱和蒸汽性质表(按温度排列)	280
表三 未饱和水与过热蒸汽性质表	282

绪 论

电能是电力企业的主导产品。电力生产过程实质上是电能的生产、分配和销售过程。电力生产的主要特点是生产、流通和消费同时进行，并由此决定了电力生产过程是一个不可分割的有机整体。它可以概括为电能的生产（发电）、电能的传输（送电）、电压的变换（变电）、电能的分配（配电）和电能的销售（营业）等五大环节。发、送、变、配、售五大环节连续同时进行，构成了完整的电力生产过程。

一、电能在我国经济发展中的地位和作用

能源是国民经济发展的物质基础。在我国，作为二次能源的电能已经成为工农业生产的主要动力。国务院关于《国民经济和社会发展十年规划和第八个五年计划纲要》中指出：“电力，实行因地制宜、水火电并举和适当发展核电的方针。要重视水电建设，认真贯彻大中小相结合、梯级开发和综合利用的方针。要在水力资源丰富的黄河上游、长江干支流和红水河流域加快水电的开发。火电建设，积极建设矿区电厂、沿海沿江港口电厂、铁路沿线和负荷中心电厂，并积极发展热电联产。”国务院的决定，表明了电力工业在经济发展中的地位是举足轻重的，说明了电力工业已经成为经济发展中最重要的能源产业。

电能的主要特点是：

（1）电能便于集中、便于传输、便于分配、便于转换（便于转换成光能、热能和机械能）、便于使用。因此，被称为“方便的能源”；

（2）电能代替其它能源可以提高效率。例如，用电动机代替柴油机，可节能50%左右；用电气机车代替蒸汽机车，效率可提高20%左右。因此，电能被称为“节约的能源”；

（3）电能在使用时没有污染。有利于改善劳动条件，有利于劳动者身体健康。因此，电能被称为“无污染的能源”。

由于电能的上述优点，使其使用范围不断扩大。目前，电能已经渗透到国民经济的各部门、各领域。电能作为优质二次能源的需求动向及供需情况，将对国家的能源开发政策和国民经济的持续稳定发展产生重大影响。因此，世界各国都把电能消费在总能源消费中所占的比重，作为衡量一个国家经济发展水平和现代化水平的标志。我国国民经济发展的实践证明，以电能为主导产品的电力工业已经成为国民经济的基础工业。

国民生产总值是一个能充分反映一个国家经济发展水平的指标，而国民生产总值又与用电需求密切相关。一些发达国家的经验表明，电能消费的增长速度应超前于国民经济的增长速度。50~70年代，电能消费增长速度与国民经济总产值增长速度之比（或称为电力弹性系数），在美国为1.9，原苏联为1.3，日本为1.2，英国为2.2，法国为1.5，联邦德国为1.7。这种“超前性”表明了电力工业应是国民经济发展的先行工业。

上述的“超前”关系，在我国主要由下列因素决定：

(1) 我国在实现了由计划经济向有计划的商品经济转变之后，生产力已成为检验经济发展程度的唯一标准。而生产力的发展在很大程度上依赖于电气化的水平；

(2) 随着新技术革命的深入发展，出现了许多新的、规模大的、耗电多的新兴产业和工业。随着大量新技术的应用，电能的使用范围日趋广泛，全社会对电能的需求量将显著增加；

(3) 随着人民生活和文化水平的不断提高，电视机、电冰箱、洗衣机等家用电器已成为人民生活的必需品。这些家用电器的普及，致使生活用电量大幅度提高。

电能消费增长速度的“超前”性，从一个侧面更进一步突出了电能在国民经济发展中的地位。我国社会主义建设的实践证明，一旦电力消费增长速度滞后于国民经济增长速度，必将制约国民经济的发展。

综上所述，以电能为主导产品的电力工业既是重要的能源产业，又是国民经济的基础工业；既是国民经济发展的先行工业，也是与人民生活息息相关的公用事业。

电能 在国民经济发展中的地位决定了其在国民经济发展中的重要作用。当今世界，社会的发展以及人们的生活对电能的依赖程度愈来愈高，需求量越来越大。甚至可以说，没有电能的社会是一个黑暗的社会、瘫痪的社会。有一篇科学幻想小说，讲到了从另一个星球上来的“人”轻而易举地征服了地球。就是因为他们拥有一种能同时切断地球上所有的电源的设备。这绝不是危言耸听，因为现实社会的一切经济活动、人民生活，甚至军事活动都与电能密切相关。经济的振兴、人民生活水平的提高、社会福利事业的发展、科技文化的繁荣等，各方面都与电能休戚相关。因此，可以毫不夸张地说，电能是人类现代文明的基础，是现代社会发展的源泉。

二、电力工业的基本特征和电力生产的主要特点

电力生产是建立在现代科学技术基础上的高度集中的社会化大生产。在我国，电力工业具有现代化工业企业社会化大生产的共同特征——生产资料社会主义公有制；在国家计划的指导下，进行独立经济核算、自负盈亏，为满足社会需求而进行生产经营活动。另外，电力企业由于其行业特点，又具有与其它企业不同的下述基本特征：

(1) 电能是一种无形的、不能储存的特殊商品。电能的生产、流通和消费是瞬间同时进行、同时完成的。如果没有电能的销售环节，发电厂就无需也无法生产出电能，这时，发电机在原动机的带动下只能产生端电压，而不能生产电能。

(2) 电能的生产、传输、分配和使用必须严格保持平衡。这里的“严格”，不仅指在数量上保持平衡，而且还含有确定的时间概念，即在某一确定的时间里，生产和消费的电能必须保持平衡。这一特征要求电力企业充分利用各种经济手段（如超电力、超电量的罚款制度）、行政手段（实行峰、谷分时电价）和技术手段（应用各种电力负荷监控装置）来实现计划用电。

(3) 由于电能消费增长速度的“超前”性，电力企业必须配置足够的发供电生产能力，以满足事故备用、检修备用以及国民经济发展“超前”备用的需要。

(4) 电力生产是通过一系列极为复杂的生产环节来进行的，这些生产环节构成一个

整体——电力系统。在一个电力系统内，不管有多少个发电厂、供电局，不管有多少个用户，不论其隶属关系如何，电力生产都必须接受电力系统的统一调度，实行统一的质量标准（频率、电压和供电可靠性）；电能产品统一管理，由网（省）局统一分配和销售。这种统一调度、统一管理、统一指挥的特征是电力工业最基本的特征。

电力生产的特点突出表现在电力生产安全性和计划性两个方面：

（1）电力生产的中心任务是保证电力系统安全、可靠、优质、经济地发供电。电力生产的安全、可靠主要表现在能否有效地防止大面积或长时间停电事故，特别是要有效地防止电力系统崩溃瓦解事故。大面积、长时间停电事故将会给国民经济造成严重损失。如1982年湖北电网事故甩负荷895MW，仅武汉钢铁公司的直接经济损失就达150万元；1977年美国纽约电网事故，造成直接经济损失3.45亿美元。因此，电力生产必须坚决贯彻“安全第一，预防为主”的方针，电力企业全部生产活动必须严肃认真地执行《电业安全工作规程》，尽最大努力消灭或减少事故，保证电力系统稳定、连续发供电。以强化电力系统运行管理为核心，逐步推行电力系统可靠性管理，保证充足、可靠地向社会提供合格、廉价的电能。

（2）严肃电力生产的计划性，既是社会主义经济发展的客观需要，也是电力企业自身生产的需要。电能是国家的重要能源，对电能的计划生产和统一分配使用，是我国电力生产经营管理的一项基本政策。在国家计划的指导下，国民经济各部门“以量定产”（以分配的电量和电力指标确定企业的产量和产值），这就要求电力企业必须按计划生产出“适量”的电能。

由于我国电力资源开发相对不足，长期以来，电能供需矛盾突出。为了适应国民经济发展的客观需要，电力企业应最大限度地发挥设备潜力，保证实现国家下达的指令性和指导性发电计划。同时，电力用户应节约用电。电能供需双方应认真落实“开发能源和节约能源并重”的方针。

电力企业的基本特征和电力生产的特点决定了电力企业的生产经营方式——加强自身的调节和控制，谋求电力用户的支持和信任，实现“合作供电”；加强管理、发展科技，谋求高效的“社会性经营”。唯此电力企业才能生机勃勃的向前发展。所谓“合作供电”，系指电力用户应按用电指标计划用电，并根据电力企业的供电能力合理组织生产，以保持电力系统产、供、销的随时平衡。所谓高效的“社会性经营”，系指电力生产全过程应全面推行技术进步，提高效率和效益，也就是要提高发电厂的热效率，提高发供电设备利用率，降低供电损失率，降低厂用电率，降低用电产品单耗等，最大限度谋求全社会效益。即电力企业通过提高效率，一方面提高本企业的经济效益，另一方面谋求全社会的综合效益。

三、学习《电力生产概论》的基本方法

《电力生产概论》是电力中专学校管理类专业的技术基础课。不能设想，不掌握电力生产过程而能科学地学习和掌握电力企业经营管理知识；不了解电力生产过程而能有效地进行电力企业经营管理。因此，有充分的理由说，《电力生产概论》课，是电力中专学校管理类各专业学生学好专业课或将来从事电力企业管理工作的基础和保证。

学习《电力生产概论》最基本的方法是，以电力系统的整体观点为指导，注重电力企业的基本特征和电力生产的特点，全面地、本质地理解和掌握电力生产活动。

全面地、本质地理解和掌握电力生产活动，就是要从电力生产五大环节的全过程去分析问题，要从电力企业“转轨变型”的实际出发，把电力企业看成生产经营型企业。电能的质量控制，要贯穿于电力生产的全过程。学习《电力生产概论》要克服单纯生产观点，应广泛联系电力企业生产经营管理的实践。通过理论联系实际，充分理解和认真掌握电力企业生产经营管理的基本原则，即以安全生产为基础，以经济效益为中心，以优质服务为宗旨，最大限度地满足社会的用电需求。

第一章 流体力学基本知识

流体力学是研究流体平衡和运动规律的学科。发电厂内流经水泵、风机、水轮机、汽轮机、锅炉及其连接管道中的工作介质都是流体，本课程有关章节如汽轮机、锅炉以及它们的辅助设备等，都广泛地应用到流体力学的基本知识。因此，流体力学是学习电力生产概论和电力工作者所必需的基础知识。

第一节 流体的主要物理性质

物质存在的形态有三种，即固态、液态和气态，其中液态和气态物质统称为流体。流体与固体主要的差别在于它具有流动性。流体没有固定的形状，总是随容器的形状而改变。对于一定质量的液体具有一定的体积，当容器的容积大于它的体积时，液体不能充满容器，而会形成一个自由表面；而气体没有固定不变的体积，它能充满任意容器而没有自由表面。流体具有流动性的原因是其内部分子间的内聚力很小，几乎不能承受拉力而无抵抗拉伸变形的能力；静止时也不能承受切向力的作用而无抵抗变形的能力。但液体与固体一样能承受压力，并且对压缩变形有很大的抵抗能力。

在研究流体的平衡和运动时，必须知道流体的物理性质。下面对其主要物理性质分别加以介绍。

一、密度

流体具有质量的性质用密度来表示。对于各处密度相同的均质流体来说，密度是单位体积内流体所具有的质量。它表示流体质量在空间分布的密集程度。用公式表示为

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

式中 ρ ——密度， kg/m^3 ；

表 1-1 几种流体在大气压下的密度

流体名称	温度 (°C)	密度 (kg/m^3)	流体名称	温度 (°C)	密度 (kg/m^3)
水	4	1000	空气(干)	0	1.293
	20	998		20	1.205
水 银	0	13596	氢	20	0.0899
	20	13546	润滑油	20	918

m ——均质流体的质量, kg;

V ——均质流体的体积, m^3 。

流体的密度随压力和温度的改变而变化。表1-1为几种流体在大气压(101325Pa)下的密度值。

二、膨胀性和压缩性

1. 压缩性

在一定的温度下, 流体的体积随压力升高而缩小的性质称为流体的压缩性。它的大小用体积压缩系数 β_p 来度量。 β_p 表示温度一定时, 增加单位压力所引起的体积相对缩小量, 即

$$\beta_p = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} \quad (1-2)$$

式中 β_p ——流体体积压缩系数, m^2/N ;

V ——流体原有的体积量, m^3 ;

Δp ——流体压力的增加量, Pa;

ΔV ——流体体积的缩小量, m^3 。

流体在压力增大时, 体积减小; 压力减小时, 体积增大。说明 Δp 与 ΔV 的变化方向相反, 故在上式的分子中加一负号, 以保证压缩系数 β_p 的数值为正。

实验指出, 液体的体积压缩系数很小。例如, 当压力在 $(1 \sim 490) \times 10^5 Pa$ 、温度在 $0 \sim 20^\circ C$ 的范围内, 水的压缩系数仅为 $1/20000$ 。气体的压缩性要比液体大得多, 这是由于气体的密度随着温度和压力的改变而发生显著变化造成的。

2. 膨胀性

在一定的压力下, 流体的体积随温度升高而增大的性质称为流体的膨胀性。流体膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_t 来度量, 它表示压力一定时, 升 $1^\circ C$ 所引起体积的相对增加量, 即

$$\beta_t = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta t} \quad (1-3)$$

式中 β_t ——流体的体积膨胀系数, $^\circ C^{-1}$;

Δt ——流体温度的增加量, $^\circ C$;

V ——流体的原有体积, m^3 ;

ΔV ——流体体积的增加量, m^3 。

实践证明, 液体的膨胀系数也很小。例如在常压下, 当温度较低($1 \sim 20^\circ C$)时, 温度每升高 $1^\circ C$, 水的体积最大只改变 $5/10000$; 温度较高($90 \sim 100^\circ C$)时, 温度每升高 $1^\circ C$, 水的体积也仅改变 $7/10000$ 左右。其它液体的膨胀系数也是很小的。因此, 在工程实用上, 当温度变化不大时, 一般可以不考虑液体的膨胀性。必须注意, 把液体看作不可压缩流体, 把气体看作是可压缩流体, 都不是绝对的。例如, 在我们研究管道中的水击

时, 水的压力变化很大, 而且变化过程非常迅速, 这时水的密度变化就不可忽略, 也就是要考虑水的压缩性, 把水做为可压缩流体来处理; 又如锅炉尾部烟道和通风管道中, 气体在整个流动中, 压力和温度的变化都很小, 其密度变化也很小, 实用上往往忽略不计, 通常作为不可压缩流体来处理。

【例 1-1】在采暖系统中一般设置膨胀水箱, 以便系统内的水在温度升高时可以自由膨胀。设系统内水的总容积为 20m^3 , 最大温升为 50°C , 水的体积膨胀系数 $\beta_t = 0.0005^\circ\text{C}^{-1}$, 问膨胀水箱最小应有多大容积?

解 由式 (1-3) 即 $\beta_t = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta t}$, 得:

$$\Delta V = \beta_t V \Delta t = 0.0005 \times 20 \times 50 = 0.5 (\text{m}^3)$$

三、粘性

流体在流动时虽能改变形状, 但却具有抗拒变形的能力。我们把流体抵抗变形的能力称为流体的粘性。例如在同样条件下, 倾倒一杯重油和一杯水, 让它们流动, 发现重油比水流得慢。我们说流得慢的重油具有较大的粘性, 而流得快的水具有的粘性较小, 也就是重油抗拒变形的能力比水大; 但一停止流动, 这种抗拒力也就马上消失。因此, 当流体处于静止状态而不存在变形时, 就表现不出抗拒变形的能力, 也就显不出粘性。

设将两块平板相隔一定距离水平放置, 其间充满某种液体, 并使下板固定不动, 上板以某一速度 u_0 向右移动, 如图 1-1 所示。由于流体与平板间的附着力作用, 紧贴上板的一薄层流体将跟随上板以速度 u_0 向右运动, 而紧贴下板的一层流体和下板一样静止不动。两板之间的各薄层流体在上板的带动下, 都作平行于平板的运动, 其运动速度自上而下逐层递减。显然, 对于相邻两层液体, 流动较快的液层将对流动较慢的液层产生一个拖力, 使其流动加快; 而流动较慢的液层将对流动较快的液层产生一个阻力, 使其流动减慢。这种由于流速不同、流层间发生相对运动而产生的切向力称为内摩擦力。根据牛顿实验研究的结果, 运动流体产生内摩擦力的大小与垂直于流动方向的速度梯度 (单位距离的速度变化) 成正比, 与接触的面积成正比, 并与流体的性质有关, 而与接触面上的压力关系甚微。这就是牛顿内摩擦定律, 其数学表达式为

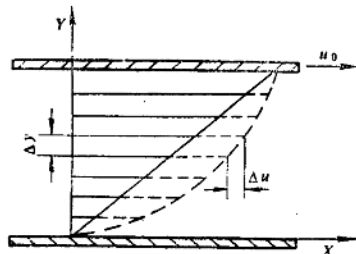


图 1-1 流体粘性实验示意

$$F = \mu A \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1-4)$$

式中 F —— 流体层接触面上的内摩擦力, N ;

A —— 流体层间的接触面积, m^2 ;

$\frac{\Delta u}{\Delta y}$ —— 垂直于流动方向上的速度梯度 (数值上等于单位距离的速度变化), s^{-1} ;

μ —— 与流体的物理性质有关的比例系数, 称为动力粘性系数或动力粘度, 简称为粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

流体的动力粘性系数 μ 是衡量流体粘性大小的物理量。从公式(1-4)可以看出,当面积 $A=1\text{m}^2$, $\Delta u/\Delta y=1\text{s}^{-1}$ 时,则动力粘度 μ 与单位面积上的内摩擦力在数值上相等。因此,动力粘度 μ 反映了流体粘性的大小。

各种流体的动力粘度 μ 值是各不相同的,并且随压力和温度的变化而改变。在通常的压力下,压力对流体粘度的影响很小,可忽略不计;在高压下,流体的粘度随压力的升高而增大。流体的粘度受温度的影响很大,而且液体和气体的粘度随温度的变化规律不同:液体的粘度随温度的升高而减小;气体的粘度随温度的升高而增大。

流体流动时,粘性力和惯性力成对出现,其中,粘性力和动力粘度 μ 成正比,而惯性力与密度 ρ 成正比。因此比值 μ/ρ 经常出现在公式中,为方便起见,以 ν 来表示其比值,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

式中 ν ——运动粘性系数或运动粘度, m^2/s ;

ρ ——流体密度, kg/m^3 。

必须注意,运动粘性系数不能表示粘性的大小。例如空气的粘性比水的粘性小,它的 μ 值约为水的 μ 值的 $\frac{1}{100}$,但空气的 ν 值却为水的 ν 值的7.5倍,这是由于空气的密度约为水的密度的 $\frac{1}{100}$ 。

第二节 流 体 静 力 学

一、静压力及其特性

流体中存在压力的现象,是我们在日常生活中可以直接感觉到的事情。例如游泳时当水淹没到胸部以上,就会感觉胸部闷、憋气,这就是水对胸部施加了压力,使呼吸略感困难。顶着风骑自行车时感到很费力,这是因为风对人和自行车施加了压力。自行车轮胎充气过多会使轮胎发生爆裂,这是因为轮胎内的气压过高,超过了轮胎允许承受压力的结果。上述例子说明,流体的压力就是流体内部或流体对固体壁面的作用力。流体静压力则是流体单位表面积所承受的垂直于该表面上的作用力。若流体的面积为 A ,垂直作用在该面积的力为 P ,则作用在该面积的平均静压力 $\bar{p}$ 为

$$\bar{p} = \frac{P}{A} \quad (1-6)$$

很明显,若所取的面积越小,平均压力就越接近真实压力。当面积趋近于零时,作用在面积 ΔA 上的平均压力 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 就趋近于点的真实压力,用数学式表示为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-7)$$

在法定单位制中, 力的单位为N或kN, 压力单位为 N/m^2 或 kN/m^2 , 通常又写为 Pa 或 kPa。

流体静压力有两个极其重要的特性:

1. 流体静压力总是垂直指向作用面

我们将一个周向开有许多小孔的橡皮管接到能保持水位不变的水箱阀门上, 打开阀门就会看见水从橡皮管圆周各个小孔喷射出来, 喷出方向与各小孔的管壁表面垂直。这不仅说明静止流体对容器存在压力, 也表明静压力的方向是垂直指向其作用面的。下面我们用反证法予以说明。如果用一个曲面容器盛水, 其压力 p 不是垂直指向作用面, 我们就可以根据力的三角形法则, 将其分解为一个垂直于壁面的力 $p \cos \alpha$ 和一个平行于壁面的切向力 $p \sin \alpha$ 。后者将使流体沿切向发生流动。这种情况与我们讨论的前提即静力学不相符合, 因此, 流体内部的切向力是不存在的, 而只有垂直于壁面的压力。

2. 流体内部任意一点, 在各方向的静压力相等

流体静压力的第二个特性除可从理论上证明外, 也可用反证法加以说明。即流体内部任意一点在各方向的静压力若不相等, 则该点必将产生流动。这也不符合我们讨论的前提——流体静力学。

二、流体静力学的基本方程式

设在静止的液体中, 分离出一个直立的棱柱体, 如图1-2所示。若棱柱的横断面积为 ΔA 、高度为 h 、液体的密度为 ρ 、液面上作用的压力为 p_0 , 则作用在棱柱体底面上垂直方向的力为: 顶面上的压力 $p_0 \Delta A$; 重力 $\rho g h \Delta A$ 和作用在底面而方向朝上的静压力 $p \Delta A$ 。根据力的平衡原理, 当棱柱体处于平衡状态时, 其垂直方向作用力的代数和为零, 故有

$$p_0 \Delta A + \rho g h \Delta A - p \Delta A = 0$$

或

$$p = p_0 + \rho g h \quad (1-8)$$

式(1-8)就是重力作用下流体静力学基本方程式。它表明水静压力由两部分组成: p_0 和 $\rho g h$ 。其中 p_0 是作用在自由表面上的压力通过液体传递到该截面的, 称为表面压力; $\rho g h$ 是位于该截面之上、截面积为单位数量、高度为 h 的液柱的重力引起的, 称为剩余压力。表面压力与剩余压力之和称为全压力。

当表面压力为大气压力 p_0 时, 则 $p = p_0 + \rho g h$ 。此时 $\rho g h$ 为压力 p 比大气压力 p_0 高出的数值, 称相对压力, 又因为它是压力表指示出的数值, 故称为计示压力或表压力。 p 也称绝对压力, 因为它是以绝对真空 (即压力值为零) 时作为起始点 (即零点) 的压力。

当液面压力为零时, 则

$$p = \rho g h$$

或

$$h = \frac{p}{\rho g} \quad (1-9)$$

对于不可压缩流体, ρg 的数值基本上是常数, 工程上过去曾用液柱的高度来表示压力的大小。如水的密度在标准大气压 ($1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)、 4°C 时为 1000 kg/m^3 , 对于 1 Pa

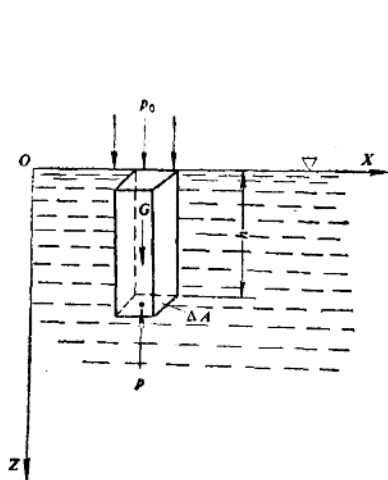


图 1-2 液体中的液柱受力示意图

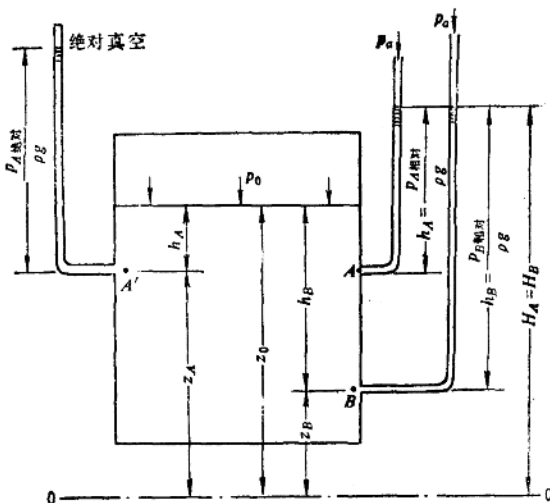


图 1-3 压力水头和测压管水头

的压力用水柱高度表示则为

$$h = \frac{p}{\rho g} = \frac{1}{1000 \times 9.81} = 0.000102(\text{mH}_2\text{O}) = 0.102(\text{mmH}_2\text{O})$$

三、静力学基本方程式的意义 水头的概念

观察图1-3, 一个密封容器内盛有液体, 其自由表面离基准面0-0的高度为 z_0 , A点液体离基准面的高度为 z_A , 则液深 $h_A = z_0 - z_A$, 代入式(1-8), 得

$$p_A = p_0 + \rho g h_A = p_0 + \rho g (z_0 - z_A)$$

或

$$z_A + \frac{p_A}{\rho g} = z_0 + \frac{p_0}{\rho g} \quad (1-10a)$$

由于A点是任意选择的, 而 z_0 、 p_0 、 ρg 对于所讨论的情况都是常数, 所以对容器内任意一点液体都可写成

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

式(1-10)是流体静力学方程式的又一种表达形式。用它解释流体静力学基本方程式更为方便。

z 是任意一点液体离基准面的高度。如果我们把质量为 m 的物体从基准面提升到 z 后, 则该点具有位能 mgz , 单位质量流体对某一基准面的位能为 $\frac{mgz}{m} = gz$ 。所以式(1-10a)中的第一项 gz 是表示单位质量液体对某一水平基准面的位能。第二项 $\frac{p}{\rho}$ 为单位质量液体所具有的压能。位能与压能之和称为势能。因此, $gz + \frac{p}{\rho}$ 为单位质量液体所具