



# 第四章 相似和量纲分析

流体力学



相似原理、准则数

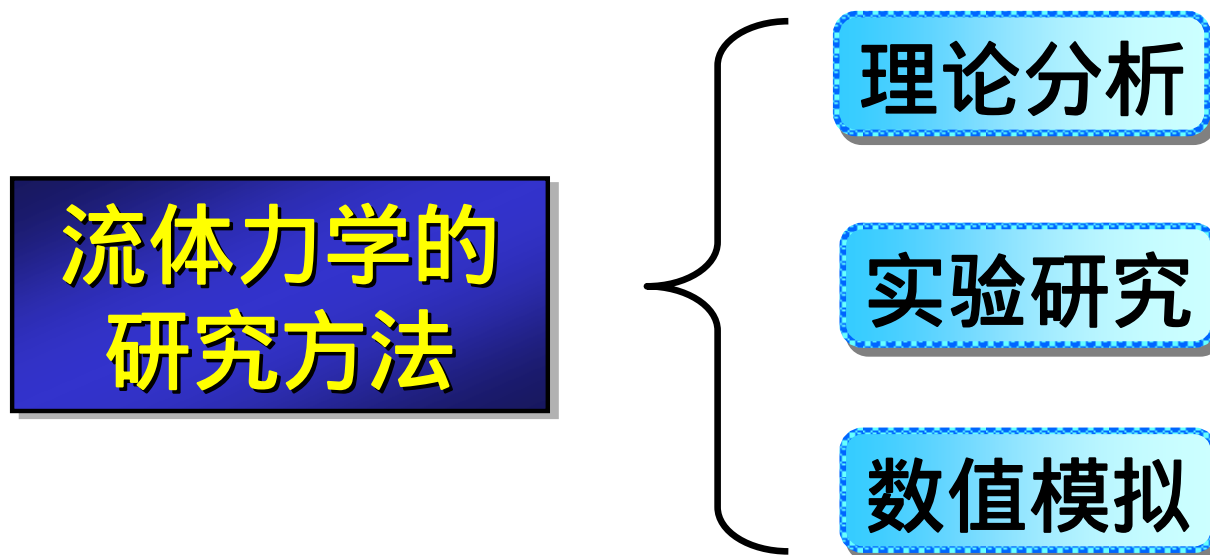
✚ 基础知识



几何相似，几种力的定义



# 相似原理与量纲分析概述2

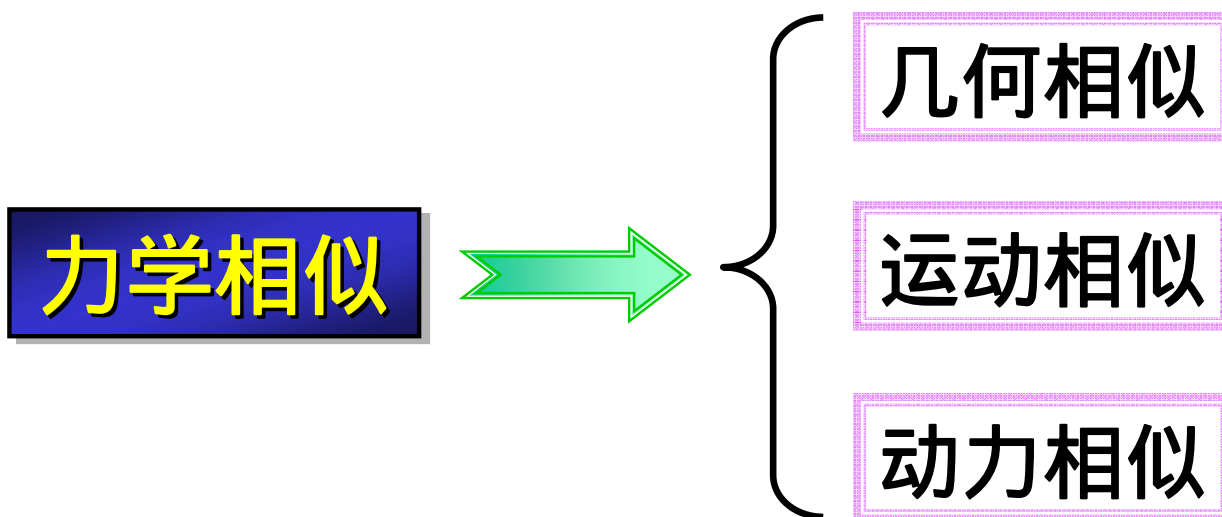


量纲分析  $\longrightarrow$  分析物理现象中的未知规律



# 4.1 力学相似

模型流动与实物流动在各对应点和对应时刻，对应物理量成一定的比例关系





# 几何相似1

几何相似

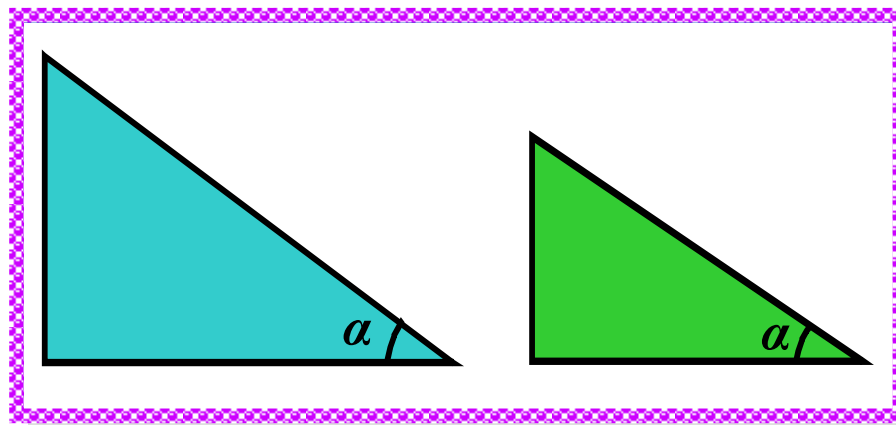


针对描述几何形状的量

- ④ 模型流动与实物流动有相似的边界形状
- ④ 对应的线性尺寸成同一比例

$$\frac{L_{1m}}{L_{1p}} = \frac{L_{2m}}{L_{2p}} = \dots = C_L$$

$C_L$  - 线性比例系数



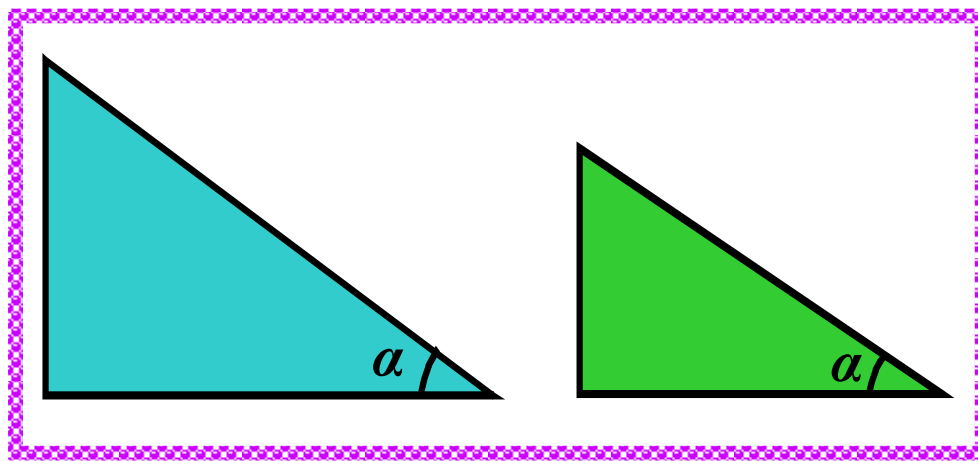


# 几何相似2

④ 对应的面积和体积分别成一定的比例关系

$$\frac{A_m}{A_p} = \frac{L_m^2}{L_p^2} = C_L^2$$

$$\frac{V_m}{V_p} = \frac{L_m^3}{L_p^3} = C_L^3$$



④ 线性尺寸成同一比例时，对应的夹角相等



# 运动相似1

运动相似



针对描述运动状态的量

- ④ 满足几何相似
- ④ 对应瞬时，对应空间点
- ④ 流速方向相同，大小成同一比例

$$\frac{V_{1m}}{V_{1p}} = \frac{V_{2m}}{V_{2p}} = \dots = C_V$$

$C_V$  – 速度比例系数



# 运动相似2

## ④ 流体质点通过对应距离的时间相似

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{L_m/V_m}{L_p/V_p} = \frac{C_L}{C_V} = \underline{\underline{C_t}}$$

## ④ 流体质点的加速度相似

$$\frac{a_m}{a_p} = \frac{V_m/t_m}{V_p/t_p} = \frac{C_V}{C_t} = \underline{\underline{C_a}}$$

## ④ 流线几何相似



# 动力相似1

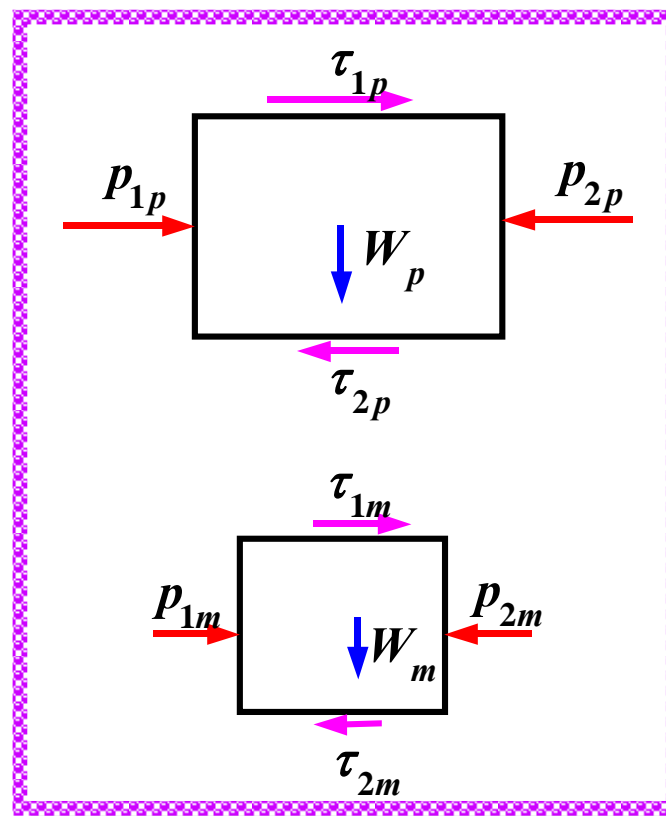
动力相似



针对描述动力特征的量

- ④ 满足几何相似
- ④ 对应瞬时，对应空间点
- ④ 同名力方向相同，大小成同一比例

$$\frac{F_{1m}}{F_{1p}} = \frac{F_{2m}}{F_{2p}} = \dots = C_F$$



$C_F$  – 作用力比例系数





# 相似准则1

准则数



惯性力与某种力的比

④ 惯性力  $\longrightarrow -Ma \propto \rho L^2 V^2$

④ 重力  $\longrightarrow Mg \propto \rho L^3 g$

④ 压力  $\longrightarrow \Delta p A$

④ 粘性力  $\longrightarrow \tau A = \mu \frac{du}{dy} A \propto \mu V L$

$\propto \Delta p L^2$

④ 弹性力  $\longrightarrow E_v A \propto E_v L^2$

④ 表面张力  $\longrightarrow \sigma l \propto \sigma L$



# 相似准则2

雷诺准则 (雷诺数)



惯性力与粘性力的比

$$\text{Re} = \frac{\rho VL}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{VL}{\nu}$$



小模型，高流速



原型与模型中的流体  
无需一致

④  $V$  为特征速度， $L$  为特征长度

粘性流动最重要的准则数：完全充满的管道流动、飞行器或潜艇（不产生水面波）的阻力等



# 相似准则3

弗劳德准则  
(弗劳德数)



惯性力与重力的比

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$



重力加速度一样时，  
小模型对应小流速

② 是具有自由液面流体流动时重要的准则数

船舶形成的波运动、明渠流、水对桥墩的作用、溢洪道流动、孔口出流及其它重力起主要作用的流动



# 相似准则4

欧拉准则  
(欧拉数)



压力与惯性力的比

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho V^2}$$



如果有其它参数导致流  
态改变,  $Eu$  也会变化

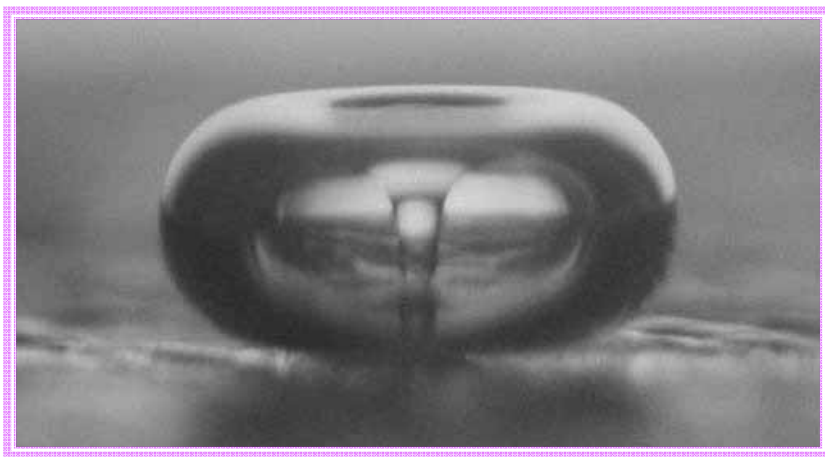
④ 压力或压差对流速分布影响较大的流动中重要的准则数

空化效应或空蚀现象等

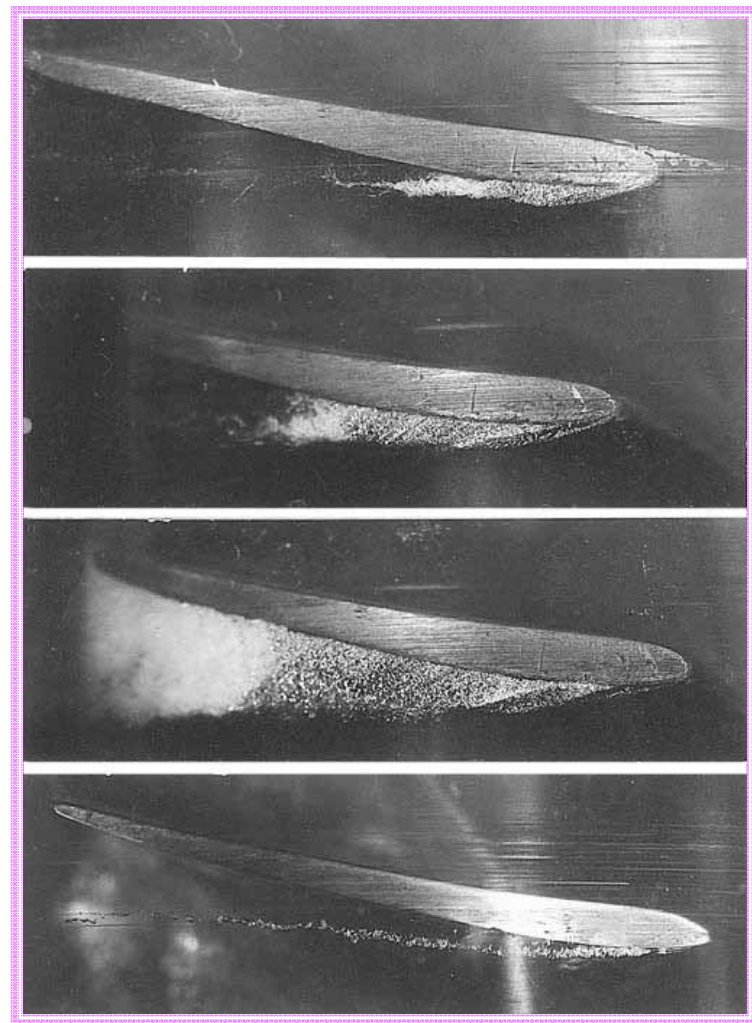


# 汽穴、汽蚀、空化1

- ④ 气泡直径：0.15-6 mm
- ④ 射流速度：110 m/s
- ④ 撞击壁面压强：50700 kPa
- ④ 液体温度不到1/1000秒内升高2100°C



爆聚气泡的显微照片



轴流式泵叶片的绕流



# 相似准则5

马赫准则  
(马赫数)



惯性力与弹性力的比

$$\text{Ma} = \frac{v}{a}$$



$\text{Ma} < 1$  : 亚音速流动

$\text{Ma} = 1$  : 音速流动

$\text{Ma} > 1$  : 超音速流动

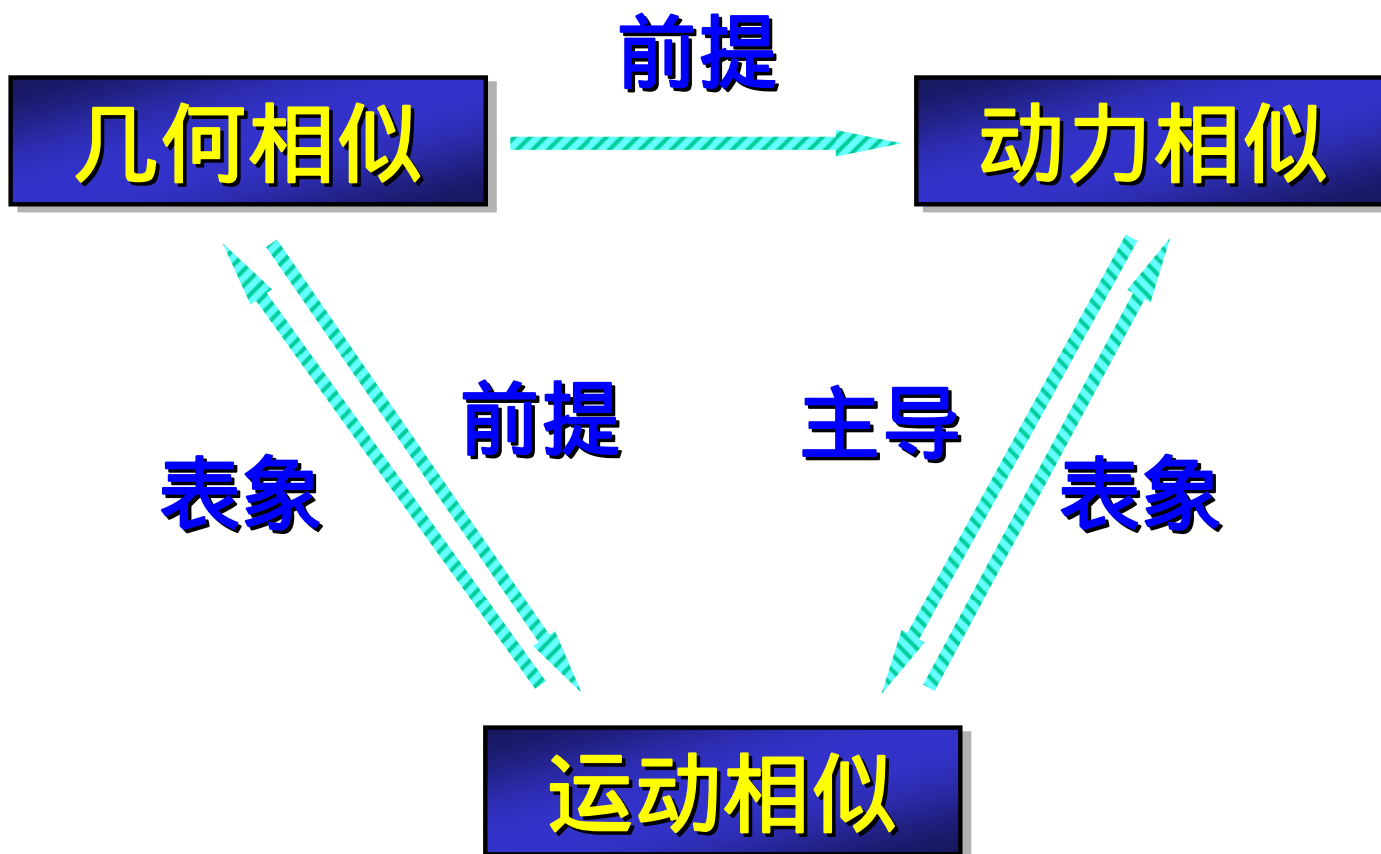
④ 可压缩流动中重要的准则数

高速流动问题

模型流动与实物流动动力相似时，必须  
保证在对应点上各个准则数分别相等



# 相似准则6





# Re 数特征长度 $L$ 和特征速度 $V$

## 特征长度与特征速度

流动	$V$	$L$
圆管流动	过流断面平均速度	管道直径
钝体绕流	来流速度	迎风截面的宽度
平板边界层	来流速度	到前缘的距离

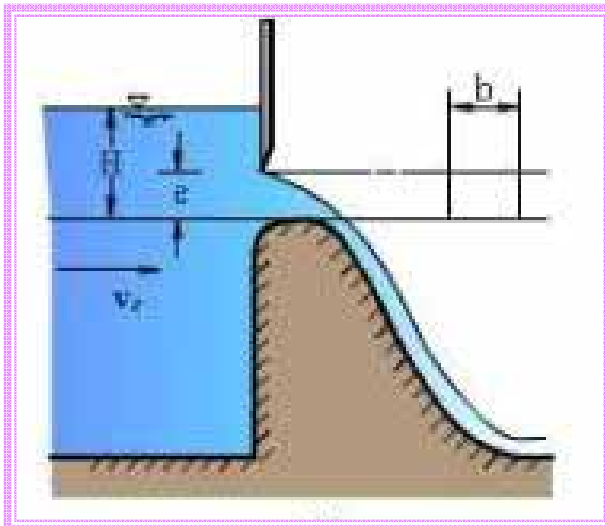
## 特征 Re 范围

$Re \ll 1$	低Re粘性流动 - 蠕动流
$Re < 2100$	管内粘性层流
$Re \gg 1$	边界层外理想无旋 - 势流 边界层内粘性有旋





# Fr 数特征长度 $L$ 和特征速度 $V$



## 特征长度与特征速度

流动	$V$	$L$
水面船舶	船舶速度	吃水线长度
明渠流	平均流速	水深



# 自模化

