



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷与空调技术专业领域

流体力学 及 泵与风机

■ 陈 礼 余华明 主编

Hydrodynamics

Pump

B l a s t M a c h i n e



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷与空调技术专业领域

流体力学及泵与风机

陈 礼 余华明 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是制冷与空调技术专业系列教材之一,针对高职教育的特点,注重内容的精选,注重理论与实践相结合、专业基础与专业知识相结合。

主要内容包括流体性质与流体机械介绍、流体流动基本方程及其应用、流动阻力计算及管路特性曲线、管路计算、泵与风机性能与选型计算、泵与风机的运行调节及故障诊断与维修。每章都设置了学习导引及思考题和习题,便于教师教学及学生课后巩固所学内容。

本书可作为高等职业院校、高等专科学校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院制冷与空调、热能动力等专业学生的教学用书,也可作为相关工程技术人员的参考书及培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学及泵与风机/陈礼,余华明主编. —北京:高等教育出版社,2007.10

ISBN 978 - 7 - 04 - 022417 - 7

I. 流… II. ①陈…②余… III. ①流体力学 - 高等学校:技术学校 - 教材②泵 - 高等学校:技术学校 - 教材③鼓风机 - 高等学校:技术学校 - 教材 IV. O35 TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 141129 号

策划编辑 罗德春 责任编辑 葛 心 封面设计 张申申 责任绘图 朱 静
版式设计 张 岚 责任校对 王 超 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京明月印务有限责任公司

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 13.5
字 数 320 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2007 年 10 月第 1 版
印 次 2007 年 10 月第 1 次印刷
定 价 17.30 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22417 - 00

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

传 真：(010)82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

全国高职高专教育 制冷与空调技术 规划教材编写委员会

(按姓氏笔画排序)

主任：匡奕珍 陈 礼

委员：王 宏 王凌杰 王 琪 尹选模 卢 勇 李好学
朱 立 任 峰 刘 乐 刘佳霓 何 晖 余华明
邹新生 邵长波 张 敏 罗 伦 钱华梅 徐思维
殷 浩

前言

高职院校制冷与空调技术专业大都设置了“流体力学及泵与风机”这门课程。顺德职业技术学院制冷工程专业设置了“制冷流体机械”课程,该课程于2003年确定为全国首批精品课程。为适应精品课程建设及高职院校教学的需要,编制本教材。

高职教育旨在培养生产第一线的高等技术应用性专门人才,其主要特征是具备较强的技术应用能力,即能综合运用多种知识和技能解决现场实际问题。培养目标与人才特征的需求必然导致教学内容与教学方法的变革,并影响到教材的编制。

根据技术知识的认知规律,高职专业主干课程宜采用串行结构,即根据某一方面技术能力的需要将相关的专业基础与专业技术、理论知识与技能训练结合起来。学习者通过课程学习形成某一方面的技术能力,若干个方面的技术能力汇聚在一起就形成了专业技术应用能力。

为此,本书作了一些大胆的探索与尝试,力求体现如下特色。

1. 课程目标是在掌握相关知识和技能的前提下形成管道系统计算,泵与风机选型、运行及维修方面的技术应用能力,据此对内容进行了优选。
2. 打破传统的三段论课程结构,实现了专业基础与专业技术的结合。力求结合专业技术学习专业基础,巩固对专业基础知识的理解,并以专业基础提升专业技术。
3. 打破先理论后实践的传统模式,将理论教学与实践教学环节相结合,缓解学习矛盾,促进理论联系实际的思想方法和工作方法的形成,促进技术能力的形成。
4. 设置了若干综合性的工作任务:风管系统及水管系统设计,泵与风机选型、运行及维修。通过这些工作任务将理论与实践融汇到一起。根据高职教育教学的特点,将整门课程的内容归结为若干任务仍有困难,但根据英国 BTEC^① 的教学思路,每门课程设计三个左右综合性课业在现阶段是可行的。
5. 教学内容力求少而精,主张精讲多练。在课时分配方面建议强调训练时间,包括综合性设计训练,以及实践环节中的技能训练。
6. 为有利于学生自主学习,文字力求深入浅出、通俗易懂;书中设置了较多的有实用意义的例题,包括详细的解题步骤。每章前面有学习导引、学习目标和本章难点。学习导引介绍内容及线索;学习目标用识别、选择、计算、解释、评价、分析、比较等动词作为引导,列举出应掌握的知识 and 形成的能力的建议,使目标具体化,并可操作、可评价。

此外,本书法定计量单位、物理量名称和符号遵照国家标准的统一规定。

本书适用学时数为60学时,可供高等职业技术学院制冷与空调专业 and 热能工程专业教

^① 英国商业与技术教育委员会(Business and Technology Education Council)的简称。

学之用,亦可供相关专业的工程技术人员参考。

本书由顺德职业技术学院陈礼和余华明合作编写,其中陈礼编写第一章的部分内容,第二、三章全部及第四章的部分内容,余华明编写第一章 1.2 节、第四章 4.2 节、第五章及第六章的全部内容。

本书的编写得到了顺德职业技术学院许多同事的帮助,同时得到了高等教育出版社的支持和指导,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,不妥及疏漏之处敬请批评指正。

编 者

2007 年 5 月

主要符号表

A	面积, m^2	p_e	表压力, Pa
c	水击波传播速度, m/s	p_v	真空度, Pa
c_0	水中声速, m/s	p_l	压力损失, Pa
d	直径, m	q_v	体积流量, m^3/s
d_e	当量直径, m	q_m	质量流量, kg/s
E	弹性模量, N/m^2	r	半径, m
E_0	水的弹性模量, N/m^2	R_m	比摩阻; Pa/m
g	重力加速度, m/s^2	S_h	液体管道阻抗, s^2/m^5
h	高度, m	S_p	气体管道阻抗, kg/m^7
h_l	水头损失, m	T	切力, N
h_f	沿程水头损失, m	u	速度, m/s
h_m	局部水头损失, m	V	体积, m^3
Δh	汽蚀余量, m	v	平均速度, m/s
Δh_a	有效汽蚀余量, m	z	高度、位置水头, m
Δh_r	必需汽蚀余量, m	α	体胀系数, K^{-1} ; 湿润角
$[\Delta h]$	允许汽蚀余量, m	β	压缩系数, m^2/N
H	高度、扬程、压头, m	δ	厚度, m
K	管壁粗糙高度、当量糙粒高度, m;	η	效率; 动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$
l	长度, m	η_{im}	传动效率
L	长度, m	λ	沿程阻力系数
m	质量, kg	ν	运动粘度, m^2/s
n	转数, r/min	ρ	密度, kg/m^3
n_s	比转数	σ	表面张力系数, N/m
P	功率, kW	τ	切应力, N/m^2
p	压力, Pa	ζ	局部阻力系数
p_a	大气压力, Pa		

目录

第一章 流体与流体机械	1
学习导引	1
1.1 流体的物理性质	4
1.2 流体机械的分类和结构	13
思考题	31
习题	31
第二章 流体力学基础	32
学习导引	32
2.1 流体的机械能守恒	32
2.2 液体静压力分布规律	34
2.3 一元流体动力学基本 方程式	41
思考题	55
习题	55
第三章 流动阻力及管路特性曲线	60
学习导引	60
3.1 圆管内流动	61
3.2 能量损失	68
3.3 沿程阻力系数	69
3.4 局部损失计算	79
3.5 管路特性曲线	88
3.6 实践环节:测定管路特性 曲线	96
3.7 有压管路中的水击	99
思考题	103
习题	103
第四章 管路计算	106
学习导引	106
4.1 简单管路计算	106
4.2 复杂管路计算	110
思考题	124
习题	124
第五章 泵与风机的选型	126
学习导引	126
5.1 泵与风机的性能参数	127
5.2 泵与风机的性能曲线	129
5.3 泵与风机的相似定律和 比转数	136
5.4 泵与风机的选型实例	144
思考题	147
习题	147
第六章 泵与风机的运行及调节	149
学习导引	149
6.1 泵的汽蚀与安装高度	150
6.2 泵与风机的工作点	158
6.3 实践环节:离心式泵串并联 运行性能曲线测定实验	166
6.4 泵与风机运行故障分析	168
6.5 实践环节:离心式泵与风机 的故障分析和检修实训	179
思考题	183
习题	184
附录 1 通风管道比摩阻线解图	185
附录 2 常用局部管件的局部阻力 系数	186
附录 3 常用金属管规格	195
附录 4 离心泵的类型和选用	197
附录 5 离心式通风机的型号与选择	203
参考文献	205

第一章 流体与流体机械

学习导引

本章通过输送水与空气两个系统的实例,分析学习流体、流体机械的相关知识,并进一步阐述流体性质及几种主要流体机械的分类、结构与原理。

一、学习目标

1. 解释压力、密度、比体积、压缩系数、热胀系数及粘度的物理意义,识别其单位和单位换算,通过计算和查表得到所需参数。
2. 比较绝对压力、表压力和真空度的含义及区别。
3. 识别不同类别泵与风机的牌号、结构特点,解释其工作特点,评价其不同的用途。

二、本章难点

1. 绝对压力、表压力和真空度的关系,以及压力单位的换算。
2. 对流体粘滞性的认识有一定难度。粘滞性表现出阻碍流体流动的趋势,通过流层间的速度分布图会有较为直观的理解。而动力粘度是由内摩擦力的数学表达式定义的,该定义式涉及速度梯度的概念。速度、速度梯度和内摩擦力都具有方向性。
3. 表面张力和毛细管现象的理解是另一个难点。表面张力使液体靠近壁面的液面弯曲,表面张力也就集中在曲面部分,大小用接触周边曲线线性长度与表面张力系数的乘积表示,而方向沿曲面切线指向液面的弯曲方向。
4. 流体机械,特别是离心式和轴流式泵与风机的各个组成结构的功能和原理的理解有一定难度,因为各个部分都是按照一定的流体力学原理和功能要求设定的,且与材料力学等有密切的联系。这些原理性内容在后续章节中会具体讲述,所以本章只要求了解即可。

现代社会中空调的应用已十分普遍,宾馆、影剧院等大型楼宇一般采用中央空调系统,夏天对室内供冷,冬天对室内供热,以实现空气调节。中央空调系统由空调机组、管道系统和用户终端等组成。机组作制冷循环时可以生产冷风或冷冻水,作热泵循环时则生产热风或热水。空气和水都称为工作介质,简称工质。管道系统把工质送到用户终端,以实现制冷或供热。工质在系统中周而复始地循环,实现了连续的能量传递。工质的流动性能是实现能量传递的先决条件。固体不能流动,也就不能充当工作介质。工质一般只能选择液体和气体。

液体和气体统称为流体。

流体区别于固体的显著特点是其流动性。流体受到力的作用就会流动。基于这个特点,制冷、供热、动力、化工等工程都以流体为工质,让流体在流动中实现连续的能量传递。而在空调机

组中还利用制冷工质(制冷剂)实现能量的转换。

空气调节只是一个简单的实例。在动力工程中,水在锅炉中蒸发为蒸汽,经过热器加热达到过热蒸汽状态后送到蒸汽轮机中膨胀做功,推动发电机发电。乏汽在冷凝器中被冷却为水,再由给水泵送回到锅炉开始新一轮的循环。工质在循环中实现了连续的能量传递和转换。这里的工质包括了液体和蒸汽状态,蒸汽是气体的一种类型。

工质是能量的载体,工质通常又在系统管道中流动。输送流体的管道组成了管道系统,工质在管道系统中流动的先决条件是流体本身具有一定的能量。因为流体可以自发地从高处流向低处,但却不能自发地从低处流向高处。要把流体通过管道系统输送一定的距离和高度就需要借助输送流体的机械,以提高流体的能量。

流体力学是研究流体运动规律,并运用这些规律解决工程实际问题的学科。

输送流体的机械和利用流体能量做功的机械统称为**流体机械**。泵与风机是输送流体的机械,属于流体机械的范畴。泵与风机将从电动机获得的电能转变为机械能,再传递给流体,以增加流体的机械能,使之能够到达一定的距离和高度,或者克服一定的阻力流过传递能量的装置,比如发电厂中的冷凝器,空调机组中的蒸发器等。

而事实上,在制冷、通风、化工等领域涉及的流体机械都为输送流体的机械,故在后文若无特别说明,所指的流体机械都为输送流体的机械。

综上所述,制冷、动力、给水排水、化工等工程输送流体时既需要管路系统,也需要泵与风机等流体机械,二者缺一不可。管路系统及为流体提供能量的流体机械构成了完整的流体输送系统。图 1-1 展示了一个楼房集中空调的冷冻水输送系统。每一个房间都设置了一个空调用户终端。夏天制冷时,冷冻水流过终端使房间降温并维持在较低的温度,实现了温度调节。冷冻水经过用户终端之后温度升高,通过回水管(虚线所示)汇集到一起,进入水泵加压,再经过空调制冷机组降温后送到用户终端。如此反复循环,实现了连续的制冷。

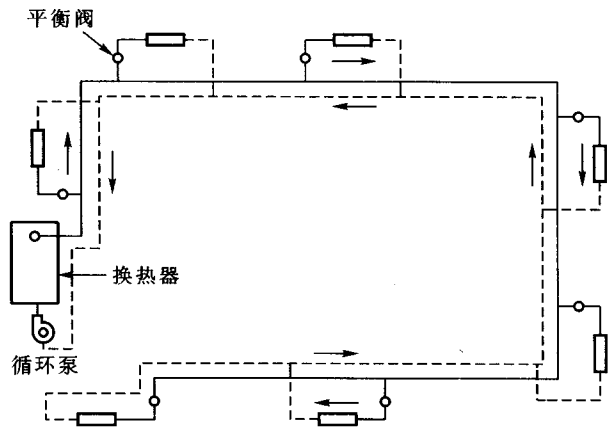


图 1-1 集中空调的冷冻水系统

图 1-2 则为一套空气输送系统,包括管路和风机,风管截面多为矩形,与圆形水管不同。风

机从吸风口吸入新鲜空气,经处理后通过矩形管路分送到各用户出风口,空气进入房间或车间后不再回收或通过专门的回风管收集回收。

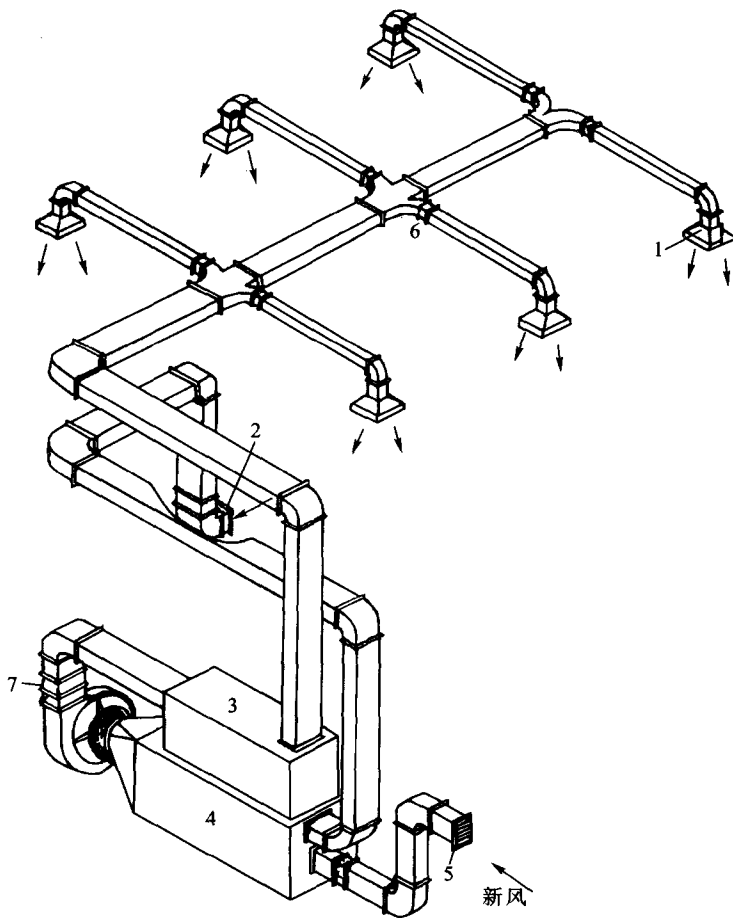


图 1-2 空气输送系统示意图

1—送风口;2—集中回风口;3—过滤器和消声器;4—空气调节箱;5—新鲜空气进口;
6—支风管风量调节阀;7—总管风量调节阀

制冷、空调、动力、给水排水等工程通常会使用到上述输送水和输送空气的系统。工程技术人员的任务是设计出科学合理的系统,以满足用户的需求。这时,需要确定以下因素:

- ① 根据实际情况确定管路走向。
 - ② 根据流量和压力的要求计算不同位置管路的大小和长度,包括圆管的直径和矩形风管的尺寸。
 - ③ 配置相应的管道附件,包括弯头、阀门等。
 - ④ 根据管路系统的要求选配合适的泵或风机。
- 系统的设计与计算是一项非常细致的工作,关系到用户对水量、风量的要求;管路系统、流体

机械既要满足需要又要精心地为用户节省材料,尽量降低运行的能源消耗。

为了圆满地完成设计任务,工程技术人员必须熟悉流体的性质和流体的动力特性,并能熟练地利用流体流动的能量守恒关系计算流体速度、压力和流体在管道中的各种能量损失。并根据设计方法确定圆管管径或矩形管截面尺寸。还必须了解和熟悉泵与风机的分类、结构、工作原理、性能参数、特性曲线,并根据系统需要合理选配泵与风机,确定其在管道系统中的实际工作点。

在整个流体输送系统建立起来之后,流体机械的运行需要调节和管理,使之处于最佳状况,同时节省能源。流体机械有时候也会出现故障,使运转偏离正常状态,甚至停止运转。故障包括机械故障及电气控制部分的故障。这时就需要对流体机械进行故障诊断,找出发生故障的原因,然后排除故障。这个过程通常称为维修。因此,工程技术人员还需要掌握流体机械调节、保养、维修方面的知识和技能,要具备迅速处理这些问题的能力。

所有这些就构成了本书的学习内容。本书采用我国法定计量单位,并尽可能提供单位换算关系。

1.1 流体的物理性质

流体的物理性质包括密度、比体积、压力、压缩性、热胀性、粘滞性及表面张力特性。

1.1.1 压力

1. 压力的定义

流体垂直作用于单位面积上的力称为流体的静压力,简称压力,记为 p ,单位为 Pa,称为帕斯卡,简称为帕。表达式为

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

式中 F ——流体对物体表面的垂直作用力, N;

A ——受力面积, m^2 。

国际单位制中,压力的单位为 Pa, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。由于 Pa 单位很小,有时使用 MPa(兆帕)、kPa(千帕),且

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$$

由于历史的原因,工程上有时会用到其他单位制的压力单位,如 bar(巴), atm(标准大气压)、at(工程大气压)、 mmH_2O 和 mmHg 等,换算关系为:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa}$$

毫米水柱(mmH_2O)和毫米汞柱(mmHg)是用液柱高度来表示的压力单位,其换算关系为:

$$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.81 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$$

标准大气压(atm),又称为物理大气压。工程大气压(at)的单位是 kgf/cm^2 (千克力/厘米²),换算关系为

$$\begin{aligned}
 1 \text{ atm} &= 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa} \\
 1 \text{ at} &= 1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.81 \text{ N/cm}^2 \\
 &= 9.81 \times 10^4 \text{ N/m}^2 \\
 &= 0.981 \times 10^5 \text{ Pa} \\
 &= 0.981 \text{ bar}
 \end{aligned}$$

其中

$$1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ N}$$

我国称重计量单位仍多采用 kgf, 可根据上式换算为 N(牛顿)。

2. 压力流体的性质

流体具有两个重要的特性:

- (1) 流体静压力的方向总是与作用面垂直, 并指向作用面。
- (2) 静止流体内部任意点处的流体静压力在各方向上是相等的。

以上特性适用于流体内部, 以及流体与固体的接触表面。无论容器壁面的方向和形状如何, 流体的静压力总是垂直于壁面。根据第二个特性, 测量流体中某一点的静压力时, 不必考虑方向, 只要在确定的位置上测量即可。

3. 绝对压力、表压力和真空度。

压力要用压力计测量, 而压力计本身处于大气环境中, 因而压力计测得的压力只是工质压力与当地大气压力的差值。其实质是针对当地大气压力的相对值, 而不是工质的真实压力。工质的真实压力称为绝对压力, 用 p 表示。当绝对压力高于大气压力 p_a 时, 压力表测出的压力是流体压力高出大气压的部分, 称为表压力, 记为 p_e , 于是

$$p = p_a + p_e \quad (1-2)$$

工质的绝对压力低于大气压力 p_a 时, 压力表测得的压力是流体压力低于大气压的部分, 称为真空度。记为 p_v , 于是

$$p = p_a - p_v \quad (1-3)$$

工质的绝对压力、表压力和真空度三者之间的关系, 可以比较直观地绘制成如图 1-3 所示关系图。

工程计算中, 当流体压力较高时, 为简便起见, 常把大气压 p_a 近似取为 0.1 MPa。但在流体压力较低, 特别是低于大气压力时, 这种近似会引起较大的误差。

例 1-1 某容器中工质压力 p 为 1.2 atm, 试换算为 Pa、mmH₂O 和 mmHg。

解: $p = 1.2 \times 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.216 \times 10^5 \text{ Pa}$

$$p = \frac{1.216 \times 10^5}{9.81} \text{ mmH}_2\text{O} = 12395.5 \text{ mmH}_2\text{O} = 12.396 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$p = \frac{1.216 \times 10^5}{133.3} \text{ mmHg} = 912.23 \text{ mmHg} = 0.912 \text{ mHg}$$

例 1-2 用压力表测量 A、B 两个容器中的工质压力, A 容器工质表压力为 0.57 MPa, B 容器的真空度为 0.03 MPa, 当地大气压为 0.101 MPa。试计算两个容器中工质的绝对压力。

解:

$$\begin{aligned}
 p_A &= p_a + p_e \\
 &= 0.101 \text{ MPa} + 0.57 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

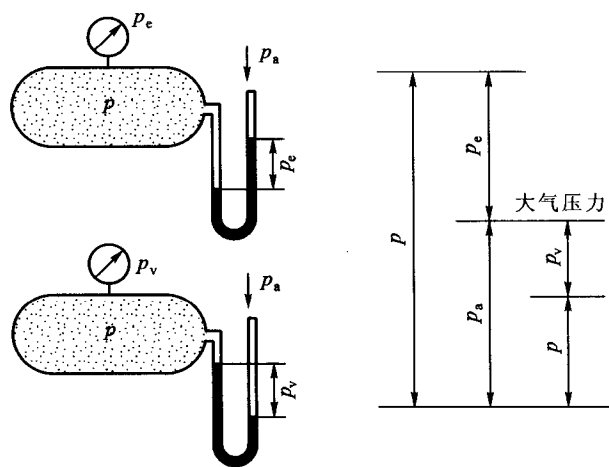


图 1-3 绝对压力、表压力和真空度的关系

$$= 0.671 \text{ MPa}$$

$$p_B = p_a - p_v$$

$$= 0.101 \text{ MPa} - 0.03 \text{ MPa}$$

$$= 0.071 \text{ MPa}$$

$$= 71\,000 \text{ Pa}$$

1.1.2 密度和比体积

1. 密度

流体的密度指单位体积流体的质量,记为 ρ ,单位为 kg/m^3 ,表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-4)$$

式中 m ——流体的质量,kg。

V ——流体的体积, m^3 。

流体的密度随流体种类、温度、压力而变化。

定义密度之后,单位体积流体的重量则可以方便地表示为 ρg 。

2. 比体积

流体的比体积指单位质量的流体所占有的体积,记为 v ,单位为 m^3/kg ,表达式为

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-5)$$

显然,流体的比体积与密度互为倒数。即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-6)$$

理想气体的比体积可利用状态方程计算,实际气体和液体的比体积可在相关资料中查出。

1.1.3 压缩性和热胀性

流体受压时体积缩小、密度增大的性质,称为流体的**压缩性**。流体受热时体积膨胀、密度减小的性质,称为流体的**热胀性**。

1. 液体的压缩性和热胀性

液体的压缩系数定义为:每增加单位压力时,液体体积或密度的相对变化率,记为 β ,单位为 m^2/N 。数学表达式为:

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

或

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-8)$$

式中 ρ ——液体原密度, kg/m^3 ;

$\Delta \rho$ ——液体密度变化量, kg/m^3 ;

Δp ——作用在液体上的压力增加量, Pa ;

V ——液体原体积, m^3 ;

ΔV ——液体体积变化量, m^3 。

当 Δp 为正时, ΔV 必然为负。换言之,压力与体积的变化方向刚好相反,压力增大时体积缩小。式(1-8)中负号的目的是使 β 保持为正值。压缩系数 β 愈大,则液体的压缩性愈大。

β 的倒数称为弹性模量,记为 E :

$$E = \frac{1}{\beta} = \rho \frac{\Delta p}{\Delta \rho} = -V \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (1-9)$$

E 的单位为 N/m^2 。

表1-1列举了 0°C 的水在不同压力下的压缩系数。

表 1-1 水在 0°C 时的压缩系数

压力/ MPa	0.49	0.981	1.961	3.923	7.845
β	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

液体的热胀性,用热胀系数 α 表示,它表示温度增加 1K 时,液体密度或体积的相对变化率,数学表达式为:

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \quad (1-10)$$

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1-11)$$

由于密度与温度的变化方向也正好相反,式(1-10)中加一负号,以使 α 始终为正值。 α 的单位为 K^{-1} 。

由此可知,流体的热胀性和压缩性不仅与压力有关,而且受到温度的影响。表1-2列举了水在一个大气压下不同温度的密度。

表 1-2 水在一个大气压下的密度随温度的变化值

温度/℃	密度/(kg/m ³)	温度/℃	密度/(kg/m ³)
0	999.9	50	988.1
5	1 000.0	60	983.2
10	999.7	70	977.8
20	998.2	80	971.8
30	995.7	90	965.3
40	992.2	100	958.4

表 1-2 表明,温度超过 5℃ 之后,密度随温度的增加而减少,但减少的比例很小。在温度较低时(10~20℃),温度每增加 1℃,水的密度减小约为 $\frac{1.5}{10\,000}$;在温度较高时(90~100℃),水的密度减小也只有 $\frac{7}{100}$ 。密度的减小意味着比体积增大,因此随着温度的升高水的体积发生膨胀,但膨胀的比例很小,一般情况下可以忽略不计。在特殊情况下,如热水采暖等工程中,必须要考虑水的膨胀性。此时系统中水的总体积很大,温度升高时导致的水的膨胀量是系统管路所不能容纳的。此时就需要在热水循环系统的最高位置设置膨胀水箱,以适应水温变化所引起的水体积变化,同时也便于给系统供水、补充水。

如果该系统除了冬天供暖外,在夏天又利用冷冻水制冷,则热水与冷冻水的温差更大,水体积的变化也会更大。此时,膨胀箱的容积一般要为系统水容量的 3%~4%。

2. 气体的压缩性和热胀性

压力和温度的改变对气体密度的影响很大,因此气体具有十分显著的压缩性和热胀性。在 $p < 20\text{ MPa}$, $t > -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,气体的压缩性和热胀性可用理想气体状态方程来描述,即:

$$\frac{p}{\rho} = R_g T \quad (1-12)$$

R_g 称为气体常数,单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, R_g 的值与气体的性质有关,而与气体的状态无关。对于同一种气体 R_g 为一常数,不同气体的 R_g 值各不相同。当温度不变时

$$\frac{p}{\rho} = \text{常数} \quad (1-13)$$

式(1-13)表明温度不变时气体的密度与压力成正比。压力增大 1 倍,则密度也会增大 1 倍。当然,密度的增加存在一个极限,不可能无限度地增加。

式(1-12)中令压力为常数,则有

$$\rho T = \text{常数} \quad (1-14)$$

上式说明压力不变时密度与温度成反比,温度增大 1 倍,则密度减小 1 倍。但是,在气体温度降到其液化温度时,上式不再适用。

对于速度远低于声速的低速气流($v < 68\text{ m/s}$),若压强和温度变化较小,在通风工程中的气流密度非常小,可按不可压缩流体来处理。