

高职高专“十五”规划教材

GAOZHI
GAOZHUAN
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

流体力学泵与风机

刘立 主编 马立山 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

高职高专“十五”规划教材

GAOZHI
GAOZHUAN
SHIWU
GUIHUA JIAOCAI

流体力学泵与风机

主 编 刘 立 言
副主编 马立山 图书馆
主 审 吴耀伟
张 玲 孟 涛



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本教材为高等职业技术学院供热通风与空调专业“流体力学泵与风机”课程教学用书。其目标是使学生掌握必要的工程流体力学基本概念、基本原理和基本计算,为学习和解决供热、通风、空调和建筑给排水工程中的流体力学问题提供必要的理论基础、分析计算能力和泵与风机的技术知识。

全书共分上下两篇。上篇为“流体力学”,内容包括绪论、流体静力学、一元流体动力学、流动阻力与能量损失、孔口管嘴和有压管流、气体射流、明渠均匀流与绕流运动概述;下篇为“泵与风机”,内容包括离心式泵与风机的分类与构造、离心式泵与风机的理论基础、离心式泵与风机的运行分析、离心式泵与风机的选型与安装以及其它常用类型泵的介绍。

书中在安排理论内容的同时,也配有适量的例题与习题,以辅助教师讲授和学生的应用练习。

本教材也可作为燃气工程、建筑设备工程等相近专业的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学泵与风机/刘立主编. —北京:中国电力出版社, 2004

高职高专“十五”规划教材

ISBN 7-5083-1689-4

I. 流... II. 刘... 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. ①035②TH

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第051900号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004年6月第一版 2004年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15印张 342千字

印数0001—3000册 定价22.00元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序

随着新世纪的到来,我国进入全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。新世纪新阶段的新任务,对我国高等职业教育提出了新要求。我国加入世界贸易组织和经济全球化迅速发展的新形势,也要求高等职业教育必须开创新局面。

高职高专教材建设是高等职业教育的重要组成部分,是一项极具重要意义的基础性工作,对高等职业教育培养目标的实现起着举足轻重的作用。为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》精神,进一步推动高等职业教育的发展,加强高职高专教材建设,根据教育部关于通过多层次的教材建设,逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系的精神,中国电力教育协会会同中国高等职业技术教育研究会和中国电力出版社,组织有关专家对高职高专“十五”教材规划工作进行研究,在广泛征求各方面意见的基础上,制订了体现高等职业教育特色的高职高专“十五”教材规划。

高职高专“十五”规划教材紧紧围绕培养高等技术应用性专门人才开展编写工作。基础课程教材注重体现以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为教学重点;专业课程教材着重加强针对性和实用性。同时,“十五”规划教材不仅注重内容和体系的改革,还注重方法和手段的改革,以满足科技发展和生产实际的需求。此外,高职高专“十五”规划教材还着力推动高等职业教育人才培养模式改革,促进高等职业教育协调发展。相信通过我们的不断努力,一批内容新、体系新、方法新、手段新,在内容质量上和出版质量上有突破的高水平高职高专教材,很快就能陆续推出,力争尽快形成一纲多本、优化配套,适用于不同地区、不同学校、特色鲜明的高职高专教育教材体系。

在高职高专“十五”教材规划的组织实施过程中,得到了教育部、国家电力公司、中国电力企业联合会、中国高等职业技术教育研究会、中国电力出版社、有关院校和广大教师的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务,不可能一蹴而就,需要不断完善。因此,在教材的使用过程中,请大家随时提出宝贵的意见和建议,以便今后修订或增补。(联系方式:100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222)

中国电力教育协会

二〇〇二年十二月

02APUE/22

前 言

本教材是根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》精神进行编写的。本教材编写的基本思想是：

- (1) 努力体现职业教育特色，突出以应用为目标，强调与工程实践的结合，方便教与学，在结构上适当弱化知识体系的完整性。
- (2) 在内容的取舍上注重基本概念、基本应用公式的交代，弱化方程的推导与数理论证。
- (3) 在语言表述上力求深入浅出，简洁明了。
- (4) 强化应用计算的训练，选择典型、适中的例题与习题。

另外，考虑后续专业课程《建筑给排水工程》的需要，增加了无压圆管均匀流的相关内容，加强了“泵与风机”的应用部分。

本书第一、三、四、七章由浙江建设职业技术学院刘立编写；第二、十、十一章由河北建筑工程学院马立山编写；第五、六章由浙江建设职业技术学院张玲编写；第八、九、十二、十三章由山西大学工程学院孟涛编写。全书由刘立主编，黑龙江建筑职业技术学院吴耀伟主审。

由于编者水平有限，不妥之处恳请批评指正。

中国建设教育协会

二〇〇二年十二月

目 录

序
前言

上篇 流体力学

第一章 绪论	1
第一节 流体力学的任务及其应用	1
第二节 流体的主要物理性质	1
第三节 流体的主要力学模型	5
第四节 作用在流体上的力	6
习题	7
第二章 流体静力学	8
第一节 流体静压强及其特性	8
第二节 流体静压强的计算	10
第三节 压强的测量	18
第四节 作用于平面上的液体总压力	21
第五节 作用于曲面上的液体压力	25
习题	30
第三章 一元流体动力学	34
第一节 流体运动的基本概念	34
第二节 恒定流连续性方程	38
第三节 恒定流能量方程	40
第四节 恒定流能量方程的应用	44
第五节 气流的能量方程	50
第六节 动量方程	52
习题	55
第四章 流动形态与能量损失	59
第一节 流体运动的两种形态——层流与紊流	59

第二节	能量损失的两种形式	61
第三节	沿程损失与切应力的关系——均匀流基本方程	63
第四节	圆管层流的沿程损失计算	64
第五节	紊流运动	66
第六节	紊流的沿程损失计算	68
第七节	非圆管路内的沿程损失	74
第八节	局部水头损失	75
习题	.....	78
第五章	孔口、管嘴出流和有压管流	81
第一节	压力出流现象及其分类	81
第二节	孔口出流	82
第三节	管嘴出流	87
第四节	简单管路计算	91
第五节	复杂管路计算	97
第六节	有压管路水击	104
习题	.....	107
第六章	气体射流	111
第一节	概述	111
第二节	无限空间紊流射流的特性	112
第三节	射流的流速与流量变化	116
第四节	温差(浓差)射流和射流弯曲	119
第五节	有限空间射流简介	122
习题	.....	125
第七章	明渠均匀流	126
第一节	明渠均匀流概述	126
第二节	明渠均匀流的水力计算	129
第三节	无压圆管均匀流的水力计算	131
习题	.....	135
第八章	绕流运动概述	137
第一节	附面层的概念	137
第二节	绕流阻力与升力	139
习题	.....	144

下篇 泵与风机

第九章 离心式泵与风机的构造	146
第一节 泵与风机的分类和应用	146
第二节 离心式泵与风机的基本构造、工作原理和性能参数	147
第三节 离心式泵装置与扬程计算	157
第十章 离心式泵与风机的理论基础	160
第一节 欧拉方程	160
第二节 泵与风机的理论性能曲线	164
第三节 泵与风机的实际性能曲线	166
第四节 相似律与比转数	170
第五节 相似律的实际应用	177
习题	179
第十一章 离心式泵与风机的运行分析	181
第一节 管路性能曲线及工作点	181
第二节 泵或风机的联合工作	185
第三节 离心式泵与风机的工况调节	188
习题	195
第十二章 泵与风机的安装与选择	197
第一节 泵的气蚀与安装高度	197
第二节 风机的通用性能曲线与选择性能曲线	202
第三节 离心式泵与风机的选择	203
第四节 泵与风机常见故障的分析与排除	208
习题	212
第十三章 其他常用泵与风机	213
第一节 轴流式泵	213
第二节 贯流式风机	216
第三节 往复式泵	217
第四节 真空泵	218
第五节 深井泵	219
第六节 旋涡泵	220

附录	221
附录一 BA、BL 型离心泵及 SG 型管道泵性能示例	221
附录二 BL 型水泵性能表（摘录）和水泵型号举例	223
附录三 IS 型离心泵规格性能表及型号举例	223
附录四 T4 - 72 型离心通风机	225
附录五 KT4 - 68 - 22N 06.3E 型风机性能表	226
附录六 T40 型轴流通风机	227
参考文献	229

上篇 流体力学

第一章

绪 论

第一节 流体力学的任务及其应用

流体力学是研究流体的平衡和机械运动的力学规律及其在工程实践中应用的一门技术学科。它研究的对象是流体（包括液体和气体）。流体力学属于力学的范畴，它是力学的一个分支。

流体力学按其研究的方法及特点不同可分为理论流体力学（古典流体力学）和实验流体力学（工程流体力学）。前者偏重于用数学工具进行理论研究，追求问题的严密性和精确性；后者则着重于实际工程中的流体力学问题，其研究方法是理论计算与实验并重，对于那些非常复杂的、难以用解析式表达的流动现象，则通过实验和经验公式来解决。本课程属于工程流体力学的范畴。

流体力学按其研究的内容又可分为流体静力学和流体动力学。前者研究静止流体中压强的分布规律以及流体对固体壁面的压力等问题；后者则研究运动流体运动参数的变化规律及与固体边界的相互作用等问题。

流体力学的研究和其他自然科学的研究一样，是随着人类社会生产的发展需要而发展起来的。它在工农业生产和城市建设的各个领域有着广泛的应用。它是土木、环境、交通、能源、机械、化工等诸多工程技术的重要的基础理论。

流体力学是供热与通风空调工程的一门重要的技术基础课。供热、制冷、通风除尘、空气调节和给水排水工程多以流体为工作介质。只有学好流体力学，才能正确把握流体介质的力学性质和运动规律，从而正确、有效地解决工程实际中所遇到的各种流体力学问题。

学习本课程的重点是应用，要在理解和掌握基本原理和基本概念的基础上，重点掌握基本方法和基本公式的应用。

本书采用国际单位制，同时在表 2-1 中给出了工程单位制和国际单位制的换算关系，以方便学习者使用。

第二节 流体的主要物理性质

流体是液体和气体的总称。流体与固体最大的区别在于流体具有流动性。流体没有固定

形状,几乎不能承受拉力来抵抗拉伸变形,静止时也不能承受切向力来抵抗剪切变形。此外,液体可以具有一定的体积,具有与气体分界的自由表面。气体则没有固定体积,它充满在任何盛装它的容器中。流体的形状取决于约束它的边界的形状。

流体的主要物理性质有密度、容重、压缩性、膨胀性、黏滞性和汽化压强等。

一、密度与容重

流体具有质量,并受重力场作用,通常用密度 ρ 和容重 γ 来表示其特征。质量为 m 、体积为 V 、重量为 G 的均质流体的密度和容重可分别表示为

$$\rho = m/V \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1-1)$$

$$\gamma = G/V \quad (\text{N/m}^3) \quad (1-2)$$

在重力场中,密度与容重有如下关系

$$\gamma = \rho g \quad (1-3)$$

不同流体的密度与容重各不相同,同一种流体的密度与容重随温度和压强变化。一个标准大气压下,不同温度时水和空气的密度、容重值可参见表 1-1 和表 1-2。实验表明,液体的密度与容重随温度和压强的变化较小,可近似为常数。流体力学计算中一般采用水的密度为 1000kg/m^3 ,容重为 9800N/m^3 ,水银的容重为 133.28N/m^3 。

二、压缩性与膨胀性

在温度不变的情况下,流体随着压强增大体积减小、密度增大的性质,称为流体的压缩性。在压力不变的情况下,流体随着温度升高体积增大、密度减小的性质,称为流体的膨胀性。

流体的压缩性一般以压缩系数 β 和体积弹性模量 E 来度量。压缩系数的定义为:增加单位压力时,流体体积或密度的相对变化率,即

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-4)$$

或

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-5)$$

由于 $d\rho$ 和 dV 的符号相反,故式中的负号表示 β 为正值, β 的单位为 m^2/N 。

压缩系数 β 的倒数为流体的体积弹性模量 E

$$E = \frac{1}{\beta} \quad (1-6)$$

E 的单位为 N/m^2 。不同温度下水的弹性模量值可参见表 1-1。

流体的膨胀性可用热胀系数 α 表示,它表示温度增加 1K 时流体密度或体积的相对变化率,即

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT} \quad (1-7)$$

或

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (1-8)$$

由于 $d\rho$ 与 dT 的符号相反,故式中负号表示 α 为正值, α 的单位为 K^{-1} 。

液体的压缩性和膨胀性都比较小,除特殊情况(如有压管路的水击、热水管路系统等)外,在大多数工程条件下都忽略其压缩性和膨胀性。

气体与液体不同,温度和压力的改变对气体的影响很大,因此,气体具有十分显著的压缩性和膨胀性。在压力不过高($p < 20\text{MPa}$),温度不过低($T > 253\text{K}$)的条件下,气体压强、温度和密度之间的关系可用理想气体状态方程来描述,即

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

$$R = \frac{8314}{n} \quad (\text{J/kg} \cdot \text{K})$$

式中 p ——气体的绝对压强, N/m^2 ;

ρ ——气体的密度, kg/m^3 ;

T ——气体的热力学温度, $^{\circ}\text{C}$, $T (\text{K}) = 273 + t^{\circ}\text{C}$;

R ——气体常数;

n ——气体的分子量,对于空气 $n = 287 (\text{J/kg} \cdot \text{K})$ 。

式(1-9)表明,温度不变时,气体的密度与压力成正比;压力不变时,密度与温度成反比。

【例1-1】 已知一个大气压下, 5°C 时的空气密度为 1.270kg/m^3 ,求 85°C 时空气的密度和容重。

解: 由式(1-9)可知,当压力不变时,密度与温度成反比,即 $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}$,

依题意,已知 $\rho_1 = 1.27\text{kg/m}^3$, $T_1 = 273 + 5 = 278\text{K}$, $T_2 = 273 + 85 = 358\text{K}$,

代入上式得 $\rho_2 = \frac{\rho_1 T_1}{T_2} = \frac{1.27 \times 278}{358} = 0.9862(\text{kg/m}^3)$

三、黏滯性

流体的黏滯性直观地表现为流体的黏稠程度。

一般人说油比水黏稠,是由于油比水流动缓慢,这是因为油比水表现出更强的阻止流动的趋势。由于这种性质,流体在管内流动时,紧靠管壁的流体黏附在管壁上,其流速为零;管轴心处的流体受管壁的影响最小,速度最大,如图1-1所示。

流速不等的流体形成了不同的流层,流层间因速度不等而存在相对运动和内部摩擦力,内摩擦力阻碍流体的相对运动。流体这种阻碍流层间相对运动的性质称为黏滯性。内摩擦力又称为黏滯力或切向力。黏滯力的大小可根据牛顿内摩擦定律来计算,即

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

或记为

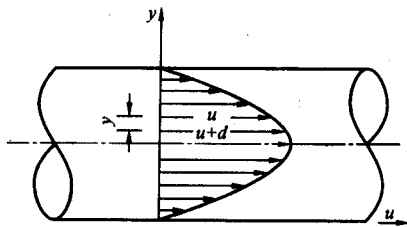


图1-1 圆管内流速分布

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-11)$$

式中 T ——黏滞力或内摩擦力, N;

τ ——黏滞切应力, N/m^2 ;

A ——流层间接触面积, m^2 ;

du/dy ——垂直于速度方向的速度梯度, s^{-1} ;

μ ——黏度或称动力黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;

动力黏度是流体黏滞性的量度, 它表示流体在单位速度梯度作用下的黏滞切应力。流体力学中还常常用到 μ 与 ρ 的比值, 称为运动黏度, 记为 ν , 单位是 m^2/s , 即

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-12)$$

不同流体有不同的黏度, 同种流体的黏度随温度变化。温度升高时, 液体的黏度减小, 气体的黏度增大。水和空气的黏度可参见表 1-1 和表 1-2。

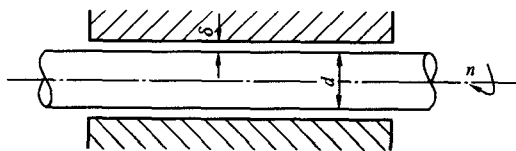


图 1-2 [例 1-2] 图

【例 1-2】如图 1-2 所示, 转轴直径 $d = 0.36\text{mm}$, 轴承长度 $L = 1\text{m}$, 轴与轴承的间隙 $\delta = 0.2\text{mm}$, 若其间润滑油的系数 $\mu = 0.72\text{Pa}\cdot\text{s}$, 轴的转数为 $n = 200\text{r}/\text{min}$, 求克服油的阻力所需功率。

解: 依题意, 轴承表面油的速度为零, 转轴表面油的速度为

$$u = \frac{\pi dn}{60} = \frac{3.14 \times 0.36 \times 200}{60} = 3.77(\text{m}/\text{s})$$

由于转轴与轴承间隙很小, 可认为期间油层的速度呈线性变化, 故应用牛顿内摩擦定律可得

$$\text{黏滞切应力为 } \tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{u - 0}{\delta} = 0.72 \times \frac{3.77}{0.2 \times 10^{-3}} = 13572(\text{N}/\text{m}^2)$$

$$\text{黏滞阻力和阻力矩为 } T = \tau A, M = T \frac{d}{2}$$

$$\text{式中 } A \text{ 为转轴表面积 } A = \pi dL = 3.14 \times 0.36 \times 1 = 1.131(\text{m}^2)$$

$$\text{代入上式得 } T = 13572 \times 1.131 = 15350(\text{N})$$

$$M = 15350 \times \frac{0.36}{2} = 2763(\text{N}\cdot\text{m})$$

故克服黏滞阻力所需功率为

$$P = M\omega = M \frac{\pi n}{30} = 2763 \times \frac{3.14 \times 200}{30} = 57.9(\text{kW})$$

四、汽化压强

液体的自由表面存在一种向外扩张的压强(压力), 它使液体分子总是企图离开液体表面, 汽化为蒸汽, 这种压强就称为汽化压强(或汽化压力)。液体的汽化压强是液体内部分子动能大小在外界的一种宏观表现, 它是液体的固有属性, 它随着液体温度的升高而增大。

液体的汽化压强又称为液体的饱和蒸汽压。水在不同温度下的汽化压强可参见表 1-1。当液体的外部压强等于该温度下的汽化压强时，液体将产生沸腾（气泡从液体内部产生）。液体沸腾时所具有的温度称为沸点。一个标准大气压下水的沸点是 100℃。在常温下，当流动液体某处的压强等于或低于该温度下液体的汽化压强时，液体将产生沸腾，这种现象称为冷沸。冷沸现象对有压管流动和水泵工作都会造成不良影响。

表 1-1 (一个标准大气压下) 水的物理性质

温 度 (℃)	容 重 γ (kN/m ³)	密 度 ρ (kg/m ³)	黏 度 $\mu \times 10^3$ (Pa·s)	运动黏度 $\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)	弹性模量 $E \times 10^{-6}$ (kN/m ²)	汽化压强 (kPa)
0	9.805	999.8	1.781	1.785	2.02	0.61
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	2.06	0.87
10	9.804	999.7	1.300	1.306	2.10	1.23
15	9.798	999.1	1.139	1.139	2.15	1.70
20	9.789	998.2	1.002	1.003	2.18	2.34
25	9.777	997.0	0.890	0.893	2.22	3.17
30	9.764	995.7	0.798	0.800	2.25	4.24
40	9.730	992.2	0.653	0.658	2.28	7.38
50	9.689	988.0	0.547	0.553	2.29	12.33
60	9.642	983.2	0.466	0.474	2.28	19.92
70	9.589	977.8	0.404	0.413	2.25	31.16
80	9.530	971.8	0.354	0.364	2.20	47.34
90	9.466	965.3	0.315	0.326	2.14	70.10
100	9.399	958.4	0.282	0.294	2.07	101.33

表 1-2 一个标准大气压下空气的物理性质

温 度 t (℃)	密 度 ρ (kg/m ³)	容 重 γ (N/m ³)	黏 度 $\mu \times 10^5$ (Pa·s)	运动黏度 $\nu \times 10^5$ (m ² /s)
-40	1.515	14.86	1.49	0.98
-20	1.395	13.68	1.61	1.15
0	1.293	12.68	1.71	1.32
10	1.248	12.24	1.76	1.41
20	1.205	11.82	1.81	1.50
30	1.165	11.43	1.86	1.60
40	1.128	11.06	1.90	1.68
60	1.060	10.40	2.00	1.87
80	1.000	9.81	2.09	2.09
100	0.946	9.28	2.18	2.31
200	0.747	7.33	2.58	3.45

第三节 流体的主要力学模型

一、连续介质模型

与所有的物质一样，流体也是由大量的分子组成的，分子间有着一定的空隙。然而，一般工程中所涉及的流体的尺寸远大于流体质点间的距离，而且工程中所关心的流体力学问题

大都是具有一定特性的宏观运动，并不需要了解个别分子的微观运动。因此，人们提出了“连续介质”的基本假设：流体是由充满整个空间的无数质点构成的，而这些质点则是具有一定质量（包含大量分子）而无空间尺度的连续的几何点。根据上述假设建立的连续介质模型将流体的物理参量看作是时间和空间的连续函数，从而可以充分利用数学分析中连续函数这一有力工具来研究流体的平衡和运动规律。

在连续介质模型的基础上，一般可以认为流体具有均匀性和各向同性，即流体是均匀的，其各部分和各方向上的物理性质都一样。实践证明，连续介质模型对于绝大多数工程流体力学问题都是适合的。只有在研究的对象为分子大小或气体的密度极小时才考虑其非连续性。

二、不可压缩流体模型

实际流体的密度都是随温度和压力变化的，即实际流体都是可压缩的。当流体的压缩性很小且可以忽略时，该流体被认为是不可压缩的。

实验测得，水每增加一个标准大气压，其密度仅仅增加约十万分之五左右，在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内，温度每升高 1°C ，其密度也只减小万分之一点五，可见水的压缩性和膨胀性都是很小的。其它液体也是如此。因此，一般情况下可将液体视为不可压缩流体，其密度可视为常数。

气体的密度受温度和压力的影响比液体要大得多，因此，气体的压缩性与膨胀性比液体大得多。但是气体在低速流动时（一般小于 68m/s ），其压力和温度的变化很小，所引起的密度变化很小（例如通风空调工程中的气流），此时的气体压缩性也可以不考虑，该气体一般可视为不可压缩流体，其密度可视为常数。

三、理想流体模型

流体都具有黏滞性，所以一般实际流体都称为黏性流体。但是，当流体的黏滞性对所研究的流体力学问题所起的作用可以忽略时，可将该流体视为无黏性流体，即理想流体。对于黏性流体运动的研究，往往先将其作为理想流体来研究，使问题得到简化，得出基本结论后，再通过实验的方法测定黏性的影响，对基本结论给予修正或补充。这也是流体力学常用的一种研究方法。

第四节 作用在流体上的力

作用于流体上的力按其作用形式的不同可以分为质量力（或称为体积力）和表面力两种。

一、质量力

质量力作用于流体的每一个质点上，与被作用的流体的质量成正比。在均质流体中，质量力与被作用流体的体积成正比，所以质量力又称为体积力。流体力学中常遇到的质量力有重力和惯性力。单位质量流体所受的质量力叫做单位质量力。设均质流体的质量为 M ，所受质量力为 F ，则单位质量力 f 为

$$f = F/M \quad (1-13)$$

若 F 在三维坐标轴上的分量为 F_x 、 F_y 、 F_z ，则相应的单位质量力在三个坐标轴上的分量为

$$X = F_x/M, Y = F_y/M, Z = F_z/M \quad (1-14)$$

只受重力场作用的流体所受质量力为： $F_x = F_y = 0$ ， $F_z = -Mg$ ，单位质量分力则为

$$X = Y = 0, Z = -g \quad (1-15)$$

质量力的单位为 N (牛顿)，单位质量力的单位为 m/s^2 (米/秒²)。

二、表面力

表面力是作用在被研究流体的表面上，与受作用的表面积成正比的力。作用在流体上的表面力可以是大气压力、固体边界对流体的反作用力和摩擦力等，也可以是两流层之间的摩擦力。由于流体几乎不能承受拉力，所以任何作用于流体表面上的力只能分解为垂直于作用面的正压力和平行于作用面的切向力。静止的流体不能承受切向力，如图 1-3 所示。设作用在流体表面积 ΔA 上的表面力为 ΔF ，将 ΔF 分解为正压力 ΔP 和切向力 ΔT ，则作用在单位流体面积上的平均压强为

$$\bar{p} = \Delta P / \Delta A \quad (1-16)$$

平均切应力为

$$\bar{\tau} = \Delta T / \Delta A \quad (1-17)$$

在国际单位制中 p 和 τ 的单位都为 N/m^2 (牛顿/米²)，或称为帕斯卡 (Pa)。

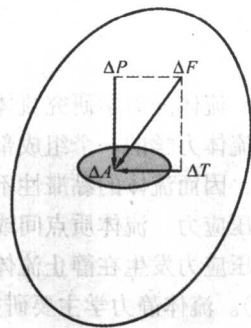


图 1-3 流体表面受力示意图

习 题

1-1 温度为 4℃、体积为 1L 的清水，在一个大气压下的重量和质量各为多少？

1-2 某供热系统内水的总体积为 10m³，加热时温度最大升高为 60℃，水的热胀系数为 0.0005，为使水被加热时能够自由膨胀进入水箱，问膨胀水箱的容积至少应有多大？

1-3 在一个大气压，温度为 0℃时，烟气的密度为 1kg/m³，试求在一个大气压，温度为 500℃时烟气的密度。

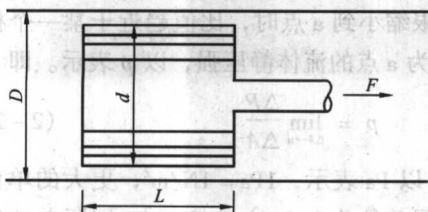


图 1-4 题 1-5 图

1-4 已知水的容重 $\gamma = 9.71kN/m^3$ ，动力黏滞系数 $\mu = 0.6 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ ，求其运动黏滞系数 ν 为多少。

1-5 如图 1-4 所示，一直径 $d = 11.96cm$ 、长度 $L = 14cm$ 的活塞，在一直径 $D = 12cm$ 的活塞筒内运动。活塞与筒之间充以润滑油。若润滑油的动力黏滞系数 $\mu = 0.172 Pa \cdot s$ ，问需对活塞施加多大的力 F ，才能使活塞以 1m/s 的速度作匀速运动？

第三章

流体静力学

流体静力学研究流体处于静止或相对静止状态时的力学规律及其在实际工程中的应用,是流体力学的一个组成部分。当流体处于静止或相对静止时,各质点之间均不产生相对运动,因而流体的黏滞性不起作用。所以,静止流体中不会有切应力,亦不会产生拉应力,只有压应力。流体质点间或质点与边界之间的相互作用,只能以压应力的形式来体现。因为这个压应力发生在静止流体中,所以称为流体静压强,用以区别运动流体中的压应力(称动压强)。流体静力学主要研究静止流体中的压强分布规律。

第一节 流体静压强及其特性

一、流体静压强的定义

从静止或相对静止状态的均质流体中,任取一体积 V , 四周流体对该体积 V 的作用力以箭头表示,如图 2-1 所示。设用一平面 ABCD 将此体积分为 I、II 两部分。假定将 I 部分移去,并以等效的力代替它对 II 部分的作用,使 II 部分不失原有的平衡。

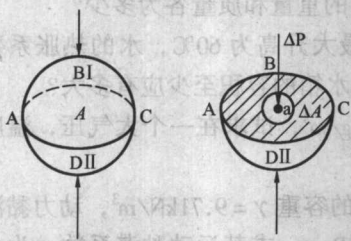


图 2-1 静止流体相互作用

从平面 ABCD 上任取一微小面积 ΔA , a 点是该面积的中心。因流体处于静止状态,作用在 ΔA 上的作用力 ΔP 只能垂直于面积 ΔA 。若作用在面积 ΔA 上的平均流体静压强以 \bar{p} 表示,则有

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-1)$$

当面积 ΔA 无限缩小到 a 点时,比值趋近于某一个极限值,此极限值称为 a 点的流体静压强,以 p 表示。即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow a} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (2-2)$$

流体静压强在国际单位制中常用单位为帕斯卡,以 Pa 表示, $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$; 更大的单位用巴,以 bar 表示, $1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$ 。在工程单位制中常用单位为 kgf/m^2 、 kgf/cm^2 。国际单位制与工程单位制的换算关系为 $1\text{kgf} = 9.8\text{N}$ 。

二、流体静压强的特性

流体静压强有如下两个特性: