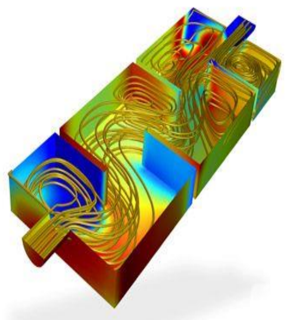


传热学

对流换热

授课老师：苗雨

目录

CONTENTS

01 课前回顾及导引

02 流体力学基础知识复习

03 对流传热概述

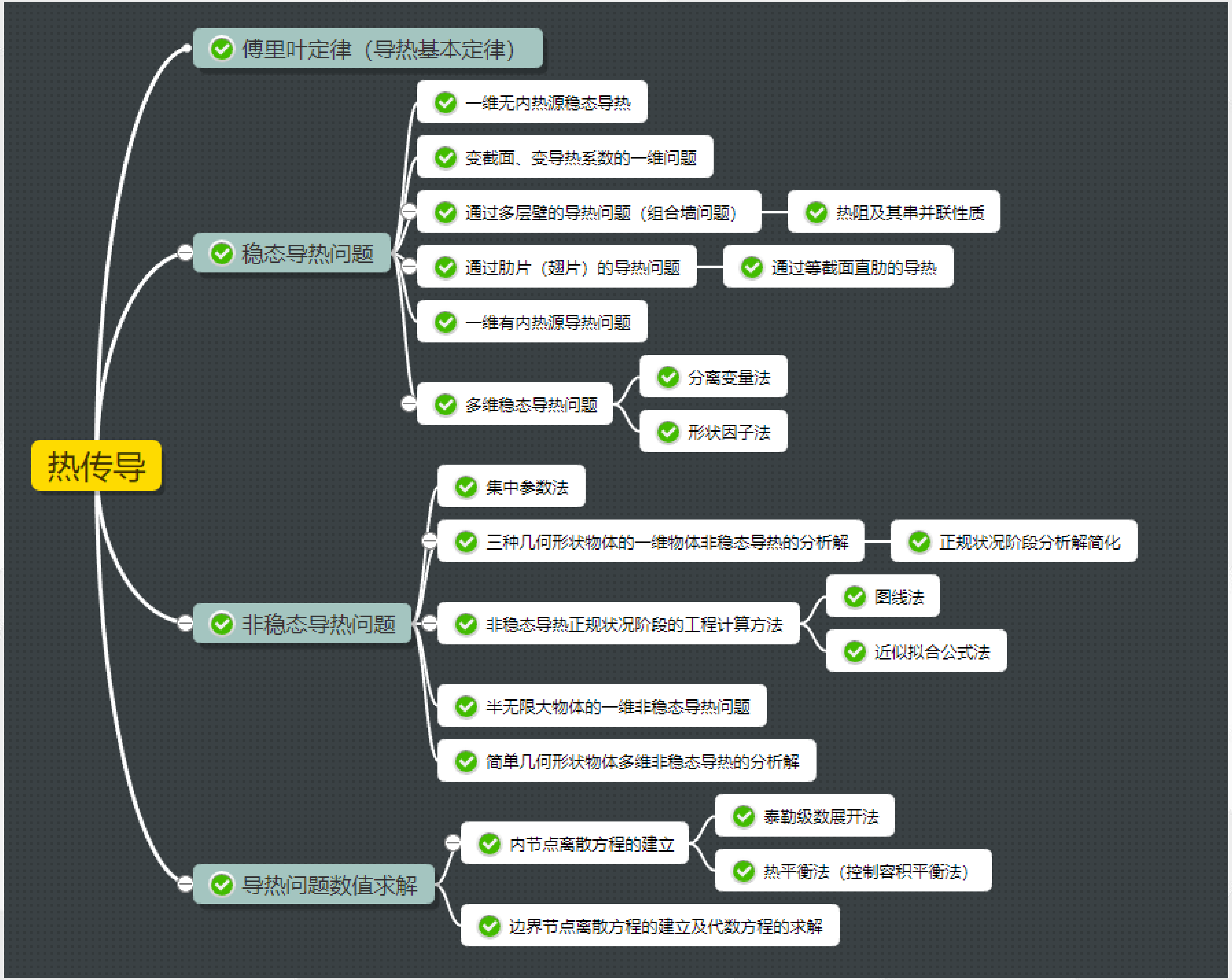
04 对流传热问题的数学描写

05 边界层理论

01

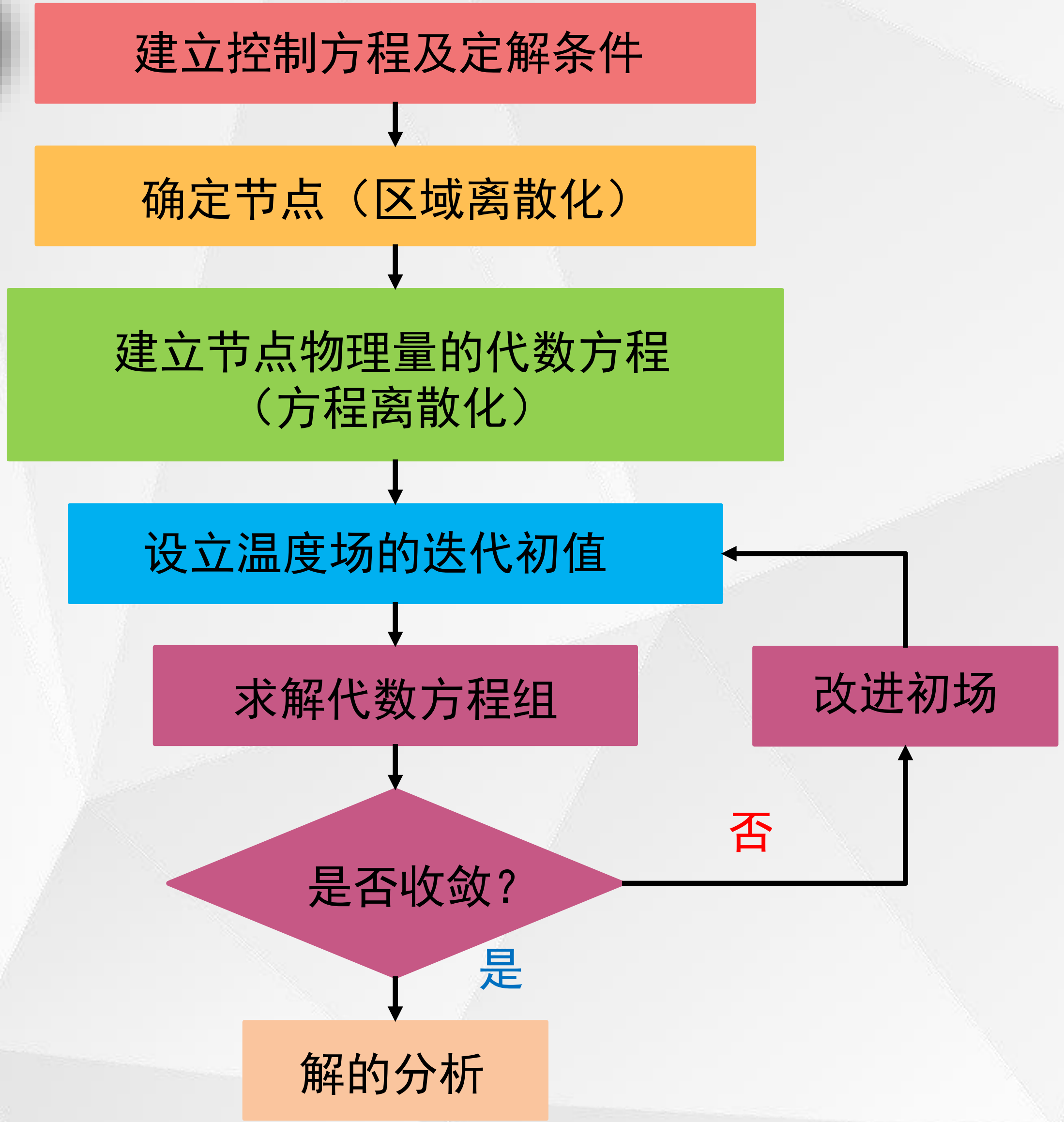
课前回顾及导引

课前回顾及导引


热传导
傅里叶定律（导热基本定律）
稳态导热问题
一维无内热源稳态导热
变截面、变导热系数的一维问题
通过多层壁的导热问题（组合墙问题）
热阻及其串并联性质
通过肋片（翅片）的导热问题
通过等截面直肋的导热
一维有内热源导热问题
多维稳态导热问题
分离变量法
形状因子法
非稳态导热问题
集中参数法
三种几何形状物体的一维物体非稳态导热的分析解
正规状况阶段分析解简化
非稳态导热正规状况阶段的工程计算方法
图线法
近似拟合公式法
半无限大物体的一维非稳态导热问题
简单几何形状物体多维非稳态导热的分析解
导热问题数值求解
内节点离散方程的建立
泰勒级数展开法
热平衡法（控制容积平衡法）
边界节点离散方程的建立及代数方程的求解

课前回顾及导引

1

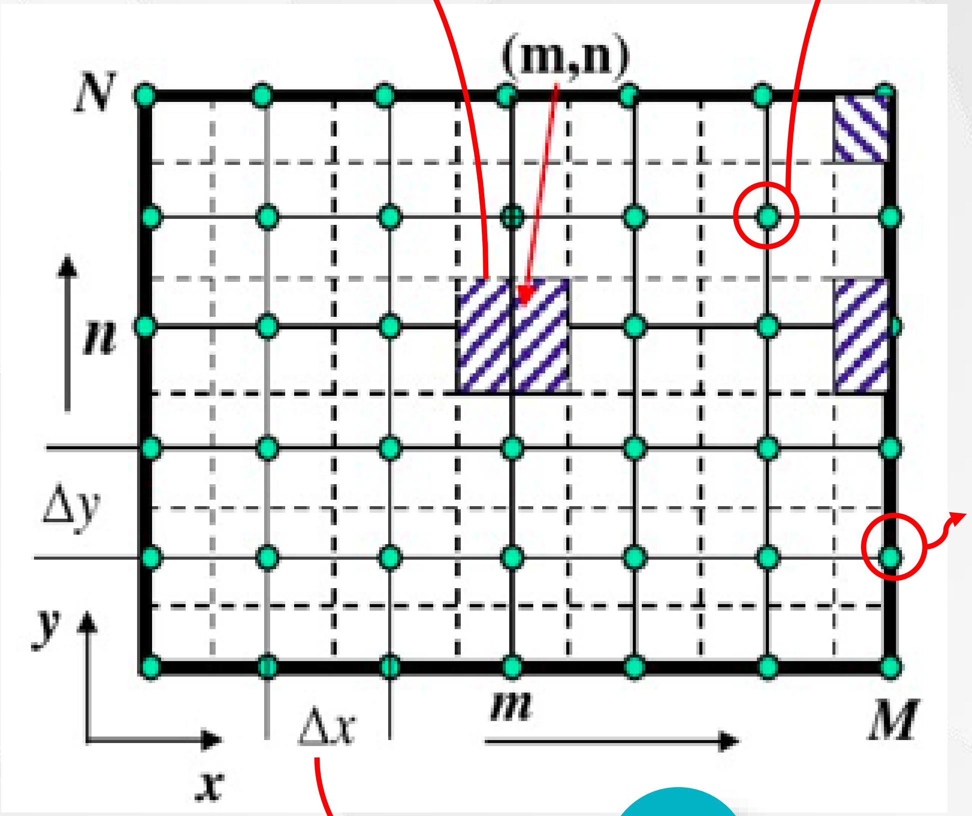


2

元体
（控制容积）

3

内节点



边界节点

步长

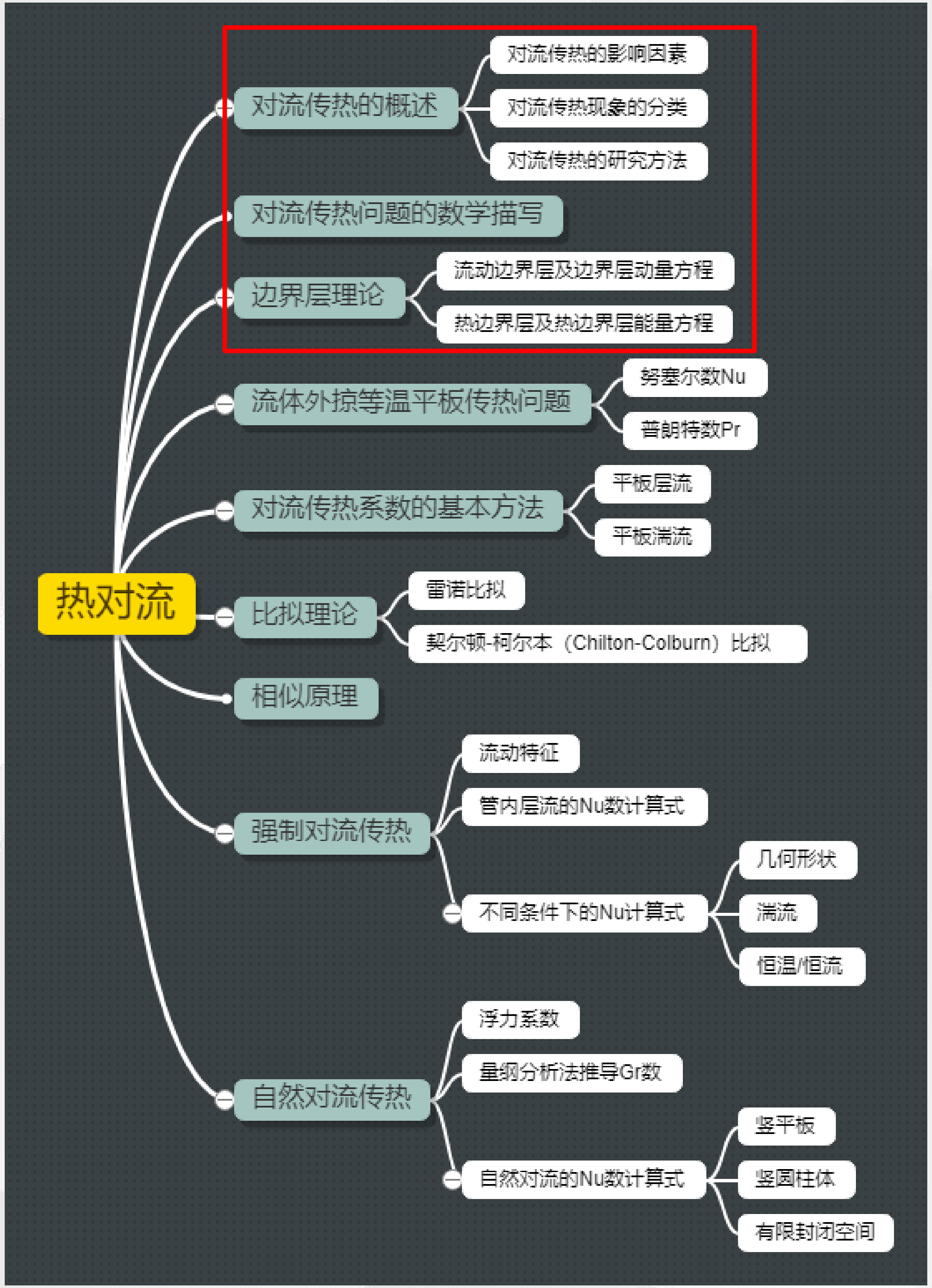
4

5

边界节点包括哪三种？

平直边界上的节点、外部角点、内部角点

课前回顾及导引



热对流
对流传热的概述
对流传热的影响因素
对流传热现象的分类
对流传热的研究方法
对流传热问题的数学描写
边界层理论
流动边界层及边界层动量方程
热边界层及热边界层能量方程
流体外掠等温平板传热问题
努塞尔数Nu
普朗特数Pr
对流传热系数的基本方法
平板层流
平板湍流
比拟理论
雷诺比拟
契尔顿-柯尔本（Chilton-Colburn）比拟
相似原理
强制对流传热
流动特征
管内层流的Nu数计算式
不同条件下的Nu计算式
几何形状
湍流
恒温/恒流
自然对流传热
浮力系数
量纲分析法推导Gr数
自然对流的Nu数计算式
竖平板
竖圆柱体
有限封闭空间

02

流体力学基础知识复习

流体力学基础知识复习

三种传热方式中，对流传热与流体力学密切相关

1 直角坐标系，纳维尔斯托克斯方程（N-S方程）在 x 方向上的分量表达式

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial \tau}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=F_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\eta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$$

2 雷诺数的表达式，平板上与管道中流动判定层流的雷诺数的临界值分别是多少？

$\mathrm{Re}=\frac{\rho u l_c}{\mu}$ 平板上流动：$\mathrm{Re}<5\times10^{5}$ 管道中流动：$\mathrm{Re}<2300$

3 流动边界层的产生原因？速度梯度存在于流动边界层还是主流区？

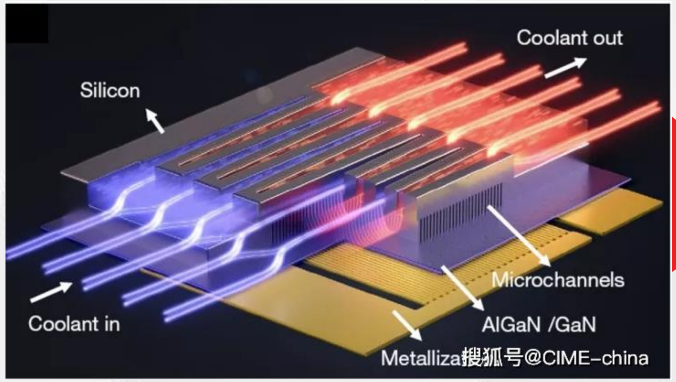
粘性力；流动边界层

03

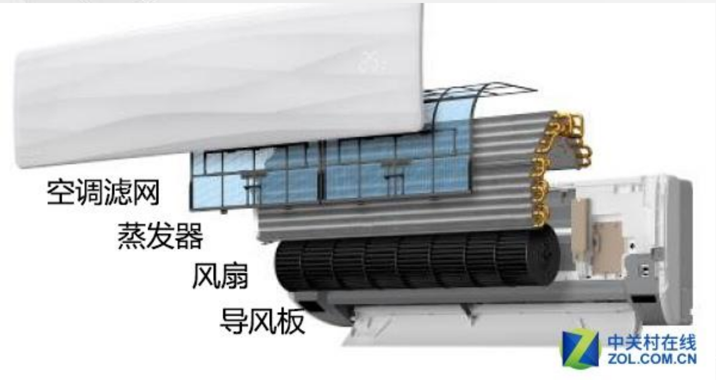
对流传热概述

- 定义及特点
- 研究目的
- 主要影响因素
- 分类

对流传热概述



对流传热现象



定义及特点

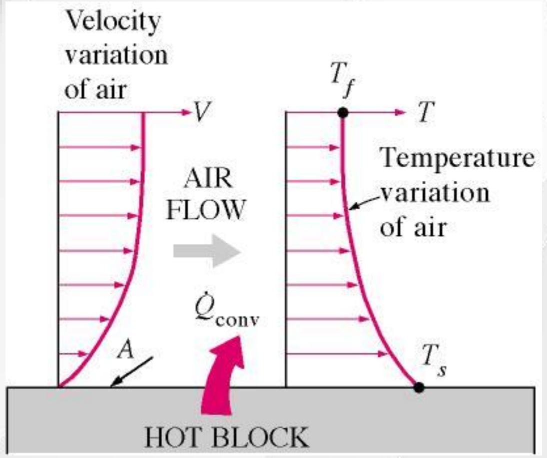
流体流过固体壁面时由于流体与壁面间温差所引起的热量交换

流体与固体壁面直接接触

流体与固体壁面存在温差

同时存在导热和热对流

近壁面存在速度梯度较大的边界层



研究目的

牛顿冷却公式 $$\Phi = hA(t_w - t_f)$$

Robin边界条件 $$-\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_w = h(t_w - t_f)$$

在之前的计算中，题目中给定了对流换热系数h

01

揭示h的影响因素及其与相关物理量的内在联系

02

定量计算对流换热系数h

03

研究强化对流传热的措施

主要影响因素

几何尺度　动力粘性　比热容　温度

$$h = f(u, l, \rho, \eta, \lambda, c_p, r, t_m)$$

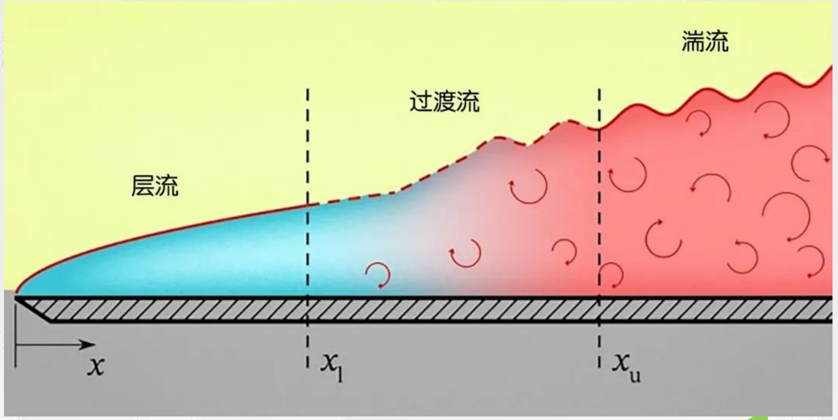
速度　密度　导热系数　相变潜热

流体的物理性质

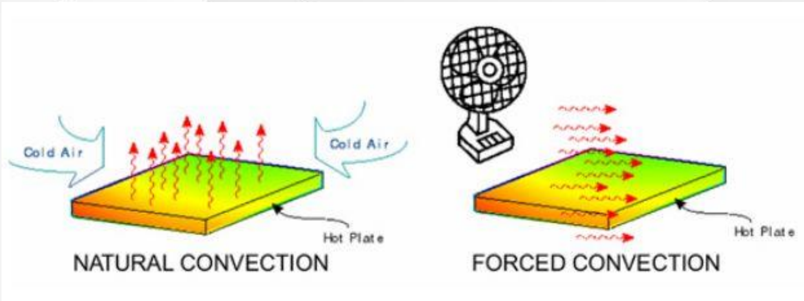
换热表面的几何因素

换热表面形状、大小、状态以及与流体运动方向的相对位置

流体的流动状态



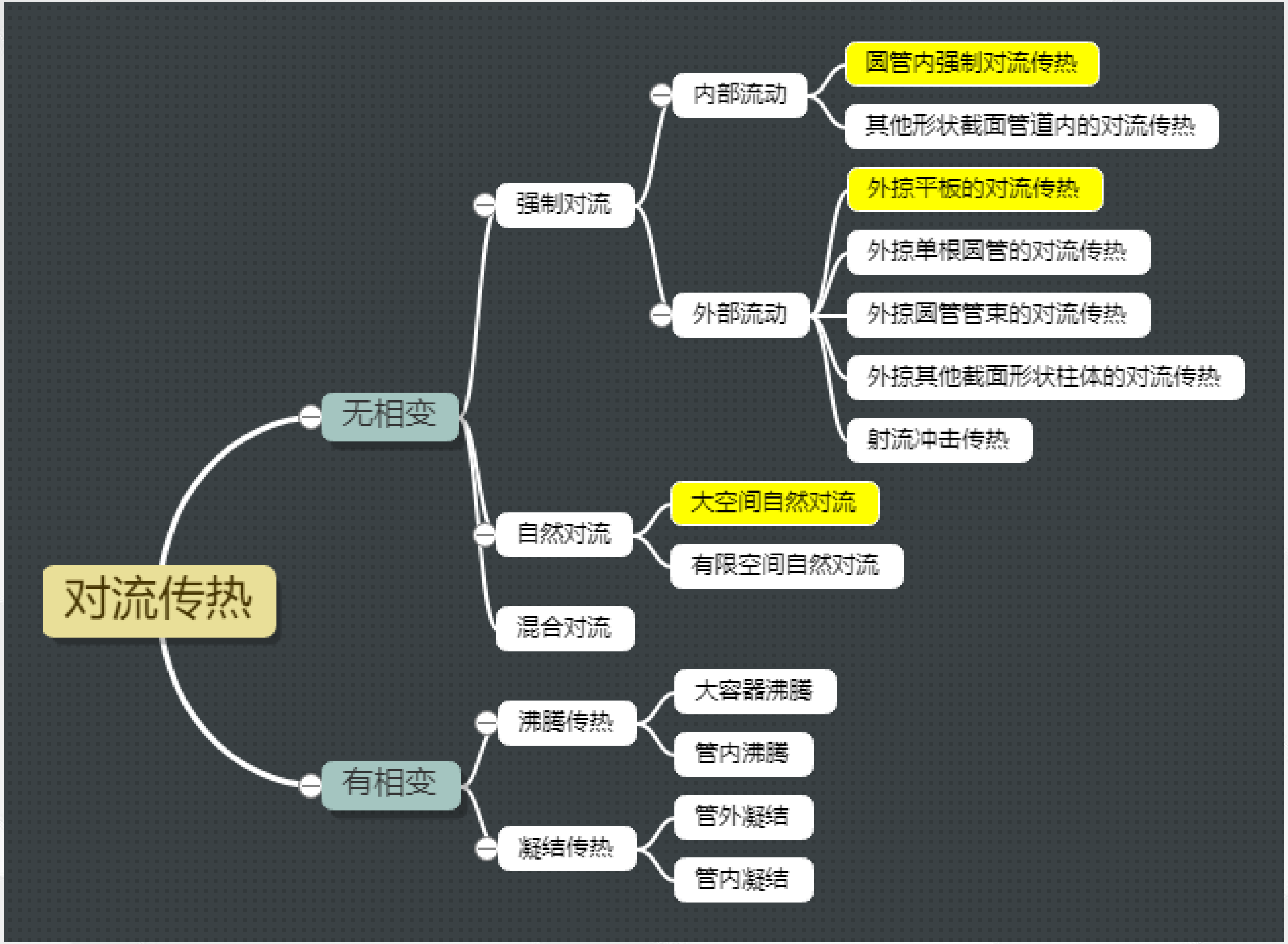
流动的起因



流体有无相变

- 无相变：取决于流体显热变化
- 有相变：包含了相变潜热

分类



对流传热
无相变
强制对流
内部流动
圆管内强制对流传热
其他形状截面管道内的对流传热
外部流动
外掠平板的对流传热
外掠单根圆管的对流传热
外掠圆管管束的对流传热
外掠其他截面形状柱体的对流传热
射流冲击传热
自然对流
大空间自然对流
有限空间自然对流
混合对流
有相变
沸腾传热
大容器沸腾
管内沸腾
凝结传热
管外凝结
管内凝结

04

对流传热问题的数学描写

- 导热问题和对流传热的对比
- 简化假设
- 对流传热微分方程的推导
- 相关讨论

导热问题和对流传热问题的对比

导热微分方程

$$\rho c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}\right) + \dot{\Phi}$$

导热问题

导热基本定律

温度场

热流量/热流密度

$$\Phi = -\lambda A \frac{dt}{dx}$$

$$\Phi = hA(t_w - t_f)$$

对流换热问题

对流传热的基本方程

温度场/速度场

热流量/热流密度

对流传热微分方程?

简化假设

01 流体为连续介质，流动是二维或三维的

02 流体为不可压缩牛顿流体
- 不可压缩：ρ = const
- 牛顿流体：切应力满足牛顿粘性定律

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

03 常物性、无内热源

04 忽略粘性耗散热以及辐射传热

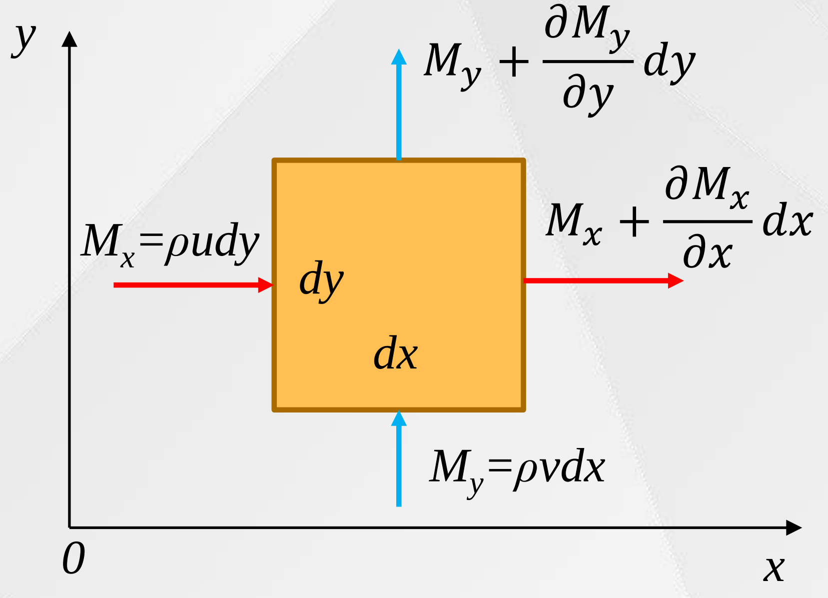
05 流体不对外做功

对流传热微分方程的推导

对流传热微分方程的推导

质量守恒方程

单位时间流出微元体的质量 − 单位时间流入微元体的质量 = 微元体流体质量的变化



$$\cancel{M_x}+\frac{\partial M_x}{\partial x}dx+\cancel{M_y}+\frac{\partial M_y}{\partial y}dy \qquad \cancel{M_x}+\cancel{M_y} \qquad \frac{\partial \rho}{\partial \tau}dxdy$$

$$\frac{\partial M_x}{\partial x}dx+\frac{\partial M_y}{\partial y}dy=\frac{\partial \rho}{\partial \tau}dxdy \Rightarrow \frac{\partial(\rho u dy)}{\partial x}dx+\frac{\partial(\rho v dx)}{\partial y}dy=\frac{\partial \rho}{\partial \tau}dxdy$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}=\frac{\partial \rho}{\partial \tau}$$

对于不可压缩流体

$$\boxed{\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0}$$

连续性方程（continuity equation）

对流传热微分方程的推导

动量守恒方程

微元体流体动量的变化率 = 作用在微元体上外力的总和

体积力（重力）　压力梯度　粘性力

不考虑 z 方向

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial \tau}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=F_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\eta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial \tau}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=F_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\eta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$

纳维尔-斯托克斯方程

对流传热微分方程的推导

能量守恒方程

热力学第一定律 Q = ΔE + W

导入与导出的净热量 + 热对流传递的净热量 + ~~内热源发热量~~ = 总能量的增量 + ~~对外膨胀功~~

无内热源

流体不对外做功

$$Q_{conduction} + Q_{convection} = \Delta U$$

单位时间导入导出的净热量

$$Q_{conduction} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dxdy + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} dxdy$$

单位时间热力学能的增量

$$\Delta U = \rho c_p dxdy \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

对流传热微分方程的推导

能量守恒方程

单位时间热对流传递的净热量

$$Q_{convection} = \left(\Phi'_x - \Phi'_{x+dx}\right) + \left(\Phi'_y - \Phi'_{y+dy}\right)$$

$$\Phi'_x - \Phi'_{x+dx} = \left(\dot{m}c_p t\right)_x - \left[\left(\dot{m}c_p t\right)_x + \frac{\partial\left(\dot{m}c_p t\right)_x}{\partial x}dx\right] = \frac{\partial\left(\dot{m}c_p t\right)_x}{\partial x}dx$$

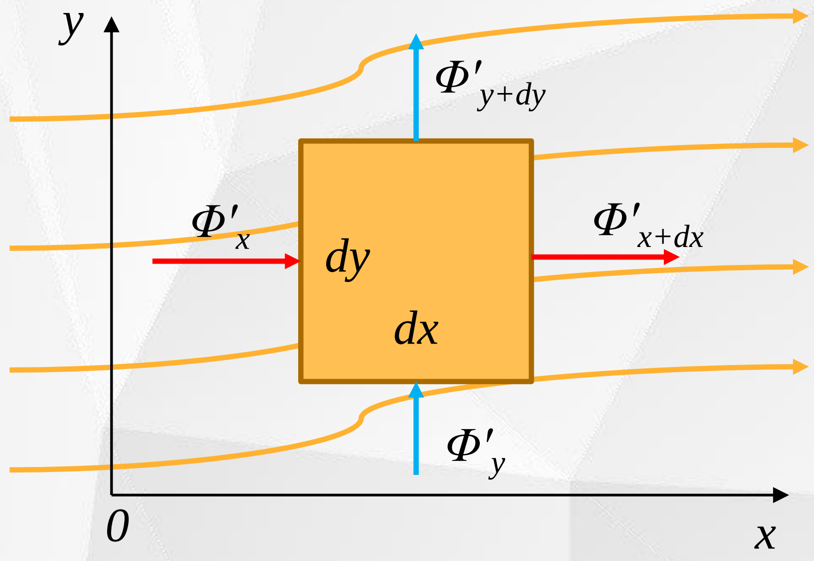
$$= -\frac{\partial\left(\rho u dy c_p t\right)_x}{\partial x}dx = -\rho c_p \frac{\partial (ut)_x}{\partial x}dxdy = -\rho c_p\left(t\frac{\partial u}{\partial x} + u\frac{\partial t}{\partial x}\right)dxdy$$

$$\Phi'_y - \Phi'_{y+dy} = -\rho c_p\left(t\frac{\partial v}{\partial y} + v\frac{\partial t}{\partial y}\right)dxdy$$

$$Q_{convection} = -\rho c_p\left(t\frac{\partial u}{\partial x} + u\frac{\partial t}{\partial x}\right)dxdy - \rho c_p\left(t\frac{\partial v}{\partial y} + v\frac{\partial t}{\partial y}\right)dxdy$$

$$= -\rho c_p\left(\cancel{t\frac{\partial u}{\partial x} + t\frac{\partial v}{\partial y}}\right)dxdy - \rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x} + v\frac{\partial t}{\partial y}\right)dxdy$$

$$= -\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x} + v\frac{\partial t}{\partial y}\right)dxdy$$



对流传热微分方程的推导

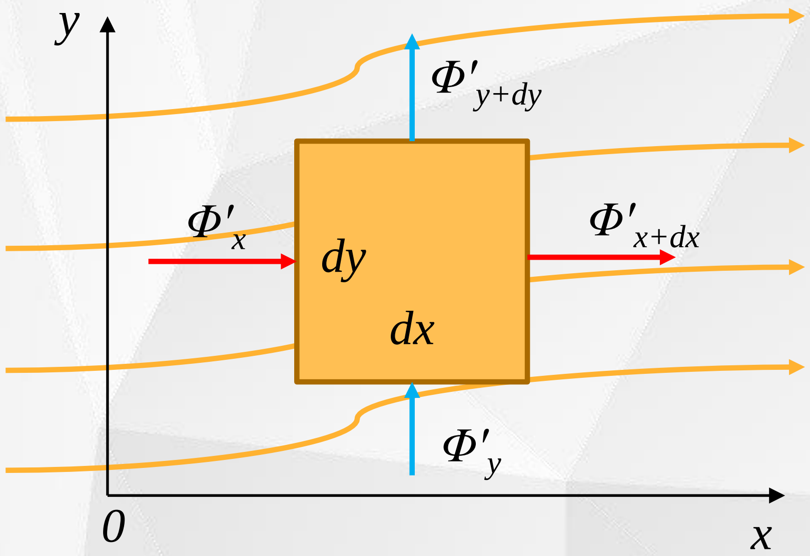
能量守恒方程

$$Q_{conduction} + Q_{convection} = \Delta U$$

$$\lambda\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}dxdy + \lambda\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}dxdy \qquad -\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x} + v\frac{\partial t}{\partial y}\right)dxdy \qquad \rho c_p dxdy\frac{\partial t}{\partial \tau}$$

$$\lambda\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\cancel{dxdy} + \lambda\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\cancel{dxdy} - \rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x} + v\frac{\partial t}{\partial y}\right)\cancel{dxdy} = \rho c_p\cancel{dxdy}\frac{\partial t}{\partial \tau}$$

$$\lambda\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} - \rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x} + v\frac{\partial t}{\partial y}\right) = \rho c_p\frac{\partial t}{\partial \tau}$$



二维、常物性、不可压缩、无内热源的能量微分方程

$$\boxed{\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x} + v\frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial \tau}\right) = \lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)}$$

对流传热微分方程的推导

能量守恒方程

$$\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}+\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)$$

非稳态项：流体温度随时间变化

扩散项：流体中热传导而净导入该控制容积的热量

对流项：流体流出与流进该控制容积净带走的热量

相关讨论

$$\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}+\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)$$

01

稳态情况

$$\frac{\partial t}{\partial \tau}=0$$

$$\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}+\cancel{\frac{\partial t}{\partial \tau}}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)$$

02

当流体静止，该式退化为常物性、无内热源的导热微分方程

$$\rho c_p\left(\cancel{u\frac{\partial t}{\partial x}}+\cancel{v\frac{\partial t}{\partial y}}+\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)$$

03

如有内热源

$$\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}+\frac{\partial t}{\partial \tau}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)+\dot{\Phi}(x,y)$$

相关讨论

对流换热完整微分方程组：

质量守恒方程（连续性方程）

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

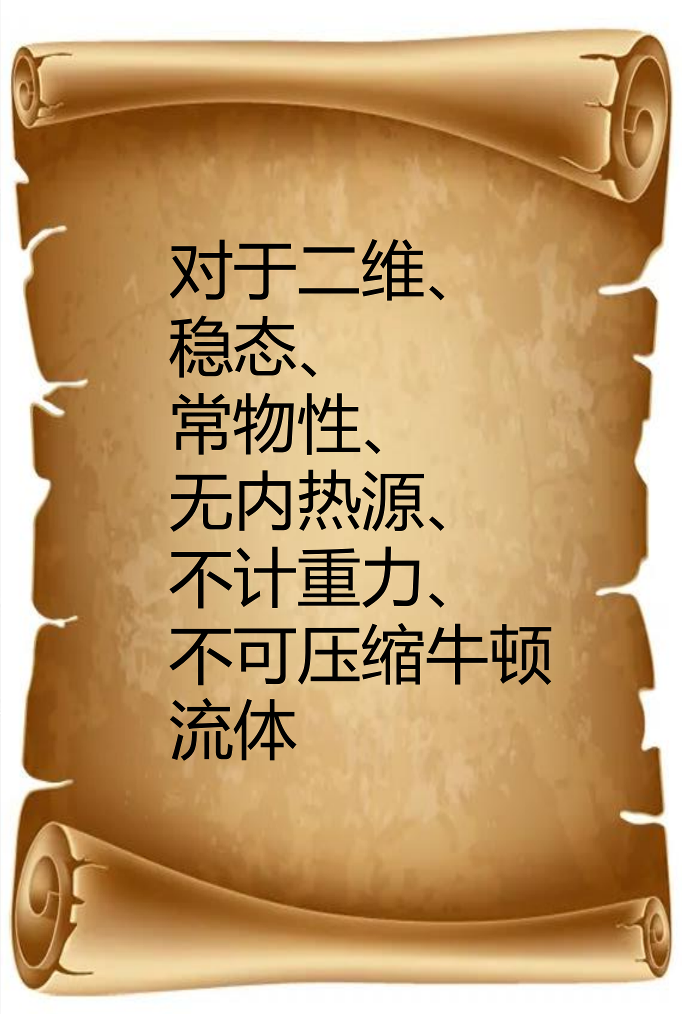
动量守恒方程（纳维尔-斯托克斯方程）

$$\rho\left(\cancel{\frac{\partial u}{\partial \tau}}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)=\cancel{F_x}-\frac{\partial p}{\partial x}+\eta\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$

$$\rho\left(\cancel{\frac{\partial v}{\partial \tau}}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)=\cancel{F_x}-\frac{\partial p}{\partial y}+\eta\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)$$

能量守恒方程

$$\rho c_p\left(u\frac{\partial t}{\partial x}+v\frac{\partial t}{\partial y}+\cancel{\frac{\partial t}{\partial \tau}}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)$$



相关讨论

定解条件

初始条件

初始时刻的条件

边界条件

- 边界上与速度、压力及温度有关的条件
- 只有Dirichlet和Neumann条件，没有Robin条件

05

边界层理论

- 流动边界层与热边界层
- 引入边界层概念的意义和适用范围
- 数量级分析

流动边界层与热边界层

流动边界层（速度边界层）

速度梯度/温度梯度	产生原因	无量纲数	厚度	流动形态
速度梯度主要存在于流动边界层，主流区速度梯度几乎为零	粘性力	雷诺数Re	$u_{y=\delta} = 99\% u_{\infty}$	分为层流和湍流边界层；与流速、距离和流体物性有关
温度梯度主要存在于热边界层，主流区温度梯度几乎为零	温度差	普朗特数Pr	$(t - t_w)_{\delta_t} = 99\%(t_{\infty} - t_w)$	热边界层内的温度分布受层流和湍流影响；湍流强化传热

热边界层（温度边界层）

引入边界层概念的意义和适用范围

意义

可以有效减小计算区域，
有效简化微分方程组

适用范围

适用于除流动分离的问题
大部分情况

数量级分析

比较方程中各量或各项量级的相对大小，保留量级较大的量或项，舍去量级小的项，实现方程的合理简化（得到适用于热边界层的能量方程）

1表示量级较大的量
δ表示量级较小的量

A 采用各量在作用区间的积分平均绝对值确定各项的数量级

主流速度（x方向）　u~1

y方向速度　v~δ

B 将因变量及自变量的数量级代入导数的表达式得到导数的数量级

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} \sim \frac{1}{1} = 1$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right) \sim \frac{1/\delta}{\delta} = \frac{1}{\delta^2}$$

数量级分析

常用物理量的数量级

变量	数量级
主流速度（x方向） u	1
y方向速度 v	δ
压力 p	1
温度 t	1
时间 τ	1
壁面特征长度 dx	1
壁面特征长度 dy	δ
流动边界层厚度 δ	δ
热边界层厚度 δ_t	δ
运动粘度 v	δ^2
热扩散率 α	δ^2

数量级分析

使用数量级分析对对流传热微分方程进行简化

对于二维、稳态、常物性、无内热源、不计重力、不可压缩牛顿流体

质量守恒方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial v}{\partial y} \Rightarrow \frac{1}{1} = \frac{\delta}{\delta}$$

动量守恒方程

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left(\cancel{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \Rightarrow 1\frac{1}{1} + \delta\frac{1}{\delta} = 1\frac{1}{1} + \cancel{\delta^2\frac{1}{1}} + \delta^2\frac{1}{\delta^2}$$

$$\cancel{u\frac{\partial v}{\partial x}} + \cancel{v\frac{\partial v}{\partial y}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} + \nu\left(\cancel{\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}} + \cancel{\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}}\right) \Rightarrow \cancel{1\frac{\delta}{1}} + \cancel{\delta\frac{\delta}{\delta}} = 1\frac{1}{\delta} + \cancel{\delta^2\frac{\delta^2}{1}} + \cancel{\delta^2\frac{\delta^2}{\delta^2}}$$

能量守恒方程

$$u\frac{\partial t}{\partial x} + v\frac{\partial t}{\partial y} = \alpha\left(\cancel{\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right) \Rightarrow 1\frac{1}{1} + \delta\frac{1}{\delta} = \cancel{\delta^2\frac{1}{1}} + \delta^2\frac{1}{\delta^2}$$

数量级分析

简化后的对流传热微分方程

质量守恒方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial v}{\partial y}$$

动量守恒方程

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \upsilon\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

能量守恒方程

$$u\frac{\partial t}{\partial x} + v\frac{\partial t}{\partial y} = \alpha\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$$

四个变量：*u*, *v*, *p*, *t*，但实际上只有三个方程，方程组不封闭

dp/dx可由边界层外主流理想流体伯努利方程求解，变量变为*u*, *v*, *t*，方程组封闭

$$\Delta p + \frac{1}{2}\rho\Delta(u^2) + \rho g\Delta h = 0$$

预习小测验答案

1.(多选题，1分)
以下哪些是影响对流传热系数的因素?

A. 比热容

B. 速度

C. 几何尺寸

D. 导热系数

答案： ABCD

2.(多选题，1分)
以下哪些是对流传热问题的简化假设?

A. 流体为连续介质，流动是二维或三维的

B. 流体为可压缩牛顿流体

C. 忽略粘性耗散热

D. 忽略辐射传热

答案： ACD

3.(多选题，1分)
以下关于流动边界层和热边界层描述正确的是?

A. 温度梯度主要存在于主流区，热边界层温度梯度几乎为零

B. 速度梯度主要存在于流动边界层，主流区速度梯度几乎为零

C. 热边界层内的温度分布受层流和湍流影响，湍流可以强化传热

D. 流动边界层相关的无量纲数是普朗特数

答案： BC