前　言

本书是根据国家教委审订的高等学校机械类流体力学课程的基本要求，结合多年教学改革的实践，并吸收兄弟院校教学改革的成功经验而编写的。

该书以流体力学的基本理论为主，力求系统地讲述流体运动的基本规律。遵循简明扼要，深入浅出，循序渐进的原则，着重阐明基本概念，使学生在掌握流体力学基本理论的基础上，进一步掌握研究流体力学的方法，培养分析和解决问题的能力。另外书中还对液压专业中有关问题的基本理论作了介绍（液压专题部分）。

该书可作为机械类液压传动及控制专业的流体力学教材，也可作为机械类其它专业的“工程流体力学”的教材（只讲授基础部分），本书也可供有关技术人员作参考。该书的基础部分可用 30～40 学时授完，全书用 70 学时左右。

本书由乔中华主编，由太原重型机械学院王明智教授主审。王教授仔细审阅了书稿并提出许多宝贵意见，帮助编者避免了不少错误。参加编写的有江苏理工大学王存堂（第一、六章），乔中华（第二、三、四、五、七、八、九章）。在书稿的整理过程中得到了太原重型机械学院液压教研室魏聪梅、安高成、刘志奇等老师和研究生张力平、范振东以及太原钢铁（集团）有限公司设计院的王海拴、王治中和白灵宝同志的热情帮助，在此表示衷心地感谢。

由于编者的水平有限，实践经验不足，在编写过程中难免有不当和错误之处，希望广大读者和专家给予批评指正。

编　者

目 录

第一章　绪论

§1-1　流体力学的研究对象

流体力学的研究对象是流体。流体包括液体和气体。流体力学是依据经典力学基本定律，运用数学（理论）方法和实验方法研究流体平衡和运动规律及其实际应用的一门学科，是力学的一个分支。

流体力学分流体静力学和流体动力学两大部分。前者研究静止流体中的压强分布规律及流体与固体接触面的作用力等问题，后者研究运动流体运动参数的变化规律及与固体接触面的相互作用力等问题。

根据研究问题的侧重面不同，研究流体力学问题的学科还有一个分支——水力学。流体力学侧重于数学分析，它研究问题时，往往要求数学上的严密性和精确性，但因流体的运动极为复杂，某些问题很难纯粹用数学方法获得解决。水力学则偏重于实验研究，它以流体力学的理论为基础，但不受数学上严密性的束缚，遇到用数学方法不能解决问题时，便通过实验，以实验资料和经验公式来解决。在现代的流体力学中，也引入了某些实验资料和经验公式，因而两门科学已在逐步接近而成为一门理论与实践紧密结合的科学。

流体力学是一门重要的技术基础课。它的任务是为学生学习有关专业课程及解决生产实际问题奠定一定的基础。涉及流体的工程技术部门是多方面的，例如水力工程、机械制造、流体输送、动力机械、交通运输及化学、冶金等各个部门中都将遇到各种问题，需要应用流体力学的知识来解决。因此，学习本课程的目的，就是要掌握这方面的客观规律，为解决生产实际问题服务。

§1-2　流体的概念

流体与固体的区别是易流动性，这也是流体命名的由来。所谓易流动性包括两个特点：第一点是流体不能承受拉力，因而流体内部永远不存在抵抗拉伸变形的拉应力；第二点是流体不能承受剪切力，任何微小的剪切力都会导致流体的连续变形。易流动性使流体本身不能保持一定的形状，只能取所在容器的形状。

液体与气体的区别是不可压缩性（严格地讲应该是少压缩性）。液体的抗压缩能力极大，在很大压强的作用下，液体的体积变化却极小。常常认为液体具有不可压缩性，而气体的抗压缩能力较小，所以具有一定的压缩性。

流体是由分子组成的，分子之间有一定的空隙，即从微观角度来看，流体是不连续的，空间点上的运动参数是不定的，这样就给用数学方法研究问题带来了困难。由于流体力学是从宏观角度研究流体的机械运动，而不涉及微观的物质结构，因此以宏观的流体质点作为最

小的研究单位。一个流体质点可包含大量的分子，它是能保持宏观物体特性的微小体积的流体单元。从而，把流体看成是由质点组成的，并且认为质点与质点之间没有间断的空隙，而是连绵不断的组成，即把流体看成具有绵续性的连续介质，这就是连续介质的概念。这样，流体中的运动参数将为空间点坐标和时间的连续函数，便有可能采用数学工具来处理解决问题。

§1-3　单位制

本书采用国际单位制（SI）。在 SI 单位中，流体力学涉及到的四个基本单位是：质量 M、长度 L、时间 t 和热力学温度 T。其它物理量的单位为导出单位。

质量的单位是千克（kg），长度的单位是米（m），时间的单位是秒（s），热力学温度的单位是开尔文（K）。力的单位是导出单位，选取使 1kg 质量的物体能获得 1m/s² 加速度的力作为它的单位尺度，并命名为牛顿，用符号 N 表示，即

$$1\mathrm{N}=1\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m/s^2} \tag{1-1}$$

国际单位制中压强的单位为 $\mathrm{N/m^2}$，称为帕斯卡，用符号 Pa 表示，因为这个单位量值太小，在某些工程技术中使用不便，一般采用倍单位兆帕(MPa)或巴（bar），即

$$1\mathrm{MPa}=10^6\,\mathrm{N/m^2}=10^6\,\mathrm{Pa}$$
$$1\mathrm{bar}=10^5\,\mathrm{N/m^2}=10^5\,\mathrm{Pa} \tag{1-2}$$

其它物理量的导出单位在书中有关部分介绍。

§1-4　流体中的作用力

要研究流体受力后的运动规律，首先必须明确流体上的作用力。为此，在流体中取出任意一块体积为 ΔV 的流体（如图 1-1），它的质量为 Δm。这块流体上作用的力，按其作用方式可分为质量力和表面力两种。质量力作用在该体积 ΔV 内所有流体质点上，力的大小与 ΔV 体积内的流体质量 Δm 成正比，而与 ΔV 以外的流体无关。重力、惯性力均为质量力。单位质量的质量力称为单位质量力。单位质量力在数值上就等于加速度。设单位质量力在坐标轴 x、y、z 的投影为 X、Y、Z，则 X、Y、Z 就相当于坐标轴 x、y、z 向的加速度。如果流体只受到地球引力的作用，且 xoy 面为水平面，则单位质量力 X、Y、Z 为

$$X=0,\ Y=0,\ Z=-\Delta mg/\Delta m=-g$$

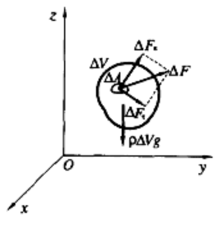
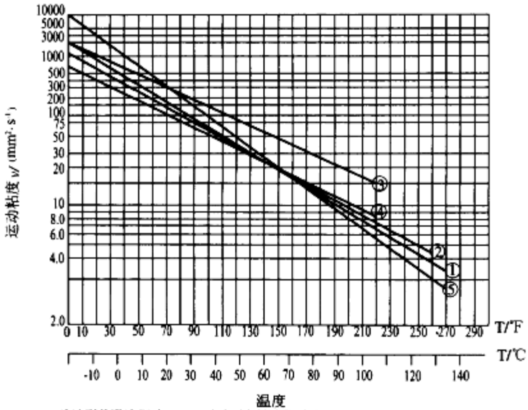


图 1-1　流体中的作用力

式中负号表示重力加速度 g 与坐标轴 z 方向相反。

流体是连续介质，被研究的流体 ΔV 与四周流体表面相互接触而引起相互之间的作用力，例如摩擦力、压力等。这些作用力的特点是只与接触表面积有关，而与流体的质量或体积无关，所以称为表面力。一般可以把表面力分为法向力和切向力。法向力与表面的法线

或
$$\lambda=\frac{\ln(\mu_{30}/\mu_{70})}{40}=\frac{\ln(\nu_{30}/\nu_{70})}{40}$$



1—矿油型普通液压油　2—矿油型高粘度指数液压油　3—水包油乳化液

4—水－乙二醇液　　5—磷酸酯液

图 1-5　典型液压油的粘温特性曲线

根据图 1-5 的数据可以算得液压油的 λ 值。这样算得的 λ 值是在上述温度范围内的平均值。由上式可知 λ 具有温度负一次方的量纲。

液体的粘度将随压强的升高而增大，一般可用下列近似式表示

$$\mu_p=\mu_0 e^{\alpha p} \tag{1-20}$$

式中 μ_p 为压强 p 时的粘度；μ_0 为 1 个大气压时的粘度；α 为粘压系数。

对（1-20）式取对数可得粘压系数 α 为

$$\alpha=\frac{\ln(\mu_p/\mu_0)}{p}=\frac{\ln(\nu_p/\nu_0)}{p}$$

由此可见，α 具有压强倒数的量纲。在 0~50MPa 的压强范围内，一般液压用矿物油每增加 30MPa 的压强，粘度大致增加一倍，即 $p=30$MPa，$\mu_p/\mu_0=2$，所以

$$\alpha=\frac{\ln 2}{30}\approx\frac{1}{43.2}$$

根据公式（1-19）和（1-20），温度和压强对粘度的影响可写成下式

$$\mu=\mu_0 e^{\alpha p-\lambda(t-t_0)} \tag{1-21}$$

式中 μ 是压强为 p、温度为 t 时的粘度；μ_0 是压强为 1 个大气压、温度为 t_0 时的粘度。

习　题

1-1　为什么可以把流体看做连续介质？为什么要把流体作为连续介质？

1-2　什么是流体的体积弹性模量？它表征了流体哪一方面的性质？

1-3　体积弹性模量 $K=1.5\times10^{3}$ MPa 的纯液压油，当作用压强为 21 MPa 时，混入 1% 空气，问混气油液的体积弹性模量为多少？(答：$K_m=880.134$ MPa)

1-4　求空气在 20℃，10MPa 时的密度。　（答：$\rho=118.9\times10^{6}\text{kg/m}^3$）

1-5　什么是流体的粘性？流体怎样会有粘性？为什么温度对液体和气体粘度的影响正好相反？

1-6　已知某油液在 20℃时为 10°E，在 80℃时为 3.5°E，试求温度为 60℃时的运动粘度。（答：$\nu_{60}=0.345\times10^{-4}\,\text{m}^2/\text{s}$）

1-7　某矿物油在 20℃及 1 个大气压时粘度为 $\nu=0.2\times10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$，求在 50℃及 21 MPa 时的动力粘度，设油的密度为 880kg/m^3。　（答：$\mu_{50}=1.64\times10^{-2}\text{Pa}\cdot\text{s}$）

1-8　在 $\delta=40$ mm 的两平行壁面之间充满动力粘度 $\mu=0.7$ Pa·s 的液体，在液体中有一边长为 a=60mm 的薄板以 U=15m/s 的速度沿薄板所在平面内运动，假定沿铅直方向的速度分布是直线规律，如图 1-6。

（1）　当 h=10mm 时，求薄板运动的液体阻力。

（2）　如果 h 可变，求 h 为多大时，薄板运动阻力最小？最小阻力为多大？

[答：（1）$F=5.04$N　（2）$h=\delta/2$，$F_{\min}=3.78$N]

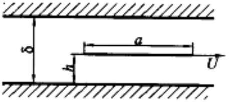


图 1-6　题 1-8 图

1-9　直径 76 mm 的轴在同心缝隙为 0.03 mm，长度为 150mm 的轴承中旋转，轴的转速 226 r / min，测得轴径上的摩擦力矩为 76 Nm，试确定缝隙中油液的动力粘度，如图 1-7。

（答：$\mu=1.86$ Pa·s）

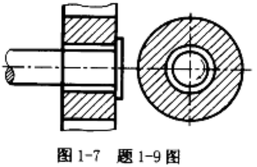


图 1-7　题 1-9 图

1-10　油压机活动部件在自重与轴承摩擦力的作用下匀速下落，已知自重 $G=190$N，$d=152$mm，D=152.02mm，l=200mm，如图 1-8。如果用 $\mu=0.62$ Pa·s 的油，试求活塞部件的下落速度。如果下落速度变为 $U=39$ mm / s，试问此时油的动力粘度变为多少？

（答：U=32 mm / s，$\mu=0.51$Pa·s）

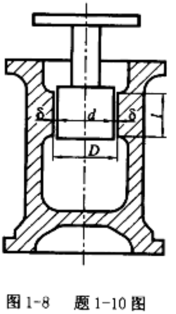


图 1-8　题 1-10 图

第二章　流体静力学

流体静力学是研究流体平衡规律及其应用的。这里所谓的“静”是指流体宏观质点之间没有相对运动，达到了相对平衡。至于流体作为一个整体完全可以同刚体一样的运动。本章主要讨论流体的平衡规律和压强分布规律，以及流体对固体壁面的作用力。因为平衡流体质点之间没有相对运动，流体的粘性表现不出来，切向应力为零。所以本章结论无论对理想流体还是对实际的粘性流体均适用。

§2-1　静压强及其特性

压强是流体工程中最重要、最常用的参数，必须深入了解其概念，掌握其特性。

在静止流体中，单位面积上的内法向表面力称为压强（即静压强）。流体静压强具有两个重要特性。

特性一：流体静压强的方向总是沿着流体作用面的内法线方向。

证明：如图 2-1 所示，在静止流体中，取一作用面 AB，假设作用于该面上的静压强为 p'，方向向外且不与该面垂直，则 p' 可分解为法向应力 σ 和切向应力 τ。因为是静止流体，$\tau=0$，所以 p' 必定与面 AB 垂直。又由于流体分子间引力较小，不能承受拉力，因此 p' 的方向只能沿着作用面 AB 的内法线方向，即图 2-1 中 p 的方向。证毕。

特性二：静止流体中任一点静压强的大小在各个方向相等，即同一点的静压强各向等值。

证明：静止流体中任意取一微元四面体 $ABCD$，其三个相互垂直的边长分别为 dx、dy、dz，如图 2-2 所示。分析微元体的受力，并写出它的力平衡方程式。因为是静止流体，所以

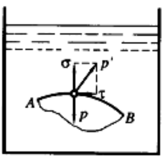


图 2-1　静压强的方向

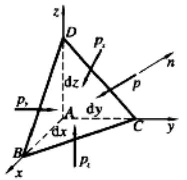


图 2-2　静止流体上的表面力

表面力只有法向力。由于是微元四面体，可以认为在微小面积上的压强 p 是均匀分布的。假设作用在面积 ACD、ABD、ABC 和 BCD 四个面上的压强分别为 p_x、p_y、p_z 和 p，则在相应各面上作用的表面力分别为

$$p_x \frac{1}{2}\mathrm{d}y\mathrm{d}z,\quad p_y \frac{1}{2}\mathrm{d}x\mathrm{d}z,\quad p_z \frac{1}{2}\mathrm{d}x\mathrm{d}y,\quad p\mathrm{d}A$$

式中 dA 为三角形 BCD 的面积。

此外，四面体上还作用有质量力。设在 x、y、z 向的单位质量力分别为 X、Y、Z，流体的密度为 ρ，则微元四面体的质量力在各坐标方向的分力分别为

$$X\rho\frac{1}{6}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z,\quad Y\rho\frac{1}{6}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z,\quad Z\rho\frac{1}{6}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z$$

四面体上力的平衡方程式为 $\Sigma F_x=0$，即

$$p_x\frac{1}{2}\mathrm{d}y\mathrm{d}z-p\mathrm{d}A\cos(n,x)+X\rho\frac{1}{6}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z=0$$

式中 $\cos(n, x)$ 为斜面 BCD 的法线方向 n 与 x 轴向夹角的余弦。由几何关系得

$$\mathrm{d}A\cos(n,x)=\frac{1}{2}\mathrm{d}y\mathrm{d}z$$

所以上式变为

$$(p_x-p)\frac{1}{2}\mathrm{d}y\mathrm{d}z+X\rho\frac{1}{6}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z=0$$

式中表面力是二阶无限小量，而质量力是三阶无限小量，所以质量力可以忽略不计。于是简化得

$$p_x=p$$

同理，由 $\Sigma F_y=0$ 及 $\Sigma F_z=0$ 可得

$$p_y=p,\quad p_z=p$$

由此得出

$$p_x=p_y=p_z=p$$

因为是任意选取的一个四面体，所以就证明了在静止流体中同一点的压强各向等值。根据这个特性可知，静压强不是矢量，而只是个标量，它只取决于空间点的位置，因此只是空间点坐标 x、y、z 的单值函数，即

$$p=p(x, y, z)$$

由此可得静压强的全微分为

$$\mathrm{d}p=\frac{\partial p}{\partial x}\mathrm{d}x+\frac{\partial p}{\partial y}\mathrm{d}y+\frac{\partial p}{\partial z}\mathrm{d}z$$

§2-2　流体的平衡微分方程式

本节讨论静止流体的平衡规律。可以从微元体的受力关系着手，建立其平衡微分方程式。在静止流体中，任意取一微元正六面体（图 2-3），它与 x、y、z 坐标轴平行的棱边分别为 $\mathrm{d}x$、$\mathrm{d}y$ 和 $\mathrm{d}z$，它的体积 $\mathrm{d}V=\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z$，密度为 ρ。下面分析六面体的受力平衡关系。

假设六面体中心点 a 处的压强为 p，因为压强是空间点坐标 x、y、z 的连续函数，所以距中心点 $\pm\mathrm{d}x/2$ 的前后两侧面中心点的压强，按泰勒级数展开，并且只取头二项，用 a 点的压强 p 分别表示为

$$p+\frac{\partial p}{\partial x}\frac{\mathrm{d}x}{2},\qquad p-\frac{\partial p}{\partial x}\frac{\mathrm{d}x}{2}$$

由于六面体侧面的面积很微小，它的中心点的压强可以看做是整个面积上的平均压强，

所以，前后两个侧面上的表面力 dF_x' 和 dF_x 分别为

$$(p+\frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{2})dydz，(p-\frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{2})dydz$$

对于六面体其它四个侧面上，也可按上述方法写出其 dF_y' 、dF_y 、dF_z' 和 dF_z 相应的表达式为

$$(p+\frac{\partial p}{\partial y}\frac{dy}{2})dxdz，(p-\frac{\partial p}{\partial y}\frac{dy}{2})dxdz$$

$$(p+\frac{\partial p}{\partial z}\frac{dz}{2})dxdy，(p-\frac{\partial p}{\partial z}\frac{dz}{2})dxdy$$

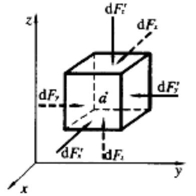


图 2-3　微元六面体上的法向表面力

在静止流体中 $\tau=0$，所以切向表面力为零。

设六面体的单位质量力在三个坐标轴上的分力为 X、Y、Z，则作用在该六面体上的质量力在坐标轴上的分力为

$$X\rho dV = X\rho dxdydz$$
$$Y\rho dV = Y\rho dxdydz$$
$$Z\rho dV = Z\rho dxdydz$$

因为六面体是在平衡状态下，所以 $\Sigma F_x=0$，即

$$(p-\frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{2})dydz-(p+\frac{\partial p}{\partial x}\frac{dx}{2})dydz+X\rho dxdydz=0$$

化简得

$$X\rho dxdydz-\frac{\partial p}{\partial x}dxdydz=0$$

以质量 $\rho dxdydz$ 除之得单位质量的平衡方程式

同理由 $\Sigma F_y=0$ 及 $\Sigma F_z=0$ 得

$$\left.\begin{aligned}X-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}=0\\ Y-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}=0\\ Z-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}=0\end{aligned}\right\}\tag{2-1}$$

（2-1）式就是流体的平衡微分方程式。它是欧拉 1755 年首先导出的，所以又称为欧拉平衡方程式。它表示流体在质量力和表面力作用下的平衡条件。

把（2-1）式中的三式分别乘以 dx、dy、dz，然后相加得

$$\rho(Xdx+Ydy+Zdz)=\frac{\partial p}{\partial x}dx+\frac{\partial p}{\partial y}dy+\frac{\partial p}{\partial z}dz$$

上式等号右边为压强的全微分 dp，因此

$$dp=\rho(Xdx+Ydy+Zdz)\tag{2-2}$$