

第1章 黏性流动的基本概念

黏性如何影响流体运动？

课程名称：黏性流体力学

授课教师：徐翱

面向力学、航空航天、能源动力及相关工科专业本科生

物理问题

黏性作用

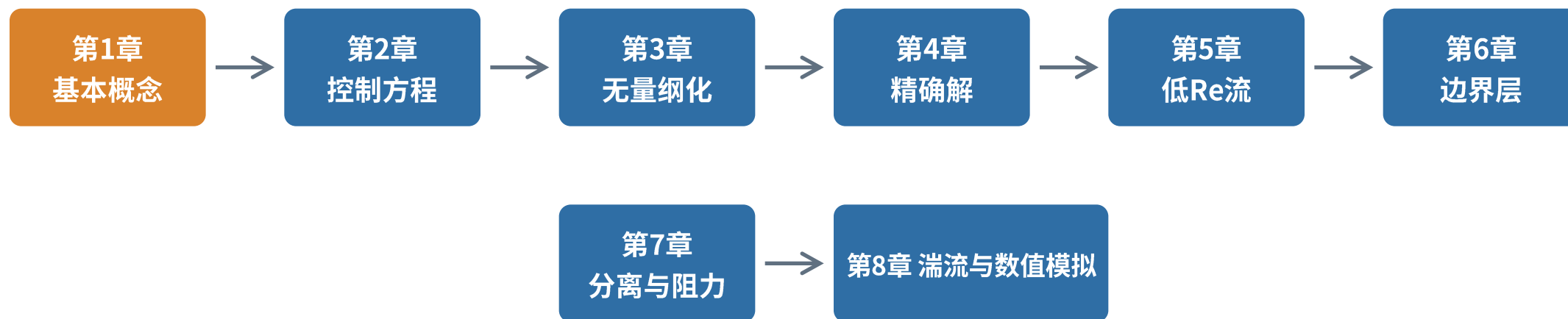
控制方程

尺度分析

流动结构

本章在课程中的位置

全书主线：物理问题 → 黏性作用 → 控制方程 → 尺度与无量纲参数 → 模型简化 → 典型流动 → 工程应用 → 数值计算



本章角色：全书的概念基石。建立连续介质近似、黏性的物理本质、Newton黏性定律、无滑移条件和Reynolds数的初步认识。

前承：基础流体力学中的无黏模型与 Euler 方程。

后启：第2章将以本章概念为基础，从守恒律和本构关系出发建立 Navier–Stokes 方程；第3章将对其进行无量纲化，正式引入 Reynolds 数。

本章知识结构



逻辑主线：连续介质近似 → 理想模型的局限 → 黏性的宏观表现 → 微观动量输运本质 → 定量定律（Newton黏性定律）
→ 物性参数（ μ , ν , 温度依赖） → 壁面边界条件（无滑移） → 惯性与黏性的竞争（Reynolds数） → 流动分类

学习目标

知识目标

1. 说明连续介质近似与流体微元的基本含义
2. 区分理想流体与黏性流体，用 D'Alembert 悖论说明无黏模型的局限
3. 使用 Newton 黏性定律分析简单剪切流动
4. 正确区分动力黏度 μ 与运动黏度 ν ，写出量纲和单位
5. 从动量输运角度解释黏性的物理意义，并说明与热扩散的类比

能力目标

6. 说明无滑移条件与无穿透条件的含义及差别
 7. 对 Newton 流体和常见非 Newton 流体作基本区分
 8. 说明气体和液体黏度随温度变化的典型趋势
 9. 计算 Reynolds 数，并对不同 Re 下的流动状态形成初步物理判断
- 核心能力：**建立"黏性作用 → 方程项 → 尺度 → 流动形态"的关联思维

教学重点与难点

教学重点

- 黏性的物理本质：动量输运与扩散
- Newton 黏性定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$
- 动力黏度 μ 与运动黏度 ν 的区别
- 无滑移条件及其物理后果
- Reynolds 数的物理意义与计算
- D'Alembert 悖论与无黏模型的局限

教学难点

- 黏性抵抗的是"变形"而非"运动"——刚体平移不产生剪切应力
- μ 小不代表 ν 小：空气 μ 远小于水，但 ν 通常更大
- 黏度大小不能单独决定黏性效应的相对重要性
- 高 Re 流动中黏性仍在壁面附近起关键作用
- 无滑移条件是物理模型而非纯数学规定

为什么把流体视为连续介质？

流体力学中的"点"不是数学点，而是一个经过局部平均的**流体微元**（fluid parcel）。

它必须同时满足两个尺度要求：

- **相对于宏观流动尺度足够小**——仍能描述局部变化
- **相对于分子尺度足够大**——包含大量分子，使密度、压强、温度、速度等宏观量具有稳定统计意义

这一近似是宏观流体力学（包括 Navier-Stokes 方程）的基础。

尺度关系

$$\ell_{\text{molecular}} \ll \ell_{\text{parcel}} \ll L_{\text{flow}}$$

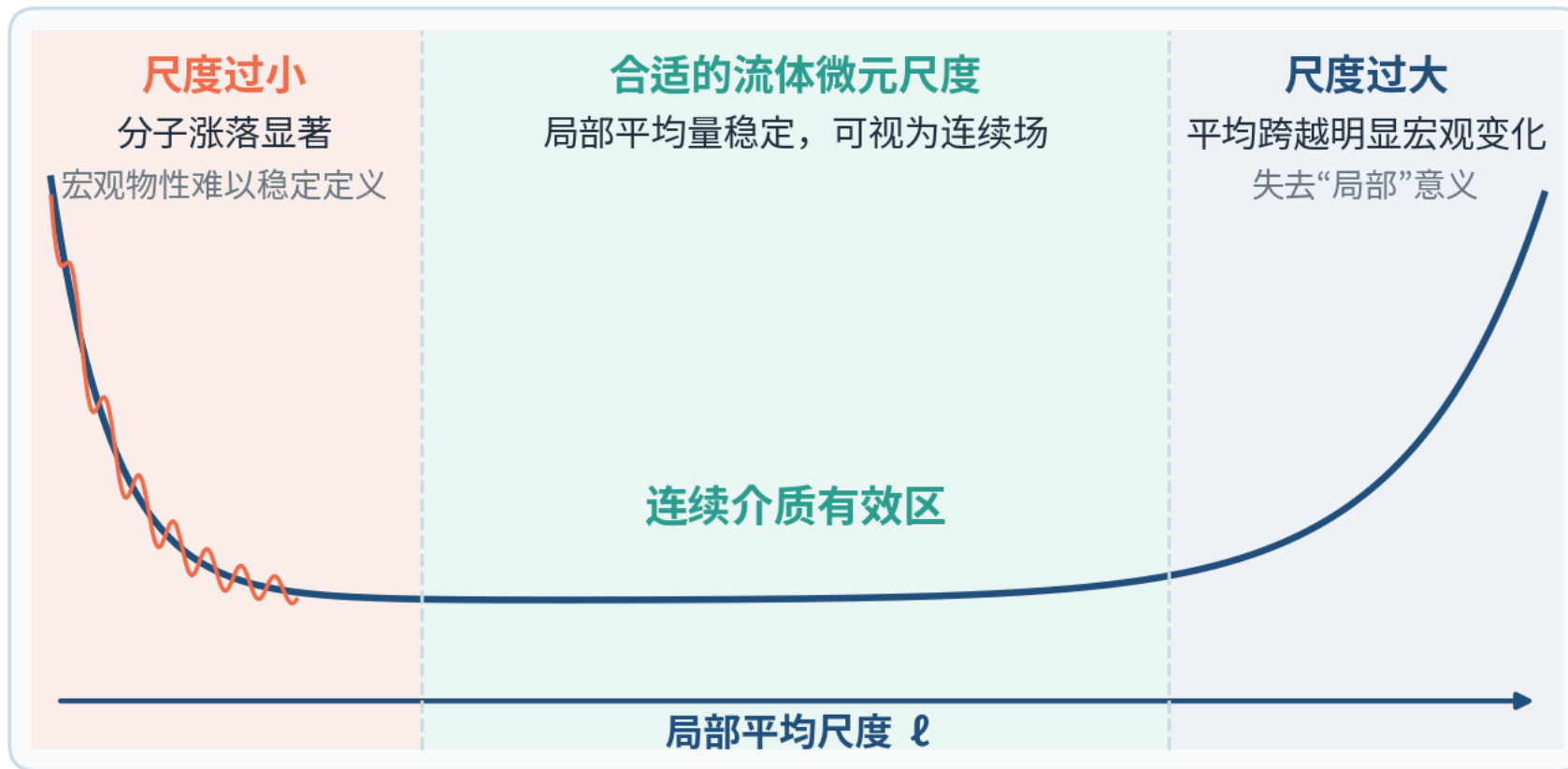
分子尺度 $\ll$ 微元尺度 $\ll$ 流动尺度

工程意义：

在通常工程尺度下，分子平均自由程（空气约 10^{-7} m）远小于装置尺度（ 10^{-3} – 10^2 m），连续介质近似非常可靠。

第2章建立微分控制方程时将默认采用这一观点。

连续介质近似与流体微元的尺度要求



分子尺度 $\ll$ 流体微元尺度 $\ll$ 宏观流动尺度

连续介质近似与流体微元的尺度要求

课堂思考：连续介质近似何时失效？

互动

问题：对气体流动，可用 Knudsen 数比较分子平均自由程 λ_{mfp} 与宏观特征长度 L_c ： $Kn = \frac{\lambda_{mfp}}{L_c}$

当飞行器在高空（极稀薄大气）飞行时，Kn 会增大还是减小？连续介质近似还可靠吗？

Kn $\ll$ 1：分子尺度与流动尺度充分分离，连续介质近似可靠

Kn 不再很小：壁面滑移、非平衡效应、分子运动学描述变得必要

本课程只借此建立**尺度判断**思维，不展开稀薄气体动力学。
提醒：边界条件本身也是物理模型的一部分，不是纯粹的数学规定。

工程问题导入：为什么需要黏性流体力学

真实流体运动中，许多现象无法用无黏模型解释：

管道流动

为什么管内流动需要持续的压降才能维持？能量去了哪里？

飞行器阻力

为什么真实机翼受到阻力？摩擦阻力和压差阻力从何而来？

边界层与分离

为什么高 Re 流动中壁面附近仍有很薄的黏性区域？

核心问题：黏性如何影响流体运动？

- 黏性应力从何而来？
- 黏性如何进入流动控制方程？
- 惯性、黏性、压力、重力如何竞争？为什么 Reynolds 数如此重要？
- 什么情况下黏性主导整个流场？什么情况下黏性集中于壁面附近？

理想流体模型：忽略黏性后的近似

为突出主要物理机制，有时可忽略流体微团间的切向作用，将流体理想化为**无黏流体**（inviscid fluid）。

基本特征： $\mu = 0$ ，即不产生由黏性引起的剪切应力。

术语约定：本书中"理想流体"主要指忽略黏性的无黏模型；是否同时假设不可压缩需另行说明，不把"理想"自动等同于"不可压缩"。

理想流体不是真实物质，而是一种**物理模型**。

无黏近似有效的区域：

- 高 Re 流动中远离固体壁面的区域
- 远离剪切层和尾迹的区域
- 黏性作用相对较弱的外部流动

黏性通常不能忽略的现象：

壁面附近速度变化 · 管道流动阻力 · 摩擦阻力
边界层 · 流动分离 · 剪切层和尾迹
黏性耗散 · 低 Re 数流动

课堂判断：哪些现象中黏性不能忽略？

互动

请判断下列流动现象中，黏性是否通常不能被忽略，并说明理由：

A. 水在大型水库深处的缓慢流动

B. 润滑油在轴承间隙中的流动

C. 高速飞机机翼上方远离壁面的流动

D. 圆柱绕流尾部的尾迹区域

判断要点：关键不在于“流体有没有黏性”，而在于“黏性是否在该区域主导流动结构”。

A 远离壁面且速度梯度小→黏性可能较弱；B 间隙小、速度梯度大→黏性主导；C 外部流→无黏近似可能较好；D 尾迹中有强剪切→黏性重要。

注意：即使 C 中远离壁面区域黏性弱，**机翼表面附近**仍必须考虑黏性（边界层）。

课堂思考：无黏模型能解释阻力吗？

互动

问题：对于定常、不可压缩、无黏且无旋的理想流体绕圆柱流动，理论计算得到沿来流方向的合力 $F_D = 0$ 。
但真实圆柱在流体中运动时显然受到阻力。
这一矛盾说明了什么？无黏理论错了吗？

提示：思考阻力可能来自哪些物理过程？无黏模型中哪些过程被忽略了？
请先独立思考，然后讨论。

D' Alembert 悖论：无黏模型为何会失效？

对于**定常、不可压缩、无黏且无旋**的理想绕流：

- 物体前后的流动和压强分布保持对称
- 对物体表面压强牵引进行面积积分
- 沿来流方向的合力为零

即理想模型预言：

$$F_D = 0$$

然而真实物体在流体中运动时**显然受到阻力**。

悖论的启示：

这个矛盾不意味着无黏理论"错误"。

它说明：**一旦问题的关键机制发生在固体壁面、边界层或分离区域，忽略黏性就可能漏掉决定性物理过程。**

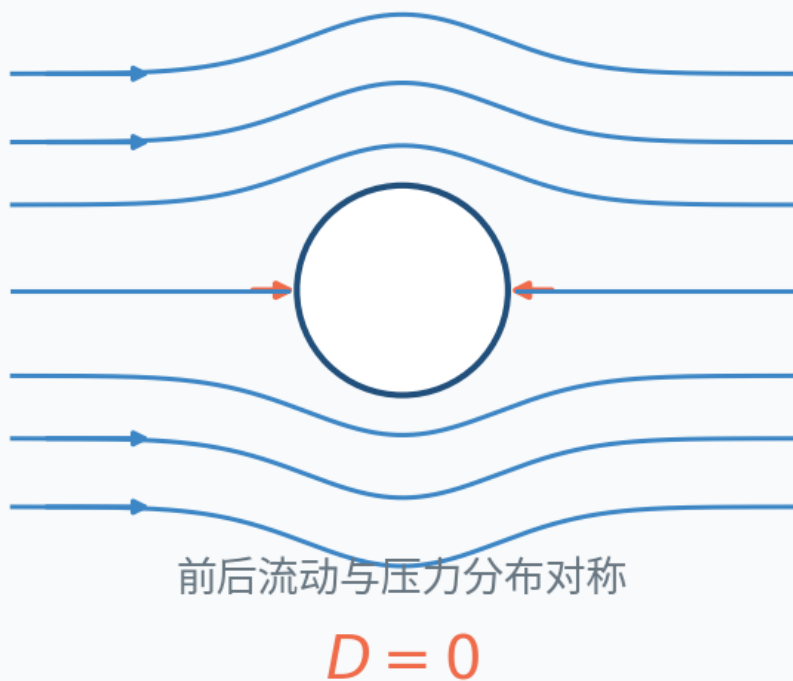
无黏模型在其适用范围内是自洽的，但它的适用范围不包含壁面附近和分离区域。

这正是学习黏性流体力学的出发点。

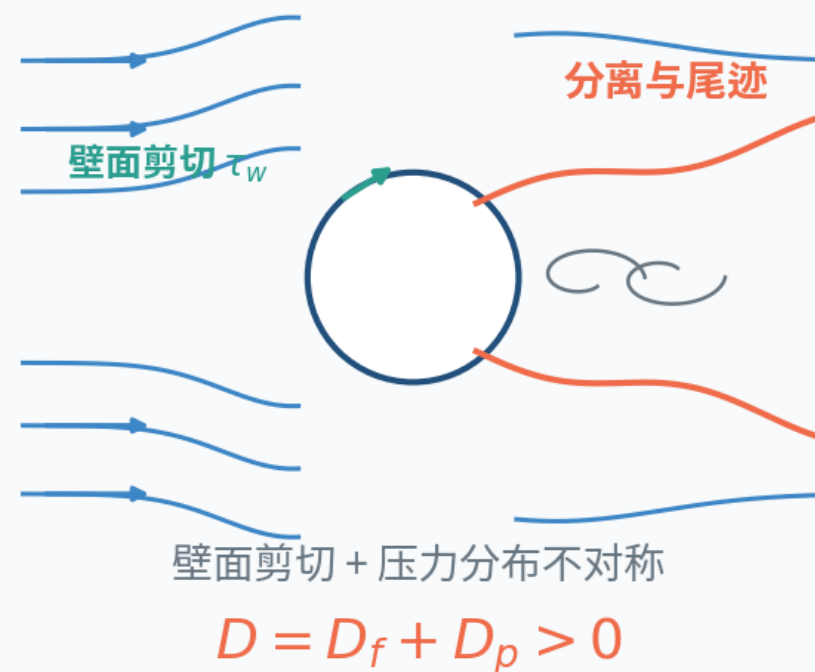
理想绕流与真实黏性绕流的对比

1.1 理想流体与黏性流体

A 理想无黏模型



B 真实黏性流动



Alembert 悖论：理想无黏模型前后对称、零阻力；真实黏性流动有壁面剪切、分离和尾迹，阻力非零

阻力从何而来？摩擦阻力与压差阻力

真实物体的总阻力可概念性分解为两部分：

摩擦阻力 $F_{D,f}$

- 由壁面剪切应力直接产生
- 根源：无滑移条件 $\rightarrow$ 近壁速度梯度 $\rightarrow$ 黏性剪切
- 与壁面面积和剪切应力大小有关
- 在流线型物体（如机翼）总阻力中占比大

$$F_{D,f} \propto \tau_w A_w$$

压差阻力 $F_{D,p}$

- 由物体前后压强分布不对称产生
- 根源：黏性 $\rightarrow$ 边界层 $\rightarrow$ 分离 $\rightarrow$ 尾迹低压区
- 与物体形状和分离程度密切相关
- 在钝体（如圆柱、建筑）总阻力中占主导

$$F_D = F_{D,f} + F_{D,p}$$

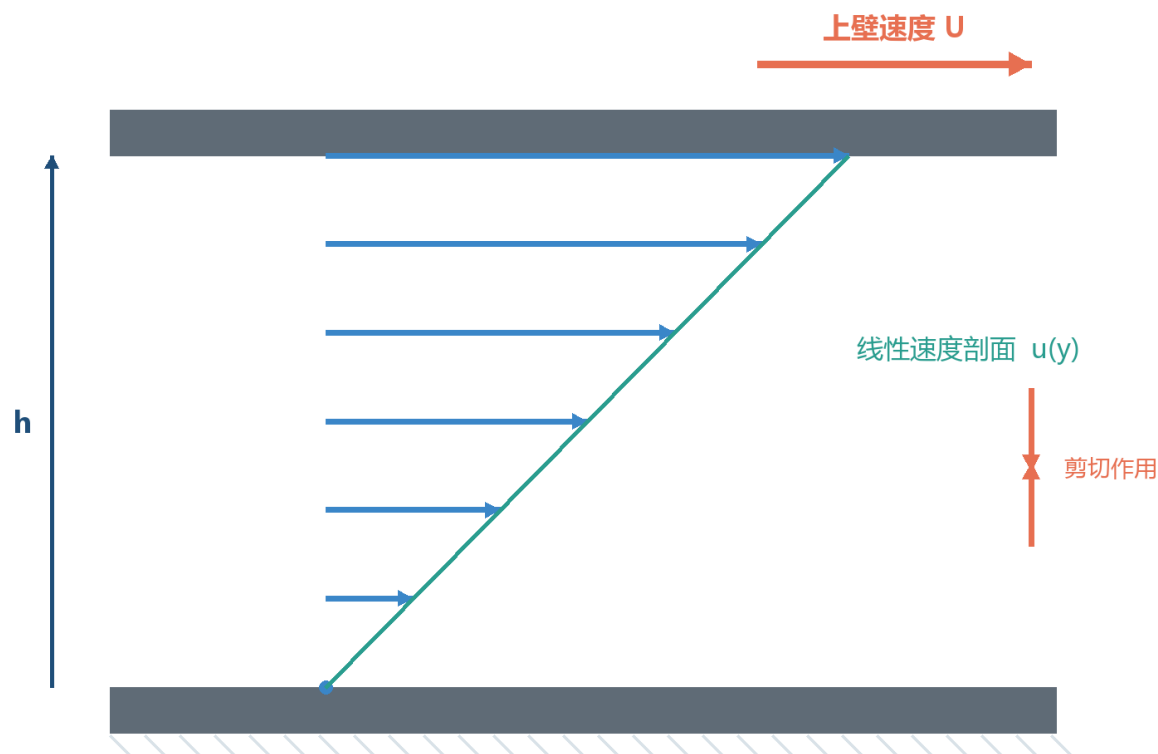
黏性影响阻力的两条路径

1.1 理想流体与黏性流体



黏性的宏观表现：简单剪切流动

1.1 理想流体与黏性流体



实验设置：

两平行平板间距 h
下板固定，上板以速度 U 沿 x 方向运动

观察：

与下板接触的流体近似静止
与上板接触的流体以速度 U 运动
中间速度连续变化

维持上板匀速需要持续施加切向力

高速层拖动低速层，低速层阻滞高速层

这种由流体内部相对运动产生的切向作用，正是黏性的宏观表现之一。速度仅沿 x 方向，且只随 y 变化： $u=u(y)$

Newton 黏性定律：剪切应力与速度梯度

1.3 Newton 黏性定律

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy}$$

各项含义：

- τ_{xy} ：剪切应力（单位面积的切向力）
- $\frac{du}{dy}$ ：速度梯度（变形速率）
- μ ：动力黏度，比例系数

对于线性速度分布 $u(y) = \frac{Uy}{h}$ ：

$$\tau_{xy} = \mu \frac{U}{h} \text{ (常数)}$$

关键认识：

黏性抵抗的是流体的**相对变形**，而不是整体运动。

若流体以 U_0 匀速平移：

$$u = U_0, \quad \frac{du}{dy} = 0$$

则 $\tau_{xy} = 0$ ，不产生剪切黏性应力。

判断黏性作用应考察**相邻位置的速度差**，而非速度本身大小。

动力黏度 μ ：给定变形速率下的应力能力

Newton 黏性定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 中的

比例系数 μ 称为**动力黏度**（dynamic viscosity）。

量纲推导：

SI 单位： $[\mu] = \text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

动力黏度描述流体在给定变形速率下产生黏性应力的能力。

典型数量级（常温常压）：

- 空气： $\mu \approx 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- 水： $\mu \approx 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- 润滑油： $\mu \approx 0.01\text{--}0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- 甘油： $\mu \approx 1.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

注意：判断某个流动中"黏性效应是否重要"，不能仅比较 μ 的大小，还必须考虑密度、速度和特征长度——这正是 Reynolds 数存在的原因。

课堂思考：匀速平移的流体有黏性应力吗？

互动

问题：一个流体整体以恒定速度 $\mathbf{u} = (U_0, 0, 0)$ 作匀速平移。

1. 是否存在速度梯度？
2. 根据简单 Newton 黏性定律，是否产生剪切黏性应力？
3. 这个例子说明黏性抵抗的是"运动"还是"变形"？

解析：(1) 速度处处相同， $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$ ，无速度梯度；(2) $\tau_{xy} = \mu \cdot 0 = 0$ ，不产生剪切应力；(3) 黏性抵抗的是**变形（相对运动）**，而非整体平移运动。

这就是为什么判断黏性效应要看速度梯度，而不是速度大小。

例1.1 平板间简单剪切：剪切应力计算

1.2 Newton 黏性定律

已知：

两平行平板间距 $h = 2 \text{ mm}$
上平板速度 $U = 0.5 \text{ m/s}$
流体动力黏度 $\mu = 0.10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

求： 流体中的剪切应力

假设： 速度近似线性分布 $u(y) = \frac{Uy}{h}$

解：

速度梯度：

$$\frac{du}{dy} = \frac{U}{h} = \frac{0.5}{2 \times 10^{-3}} \text{ s}^{-1} = 250 \text{ s}^{-1}$$

代入 Newton 黏性定律：

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} = 0.10 \times 250 \text{ Pa} = 25 \text{ Pa}$$

结论： 剪切应力由"黏度"和"变形速率"共同决定。高黏度不一定意味着剪切应力大——若速度梯度很小，剪切应力仍可能很小。

运动黏度 ν : 动量扩散率

1.2 Newton 黏性定律

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ν 称为**运动黏度** (kinematic viscosity) 。

量纲: $[\nu] = L^2 T^{-1}$

SI 单位: $[\nu] = \frac{m^2}{s}$

$\frac{L^2}{T}$ 正是典型的"扩散系数"量纲。

物理意义:

ν 不只是 $\frac{\mu}{\rho}$ 的数学组合, 它具有清楚的物理意义:

ν 表征动量通过黏性作用在流体中扩散的能力。

这一认识将在第4章非定常黏性流动和第6章边界层理论中得到进一步体现。

例1.2 动力黏度与运动黏度换算

1.2 Newton 黏性定律

已知：

某流体在给定温度下：

动力黏度 $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

求：运动黏度 ν

解：

由运动黏度定义：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1.0 \times 10^{-3}}{1.0 \times 10^3} \text{ m}^2/\text{s} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

结论：这与常温水的数量级相当。

注意单位： m^2/s ，是扩散系数数量纲。

课堂判断：空气和水，哪个运动黏度更大？

互动

问题：常温常压下，空气的动力黏度 μ 约为水的 $1/55$ 。

那么空气的运动黏度 ν 与水相比如何？请先给出直觉判断，再说明理由。

解析： $\nu = \mu / \rho$ 。空气 $\mu \approx 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ （水的约 $1/55$ ），但空气密度 $\rho \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$ （水的约 $1/830$ ）。

因此 $\nu_{\text{空气}} \approx 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ， $\nu_{\text{水}} \approx 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ——**空气的运动黏度约为水的15倍！**

这意味着：在相同速度和特征长度下，空气中的 Reynolds 数反而比水中小。

教训：不能用“稀/稠”的直觉判断运动黏度或黏性效应的相对重要性。

易错点：μ 小 ≠ ν 小

动力黏度 μ 衡量产生应力的能力；运动黏度 $\nu=\mu/\rho$ 还包含密度的影响。两者的直觉可能相反！

流体	动力黏度 μ (Pa · s)	运动黏度 ν (m²/s)
水	$\approx 1.0\times10^{-3}$ (较大)	$\approx 1.0\times10^{-6}$ (较小)
空气	$\approx 1.8\times10^{-5}$ (远小于水)	$\approx 1.5\times10^{-5}$ (大于水!)

空气的动力黏度远小于水，但运动黏度却通常更大——因为空气密度远小于水。

比较 Reynolds 数时应使用 $Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu}$ ，不能只凭 μ 的大小判断黏性相对作用。

上述数值为常温常压典型量级，具体值随温度和压强而变。

为什么速度梯度会产生剪切应力？

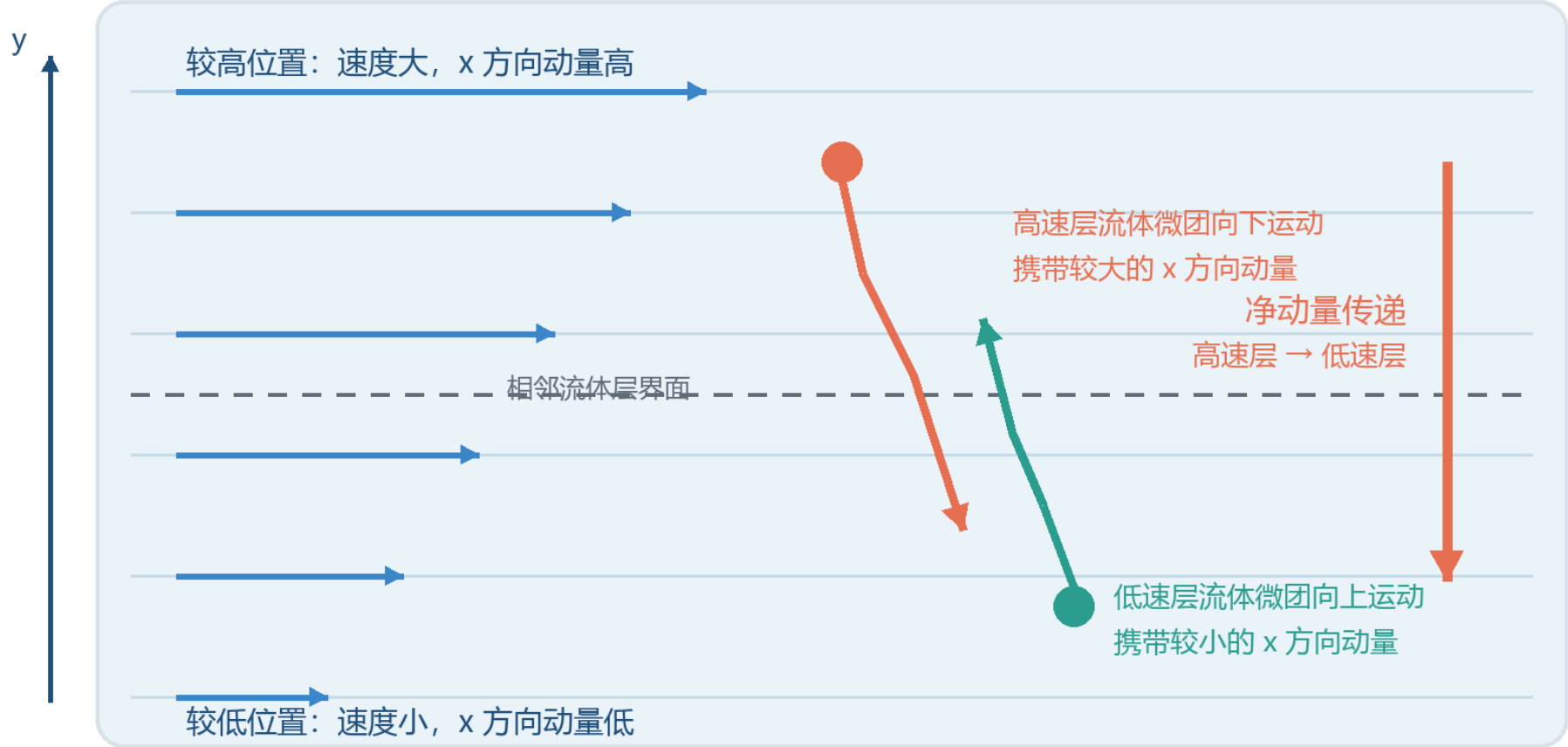
Newton 黏性定律给出了宏观关系。要理解黏性的物理本质，需从**动量运输**的角度思考。

考虑速度随 y 增大的平行流动 $u = u(y)$ ，且 $\frac{du}{dy} > 0$ ：

- 较高位置的流体具有较大的 x 方向动量
- 较低位置的流体具有较小的 x 方向动量
- 分子热运动或微观相互作用使不同位置间发生动量交换
- x 方向动量由高动量区域净传向低动量区域
- 低速层获得动量，高速层失去动量，速度差异逐渐减小

因此：黏性倾向于减弱速度在空间上的非均匀性。

动量输运的微观机制



相邻流体层间的微观交换产生净动量输运：高速层微团向下携带较大动量，低速层微团向上携带较小动量

黏性 = 动量扩散机制

扩散的本质：

某种物理量在空间上不均匀时，通过微观随机运动从高浓度区域向低浓度区域净输运，使分布趋于均匀。

黏性中的动量扩散：

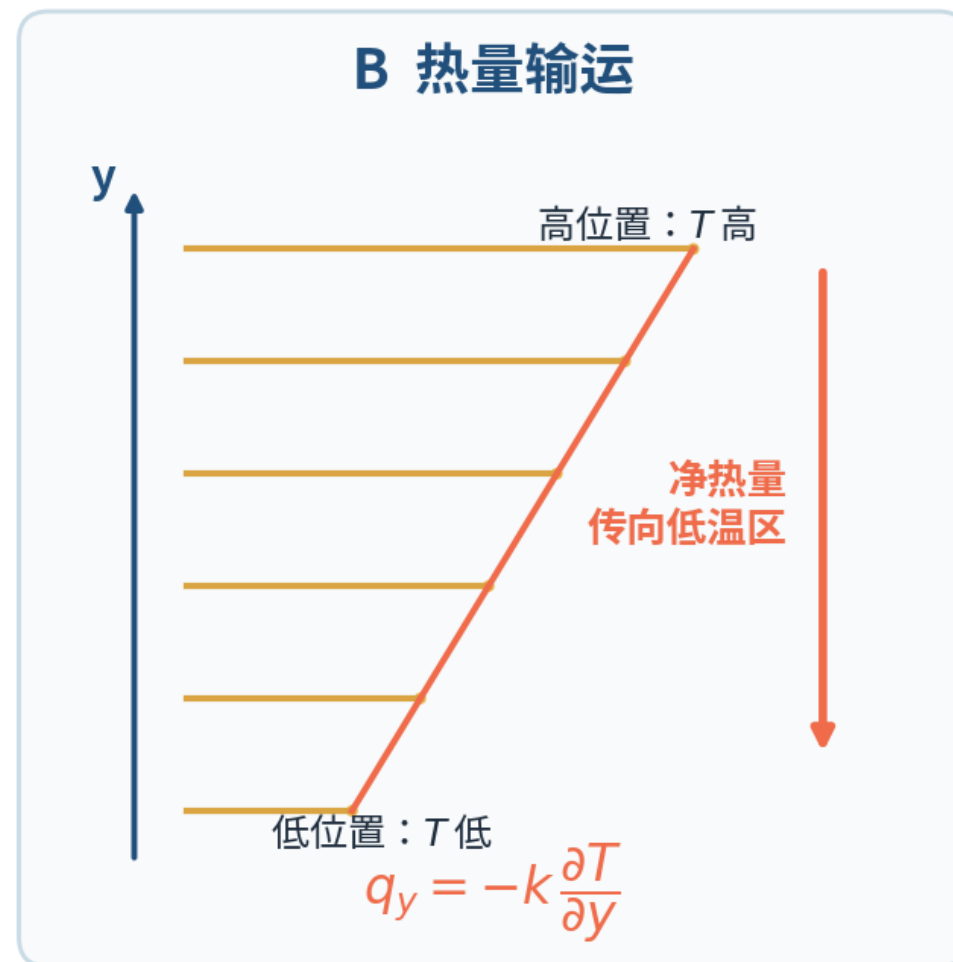
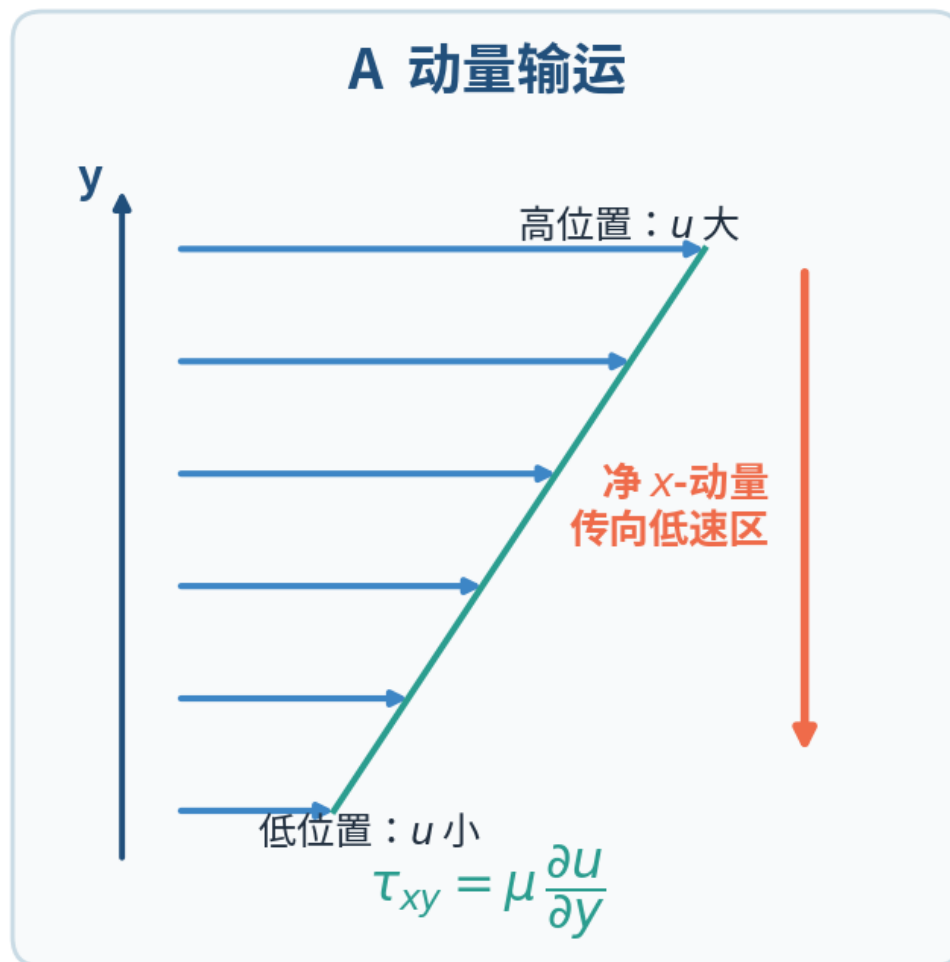
速度（动量/质量）不均匀 $\rightarrow$ 分子交换 $\rightarrow$ 动量净输运 $\rightarrow$ 速度场趋于平滑

本课程的一条主线：

把黏性理解为动量扩散，将帮助理解：

- Stokes 第一问题（非定常扩散）
- 边界层的形成与发展
- 壁湍流中的动量输运增强
- Reynolds 数作为扩散与对流竞争的度量

动量扩散与热扩散的类比



动量运输与热量运输的类比：速度梯度驱动动量扩散，温度梯度驱动热扩散

动量输运与热量输运：系统对比

对比项	动量输运	热量输运
非均匀量	速度 u	温度 T
梯度	$\frac{\partial u}{\partial y}$	$\frac{\partial T}{\partial y}$
通量	剪切应力 τ	热通量 q
比例系数	动力黏度 μ	导热系数 k_T
扩散率	运动黏度 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$	热扩散率 $\alpha = \frac{k_T}{\rho c_p}$

两者都说明：**空间梯度驱动某种物理量在相邻区域间传递，从而削弱原有的不均匀性。**
 ν 和 α 具有完全相同的量纲 $[\nu] = [\alpha] = L^2 T^{-1}$ ——这是理解 Prandtl 数等无量纲参数的基础。

1. 动量扩散

如果某区域存在较大速度梯度，黏性会在相邻区域间传递动量，使速度场趋于平滑。

宏观表现：

- 壁面附近速度从0过渡到来流速度
- 剪切层中速度逐渐均匀化
- 非定常流动中动量向内部渗透

2. 机械能耗散

黏性作用使宏观有序运动的机械能逐渐转化为内能。

工程实例：

- 管流中必须持续保持压降才能维持流动
- 输入的机械能最终通过黏性耗散转化为热
- 飞行器蒙皮因黏性耗散而升温

黏性既是动量运输机制，也是机械能耗散机制。

Newton 流体：应力与变形速率线性相关

1.4 Newton 流体与非 Newton 流体

若在一定温度和压强下，流体的剪切应力与剪切变形速率满足**线性关系**，且 μ 与剪切速率无关，则称该流体为 **Newton 流体**。

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

简单剪切中 $\dot{\gamma} = \frac{du}{dy}$

Newton 流体的 μ 是常数（给定温度压强下），不随剪切速率变化。 $\tau - \dot{\gamma}$ 曲线是过原点的直线。

常见 Newton 流体：

- 空气
- 水
- 多数低分子量液体
- 在一定工作范围内的许多工程流体

本课程约定：后续若无特别说明，主要讨论 Newton 流体。

非 Newton 流体：概念辨析

1.4 Newton 流体与非 Newton 流体

若剪切应力与剪切速率不满足常黏度线性关系，或材料还表现出屈服、记忆和弹性等特性，就属于**非 Newton 流体**。

剪切变稀 (pseudoplastic)

表观黏度随剪切速率增大而减小

例：聚合物溶液、血液、涂料

剪切增稠 (dilatant)

表观黏度随剪切速率增大而增大

例：泥浆、玉米淀粉糊、某些悬浮液

Bingham 流体 (viscoplastic)

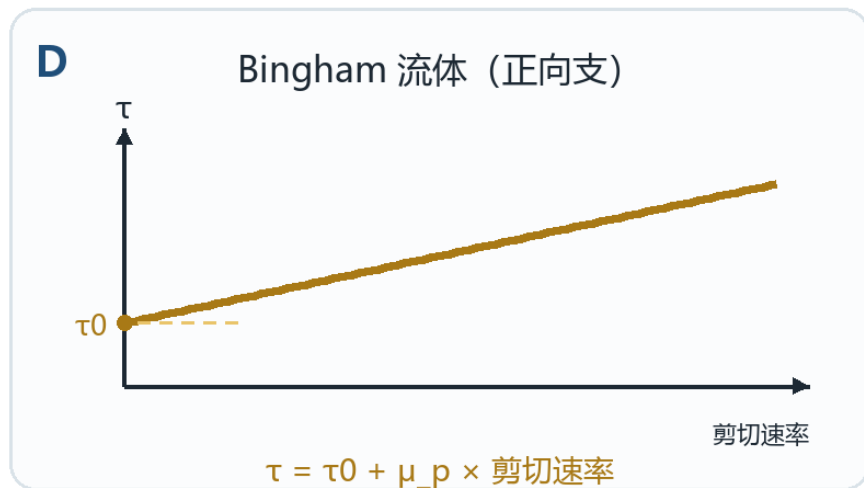
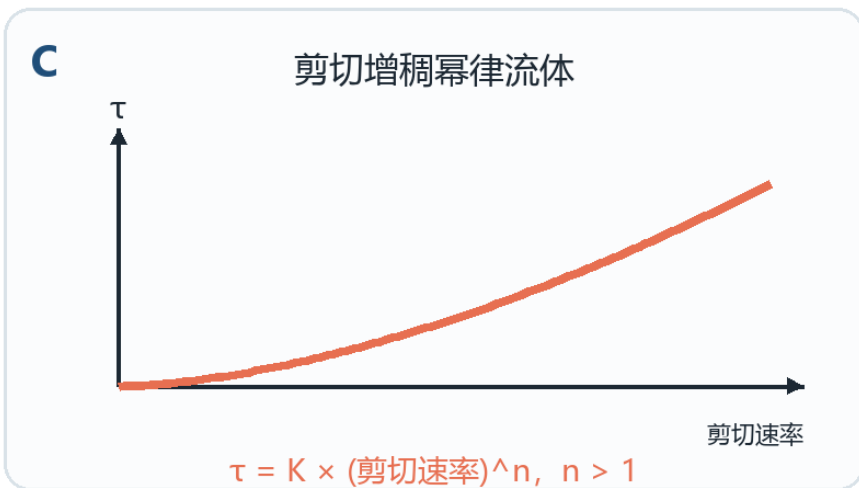
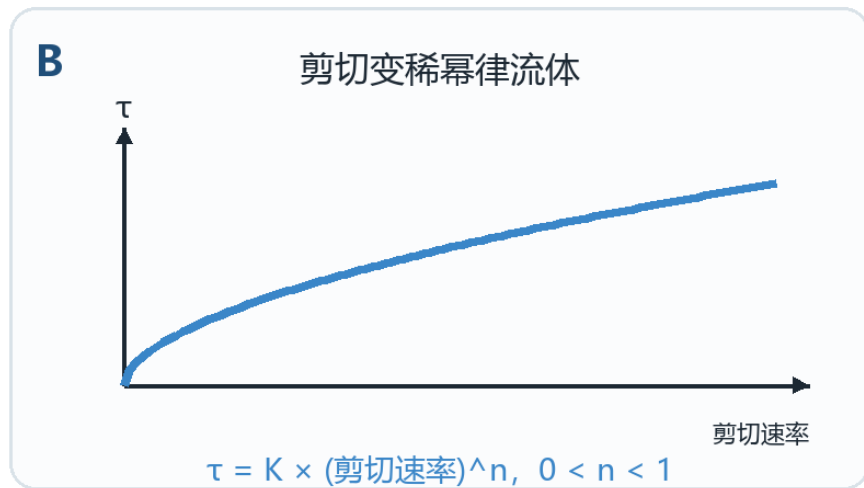
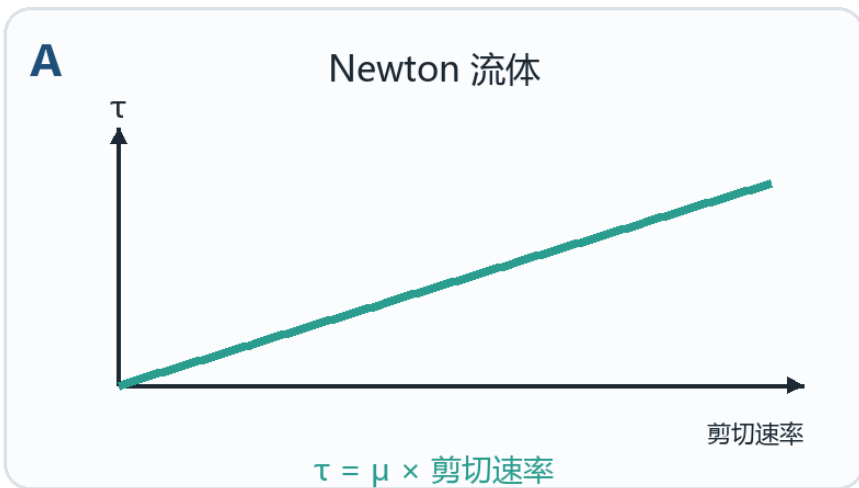
存在屈服应力 τ_0 ，超过屈服后近似线性

例：牙膏、泥浆、某些食品

本课程只作概念辨析；后续控制方程、解析解、边界层和湍流均以 Newton 流体为主线。

四类典型流变关系曲线

1.4 Newton 流体与非 Newton 流体



四类典型流变关系：Newton流体为过原点直线；剪切变稀/增稠呈曲线；Bingham流体有屈服截距。各面板纵轴独立缩放。

非牛顿流体应用举例

1.4 Newton 流体与非 Newton 流体

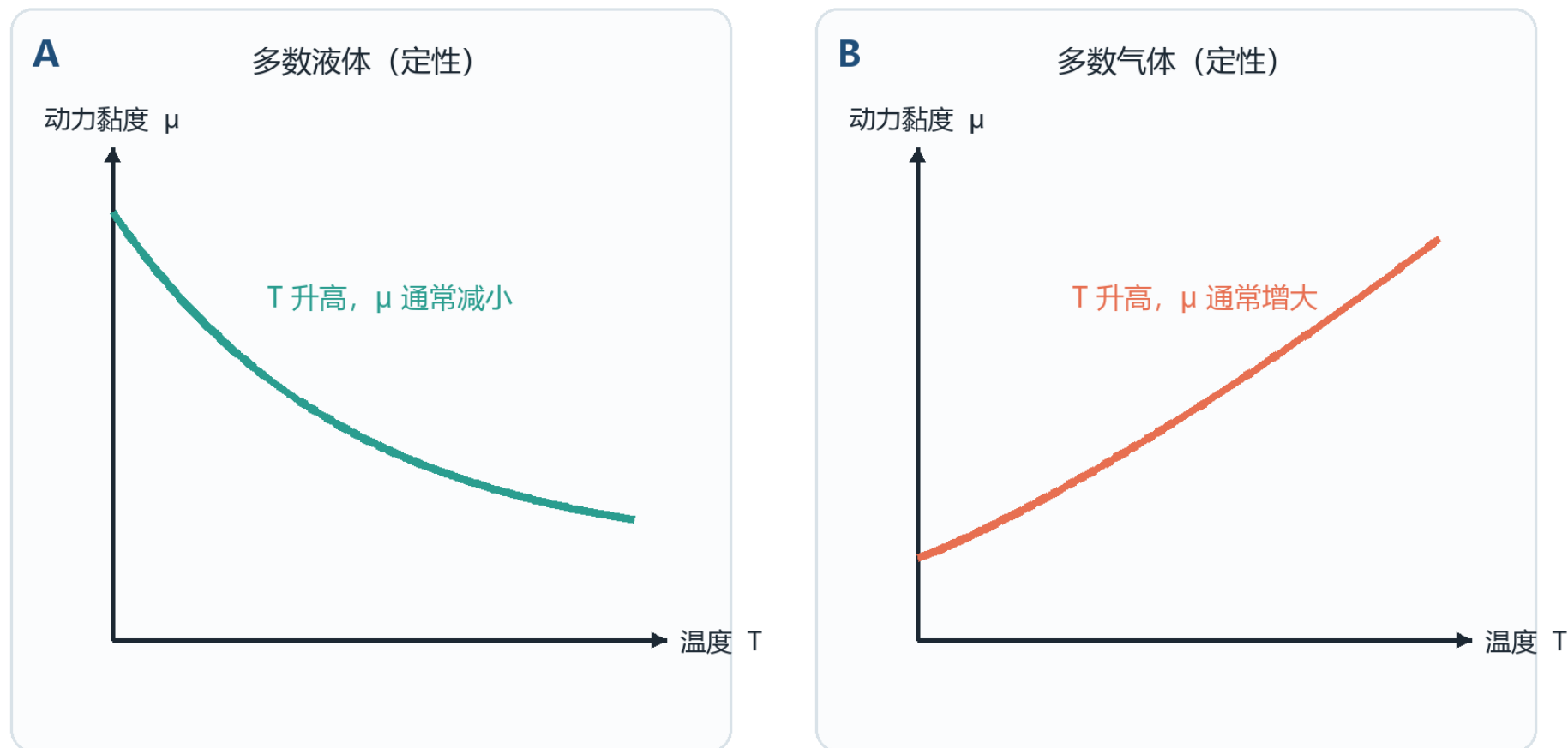


原地址: <https://www.bilibili.com/video/BV1o4411d7zM>

黏度与温度：液体与气体的不同趋势

1.5 黏度与温度

动力黏度随温度的典型趋势



液体与气体动力黏度随温度变化的典型趋势（分开绘制，纵轴独立缩放，只表示趋势）

为什么液体和气体的温度趋势相反？

液体：温度升高 $\rightarrow \mu$ 减小

微观机制：

液体黏性主要与分子之间较强的相互作用（内聚力）有关。

升高温度后，分子运动增强，分子间束缚减弱，液体抵抗剪切变形的能力通常减弱。

实例：加热后的润滑油或蜂蜜比低温时更容易流动。

气体：温度升高 $\rightarrow \mu$ 增大

微观机制：

气体黏性与分子热运动所导致的跨层动量交换密切相关。

温度越高，分子热运动越强，跨层动量交换通常也越强。

工程公式：空气等气体常用 Sutherland 公式近似。

工程补充：气体黏度的 Sutherland 公式

1.5 黏度与温度

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} (T_0 + S_\mu)}{T + S_\mu}$$

参数说明：

- T_0 ：参考温度
- μ_0 ：该温度下的参考动力黏度
- S_μ ：Sutherland 常数
- 对空气： $S_\mu \approx 110.4 \text{ K}$

下标 μ 用于避免与控制面 S 混淆。

工程应用：

- 空气动力学中描述黏度随温度变化
- CFD 计算中作为物性输入
- 高超声速流动中温度变化大，必须考虑

本书约定：

后续若主要研究温度变化不大的不可压缩流动，通常仍可把 μ 近似看作常数。

课堂判断：黏度大 = Reynolds 数小吗？

互动

问题：某研究者说："流体 A 的动力黏度比流体 B 小，因此使用流体 A 时一定更容易形成湍流。" 这句话对吗？请从 Reynolds 数的定义出发分析。

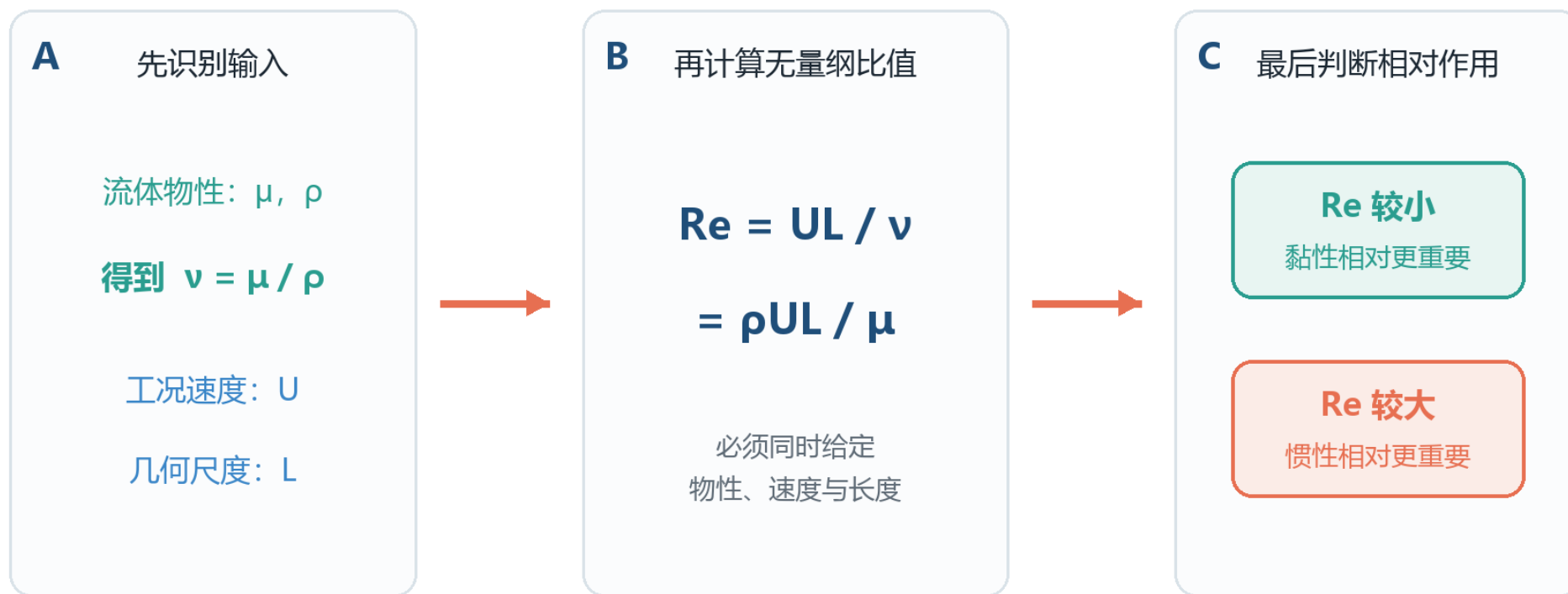
解析：这句话不对。Reynolds 数 $Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$ 取决于五个因素：密度、特征速度、特征长度、动力黏度（或运动黏度）。黏度只是输入之一。即使 μ 小，如果密度也小（如空气）， ν 可能反而大；即使同一种流体，改变速度或尺寸也会使得 Re 完全不同。

结论：判断惯性与黏性的相对重要性，必须同时给出流体物性、特征速度和特征长度。

从物性、速度和长度判断 Reynolds 数

1.5 黏度与温度

黏度大不等于 Reynolds 数小



从流体物性、特征速度和特征长度判断 Reynolds 数的流程：黏度大小本身不能单独决定 Re

无穿透条件：流体不能进入固体

考虑一个静止固体壁面。若流体不能穿过固体表面，则流体在壁面**法向方向**的速度必须与壁面法向速度一致。

对于静止、不可渗透壁面：

$$u_n = 0$$

称为**无穿透条件**
(no-penetration)

本质：运动学约束

流体不能进入固体内部。

这个条件只约束法向速度，不约束切向速度。

仅满足无穿透时，壁面处流体仍可以沿壁面滑动。

思考：如果只有无穿透条件而没有无滑移条件，壁面附近的速度分布会是什么样？

无滑移条件：壁面处切向速度也与壁面一致

对绝大多数宏观尺度下的普通黏性流动，实验表明流体在固体表面的**切向速度**也与壁面速度一致。

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}_w$$

若壁面速度为 $\mathbf{U}_w$ ，则壁面处满足上式，称为**无滑移条件**（no-slip condition）。

对于静止壁面： $\mathbf{u} = 0$

因此，静止不可渗透固壁条件实际上同时包含：

- 法向无穿透
- 切向无滑移

关键区别：

无穿透：法向速度为零（运动学约束）

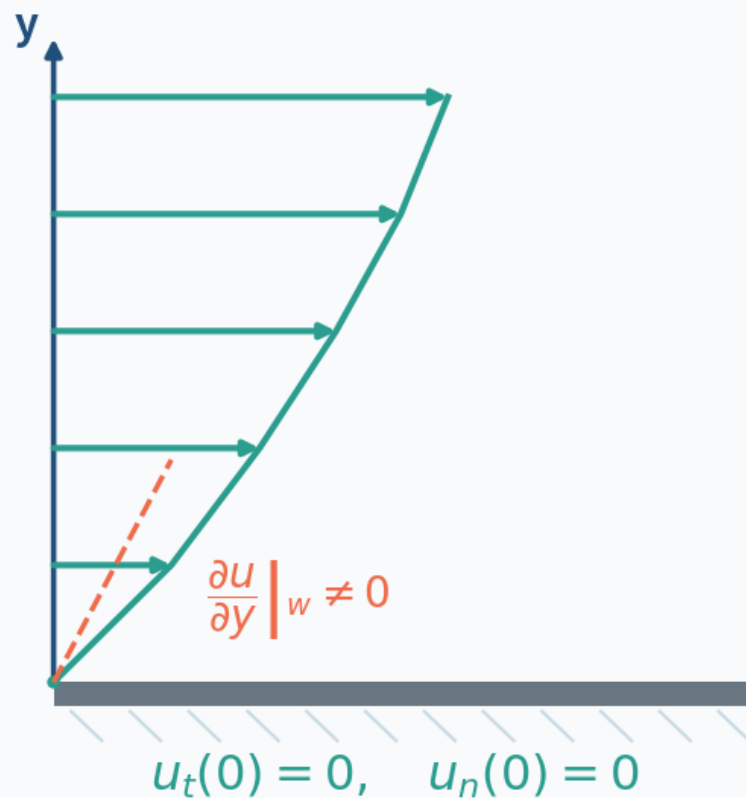
无滑移：切向速度为零（黏性动力学约束）

无黏模型只满足无穿透，不满足无滑移——这正是它在壁面附近失效的原因。

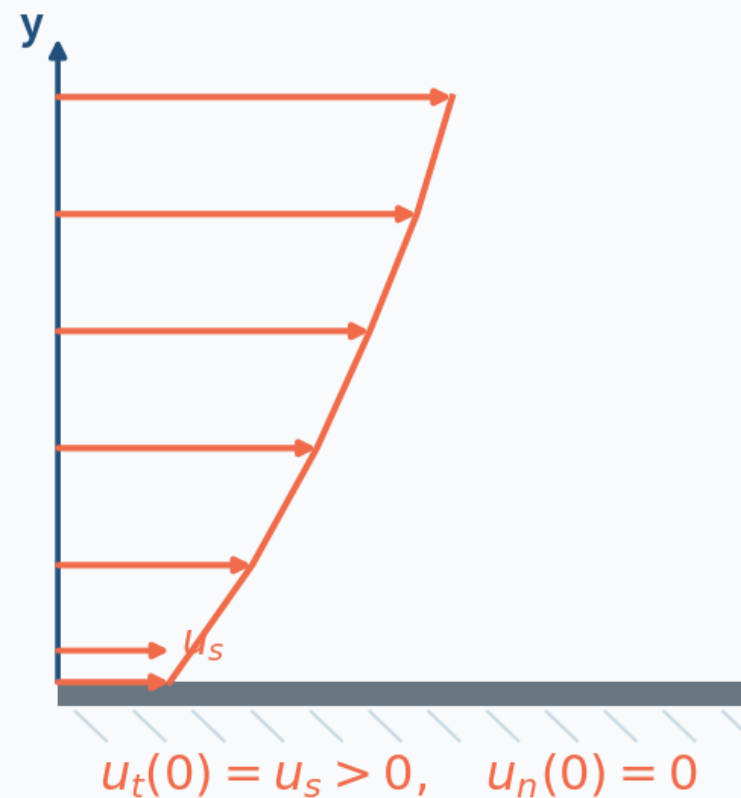
无滑移边界与假想滑移边界的对比

1.6 固体壁面上的无滑移条件

A 无滑移边界



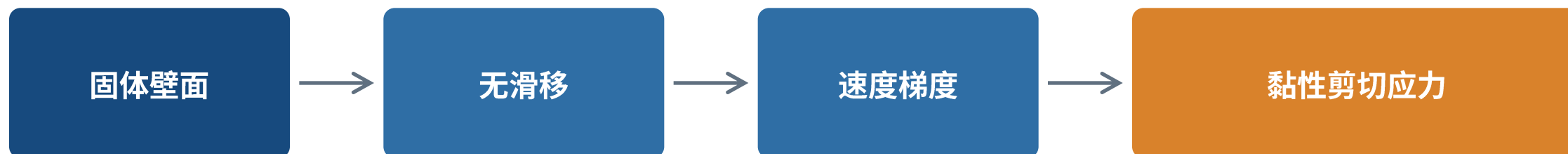
B 假想滑移边界



静止固壁附近的无滑移边界与假想滑移边界对比：无滑移使壁面切向速度为零，并在壁面附近建立速度梯度

无滑移条件为什么如此重要？

无滑移条件意味着：只要远离壁面的流体有非零速度，而壁面静止，近壁速度就必须从零过渡到外部流速。



壁面在黏性流动中具有特殊地位，**不是因为附近流体材料发生了改变，而是因为：**
无滑移条件迫使速度在很短距离内由壁面速度过渡到外部流速，从而建立显著的速度梯度和黏性应力。

这个因果关系是理解**壁面摩擦、边界层和壁湍流**的基础。

第6章将看到：高 Re 流动中，正是这个梯度被限制在很薄的近壁区域内，形成边界层。

课堂思考：没有速度梯度能有剪切应力吗？

互动

问题：如果壁面附近速度没有梯度（即速度在壁面处也等于来流速度），壁面还能产生黏性剪切应力吗？这意味着什么边界条件？

请结合 Newton 黏性定律 $\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) |_w$ 分析。

解析：若壁面处 $\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) |_w = 0$ ，则 $\tau_w = \mu \cdot 0 = 0$ ，壁面不产生黏性剪切应力。

这意味着壁面处流体速度不等于零（可以沿壁面滑动），即**不满足无滑移条件**——这正是无黏模型的壁面边界。

结论：无滑移条件是壁面剪切应力（摩擦阻力）存在的前提。

无滑移条件是否永远成立？

无滑移条件对绝大多数常规工程尺度的液体和气体流动是非常好的近似，但它**不是在所有尺度和条件下都严格成立**。

可能需要考虑速度滑移的情况：

- 稀薄气体（高空飞行、真空系统）
- 微尺度和纳米尺度流动（MEMS、微通道）
- 特殊疏水或超疏水表面
- 某些复杂界面问题（如接触线附近）

这些情况不属于本课程主线，但它们提醒我们：**边界条件本身也是物理模型的一部分，而不是纯粹的数学规定。**
选择什么边界条件，取决于流动的尺度和物理条件。

Reynolds 数：惯性与黏性的相对重要性

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$$

Reynolds 数是**无量纲量**，描述惯性作用与黏性作用的相对重要性。

符号	含义
U	特征速度（如来流速度、截面平均速度）
L	特征长度（如管径、弦长、平板长度）
ρ, μ	流体密度和动力黏度
ν	运动黏度 $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

Reynolds 数究竟比较了什么？

1.7 Reynolds 数的初步认识

惯性作用的尺度

惯性力 $\sim \rho U^2/L$ (单位体积)

惯性使流体保持原有运动状态

惯性大 $\rightarrow$ 流动倾向于维持原有方向和速度

惯性大 $\rightarrow$ 不易被壁面或障碍物改变

惯性项尺度: $\rho U^2/L$

黏性作用的尺度

黏性力 $\sim \mu U/L^2$ (单位体积)

黏性使速度趋于均匀、耗散机械能

黏性大 $\rightarrow$ 流动容易被壁面约束

黏性大 $\rightarrow$ 速度梯度被快速抹平

黏性项尺度: $\mu U/L^2$

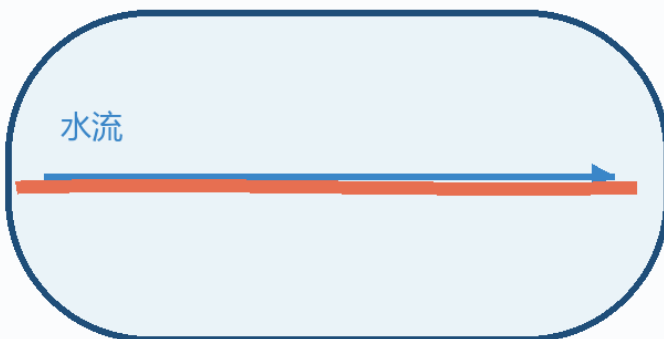
$$Re = \text{惯性/黏性} \quad Re = \frac{\frac{\rho U^2}{L}}{\frac{\mu U}{L^2}} = \frac{\rho U L}{\mu}$$

Reynolds 实验：层流与湍流的视觉对比

1.7 Reynolds 数的初步认识

A

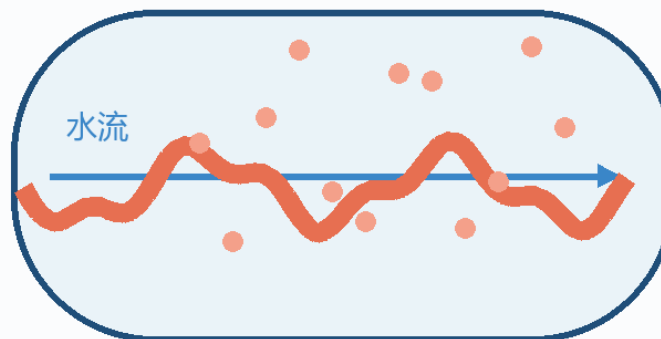
低 Reynolds 数：层流



染色线保持细而稳定

B

高 Reynolds 数：湍流



染料快速扩散并混合

Reynolds 圆管染色实验：层流中染色线保持稳定，湍流中染料迅速横向扩散

临界 Reynolds 数不是普适常数

对于充分发展圆管流，常见工程判断：

Reynolds 数范围	流动状态
$Re \lesssim 2300$	通常为层流
$2300 \lesssim Re \lesssim 4000$	通常处于过渡区

这些数值绝不能被理解为适用于所有流动的"普适临界值"。

临界 Reynolds 数取决于：流动几何 · 入口条件 · 外界扰动 · 壁面粗糙度 · 流动类型 · 所采用的特征长度和特征速度

圆管流、平板边界层和圆柱绕流具有完全不同的 Reynolds 数效应。圆柱绕流随 Re 变化经历分离、涡脱落及阻力特性的显著改变（第7章）。

例1.3 Reynolds 数计算与流动状态判断

1.7 Reynolds 数的初步认识

已知:

水以平均速度 $U=0.10$ m/s 流过直径 $D=20$ mm 的圆管

运动黏度 $\nu=1.0\times 10^{-6}$ m²/s

以管径作为特征长度

求:

- (1) Reynolds 数
- (2) 若速度提高10倍, Re 如何变化
- (3) 流动状态可能有何不同

解(1):

$$Re = \frac{UD}{\nu} = \frac{0.10 \times 0.020}{1.0 \times 10^{-6}} = 2.0 \times 10^3$$

位于典型圆管层流范围上部。

解(2): 速度提高10倍, 其他不变:

$$Re = 2.0 \times 10^4$$

远超临界值, 流动将转变为湍流。

结论: 同一种流体、同一个装置, 仅改变流速就可能把流动带入完全不同的动力学状态。

课堂推理：速度加倍、长度减半，Re 如何变？

互动

问题：某流动的 Reynolds 数为 Re_0 。若特征速度增加为原来的 2 倍，同时特征长度减小为原来的 $1/2$ ，流体不变。新的 Reynolds 数是多少？这说明了什么？

解析： $Re = \frac{UL}{\nu}$ 。 $U \rightarrow 2U$ ， $L \rightarrow L/2$ ， ν 不变：

$$Re' = \frac{(2U)(\frac{L}{2})}{\nu} = \frac{UL}{\nu} = Re_0 \text{——Reynolds 数不变!}$$

这说明：Reynolds 数取决于 U 和 L 的乘积，速度和长度的影响可以相互补偿。

这也是几何相似流动中保持 Re 相同的原理——模型实验可以通过调整速度来匹配原型的 Re 。

黏性流动分类（一）：内流与外流

1.8 黏性流动的基本分类

内流

流体受到固体边界较强约束。

典型例子：

- 圆管流
- 平行板通道流
- 管网流动

黏性特点：

壁面黏性作用通常会影影响整个截面。
第4章将详细求解圆管和通道流。

外流

流体绕过物体运动。

典型例子：

- 平板边界层
- 圆柱绕流
- 翼型绕流
- 车辆外流场

黏性特点：

高 Re 外流中，黏性可能主要集中在边界层、剪切层和尾迹内。

黏性流动分类（二）：稳态与层流/湍流

1.8 黏性流动的基本分类

稳态流动：固定空间位置的流动物理量不随时间变化。

非稳态流动：这些量随时间变化。

注意：判断的是场量在固定位置的时间变化，不是流体质点是否运动——稳态流场中流体质点完全可以持续运动。

层流：流动结构相对规则，速度和压强随时间、空间变化较为有序。

湍流：流动表现出复杂的三维、多尺度和非规则脉动，伴随显著增强的动量、热量和物质输运。

注意：层流和湍流之间不是简单由一个普适 Reynolds 数分隔。

转捩（transition）取决于几何、扰动、粗糙度等多种因素。

关于转捩和湍流的基本概念将在第8章讨论。本章只建立初步认识： Re 较小时流动更规则， Re 较大时流动更容易变得复杂和不规则。

但即使在湍流中，黏性仍然是基本的物理机制——湍流脉动本身就是黏性与惯性非线性相互作用的结果。

按 Reynolds 数分类：三种极限

$$\text{Re} \ll 1$$

黏性占主导
惯性相对较弱

惯性项可以忽略
方程线性化 (Stokes 方程)
流动可逆

第5章：低 Reynolds 数流动 /
creeping flow
微尺度流动、润滑问题

$$\text{Re} = O(1)$$

惯性和黏性都可能重要

通常需要保留完整的黏性流动动力学
不能随意忽略任何一方

需要完整 Navier–Stokes 方程
数值计算或复杂分析

许多工程流动处于这个范围

$$\text{Re} \gg 1$$

惯性在大部分流场中很强

但黏性**不能处处忽略**
固体壁面附近形成薄的黏性区域
即边界层

第6章：边界层理论
第7章：分离与尾迹
高 Re 流动最能体现黏性的局部关键作用

理解流体的黏度

本章总结



原地址: <https://www.youtube.com/watch?v=VvDJyhYSJv8>

中文字幕: <https://www.bilibili.com/video/BV1ov411u77K>

1. 连续介质近似

流体微元大于分子尺度而小于流动尺度；Kn 是检查尺度分离的参数。

2. 理想流体是模型

D'Alembert 悖论说明无黏模型在壁面和分离区域失效。

3. Newton 黏性定律

$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy}$ ；黏性输运动量、抑制速度差异、耗散机械能。

4. μ 与 ν 不可混同

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ ；空气 μ 小但 ν 大；黏度大小不能单独决定 Re。

5. Newton 流体为主线

非 Newton 流体只用于辨析剪切变稀、增稠和屈服。

6. 温度依赖

液体升温 μ 减小（分子间作用减弱）；气体升温 μ 增大（分子热运动增强）。

7. 无滑移条件

静止固壁同时满足无穿透和无滑移→近壁速度梯度→黏性应力。

8. Reynolds 数

$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$ ；衡量惯性与黏性相对重要性；解读时必须说明几何和特征尺度。

关键公式回顾：每个公式表达什么物理平衡？

本章总结

序号	公式	物理意义
1	$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy}$	Newton 黏性定律：剪切应力正比于速度梯度；黏性抵抗变形（相对运动）
2	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$	运动黏度：动量扩散率，量纲 L^2/T ；与热扩散率 α 结构相同
3	$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$	Reynolds 数：惯性作用与黏性作用之比；决定流动状态和方程简化方式
4	$\mathbf{u} = \mathbf{U}_w$	无滑移条件：壁面处流体速度等于壁面速度；近壁速度梯度和剪切应力的来源
5	$Kn = \frac{\lambda_{mfp}}{L_c}$	Knudsen 数：分子平均自由程与特征长度之比；判断连续介质近似是否成立

物理图像回顾：本章最关键的流动图像

本章总结

简单剪切流

上板运动→无滑移→线性速度剖面→
恒定剪切应力

关键：速度梯度是黏性应力的直接来源

刚体平移→无梯度→无应力

壁面附近

无滑移→速度从0过渡到来流→大梯度
→大剪切

关键：壁面是黏性作用最集中的区域

高 Re 时这个区域变薄→边界层

D'Alembert 悖论

无黏绕流→前后对称→零阻力
真实绕流→壁面剪切+分离→非零阻力

关键：对称性的打破来自黏性

黏性→摩擦阻力+压差阻力

易错点回顾：这些概念最容易混淆

本章总结

易错1： "黏度大的流体，黏性效应一定强" → 错。黏性效应的相对强弱由 Re 决定，需同时看 ρ 、 U 、 L 、 μ 。

易错2： "空气比水稀，所以空气的运动黏度更小" → 错。空气 $\nu \approx 1.5 \times 10^{-5} >$ 水 $\nu \approx 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，因为空气密度小。

易错3： "流体在运动就有黏性应力" → 错。黏性抵抗的是变形（速度梯度），不是整体运动。刚体平移 $\frac{du}{dy} = 0 \rightarrow \tau = 0$ 。

易错4： " Re 很大时黏性可以忽略" → 不全面。高 Re 时大部分流场黏性弱，但壁面附近边界层内黏性仍起关键作用。

易错5： " $Re \approx 2300$ 是所有流动的临界值" → 错。临界 Re 依赖几何、入口条件、扰动、粗糙度和特征尺度定义。

形成性评价（一）：概念辨析

形成性评价

题1：判断正误并说明理由——"理想流体模型是错误的，因为真实流体都有黏性。"

题2：两平行平板间距 h ，下板固定上板以 U 运动。若 U 增大为3倍、 h 增大为2倍，剪切应力如何变化？

题3：为什么无滑移条件是壁面摩擦阻力存在的前提？请用因果链说明。

题4：同一种流体在直径 1cm 的管中以 1m/s 流动，和在直径 1m 的管中以 0.01m/s 流动，哪个 Re 大？

评价目的：检测学生是否建立"公式—物理意义—适用条件"的关联，而非死记硬背。

建议课堂限时独立完成，然后互查。

形成性评价（二）：计算与推理

形成性评价

题5（计算）：水以 $U=0.20\text{ m/s}$ 流过直径 $D=5\text{ mm}$ 的圆管， $\nu=1.0\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

(1) 计算 Reynolds 数；(2) 若速度提高到 1.0 m/s ，重新计算；(3) 讨论两种情况下流动状态可能有何不同。

提示： $Re = \frac{UD}{\nu}$ ，注意单位换算。

题6（推理）：两个几何相似的流动装置，模型 A 特征长度 0.10m 、流速 1.0m/s ；模型 B 特征长度 1.0m 。

使用同一种流体，为使 Reynolds 数相同，模型 B 需要多大流速？这说明无量纲参数对于模型实验有什么意义？

评价目的：检测 Reynolds 数计算能力和相似性推理能力。建议课堂限时独立完成。

课后任务

必做题 (★) :

1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.9, 1.10, 1.11, 1.12

选做题 (★★) :

1.8, 1.13, 1.14, 1.15

研究训练 (★★★) :

1.16 评价"流体A动力黏度小→更容易湍流"的说法

思考与讨论：教材第1.10节后的6个讨论题

下章衔接

第2章：黏性流动控制方程

本章建立了黏性的物理概念，下一章将：

- 从质量守恒出发建立连续性方程
- 从动量守恒出发建立运动方程
- 引入 Newton 流体的三维本构关系
- 得到完整的 Navier-Stokes 方程

本章知识为什么是下章基础：

无滑移条件将作为 N-S 方程的壁面边界条件；
Newton 黏性定律将推广为三维应力-应变率关系；
黏性的动量扩散本质将出现在方程的黏性项中。