

技工学校教材



水力学 泵与风机

重庆电力技工学校 陈兴华 编

水利电力出版社

JIGONG XUEXIAO JIAOCAI

技工学校教材

水力学 泵与风机

重庆电力技工学校 陈兴华 编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍水力学、泵与风机的基本概念、基本原理和应用。其内容包括水力学理论基础，管道水力计算，离心式泵与风机的基本构造、工作原理、主要性能、运行调节，热力发电厂常用泵与风机等。

本书为技工学校电厂热能动力设备运行与检修专业的教材，并可作为热力发电厂技术工人的培训教材，也可供电力工程技术人员、工人参考。

技工学校教材

水力学、泵与风机

重庆电力技工学校、陈兴华 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 14印张 316千字 1插图

1987年6月第一版 1987年6月北京第一次印刷

印数00001—30150册 定价2.10元

书号 15143·6353

前 言

本书是根据水利电力部1982年7月颁发的“电厂热能动力设备运行与检修专业”《水力学 泵与风机》教学大纲编写的教材。

全书分水力学理论基础、泵与风机及运行两篇，共九章并有附录。其内容主要介绍水力学的基本概念、基本理论及管道水力计算，泵与风机的基本构造原理、设备性能及运行调节，还介绍了热力发电厂常用泵与风机的工作、结构和运行特点。

本书由重庆电力技工学校陈兴华编写，由大连电力技术学校李文艺审阅。

本书在编写过程中，得到湖州、保定、淮北、天津、大同、牡丹江、湖北省等电力技工学校帮助，在此谨致谢意。

由于水平有限，书中难免存在不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

编 者

1985年5月

目 录

前言

绪论	1
§ 0-1 本课程研究对象和任务	1
§ 0-2 泵与风机在热力发电厂中的作用	1
§ 0-3 泵与风机的发展概况	3

第一篇 水力学理论基础

第一章 概论	5
§ 1-1 液体的基本特性和连续介质的概念	5
§ 1-2 液体的主要物理性质	6
§ 1-3 作用在液体上的力	12
习题	12
第二章 水静力学	14
§ 2-1 静压强及其特性	14
§ 2-2 液体静力学基本方程	16
§ 2-3 压强的计算基准和量度单位	20
§ 2-4 静力学基本方程的应用	23
习题	30
第三章 水动力学	35
§ 3-1 液体运动的基本概念	35
§ 3-2 稳定液流的连续方程	40
§ 3-3 稳定液流的能量方程	41
§ 3-4 能量方程的应用	49
§ 3-5 稳定液流的动量方程	58
§ 3-6 非稳定流的特例——水锤	62
习题	65
第四章 流动阻力和管道水力计算	69
§ 4-1 流动阻力及其分类	69
§ 4-2 液体流动的两型态	69
§ 4-3 沿程水头损失的分析 and 计算	74
§ 4-4 局部水头损失的分析 and 计算	81
§ 4-5 减少水头损失的原则	87
§ 4-6 管道水力计算	90

习题	97
----------	----

第二篇 泵与风机及运行

第五章 离心式泵与风机的分类及构造	99
§ 5-1 离心式泵与风机的分类	100
§ 5-2 离心式泵的构造	102
§ 5-3 离心通风机的构造	108
习题	110
第六章 离心式泵与风机的原理	111
§ 6-1 工作原理及工作过程	111
§ 6-2 流体在叶轮中的运动	112
§ 6-3 离心式泵与风机的基本方程式	114
§ 6-4 叶型及其工作特性	119
§ 6-5 泵与风机的功率、损失及效率	123
§ 6-6 泵与风机装置的计算	130
§ 6-7 离心式泵的汽蚀	134
§ 6-8 离心式泵的轴向力及其平衡	140
习题	145
第七章 离心式泵与风机的性能	147
§ 7-1 泵与风机的性能曲线	147
§ 7-2 相似定律及其应用	152
§ 7-3 泵与风机叶轮的切割	162
习题	167
第八章 泵与风机的运行	169
§ 8-1 泵与风机装置的管道特性曲线及工作点	169
§ 8-2 泵与风机装置的工况调节	174
§ 8-3 泵与风机的联合工作	180
§ 8-4 离心式泵的运行	185
§ 8-5 离心风机的运行	190
习题	192
第九章 热力发电厂常用泵与风机	194
§ 9-1 发电厂常用离心式泵	194
§ 9-2 发电厂常用离心风机	201
§ 9-3 轴流式泵与风机简介	205
§ 9-4 其它类型泵简介	212
习题	216
附录 常用单位的换算	217

绪 论

§ 0-1 本课程研究对象和任务

本课程共分两篇，第一篇是水力学理论基础，第二篇是泵与风机及运行。

流体包括液体和气体。水力学主要研究以水为代表的液体的机械运动规律，以及如何运用这些规律来解决工程实际问题。但是应该注意到，水力学虽然以水为主要研究对象，但其基本原理同样适用于一般常见的液体和可以忽略压缩性影响的气体。

水力学是一门工程技术基础学科，在很多工程技术部门有着广泛的应用，如电力、机械、石油、化工、造船工业及水利工程等，都有大量的液流问题需要应用水力学的知识去解决。

水力学理论基础，其内容包括液体的主要物理性质、水静力学、水动力学、流动阻力和管道水力计算等。学习水力学要把注意力放在基本原理、基本概念、基本方法的理解和掌握方面，注重理论联系实际，能对专业范围内的水力学现象作出合乎实际的定性判断和解释，进行足够精确的定性估计和定量计算。

泵与风机是提高流体能量并输送流体的机械。从能量观点来说，泵与风机是一种转换能量的流体机械，它把原动机的机械能或其它形式的能量传递给流体，使流体的能量增加。通常，把提高液体能量并输送液体的机械称为泵，把提高气体能量并输送气体的机械称为风机。

泵与风机属于通用机械类，广泛地应用在国民经济的各个方面。例如，农业生产的灌溉和排涝，采矿工业中坑道的通风和排水，冶金工业中各种冶炼炉的鼓风，石油工业中的输油和注水，热力发电厂中各种介质的输送等，都离不开泵与风机。此外，在化学工业和核能工业等部门中，还需要输送带腐蚀性的液体以及金属、非金属液体的特殊泵。

泵与风机及运行，主要研究泵与风机的构造、原理、性能、运行调节等基础理论、基本知识和基本方法，还介绍热力发电厂常用泵与风机的工作特点、结构特点和运行特点。

§ 0-2 泵与风机在热力发电厂中的作用

泵与风机在热力发电厂中的地位和作用，可以通过热力发电厂的生产过程来说明。图 0-1 为热力发电厂系统，其中：1 是锅炉汽包，2 是过热器。由过热器引出的过热蒸汽送入汽轮机 3 中膨胀作功，高速汽流冲动汽轮机转子并带动发电机 4 的转子一起旋转，利用导体切割磁力线产生感应电流的原理而发出电能。汽轮机的排汽进入凝汽器 5，凝结水经过凝结水泵 6 升压后流经除盐装置 7，再经升压水泵 8，依次送到低压加热器 9 加热，然后进入除氧器 10 除氧，再由给水泵 11 升压，经过高压加热器 12 送入省煤器 13，最后进入锅炉汽包 1。

为使汽轮机排汽能迅速凝结成水，设置循环水泵14向凝汽器输送大量冷却水；为抽出凝汽器中的空气和气体，装设有射水抽气器15和射水泵16；为排除各处疏水，设有疏水泵17；为补充管道系统的汽水损失，设有补给水泵18；为排除锅炉燃烧后的灰渣，设置灰渣泵22和冲灰水泵23等。此外还有供汽轮机各轴承润滑用油的油泵24，供各泵与风机轴承冷却水的工业水泵25等。

炉膛燃烧所需的空气和煤粉，则由送风机26和排粉风机27送入，锅炉的排烟最后由引风机28送入烟囱29排向大气。

由此可见，热力发电厂的生产过程是一个能量转换的过程，泵与风机担负着连续不断地输送流体介质（水、油、风、烟等）的任务。循环水泵、给水泵、凝结水泵、油泵，送风机、引风机、排粉风机等泵与风机和其它热力设备有机地组成整个热力发电厂系统，共同完成电能生产的任务，并成为必不可少的重要辅助设备，影响着发电厂的安全、经济运行。

在发电厂的生产过程中，若泵或风机发生故障，往往会影响整个发电厂的正常运行和安全。例如，循环水泵故障，会降低汽轮发电机组出力；给水泵故障，会使锅炉缺水，甚至造成烧干锅事故；油泵故障，可能会使汽轮机被迫停机；送、引风机故障，可能会使锅炉降低出力，甚至被迫停炉等。

另外，泵与风机的耗电量很大，约占整个发电厂用电的80%~90%，占发电量的7%~9%。因此，提高泵与风机的效率，降低泵与风机的耗电量，是减少发电厂的厂用电、提高供电能力、降低发电成本的重要途径。

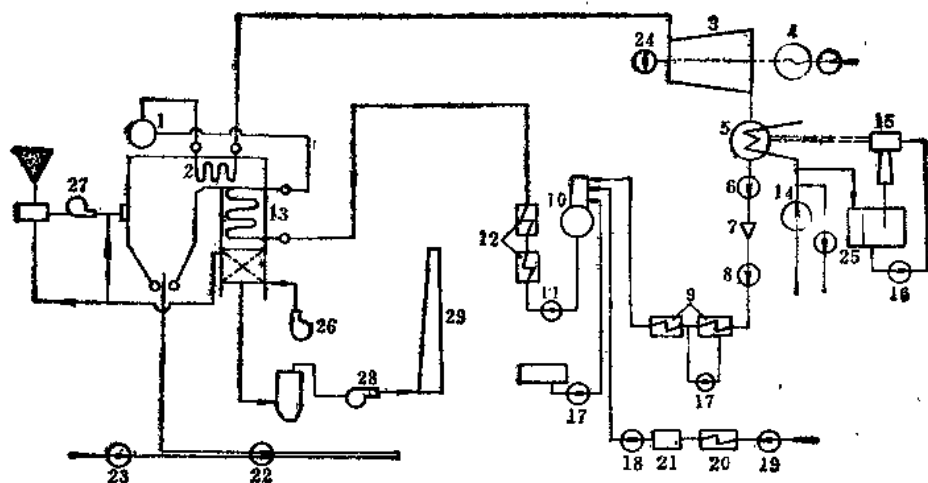


图 0-1 热力发电厂系统

- 1—锅炉汽包；2—过热器；3—汽轮机；4—发电机；5—凝汽器；6—凝结水泵；7—除盐装置；8—升压水泵；9—低压加热器；10—除氧器；11—给水泵；12—高压加热器；13—省煤器；14—循环水泵；15—射水抽气器；16—射水泵；17—疏水泵；18—补给水泵；19—生水；20—生水预热器；21—化学水处理设备；22—灰渣泵；23—冲灰水泵；24—油泵；25—工业水泵；26—送风机；27—排粉风机；28—引风机；29—烟囱

§ 0-3 泵与风机的发展概况

泵与风机是应用比较早的机械之一。在古代,为了适应农业灌溉和冶炼的需要,人类就制造了简单的提水工具和鼓风工具,成为泵与风机的雏形。18世纪由于往复式蒸汽机的发明,使往复式泵与风机也随之出现。之后,又发明了离心式和轴流式泵与风机。到19世纪末,由于电动机的发明,泵与风机在工农业生产中得到了广泛的应用。

但是,在解放前的旧中国,整个工业水平非常落后,就根本没有一个象样的泵、风机制造厂,只能修配或制造一些小容量的泵与风机,工业用泵要依赖进口。

新中国成立后,我国国民经济有了很大发展,泵与风机制造工业也得到迅速发展,建立了大型泵与风机制造厂和研究机构。泵与风机生产经历了由小到大,从仿制到自行研制,品种由少到多的过程;通过对老产品的改造和新产品的研制,不仅填补了我国部分产品的空白,而且已制订出具有我国特点的产品系列,从而提高了我国泵与风机类产品的系列化、标准化和通用化水平。现在,我国不但能生产一般泵与风机,而且能生产各种特殊用泵与风机,基本上已能满足工农业生产和国防建设的需要,有些产品已达到和接近世界先进水平,同时形成了我国泵与风机类产品比较完整的生产体系。

随着科学技术的不断发展,近年来泵与风机正向着大容量、高转速、高效率及自动化等方向发展。

1. 大容量

泵与风机容量的增大,可以提高其运行的经济性和可靠性,也便于采用自动化技术。在热力发电厂中,由于发电机组单机容量的迅速增大,送风机、引风机和给水泵等辅机容量也相应的增大。国产300MW发电机组配套的离心式锅炉给水泵,型号为DG500-240,驱动功率为5.5MW;配套的轴流式送、引风机,型号为0.7-11-N923及0.7-11-N929,驱动功率各为2MW及2.5MW。在国外,1300MW发电机组配套的锅炉给水泵,扬程为3540m,流量为4900m³/h,驱动功率为49.4MW;配套的离心式风机,风量为35000m³/min,驱动功率为6.7MW。而1800MW发电机组配套的锅炉给水泵,其驱动功率达55MW。

但是,泵与风机发展到大容量以后,所采用的型式是不同的。由于泵要求扬程高,因此仍采用离心式;风机由于风压不大,所以向轴流式发展。国外,轮毂直径为2240mm的超大型伐列克斯型轴流风机已经问世。

另外,为了提高大容量泵与风机运行的经济性,采用变速传动,已成为主要发展趋势。锅炉给水泵广泛采用汽轮机驱动和液力联轴器作变速传动。锅炉送、引风机除采用汽轮机驱动和液力联轴器作变速传动外,也广泛采用双速电动机和可控硅调速的绕线式电动机作变速传动。

2. 高转速

随着泵汽蚀、材料问题的不断解决,尤其是给水泵压力的增加,导致泵的转速很快提高。现代大型锅炉给水泵的转速,已由3000r/min提高到7500r/min。提高给水泵的转速是增加单级扬程、减少级数、缩小体积、减轻重量的重要途径。表0-1列出不同转速给

表 0-1

不同转速给水泵级数和重量的比较

机 组 容 量 (MW)	泵 转 速 (r/min)	单 级 扬 程 (m)	级 数	重 量 (kN)
550	3 000	341	5	432
600	4 700	567	4	167
680	7 500	1 143	2	103

泵级数和重量的比较。

对于某些泵,转速的提高更为惊人,目前已有转速为24 000r/min的齿轮泵、30 000r/min的旋转活塞泵等。

3. 高效率

效率是泵与风机很重要的一项技术经济指标,对于大容量的泵与风机,提高效率更具有十分重要的经济意义。我国在研制高效率泵与风机方面进行了大量的工作,产品效率普遍提高。目前离心泵效率大致在60%~85%,大型离心泵效率可达90%,如改进后的DG400-140型锅炉给水泵的效率已达80%。离心风机效率一般为65%~70%,而后弯机翼型叶片离心风机效率可达85%~92%,如国产 $\frac{G}{Y}$ 4-73型后弯机翼型叶片离心式送、引风机的效率已达90%以上。

4. 自动化

随着科学技术的发展,特别是微机的普及应用,大容量泵与风机采用自动化技术已成为发展趋势。例如,在泵与风机的运行上,自动或程序启停;压强、流量、温度等参数的自动检测、显示和控制;主要参数的上下限报警及自动联锁、保护等。

第一篇 水力学理论基础

第一章 概 论

§ 1-1 液体的基本特性和连续介质的概念

一、液体的基本特性

自然界中物质的存在形式一般有三种：固体、液体和气体。它们之间的主要区别是：固体具有一定的体积，并且有一定的形状；液体具有一定的体积，但没有一定的形状，很容易流动，其形状随容器形状而异，并能形成自由表面；气体没有固定的体积，也没有一定的形状，能充满任何容器。这就是说，液体和气体容易变形，具有易流动性，故统称为流体。液体和固体能承受一定压力，并且很不容易被压缩变形，而气体则很容易被压缩。

所以，液体的基本特性是具有易流动性和不易压缩性。

液体、气体与固体所具有的不同特性，是由于它们分子之间的距离和分子之间的吸引力不同。固体的分子排列最紧密，分子间的距离很小，分子之间的吸引力很大，抵抗变形的能力也很大。所以，固体具有抗拉、抗切、抗压的能力。液体的分子排列较松散，分子间的距离较大，分子之间的吸引力较小；而气体的分子排列最松散，分子间的距离很大，分子之间的吸引力最小。所以，液体和气体几乎不能承受拉力和切力，在微小拉力 and 切力作用下，就很容易发生变形或流动。因此，从力学的观点来看，液体的易流动性常被规定为液体在静止时，不能抵抗拉力或切力的特性。

同气体比较，液体分子之间的吸引力远比气体分子之间吸引力大，同时分子运动的能量也较气体小，所以液体的分子不能自由地从液体内部逸出。这样就使得液体相似于固体，不易压缩；而又不同于气体，具有一定的体积和一个自由表面。

二、连续介质的概念

从分子结构的观点来看，物质都是由分子所组成的，分子间有空隙，分子在不停地运动着，分子间有相互作用力。因此，从微观结构上说，液体是有空隙的不连续、不均匀的物质。由于水力学的任务不是研究液体分子的微观运动，而是研究整个液体的宏观特性和宏观机械运动，因此水力学中引入了“连续介质”的假设。设想所研究的液体可以分割成为很小的基元个体，相当于微小的分子集团，叫做液体的“质点”。进而认为，液体就是由这样的一个紧挨着一个的连续质点所组成的，质点之间没有空隙，即所谓“连续介质”。把液体作为连续介质来看待，这样就摆脱了复杂的分子运动，而着眼于实际所关心的宏观机械运动，并能充分利用连续函数这一数学工具。这在应用上很方便，又有足够的精确性。

在连续介质假设的基础上,一般还认为液体是均质液体,具有均匀等向性,即液体各部分和各方向的物理性质是一样的。

总之,在水力学中,液体的基本特性是容易流动、不易压缩、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这些基本特性。

§ 1-2 液体的主要物理性质

液体静止和运动的规律,一方面和液体所受到的外部条件有关,另一方面也取决于液体本身的内在物理性质。下面将介绍和液体运动有关的液体主要物理性质。

一、惯性

惯性是物体所具有的反抗改变原有运动状态的物理性质。惯性的度量是质量,质量愈大,惯性也愈大,物体的运动状态愈难改变。物体的质量是指该物体所含物质的多少,用符号 m 表示。

液体和其它物体一样,具有质量。对于均质液体,单位体积内所具有的质量称为密度,用符号 ρ 表示,则

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

式中 ρ ——液体的密度, kg/m^3 ;

m ——液体的质量, kg ;

V ——液体的体积, m^3 。

不同液体的密度各不相同。同一种液体的密度随压强和温度而稍有变化。但在一般情况下,这种变化是很微小的,在水力计算中常可忽略不计,可以把液体的密度视为常数。例如水的密度,实用上就以纯净水在标准大气压下, 4°C 时的最大密度值作为计算值,即 $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ 。不同温度下水的密度值见表1-1。

二、万有引力特性

物体之间相互具有吸引力的性质称为万有引力特性,这个吸引力称为万有引力。在地球上的物体,一般只需要考虑地球对物体的引力,这个引力称为重力,用符号 G 表示,则

$$G = mg \quad (1-2)$$

式中 G ——物体的重量, N ;

g ——重力加速度, g 的数值大小与纬度有关,一般可看作常数,并采用 $g = 9.807 \text{m/s}^2$ 。

对于均质液体,单位体积内所具有的重量称为重度,用符号 γ 表示,则

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

式中 γ ——液体的重度, N/m^3 。

液体的重度也随压强和温度而稍有变化,但在一般情况下可视为常数。水的重度常采用的数值为 $\gamma = 9807 \text{N/m}^3$ 。不同温度下水的重度值见表1-1。

表 1-1

不同温度下水的密度和重度

温度 t (°C)	密度 ρ (kg/m ³)	重度 γ (N/m ³)	温度 t (°C)	密度 ρ (kg/m ³)	重度 γ (N/m ³)
0	999.9	9 805	40	992.2	9 730
5	1000.0	9 807	50	988.0	9 689
10	999.7	9 804	60	983.2	9 642
15	999.1	9 798	70	977.8	9 589
20	998.2	9 789	80	971.8	9 530
25	997.0	9 777	90	965.3	9 466
30	995.7	9 764	100	958.4	9 399

几种液体在正常气压下的重度值见表1-2。

表 1-2

几种液体的重度

液体名称	温度 t (°C)	重度 γ (N/m ³)	液体名称	温度 t (°C)	重度 γ (N/m ³)
海水	15	10 000~10 100	苯	0	8 620
水银	0	133 400	酒精	15	7 740~8 620
煤油	15	7 740~8 040	无水甘油	0	12 350
汽油	15	6 860~7 350	石油	15	8 620~8 720

对于气体，重度随压强和温度的变化很大，其变化关系可以用理想气体的状态方程式来表示，即

$$p\nu = RT \quad (1-4)$$

式中 p ——气体的绝对压强，Pa；

ν ——气体的比容， $\nu = \frac{1}{\rho}$ ，m³/kg；

T ——气体的热力学温度，K，热力学温度 T 与摄氏温度 t 的关系是 $T = 273 + t$ ；

R ——气体常数，N·m/(kg·K)。

由上式推导可以得到：

当气体的温度不变时，气体的重度和压强成正比，即

$$\frac{p}{\gamma} = \text{常数}$$

或

$$\frac{p_1}{\gamma_1} = \frac{p_2}{\gamma_2} \quad (1-5)$$

当气体的压强不变时，气体的重度和温度成反比，即

$$\gamma T = \text{常数}$$

或

$$\gamma_1 T_1 = \gamma_2 T_2 \quad (1-6)$$

式中 γ_1, p_1, T_1 ——气体状态变化前的重度、压强、绝对温度；

γ_2, p_2, T_2 ——气体状态变化后的重度、压强、绝对温度。

表 1-3

不同温度时空气的重度值

温度 t (°C)	重度 γ (N/m ³)	温度 t (°C)	重度 γ (N/m ³)	温度 t (°C)	重度 γ (N/m ³)
0	12.70	25	11.62	60	10.40
5	12.47	30	11.43	70	10.10
10	12.24	35	11.23	80	9.81
15	12.02	40	11.05	90	9.55
20	11.80	50	10.72	100	9.30

表1-3中列出了在标准大气压下, 不同温度时空气的重度值。

例 1-1 求在98.07kPa压强下, 4°C时体积为1L水的重量和质量。

解 在98.07kPa压强下, 4°C时水的密度 $\rho=1000\text{kg/m}^3$, 水的体积 $1\text{L}=0.001\text{m}^3$, 则1L水的质量为

$$m=\rho v=1000\times 0.001=1\text{kg}$$

重量为

$$G=mg=1\times 9.807=9.807\text{N}$$

例 1-2 已知压强为98.07kPa时, 0°C的烟气重度为13.13N/m³, 求200°C时烟气的重度和密度。

解 气体的热力学温度 T 与摄氏温度 t 的关系为

$$T=273+t$$

烟气的加热可视为定压加热过程, 可用 $\gamma_1 T_1 = \gamma_2 T_2$ 公式计算。将 $T_1=273\text{K}$, $T_2=473\text{K}$, $\gamma_1=13.13\text{N/m}^3$ 代入此式中, 可得200°C时烟气的重度为

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1 T_1}{T_2} = \frac{13.13 \times 273}{473} = 7.58 \text{ N/m}^3$$

密度为

$$\rho_2 = \frac{\gamma_2}{g} = \frac{7.58}{9.807} = 0.77\text{kg/m}^3$$

三、压缩性和膨胀性

在一定温度下, 液体体积随压强增加而缩小的性质称为液体的压缩性。液体压缩性的大小用体积压缩系数 β 表示, 它是指当温度不变时, 增加一个单位压强时所引起的体积相对缩小量, 即

$$\beta = -\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (1-7)$$

式中 β ——液体体积压缩系数, 1/Pa;

$\frac{\Delta V}{V}$ ——液体体积的相对缩小量;

Δp ——液体压强的增量, Pa。

因为液体压强增加时体积减小, 即 Δp 为正时, ΔV 总是负的, 所以式中加一负号, 使 β

表 1-4

0°C 时 水 的 压 缩 系 数

压 强 $p(10^5 \text{Pa})$	4.90	9.81	19.61	39.23	78.45
压缩系数 $\beta(10^{-5} 1/\text{Pa})$	0.589	0.537	0.531	0.523	0.515

保持正值。显然， β 值愈大，表示液体愈易压缩。表1-4列出0°C时水的压缩系数。

在一定压强下，液体体积随温度升高而增大的性质称为液体的膨胀性。液体膨胀性的大小用体积膨胀系数 α 表示，它是指当压强不变时，增加一个单位温度时所引起的体积相对增大量，即

$$\alpha = \frac{1}{\Delta T} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (1-8)$$

式中 α ——液体的体积膨胀系数， $1/\text{K}$ ；

ΔT ——液体温度的增量， K ；

$\frac{\Delta V}{V}$ ——液体体积的相对增大量。

液体的压缩系数和膨胀系数都很小，所以工程上一般不考虑液体的压缩性和膨胀性。为简化研究，通常把液体视为不可压缩的液体。但是反过来，由于体积或密度的微小变化，则会造成巨大的压强变化，这在工程上必须给予足够的重视。但当压强、温度变化比较大时（如高温高压锅炉中的水），或在研究管道水锤和水下爆炸等问题时，由于压强瞬间升得很高，就必须考虑液体的压缩性或膨胀性，否则将会得出错误的结论。

气体与液体不同，具有显著的压缩性和膨胀性。当压强和温度变化时，对气体的体积变化影响很大，因而对气体的重度和密度的影响也很大，其变化关系由公式（1-4）、（1-5）、（1-6）给出，故通常把气体看作为可压缩的气体。但是，当气体流速远小于音速，其压强、温度变化不大时，仍可把气体当作不可压缩的气体来对待。在供热通风工程中所遇到的大多数气体的流动，一般都可作为不可压缩的气体来对待，这样既简化了研究，又可满足工程实际对精确性的要求。

四、粘滞性

液体具有易流动性，静止液体在微小切向力的作用下，都将立即破坏其原来的静止状态变形而流动。但是当液体运动时，则液体分子间的作用力却立即显示出对流动的阻抗作用，即液体具有抵抗剪切变形的能力。在运动状态下，液体具有抵抗剪切变形的特性称为液体的粘滞性。

观察一个实验，如图1-1所示。圆盘A由电动机带动，圆盘B用金属丝悬挂在圆盘A的上面。A盘和B盘都浸没在液体中，并保持一定距离。电动机开动后A盘转动，可以看到，B盘也随着转动。A盘与B盘没有直接连接，为什么B盘会随着A盘转动，简单地说，由于液体具有粘滞性，A盘转动带动液体跟着旋转，旋转的液体又带动B盘转动。

为了说明液体的粘滞性，以实际渠道水流来研究。如图1-2所示渠道水流，如果测出渠道水流中心线横断面上各点的流速 u ，并绘出流速分布曲线，就会发现横断面上的流速分

布是不均匀的。由于液体和渠道底壁表面的“附着力”，使紧邻底壁的液体粘附在底壁表面上静止不动，流速为零；水流表面上的液层由于受底壁表面上不动液层的阻滞较小，因而流速最大；介于两者之间的其它各液层，将以自上而下逐层递减的流速向右流动，从而形成如图1-2所示的流速分布曲线。

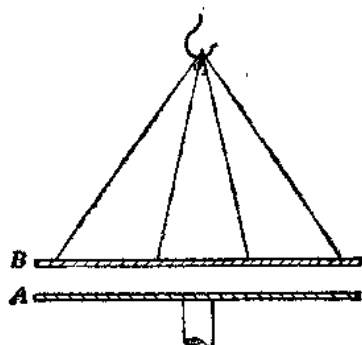


图 1-1 圆盘转动实验

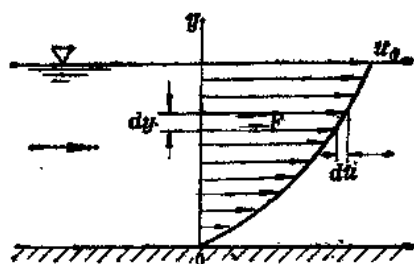


图 1-2 渠道水流横断面上的流速分布

显然，对于相邻两液层，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。反之，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。拖力和阻力是大小相等，方向相反的一对作用力和反作用力，分别作用在两个相邻的液层上。这一现象很类似固体间的摩擦，而又发生在液体内部，故把这一对作用力和反作用力称为内摩擦力或粘性力。这就是液体流动时粘滞性的体现。

液体在流动过程中，为了克服粘性力而不断消耗本身的能量，不断转化为热能而散逸，产生液体的能量损失。因此，液体的粘滞性是液体流动时产生能量损失的根本原因。

根据牛顿研究的结果，液体流动时所产生的粘性力与沿接触面法线方向的速度梯度成正比，与接触面的面积成正比，与液体的物理性质有关，而与接触面上的压强无关，这个关系可以用牛顿内摩擦定律表示为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式中 F —— 液体的粘性力，N；

A —— 流层间的接触面积， m^2 ；

$\frac{du}{dy}$ —— 沿接触面法线方向的速度梯度， $1/s$ ；

μ —— 动力粘滞系数， $Pa \cdot s$ 。

单位面积上的粘性力称为切应力，用符号 τ 表示，即

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中 τ —— 切应力， Pa 。

当液体静止时， $\frac{du}{dy} = 0$ ，则 $F = 0$ ， $\tau = 0$ 。即处于静止状态下的液体内部都不存在粘性力或切应力，因而液体的粘滞性不显示作用。

动力粘滞系数 μ 是液体粘滞性的度量, μ 值愈大则粘滞性作用愈强。 μ 值随液体的种类而不同, 并随温度和压强的变化而变化。但一般液体的 μ 值随压强的变化很小, 可以忽略。温度是影响 μ 值的主要因素。温度升高时, 液体的 μ 值降低; 而气体的 μ 值则反而增大。其原因可定性地简单解释如下: 由于液体的分子间距较小, 相互吸引力起主要作用, 当温度升高时, 分子间距增大, 吸引力减小, 因而粘性力减小, 液体抵抗变形的能力降低, 所以 μ 值随温度的升高而减小。气体的分子间距较大, 吸引力影响很小, 当温度升高时, 分子的动量增加很大, 使各液层间产生质量与动量的急剧交换, 因而粘性力增大, 所以 μ 值随温度的升高而增大。

在工程计算中, 常采用液体的动力粘滞系数 μ 与其密度 ρ 的比值来表示液体粘滞性的大小, 这个比值称为运动粘滞系数, 用符号 ν 表示, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-11)$$

式中 ν ——运动粘滞系数, m^2/s 。

表1-5列出在不同温度时水的动力粘滞系数 μ 和运动粘滞系数 ν 的数值。

表 1-5 不同温度时水的粘滞系数

温 度 t (°C)	动力粘滞系数 μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动粘滞系数 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	温 度 t (°C)	动力粘滞系数 μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动粘滞系数 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	1.781	1.785	40	0.653	0.658
5	1.518	1.519	50	0.547	0.553
10	1.307	1.306	60	0.466	0.474
15	1.139	1.139	70	0.404	0.413
20	1.002	1.003	80	0.354	0.364
25	0.890	0.893	90	0.315	0.326
30	0.798	0.800	100	0.282	0.294

表1-6列出在不同温度时空气的动力粘滞系数 μ 和运动粘滞系数 ν 的数值。

表 1-6 不同温度时空气的粘滞系数

温 度 t (°C)	动力粘滞系数 μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动粘滞系数 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)	温 度 t (°C)	动力粘滞系数 μ ($10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	运动粘滞系数 ν ($10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$)
0	0.0172	13.7	90	0.0216	22.9
10	0.0178	14.7	100	0.0218	23.6
20	0.0183	15.7	120	0.0228	26.2
30	0.0187	16.6	140	0.0236	28.5
40	0.0192	17.6	160	0.0242	30.6
50	0.0196	18.6	180	0.0251	33.2
60	0.0201	19.6	200	0.0259	35.8
70	0.0204	20.5	250	0.0280	42.8
80	0.0210	21.7	300	0.0298	49.9

液体的粘滞性随温度升高而降低的特性, 对于热力发电厂锅炉的燃油输送和提高其雾化质量, 起到了良好作用; 但对汽轮发电机组、泵与风机等转动机械的轴承润滑, 将起消