

高等学校教材

# 工程流体力学

山东工学院 南京电力学院 合编

电力工业出版社

高等学校教材

---

# 工程流体力学

山东工学院 东北电力学院 合编

电力工业出版社

## 内 容 提 要

本书共分七章。内容包括流体及其物理性质、流体静力学、流体流动的基础、粘性流体的一元流动、理想流体的有旋流动和无旋流动、粘性流体绕物体的流动以及气体动力学基础。在管道计算中引进了电子计算机的计算程序。

本书为高等学校电厂热能动力专业以及其他相近专业流体力学课程的教材，也可作为工厂和设计部门中有关工程技术人员的参考书。

高等学校教材

## 工 程 流 体 力 学

山东工学院 东北电力学院 合编

(根据水利电力出版社纸型重印)

\*

电力工业出版社出版

(北京前门大街六号)

新华书店北京发行社发行·各地新华书店经售  
顾文雲印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 18.5印张 419千字

1979年12月第一版

1980年7月新一版 1982年2月北京第三次印刷

印数12001—24000册 定价 1.95元

书号 15036·4137

# 前 言

工程流体力学是电厂热能动力专业及其相近专业的一门重要专业基础课。本书是根据1978年水利电力部组织制订的高等学校电厂热能动力专业流体力学教材编写大纲编写的。

在教材的编写中，我们努力运用辩证唯物主义观点去阐述流体的性质及其运动规律，注意加强理论基础，同时也适当地注意结合专业，联系实际。在着重讲述流体的性质、平衡规律和一元流动的几个基本方程（连续性方程、能量方程、动量方程等）的同时，还进一步讲述了理想和粘性流体二元流动的基本知识。对连续性方程、欧拉方程、纳维尔——斯托克斯方程等，均按三元推导，以利加强理论基础。对本专业最常遇到的管内流动等问题，作了较为详细的叙述。在教材内容的安排上，既注意保持本学科的系统性，又注意由浅入深、由易到难的认识发展规律。所以在讲述了流体的性质和平衡之后，首先讲述了理想和粘性不可压缩流体的一元流动，再讲述理想和粘性不可压缩流体的二元流动，最后讲述可压缩流体的流动。在管道计算中，引进了电子计算机的计算程序（ALGOL60），以适应社会主义四个现代化的需要。各章均编选有一定数量的例题和习题，以利加强对学生运用基本理论去分析和解决实际问题能力的培养。

本教材由山东工学院（孔珑、蔡国琰、田名振）和东北电力学院（薛祖绳）合编，由南京工学院、华中工学院和重庆大学审稿。教材的引言、第一章和第四章由孔珑编写，第二章由田名振编写，第三章由蔡国琰编写，第五章、第六章和第七章由薛祖绳编写。孔珑担任主编，南京工学院王文琪担任主审。

在教材的编写和修改过程中，主审、兄弟院校参加审稿会的教师以及我们两院校的流体力学教师都曾提出过许多宝贵的修改意见，我们在此表示由衷的谢忱。

限于我们的水平，加之成书仓促，书中可能有不妥和谬误之处，恳切欢迎读者批评指正。

编 者

1979.6.

# 目 录

## 前言

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 引言 .....                          | 1  |
| 第一章 流体及其物理性质 .....                | 4  |
| 第一节 流体的定义和特征 .....                | 4  |
| 第二节 流体作为连续介质的假设 .....             | 4  |
| 第三节 流体的密度和重度 .....                | 5  |
| 第四节 流体的压缩性和膨胀性 .....              | 7  |
| 第五节 流体的粘性 .....                   | 10 |
| 第六节 液体的表面性质 .....                 | 17 |
| 习题 .....                          | 20 |
| 第二章 流体静力学 .....                   | 21 |
| 第一节 作用在流体上的力 表面力 质量力 .....        | 21 |
| 第二节 流体静压力及其特性 .....               | 22 |
| 第三节 流体的平衡微分方程式 .....              | 24 |
| 第四节 流体静力学基本方程式 .....              | 25 |
| 第五节 绝对压力 表压力和真空 液柱式测压计 .....      | 28 |
| 第六节 液体的相对平衡 .....                 | 33 |
| 第七节 静止液体作用在平面上的总压力 .....          | 37 |
| 第八节 静止液体作用在曲面上的总压力 .....          | 40 |
| 第九节 静止液体作用在沉没物体上的总压力 阿基米德原理 ..... | 44 |
| 习题 .....                          | 46 |
| 第三章 流体流动的基础 .....                 | 52 |
| 第一节 研究流体流动的欧拉方法 .....             | 52 |
| 第二节 流动的分类 .....                   | 53 |
| 第三节 系统与控制体 .....                  | 55 |
| 第四节 迹线与流线 .....                   | 59 |
| 第五节 流管 流束 流量 .....                | 60 |
| 第六节 一元流动的连续性方程 .....              | 61 |
| 第七节 理想流体一元流动的运动微分方程及伯努里方程 .....   | 63 |
| 第八节 伯努里方程的应用 .....                | 68 |
| 第九节 动量方程 .....                    | 71 |
| 第十节 动量矩方程 .....                   | 73 |
| 习题 .....                          | 76 |
| 第四章 粘性流体的一元流动 .....               | 82 |
| 第一节 粘性流体总流的伯努里方程 .....            | 82 |

|      |                                    |     |
|------|------------------------------------|-----|
| 第二节  | 粘性流体的两种流动状态 .....                  | 86  |
| 第三节  | 粘性流体的层流流动 .....                    | 88  |
| 第四节  | 粘性流体的紊流流动 .....                    | 98  |
| 第五节  | 沿程阻力系数 .....                       | 103 |
| 第六节  | 非圆形管道沿程阻力的计算 .....                 | 108 |
| 第七节  | 局部阻力 .....                         | 110 |
| 第八节  | 综合应用举例 .....                       | 115 |
| 第九节  | 管道计算 电子计算机在管道计算中的应用 .....          | 122 |
| 第十节  | 水击现象 .....                         | 135 |
| 第十一节 | 相似原理及模型试验方法 .....                  | 138 |
|      | 习题 .....                           | 147 |
| 第五章  | 理想流体的有旋流动和无旋流动 .....               | 153 |
| 第一节  | 流体流动的连续性方程 .....                   | 153 |
| 第二节  | 流体微团运动的分析 有旋流动和无旋流动 .....          | 155 |
| 第三节  | 理想流体的运动微分方程 .....                  | 160 |
| 第四节  | 伯努里积分式和欧拉积分式 伯努里方程 .....           | 162 |
| 第五节  | 涡线 涡管 涡束和漩涡强度 .....                | 164 |
| 第六节  | 速度环量 斯托克斯定理 .....                  | 165 |
| 第七节  | 汤姆生定理 海尔姆霍兹漩涡定理 .....              | 169 |
| 第八节  | 有势流动 速度势和流函数 流网 .....              | 172 |
| 第九节  | 几种简单的不可压缩流体的平面流动 .....             | 175 |
| 第十节  | 几种简单的平面无旋流动的迭加 .....               | 182 |
| 第十一节 | 平行流绕圆柱体无环流的平面流动 .....              | 185 |
| 第十二节 | 平行流绕圆柱体有环流的平面流动 库塔——儒可夫斯基公式 .....  | 189 |
| 第十三节 | 叶型和叶栅的几何参数和气流参数 .....              | 191 |
| 第十四节 | 叶栅的库塔——儒可夫斯基公式 .....               | 194 |
| 第十五节 | 叶型上的压力分布 .....                     | 196 |
| 第十六节 | 绕叶型有环流的流动 库塔条件 .....               | 198 |
|      | 习题 .....                           | 200 |
| 第六章  | 粘性流体绕物体的流动 .....                   | 203 |
| 第一节  | 不可压缩粘性流体的运动微分方程(纳维尔——斯托克斯方程) ..... | 203 |
| 第二节  | 附面层的基本概念 .....                     | 209 |
| 第三节  | 层流附面层的微分方程 .....                   | 210 |
| 第四节  | 附面层的动量积分关系式 .....                  | 213 |
| 第五节  | 附面层的位移厚度和动量损失厚度 .....              | 215 |
| 第六节  | 平板的层流附面层的近似计算 .....                | 216 |
| 第七节  | 平板的紊流附面层的近似计算 .....                | 218 |
| 第八节  | 平板的混合附面层的近似计算 .....                | 222 |
| 第九节  | 曲面附面层的分离现象 .....                   | 223 |
| 第十节  | 绕圆柱体流动 卡门涡街 .....                  | 225 |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 第十一节       | 物体的阻力 阻力系数 .....        | 231        |
| 第十二节       | 雷诺数很小时绕静止圆球的定常平行流 ..... | 234        |
| 第十三节       | 自由淹没射流 .....            | 239        |
| 第十四节       | 管道入口段中附面层的形成 .....      | 244        |
|            | 习题 .....                | 245        |
| <b>第七章</b> | <b>气体动力学基础 .....</b>    | <b>247</b> |
| 第一节        | 气体定常流动的基本方程组 .....      | 247        |
| 第二节        | 音速 .....                | 248        |
| 第三节        | 微弱扰动波在气体中的传播 .....      | 250        |
| 第四节        | 气体一元等熵流动的基本方程 .....     | 252        |
| 第五节        | 气体流动的速度与通道截面的关系 .....   | 256        |
| 第六节        | 收缩喷管和缩放喷管 .....         | 258        |
| 第七节        | 在等截面管中有摩擦的绝热流动 .....    | 262        |
| 第八节        | 绕凸钝角的超音速流动 膨胀波 .....    | 266        |
| 第九节        | 冲波的特征及其种类 .....         | 269        |
| 第十节        | 正冲波的形成和传播速度 .....       | 270        |
| 第十一节       | 正冲波前后气流参数的关系 .....      | 272        |
| 第十二节       | 斜冲波的形成 .....            | 274        |
| 第十三节       | 斜冲波前后气流参数的关系 .....      | 275        |
| 第十四节       | 超音速气流折转角与斜冲波角的关系 .....  | 277        |
| 第十五节       | 突跃压缩与等熵压缩的比较 波阻 .....   | 279        |
| 第十六节       | 冲波的相交和反射 .....          | 281        |
| 第十七节       | 喷管在非设计工况下的流动分析 .....    | 283        |
| 第十八节       | 冲波与附面层的相互干扰 .....       | 285        |
| 第十九节       | 绕机翼近音速和超音速流动的定性分析 ..... | 286        |
|            | 习题 .....                | 287        |
|            | 参考书 .....               | 289        |

# 引 言

流体力学是研究流体平衡和运动规律的科学。它研究流体流动的基本规律；研究流体绕过某种物体或流过某种通道时的速度分布、压力分布、能量损失及其同固体间的相互作用。作为基础和工程实际的需要，它也研究流体平衡时的条件及其压力分布规律。

流体力学在许多工业技术中有着广泛的应用。水利工程的建设、造船工业的发展是水静力学的建立和水动力学的发展密切相关的。航空工业中各种飞机和飞行器的设计都离不开空气动力学和气体动力学的基本原理。在电力工业中，不论是水电站、火电站，还是原子能电站、地热电站，它们的工作介质都是流体，所有动力设备的设计都必须服从流体流动的规律。机械工业中的润滑、冷却、液压传动、气力输送以及液压和气动控制问题的解决，都必须依靠流体力学的理论。在冶金工业中，也会遇到象气体在炉内的流动、液态金属在炉内或铸模内的流动以及冷却、通风等流体力学问题。化学工业中的流体力学问题则更多，因为大部分化学工艺流程都是伴随有化学反应、传质、传热的流动过程。石油工业中也有大量的流体力学问题，例如油、水、气的渗流问题，油、气的自喷、抽吸和输送问题，以及原油中多种产品的提炼、分离等等。土木建筑中的给水排水、采暖通风是流体力学问题，海洋中的波浪、环流、潮汐以及大气中的气旋、环流和季风等等都是流体力学问题。人体的循环系统也是流体系统，因此象人工心脏、心肺机、助呼吸器等的设计都要依赖于流体力学的基本原理。这样看来，流体力学确是许多工业技术部门必须应用和研究的一门重要学科。

高等学校的电厂热能动力专业是为电力工业培养“德、智、体全面发展的又红又专的电厂热能动力方面高级工程技术人材”的。电厂各种热力设备中的工作介质都是流体，诸如水、汽、空气、烟气以及低沸点的流体（如地热电站中用的丙酮、氯乙烷、氟利昂等）和热等离子体（磁流体发电）等等。只有切实地了解和掌握流体在各种热力设备中的流动规律，才能熟悉和掌握这些设备的性能和运行规律，也才能在电力生产中充分发挥这些设备的效益，更好地为社会主义的四个现代化服务。流体力学和热力学、传热学等构成热能动力专业的主要专业基础课，是学好本专业必要的基础课程。

本教材不可能讲述以上这些流体的所有流动规律，而只能讲述那些基本的共同的流动规律。在学习本课程时，则应着重于掌握流体力学的基本概念、基本原理以及基本的计算方法和实验技能，为学好后继课程，为从事电力生产和热力设备的革新，为进一步研究特殊流体（例如两相流、等离子体等）的流动以及流体在热力设备中的特殊流动规律打下坚实的基础。

为了便于学习，本教材共分七章。第一章流体及其物理性质，讲述与流体运动规律有关的几个主要物理性质。第二章流体静力学，主要讲述流体处于静止（或相对静止）状态的条件及其压力分布规律。第三章流体流动的基础，讲述研究流体流动的欧拉方法、系统

表 0-1 国际制单位与公制工程单位对照换算表

| 量         | 国 际 制 单 位 |             |                    |                    | 公 制 工 程 单 位       |                             |        | 1 公制工<br>程单位换<br>成国际制<br>单位时应<br>乘的系数                        | 备 注 |
|-----------|-----------|-------------|--------------------|--------------------|-------------------|-----------------------------|--------|--------------------------------------------------------------|-----|
|           | 类 别       | 名 称         | 代 号                |                    | 名 称               | 用公制基本<br>单位表示的<br>关 系 式     |        |                                                              |     |
|           |           |             | 中 文                | 国 际                |                   |                             |        |                                                              |     |
| 长 度       | 基 本 单 位   | 米           | 米                  | m                  | 米                 | m                           | 9.806  | 在公制工程单位中为导<br>出单位                                            |     |
| 质 量       |           | 千克(公斤)      | 千克(公斤)             | kg                 | 工程质量单位            | $m^{-1} \cdot kg \cdot s^2$ |        | SI单位中也使用 $^{\circ}C$ ,<br>$273.15 + t^{\circ}C = T^{\circ}K$ |     |
| 时 间       |           | 秒           | 秒                  | s                  | 秒                 | s                           |        |                                                              |     |
| 热力学温度     |           | 开尔文         | 开                  | K                  | 摄氏( $^{\circ}C$ ) | K                           |        |                                                              |     |
| 平 面 角     | 辅 单 位     | 弧 度         | 弧 度                | rad                | 弧 度               |                             |        |                                                              |     |
| 立 体 角     |           | 球 面 度       | 球 面 度              | sr                 | 球 面 度             |                             |        |                                                              |     |
| 力         | 导 出 单 位   | 牛 顿         | 牛                  | N                  | 公斤(千克力)           | kgf                         | 9.806  | 在公制工程单位中为基<br>本单位                                            |     |
| 力 矩       |           | 牛 顿 米       | 牛·米                | N·m                | 公斤米               | kgf·m                       | 9.806  |                                                              |     |
| 压力(压强)、应力 |           | 帕 斯卡        | 帕                  | Pa                 | 公斤每平方米            | $kgf \cdot m^{-2}$          | 9.806  |                                                              |     |
| 表面张力      |           | 牛 顿 每 米     | 牛/米                | N/m                | 公斤每米              | $kgf \cdot m^{-1}$          | 9.806  |                                                              |     |
| 密 度       |           | 千 克 每 立 方 米 | 千克/米 <sup>3</sup>  | kg/m <sup>3</sup>  | 工程质量单位每立方米        | $m^{-4} \cdot kg \cdot s^2$ | 9.806  |                                                              |     |
| 动力粘度      |           | 帕 斯 卡 秒     | 帕·秒                | Pa·s               | 公斤秒每平方米           | $kgf \cdot s \cdot m^{-2}$  | 9.806  |                                                              |     |
| 能、功、热量    |           | 焦 耳         | 焦                  | J                  | 公斤米               | kgf·m                       | 9.806  | 工程单位中还用千卡<br>$1 kcal = 427 kgf \cdot m$                      |     |
| 功 率       |           | 瓦 特         | 瓦                  | W                  | 公斤米每秒             | $kgf \cdot m \cdot s^{-1}$  | 9.806  |                                                              |     |
| 热容、焓      |           | 焦耳每开尔文      | 焦/开                | J/K                | 千卡每度              |                             | 4186.8 |                                                              |     |
| 比热容、比焓    |           | 焦耳每千克开尔文    | 焦/(千克·开)           | J/(kg·K)           | 千卡每公斤度            |                             | 4186.8 |                                                              |     |
| 比 能       |           | 焦耳每千克       | 焦/千克               | J/kg               | 千卡每公斤             |                             | 4186.8 |                                                              |     |
| 热导率(导热系数) |           | 瓦特每米开尔文     | 瓦/(米·开)            | W/(m·K)            | 千卡每米秒度            |                             | 4186.8 |                                                              |     |
| 面 积       |           | 平 方 米       | 米 <sup>2</sup>     | m <sup>2</sup>     | 平方米               | m <sup>2</sup>              |        |                                                              |     |
| 体 积       |           | 立 方 米       | 米 <sup>3</sup>     | m <sup>3</sup>     | 立方米               | m <sup>3</sup>              |        |                                                              |     |
| 比 体 积     |           | 立方米每千克      | 米 <sup>3</sup> /kg | m <sup>3</sup> /kg | 立方米每公斤            | $m^3 \cdot kgf^{-1}$        |        |                                                              |     |
| 速 度       |           | 米 每 秒       | 米/秒                | m/s                | 米每秒               | $m \cdot s^{-1}$            |        |                                                              |     |
| 加 速 度     |           | 米 每 秒 平 方   | 米/秒 <sup>2</sup>   | m/s <sup>2</sup>   | 米每秒平方             | $m \cdot s^{-2}$            |        |                                                              |     |
| 角 速 度     |           | 弧度每秒        | 弧度/秒               | rad/s              | 弧度每秒              |                             |        |                                                              |     |
| 角 加 速 度   |           | 弧度每秒平方      | 弧度/秒 <sup>2</sup>  | rad/s <sup>2</sup> | 弧度每秒平方            |                             |        |                                                              |     |
| 频 率       |           | 赫 兹         | 赫                  | Hz                 | 赫兹                | s <sup>-1</sup>             |        |                                                              |     |

与控制体的概念及其计算公式，并着重讲述理想流体一元流动的连续性方程、伯努里方程、动量方程及其应用。第四章粘性流体的一元流动，主要讲述粘性流体一元流动的规律及其应用。此外，还介绍了有压管道中常会遇到的水击现象以及流动相似的规律。第五章理想流体的有旋流动和无旋流动，主要讲述理想流体的二元有旋流动和无旋流动。对于连续性方程、流体微团的运动分析、欧拉运动微分方程等则按三元推导，以加强理论基础。关于绕机翼和翼栅流动则介绍其基本原理。第六章粘性流体绕物体的流动，主要讲述粘性流体运动微分方程（纳维尔——斯托克斯方程）、附面层的概念、流体沿平板作定常流动时附面层的近似计算以及粘性流体绕过圆球和圆柱的流动，并介绍等温自由淹没射流。第七章气体动力学基础，讲述微弱扰动在可压缩流体中的传播特征，并着重讲述可压缩流体一元等熵流动的规律及其应用，讲述膨胀波的概念以及正冲波、斜冲波的概念和计算。此外还介绍了等截面管中有摩擦的绝热流动。

在叙述本教材的主要内容之前，要说明一下本教材采用的单位制。根据1977年5月27日国务院颁发的《中华人民共和国计量管理条例（试行）》第三条规定：“我国的基本计量制度是米制（即‘公制’），逐步采用国际单位制。”和教育部“关于教材采用国际单位制的通知”的精神，本教材将全部采用国际单位制。为了便于同原先采用的公制工程单位衔接起来和在必要时进行换算，特将与流体力学有关的国际制单位（SI单位）和公制工程单位的对照和换算关系列于表0-1，国际制词冠列于表0-2。

表 0-2 国 际 制 词 冠

| 因 数       | 词 冠      | 代 号 |    | 因 数        | 词 冠        | 代 号 |       |
|-----------|----------|-----|----|------------|------------|-----|-------|
|           |          | 中文  | 国际 |            |            | 中文  | 国际    |
| $10^{18}$ | 艾可萨(exa) | 艾   | E  | $10^{-1}$  | 分(déci)    | 分   | d     |
| $10^{15}$ | 拍它(peta) | 拍   | P  | $10^{-2}$  | 厘(centi)   | 厘   | c     |
| $10^{12}$ | 太拉(téra) | 太   | T  | $10^{-3}$  | 毫(milli)   | 毫   | m     |
| $10^9$    | 吉咖(giga) | 吉   | G  | $10^{-6}$  | 微(micro)   | 微   | $\mu$ |
| $10^6$    | 兆(méga)  | 兆   | M  | $10^{-9}$  | 纳诺(nano)   | 纳   | n     |
| $10^3$    | 千(kilo)  | 千   | k  | $10^{-12}$ | 皮可(pico)   | 皮   | p     |
| $10^2$    | 百(hecto) | 百   | h  | $10^{-15}$ | 飞母托(femto) | 飞   | f     |
| $10^1$    | 十(déca)  | 十   | da | $10^{-18}$ | 阿托(atto)   | 阿   | a     |

# 第一章 流体及其物理性质

## 第一节 流体的定义和特征

通常我们说能流动的物质为流体。从力学的特征讲，流体是一种受任何微小剪切力都能连续变形的物质。只要这种力继续作用，流体就将继续变形（流动）；只有当外力停止作用，变形才会停止。固体则不同，当受到剪切力作用时，固体仅产生一定程度的变形，只要作用力保持不变，固体的变形也就不再变化。由此可见，流体与固体不同，流体具有容易变形（流动）的特征，这就是流体的流动性。

流体按照它们的集态的不同又可分为液体和气体。气体是比液体更易变形和流动的物质。这是因为，气体的分子分布比液体要稀疏得多。在相同的外界条件下，气相分子与液相分子的大小并无显著差异，而气体所占的体积可以达到相同质量液体体积的约  $10^3$  倍。可见，气体的分子距很大（与分子直径约为  $2.5 \times 10^{-10}$  米相比），分子间的吸引力是微不足道的。因而，气体的分子除去跟器壁和自身相互碰撞外，可以自由运动，故它极易变形和流动，而且总是充满它能够达到的全部空间。液体则由于分子距较小，分子间的吸引力较大，在周围分子的作用下它能够作没有一定方向和没有固定周期的无规则振动，同时也能够在其他分子间作移动，但不能象气体那样自由运动。所以，液体的流动性不如气体。此外，液体具有一定的体积，并取容器的形状。当液体和气体接触时便会出现液体同气体间的交界面，这种交界面称为液体的自由表面。

## 第二节 流体作为连续介质的假设

众所周知，任何流体都是由无数分子组成的，分子与分子间是有空隙的。这就是说，从微观角度看，流体并不是连续分布的物质。但是，流体力学并不研究微观的分子运动，而只研究流体的宏观的机械运动。在研究流体的宏观运动中，我们所取的最小的流体微元是体积为无穷小的流体微团（或称流体质点）。流体微团虽小，但却包含着为数甚多的分子。在工程上通常  $1 \text{ 毫米}^3$  是很小的体积，但它在标准状态（ $0^\circ\text{C}$ ，1 标准大气压<sup>①</sup>）下所能包含的气体分子的数目就有  $2.7 \times 10^{18}$  个。可见，气体分子及其间的空隙都是极其微小的。只要我们在研究流体运动时所取的流体微团包含有足够多的分子，从而使各物理量的统计平均值有意义，我们就可以不去研究无数分子的瞬时状态（这是分子动力学的研究内容），而只研究描述流体运动的某些宏观属性（例如密度、速度、压力、温度、粘度、剪应力、内能等）。这就是说，可以不去考虑分子间存在的空隙，而把流体视为由无数连续分布的流体微团所组成的连续介质。这就是流体的连续介质的假设。

① 1 标准大气压(atm) = 101325 帕 =  $101325 \text{ N/m}^2$ 。

既然在流体力学中把流体作为连续介质来处理,则表征流体属性的密度、速度、压力、温度等物理量一般地在空间也应该是连续分布的。这是因为,如果流体内某点(即该点的流体微团)的属性发生了变化,则由于分子运动所产生的扩散作用或流体微团紊乱运动所进行的质量、动量和热量交换,必然会引起它周围流体的同一属性也发生变化,而这种变化在空间上和时间上必然是逐渐地连续地进行的。当然例外的情况也是有的,例如超音速气流中出现冲波时,冲波前后的流体参数将发生突变,这将在可压缩流体的流动中加以讨论。由此可以认为:除个别情况(冲波等)外,对于流体的连续运动,表征流体属性的各物理量应该是空间坐标和时间的单值连续可微函数。这样,我们就有可能利用微分方程等数学工具去研究流体的平衡和运动的规律了。

顺便提及,把流体作为连续介质来处理,对于大部分工程技术问题都是正确的,但对于某些特殊问题则是不适用的。例如,当分子的自由行程和所涉及的最小有效尺寸可以相比拟时(例如,火箭在高空非常稀薄的气体中飞行以及高真空技术等),就必须舍弃宏观的连续介质的研究方法,而代之以分子动力论的微观方法。

在研究流体的宏观运动中,最常遇到的流体属性是流体的压力、密度和粘度,不论是在各种管道的流动计算中,还是在绕过物体的流动计算中,它们都是要用到的主要物理量。在深水作业、水击现象和高速气流的流动中,我们将必须考虑流体可压缩的属性,即流体的压缩性与膨胀性。在遇到液体与气体、液体与气体和固体有界面时,正如在液滴的形成、小股射流以及毛细管中所遇到的那样,液体的表面性质必须加以考虑。在气蚀等现象中还会遇到饱和蒸汽压力,在可压缩流体的流动中还会遇到内能、熵等属性,由于这些物理量在热力学中已经作了较详细的讨论,这里不再赘述。下面将分别讨论以上经常遇到的一些流体属性。

### 第三节 流体的密度和重度

#### 一、流体的密度

流体的密度是流体的重要属性之一,因为它所表征的是流体在空间某点质量的密集程度。我们考虑流体中围绕着某点的体积 $\delta V$ ,其中流体的质量为 $\delta m$ ,则比值 $\delta m/\delta V$ 为体积 $\delta V$ 内流体的平均密度。令 $\delta V \rightarrow 0$ ,而取该比值的极限,便可得到该点处的流体密度

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

$\rho$ 表示流体单位体积内所具有的质量。单位为千克/米<sup>3</sup>。

必须指出,正如在流体的连续介质假设中所讨论的那样,这里数学上的 $\delta V \rightarrow 0$ ,从物理上应理解为体积缩小为无穷小的流体质点,该点的体积同被考察的流体体积相比是完全可以忽略不计的,但它必须包含足够多的分子,而不失去把流体当作连续介质来处理的基础。以后遇到的类似情况都应该这样去理解。

假如流体是均匀的流体,显然流体的密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中  $m$ ——流体的质量（千克）；  
 $V$ ——流体的体积（米<sup>3</sup>）。

二、流体的重度

在重力场中单位体积流体所具有的重量称为重度。流体的重度可计算如下：

对于非均匀流体 
$$\gamma = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\delta V} \tag{1-3}$$

对于均匀流体 
$$\gamma = \frac{W}{V} \tag{1-4}$$

式中  $\gamma$ ——流体的重度（牛/米<sup>3</sup>）；  
 $\delta W$ 、 $W$ ——流体的重量（牛）；  
 $\delta V$ 、 $V$ ——流体的体积（米<sup>3</sup>）。

流体的重度和密度之间的关系为

$$\gamma = \rho g \qquad \rho = \gamma / g \tag{1-5}$$

式中  $g$ ——重力加速度，通常  $g = 9.806$  米/秒<sup>2</sup>。

表1-1列出了在标准大气压几种常用流体的密度和重度，表1-2列出了在标准大气压下水、空气和水银的密度随温度而变化的数值。

表 1-1 常用流体的密度和重度

| 流 体 名 称 | 温 度(°C) | 密 度(千克/米 <sup>3</sup> ) | 重 度(牛/米 <sup>3</sup> ) | 备 注          |
|---------|---------|-------------------------|------------------------|--------------|
| 蒸 馏 水   | 4       | 1000                    | 9806                   |              |
| 海 水     | 15      | 1020~1030               | 10000~10100            |              |
| 普 通 汽 油 | 15      | 700~750                 | 6800~7350              |              |
| 石 油     | 15      | 880~890                 | 8630~8730              |              |
| 润 滑 油   | 15      | 890~920                 | 8730~9030              |              |
| 酒 精     | 15      | 790~800                 | 7750~7840              |              |
| 水 银     | 0       | 13600                   | 133400                 |              |
| 熔 化 生 铁 | 1200    | 7000                    | 68600                  |              |
| 空 气     | 0       | 1.293                   | 12.68                  |              |
| 氧       | 0       | 1.429                   | 14.02                  |              |
| 氮       | 0       | 1.251                   | 12.28                  |              |
| 氢       | 0       | 0.0899                  | 0.881                  |              |
| 一 氧 化 碳 | 0       | 1.250                   | 12.27                  |              |
| 二 氧 化 碳 | 0       | 1.976                   | 19.40                  |              |
| 二 氧 化 硫 | 0       | 2.927                   | 29.10                  |              |
| 水 蒸 汽   | 0       | 0.804                   | 7.88                   | 为便于计算而推算到0°C |

顺便提及，不应把流体的重度同流体的比重相混淆。比重是指某流体的重量与4℃时同体积水的重量的比值，它也等于流体的密度或重度与4℃时水的密度或重度的比值，用  $S_d$  表示

$$S_d = \rho_f / \rho_w \tag{1-6}$$

式中  $\rho_f$ ——流体的密度（千克/米<sup>3</sup>）；  
 $\rho_w$ ——4℃时水的密度（千克/米<sup>3</sup>）。

表 1-2

不同温度下的水、空气和水银的密度 (千克/米<sup>3</sup>)

| 流 体 名 称 | 温 度 (°C) |        |        |        |        |        |        |
|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|         | 0        | 10     | 20     | 40     | 60     | 80     | 100    |
| 水       | 999.87   | 999.73 | 998.23 | 992.24 | 983.24 | 971.83 | 958.35 |
| 空气      | 1.29     | 1.24   | 1.20   | 1.12   | 1.06   | 0.99   | 0.94   |
| 水银      | 13600    | 13570  | 13550  | 13500  | 13450  | 13400  | 13350  |

### 三、流体的比体积

流体密度的倒数称为比体积, 即单位质量的流体所占有的体积, 用  $v$  表示

$$v = 1/\rho \quad (1-7)$$

它的单位为米<sup>3</sup>/千克。

### 四、混合气体的密度

混合气体的密度可按各组分气体所占体积百分数计算如下:

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2 + \cdots + \rho_n \alpha_n = \sum_{i=1}^n \rho_i \alpha_i \quad (1-8)$$

式中  $\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——混合气体中各组分气体的密度;

$\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_n$ ——混合气体中各组分气体所占的体积百分数。

【例 1-1】已经测得锅炉烟气各组分气体的体积百分数分别为:  $\alpha_{\text{CO}_2} = 13.6\%$ ,  $\alpha_{\text{SO}_2} = 0.4\%$ ,  $\alpha_{\text{O}_2} = 4.2\%$ ,  $\alpha_{\text{N}_2} = 75.6\%$ ,  $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = 6.2\%$ , 试求烟气的密度。

【解】由表1-1查得在标准状态下  $\rho_{\text{CO}_2} = 1.98 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{SO}_2} = 2.93 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{O}_2} = 1.43 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{N}_2} = 1.25 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0.804 \text{ kg/m}^3$ 。将已知数值代入式(1-8), 得烟气在标准状态下的密度

$$\begin{aligned} \rho &= 1.98 \times 0.136 + 2.93 \times 0.004 + 1.43 \times 0.042 + 1.25 \times 0.756 + 0.804 \times 0.062 \\ &= 1.34 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

## 第四节 流体的压缩性和膨胀性

随着压力的增高, 体积便缩小, 随着温度的升高, 体积便膨胀, 这是所有流体的共同属性, 即流体的压缩性和膨胀性。

### 一、流体的压缩性和膨胀性

流体的压缩性用单位压力所引起的体积变化率表示, 称为体积压缩系数, 以  $\beta_p$  表示之。当温度不变时, 体积压缩系数由下式确定

$$\beta_p = -\frac{\delta V/V}{\delta p} = -\frac{\delta V}{V \delta p} \quad (1-9)$$

式中  $\delta p$  为压力的增量,  $\delta V/V$  为流体相应的体积变化率。由于压力增大, 体积缩小,  $\delta p$  与  $\delta V$  异号, 故在等号的右侧加一负号。 $\beta_p$  的单位为米<sup>2</sup>/牛。式(1-9)表明, 对于同样的压力增量,  $\beta_p$  值大的流体, 其体积变化率大, 较易压缩;  $\beta_p$  值小的流体, 其体积变化率小,

较难压缩。

体积压缩系数的倒数为体积弹性系数，用 $K_p$ 表示

$$K_p = \frac{1}{\beta_p} = - \frac{\gamma \delta p}{\delta \gamma} \tag{1-10}$$

工程上常用体积弹性系数去衡量流体压缩性的大小。显然， $K_p$ 值大的流体的压缩性小， $K_p$ 值小的流体的压缩性大。 $K_p$ 的单位与压力相同，为帕或牛/米<sup>2</sup>。

在一定温度下水的体积弹性系数与压力的关系列于表1-3。由表中可见，水的 $K_p$ 值很大，即它的压缩性很小。通常在工程计算中近似地取水的 $K_p=2.0$ 吉牛/米<sup>2</sup>。

表 1-3 水的体积弹性系数（吉牛/米<sup>2</sup>）

| 温 度 (°C) | 压 力 (工程大气压①) |      |      |      |      |
|----------|--------------|------|------|------|------|
|          | 5            | 10   | 20   | 40   | 60   |
| 0        | 1.85         | 1.86 | 1.88 | 1.91 | 1.93 |
| 5        | 1.89         | 1.91 | 1.93 | 1.97 | 2.00 |
| 10       | 1.91         | 1.93 | 1.97 | 2.01 | 2.06 |
| 15       | 1.93         | 1.96 | 1.99 | 2.05 | 2.13 |
| 20       | 1.94         | 1.98 | 2.02 | 2.08 | 2.17 |

① 工程上常用工程大气压(kgf/cm<sup>2</sup>)作为计量压力的单位。

1 工程大气压 = 98060 帕 = 98060 牛/米<sup>2</sup>。

流体的膨胀性用单位温升所引起的体积变化率表示，称为温度膨胀系数，以 $\beta_T$ 表示之。当压力不变时，温度膨胀系数由下式确定

$$\beta_T = \frac{\delta \gamma / \gamma}{\delta T} = \frac{\delta \gamma}{\gamma \delta T} \tag{1-11}$$

式中 $\delta T$ （或 $\delta t$ ）为温度的增量， $\delta \gamma / \gamma$ 仍为流体相应的体积变化率。由于温度升高，体积膨胀，故 $\delta T$ 与 $\delta \gamma$ 同号。 $\beta_T$ 的单位为1/K或1/°C。流体的温度膨胀系数在工程计算中有时也会用到。在一定压力作用下水的温度膨胀系数与温度的关系列于表1-4。

表 1-4 水的温度膨胀系数 $\beta_T$ （1/°C）

| 压 力 (工程大气压) | 温 度 (°C)             |                      |                      |                      |                      |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|             | 1~10                 | 10~20                | 40~50                | 60~70                | 90~100               |
| 1           | $14 \times 10^{-6}$  | $150 \times 10^{-6}$ | $422 \times 10^{-6}$ | $556 \times 10^{-6}$ | $719 \times 10^{-6}$ |
| 100         | $43 \times 10^{-6}$  | $165 \times 10^{-6}$ | $422 \times 10^{-6}$ | $548 \times 10^{-6}$ | $704 \times 10^{-6}$ |
| 200         | $72 \times 10^{-6}$  | $183 \times 10^{-6}$ | $426 \times 10^{-6}$ | $539 \times 10^{-6}$ |                      |
| 500         | $149 \times 10^{-6}$ | $236 \times 10^{-6}$ | $429 \times 10^{-6}$ | $523 \times 10^{-6}$ | $661 \times 10^{-6}$ |
| 900         | $229 \times 10^{-6}$ | $289 \times 10^{-6}$ | $437 \times 10^{-6}$ | $514 \times 10^{-6}$ | $621 \times 10^{-6}$ |

由表1-4中可以看出,当温度低于50℃时,水的温度膨胀系数 $\beta_T$ 随着压力的增加而增大;当温度高于50℃时, $\beta_T$ 却随压力的增加而减小。

一般情况下,需要同时考虑压力和温度对气体体积和密度变化的影响。对于完全气体①可用状态方程表示它们之间的关系,即

$$pv = RT \quad (1-12)$$

$$\text{或} \quad p/\rho = RT \quad (1-12a)$$

式中  $p$  —— 气体的绝对压力(帕);

$v$  —— 气体的比体积(米<sup>3</sup>/千克);

$R$  —— 气体常数(米·牛/千克·开);

$T$  —— 热力学温度(开);

$\rho$  —— 气体的密度(千克/米<sup>3</sup>)。

状态方程说明,气体的比体积同绝对压力成反比,而同热力学温度成正比。

【例1-2】在厚壁圆筒中受到压缩的水,当压力为 $1 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 时,其体积为 $1000 \text{ cm}^3$ ,当压力增至 $5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 时,其体积变为 $998 \text{ cm}^3$ ,求水的体积弹性系数 $K_p$ 。

【解】将上述实测数据代入式(1-10),可得

$$K_p = -\frac{\delta p}{\delta v/v} = -\frac{(5-1) \times 10^6}{(998-1000)/1000} = 2.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2 = 2.0 \text{ GN/m}^2$$

## 二、可压缩流体和不可压缩流体

由上述可知,流体的压缩性是流体的基本属性,任何流体都是可以压缩的,只是可压缩的程度不同而已。例如,水的压缩性就比较小,通常每增加一个工程大气压,其体积变化率不到万分之一。其他液体的压缩性一般也是比较小的。气体的压缩性就比较大,象等温过程中完全气体的体积同绝对压力成反比,压力增大一倍,体积便要缩小一倍,足见气体的压缩性之大。气体在其他过程中的压缩性也是比较大的。

但是,在工程实际问题中要不要考虑流体的压缩性,则要视具体情况而定。通常把液体视为不可压缩流体,即忽略在一般工程中没有多大影响的微小的体积变化,而把它的密度视为常数。这样处理问题的好处是,使工程计算大为简化。但是,在水击现象、水下爆炸等类问题中,都是把水作为可压缩流体来处理,因为水的压缩性虽然很小,但在这类问题中却是不能忽视的。通常把气体作为可压缩流体来处理,特别是在流速较高压力变化较大的场合,它们的体积的变化是不容忽视的,必须把它们的密度视为变数。但是,在流速不高压力变化较小的场合,却又可忽略压缩性的影响,而把气体视为不可压缩流体。例如,在标准大气条件下,当空气的流速等于68米/秒时,不考虑压缩性所引起的相对误差约等于1%,这在工程计算中一般是可以忽略不计的。这样,我们对不可压缩流体得出的各种运动规律,便可直接应用到这类气体的流动上去。锅炉尾部烟道的风速只有10~20米/秒,压力的变化只有几十个、最多百十个毫米水柱②。因此,完全可以把烟气当作不可压缩流体来处理。

① 热力学中的理想气体在这里称为完全气体,以便与无粘性的理想流体相区分。

② 1毫米水柱(mmH<sub>2</sub>O)相当于9.806牛/米<sup>2</sup>的压力。

## 第五节 流体的粘性

### 一、流体的粘性 牛顿内摩擦定律

实际流体都是有粘性的。流体的粘性指的是，当流体微团间发生相对的滑移时产生切向阻力的性质。粘性形成流体的内摩擦，粘性使流体粘附于它所接触的固体表面。为了理解流体的粘性，可取两块相互平行的平板，假设它们相距  $h$ ，其间充满着流体，上板以  $U$  的速度沿  $x$  轴方向运动，下板静止不动，如图 1-1 所示。由于粘性流体将粘附于它所接触的固体表面，与上板接触的流体将以  $U$  的速度运动，而与下板接触的流体则静止不动。它们中间的流体均作平行于板的运动，且其速度均匀地由下板的零变化到上板的  $U$ 。可见，各流层之间都有相对运动，因而必定产生切向阻力。若要维持这种运动，必须在上板上施加以与摩擦阻力  $F$  大小相等而方向相反的切向力  $F'$ 。实验证明，流体内摩擦阻力的大小与速度  $U$  成正比，与接触面  $A$  成正比，而与两板间的距离  $h$  成反比。写成等式，有

$$F = \mu AU/h \quad (1-13)$$

式中  $\mu$  称作流体的动力粘度，或简称粘度，有时也称绝对粘度。它是同流体的种类及其温度和压力有关的比例系数，在一定温度和压力下，它是个常数。它的单位为帕·秒或千克/米·秒、牛·秒/米<sup>2</sup>。

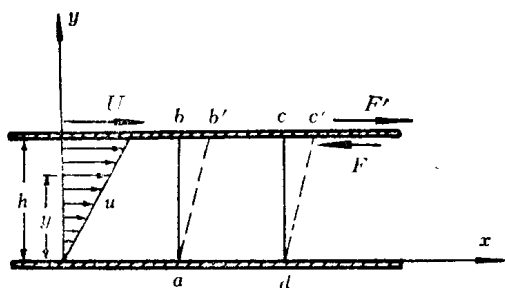


图 1-1 粘性流体内摩擦实验示意

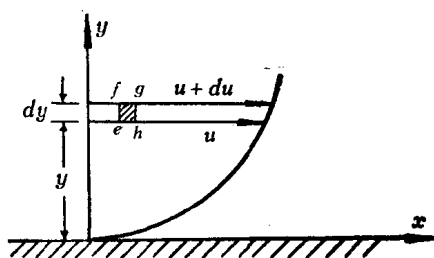


图 1-2 粘性流体的速度分布示意

单位面积上的切向阻力称为切向应力，用  $\tau$  表示

$$\tau = \mu U/h \quad (1-14)$$

式中  $U/h$  表示在垂直于流速的方向上单位长度的速度增量，即流速在其法线方向上的变化率，称速度梯度。显然，在上述特殊情况中，速度梯度是个常数。切向应力的单位为帕或牛/米<sup>2</sup>。

一般情况下，流体流动的速度并不按直线变化，如图 1-2 所示。这样，我们可以取出一无限薄的流体层进行研究。坐标为  $y$  处的流速为  $u$ ，坐标为  $y + dy$  处的流速为  $u + du$ ，显然在厚度为  $dy$  的薄层中速度梯度为  $du/dy$ 。将式 (1-14) 推广应用于流体的各个薄层，可得牛顿 (I. Newton) 内摩擦定律

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-15)$$