

高等职业教育“十二五”规划教材

流体力学 与热工学基础


LIUTI LIXUE YU REGONGXUE JICHU

刘晓红 徐涛 主编



NLIC2970827084



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

赠 电子 课件

器工，学代对高个要主；一公果为的器工巧造院册管液气火并本
 基学代保社商，学代有制商，器本基的器工巧造院册管液气火并本
 基的学代，高等职业教育“十二五”规划教材
 器本基的器工巧造院册管液气火并本
 器本基的器工巧造院册管液气火并本
 器本基的器工巧造院册管液气火并本

流体力学与热工学基础

主 编 刘晓红 徐 涛
 参 编 张 晖 夏挥武
 主 审 蒋祖星

ISBN 978-7-111-30213-2
 高等职业教育“十二五”规划教材

I. ①刘... II. ①徐... ②夏... III. ①流体力学-高等学校-教材 IV. ①O32②TK152



机械工业出版社
 社址：北京机械工业出版社...
 社址：北京机械工业出版社...
 社址：北京机械工业出版社...

本书为广东省新世纪教改工程的成果之一，主要介绍流体力学、工程热力学、传热学的内容。

流体力学部分主要介绍流体的基本特性、流体静力学、流体动力学基础及能量损失与管路计算等知识；工程热力学部分在讲述工程热力学的基本理论和常用工质的性质基础上，主要论述了热工理论在工程上的一些应用，传热学部分内容包括导热、对流换热、辐射换热、传热过程及换热器。

本书可作为高职高专轮机工程专业轮机工程基础课程及热工基础等课程的教材，还可作为有关工程技术人员的参考用书。

本书配有电子课件，凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱：cmpgaozhi@sina.com。咨询电话：010-88379375。

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学与热工学基础/刘晓红, 徐涛主编. —北京: 机械工业出版社, 2012. 8

高等职业教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-39213-2

I. ①流… II. ①刘…②徐… III. ①流体力学 - 高等职业教育 - 教材
②热工学 - 高等职业教育 - 教材 IV. ①O35②TK122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 180490 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘良超 责任编辑: 刘良超

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 媛

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.5 印张 · 429 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-39213-2

定价: 34.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书根据《STCW78/95 公约》和我国国家海事局颁布的《海船船员适任考试与评估大纲》的要求编写而成。

本书主要介绍流体力学、工程热力学、传热学的内容。本书作为轮机工程专业课程教学内容与体系改革的一部分，本着“基础、够用”的原则，删除了一些偏难、偏深的内容，避开一些繁琐的理论推导和数学运算。“流体力学与热工学基础”属于专业基础课，课程内容的编排上应主要考虑后续专业课程学习对基础知识的需要，重点介绍一些最基本的概念、原理及其应用。为了强化学生分析和解决问题的能力，书中结合专业需要引入了大量涉及专业领域的工程实例及与专业和工程问题有关的例题和习题。

本书由广东轻工职业技术学院刘晓红教授和华南理工大学徐涛博士担任主编，由广州航海高等专科学校张晖老师和广州海运集团培训中心夏挥武老师担任参编。徐涛负责编写第一章至第四章，刘晓红负责编写第五章至第十章、第十四章，夏挥武负责编写第十一章至第十三章，张晖负责编写第十五章至第十八章。全书由广东交通职业技术学院蒋祖星教授担任主审。

由于编者水平有限，书中难免存在一些不足之处，希望读者批评指正。

本书配有电子课件，凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱：cmpgaozhi@sina.com。咨询电话：010-88379375。

编 者

学代热警工 篇二第

念册本基的学代热警工 章正第

美承代热及精然，则工 章一第

造美其又态外学代热 章二第

器代式热 章三第

器代式热 章四第

器代式热 章五第

器代式热 章六第

器代式热 章七第

器代式热 章八第

器代式热 章九第

器代式热 章十第

目 录

前言	1	第四节 热力学第一定律能量方程的应用	82
		思考与练习题	84
第一篇 流体力学		第七章 理想气体的热力性质与热力过程	87
第一章 流体的基本特性	1	第一节 理想气体的定义	87
第一节 流体的主要物理性质	1	第二节 理想气体的比热容	90
第二节 作用在流体上的力	8	第三节 理想气体的热力学能、焓和熵的计算	94
思考与练习题	9	第四节 理想气体的热力过程	96
第二章 流体静力学	11	思考与练习题	108
第一节 流体静压力及其特性	11	第八章 热力学第二定律	110
第二节 流体静力学基本方程及其应用	13	第一节 热力循环	110
思考与练习题	20	第二节 热力学第二定律的表述	113
第三章 流体动力学基础	22	第三节 卡诺循环和卡诺定理	114
第一节 流体流动的基本概念	22	第四节 熵方程和熵增原理	119
第二节 稳定流动的连续性方程	25	思考与练习题	122
第三节 伯努利方程	26	第九章 水蒸气热力性质和热力过程	125
第四节 伯努利方程在工程上的应用	31	第一节 水蒸气的基本概念	125
思考与练习题	37	第二节 水的定压加热汽化过程	126
第四章 能量损失与管路计算	40	第三节 水蒸气表和图	129
第一节 流动阻力与水头损失	40	第四节 水蒸气的基本热力过程	132
第二节 流体流动的两种形态	41	思考与练习题	135
第三节 圆管层流的沿程损失计算	44	第十章 气体和蒸汽的流动	137
第四节 圆管湍流的沿程损失计算	47	第一节 气体稳定流动的基本方程	137
第五节 局部损失计算	53	第二节 促使气流速度改变的条件	139
第六节 管路水力计算	56	第三节 喷管和扩压管的选型分析	141
思考与练习题	59	第四节 喷管的流速和流量计算	142
		第五节 绝热节流	146
		思考与练习题	148
第二篇 工程热力学		第十一章 压气机的热力过程	149
第五章 工程热力学的基本概念	62	第一节 单级活塞式理想压气机工作过程分析	149
第一节 工质、热源及热力系统	62	第二节 余隙容积的影响	151
第二节 热力学状态及其参数	65	第三节 多级压缩与级间冷却	153
第三节 热力过程	69	第四节 叶轮式压气机的工作原理	157
思考与练习题	72		
第六章 热力学第一定律	74		
第一节 热力学第一定律的实质	74		
第二节 闭口系统能量方程	78		
第三节 开口系统能量方程	79		

思考与练习题	159	第十七章 辐射换热	222
第十二章 气体动力循环	161	第一节 热辐射的基本概念	222
第一节 活塞式内燃机理想循环	161	第二节 热辐射的基本定律	225
第二节 活塞式内燃机理想循环的比较 及循环的平均压力	165	第三节 物体间的辐射换热计算	228
第三节 燃气轮机动力装置的理想循环	168	第四节 遮热板原理	232
思考与练习题	169	思考与练习题	233
第十三章 制冷循环	171	第十八章 传热过程及换热器	234
第一节 蒸汽压缩式制冷循环	171	第一节 传热过程的分析和计算	234
第二节 热泵循环	178	第二节 换热器	236
思考与练习题	179	第三节 传热过程的削弱和强化	246
第十四章 理想混合气体和湿空气	180	思考与练习题	250
第一节 理想混合气体	180	附录	252
第二节 湿空气的基本概念	182	附录 A 饱和水与饱和蒸汽表 (按温度 排序)	252
第三节 湿空气 $h-d$ 图	186	附录 B 饱和水与饱和蒸汽表 (按压力 排序)	253
第四节 湿空气的典型过程	188	附录 C 未饱和水与过热蒸汽表	255
思考与练习题	191	附录 D R12 饱和液体及蒸汽的热力性质 表	261
第三篇 传 热 学			
第十五章 导热	193	附录 E R22 饱和液体及蒸汽的热力性质 表	263
第一节 导热的基本概念和基本定律	193	附录 F HCFC134a 饱和液体及蒸汽的热 力性质表	265
第二节 平壁和圆筒壁的稳态导热	197	附录 G HCFC134a 过热蒸汽性质表	266
思考与练习题	202	附录 H 干空气的热物理性质 ($p = 1.013$ $\times 10^5 \text{ Pa}$)	266
第十六章 对流换热	204	附录 I 饱和水的热物理性质	267
第一节 对流换热及基本公式	204	附录 J 干饱和水蒸气的热物理性质表	268
第二节 影响表面传热系数的因素分析	205	附录 K 几种饱和液体的热物理性质表	269
第三节 受迫对流换热的分析与计算	208	附录 L 水蒸气 $h-s$ 图	270
第四节 自然对流换热计算	215	参考文献	272
第五节 凝结和沸腾换热	217		
思考与练习题	221		

第一篇 流体力学

物质是由分子组成的，在一定的外界条件下，根据组成物质的分子间的距离和相互作用的强弱不同，物质的存在状态分为气态、液态和固态。气态物质在标准状态下分子间的平均距离大于分子直径的10倍，分子间的相互作用微弱，不能保持一定的体积和形状，当外部压力增大时，其体积按一定的规律缩小，具有较大的可压缩性。液态物质分子间平均距离约为分子直径的一倍，分子间相互作用较大，通常可以保持其固有体积，但不能保持其形状。固态物质则具有固定的形状和体积。

从物质受力和运动的特性来看，物质又可分为两大类：一类物质不能抵抗切向力，在切向力的作用下可以无限的变形，这种变形称为流动，这类物质称为流体，其变形速度即流动速度与切向力的大小有关，气体和液体都属于流体；另一类是固体物质，它能承受一定的切应力，其切应力与变形的大小呈一定的比例关系。

流体力学的基本理论包括两个基本部分，即流体静力学和流体动力学。前者研究流体在静止（或相对平衡）状态下的力学规律；后者研究流体流动时的运动规律。

流体力学在舰船工程中应用非常广泛，如船舶与水相互作用所体现出的浮性、稳性、抗沉性、速航性、摇摆性和操纵性等，轮机机械中用各种泵来输送液体（水、润滑油、燃油等）及风机输送气体（空气、蒸汽等），其工作原理和工作特性无不与流体的平衡规律、运动规律密切相关。

综上所述，工程流体力学是研究流体的平衡和运动规律及其工程应用的科学。

第一章 流体的基本特性

【学习目的】 理解流体的重度、密度、膨胀性与压缩性、粘滞性、表面张力、空气分离压、粘温性、理想流体等基本概念；掌握流体内摩擦力定律，流体粘度的种类及其影响因素。

第一节 流体的主要物理性质

流体的物理性质包括其密度、重度、压缩性、膨胀性、粘滞性、表面张力、含气量及空气分离压等。

一、流体的密度和重度

1. 流体的密度和比体积

流体的密度以单位体积流体所具有的质量来表示，它代表了流体在空间的密集程度。取

包围某点的微元体积 ΔV ，其中所包含的流体质量为 Δm ，比值 $\Delta m/\Delta V$ 即为 ΔV 中流体的平均密度，当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时，即为该点的密度。

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \Delta m / \Delta V$$

对空间各点密度相同的匀质流体，其密度为

$$\rho = m/V \quad (1-1)$$

式中， ρ 为流体的密度，单位为 kg/m^3 ； m 为流体的质量，单位为 kg ； V 为流体的体积，单位为 m^3 。

流体密度的倒数称为流体的比体积，即

$$v = 1/\rho$$

式中， v 为流体的比体积，单位为 m^3/kg 。

2. 重度

在匀质流体中，流体具有的重量与其所占的体积之比称为重度，用 γ 表示，即

$$\gamma = G/V = \rho g \quad (1-2)$$

式中， γ 为流体重度，单位为 N/m^3 ； G 为匀质流体重量，单位为 N ； V 为流体体积，单位为 m^3 ； $g = 9.81 \text{m}/\text{s}^2$ 为重力加速度。

流体的密度和重度均为压力和温度的函数，即同一种流体的密度和重度将随温度和压力而变化。表 1-1 列出了标准大气压下水在不同温度时的密度和重度。从表中可看出，在温度低于 4°C 时，水的体积随温度升高而减小；在温度高于 4°C 时，水的体积随温度升高而增大。故通常将 4°C 称为水在一个标准大气压下的转回温度。表 1-2 中还列出了几种常见流体的密度。

在工程上一般认为水的密度 ρ 和重度 γ 变化不大，常取 4°C 蒸馏水的 $\rho = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$ 和 $\gamma = 9800 \text{N}/\text{m}^3$ 作为日常计算值。

表 1-1 标准大气压下水在不同温度时的密度和重度

$t/^\circ\text{C}$	0	4	10	20	40	60	80	100
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	999.87	1000.00	999.75	998.26	992.35	983.38	971.94	958.65
$\gamma/(\text{N}/\text{m}^3)$	9798.73	9800.00	9797.54	9782.95	9725.03	9637.12	9525.01	9394.77

表 1-2 几种常见流体的密度

流体的种类	温度/ $^\circ\text{C}$	密度/ (kg/m^3)	流体的种类	温度/ $^\circ\text{C}$	密度/ (kg/m^3)
海水	15	1020 ~ 1030	重油	20	980
润滑油	15	890 ~ 920	水银	0	13600
液压油	15	860 ~ 900	酒精	15	790 ~ 800
柴油	20	840 ~ 900	空气	0	1.293
汽油	15	700 ~ 750	二氧化碳	0	1.977

二、流体的压缩性和膨胀性

当温度保持不变，流体所受压力增大时，体积缩小的性质称为流体的压缩性。当压力保持不变，流体的温度升高时，体积增大的性质称为流体的膨胀性。

1. 压缩性

流体的压缩性的大小用体积压缩系数 β_p 来度量。它表示当流体温度不变时, 增加一个单位压力所引起的体积相对缩小量, 即

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_T \quad (1-3)$$

式中, β_p 为流体体积压缩系数, 单位为 m^2/N ; V 为流体原有体积, 单位为 m^3 ; dV 为流体体积的缩小量, 单位为 m^3 ; dp 为流体压力增加量, 单位为 N/m^2 。负号是考虑到压力增大, 体积减小, 所以 dV 与 dp 始终是反号的, 为保持 β_p 为正数, 加了一个负号。 β_p 值越大, 则流体压缩性越大。

由试验得知, 液体的体积压缩系数非常小, 例如水在 0°C 时, 压力增加 0.1MPa 时, $\beta_p = 1/2000 \approx 0$ 。因此, 在工程实际中, 常将液体当作不可压缩流体处理。只有某些特殊情况下, 如研究高压液体传动、水下爆炸及管路中的水击时, 才考虑液体的压缩性。

由于气体的压缩性很大, 一般只能当做可压缩流体对待。但在流速低于 $50 \sim 70\text{m/s}$, 其压力和温度变化不大时, 体积或密度变化可忽略不计。如船舶通风等问题, 可以将气体当做不可压缩流体处理。所以, 不可压缩流体得出的规律, 不仅适用于液体运动, 也适用于低速气体的运动。在工程流体力学的分析中, 认为不可压缩流体的密度 ρ 为常数。

2. 膨胀性

流体膨胀性的大小用体积膨胀系数 β_T 来度量。它表示当流体压力不变时, 温度升高 1°C 所引起的体积相对增加量, 即

$$\beta_T = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_p \quad (1-4)$$

式中, β_T 为流体体积膨胀系数, 单位为 $1/\text{K}$; V 为流体原有体积, 单位为 m^3 ; dV 为流体体积的增加量, 单位为 m^3 ; dT 为流体温度增加量, 单位为 K 。

由试验得知, 液体的体积膨胀系数非常小。例如水, 在 0.1MPa 下, 温度在 $0 \sim 10^\circ\text{C}$ 范围内变化时, 其体积膨胀系数 $\beta_T = 14 \times 10^{-6}$; 当温度在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 范围内变化时, 其体积膨胀系数 $\beta_T = 150 \times 10^{-6}$ 。其他液体的体积膨胀系数也很小, 液体的体积膨胀系数在大多数工程问题上都可忽略不计。气体的体积膨胀系数则较大, 气体的体积随温度和压力的变化规律可通过气体状态方程来反映, 比如对于理想气体, 其体积膨胀系数为 $1/T$ 。

三、粘滞性

1. 粘滞性的概念

凡流体都具有流动性, 流动的实质是流体内部发生了切向变形, 但各种流体的流动性通常有较大差别。例如, 日常生活中从瓶里倒出水和油, 可以看到水和油的流动速度不同。这是因为水和油在流动过程中克服其内部及其与瓶壁间的阻滞作用的能力不同。

流体在运动状态下具有的抵抗剪切变形的物理性质称为流体的粘滞性。流体在静止时不能抵抗剪切变形 (一旦发生剪切变形, 静止状态即遭到破坏), 但在运动状态下, 具有抵抗剪切变形的能力。例如, 水比油的流动性好, 是因为水容易发生切向变形, 它的粘滞性小, 而油的粘滞性大。所有流体都有不同程度的粘滞性, 它是流体流动时产生阻力的内因, 这种阻力称为切向力 (或称内摩擦力)。当流体内部发生相对变形 (即剪切变形) 时, 这种内部出现的内摩擦力将抵抗流体内部的相对运动, 从而影响流体的运动状态。

假定两块平行板，其间充满液体，下板 A 静止不动，上板 B 则以匀速度 u_0 向右移动，如图 1-1 所示。由于粘滞作用，与上下两板相邻的极薄液体层将粘附在板上，与板保持相同的运动状态，即最上层液体以 u_0 的速度向右移动；最下层液体则静止不动。而这两层液体在运动中影响相邻液体层。也就是说第一层液体将通过粘滞作用影响第二层液体的流速，第二层液体又通过粘滞作用影响第三层液体，如此逐渐影响下去，所以中间的液体层分别以不同的速度分层运动。可见平板通过液体的粘滞性而对液体运动起阻滞作用。如果某层液体以速度 u 运动，相邻 dy 处的上层液体则以 $u + du$ 的速度流动，既然速度不同，就产生了相对运动，相邻接触面上有内摩擦力出现，相互阻滞，相互制约，流得快的液体层对流得慢的液体层起拖动作用，而快层作用于慢层的摩擦力与流向一致，反之慢层对快层起阻滞作用，且慢层作用于快层的摩擦与流向相反。这种内摩擦力就是粘滞力。单位面积上的粘滞力称为粘滞切应力，粘滞内摩擦力和粘滞切应力分别用 F 和 τ 来表示。

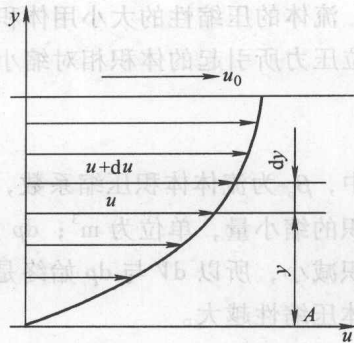


图 1-1 流体层流速度分布图

2. 牛顿内摩擦力定律

根据牛顿研究的结果，流体作层流运动时，各流层间产生的内摩擦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，而与接触面上的压力无关，此即牛顿内摩擦力定律，其数学表达式为

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \tag{1-5}$$

或用粘滞切应力表示为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{1-6}$$

式中， F 为流体层接触面上的内摩擦力，单位为 N； A 为流体流层间的接触面积，单位为 m^2 ， du/dy 为沿接触面法线方向的速度梯度，单位为 $1/s$ ； μ 为反映流体物理性质的比例系数，称为动力粘度，单位为 $Pa \cdot s$ ； τ 为粘滞切应力，单位为 N/m^2 。

在运动的流体中，内摩擦力总是成对出现的，它们大小相等、方向相反，分别作用在对方流层上。流体静止时，速度梯度为零，则内摩擦力或切应力等于零，即流体在静止时不能呈现出内摩擦力或切应力。这说明流体的粘滞性只有在流体发生运动或变形时才能呈现出来。而流体的运动或变形一旦停止，阻碍流体运动的内摩擦力或切应力也随之消失，流体就不再呈现为粘滞性。值得注意的是，我们不能说静止不动的流体就不具有粘滞性，实际上粘滞性是一切流体的基本属性，只不过流体只有在运动或变形时其本身具有的粘滞性才表现出来。

必须强调指出的是，牛顿内摩擦力定律只适用于流体作层流运动的情况。对某些特殊液体（如泥浆、胶状液体、接近凝固的石油等）是不适用于牛顿内摩擦力定律的。为了区别，通常将符合牛顿内摩擦力定律的流体称为“牛顿流体”，反之称为“非牛顿流体”。

3. 流体的粘度

粘度是反映流体粘滞性大小的参数，根据用途和测量方法不同，常用的粘度有以下几

种:

(1) 动力粘度 μ 即粘性动力系数, 其物理意义是在相同的速度梯度 du/dy 下, 表征流体粘滞性的大小。由式 (1-6) 可知, 当速度梯度等于 1 时, 在数值上 μ 等于接触面上的粘滞切应力。动力粘度的国际单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 运动粘度 ν 即粘度运动系数, 它是流体动力粘度 μ 与流体密度 ρ 之比值。其国际单位为 m^2/s , 即

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-7)$$

运动粘度不能像动力粘度那样直接表示流体粘滞性的大小, 只有对密度相近的流体才可用来大致比较它们的粘滞性。在液压系统计算及液压油的牌号表示上常用运动粘度。机油的号数就是根据这种油在一定温度下的运动粘度的平均值来编号的。

(3) 相对粘度 直接测定动力粘度 μ 与运动粘度 ν 都是很困难的, 只能间接测量。对于流体, 如液压系统中的液压油, 实际上都是用粘度计测量的。用各种粘度计测得的流体粘度都称为相对粘度。由于测量流体粘度的方法不同, 各国采用的相对粘度单位有所不同, 美国用赛氏粘度 (SSU), 英国用雷氏粘度 (Red), 我国用恩氏粘度 ($^{\circ}E$)。

恩氏粘度是利用恩氏粘度计测定的, 如图 1-2 所示, 它是由两个同心安装的黄铜容器 1 和 2 组成。容器 1 的球形底部中心有一个小管嘴 3, 管嘴的孔口用具有锥形顶部的针杆 4 塞住。在容器 1 和 2 之间的空间内充水, 并通过电热器保持一定的温度。

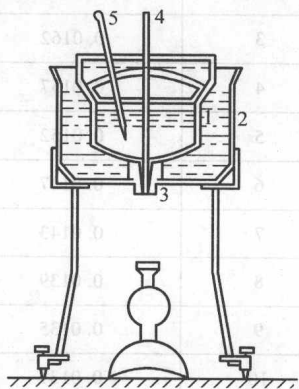


图 1-2 恩氏粘度计

1、2—容器 3—管嘴
4—针杆 5—温度计

测定之前先关闭管嘴, 再将 200cm^3 的待测液体注入储液器内, 然后用电热器将水槽中的水加热, 使恒温槽中的水保持一定的温度, 并用温度计测量槽内水的温度。当稳定在规定温度后, 开启针杆, 则待测液体自管嘴滴入量筒内。这时测出 200cm^3 待测液体在规定温度下出流完毕所需的时间 t_1 , 然后以同样的办法测定 200cm^3 蒸馏水在 20°C 出流完毕所需的时间 t_0 (一般为 $50 \sim 53\text{s}$, 取平均值为 51s), 则 t_1 与 t_0 之比称为恩氏粘度, 即

$$^{\circ}E = t_1/t_0$$

显然, 恩氏粘度无量纲, 工业上一般以 20°C 、 50°C 、 100°C 作为测定恩氏粘度的标准温度, 并以符号 $^{\circ}E_{20}$ 、 $^{\circ}E_{50}$ 、 $^{\circ}E_{100}$ 表示。

(4) 流体的粘温性 流体粘度随温度而变化的特性称为粘温性。温度对流体粘度的影响较大, 但它对液体和气体却有相反的影响。温度升高时, 液体的粘度降低, 而气体粘度反而增大。这是由于液体分子的间距较小, 相互吸引的内聚力起主要作用, 而切应力主要取决于内聚力。当温度升高时, 分子间距增大, 液体的内聚力减小, 因而切应力也随之减小。而气体的分子间距较大, 内聚力极其微小。根据分子运动理论, 分子的动量交换率随温度升高而加剧, 因而切应力也随之增加。相对地说, 温度的影响对液体较气体更为明显。油液的粘温性对液压元件性能有较大的影响, 温度升高时由于粘度下降, 使流量发生波动, 工作不平衡, 所以液压系统中要求采用粘温性较好的油液, 即粘度随温度变化越小越好。燃油的粘温性对船舶燃油输送和雾化质量有较大影响。采用对燃油适当加热的方法, 降低其粘度, 可减

少燃油输送功率消耗和提高雾化质量。但润滑油粘温性对于主辅机、水泵、风机等转动机械轴承的润滑性能将产生不利的影 响，在温度超过 60°C 时，由于润滑油粘度下降，妨碍润滑油膜的形成，会造成轴承温度升高，甚至发生“烧瓦”现象。因此，轴承温度一般都保持在 60°C 以下。表 1-3 给出了正常压力下水的运动粘度与温度的关系。

压力对液体的粘度也有一定的影响。一般液体的粘度随压力的升高而增大。因为当液体压力增加时，分子间距离减小，其粘度增加。当压力在 30MPa 以下时粘度随压力的变化一般呈线性关系。当压力极高时，粘度会急剧增加。所以当液压油压力在 20MPa 以上且变化幅度较大时，应当计算其粘度的变化。当液压油压力在 10MPa 以下时，其粘度变化可忽略不计。

表 1-3 正常压力下水的运动粘度与温度的关系

温度 / $^{\circ}\text{C}$	运动粘度 ν / cm^2/s	温度 / $^{\circ}\text{C}$	运动粘度 ν / cm^2/s	温度 / $^{\circ}\text{C}$	运动粘度 ν / cm^2/s
0	0.0179	15	0.0114	65	0.00436
2	0.0167	20	0.0100	70	0.00406
3	0.0162	25	0.00894	75	0.00380
4	0.0157	30	0.00801	80	0.00357
5	0.0152	35	0.00723	85	0.00336
6	0.0147	40	0.00660	90	0.00316
7	0.0143	45	0.00599	95	0.00299
8	0.0139	50	0.00549	100	0.00285
9	0.0135	55	0.00506		
10	0.0131	60	0.00469		

(5) 理想流体 自然界中存在的流体都具有粘性，统称为粘性流体或实际流体。不具有粘性的流体称为理想流体，这是客观世界中并不存在的一种假想流体。在流体力学中引入这一概念是因为：①在静止流体和速度均匀且作直线运动的流体中，流体的粘性表现不出来，在这种情况下完全可将粘性流体当做理想流体来对待；②在许多场合，求解粘性流体的精确解是很困难的，对于某些粘性不起主要作用的问题，可以先不计粘性的影响，使问题的分析大为简化，从而有利于掌握流体流动的基本规律。至于粘性的影响可通过试验加以修正。

【例 1-1】 某输油管直径 $d = 5\text{cm}$ ，管中速度分布的方程式为 $u = 0.5 - 800y^2$ (m/s)，已知靠近管壁单位面积上的粘滞切应力 $\tau = 43.512\text{N/m}^2$ ，试求该油种的动力粘度 (y 为管子轴心至管壁距离，以 m 计)。

解：以管子中心轴为横坐标表示流速 u ，垂直中心轴沿管径方向的轴为纵坐标表示长度 y ，绘制流速分布图，得 u - y 曲线，如图 1-3 所示。

管壁处的速度梯度为

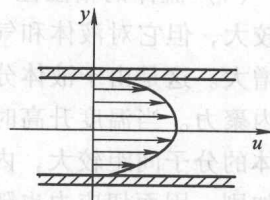


图 1-3 例 1-1 用图

$$\left. \frac{du}{dy} \right|_{y=\pm 0.025} = -1600y \Big|_{y=\pm 0.025} = \mp 40 \text{ s}^{-1}$$

取管壁处速度梯度为正值，由于管壁处 $\tau = 43.512 \text{ N/m}^2$ ，则根据牛顿内摩擦力定律式(1-6)有

$$\mu = \tau \Big/ \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=\pm 0.025} = 43.512 \times \frac{1}{40} \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1.0878 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

【例 1-2】 图 1-4 所示为一轴和滑动轴承，间隙 $\delta = 0.1 \text{ cm}$ ，轴的转速 $n = 180 \text{ r/min}$ ，轴的直径 $D = 15 \text{ cm}$ ，轴承宽度 $b = 25 \text{ cm}$ ，求所消耗的功率？（润滑油的 $\mu = 0.245 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ）。

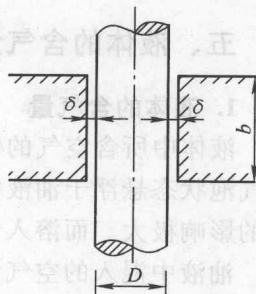


图 1-4 例 1-2 用图

解：轴表面的圆周速度为

$$u = \frac{\pi D n}{60} = \frac{3.14 \times 0.15 \times 180}{60} \text{ m/s} = 1.413 \text{ m/s}$$

因油层很薄，故可以取

$$\frac{du}{dy} = \frac{u}{\delta} = \frac{1.413}{0.001} \text{ s}^{-1} = 1413 \text{ s}^{-1}$$

则内摩擦力为

$$F = \mu A \frac{u}{\delta} = 0.245 \times 3.14 \times 0.15 \times 0.25 \times 1413 \text{ N} = 40.76 \text{ N}$$

滑动轴承所消耗的功率为

$$N = Mu = F \frac{D}{2} \frac{2\pi n}{60} = 40.76 \times \frac{0.15}{2} \times \frac{2\pi \times 180}{60} \text{ W} = 56.75 \text{ W}$$

四、液体表面张力

在液体的自由液面上，由于液体分子两侧分子吸引力的不平衡，使自由表面上液体分子受有极其微小的拉力，这种表面上所受的拉力称为表面张力。表面张力仅仅存在于自由表面上，液体内部并不存在，所以它是一种局部受力现象。

液体与固体壁面接触时，其间存在着附着力。若附着力大于液体分子间的内聚力，就产生液体能润湿固体壁面的现象，如图 1-5a 所示；若附着力小于液体分子间的内聚力，就产生液体不能润湿固体壁面的现象，如图 1-5b 所示。对于能润湿壁面的液体，接触角（液体表面的切面与固体壁面所构成的角）为锐角，对不能润湿固体壁面的液体，接触角为钝角。如水与玻璃的接触角 $\theta = 8^\circ \sim 9^\circ$ ，水银与玻璃的接触角为 $\theta = 139^\circ$ 。

将毛细管插入液体中，管内、外的液面产生高度差的现象称为毛细现象。如果液体能润湿壁面，则管内液面升高；如果液体不能润湿壁面，则管内液面下降。图 1-6 所示为玻璃管插入水和水银中的情况。液面高度差主要取决于流体的性质和管子的

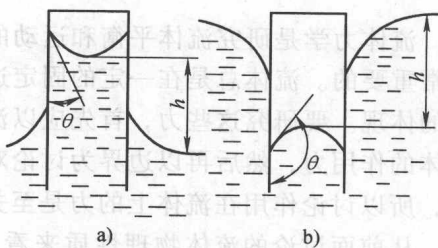


图 1-5 液体与固体壁面的接触情况

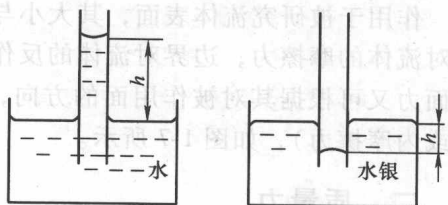


图 1-6 玻璃管插入水和水银中的情况

直径。

对于 20℃ 的水，玻璃管中水面高出容器中水面的高度 h 约为

$$h = 29.8/d$$

对于水银，玻璃管中水银面低于容器中水银面的高度差 h 约为

$$h = 10.15/d$$

这里管径 d 的单位均以 mm 计。

五、液体的含气量和空气分离压

1. 液体的含气量

液体中所含空气的体积分数称为含气量，油液中的空气有混入和溶入两种。混入的气体呈气泡状态悬浮于油液中，它对油液的体积弹性模量和粘性均产生影响，尤其对体积弹性模量的影响极大。而溶入气体对油液的体积弹性模量和粘性影响极小。

油液中混入的空气量取决于油液的性质及其与空气接触和搅动的情况；而油液中溶入的空气量正比于绝对压力。当压力加大后部分混入的空气会溶入油液中。油液中混入空气后，不仅使油液的体积弹性模量急剧下降，而且油液的动力粘度呈线性增加。

2. 空气分离压

在某一温度和压力 p_0 下，设油液中空气溶解量为 a_0 ，当压力降为 p_1 时，相应的空气溶解量为 a_1 ，则 $a_0 - a_1$ 为油液中空气的过饱和量。当压力继续下降到某一压力 p_g 时，过饱和空气将从油液中析出而产生气泡，这个压力 p_g 称为该温度下的空气分离压。空气分离压与油液的种类、温度、空气溶解量及混入量有关。通常是油温高、空气溶解量和混入量大，则空气分离压高。

第二节 作用在流体上的力

流体力学是研究流体平衡和运动的各种力学规律的科学，弄清作用在流体上的各种力是非常重要的。流体总是在一定的固定边界内运动的，流体与固体边界之间的相互作用，就是力的体现。要研究这些力，首先应以流体为讨论对象，研究流体所受的力，其中包括边界对流体的作用力，然后再以边界为讨论对象，通过作用与反作用原理，得出流体对边界的作用力，所以讨论作用在流体上的力是至关重要的。

从前面讨论的流体物理性质来看，作用于流体上的力有重力、惯性力、弹性力、摩擦力、表面张力等。按其作用的特点，可分为表面力和质量力两大类。

一、表面力

作用于被研究流体表面，其大小与被作用面的面积大小有关的力称为表面力。如固体边界对流体的摩擦力，边界对流体的反作用力，相邻两部分流体在接触面上所产生的压力等。表面力又可根据其对被作用面的方向，分为法向表面力（如压力）和切向表面力（如摩擦力或内摩擦力），如图 1-7 所示。

二、质量力

通过所研究流体的每一部分质量而作用于流体，其大小与流体质量成正比的力称为质量

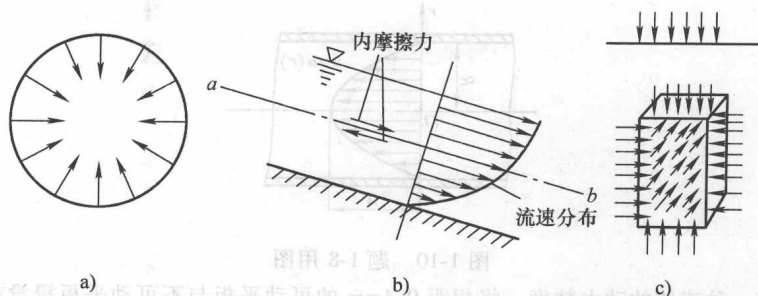


图 1-7 作用在流体上的表面力

就匀质流体来说，质量与体积是成正比的，所以质量力又称为体积力。质量力有重力和惯性力两种。重力是地球对流体每一个质点的吸引力。惯性力是流体质点受外力作变速运动时，由于惯性而在质点上体现的一种力，其大小等于该质点质量与其加速度的乘积，方向和加速度的方向相反。

由于质量力与流体的质量成正比，故一般采用单位质量力的表示方法，即表示为单位质量流体的质量力。设所讨论的流体总质量为 m ，所受的质量力合力为 F ，其沿三个坐标轴上的分量为 F_x 、 F_y 、 F_z ，则沿三个轴向上的单位质量力可以表示为

$$X = F_x/m, Y = F_y/m, Z = F_z/m$$

可见，单位质量力及其分量的单位与加速度的单位相同，为 m/s^2 。

思考与练习题

1-1 流体的内摩擦力（切应力）产生的原因是什么（用分子的微观运动说明）？它与哪些因素有关？液体承受拉力、切应力、压力的能力如何？

1-2 为什么静止流体不存在切应力？静止的流体是否具有粘滞性？

1-3 液体和气体的粘度随温度的变化有何不同？为什么？

1-4 何谓质量力和表面力？哪些力是质量力和表面力？

1-5 流体的物理性质有哪几个参数来表示？它们随温度、压力如何变化？

1-6 如图 1-8 所示，气缸内壁直径 $D=12\text{cm}$ ，活塞直径 $d=11.96\text{cm}$ ，活塞长度为 $l=17\text{cm}$ ，活塞往复运动的速度为 1m/s ，润滑油的动力粘度 $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。试求作用在活塞上的粘滞力。

1-7 如图 1-9 所示，水轮机轴径 $d=0.36\text{m}$ ，轴承长 $l=1\text{m}$ ，同心缝隙 $\delta=0.23\text{mm}$ ，润滑油的动力粘度 $\mu=0.072\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，试求水轮转速 $n=200\text{r/min}$ 时，消耗于轴承上的摩擦功率。

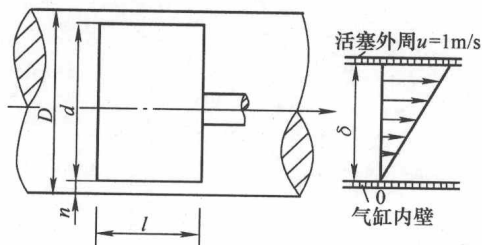


图 1-8 题 1-6 用图

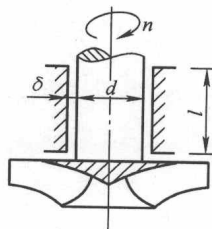


图 1-9 题 1-7 用图

1-8 已知管内液体质点的轴向速度 u 与质点所在半径 r 呈抛物线型分布，如图 1-10 所示。当 $r=0$ 时， $u=W$ ；当 $r=R$ 时， $u=0$ 。试建立 $u=u(r)$ 和 $\tau=\tau(r)$ 的函数关系，如果 $R=6\text{mm}$ ， $W=3.6\text{m/s}$ ， $\mu=0.1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 时，试求 $r=4\text{mm}$ 处的切应力。

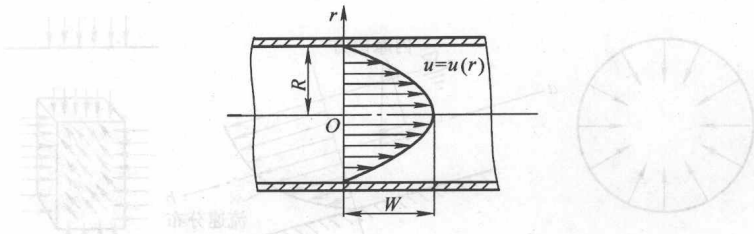


图 1-10 题 1-8 用图

1-9 为测量某一种流体的动力粘度，将相距 0.4mm 的可动平板与不可动平板浸没在该流体中，可运平板以 0.3m/s 的速度移动，为了维持这个速度需要在单位面积上施加 2N/m^2 的作用力，求流体的粘度。

由题可知，流体在两层平板之间流动，速度分布为线性。设流体厚度为 δ ，可动平板速度为 u ，不可动平板速度为 0。根据牛顿内摩擦定律，剪切应力 τ 与速度梯度成正比： $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 。在单位面积上施加的作用力 F 等于剪切应力 τ 。因此，流体的动力粘度 μ 可以通过 $\mu = \frac{F \delta}{u}$ 计算得出。

思考题

- 1-1 流体的内摩擦（粘性）产生的原因是什么？它与哪些因素有关？
- 1-2 流体的物理性质用几个参数来表示，它们是什么？
- 1-3 流体的粘滞性在什么条件下表现出来？
- 1-4 什么是流体的粘滞性？它与流体的哪些性质有关？
- 1-5 为什么静止流体不存在切应力？运动的流体是否存在切应力？
- 1-6 如图 1-8 所示，气缸内盛有直径 $D=12\text{cm}$ ，转速 $n=1190\text{rpm}$ ，活塞直径 $d=12\text{cm}$ ，活塞与缸壁之间的间隙 $\delta=0.25\text{mm}$ ，同心轴转速 $\omega=3000\text{rpm}$ ，求气缸内油膜的切应力。
- 1-7 如图 1-9 所示，水轮机轴径 $d=0.36\text{m}$ ，轴长 $l=1\text{m}$ ，同心轴套 $\delta=0.25\text{mm}$ ，轴套与轴之间的切应力 $\tau=0.075\text{Pa}$ ，求水轮机轴套的转速。

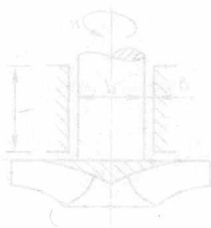


图 1-7 题 1-7 用图

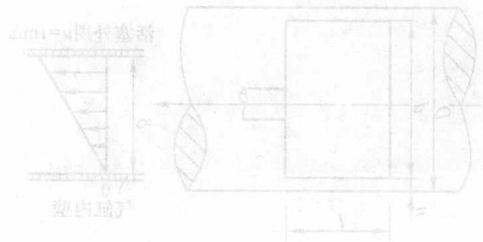


图 1-8 题 1-8 用图

1-8 已知管内液体沿轴线的速度 u 与半径 r 成正比，且 $u(r=0) = u_0$ 。求：
 (1) 轴线上液体的速度 u ；
 (2) 轴线上液体的切应力 τ ；
 (3) 轴线上液体的速度梯度 $\frac{du}{dr}$ ；
 (4) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (5) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (6) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (7) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (8) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (9) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (10) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (11) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (12) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (13) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (14) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (15) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (16) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (17) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (18) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (19) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (20) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (21) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (22) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (23) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (24) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (25) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (26) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (27) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (28) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (29) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (30) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (31) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (32) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (33) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (34) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (35) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (36) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (37) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (38) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (39) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (40) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (41) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (42) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (43) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (44) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (45) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (46) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (47) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (48) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (49) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (50) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (51) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (52) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (53) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (54) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (55) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (56) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (57) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (58) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (59) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (60) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (61) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (62) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (63) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (64) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (65) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (66) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (67) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (68) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (69) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (70) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (71) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (72) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (73) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (74) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (75) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (76) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (77) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (78) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (79) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (80) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (81) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (82) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (83) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (84) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (85) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (86) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (87) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (88) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (89) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (90) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (91) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (92) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (93) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (94) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (95) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (96) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (97) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (98) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (99) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；
 (100) 轴线上液体的速度分布 $u(r)$ ；

第二章 流体静力学

【学习目的】 理解流体静压力的基本特性；熟练掌握流体静力学基本方程的意义和工程应用；掌握帕斯卡定律的基本原理及工程应用；了解作用在流体边界上的静压力的分布规律。

第一节 流体静压力及其特性

一、流体静压力

流体在静止状态时的压力称为流体静压力。在流体力学中，为衡量压力的大小，常用单位面积上所受的总压力（即压力强度）来表示。如果受压面 A 上作用有总压力 F ，则 F/A 就称为 A 上所受的**平均静压力**，以符号 p 表示，即

$$p = F/A \quad (2-1)$$

一般来说，与流体相接触的受压面上所受的静压力不是均匀分布的，所以用式 (2-1) 计算出的平均静压力不能代表受压面上各处的真实受力情况，因此还需建立点的静压力的概念。

如图 2-1 所示，在分离体表面 ab 上取含 K 点在内的微小面积 ΔA ，设作用在此面积上的总压力为 ΔF ，那么 ΔA 面上的平均静压力应为 $\Delta F/\Delta A$ 。如果让面积 ΔA 无限缩小至趋近于 K 点，此时 $\Delta F/\Delta A$ 的极限值称为 K 点的静压力，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

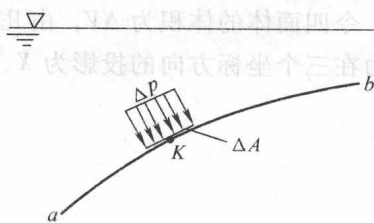


图 2-1 点的静压力的概念

K 点的静压力简称为静压力。静压力的单位为 kPa 或 MPa 。

二、流体静压力的特性

流体静压力具有两个极其重要的特性。

1. 流体静压力的方向垂直并指向受压面

一处于静止状态的流体 M ，如图 2-2a 所示，如用 $N-N$ 面将流体 M 分成 I、II 两部分，当取第 II 部分流体为分离体作受力分析时，在分割面 $N-N$ 上，第 I 部分对第 II 部分流体将有静压力。设分割面上某点 k 处所受的静压力为 p ，现讨论该静压力 p 的

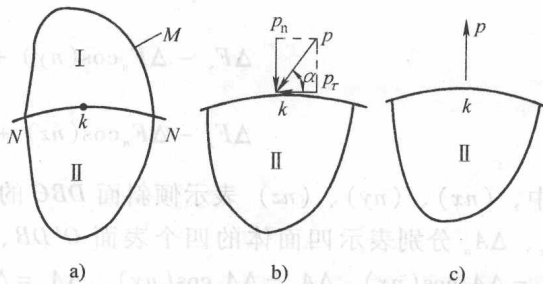


图 2-2 流体静压力的方向