

传热学

对流换热III

授课老师：苗雨

目录

CONTENTS



華東理工大學

01

课前回顾及
导引

02

比拟理论

03

流体外掠
平板湍流
传热问题

04

比拟理论
的应用

01

课前回顾及导引

课前回顾及导引

1

离开前缘x处的边界层厚度 δ/x 的计算公式

$$\frac{\delta}{x} = 4.64 \sqrt{\frac{\mu x}{\rho u_{\infty}}} \approx \frac{5.0}{\sqrt{Re_x}}$$

2

范宁局部摩擦系数 C_f 的计算公式

$$C_f = \frac{0.664}{\sqrt{Re_x}}$$

3

流动边界层与热边界层厚度之比 δ/δ_t 的计算公式

$$\frac{\delta_t}{\delta} = \frac{1}{1.026} Pr^{-1/3}$$

4

局部表面传热系数 h_x 的计算公式

$$h_x = 0.332 \frac{\lambda}{x} Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$$

5

普朗特数表达式？物理意义？

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\eta c_p}{\lambda}$$

控制动量边界层及热边界层的相对厚度

6

努塞尔数表达式？物理意义？

$$Nu = \frac{hl_c}{\lambda}$$

表示对流换热强烈程度



课前回顾及导引

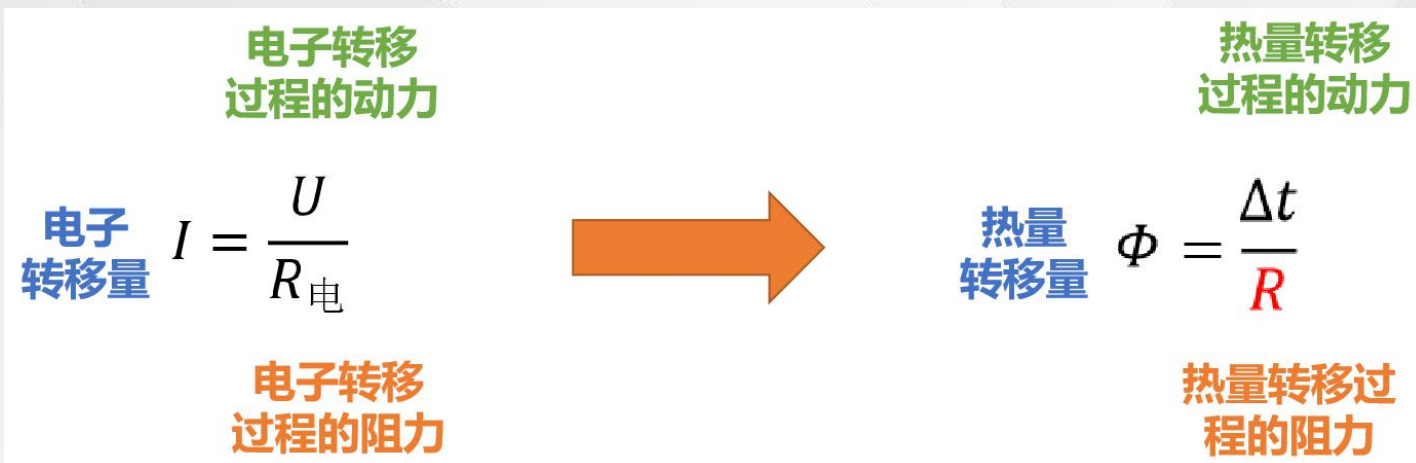


02

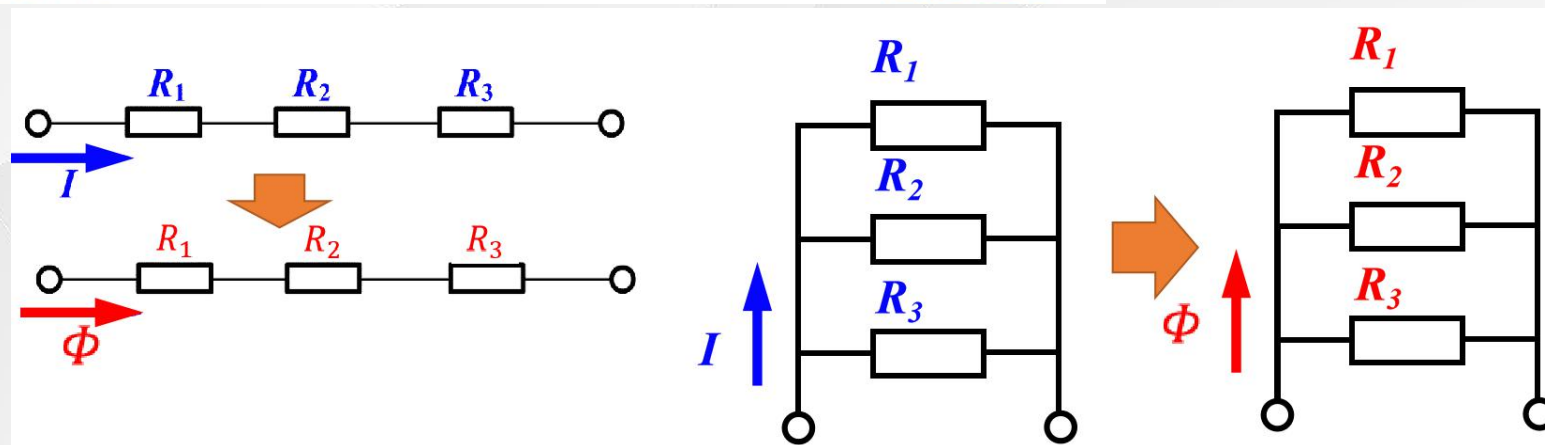
比拟理论



□ 热阻定义



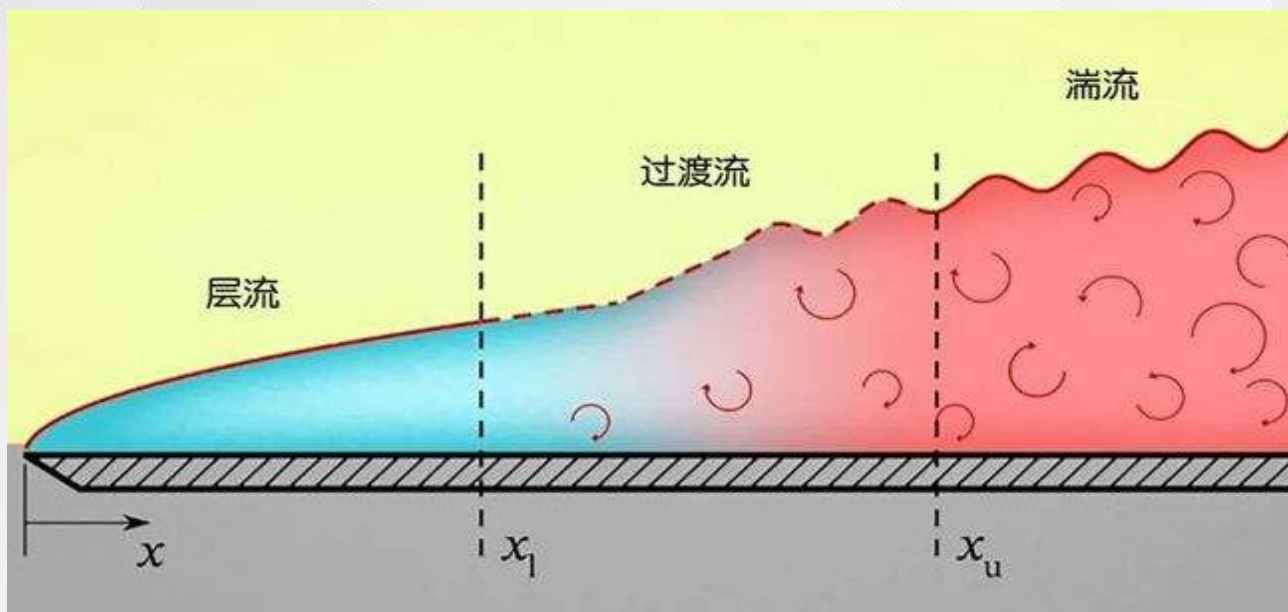
□ 热阻的串并联性质



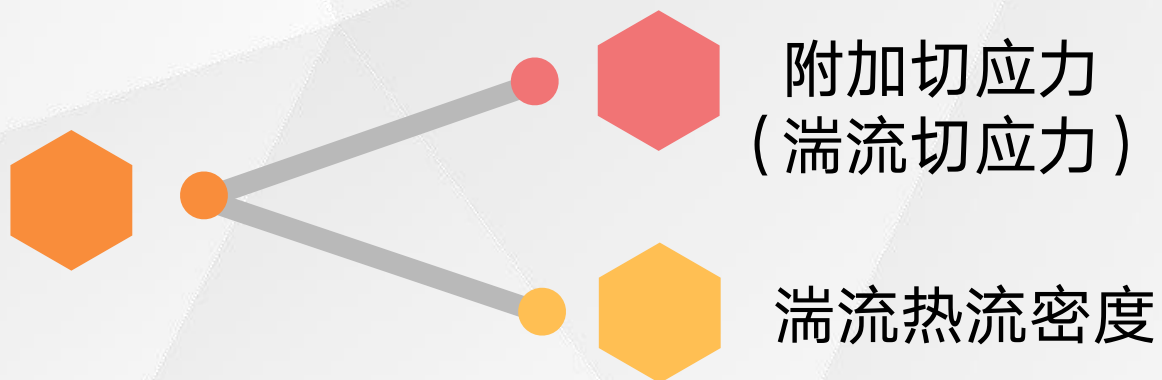
比拟理论：利用两个**不同**物理现象之间由于在控制方程方面的**类似性**，通过测定其中一种现象的规律而获得另一种现象基本关系的方法



比拟理论



流体微团的脉动



03

流体外掠平板湍流 传热问题

- 切应力和热流密度
- 湍流边界层动量方程和能量方程
- 由局部阻力系数推导努塞尔数



切应力和热流密度

切应力

$$\tau = \tau_l + \tau_t = \mu \frac{du}{dy} + \mu_t \frac{du}{dy} = \varrho \nu \frac{du}{dy} + \varrho \nu_t \frac{du}{dy} = \varrho (\nu + \nu_t) \frac{du}{dy}$$

ν_t 为湍流动量扩散率，
或湍流粘度

热流密度

$$q = q_l + q_t = - \left(\lambda \frac{dt}{dy} + \lambda_t \frac{dt}{dy} \right) = - \left(\varrho c_p \alpha \frac{dt}{dy} + \varrho c_p \alpha_t \frac{dt}{dy} \right) = - \varrho c_p (\alpha + \alpha_t) \frac{dt}{dy}$$

α_t 为湍流热扩散率



湍流边界层动量方程和能量方程

之前推导的：对于层流边界层

动量守恒方程

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

已知量

能量守恒方程

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



对于湍流边界层

动量守恒方程

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = (\nu + \nu_t) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

能量守恒方程

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

边界条件

$$@y = 0, u = 0, v = 0, t = t_w$$

$$@y = \delta, u = u_\infty, v = v_\delta, t = t_\infty$$

由局部阻力系数推导努塞尔数

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = (v + v_t) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

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

边界条件

$$@y = 0, u = 0, v = 0, t = t_w$$

$$@y = \delta, u = u_\infty, v = v_\delta, t = t_\infty$$

$$x^* = \frac{x}{l_c}$$

$$y^* = \frac{y}{l_c}$$

$$u^* = \frac{u}{u_\infty}$$

$$v^* = \frac{v}{u_\infty}$$

$$\Theta = \frac{t - t_w}{t_\infty - t_w}$$

无量纲化

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = \frac{1}{u_\infty l_c} (v + v_t) \frac{\partial^2 u^*}{\partial (y^*)^2}$$

$$u^* \frac{\partial \Theta}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial \Theta}{\partial y^*} = \frac{1}{u_\infty l_c} (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial^2 \Theta}{\partial (y^*)^2}$$

边界条件

$$@y^* = 0, u^* = 0, v^* = 0, \Theta = 0$$

$$@y^* = \frac{\delta}{l_c}, u^* = 1, v^* = \frac{v_\delta}{u_\infty}, \Theta = 1$$

假定 $\frac{v_t}{\alpha_t} = Pr = 1$, 两个方程完全等价 u^* 和 Θ 应有完全相同的解

由局部阻力系数推导努塞尔数

$$\frac{\partial u^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} = \frac{\partial \Theta}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0}$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} = \frac{\partial \left(\frac{u}{u_\infty} \right)}{\partial \left(\frac{y}{l_c} \right)} \Big|_{y=0}$$

$$= \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \frac{l_c}{u_\infty}$$

切应力

$$= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \frac{l_c}{\mu u_\infty}$$

阻力系数

$$= \tau_w \frac{1}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2} \frac{\rho u_\infty l_c}{2\mu}$$

雷诺数的
1/2

$$= c_f \frac{Re}{2}$$

$$Nu = c_f \frac{Re}{2}$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial y^*} \Big|_{y^*=0} = \frac{\partial \left(\frac{t - t_w}{t_\infty - t_w} \right)}{\partial \left(\frac{y}{l} \right)} \Big|_{y=0}$$

$$= \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y=0} \frac{l}{t_\infty - t_w}$$

热流密度

$$= -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y=0} \frac{-l}{(t_\infty - t_w) \lambda}$$

对流换热系数

$$= \frac{q}{t_\infty - t_w} \frac{l}{\lambda}$$

$$= Nu$$

04

比拟理论的应用

- 雷诺比拟
- 契尔顿-柯尔本比拟



雷诺比拟



01

成立的先决条件： $Pr_t=1$



02

通过对平板上湍流边界层阻力系数的测定

$$c_f = 0.0592 Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (Re \leq 10^7)$$



03

局部努塞尔数

$$Nu_x = c_f \frac{Re_x}{2} = \frac{Re_x}{2} \cdot 0.0592 Re_x^{-\frac{1}{5}} = 0.0296 Re_x^{\frac{4}{5}}$$

契尔顿-柯尔本比拟（修正雷诺比拟）

01

当 $Pr_t \neq 1$ 时，需要进行修正

j 因子，在制冷、低温工业的换热器设计中应用较广

02

$$\frac{c_f}{2} = St Pr^{\frac{2}{3}} = j \quad (0.6 < Pr < 60)$$

斯坦顿数 $St = \frac{Nu}{RePr}$ ，用于测量传递到流体中的热量与流体的热容量之比

03

$$\frac{c_f}{2} = \frac{Nu}{RePr} Pr^{\frac{2}{3}} = \frac{Nu}{RePr^{\frac{1}{3}}}$$

契尔顿-柯尔本比拟（修正雷诺比拟）

对于 $Re > 5 \times 10^5$ 的外掠等温平板流动，当平板长度 l 大于临界长度 x_c 时，平板上的边界层可以看成由层流段（ $x < x_c$ ）及湍流段（ $x > x_c$ ）组成

平均表面传热系数

$$h_m = \frac{\lambda}{l} \left[0.332 \left(\frac{u_\infty}{\nu} \right)^{1/2} \int_0^{x_c} \frac{dx}{x^{1/2}} + 0.0296 \left(\frac{u_\infty}{\nu} \right)^{4/5} \int_{x_c}^l \frac{dx}{x^{1/5}} \right] Pr^{1/3}$$

层流段

湍流段

积分后得，

$$Nu_m = [0.664 Re_c^{1/2} + 0.037 (Re^{4/5} - Re_c^{4/5})] Pr^{1/3}$$

临界雷诺数

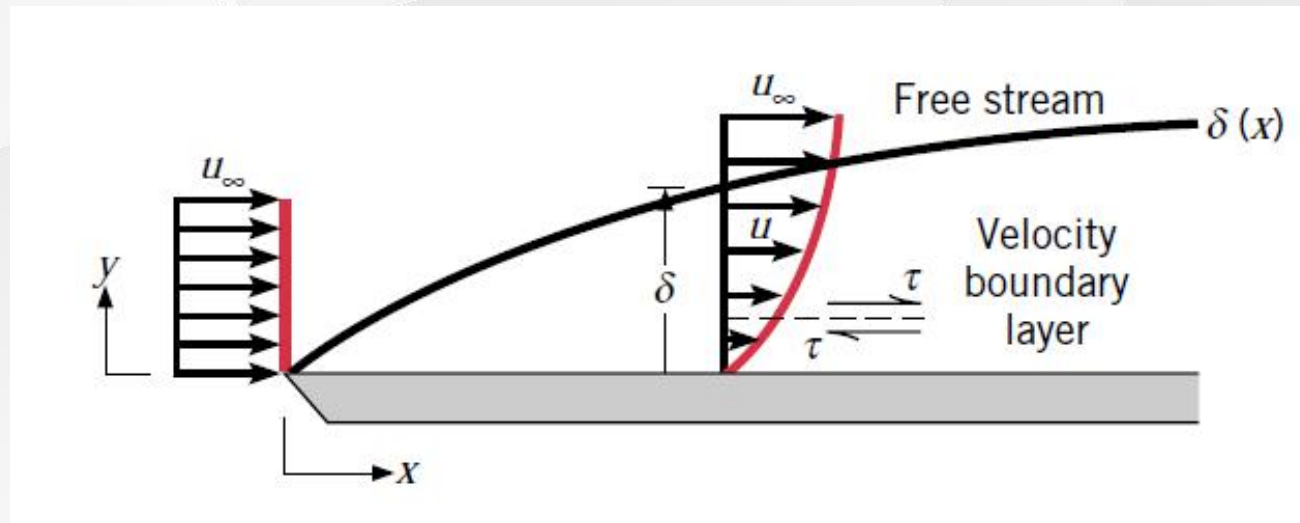
以平板全长 l 为特征长度的雷诺数

取 $Re_c = 5 \times 10^5$

$$Nu_m = (0.037 Re^{4/5} - 871) Pr^{1/3}$$

比拟理论的应用

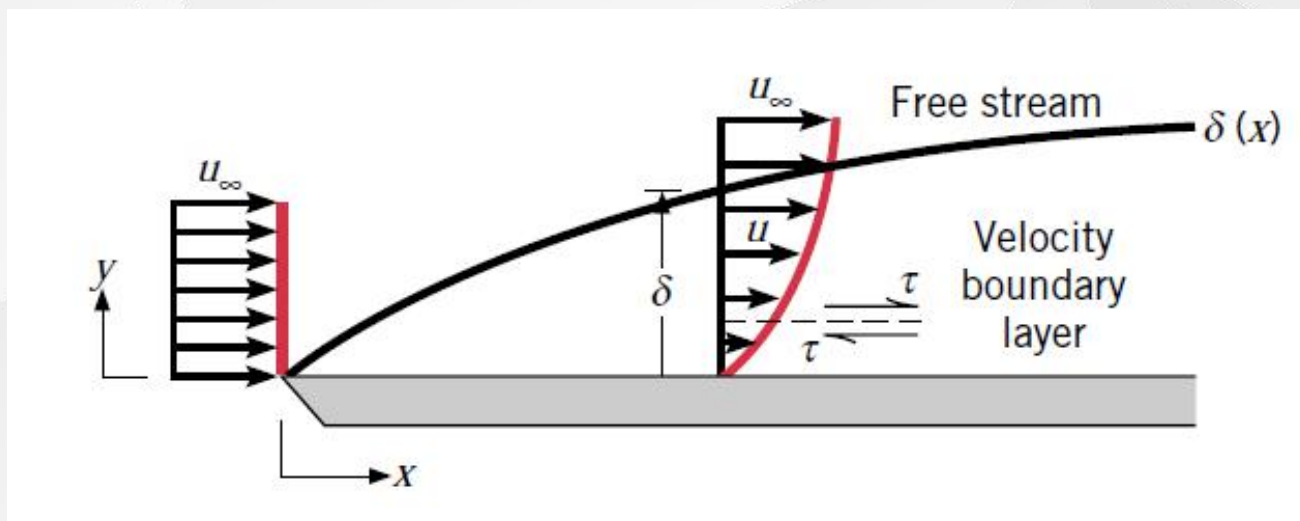
例题1：温度为 380°C 、流速为 6m/s 的大气压下的过热水蒸气流过温度为 30°C 的平板。在离开前沿点 2m 处的地方测得局部表面传热系数为 $149\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。试计算该处的 Re_x 、 Nu_x 、 c_f 之值。已知过热水蒸气在 380°C 和大气压下的密度 $0.5860\text{kg}/\text{m}^3$ ，动力粘度 $1.250\times 10^{-5}\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ ， $\text{Pr}=1.004$ 。





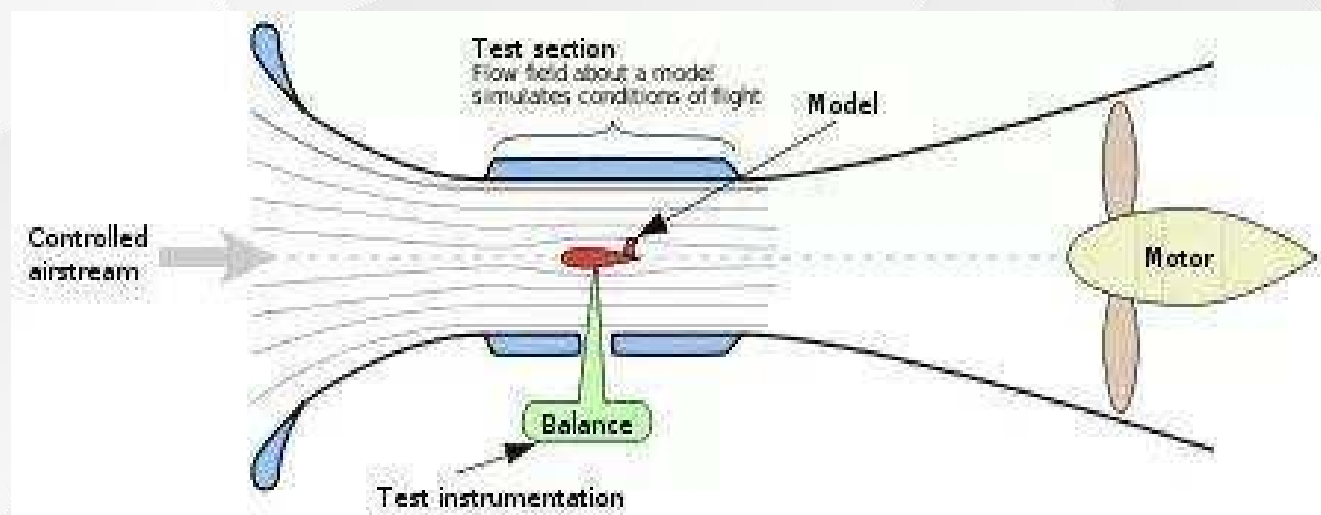
比拟理论的应用

例题2：温度为 30°C 、流速为 6m/s 的大气压下的空气流过 5m 长平板。在离开前沿点 2m 处的地方开始出现湍流。试计算整个平板的 Nu_m 之值。



比拟理论的应用

例题3：将一块尺寸为 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ 的薄平板平行地置于由风洞造成的均匀气体流场中。在气流速度 $u_\infty = 40\text{m/s}$ 的情况下用测力仪测得，要使平板维持在气流中需对它施加 0.075N 的力。此时气流温度 $t_\infty = 20^\circ\text{C}$ ，平板两表面的温度 $t_w = 120^\circ\text{C}$ 。试据比拟理论确定平板两个表面的对流传热量。气体压力为 $1.013 \times 10^5\text{Pa}$ 。





预习小测验答案

1.(多选题, 1分)

以下关于比拟理论描述正确的是?

A. 比拟是利用两个不同物理现象之间由于在控制方程方面的类似性, 通过测定其中一种现象的规律而获得另一种现象基本关系的方法

B. 利用湍流中的附加切应力及热流密度均由流体微团的脉动所致推测湍流中的热量传递与流动阻力的联系属于比拟理论的应用

C.

$$Nu_x = \frac{C_f}{3} Re_x$$

根据比拟理论通过较易测得的阻力系数获得的努塞尔数表达式是

D. 根据电学中电阻的串并联叠加原则推导传热学中的热阻的串并联原则属于比拟理论的应用

答案: ABD

2.(多选题, 1分)

以下关于雷诺比拟描述错误的是

A. 雷诺比拟涉及到斯坦顿数St

B. 雷诺比拟成立的先决条件是普朗特数不等于1

C.

平板上湍流边界层阻力系数的表达式是 $C_f = 0.0529 Re_x^{-0.5}$

D.

在湍流满足雷诺比拟成立条件时, 努塞尔数的表达式是 $Nu_x = 0.0296 Re_x^{0.8}$

答案: ABC

3.(多选题, 1分)

以下关于契尔顿-柯尔本 (Chilton-Colburn) 比拟描述正确的是?

A. 使用该比拟方法时普朗特数不等于1

B. 契尔顿-柯尔本比拟是对雷诺比拟的修正

C. 契尔顿-柯尔本比拟中涉及斯坦顿数

D. 契尔顿-柯尔本比拟中涉及j因子

答案: ABCD



第2题：请就目前为止的情况给《传热学》这门课打分，10分是满分 [量表题]

本题平均分：9.21 NPS值：76.32%

选项	小计	比例
1	0	0%
2	0	0%
3	0	0%
4	0	0%
5	0	0%
6	0	0%
7	2	5.26%
8	7	18.42%
9	10	26.32%
10	19	50%
本题有效填写人次	38	

第3题：你觉得这门课还有哪些有待提高的地方？ [填空题]

词频分析

观点分析

隐藏词云图

查看详细信息

答卷数据有更新，您可以获取最新分析结果

提交更新



第4题：请选择以下你不太熟悉的导热部分的知识点： [多选题]

选项	小计	比例
傅里叶定律	3	7.89%
导热系数	0	0%
导热微分方程及其各种简化形式	14	36.84%
Dirichlet条件、Neumann条件、Robin条件	13	34.21%
翅片（肋片）	21	55.26%
热阻	8	21.05%
傅里叶数	4	10.53%
毕渥数	2	5.26%
本题有效填写人次	38	

● 作业：《传热学》 P223 5-12

P223 5-13

● P224 5-25