

高等职业教育“十二五”规划教材
制冷与空调/制冷与冷藏专业

热工与流体 力学基础

蒋祖星 主编



赠电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

高等职业教育“十二五”规划教材
制冷与空调/制冷与冷藏专业

热工与流体力学基础

主 编 蒋祖星
副主编 周 丽
参 编 徐 涛 宋 博 王前进 张丽清
主 审 刘晓红



机械工业出版社

本书是普通高等职业教育“十二五”规划教材之一,是由全国高职高专院校制冷与空调/冷藏专业教材编审委员会组织编写的。

本书共分三篇。第一篇为工程流体力学部分,主要讲述了流体基本特性,流体静力学和动力学的基本理论,并结合专业领域的实际工程应用介绍了流动阻力及管路水力计算等相关知识;第二篇为工程热力学部分,主要讲述了热力学的基本概念和基本定律,以及热力学理论在制冷、空调、压气机、喷管与扩压管等方面的应用;第三篇为传热学部分,主要讲述了三种基本传热方式及复合换热的基本理论知识,并以换热器为例讨论了综合传热过程的分析方法,从热绝缘、传热强化和换热污垢等几方面介绍了传热学理论的工程应用。

本书可作为制冷与空调专业、制冷与冷藏专业、供热通风与空调工程技术和能源类相关专业的专业基础课教材,也可作为相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

热工与流体力学基础 / 蒋祖星主编. —北京:机械工业出版社,2011. 11
高等职业教育“十二五”规划教材. 制冷与空调/制冷与冷藏专业
ISBN 978-7-111-36441-2

I. ①热… II. ①蒋… III. ①热工学—高等职业教育—教材 ②流体力学—高等职业教育—教材 IV. ①TK122 ②035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 232275 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:张双国 责任编辑:张双国

版式设计:张世琴 责任校对:陈延翔

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京汇林印务有限公司印刷

2012 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm 20.5 印张·1 插页·510 千字

0001-3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-36441-2

定价:39.00 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

根据高等职业技术教育职业性和实践性的要求,国内许多高职高专院校均根据各自的专业方向对专业课程体系和课程教学内容进行了大胆的改革。在基础知识适度、够用,突出专业实践技能培养的高职教育思想指导下,将原有的三门专业基础课“工程流体力学”、“工程热力学”和“传热学”的内容整合成“热工与流体力学基础”一门课。本教材正是为了满足专业教学需要,按机械工业出版社组织的高职高专院校制冷与空调技术专业系列教材的要求而编写的。

“热工与流体力学基础”属于专业基础课,因此本书在内容的编排上主要考虑了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、原理及其工程应用,本着基础知识适度、够用的原则,避开一些繁琐的理论推导和数学运算,突出基本概念和基本规律的理解与应用;并结合专业特点,通过大量的工程案例分析,将课程内容进行了适当的知识拓展,介绍了大量最新工程应用技术成果和发展方向。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,提供了大量与专业和工程问题有关的例题和习题。

本书由广东交通职业技术学院蒋祖星任主编,武汉商业服务学院周丽任副主编,广州航海高等专科学校徐涛、宋博,南通航运职业技术学院王前进,河北农业大学海洋学院张丽清为本书参编。其中,第一、二章由宋博编写,第三、四章由周丽编写,第五、六、七、八、十、十一章及附录由蒋祖星编写,第九、十二章由张丽清编写,第十三、十四、十五章由王前进编写,第十六章由徐涛编写。广东轻工职业技术学院刘晓红教授任本书主审,并提出了许多宝贵的修改意见,在此对其表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些疏漏之处,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

主要符号表

A : 面积	U : 热力学能
c : 比热容	u : 比热力学能
c_p : 质量定压热容	V : 体积
c_v : 质量定容热容	v : 比体积, 平均速度
E : 辐射力, 体积模量	W : 体积功
G : 重量流量	W_s : 轴功
g : 重力加速度	W_t : 技术功
H : 焓, 高度	w : 比体积功
h : 比焓	w_g : 流速
k : 传热系数	w_s : 比轴功
M : 摩尔质量	w_t : 比技术功
n : 多变指数, 物质的量	x : 干度
p : 绝对压力	x_i : 质量分数
p_b : 大气压力	α : 体积膨胀系数
p_i : 分压力	β : 体积压缩系数
p_s : 饱和压力	γ : 比汽化热
p_v : 真空度	δ : 厚度, 余隙比
p_w : 湿空气中水蒸气分压力	ε : 制冷系数, 黑度
Q : 热量, 体积流量	η_t : 循环热效率
q : 单位换热量	η_v : 容积效率
R : 气体常数	η_f : 肋片效率
R_m : 摩尔气体常数	κ : 比热容比, 等熵指数
S : 熵	λ : 导热系数, 沿程阻力系数
s : 比熵	μ : 动力粘度
s_g : 熵产	ν : 运动粘度
s_f : 熵流	ξ : 局部阻力系数
T : 热力学温度	ρ : 密度
t : 摄氏温度	τ : 切应力
t_s : 饱和温度	φ : 相对湿度
t_w : 湿球温度	

目 录

前言

主要符号表

第一篇 工程流体力学 1

第一章 流体的基本特性 1

第一节 流体的主要物理性质 1

第二节 作用在流体上的力 8

【案例分析与知识拓展】 9

【本章小结】 10

【思考与练习题】 10

第二章 流体静力学基础 12

第一节 流体静压力及其特性 12

第二节 流体静力学基本方程 14

第三节 流体静力学基本方程的应用 16

【案例分析与知识拓展】 21

【本章小结】 22

【思考与练习题】 22

第三章 流体动力学基础 24

第一节 流体流动的基本概念 24

第二节 稳定流动的连续性方程 27

第三节 伯努利方程 28

第四节 伯努利方程的工程应用 33

【案例分析与知识拓展】 39

【本章小结】 40

【思考与练习题】 41

第四章 流动阻力与管路水力计算 44

第一节 流动阻力与水头损失 44

第二节 流体流动的基本形态 45

第三节 管流沿程水头损失计算 48

第四节 局部水头损失计算 56

第五节 管路水力计算 59

【案例分析与知识拓展】 62

【本章小结】 64

【思考与练习题】 64

第二篇 工程热力学 67

第五章 工程热力学的基本概念 67

第一节 工质与热力系统 67

第二节 热力学状态及基本状态参数 70

第三节 热力过程 74

【案例分析与知识拓展】 77

【本章小结】 78

【思考与练习题】 78

第六章 热力学第一定律 80

第一节 热力学第一定律的实质 80

第二节 过程功与热量 80

第三节 热力学能与焓 83

第四节 热力学第一定律能量方程 85

【案例分析与知识拓展】 88

【本章小结】 89

【思考与练习题】 90

第七章 理想气体的热力性质

及其热力过程 92

第一节 理想气体及其状态方程 92

第二节 理想气体的比热容 95

第三节 理想气体的热力学能与焓 99

第四节 理想气体的基本热力过程 101

第五节 理想气体的多变过程 108

【案例分析与知识拓展】 112

【本章小结】 112

【思考与练习题】 114

第八章 热力学第二定律 116

第一节 自然过程的方向性 116

第二节 热力循环 117

第三节 热力学第二定律的表述 120

第四节 卡诺循环和卡诺定理 121

第五节 熵方程和熵增原理 124

【案例分析与知识拓展】 128

【本章小结】 130

【思考与练习题】 131

第九章 水蒸气与湿空气	134	【案例分析与知识拓展】	212
第一节 水蒸气的饱和状态	134	【本章小结】	213
第二节 水的定压加热汽化过程	135	【思考与练习题】	214
第三节 水蒸气的表和图	139	第十四章 对流换热	216
第四节 理想混合气体的性质	141	第一节 对流换热及其影响因素分析	216
第五节 湿空气的基本概念	144	第二节 求解表面传热系数的方法	221
第六节 湿空气的参数与 $h-d$ 图	148	第三节 圆管受迫对流换热	227
第七节 湿空气的典型过程	151	第四节 自然对流换热	235
【案例分析与知识拓展】	154	第五节 沸腾换热	238
【本章小结】	156	第六节 凝结换热	243
【思考与练习题】	157	【案例分析与知识拓展】	245
第十章 气体和蒸汽的流动	159	【本章小结】	247
第一节 稳定流动基本方程	159	【思考与练习题】	249
第二节 喷管与扩压管的选型分析	161	第十五章 辐射换热	250
第三节 喷管流速与流量计算	163	第一节 热辐射的基本概念	250
第四节 绝热节流	168	第二节 热辐射的基本定律	253
【案例分析与知识拓展】	169	第三节 物体间的辐射换热计算	257
【本章小结】	171	第四节 遮热板原理	262
【思考与练习题】	172	【案例分析与知识拓展】	263
第十一章 压气机的热力过程	174	【本章小结】	265
第一节 单级活塞式压气机 的工作过程	174	【思考与练习题】	266
第二节 多级活塞式压气机 的工作过程	178	第十六章 传热过程与换热器	268
第三节 叶轮式压气机的工作过程	181	第一节 传热过程的分析和计算方法	268
【案例分析与知识拓展】	183	第二节 通过肋壁的传热	272
【本章小结】	184	第三节 换热器	280
【思考与练习题】	185	第四节 热绝缘	290
第十二章 制冷与热泵循环	187	第五节 换热污垢及其处理方法	292
第一节 蒸汽压缩制冷循环	187	第六节 传热强化技术	295
第二节 其他制冷循环简介	194	【案例分析与知识拓展】	299
第三节 热泵循环	197	【本章小结】	300
【案例分析与知识拓展】	198	【思考与练习题】	301
【本章小结】	200	附录	303
【思考与练习题】	201	附录 A	303
第三篇 传热学	202	附录 A-1 饱和水与饱和蒸汽性质表 (按温度排序)	303
第十三章 稳态导热	202	附录 A-2 饱和水与饱和蒸汽性质表 (按压力排序)	304
第一节 导热的基本概念	202	附录 A-3 未饱和水和过热蒸汽性质表	305
第二节 导热的基本定律	204	附录 A-4 R12 饱和液体及蒸汽的 热力性质表	311
第三节 平壁和圆筒壁的稳态导热	206	附录 A-5 R22 饱和液体及蒸汽的热力 性质表	313

附录 A-6	R134a 饱和液体及蒸汽的热力性质表	315	附录 A-10	饱和水蒸气的热物理性质表	318
附录 A-7	R134a 过热蒸汽性质表	315	附录 A-11	几种饱和液体的热物理性质表	319
附录 A-8	干空气的热物理性质表 ($p=1.013\times 10^5$ Pa)	316	附录 B	水蒸气的 $h-s$ 图(见书后彩插)	
附录 A-9	饱和水的热物理性质表	317	参考文献	320

第一篇 工程流体力学

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,物质的存在状态可分为气态、液态和固态。在标准状态下,气态物质分子间的平均距离大于分子直径的十倍,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等于分子直径,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。

根据物质受力和运动的特性的不同,物质可分为两大类:一类物质不能承受切应力,在切应力的作用下可以无限地变形,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)与切应力的大小有关,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。

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。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。

制冷装置中的制冷剂、载冷剂、冷却介质及空调系统中的空气都在不停地流动,这些流体流动所涉及的最佳流速的确定、输送通道的断面尺寸设计、流动阻力计算与输送机械的选型、管道相关附件的选择与布置以及介质流速、流量和压力的控制等都与流体的流动规律密切相关。

第一章 流体的基本特性

【知识目标】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,流体上作用力的特点。

【能力目标】具备区分不同性质流体的初步能力,在后续的学习中,能根据流体性质的不同选择分析研究方法。

第一节 流体的主要物理性质

流体是处于相对静止状态还是处于运动状态,除了与外力作用有关外,更重要的还取决于流体本身的内在物理性质。流体的主要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,它代表了流体在流动空间的密集程度。在流体内部取包围某点的微小体积 ΔV ,若其中所包含的流体质量为 Δm ,则比值 $\Delta m/\Delta V$ 即为流体的平均密度;当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时,即为流体在该点处的密度。

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

对空间各点密度相同的匀质流体,其密度为

$$\rho = m/V \tag{1-1}$$

式中, ρ 为流体密度,单位为 kg/m^3 ; m 为流体质量,单位为 kg ; V 为流体体积,单位为 m^3 。

单位质量流体所占有的体积称为流体的比体积。流体比体积与密度互为倒数,即

$$v = 1/\rho$$

2. 重度

单位体积流体的重量称为重度,用 γ 表示,其单位为 N/m^3 。匀质流体的重度为

$$\gamma = \frac{G}{V} = \rho g \tag{1-2}$$

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

对于非匀质流体,定义流体体积 ΔV 中某质点的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \tag{1-3}$$

式中, ΔV 为微小流体的体积(m^3); ΔG 为微小体积 ΔV 内的流体重量(N)。

流体的密度和重度均为其压力和温度的函数,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 1atm 下,水在不同温度时的密度和重度值。从表中可看出,在温度低于 4°C 时,水的体积随温度的升高而减小;在温度高于 4°C 时,水的体积随温度的升高而增大,故通常将 4°C 称为水在 1atm 下的转回温度。表 1-2 中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 $\rho=1\,000\text{kg}/\text{m}^3$ 和 $\gamma=9\,800\text{N}/\text{m}^3$ 作为其日常计算值。

表 1-1 1atm 下不同温度时水的密度和重度值

$t/^\circ\text{C}$	0	4	10	20	40	60	80	100
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	999.87	1 000.00	999.75	998.26	992.35	983.38	971.94	958.65
$\gamma/(\text{N}/\text{m}^2)$	9 798.73	9 800.00	9 797.54	9 782.95	9 725.03	9 637.12	9 525.01	9 394.77

表 1-2 几种常见流体的密度

流体名称	空气	酒精	四氯化碳	水银	汽油	海水
温度/ $^\circ\text{C}$	0	15	20	0	15	15
密度/ (kg/m^3)	1.293	790~800	1 590	13 600	700~750	1 020~1 030

二、流体的压缩性和膨胀性

当温度保持不变,流体所受的压力增大时,流体体积缩小的特性称为流体的压缩性。当压

力保持不变,流体的温度升高时,流体体积增大的特性称为流体的膨胀性。压缩性和膨胀性是所有流体的共同属性。

1. 压缩性

流体压缩性的大小用体积压缩系数 β 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

$$\beta = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_T \quad (1-4)$$

式中, β 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,流体体积减小,所以 dV 与 dp 始终是符号相反的,为保持 β 为正数,加了一个负号。

体积压缩系数 β 的倒数 $1/\beta$ 称为流体的体积模量,用 E 来表示,单位为 N/m^2 。 β 值越大, E 值越小,则流体压缩性越大。由实验得知,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 , $\beta=1/2000\approx 0$ 。因此,在工程实际中,常将液体当作不可压缩流体处理。只有在某些特殊情况下,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,一般只能当作可压缩流体对待。但在流速低于 $50\sim 70\text{m/s}$,其压力和温度变化不大时,体积或密度的变化可忽略不计,例如室内通风管系中的空气就可当作不可压缩流体处理。因此,不可压缩流体得出的规律不仅适用于液体流动,也适用于低速气体的流动。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 α 来度量。它表示当流体压力不变时,温度升高 1K 所引起的体积相对增加量,即

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_p \quad (1-5)$$

式中, α 为流体体积膨胀系数,单位为 K^{-1} ; 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 为流体温度的增加量,单位为 K 。

由实验得知,液体的体积膨胀系数非常小。例如 1atm 下的水,温度在 $0\sim 10^\circ\text{C}$ 范围内变化时,其体积膨胀系数 $\alpha=14\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$; 当温度在 $10\sim 20^\circ\text{C}$ 范围内变化时,其体积膨胀系数 $\alpha=150\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 。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中都可忽略不计。气体的体积膨胀系数较大,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。对于理想气体,其体积膨胀系数为 $1/T$ (T 为气体的热力学温度)。

三、流体的粘滞性

凡是流体都具有流动性,流动的实质是流体内部发生了切向变形。用一根棍棒搅动盆中的水,水在盆中沿一个方向作旋转流动,将棍棒取出,水的旋转速度将变慢直至停止。这说明在水的运动过程中,在水内部及水与盆壁间有阻滞水运动的因素。

流体在运动状态下具有的抵抗剪切变形的物理特性称为流体的粘滞性,它反映了流体抵抗剪切变形的能力。粘滞性的大小随流体的种类及所处的外界条件的变化而变化。例如,从瓶中倒水的速度比倒油的速度快;从瓶中往外倒油,夏天比冬天容易些。

1. 流体粘滞性实验

假定两块平行平板,其间充满液体,下板 A 静止不动,上板 B 以匀速度 ω_{g0} 向右移动,如

4 热工与流体力学基础

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 w_{g0} 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,如此各流层逐渐影响下去,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 w_g 运动,则相距 dy 处的上层液体以 $w_g + dw_g$ 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,且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力与流向相反。这种内摩擦力就是粘滞摩擦力,单位面积上的粘滞摩擦力称为粘滞切应力。粘滞内摩擦力和粘滞切应力分别用 T 和 τ 来表示。

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,与流体的物理性质有关,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

$$T = \mu A \frac{dw_g}{dy} \quad (1-6)$$

或用粘滞切应力表示为

$$\tau = \mu \frac{dw_g}{dy} \quad (1-7)$$

式中, T 为流体层接触面上的内摩擦力,单位为 N ; A 为流层间的接触面积,单位为 m^2 , dw_g/dy 为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 。

在流动的流体中,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,其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,流体就不再呈现粘滞性。但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的粘滞性才能表现出来。

必须强调的是,牛顿内摩擦力定律只适用于流体作层流运动的情况。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”,不符合的流体称为“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的不同,常用的粘度有以下几种。

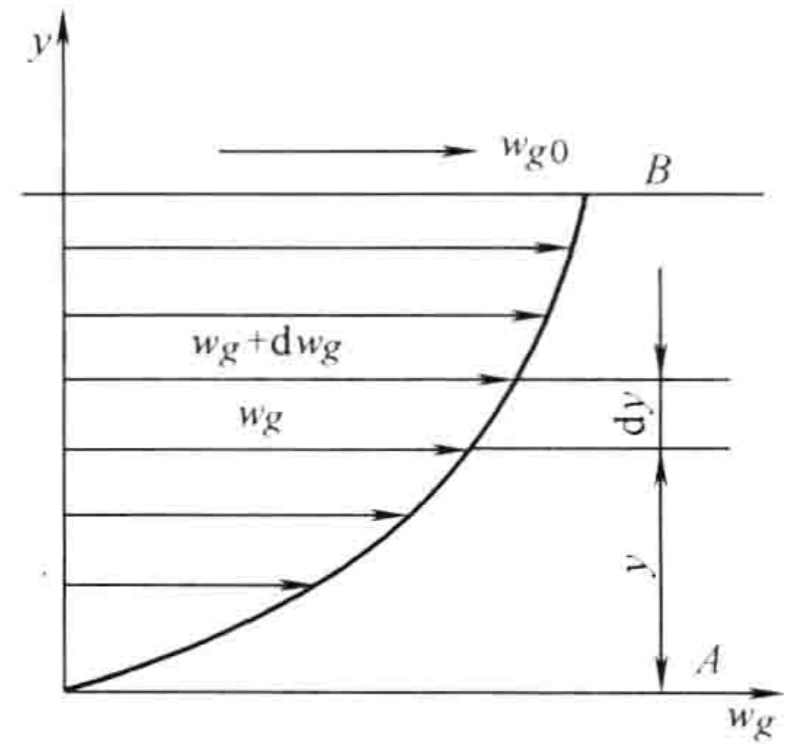


图 1-1 平行平板流体层流速度分布图

(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 $d\omega_r/dy$ 下,表征流体粘滞性的大小。由式(1-7)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 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 运动粘度 ν 即粘性运动系数,它是流体动力粘度 μ 与流体密度 ρ 的比值。其国际单位为 m^2/s 或 cm^2/s ,表达式为

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-8)$$

运动粘度不能像动力粘度一样可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。润滑油的牌号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 都很困难的,只能间接测量。对于液体,如液压系统中的液压油,实际上都是用粘度计来测量的。用各种粘度计测得的流体粘度统称为相对粘度。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,如美国用赛氏粘度(SSU),英国用雷氏粘度(Red),我国用恩氏粘度($^{\circ}\text{E}$)。

恩氏粘度是利用恩氏粘度计测定的,如图 1-2 所示。它由两个同心安装的黄铜容器 1 和 2 组成。中间容器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塞住。在两个容器 1 和 2 之间的空间内充水,并通过电热器保持一定的温度。

测量之前先关闭管嘴,再将 200cm^3 的待测液体注入中间容器内,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 4,则待测液体自管嘴 3 滴入量筒内。这时测出 200cm^3 待测液体在规定温度下流完所需的时间 t_1 ,然后以同样的办法测定 200cm^3 蒸馏水在 20°C 的恒温下流完所需的时间 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

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

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 $^{\circ}\text{E}_{20}$ 、 $^{\circ}\text{E}_{50}$ 、 $^{\circ}\text{E}_{100}$ 表示。

(4) 流体的粘温性 流体粘度随温度的变化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,因而切应力随之减小。而气体的分子间距较大,内聚力极微小。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。但润滑油的粘温性对压缩机、风机等转动机械轴承的润滑性能会有不利的影响,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,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

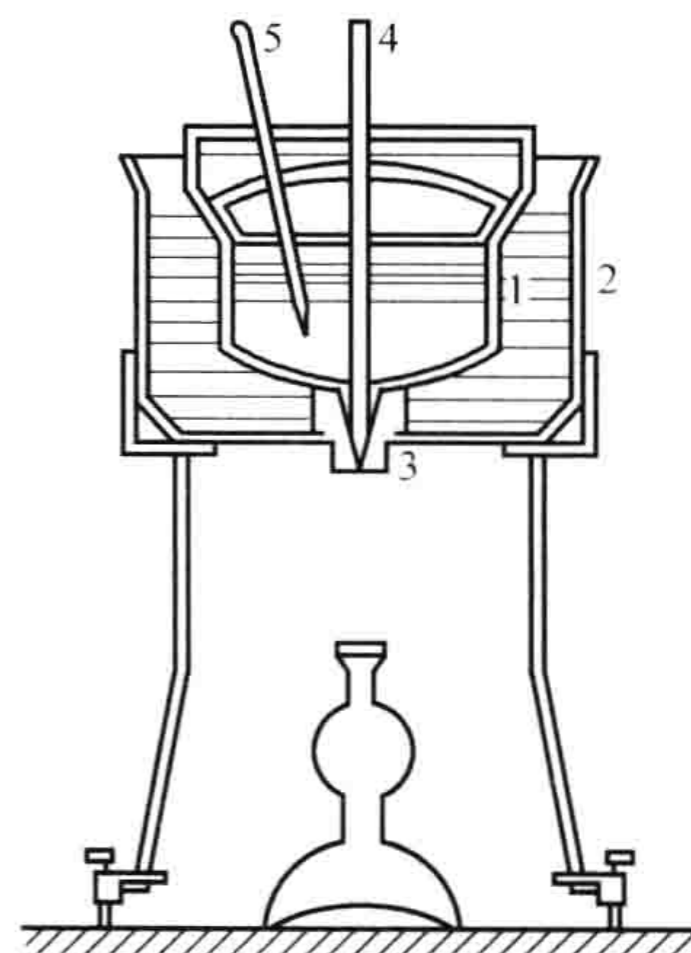


图 1-2 恩氏粘度计

1、2—黄铜容器 3—管嘴 4—针杆
5—温度计

持在 60℃ 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。

表 1-3 正常压力下水的运动粘度与温度的关系

温度/℃	运动粘度 ν /(cm ² /s)	温度/℃	运动粘度 ν /(cm ² /s)	温度/℃	运动粘度 ν /(cm ² /s)
0	0.017 9	15	0.011 4	65	0.004 36
2	0.016 7	20	0.010 0	70	0.004 06
3	0.016 2	25	0.008 94	75	0.003 80
4	0.015 7	30	0.008 01	80	0.003 57
5	0.015 2	35	0.007 23	85	0.003 36
6	0.014 7	40	0.006 60	90	0.003 16
7	0.014 3	45	0.005 99	95	0.002 99
8	0.013 9	50	0.005 49	100	0.002 85
9	0.013 5	55	0.005 06		
10	0.013 1	60	0.004 69		

压力对流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,液体粘度随压力的变化一般成线性关系。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,应当计算其粘度随压力的变化。当液压油压力在 10MPa 以下时,其粘度变化可忽略不计。

(5)理想流体 自然界中存在的流体都具有粘滞性,统称为粘性流体或实际流体。不具有粘滞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,流体的粘滞性表现不出来,在这种情况下完全可将粘性流体当作理想流体来对待;②在许多场合,求解粘性流体的精确解是很困难的,对于某些粘滞性不起主要作用的问题,可以先不计粘滞性的影响,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 $d=5\text{cm}$,管中速度分布方程式为 $w_g=0.5-800y^2$,已知靠近管壁处的粘滞切应力 $\tau=43.512\text{N/m}^2$,试求该油种的动力粘度(y 为管子轴心至管壁的距离,以 m 计)。

解:以管子中心轴为横坐标表示流速 w_g ,以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“ w_g-y ”曲线,如图 1-3 所示。

管壁处的速度梯度为

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

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由式(1-7)得

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

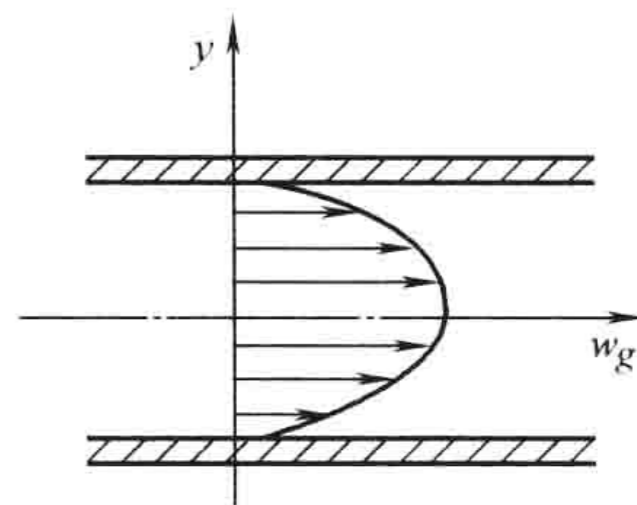


图 1-3 例 1-1 图

【例 1-2】 图 1-4 所示为某轴和滑动轴承组成的运动副,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(润滑油的动力粘度 $\mu=0.245\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

解:轴表面的圆周速度为

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

因油层很薄,故可以取

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

则内摩擦力为

$$T = \mu A \frac{\omega_g}{\delta} = 0.245 \times 3.14 \times 0.15 \times 0.25 \times 1415 \text{N} = 40.76 \text{N}$$

滑动轴承所消耗的功率为

$$N = M\omega = T \times \frac{D}{2} \times \frac{2\pi n}{60} = 40.76 \times \frac{0.15}{2} \times \frac{2\pi \times 180}{60} \text{W} = 57.59 \text{W}$$

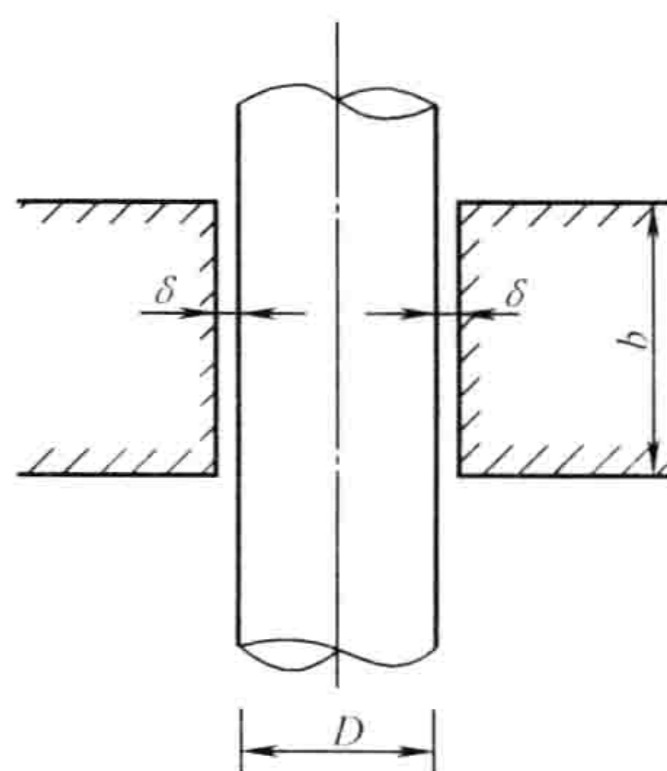


图 1-4 例 1-2 图

四、液体的表面张力

1. 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,这种仅存在于液体自由表面上的拉力称为表面张力。

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;对于不能润湿固体壁面的液体,接触角为钝角。例如,水与玻璃的接触角 $\theta=8^\circ\sim 9^\circ$,水银与玻璃的接触角 $\theta=139^\circ$ 。

2. 毛细现象

将毛细管插入液体内,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 所示为毛细玻璃管插入水和水银中的毛细现象。液面高度差主要取决于流体的性质和毛细管的直径。

对于 20°C 的水,毛细玻璃管中水面高出容器内水面的高度约为 $h=29.8/d$;对于水银,毛细玻璃管中水银面低于容器内水银面的高度差约为 $h=10.15/d$ 。这里 d 为毛细玻璃管的内径。

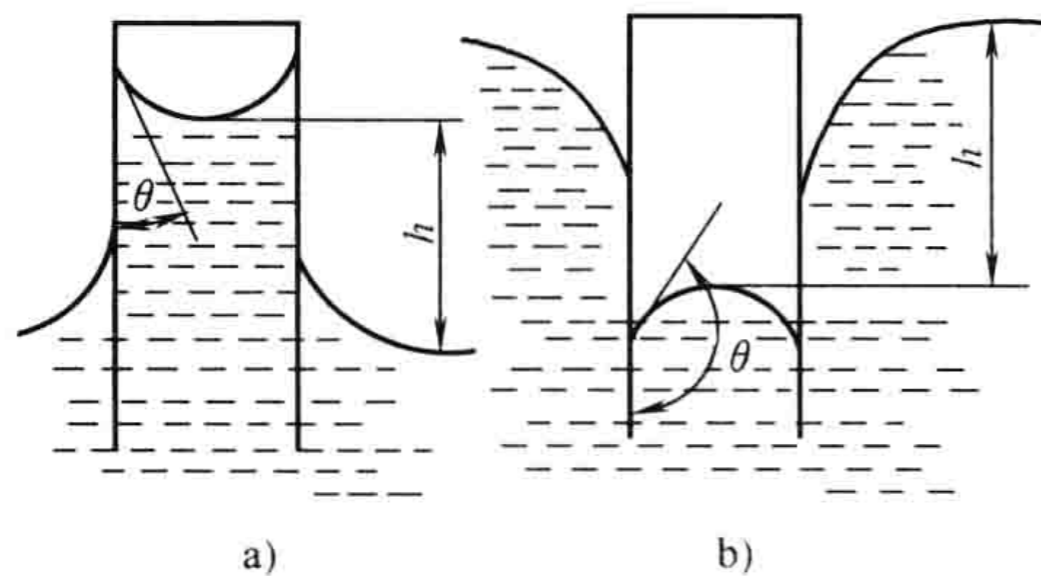


图 1-5 液体与固体壁面的接触情况

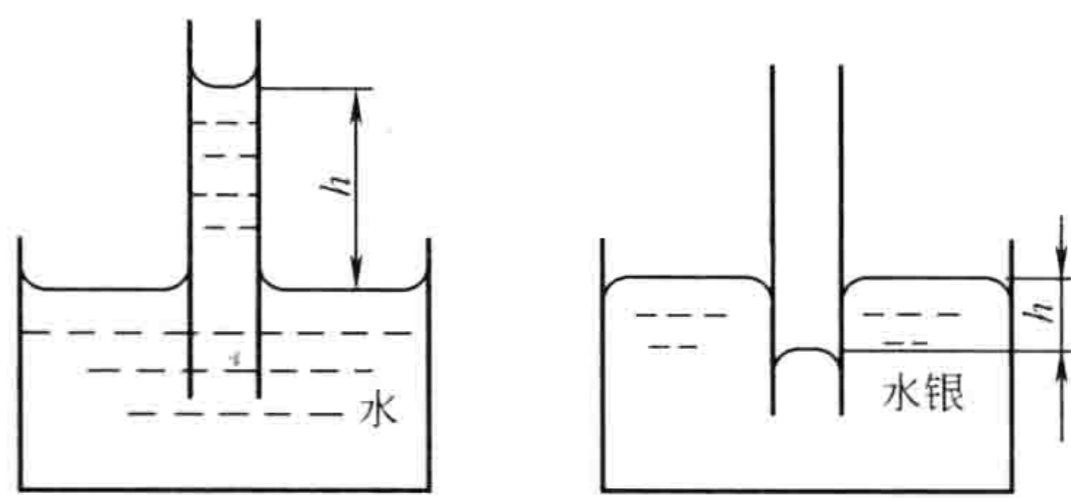


图 1-6 毛细现象

五、液体的含气量和空气分离压

1. 含气量

液体中所含空气的体积百分数称为含气量。油液中的空气有混入和溶入两种。混入的气体呈气泡状悬浮于油液中,它对油液的体积模量和粘滞性均产生影响,尤其对体积模量的影响极大;而溶入气体对油液的体积模量和粘滞性影响极小。

油中混入的空气量决定于油液的性质及其与空气接触和搅动的情况;而油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。

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_c 时,过饱和空气将从油液中析出而产生气泡,这个压力 p_c 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、空气溶解量和混入量有关。通常是油温高、空气溶解量或混入量越大,则空气分离压越高。

第二节 作用在流体上的力

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;然后再以边界为研究对象,通过作用力与反作用力原理,得出流体对边界的作用力。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。按其作用的特点不同,可分为表面力和质量力两大类。

一、表面力

表面力是指作用在流体表面上的力,其大小与作用面表面积成正比。例如,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。表面力还可按其对被作用面的方向不同,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。

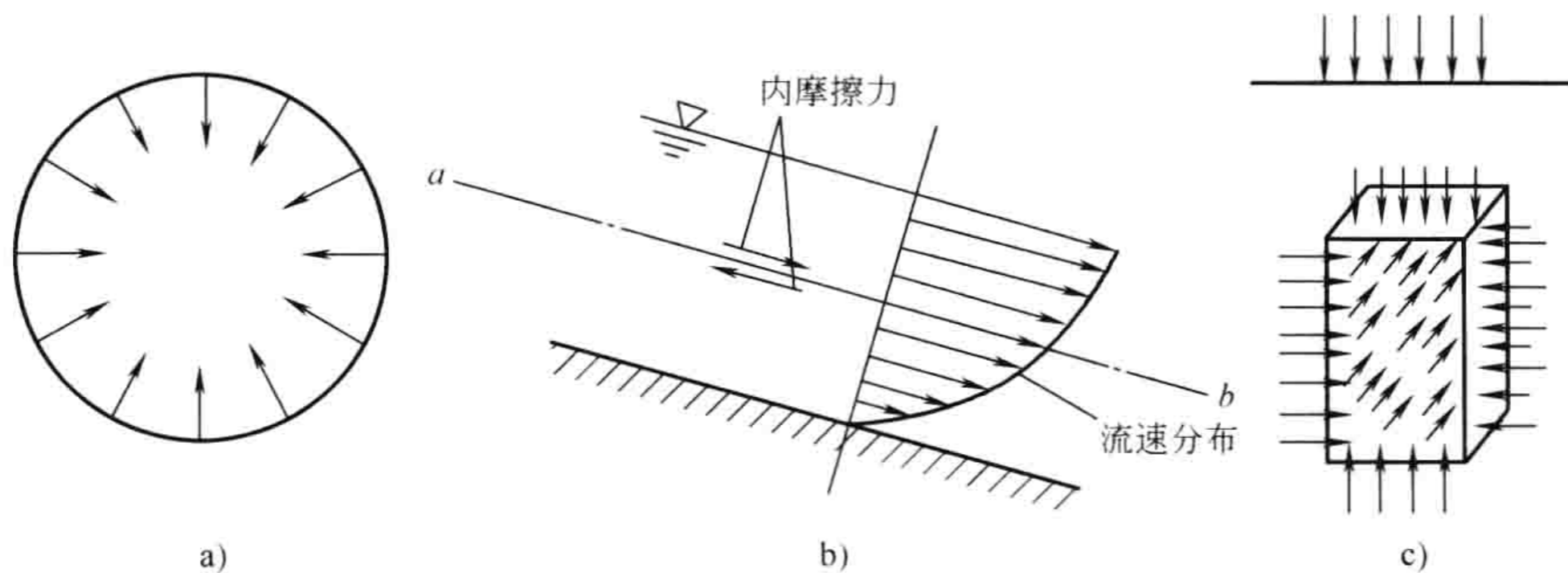


图 1-7 作用在流体上的表面力

二、质量力

质量力是指作用在流体体积内所有流体质点上的力,其大小与流体的质量成正比。就匀

质流体来说,质量与体积成正比,所以质量力又称为体积力。常见的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用后作变速运动时,由于惯性而在流体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比例,故一般采用单位质量力的方法表示,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 3 个坐标轴上的分量为 F_x 、 F_y 、 F_z ,则沿 3 个坐标轴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 。

【案例分析与知识拓展】

案例 1:毛细现象

在自然界和日常生活中有许多毛细现象的例子。植物茎内的导管就是植物体内的极细的毛细管,它能把土壤里的水分吸上来。砖块吸水、毛巾吸汗、粉笔吸墨水都是常见的毛细现象,在这些物体中有许多细小的孔道,起着毛细管的作用。在构筑冷库等地面或地下建筑物时,在夯实地基中毛细管又多又细,它们会把土壤中的水分引上来,使得室内潮湿。因此,构筑冷库建筑物时,常在地基上面敷设油毡作为防湿层,就是为了防止毛细现象造成的潮湿。水沿毛细管上升的现象,对农业生产的影响也很大。土壤里有很多毛细管,地下的水分经常沿着这些毛细管上升到地面上来;若要保存地下的水分,就应当锄松地面的土壤,破坏土壤表层的毛细管,以减少水分的蒸发。

液体在毛细管内之所以能上升或下降,是因为在表面张力作用下的液体表面类似张紧的橡胶膜,如果液面是弯曲的,它就有变平的趋势。凹液面对下面的液体施以拉力,凸液面对下面的液体施以压力。能润湿壁面的液体在毛细管中的液面是凹形的,它对下面的液体施加拉力,使液体沿着管壁上升;当向上的拉力与管内液柱所受的重力相等时,管内的液体停止上升,达到平衡。同样的分析也可以解释不能润湿壁面的液体在毛细管内下降的现象。

案例 2:滑动轴承的动压润滑原理

在高速旋转运动的机械上广泛使用的滑动轴承的润滑减摩性能与润滑油的粘度大小密切相关。静止状态下,轴颈与轴瓦的内孔是偏心安装的,使轴颈的外表面与轴瓦内孔间形成了上大下小的楔形空间,此空间内充满了具有一定压力的润滑油,如图 1-8 所示。在轴开始作旋转运动时,由于润滑油具有一定的粘度,高速旋转着的轴将润滑油不断地从轴的一侧经轴的上方沿旋转方向带到轴的另一侧,轴在外载荷和润滑油的共同作用下,其轴心将沿某一方向偏移一个距离,在轴和轴承工作面之间形成一个由大到小的间隙,通常称为油楔。旋转的轴使油不断地从间隙的大端挤入小端,从而产生使轴抬升的压力与外载荷相平衡,轴颈和轴承的工作表面被一层油膜隔开,即实现液体动压润滑。

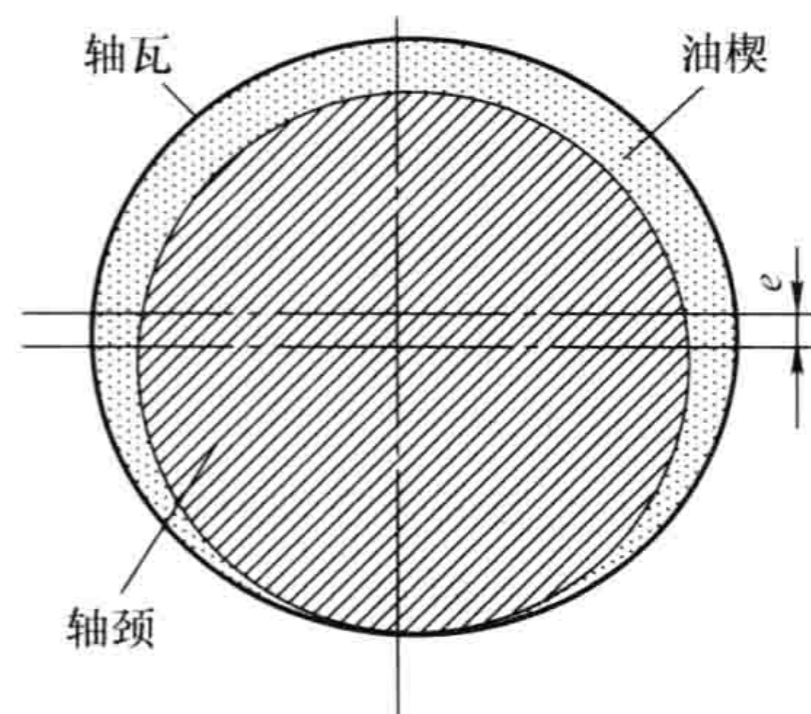


图 1-8 滑动轴承动压润滑原理图