

21世纪能源与动力工程类 **创新型** 应用人才培养规划教材

风能与动力工程



# 风力机空气动力学

吴双群 赵丹平 主编

- 紧贴热点：满足风电人才培养之急需
- 精选内容：阐述基础理论及发展脉络
- 结合案例：展现独具匠心的风能运用



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材·风能与动力工程

# 风力机空气动力学

主 编 吴双群 赵丹平  
副主编 李 岩  
参 编 姜 鑫 侯亚丽



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 介 绍

本书共分9章,其内容包括流体力学基本概念、流体动力学基础、相似原理和量纲分析、黏性流体的一维流动、理想三元流场理论、黏性空气的三元流动、风动力学及叶素理论、风力机参数及性能曲线、风力机及风场的相互影响。书中含有丰富的导入案例和阅读材料,开拓读者的视野。

本书可作为高等院校风能与动力工程、流体机械、可再生能源等相关专业本科与专科以及非本专业研究生的教材和参考书,也可作为风能行业培训、风力机应用及风力机维修等技术人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

风力机空气动力学/吴双群,赵丹平主编. —北京:北京大学出版社,2011.10

(21世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材·风能与动力工程)

ISBN 978-7-301-19555-0

I. ①风… II. ①吴…②赵… III. ①风力发电机—空气动力学—高等学校—教材 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第194466号

书 名: 风力机空气动力学

著作责任者: 吴双群 赵丹平 主编

策划编辑: 童君鑫

责任编辑: 姜晓楠

标准书号: ISBN 978-7-301-19555-0/TK·0003

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电子邮箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 15.5印张 357千字

2011年10月第1版 2011年10月第1次印刷

定 价: 32.00元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

随着能源和环境问题的日益严峻，世界各国竞相大力发展可再生能源，以达到改善能源结构，减轻环境污染，实现可持续发展和提高人民生活质量的的目的。其中，风能是非常重要的能源，是安全、清洁、充裕、稳定的能源。目前，风力发电已成为风能利用的主要形式，受到世界各国的高度重视，而且发展速度快，已成为国内外能源工业关注的一个热点。为此，我国急需学校培养相关专业人才，但目前尚缺少有关教材。

编者及其团队长期从事教学和科学研究工作，具有丰富的实践、教学经验，近几年通过开展风能方向的工作，积累了一定经验。为满足风能专业对教学的需求，编者及其团队探索性地编写了本书，给风能专业基础课教学提供参考。编者以提高学生的应用能力为目标，着重培养学生对基础理论的应用能力、自学能力和创新能力等综合素质。

本书在能源动力类专业的流体力学课程的基础上，针对风能利用的特点，在介绍流体力学基本概念、原理及应用的基础上，着重介绍风力机的流场理论，低速下的机翼理论，风力机叶素理论，风力机参数性能等针对性内容，可以作为能源动力类专业的拓展教材及风能利用专业的基础教材。

本书共分9章，由内蒙古工业大学吴双群、赵丹平担任主编，东北农业大学李岩担任副主编，此外，内蒙古工业大学姜鑫、候亚丽也参加了本书的编写工作。本书的第2、第7章由吴双群编写，第1、第3、第4章由赵丹平和姜鑫编写，第5、第6章由候亚丽编写，第8、第9章由李岩编写。

编者在本书的编写过程中得到了内蒙古工业大学能源与动力工程学院领导和师生的大力支持，在此表示谢意。

编者在本书编写过程中参阅了大量相关文献，尽量使本书内容精练、浅显易懂、图文并茂、增加针对性、知识点集中、主线条清晰、层次分明。但是，由于国内风力机空气动力学方面公开出版物极少且编者水平有限，所以书中难免有不妥之处，恳切希望各兄弟院校教师和学生在使用本书时给予关注，并将意见和建议及时反馈给编者，以便完善本书内容，编者邮箱为 zdpwsq@yahoo.cn。

编 者  
2011年6月

# 目 录

<b>第 1 章 流体力学基本概念</b> .....	1	2.5.2 伯努利方程的推导	39
1.1 流体的定义及特征	2	2.5.3 伯努利方程的应用	41
1.2 流体的连续介质模型	3	2.6 动量方程和动量矩方程	44
1.3 流体的性质	3	2.6.1 动量方程	44
1.3.1 流体的压缩性和膨胀性	3	2.6.2 动量矩方程	48
1.3.2 流体的黏性	6	2.7 风力机贝茨理论	51
1.3.3 流体的密度、相对密度和 比容	12	习题	52
1.4 作用在流体上的力	14	<b>第 3 章 相似原理和量纲分析</b> .....	60
1.4.1 表面力	14	3.1 流动的相似理论	61
1.4.2 质量力	15	3.1.1 几何相似概述	62
1.5 液体的表面性质	15	3.1.2 运动相似概述	62
1.5.1 表面张力	15	3.1.3 动力相似概述	63
1.5.2 毛细现象	16	3.2 动力相似准则	64
习题	18	3.3 流动相似条件	67
<b>第 2 章 流体动力学基础</b> .....	20	3.4 近似模型试验	69
2.1 流体运动的描述方法	21	3.5 量纲分析法	72
2.1.1 拉格朗日(Lagrange)法	22	3.5.1 物理方程量纲一致性 原则	72
2.1.2 欧拉(Euler)法	23	3.5.2 瑞利法	72
2.1.3 质点导数	24	3.5.3 $\pi$ 定理	74
2.2 动力学基本概念	27	习题	77
2.2.1 迹线和流线	27	<b>第 4 章 黏性流体的一维流动</b> .....	80
2.2.2 流管、流束、元流和 总流	29	4.1 黏性流体总流的伯努利方程	81
2.2.3 有效截面、流量和平均 流速	30	4.2 黏性流体管内流动的损失	83
2.2.4 缓变流和急变流	31	4.3 黏性流体的两种流动状态	84
2.2.5 湿周、水力半径和当量 直径	31	4.3.1 雷诺实验	84
2.3 系统、控制体与输运方程	32	4.3.2 流态的判别	85
2.4 连续性方程	35	4.3.3 沿程损失和平均流速的 关系	86
2.5 能量方程	37	4.4 圆管中的层流流动	86
2.5.1 理想流体运动微分方程	38	4.5 黏性流体的紊流流动	89
		4.5.1 紊流流动时均值	89



4.5.2 雷诺应力 ..... 90

4.5.3 圆管中紊流的速度  
分布和沿程损失 ..... 91

4.6 沿程损失的实验研究 ..... 94

4.6.1 尼古拉兹实验 ..... 94

4.6.2 莫迪图 ..... 96

4.7 局部损失 ..... 99

4.7.1 局部损失产生的原因 ..... 99

4.7.2 管道截面突然扩大的  
局部损失 ..... 100

4.7.3 常用管件的局部损失  
系数 ..... 100

习题 ..... 103

**第5章 理想三元流场理论 ..... 110**

5.1 三元流的连续性微分方程 ..... 111

5.2 流体微团的运动分解 ..... 113

5.2.1 微团运动特征的速度  
表达式 ..... 113

5.2.2 流体微团运动的分解  
概述 ..... 114

5.3 有旋流动与无旋流动 ..... 117

5.4 理想流体的运动微分方程 ..... 118

5.5 欧拉积分方程和伯努利积分  
方程 ..... 120

5.5.1 欧拉积分(定常无旋  
流动) ..... 121

5.5.2 伯努利积分(定常运动  
沿流线的积分) ..... 122

5.5.3 伯努利方程 ..... 122

5.6 理想流体的涡旋运动 ..... 122

5.6.1 涡线、涡管、涡束和  
旋涡强度 ..... 123

5.6.2 速度环量和斯托克斯  
定理 ..... 124

5.6.3 汤姆逊定理和亥姆霍兹  
旋涡定理 ..... 125

5.7 二维涡流的速度分布和压强  
分布 ..... 127

5.8 速度势函数和流函数 ..... 129

5.8.1 速度势函数 ..... 129

5.8.2 流函数 ..... 130

5.8.3 势函数和流函数的  
关系 ..... 132

5.9 几种简单的平面势流 ..... 132

5.9.1 均匀直线流动 ..... 132

5.9.2 点源和点汇 ..... 133

5.9.3 点涡 ..... 134

5.10 几种简单平面势流的叠加 ..... 135

5.10.1 点汇和点涡——  
螺旋流 ..... 136

5.10.2 点源和点汇——  
偶极流 ..... 136

5.11 均匀等速流绕过圆柱体的  
无环和有环流动 ..... 138

5.11.1 流体绕过圆柱体的无环  
流动 ..... 138

5.11.2 流体绕过圆柱体的有环  
流动 ..... 141

5.12 叶栅的库塔-儒可夫斯基公式 ..... 143

5.13 库塔条件 ..... 146

习题 ..... 148

**第6章 黏性空气的三元流动 ..... 150**

6.1 纳维-斯托克斯方程 ..... 151

6.1.1 黏性流体的运动微分  
方程 ..... 151

6.1.2 本构方程 ..... 153

6.1.3 纳维-斯托克斯方程  
概述 ..... 154

6.2 边界层的概念和特征 ..... 155

6.3 边界层的微分及积分方程 ..... 156

6.3.1 层流边界层的微分方程 ..... 156

6.3.2 边界层的动量积分  
关系式 ..... 159

6.4 边界层的位移厚度和动量损失  
厚度 ..... 160

6.5 平板边界层流动的近似计算  
概述 ..... 162

6.5.1 平板层流边界层的近似  
计算 ..... 162

6.5.2 平板紊流边界层的近似  
计算 ..... 164

6.5.3 平板混合边界层的近似计算	166	<b>第 8 章 风力机参数及性能曲线</b>	201
6.6 曲面边界层的分离现象和卡门涡街	167	8.1 风力机类型及几何参数	202
6.6.1 曲面边界层的分离现象	167	8.1.1 风力机分类概述	202
6.6.2 卡门涡街	169	8.1.2 水平轴风力机	203
6.7 黏性流体的绕流运动	171	8.1.3 垂直轴风力机	203
习题	174	8.1.4 水平轴与垂直轴风力机的对比	205
<b>第 7 章 风动力学及叶素理论</b>	176	8.1.5 风力机的组成	206
7.1 风力机翼型的几何参数	178	8.1.6 风力机的几何参数	208
7.2 黏性流体绕翼型流动	181	8.2 风力机性能评价参数	210
7.3 翼型绕流边界层特点	182	8.2.1 风力机的性能参数概述	211
7.3.1 边界层(附面层)的概念	182	8.2.2 最大风能利用系数	212
7.3.2 翼型边界层的特点	184	8.3 风力机动力特性曲线	214
7.4 启动涡与附着涡	185	8.3.1 $C_p-\lambda$ 和 $C_M-\lambda$ 特性曲线	214
7.4.1 启动涡	185	8.3.2 $C_T-\lambda$ 特性曲线	217
7.4.2 附着涡	186	习题	219
7.5 作用在运动桨叶上的气动力	187	<b>第 9 章 风力机及风场的相互影响</b>	220
7.6 升力系数和阻力系数的变化曲线	189	9.1 风场的非均匀性和非恒定性	221
7.6.1 升力特性	189	9.1.1 风的形成	221
7.6.2 阻力特性	189	9.1.2 风场的非均匀性	221
7.6.3 翼型剖面形状对其升力和阻力的影响	190	9.1.3 风场的非恒定性	224
7.6.4 埃菲尔极曲线	192	9.1.4 风场的非均匀性与非恒定性对风力机的影响	225
7.7 气动力的其他重要特性及分析	193	9.2 风力机的尾流	228
7.7.1 压力中心和焦点	193	9.2.1 风力机尾流效应	229
7.7.2 翼型剖面俯仰力矩特性	194	9.2.2 风力机尾流模型	229
7.7.3 大攻角情况下的升力、阻力及力矩特性曲线	194	9.2.3 风电场中风力机的配置	234
7.7.4 弦线和法线方向的气动力	195	9.3 风速变化对风力机的影响	234
7.8 叶素特性分析	196	9.3.1 风力机工作的额定风速	234
7.9 叶素的理论气动效率和最佳攻角	198	9.3.2 风力机的功率与风速的关系	235
习题	199	习题	236
		<b>参考文献</b>	237

# 第 1 章

## 流体力学基本概念



### 本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
流体的定义及特征	掌握感性认识方面及力学方面对流体的定义及其两方面的差异；掌握流体与固体的特征差异及气体与液体的特征同异	自然界中的物质形态；流体与固体之间最显著的特征差异；气体与液体的压缩性与流动性的差异
流体的连续介质模型	掌握流体的连续介质模型的含义及意义；理解流体的连续介质模型，并得出过程及分析问题的方法	连续函数概念
流体的性质	掌握流体的流动性、流体的压缩性和膨胀性、流体的黏性概念的本质及表征属性的物理量	摩擦力及其计算
作用在流体上的力	掌握作用在流体上的两种不同性质的力	场力；接触力
液体的表面性质	了解液体具有的表面性质	分子的吸引力





## 导入案例

流体流动问题是化工厂里最常遇到的一个问题，也是化工单元操作中的一个最基本问题。化工生产中所处理的物料以流体占大多数，流体的输送是在管路中进行的，因此流体输送管路在化工生产中起着重要的作用，可看成与人体里的血管相当。输送管路由管子、阀门、输送机械(泵、通风机等)、流量计等部分机械组成，它四通八达于各处。对于这类大量的输送管路和设备，如能做到正确设计、布置和选用，就会为国家节约许多生产资料，避免浪费。

流体输送究竟包括哪些内容，可通过图 1.1 了解概况。

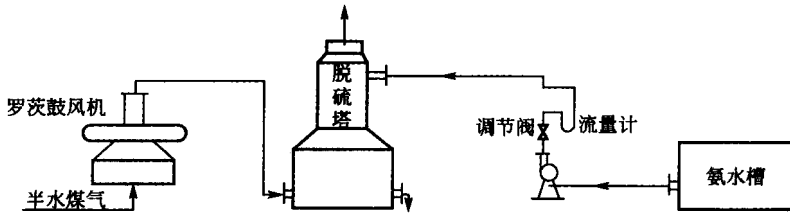


图 1.1 银川氮肥厂脱硫塔(脱硫变换工段)

由图 1.1 可知，主要任务有如下两个。

- (1) 选：合适的流速、合适的管径、阀门、测量仪表、泵、风机。
- (2) 研：为了选合适就得研究流体的性质、流动形态(即条件)、流体的有关规律。

## 1.1 流体的定义及特征

自然界中的物质均由分子构成，按照分子的聚集状态可将其分为两大类，即固体和流体，后者可进一步细分为气体和液体。有时又将它们称为固相、液相和气相。固体分子的密集程度最大，液体次之，气体又次之。通俗地讲，能够流动的物质叫流体，如果按照力学的术语进行定义，则在任何微小的剪切力的作用下都能够发生连续变形的物质称为流体。所以气体、液体通称为流体。

固体和流体具有以下不同的特征：在静止状态下固体的作用面上能够同时承受剪切应力和法向应力，而流体只有在运动状态下才能够同时有法向应力和切向应力的作用，静止状态下其作用面上仅能够承受法向应力，这一应力是压缩应力，即静压强。固体在力的作用下发生变形，在弹性极限内的变形和作用力之间服从虎克定律，即固体的变形量和作用力的大小成正比。而流体的角变形速度和剪切应力有关，层流和紊流状态下它们之间的关系有所不同，在层流状态下，二者之间服从牛顿内摩擦定律。当作用力停止作用时，固体可以恢复到原来的形状，流体只能够停止变形，而不能返回原来的位置。固体有一定的形状，流体由于其变形所需的剪切力非常小，所以很容易使自身的形状适应容器的形状，并在一定的条件下可以维持下来。

与液体相比气体更容易变形，因为气体分子比液体分子稀疏得多。在一定条件下，气体和液体的分子大小并无明显差异，但气体所占的体积是同质量液体的  $10^3$  倍。所以气体

的分子距与液体相比要大得多，分子间的引力非常微小，分子可以自由运动，极易变形，能够充满所能到达的全部空间。液体的分子距很小，分子间的引力较大，分子间相互制约，可以作无一定周期和频率的振动，并可在其他分子间移动，但不能像气体分子那样自由移动，因此，液体的流动性不如气体。在一定条件下，一定质量的液体有一定的体积，并取容器的形状，但不能像气体那样充满所能达到的全部空间。液体和气体的交界面称为自由液面。

## 1.2 流体的连续介质模型

根据物理学的观点，自然界中的所有物质都是由分子构成的，流体也不例外。由于分子和分子间存在间隙，因此从微观上看流体是不连续的。若从分子运动论入手研究流体的宏观机械运动，显然十分困难，甚至是不可能的。

流体力学并不研究流体分子的微观运动，而关心众多流体分子的宏观机械运动。描述流体运动或平衡状态的宏观物理量，都是众多流体分子平均运动的效果，都可以从实验中直接观测到。再者，在工程实际中流体流动所涉及的物体的特征尺度大得和分子间距无法比拟。因此，在流体力学的研究中将流体作为由无穷多稠密、没有间隙的流体质点构成的连续介质，这就是1755年欧拉提出的“连续介质模型”。这种假设是合理的，因为通常情况下流体分子距很小，分子非常稠密。例如，在标准状态下， $1\text{mm}^3$ 的气体中就包含 $2.7 \times 10^{16}$ 个分子； $1\text{mm}^3$ 液体中包含 $3.4 \times 10^{19}$ 个分子。所以，在这一假设之下，流体力学的研究不必再顾及孤立的流体分子的微观运动，而研究模型化了的连续介质。

在连续性假设之下，表征流体状态的宏观物理量(如速度、压强、密度、温度等)在空间和时间上都是连续分布的，都可以作为空间和时间的连续函数，从而可以用连续函数的解析方法等数学工具去研究流体的平衡和运动规律，为流体力学的研究提供了很大的方便。

在连续性的假设中，认为构成流体的基本单位是流体质点。这里所谓的流体质点是包含有足够多流体分子的微团，在宏观上流体微团的尺度和流动所涉及的物体的特征长度相比充分的小，小到在数学上可以作为一个点来处理。而在微观上，微团的尺度和分子的平均自由行程相比又要足够大，以致能够包含有足够多的流体分子，使得这些分子的共同物理属性的统计平均值有意义。

必须指出的是，连续介质模型的应用是有条件的，也就是说研究所涉及的物体的特征长度与分子的平均自由行程相比必须足够大，否则这一模型就不适用。例如，在高空稀薄空气中运动的飞行器，其特征尺寸和分子的平均自由行程具有同一数量级，这时连续介质模型就不适用了，必须借助气体分子运动论来解决有关问题。

## 1.3 流体的性质

### 1.3.1 流体的压缩性和膨胀性

流体在一定的温度下压强增大，体积减小；在压强一定条件下，温度变化，体积也要



发生相应的变化。所有流体都具有这种特性，流体的这种性质称为流体的压缩性和膨胀性。

### 1. 流体的压缩性

在一定的温度下，单位压强增量引起的体积变化率定义为流体的压缩性系数，用以衡量流体压缩性的大小，其表达式为

$$k = -\frac{dV/V}{dp} = -\frac{dV}{Vdp} \quad (1-1)$$

式中， $dp$  为压强增量，单位为 Pa； $dV/V$  为  $dp$  引起的体积变化率。

由于压强增大体积就要减小， $dp$  和  $dV$  异号，为了保证压缩性系数的直观性，在等式的右端冠以负号。 $k$  的单位为  $m^2/N$ 。由上述定义式可以看出，在同样的压强增量之下， $k$  值大的流体体积变化率大，容易压缩， $k$  值小的流体体积变化率小，不容易压缩。

工程中往往还涉及流体的体积弹性模量，用  $K$  来表示，定义为压缩性系数的倒数，其表达式为

$$K = \frac{1}{k} = -\frac{Vdp}{dV} \quad (1-2)$$

上式表明， $K$  大的流体压缩性小， $K$  小的流体压缩性大。 $K$  的单位和压强的单位相同，为 Pa 或  $N/m^2$ 。在一定温度下水的体积弹性模量示于表 1-1。由表可知，水的体积弹性模量很大，所以不容易压缩。工程计算中常近似地取为  $K=2.0\text{GPa}$ 。



### 例 1-1

求水在等温状态下，将体积缩小 5/1000 时所需要的压强增量。

【解】 由式(1-2)知

$$\delta p = -\frac{\delta V}{V}K = \frac{5}{1000} \times 2.0 \times 10^9 = 10^7 \text{ (Pa)}$$

表 1-1 水的体积弹性模量(GPa)

温度/°C	压强/MPa				
	0.490	0.981	1.961	3.923	7.845
0	1.85	1.86	1.88	1.91	1.94
5	1.89	1.91	1.93	1.97	2.03
10	1.91	1.93	1.97	2.01	2.08
15	1.93	1.96	1.99	2.05	2.13
20	1.94	1.98	2.02	2.08	2.17

### 2. 流体的膨胀性

当压强一定时，流体温度变化体积改变的性质称为流体的膨胀性，膨胀性的大小用温度膨胀系数来表示，其表达式为

$$\alpha_v = \frac{dV/V}{dT} = \frac{dV}{VdT} \quad (1-3)$$

式中,  $dT$  或  $dt$  为温度增量;  $dV/V$  为相应的体积变化率。由于温度升高体积膨胀, 故二者同号。 $\alpha_v$  的单位为  $1/K$  或  $1/^\circ C$ 。水在不同温度下的膨胀系数见表 1-2。

表 1-2 水的温度膨胀系数

压强/MPa	温度/ $^\circ C$				
	1~10	10~20	40~50	60~70	90~100
0.0981	$14 \times 10^{-6}$	$150 \times 10^{-6}$	$422 \times 10^{-6}$	$536 \times 10^{-6}$	$719 \times 10^{-6}$
9.807	$43 \times 10^{-6}$	$165 \times 10^{-6}$	$422 \times 10^{-6}$	$548 \times 10^{-6}$	$704 \times 10^{-6}$
19.61	$72 \times 10^{-6}$	$183 \times 10^{-6}$	$426 \times 10^{-6}$	$539 \times 10^{-6}$	—
49.03	$149 \times 10^{-6}$	$236 \times 10^{-6}$	$429 \times 10^{-6}$	$523 \times 10^{-6}$	$661 \times 10^{-6}$
88.26	$229 \times 10^{-6}$	$289 \times 10^{-6}$	$437 \times 10^{-6}$	$514 \times 10^{-6}$	$621 \times 10^{-6}$

由表可知, 水的体积膨胀系数和压强之间的关系在  $50^\circ C$  附近发生转变, 当温度小于  $50^\circ C$  时, 体积膨胀系数随着压强的增大而增大, 温度大于  $50^\circ C$  时, 随着温度的增大而减小。

对于气体, 需要同时考虑温度和压强对体积和密度的影响, 工程中经常涉及的气体往往可以作为完全气体(热力学中的理想气体)来处理, 可用理想气体的状态方程式来进行有关计算, 完全气体的状态方程式为

$$pv = RT \text{ 或者 } \frac{p}{\rho} = RT \quad (1-4)$$

式中,  $p$  为气体的绝对压强(Pa);  $v$  为气体的比容( $m^3/kg$ );  $\rho$  为气体的密度( $kg/m^3$ );  $R$  为气体常数( $J/kg \cdot K$ );  $T$  为热力学温度(K)。

由式(1-4)知, 气体的比容和压强成反比, 和热力学温度成正比。

对于气体, 其弹性模量随气体的变化过程的不同而不同, 例如在等温过程中

$$pv = C$$

$C$  为常数, 上式微分后得

$$p dv + v dp = 0 \text{ 或 } \frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p} \quad (1-5)$$

因为气体比容的相对变化率等于体积的相对变化率, 所以

$$K = -\frac{v}{dv} dp \quad (1-6)$$

将式(1-5)代入上式则有

$$K = \frac{p}{dp} dp = p \quad (1-7)$$

由上式知, 当气体作等温压缩时, 气体的体积弹性模量等于作用在气体上的压强。

当气体作等熵压缩时, 则有

$$pv^\gamma = C_1$$

$C_1$  为常数,  $\gamma$  为等熵指数, 上式微分后得

$$p\gamma v^{\gamma-1} dv + v^\gamma dp = 0$$

整理后则有

$$\frac{dv}{v} = -\frac{1}{\gamma} \frac{dp}{p} \quad (1-8)$$



将上式代入式(1-2)则得

$$K = \frac{p\gamma}{dp} dp = \gamma p \quad (1-9)$$

由式(1-9)知, 气体作等熵压缩时, 其体积弹性模量等于绝热指数和压强的乘积。例如气体在一个标准大气压下作等熵压缩时,  $K = 1.4 \times 101325 = 1.419 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

由上述知, 不论气体还是液体都是可压缩的, 只是压缩性的大小有所区别, 通常情况下由于液体的压缩性较小, 常常作为不可压缩流体来处理, 此时密度等于常数, 这样对问题的处理带来很大的方便。气体的压缩性比较大, 由完全气体的状态方程式知, 当温度不变时, 完全气体的体积和压强成反比, 压强增大一倍, 体积缩小为原来的一半; 当压强不变时, 温度升高  $1^\circ\text{C}$  体积就比  $0^\circ\text{C}$  时的体积膨胀  $1/273$ 。所以通常气体作为可压缩流体来处理, 其密度不能作为常数, 必须同时考虑压强和温度对密度或比容的影响。

可压缩流体和不可压缩流体都是相对而言的, 实际工程中要不要考虑流体的压缩性要视具体情况而定。例如在研究水下爆炸、管道中的水击和柴油机高压油管中柴油的流动过程时, 由于压强变化比较大, 而且过程变化非常迅速, 所以必须考虑压强对密度的影响, 即要考虑液体的压缩性, 将液体作为可压缩流体来处理。又如, 用管道输送煤气时, 由于在流动过程中压强和温度的变化都很小, 其密度变化很小, 可作为不可压缩流体来处理。再如, 气流绕流物体, 当气流速度比音速小得多时, 气体的密度变化很小, 可近似地看成常数, 也可以作为不可压缩流体处理。

### 1.3.2 流体的黏性

#### 1. 流体的黏性和牛顿内摩擦定律

流体都是具有黏性的。流体在管道中流动, 需要在管子两端建立压强差或位置高度差; 轮船在水中航行、飞机在空中飞行需要动力, 这都是为了克服流体黏性所产生的阻力。流体流动时产生内摩擦力的性质称为流体的黏性, 黏性是流体的固有物理属性, 但黏性只有在运动状态下才能显示出来。

如图 1.2 所示, 两块相隔一定距离的平行平板水平放置, 其间充满液体, 下板固定不动, 上板在  $F'$  力的作用下以  $U$  的速度沿  $x$  方向运动。实验表明, 黏附于上平板的流体在平板切向方向上产生的黏性摩擦力  $F$  即  $F'$  的反作用力, 和两块平板间的距离成反比, 和平板的面积  $A$ 、平板的运动速度  $U$  成正比, 比例关系式如下

$$F = \mu A \frac{U}{h} \quad (1-10)$$

式中, 比例系数  $\mu$  为流体的动力黏度, 是流体的重要物理属性, 和流体的种类、温度、压强有关, 某一种流体在一定温度、压强之下保持常数, 其单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。 $U/h$  表示在速度的垂直方向单位长度上的速度增量, 称为速度梯度。显然在上述情况速度分布为直线, 速度梯度为常数, 属于特殊情况。一般速度分布为曲线, 如图 1.3 所示,  $x$  方向上的速度用  $v_x$  表示时, 速度梯度可表示为  $\frac{dv_x}{dy}$ , 此时速度梯度为一变量, 在每一速度层上有不同的数值, 将  $\frac{dv_x}{dy}$  代入式(1-10), 两端同除以板的面积  $A$ , 则可以得到作用在平板单位面积上的切应力  $\tau$ 。

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (1-11)$$

上式即为牛顿内摩擦定律, 仅适用于层流流动的情况。该式表明, 黏性剪切力和速度梯度成正比, 比例系数为流体的动力黏度。在一定条件下, 速度梯度越大, 剪切应力越大, 能量损失也越大。当速度梯度为零时, 黏性剪切力为零, 流体的黏性表现不出来, 如流体静止、均匀流动就属于这种情况。

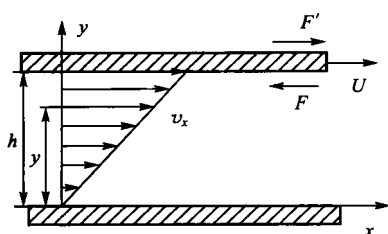


图 1.2 流体黏性实验示意图

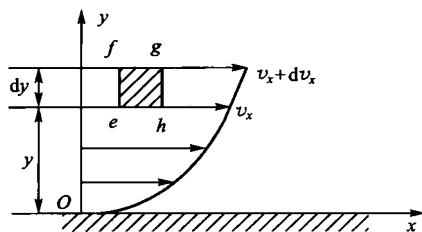


图 1.3 黏性流体速度分布示意图

流体流动时的速度梯度是流体微团微观角变形速度的宏观表现, 即速度梯度等于流体微团的角变形速度。证明如下: 如图 1.4 所示, 在运动的流体中取一正方形的流体微团, 在  $t$  时刻其形状为  $efgh$ , 经过一无限小的时间间隔  $\delta t$  后, 由于上下层的流速的差别, 其形状变为  $e'f'g'h'$ , 产生角变形  $\delta\varphi$ , 角变形速度可由几何关系推出

$$\frac{d\varphi}{dt} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta\varphi}{\delta t} = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta v_x \delta t / \delta y}{\delta t} = \frac{dv_x}{dy}$$

即在流动过程中流体微团的角变形速度等于速度梯度, 因此牛顿内摩擦定律的物理意义可以表述为: 在层流流动时, 流层之间的剪切应力和流体微团的角变形速度成正比, 其比例系数为流体的动力黏度。

在工程实际中还常常用到运动黏度的概念, 将流体动力黏度与密度的比值定义为运动黏度, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-12)$$

单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

运动黏度只是动力黏度和密度的一个比值, 不是流体的固有物理属性, 不能用来比较流体之间的黏度大小, 因为不同的流体密度差别非常大, 用密度去除流体的动力黏度有可能动力黏度大的流体在同样温度下其运动黏度还不如动力黏度小流体的运动黏度大。如温度为  $0^\circ\text{C}$  时, 空气的运动黏度为  $13.2 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ , 而这时水的运动黏度仅有  $1.792 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ 。

## 2. 影响黏性的因素

形成流体黏性的原因有两个方面, 一是流体分子间的引力, 当流体微团发生相对运动时, 必须克服相邻分子间的引力, 这种作用类似物体之间的相互摩擦, 从而表现出摩擦力; 另一个原因是流体分子的热运动, 当流体层之间作相对运动时, 由于分子的热运动,



使流体层之间产生质量交换，由于流层之间的速度差别，必然产生动量交换，从而产生力的作用，使相邻的流体层之间产生摩擦力。不论气体还是液体，都存在分子之间的引力和热运动，只是所占比重不同而已。对于气体，由于分子距比较大，分子间的引力相对较小，而分子的热运动却非常强烈，因此，构成气体黏性的主要原因是分子的热运动；而对于液体，分子距非常小，分子之间的相互约束力非常大，分子的热运动非常微弱，所以构成液体黏性的主要因素是分子间的引力。

压强改变时，对气体和液体黏性的影响有所不同。由于压强变化对分子的动量交换影响非常微弱，所以气体的黏性随压强的变化很小。压强增大时对分子的间距影响明显，故液体的黏性受压强变化的影响较气体大。但在通常的变化范围内(指低于 100 个大气压)变化时，液体压强的变化对黏性的影响很小，通常可以忽略不计。压强较高时，必须考虑压强变化对液体黏性的影响。例如：20℃时的变压器油压强由一个大气压增至 100 个大气压时，动力黏度约增加 7.6%；当压强增至 3400 个大气压时，其动力黏度将增大 6500 倍。水的动力黏度在 10<sup>5</sup>个大气压时较 1 个大气压时增大 2 倍。液体动力黏度随压强的变化可用下面的经验公式计算

$$\mu_p = \mu_0 e^{ap} \tag{1-13}$$

式中， $\mu_p$  为压强为  $p$  时的动力黏度(Pa·s)； $\mu_0$  为 1 个大气压时的动力黏度(Pa·s)； $a$  为和液体的物理性质、温度有关的系数，通常近似取  $(2\sim 3)\times 10^{-8}/(1/\text{Pa})$ 。

温度对液体和气体黏性的影响截然相反，温度升高时气体分子的热运动加剧，气体的黏性增大，分子距增大，对气体黏性的影响可以忽略不计。对于液体，由于温度升高体积膨胀，分子距增大，分子间的引力减小，故液体的黏性随温度的升高而减小。而液体温度升高引起的液体分子热运动量的变化对黏性的影响可以忽略不计。

工程中常用的机械油的动力黏度和温度之间的变化关系，在 20~80℃的范围内可用下式计算

$$\mu_t = \mu_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \tag{1-14}$$

式中， $\mu_t$  为温度为  $t$  时的动力黏度(Pa·s)； $\mu_0$  为温度为 0℃时的动力黏度(Pa·s)； $\lambda$  为黏温系数，对于矿物系机械油可取  $\lambda = 1.8\sim 3.6\times 10^{-3}(1/^\circ\text{C})$ ； $t$ 、 $t_0$  为温度(℃)。

水的动力黏度随温度的变化关系可用下式计算

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \tag{1-15}$$

式中， $\mu_t$  为温度为  $t$  时的动力黏度(Pa·s)； $\mu_0$  为水在 0℃时的动力黏度(Pa·s)； $t$  为温度(℃)。

气体的动力黏度在压强低于 10 个大气压时可用苏士兰(Sutherland)关系式计算

$$\mu_t = \mu_0 \frac{273+S}{(273+t)+S} \left( \frac{273+t}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \tag{1-16}$$

式中， $\mu_t$  为温度为  $t$  时的动力黏度(Pa·s)； $\mu_0$  为气体在 0℃时的动力黏度(Pa·s)； $t$  为温度(℃)； $S$  为按气体种类确定的常数(K)，对于空气常取  $S = 111(\text{K})$ 。

表 1-3 给出了常见气体的黏度、分子量和苏士兰常数  $S$ 。图 1.5 和图 1.6 给出了不同流体在不同温度下的动力黏度曲线和运动黏度曲线。表 1-4、表 1-5 分别给出了在不同温度下水和空气的黏度。

表 1-3 常见气体的黏度、分子量  $M$  和苏士兰常数 (标准状态)

流体名称	$\mu_0 \times 10^6$ /(Pa·s)	$\nu_0 \times 10^6$ /(m <sup>2</sup> /s)	$M$	$S/K$	备注
空气	17.09	13.20	28.96	111	0°C时的数值
氧	19.20	13.40	32.00	125	
氮	16.60	13.30	28.02	104	
氢	8.40	93.50	2.016	71	
一氧化碳	16.80	13.50	28.01	100	
二氧化碳	13.80	6.98	44.01	254	
二氧化硫	11.60	3.97	64.06	306	
水蒸气	8.93	11.12	18.01	961	

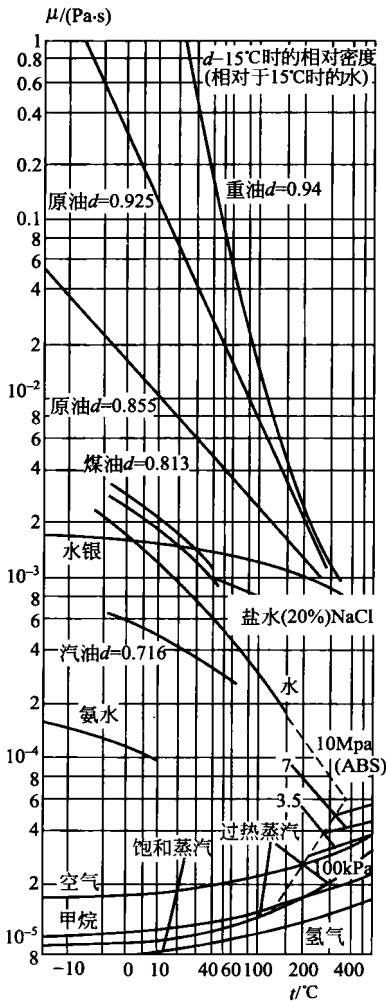


图 1.5 不同流体的动力黏度曲线

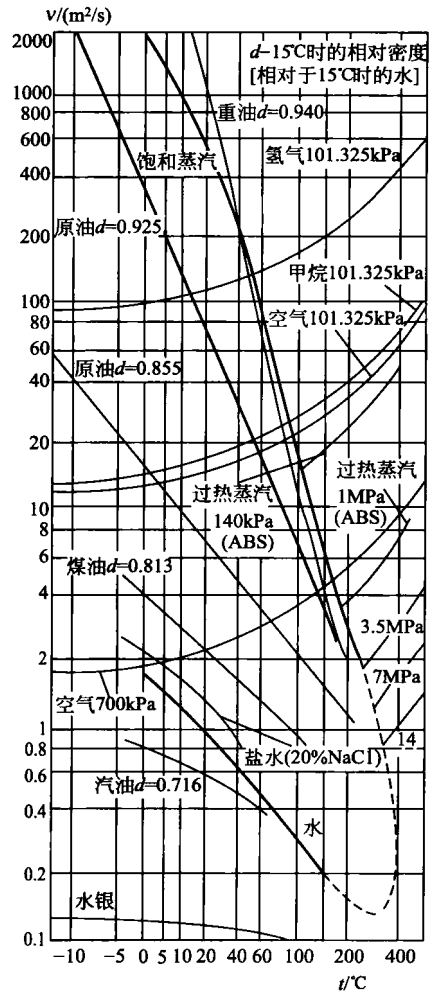


图 1.6 不同流体的运动黏度曲线





表 1-4 水的黏度与温度的关系 (101325 Pa)

温度 /°C	$\mu \times 10^3$ / (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ / (m <sup>2</sup> /s)	温度 /°C	$\mu \times 10^3$ / (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ / (m <sup>2</sup> /s)
0	1.792	1.792	40	0.656	0.661
5	1.519	1.519	45	0.599	0.605
10	1.308	1.308	50	0.549	0.556
15	1.140	1.141	60	0.469	0.477
20	1.005	1.007	70	0.406	0.415
25	0.894	0.897	80	0.357	0.367
30	0.801	0.804	90	0.317	0.328
35	0.723	0.727	100	0.284	0.296

表 1-5 空气的黏度与温度的关系 (101325 Pa)

温度 /°C	$\mu \times 10^6$ / (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ / (m <sup>2</sup> /s)	温度 /°C	$\mu \times 10^6$ / (Pa · s)	$\nu \times 10^6$ / (m <sup>2</sup> /s)
0	17.09	13.20	260	28.06	42.40
20	18.08	15.00	280	28.77	45.10
40	19.04	16.90	300	29.46	48.10
60	19.97	18.80	320	30.14	50.70
80	20.88	20.90	340	30.88	53.50
100	21.75	23.00	360	31.46	56.50
120	22.60	25.20	380	32.12	59.50
140	23.44	27.40	400	32.77	62.50
160	24.25	29.80	420	33.40	65.60
180	25.05	32.20	440	34.02	68.80
200	25.82	34.60	460	34.63	72.00
220	26.58	37.10	480	35.23	75.20
240	27.33	39.70	500	35.83	78.50

工程中还常常涉及的混合气体的动力黏度，可采用下面的经验公式计算

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n a_i M_i^{\frac{1}{2}} \mu_i}{\sum_{i=1}^n a_i M_i^{\frac{1}{2}}} \quad (1-17)$$

式中， $a_i$ 为混合气体中*i*组分气体所占体积的百分比； $M_i$ 为混合气体中*i*组分气体的分子量； $\mu_i$ 为混合气体中*i*组分气体的动力黏度。