目录

[B1 流体及其物理性质 2](#_Toc100067120)

[B1.1 连续介质假设 2](#_Toc100067121)

[B1.1.1流体的宏观特性 2](#_Toc100067122)

[B1.1.2 流体质点概念 2](#_Toc100067123)

[B1.1.3 连续介质假设 2](#_Toc100067124)

[B1.2 流体的易变形性 2](#_Toc100067125)

[B1.3 流体的黏性 2](#_Toc100067126)

[B1.3.1 流体黏性的表现 3](#_Toc100067127)

[B1.3.2 牛顿黏性定律 3](#_Toc100067128)

[B1.3.3 黏度 3](#_Toc100067129)

[B1.4 流体的其他物理性质 4](#_Toc100067130)

[B1.4.1 流体的可压缩性 4](#_Toc100067131)

[B1.4.2 表面张力 5](#_Toc100067132)

[B1.5 流体模型分类 5](#_Toc100067133)

[B1.5.1 无黏性流体与黏性流体 5](#_Toc100067134)

[B1.5.2 可压缩流体与不可压缩流体 6](#_Toc100067135)

[B1.5.3 其他流体类型 6](#_Toc100067136)

[B2 流动分析基础 6](#_Toc100067137)

[B2.1 描述流体运动的方法 6](#_Toc100067138)

[B2.2 速度场 6](#_Toc100067139)

[B2.2.1 流量与平均速度 6](#_Toc100067140)

[B2.2.2 一维，二维与三维流动 7](#_Toc100067141)

[B2.2.3 定常与不定常流动 7](#_Toc100067142)

[B2.3 流体运动的几何描述 7](#_Toc100067143)

[B2.3.1 迹线 7](#_Toc100067144)

[B2.3.2 流线 7](#_Toc100067145)

[B2.3.3 脉线 7](#_Toc100067146)

[B2.3.4 流体线 7](#_Toc100067147)

[B2.3.5 流管、流束与总流 7](#_Toc100067148)

[B2.4 流体质点的随体导数 8](#_Toc100067149)

[B2.4.1 加速度场 8](#_Toc100067150)

[B2.4.2质点导数 8](#_Toc100067151)

[B2.5一点邻域内相对运动分析 8](#_Toc100067152)

[B2.5.1亥姆霍兹速度分解定理 8](#_Toc100067153)

[B2.5.2流体元的变形 9](#_Toc100067154)

[B2.5.3 流体元的旋转 9](#_Toc100067155)

[B2.6 几种流动分类 9](#_Toc100067156)

[B2.6.1层流与湍流 9](#_Toc100067157)

[B2.6.2内流与外流 9](#_Toc100067158)

[B2.6.3有旋流动与无旋流动 涡运动基本概念 10](#_Toc100067159)

[B2.7常用的流动分析方法 10](#_Toc100067160)

[B2.7.1基本的物理定律 10](#_Toc100067161)

# B1 流体及其物理性质

## B1.1 连续介质假设

### B1.1.1流体的宏观特性

流体的微观特性：由分子运动决定的物理量的随机性和不连续性

流体团的宏观特性：分子数足够大的条件下，统计平均值在时间上是确定的，在空间上是连续的

### B1.1.2 流体质点概念

微团：具有流体宏观特性的最小体积（即临界体积Δτ）的流体团

微团缺点：1 仍具有线尺度，不能与数学上点的概念统一

2 在流体运动的过程中微团将变形

流体质点：1无线尺度，只作平移运动

2 只在外力作用下作宏观运动

3 将以流体质点为中心的周围临界体积范围内流体分子相关特性的统计平均值作为流体质点的物理量值

### B1.1.3 连续介质假设

流体连续介质模型：假设流体是由连续分布的流体质点组成的介质

## B1.2 流体的易变形性

流体：不能抵抗任何剪力作用下的剪切变形趋势(体积保持不变)，

流体的宏观力学特征：易变形性

固体内的切应力由剪切变形量(相对位移)决定，

流体内的切应力由变形速度(切变率)决定

流体平衡时压强可等值地向各个方向传递，垂直作用与任何方位的平面上

## B1.3 流体的黏性

流体的黏性：带动或阻止邻近流体运动的特性

### B1.3.1 流体黏性的表现

流体黏性表现在相邻两层流体作相对运动时有内摩擦作用，产生的阻力称为粘性切向力

流体内摩擦是两层流体间分子内聚力和分子动量交换的宏观表现

气体内摩擦通过流层间的分子交换和分子动量交换实现，称为表观切应力

流体黏性还表现在流体对固体表面具有黏附作用

壁面不滑移条件：分子间的内聚力将液体黏附在固体表面上，随固体一起运动或静止

### B1.3.2 牛顿黏性定律

其中： 为偏转角，为时间，为速度，为间距

为角变形速率或切变形速率，简称切变率

为速度梯度，表示单位间距的两层流体之间的相对速度

其中： 为切向力，为接触面积

为黏性切应力

为比例系数，称为动力黏度，简称黏度，由液体性质决定，为常数时，流体称为牛顿流体

### B1.3.3 黏度

动力粘度(绝对黏度)：度量流体黏性的物理量，单位泊P，10P=1Pa·s

温度升高，液体黏度降低(由分子内聚力决定)，气体黏度升高(由动量交换决定)

**苏士兰经验公式(Sutherland)**

气体黏度和温度的关系：

其中： 为热力学温度，单位为K，，为苏士兰常数，由气体种类决定，对空气，

液体黏度和温度的关系：

其中： 对于水

压强对黏度影响不大，高压下黏度增大

在常温(15℃~20℃)和常压下 水的黏度，约为空气的55.6倍

空气的黏度

运动粘度(动量扩散系数)ν：与流动稳定性有关，单位m2/s

在常温(15℃~20℃)和常压下 水的运动黏度

空气的运动黏度，约为水的15倍

## B1.4 流体的其他物理性质

### B1.4.1 流体的可压缩性

4℃时，水的密度最大，为

在常温下(15℃~20℃)，空气的密度为

重量密度(重度)ρg：单位为kg/(m2·s2)或N/m3

水的重度取

相对密度SG：液体的重度与4℃时水的重度之比值

水银的相对密度13.6 密度为13.6×103kg/m3

酒精的相对密度0.8 密度为800kg/m3

体积弹性模量(体积模量)K：度量压强引起流体体积和密度的变化，单位为帕Pa，越大表示越不容易被压缩

其中： 为压强增量，为体积相对变化，为声速

水的体积模量为2×109Pa

空气的体积模量为1.4×105Pa

20℃时，水的声速为1480m/s

20℃时，空气的声速为340m/s

海水的密度与压强的关系

其中：

### B1.4.2 表面张力

表面张力系数σ：表示单位长度上的张力，单位为N/m

拉普拉斯公式：

其中： 为压力增量，为曲率半径

接触角θ：液固气交界处作液体表面的切面，切面与固体表面沿液体内部的夹角。当θ为锐角时，称为液体润湿固体。

水对洁净玻璃面的接触角为0°

水银对玻璃面的接触角为140°

毛细现象：玻璃管内的液体在表面张力的作用下液面升高或降低的现象，与液体性质，固壁材料，液面上气体性质，管径有关

毛细现象修正：

其中： 为毛细现象引起的液面升高

为液体密度，为重力加速度，为管直径，为比例系数，单位m2

对水与空气，

对水银与水，

## B1.5 流体模型分类

### B1.5.1 无黏性流体与黏性流体

层流：黏性流体低速运动时的状态

湍流：黏性流体高速运动时的状态

流动曲线：将切应力与切变率的关系画在τ-γ‘坐标平面上的形成的曲线

牛顿流体：流动曲线可以用正比例函数描述

非牛顿流体：流动曲线不能用正比例函数描述

表观粘度μa：描述非牛顿流体中切应力与切变率的比值，是切应力、切变率和时间的非线性函数

剪切变稀(稠)流体：μa随γ‘增大而减小(增大)

屈服应力：部分流体当切应力超过屈服应力时才开始流动

时变性(触变性)流体：表观粘度随切应力作用时间长短而改变的流体

### B1.5.2 可压缩流体与不可压缩流体

其中： Ma为马赫数，V为流速，c为声速，当Ma<0.3或常温下空气声速为340m/s，流速c<100m/s时可视作不可压缩流体

空气密度变化近似公式：

其中： 为静止时空气密度

### B1.5.3 其他流体类型

均质流体：密度处处相等的流体，但不同时刻密度可以不同

正压流体：密度只是压强函数的流体

斜压流体：密度除了和压强有关，还与温度等参数有关的流体

完全气体：即理想气体

# B2 流动分析基础

## B2.1 描述流体运动的方法

拉格朗日法(随体法)

欧拉法(当地法)

## B2.2 速度场

### B2.2.1 流量与平均速度

速度廓线：速度矢量空间分布的包络线图

其中： 为流量，为曲面，为速度矢量，为外法线单位矢量

其中： 为平均速度

其中： 为质量流量

### B2.2.2 一维，二维与三维流动

### B2.2.3 定常与不定常流动

定常流动：流动参数不随时间变化的流动

不定常流动：流动参数随时间变化的流动

## B2.3 流体运动的几何描述

### B2.3.1 迹线

迹线：流体质点的运动轨迹，是实际存在的线

### B2.3.2 流线

流线：指示某一时刻流场中各点的速度矢量方向的假想曲线

定常流动中，迹线和流线重合

### B2.3.3 脉线

脉线(染色线，烟线，条纹线)：在某一瞬时将在某一时段内相继通过某固定点的流体质点连成的线，在定常流中脉线的形状不变，与流线、迹线重合

### B2.3.4 流体线

流体线：在流场中某时刻标记的一串首尾相连的流体质点的连线

### B2.3.5 流管、流束与总流

流管：在流场中由通过任意非流线的封闭曲线上每一点的流线所围成的管状面

流束：流管内的流体

有效截面(过流界面)：流束内处处与流线垂直的截面

微元流束：有效截面为无限小的流束

总流：微元流束的总和

## B2.4 流体质点的随体导数

随体导数(物质导数)：运动物体的物理量随时间的变化率

### B2.4.1 加速度场

### B2.4.2质点导数

算子符号

物理量B的质点导数

其中:

称为当地变化率(局部导数)，反映流场的不定常性影响，若为零，则称流场是定常的

称为迁移变化率(位变导数)，反映流场的不均匀性影响，若为零，则称流场是均匀的，简称均流

## B2.5一点邻域内相对运动分析

### B2.5.1亥姆霍兹速度分解定理

亥姆霍兹速度分解定理：M0点邻域内另一点M的速度M0点的速度+(流体旋转+线应变速率+角变形速率)引起的相对速度

其中： 点M为点M0的邻近点，坐标(x+dx，y+dy)

第一部分为M0的平移速度

第二部分为M绕M0旋转引起的相对速度

第三部分为两点间线元线应变速率引起的相对速度

第四部分为两点间面积元角变形速率引起的相对速度

### B2.5.2流体元的变形

线应变率:流体面元(在三维流动中是体元)在x方向的局部瞬时相对伸长速率

大于0表示正交线元的夹角减小

速度散度:一点邻域内瞬时面积(或体积)相对扩张速率

角变形速率(剪切变形速率,切变率):正交于该点的两线元夹角的瞬时变化率

### B2.5.3 流体元的旋转

旋转角速度:一点邻域内流体绕z轴旋转角速度为xy平面内正交于该点的两线元绕该点的旋转角速度的平均值，逆时针为正

速度旋度

## B2.6 几种流动分类

### B2.6.1层流与湍流

雷诺数

其中: 为密度，为平均流速，为圆管直径，为黏度

### B2.6.2内流与外流

内流：被限制在固体壁面之内的黏性流动

明渠流：液体不充满，存在自由液面的内流

外流：流体对物体的外部绕流

边界层的当地雷诺数

其中：为来流速度，为离前缘距离

### B2.6.3有旋流动与无旋流动 涡运动基本概念

涡量Ω：速度旋度

涡量与流体元角速度的关系

涡线：任意一点的切线方向与涡量方向一致的瞬时矢量线

涡线方程：

涡面：涡量场上一非涡线的曲线上的每一点作涡线构成的曲面

涡管：涡量场上一非涡线的封闭曲线上的每一点作涡线构成的管状面

涡通量：涡量在流场中任意曲面A上的积分

其中： 为面积元的外法矢

的大小表示流过曲面A的涡旋强度；若A为涡管横截面，表示涡管强度

速度环量：沿流场中任意封闭曲线L上的速度线积分

斯托克斯定理：封闭曲线上的速度环量等于曲线所围面积的涡通量

亥姆霍兹第一定律：在同一瞬时，速度环量与涡管强度沿涡管保持不变

有旋流动：存在涡量的流动

分布涡：流场中没有涡旋，但流线存在涡量

集中涡(涡旋)：流体绕中心轴作刚体旋转运动

无旋流动：流场中涡量处处为零的流动

## B2.7常用的流动分析方法

### B2.7.1基本的物理定律