

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



LIUTI LIXUE
BENG YU FENGJI

流体力学 泵与风机

(第二版)

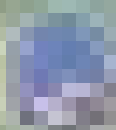
邢国清 主编
张清 副主编



中国电力出版社

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

中国工程教育认证协会 工程教育认证标志

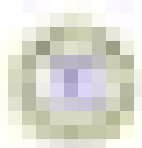


中国工程教育认证协会
工程教育认证标志

流体力学 泵与风机

（第二版）

程 焱 主编
程 焱 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



LIUTI LIXUE
BENG YU FENGJI

流体力学 泵与风机

(第二版)

主 编 邢国清
副主编 张 清
编 写 杨 濯
主 审 郑年丰



中国电力出版社

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

Fluid Mechanics Pumps and Fans

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材（高职高专教育），在编写过程中注重以实用为目的，以必须、够用为度，以掌握概念、强化应用为原则，尽量删繁就简、理论联系实际，加强实践与应用型知识内容。全书分两篇。第一篇流体力学：是以一元流动为全书的核心，对一元气体动力学和多元流体动力学作为学生拓宽理论基础，仅作简要的基本概念介绍，略去大量的数理论证。第二篇泵与风机：主要阐述泵与风机的基本原理、构造和性能参数，泵与风机的运行、调节及选择。

本书主要作为高职高专供热通风与空调工程、城市燃气工程技术、给排水工程技术、热能与动力工程专业及其相关专业的教材，也可作为函授和自考辅导教材或供相关专业人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学泵与风机/邢国清主编. —2 版. —北京:
中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5083-8441-2

I. 流… II. 邢… 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. 035 TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 009759 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 7 月第一版

2009 年 2 月第二版 2009 年 2 月北京第五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 371 千字

定价 24.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

本书是在总结高等职业技术教育经验的基础上,结合我国高等职业技术教育的特点,在保持原版编写风格基础上编写的。该书适用于供热通风与空调工程、燃气工程、给排水工程、建筑设备等专业的教学使用。

本书内容的编写,注重理论与实际工程的结合,力求做到以“应用”为主旨,在理论上坚持“必须、够用”的原则,注重基本理论、基本概念和基本方法的阐述,深入浅出、图文结合,使其更具有针对性和实用性。

本书由山东城市建设职业学院邢国清主编,山东建筑大学教授郑年丰主审。参加编写工作的有山东城市建设职业学院邢国清(第一、第二、第三、第四、第五、第六章)、江苏广播电视大学杨濯(第七、第八章)、江西建设职业技术学院张清(第九、第十、第十一章)。

由于编者水平所限,书中的缺点、错误难免,恳请使用本教材的广大读者批评指正。

编 者

2009.1

第一版前言

本书是“高职高专十五规划教材”系列教材之一,根据五年制供暖通风与空调工程专业《流体力学 泵与风机》教学大纲编写,为供暖通风与空调工程专业《流体力学 泵与风机》课程使用教材。

本书内容注重以实用为目的,以必须、够用为度,以掌握概念、强化应用为原则,尽量删繁就简。注重以实用选材,理论联系实际,加强实践与应用型知识内容。

本书包括两篇。第一篇流体力学:以一元流动为全书的核心,一元气体动力学和多元流体动力学作为理论基础,仅作简要的基本概念介绍,略去了大量的数理论证;第二篇泵与风机:主要阐述了泵与风机的基本原理、构造和性能参数,以及泵与风机的运行、调节和选择。

本书中带有“*”号的章节为选修部分。

本书第一、二、三、四、五、六章由山东省城市建设学校邢国清编写,第七、八章由江苏省广播电视大学杨濯编写,第九、十、十一章由江西建筑工程学校张清编写。全书由邢国清主编,并负责全书的统稿工作;由山东建筑学院郑年丰教授担任主审。

限于编者水平,书中如有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

2004年3月

目 录

前言
第一版前言

第一篇 流 体 力 学

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 流体的主要力学性质	2
第三节 作用在流体上的力	10
第四节 流体的力学模型	12
思考题	12
习题	13
第二章 流体静力学	14
第一节 流体静压强及其特性	14
第二节 流体静压强的分布规律	16
第三节 压强的计算基准和计量单位	19
第四节 测压管高度和测压管水头	22
第五节 液体静压强的测量	24
第六节 作用于平面上的液体总压力	26
第七节 作用于曲面上的液体总压力*	32
第八节 液体的相对平衡*	36
思考题	39
习题	40
第三章 不可压缩一元流体动力学	45
第一节 描述流体运动的两种方法	45
第二节 流体运动的基本概念	46
第三节 恒定流连续性方程	49
第四节 流体动压强及其分布规律	52
第五节 恒定流能量方程	54
第六节 能量方程的应用	59
第七节 总水头线和测压管水头线	64
第八节 恒定气流的能量方程	67
第九节 不可压缩流体恒定总流动量方程*	70
思考题	73

习题	74
第四章 流动阻力和能量损失	78
第一节 流动阻力和能量损失	78
第二节 流体流动的两态	80
第三节 均匀流基本方程	84
第四节 沿程水头损失的计算公式	85
第五节 沿程阻力系数 λ 的确定	90
第六节 非圆管沿程损失的计算	96
第七节 局部水头损失的计算	99
思考题	105
习题	106
第五章 管路计算	109
第一节 概述	109
第二节 简单管路的水力计算	109
第三节 复杂管路的水力计算	118
第四节 有压管路中的水击	123
思考题	127
习题	127
第六章 附面层与绕流阻力	130
第一节 绕流运动与附面层基本概念	130
第二节 曲面附面层分离现象与卡门涡街	131
第三节 绕流阻力和升力	133
第四节 悬浮速度	137
思考题	139
习题	139
第七章 孔口、管嘴出流和气体射流	141
第一节 孔口出流	141
第二节 管嘴出流	148
第三节 无限空间淹没紊流射流的特征	152
第四节 圆断面射流的运动分析	157
第五节 平面射流	160
第六节 温差或浓差射流及射流弯曲	161
第七节 有限空间射流简介*	165
思考题	168
习题	168
第八章 一元气体动力学基础*	172
第一节 理想可压缩气体一元恒定流动的运动方程	172
第二节 声速、滞止参数、马赫数	175

第三节 可压缩气体一元恒定流动的连续性方程	179
思考题	181
习题	182

第二篇 泵 与 风 机

第九章 离心式泵与风机的构造与理论基础	183
第一节 离心式泵与风机的分类、基本构造及工作原理	183
第二节 离心式泵与风机的性能参数	189
第三节 离心式泵与风机的基本方程	190
第四节 离心式泵与风机的理论性能曲线	193
第五节 离心式泵与风机的实际性能曲线	194
第六节 力学相似原理	198
第七节 相似律与比转数	199
思考题	202
习题	203
第十章 离心式泵与风机的运行与调节	204
第一节 离心式泵管路附件与扬程计算	204
第二节 离心式泵的汽蚀与安装高度	205
第三节 管路性能曲线和工作点	208
第四节 泵或风机的联合运行	210
第五节 离心式泵与风机的工况调节	212
第六节 离心式泵或风机选择	215
思考题	225
习题	226
第十一章 其他常用泵与风机*	227
第一节 轴流式泵与风机	227
第二节 管道泵	230
第三节 真空泵与射流泵	231
第四节 往复泵	233
第五节 贯流式风机	234
参考文献	236

第一篇 流 体 力 学

第一章 绪 论

第一节 概 述

一、流体力学的研究对象和任务

流体力学的研究对象是流体。流体包括液体和气体。

流体力学的任务是研究流体静止和运动时的宏观力学规律，并运用这些规律解决工程技术中的问题。它是力学学科的一个组成部分。

流体力学由两个基本部分组成：一是研究流体静止规律的流体静力学；二是研究流体运动规律的流体动力学。

二、流体力学的应用

流体力学在暖通与空调和燃气工程中得到广泛的应用，是一门重要的专业基础课程。在供热、空气调节、燃气输配、通风除尘等工程中都是以流体作为工作介质、通过流体的各种物理作用对流体的流动有效地加以组织来实现的。因此，学好流体力学，才能对专业中的流体力学现象做出科学的定性分析及精确的定量计算；才能正确地解决工程中所遇到的流体力学方面的设计和计算问题。

学习流体力学，要注意基本理论、基本概念、基本方法的理解和掌握，要学会理论联系实际地解决工程中的各种流体力学问题。

三、单位

本书采用国际单位制，基本单位是：长度用米(m)；时间用秒(s)；质量用千克(kg)；力为导出单位，采用牛顿(N)。1牛顿(N)=1千克·米/秒²(kg·m/s²)。

由于我国长期使用工程单位，实际工作遇到的某些量仍然用工程单位表示，学习应用时注意两种单位的换算。换算的基本关系为1kgf=9.807N。

常用的国际单位与工程单位的换算关系见表1-1。

表 1-1 常用的国际单位与工程单位的换算关系

量的名称	工程单位		国际单位		换算关系
	名称	符号	名称	符号	
长度	米	m	米	m	
时间	秒	s	秒	s	
质量	公斤力二次方秒每米	kgf·s ² /m	千克	kg	1kgf·s ² /m=9.807kg

续表

量的名称	工程单位		国际单位		换算关系
	名称	符号	名称	符号	
力、重量	公斤力	kgf	牛顿	N	1kgf=9.807N
压力、压强	公斤力每平方米	kgf/m ²	帕斯卡	Pa	1kgf/m ² =9.807Pa
	工程大气压	at	帕斯卡	Pa	1at=9.807×10 ⁴ Pa
	巴	bar	帕斯卡	Pa	1bar=100kPa
	毫米水柱	mmH ₂ O	帕斯卡	Pa	1mmH ₂ O=9.807Pa
	毫米汞柱	mmHg	帕斯卡	Pa	1mmHg=133.32Pa
能量、功	公斤力米	kgf·m	焦耳	J	1kgf·m=9.807J
功率	公斤力米每秒	kgf·m/s	瓦特	W	1kgf·m/s=9.807W
	马力		瓦特	W	1马力=735.45W
动力黏度	泊	P	帕斯卡秒	Pa·s	1P=0.1Pa·s
运动黏度	二次方米每秒	m ² /s	斯托克斯	m ² /s St	1St=10 ⁻⁴ m ² /s

第二节 流体的主要力学性质

为了研究流体的静止和运动规律，首先必须了解流体本身所固有的特征和主要的力学性质。

一、流体的基本特征

流体区别于固体的基本特征是流体具有流动性。这个特性是由于流体静止时不能承受切力作用的力学性质决定的。

液体与固体不同，其分子间的距离较大，引力较小，没有固定的形状，几乎不能承受拉力来抵抗拉伸变形；静止时也不能承受切力来抵抗剪切变形。只要施加微小的切力即可破坏其静止状态而发生流动。

气体分子间的距离更大，引力更小，易于压缩和扩散。而液体则不易压缩，也不易扩散。

流动性使流体的运动具有以下特点：

第一，流体的形状是由约束它的边界形状决定的，不同的边界必将产生不同的流动。因此，流体流动的边界条件是对流体的运动有重要影响的外因。

第二，流体的运动和流体的变形联系在一起。当流体运动时，其内部各质点之间有着复杂的相对运动，所以流体的变形又与其力学性质密切相关。因此，流体的力学性质是对流体运动有直接影响的内因。具有不同力学性质的流体，即使其边界条件相同也会产生不同的运动。

因此，流体的流动是由流体本身的力学性质（内因）和流动所在的外界条件（外因）这两个因素决定的。流体力学所要探讨的流体静止和运动的规律，实际上就是要研究流体的力学性质和流动的边界条件对流体所产生的作用和影响。

二、流体的主要力学性质

流体的主要力学性质有：惯性和重力特性、黏滞性、压缩性和热胀性、表面张力和毛细管现象等。

(一) 惯性和重力特性

1. 惯性

惯性是物体维持原有静止或运动状态的能力。表征物体惯性大小的是质量，质量愈大惯性就愈大。

质量常以密度表示。单位体积流体所具有的质量称为密度，用 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。任意点上密度相同的流体，称为均质流体。

均质流体密度可表示为

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

式中 m ——流体的质量， kg ；

V ——该质量流体的体积， m^3 。

各点密度不完全相同的流体称为非均质流体。非均质流体中某点的密度用极限表示为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-2)$$

式中 Δm ——微小体积 ΔV 内的流体质量， kg ；

ΔV ——包含该点在内的流体体积， m^3 。

2. 重力特性

流体受地球引力作用的特性，称为重力特性。流体的重力特性用容重表示。对于均质流体，作用于单位体积流体的重力称为容重，用 γ 表示，单位为 N/m^3 。

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

式中 G ——体积为 V 的流体所受的重力， N ；

V ——重力为 G 的流体体积， m^3 。

对于非均质流体，任意一点的容重为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (1-4)$$

式中 ΔG ——微小体积 ΔV 的流体重力， N ；

ΔV ——包含该点在内的流体体积， m^3 。

重力（或称重量）是质量和重力加速度 g 的乘积，即

$$G = mg \quad (1-5)$$

两端同除以体积 V ，则得容重和密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-6)$$

这个关系对均质和非均质流体都适用。

常见流体的密度及容重见表 1-2。

表 1-2

常见流体的密度及容重

流体名称		密度 (kg/m^3)	容重 (N/m^3)	测定条件	
				温度 ($^{\circ}\text{C}$)	气压
液体	煤油	800~850	7848~8338	15	760mmHg
	纯乙醇	790	7745	15	
	水	1000	9807	4	
	水银	13 590	133 318	0	
气体	氮	1.250 5	12.267 4	0	760mmHg
	氧	1.429 0	14.018 5		
	空气	1.292 0	12.682 4		
	一氧化碳	1.976 8	19.392 4		

(二) 黏滯性

流体内部质点或流层间，如有相对运动则产生内摩擦力以抵抗相对运动的性质，称为黏滯性。此内摩擦力称为黏滯力。在流体力学研究中，流体的黏滯性十分重要。

1. 流体黏滯性分析

图 1-1 为流体在圆管中流动时的管内流速分布图（以液体为例）。

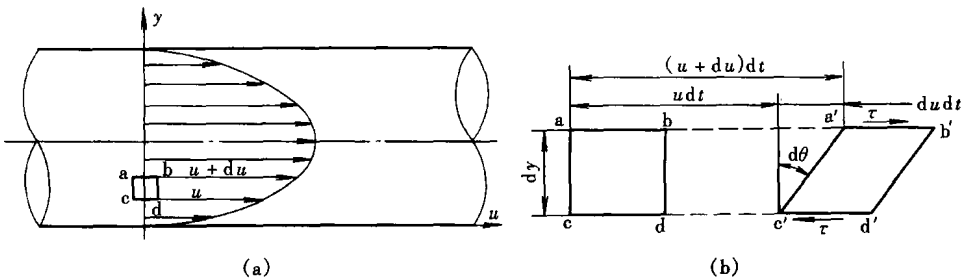


图 1-1 管内流速分布

易流动是流体的一个重要特征。不同流体流动的难易程度不同，其原因是：在不同流动内部抗拒因流动而发生的切向变形的程度各不相同（见图 1-1 中 $abcd$ 变至 $a'b'c'd'$ ）。而液体的黏滯性就是抗拒切向变形的一种力学性质。例如水比石油易于流动，这说明水比石油抗拒切向变形的能力小，因此其黏滯性亦小。黏滯性是运动流体产生流动阻力的内因，这种阻力是因质点的相对运动而产生的一种切力，亦称内摩擦力。

当流体在管道内流动时，紧贴管壁的极薄一层流体，因附着在壁面上不动，其流速为零；该流层又通过黏滯作用，使紧邻该流层的流体流动受到牵制；如此逐层牵制，距壁面愈远，牵制力愈弱，流速愈大。结果在过流断面上形成了如图 1-1 所示的流速分布不均匀状态，管壁处流速为零，而管轴处流速最大。这证明固体边壁是通过黏滯性对液流起阻滞作用的，它是运动流体产生流动阻力的外因。在静止流体中各层没有相对运动，因此就不存在使其变形的切力，只有流体在流动时才产生切力，亦即黏滯力。

2. 流体的切应力及黏滯系数

在图 1-1 中任意流层上取厚度为 dy 的一个流层 $abcd$ ， ab 面上部邻层流体因为速度快，对该面施加了沿流向的拉力； cd 面下部邻层流体因为速度慢，对该面施加了向后的拖力，

这样就形成了一对切力（内摩擦力） T 。

设与流层 $abcd$ 相邻的两个流层的速度差为 du 。由试验证明：内摩擦力 T 的大小与流体的性质有关，与流层的接触面积 A 成正比，与相邻流层的速度差 du 成正比，与流层间的距离 dy 成反比。其表达式为

$$T = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

单位接触面积上的内摩擦力称为切应力，可表示为

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

式中： τ 为流体的切应力， N/m^2 ，简称 Pa（帕）。该式称为牛顿内摩擦定律。

切应力 τ 不仅有大小，还有方向。现以图 1-1 中流层 $abcd$ 变形后的 $a'b'c'd'$ 来说明 τ 的方向的确定：上表面 $a'b'$ 上的切应力是由运动较快的流层产生的，其方向与 u 的方向相同；下表面 $c'd'$ 上的切应力是由运动较慢的流层产生的，因而其方向与 u 的方向相反。流体运动时，切应力总是成对出现的，它们大小相等、方向相反。需要指出的是：流体内产生的切应力是阻碍流体相对运动的，但它不能从根本上制止流动的发生，因此流体才具有流动性。流体静止时， $\frac{du}{dy}=0$ ，也就不产生切应力，但流体仍有黏滞性。

$\frac{du}{dy}$ 为速度梯度。表示沿垂直到流动方向的相邻流层的流速变化率，单位是 s^{-1} 。为了理解速度梯度的意义，我们在图 1-1 (a) 中垂直于速度方向上的 y 轴，任取一边长为 dy 的小正方体 $abcd$ 。为清楚起见，将它放大成图 1-1 (b)。由于小正方体下表面的速度 u 小于上表面速度 $(u+du)$ ，经过 dt 实践后，下表面移动的距离 udt 小于上表面移动的距离 $(u+du) dt$ ，因而小方块 $abcd$ 变形为 $a'b'c'd'$ 。即 ac 及 bd 在 dt 时间内发生了角变形 $d\theta$ 。由于 dt 很小， $d\theta$ 也很小，则

$$d\theta = \tan(d\theta) = \frac{du \cdot dt}{dy}$$

$$\text{故} \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

可见，速度梯度就是直角变形速度。这个直角变形速度是在切应力的作用下发生的，所以也称剪切变形速度。

μ 是与流体物理性能有关的比例系数，称动力黏度，亦称动力黏滞系数。单位为 $N/(m^2 \cdot s)$ ，也可表示为 $Pa \cdot s$ 。它是衡量流体黏滞性大小的量， μ 值越大，流体的黏滞性越强。

在流体力学中常用动力黏度 μ 与密度 ρ 的比值来衡量流体黏滞性的大小，用符号 ν 表示

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-10)$$

ν 的单位为 m^2/s ，还常用 cm^2/s ，称斯托克斯，简写 St。由于单位中只有运动学要素，故称为运动黏度，亦称为运动黏滞系数。

表 1-3 列出了水和空气在一个大气压、不同温度下的黏度。

表 1-3 水和空气 (一个大气压下) 的黏度

温度 (°C)	水		空气		温度 (°C)	水		空气	
	$\mu \times 10^{-3}$ (Pa·s)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)	$\mu \times 10^{-3}$ (Pa·s)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)		$\mu \times 10^{-3}$ (Pa·s)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)	$\mu \times 10^{-3}$ (Pa·s)	$\nu \times 10^{-6}$ (m ² /s)
0	1.792	1.792	0.0172	13.7	70	0.406	0.415	0.0204	20.5
5	1.519	1.519			80	0.357	0.367	0.0210	21.7
10	1.308	1.308	0.0178	14.7	90	0.317	0.328	0.0216	22.9
15	1.140	1.140			100	0.248	0.296	0.0218	23.6
20	1.005	1.007	0.0183	15.7	120			0.0228	26.2
25	0.894	0.897			140			0.0236	28.5
30	0.801	0.804	0.0187	16.6	160			0.0242	30.6
35	0.723	0.727			180			0.0251	33.2
40	0.656	0.661	0.0192	17.6	200			0.0259	35.8
45	0.599	0.605			250			0.0280	42.8
50	0.549	0.556	0.0196	18.6	300			0.0298	49.9
60	0.469	0.477	0.0201	19.6					

从表 1-3 中可以看出：不同种类的流体其黏度不同，水和空气的黏度随温度变化的规律是不同的，水的黏度随温度升高而减小，空气的黏度随温度的升高而增大。这是因为流体的黏滞性是分子间的吸引力和分子不规则的热运动产生动量交换的结果。温度升高，分子间吸引力降低，动量增大；反之，温度降低，分子间吸引力增大，动量减小。对于液体，分子间的吸引力是决定性的因素，所以液体的黏度随温度升高而减小；对于气体，分子间的热运动产生动量交换是决定性的因素，所以气体的黏度随温度升高而增大。

最后需指出：牛顿内摩擦定律只适用于一般流体，它对某些特殊流体是不适用的。为此，将满足牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，如水、油和空气等；而将特殊流体称为非牛顿流体，如血浆、泥浆、污水、油漆等。本课程仅涉及牛顿流体力学问题。

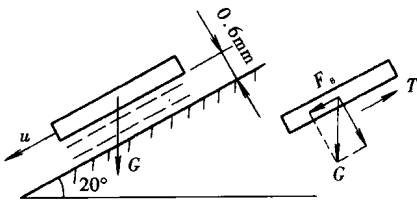


图 1-2 例 1-1 附图

【例 1-1】 有一底面为 60cm×40cm 的木板，质量为 5kg，沿一与水平面成 20° 角的斜面下滑（见图 1-2）。木板与斜面间的油层厚度为 0.6mm。如以等速 0.84m/s 下滑时，求油层的动力黏度 μ 。

解 木板沿斜面等速下滑，作用在木板上的重力 G 在平行于斜面方向的分力为 F_s ， F_s 应与油层间因相对运动产生的黏滞力 T 平衡

$$T = F_s = G \sin 20^\circ = 5 \times 9.81 \times 0.342 = 16.78 \text{ N}$$

根据牛顿内摩擦定律

$$T = \mu A \frac{du}{dy}$$

油层厚度很薄，可以认为木板与斜面间速度按直线分布

$$\frac{du}{dy} = \frac{0.84 - 0}{0.0006} = 1400 \text{ s}^{-1}$$

因此

$$\mu = T / \left(A \frac{du}{dy} \right) = \frac{16.78}{0.6 \times 0.4 \times 1400} = 0.05 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

(三) 压缩性和热胀性

在温度不变条件下, 流体受压, 体积减小, 密度增大的性质, 称为流体的压缩性。

在一定的压力下, 流体受热, 体积增大, 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

(1) 液体的压缩性。液体的压缩性通常以压缩系数 β 表示, 它表示压强每增加 1 帕 (N/m^2) 时, 液体体积或密度的相对变化率。用公式表示为

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-11)$$

或

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta p} \quad (1-12)$$

式中 β ——压缩系数, m^2/N ;

V ——液体原体积, m^3 ;

ΔV ——液体体积变化量, m^3 ;

Δp ——作用在液体上的压强增量, Pa;

ρ ——液体原密度, kg/m^3 ;

$\Delta \rho$ ——液体密度变化量, kg/m^3 。

β 值愈大, 则液体的压缩性愈大。

压缩系数的倒数为液体的弹性模量, 用 E 表示, 单位为 N/m^2 。即

$$E = \frac{1}{\beta} = \rho \frac{\Delta p}{\Delta \rho} = -\frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (1-13)$$

表 1-4 列举了水在温度为 0°C 时, 不同压强下的压缩系数。

表 1-4 水的压缩系数

压强 (Pa)	49.35	98.7	197.4	394.8	789.6
β (m^2/N)	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

从表 1-4 中可看出: 水在常温下的压缩系数值很小。所以在工程中, 除特殊情况 (如有压管路中的水击现象) 外, 水的压缩性可以忽略不计。这一结论也适应于其他液体。通常把忽略了压缩性的液体, 称为不可压缩液体。

(2) 液体的热胀性。液体的热胀性, 一般用热胀系数 α 表示, 它表示温度每增加 1°C (K) 时, 液体体积或密度的相对变化率, 用公式表示为

$$\alpha = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (1-14)$$

或

$$\alpha = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \quad (1-15)$$

式中: ΔT 为温度变化量, K; α 值愈大, 则液体的热胀性也愈大。 α 的单位为 $1/\text{K}$ 。

表 1-5 列举了水在一个大气压下，不同温度时的容重和密度。

表 1-5 水在一个大气压下，不同温度时的容重和密度

温度 (°C)	容重 (kN/m ³)	密度 (kg/m ³)	温度 (°C)	容重 (kN/m ³)	密度 (kg/m ³)
0	9.808 7	999.87	30	9.767 5	995.67
2	9.809 7	999.97	40	9.733 8	992.24
4	9.810 0	1000.00	50	9.693 0	988.07
6	9.809 1	999.97	60	9.645 6	983.24
8	9.808 8	999.88	70	9.592 3	977.81
10	9.807 3	999.73	80	9.533 6	971.83
15	9.807 2	999.10	90	9.469 9	965.34
20	9.792 6	998.23	100	9.401 7	958.38

从表 1-5 中可看出：在温度较低时（10~20°C），温度每增加 1°C，水的密度减小约为万分之一点五；在温度较高时（90~100°C），水的密度减小也只有万分之七。这说明水的热胀性也是很小的，一般情况下可忽略不计。只有在某些特殊情况下，例如热水采暖时，才须考虑水的热胀性。这一结论同样适用于其它液体。

2. 气体的压缩性和热胀性

气体与液体不同，具有显著的压缩性和热胀性。温度与压强的变化对气体的密度或容重影响很大。在温度不很低、压强不很高的条件下，气体密度、压强和温度之间的关系服从理想气体状态方程式。即

$$\frac{p}{\rho} = RT \quad (1-16)$$

式中 p ——气体的绝对压强，N/m²；

T ——气体的热力学温度，K；

ρ ——气体的密度，kg/m³；

R ——气体常数，J/(kg·K)。对于空气 $R=287$ ；对于其他气体，在标准状态下， $R=8314/n$ ， n 为气体的分子量。

同一种气体在不同状态下的压强、温度和密度间的关系，可表示为

$$\frac{p_1}{\rho_1 T_1} = \frac{p_2}{\rho_2 T_2} \quad (1-17)$$

式中：符号下的脚注 1、2 分别表示两种不同状态。

(1) 气体的压缩性。在温度不变的等温情况下 $T_1=T_2$ ，得到密度与压强的关系为

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2} \quad (1-18)$$

式 (1-18) 表明：在等温情况下压强与密度成正比。也就是说，压强增加，体积缩小，密度增大。如果把一定量的气体压缩到它的密度增大一倍，则压强也要增加一倍。但是，气体密度存在一个极限值，当压强增加到使气体密度增大到这个极限值时，若再增大压强，气体密度也不会增加，这时式 (1-18) 不再适用。对应极限密度下的压强为极限压强。

(2) 气体的热胀性。对压强不变的定压情况下 $p_1=p_2$ ，得到密度与温度的关系为

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1-19)$$

式 (1-19) 表明：在定压情况下气体的密度与温度成反比，即温度增加，体积增大，密