第一章、基本内容：

一、热量传递的三种基本方式

1.导热 掌握导热系数λ 是一物性参数，其单位为 w / (m·K)；它取决于物质的热力状态，如压力、温度等。

2.对流 掌握对流换热的表面传热系数 h 为一过程量，而不像导热系数 λ 那样是物性参数。

3.热辐射 掌握黑体辐射的斯蒂藩—玻耳兹曼定律。

二、传热过程与传热系数

1.传热过程 理解传热系数 K 是表征传热过程强弱的标尺。 2.热阻分析

1、试分析室内暖气片的散热过程，各环节有哪些热量传递方式？以暖气片管内走热水为例。

答：有以下换热环节及热传递方式

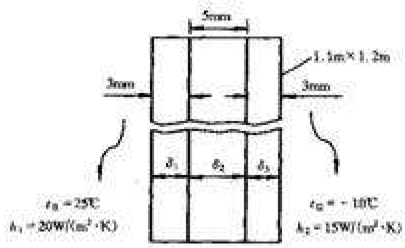
(1)由热水到暖气片管到内壁，热传递方式是对流换热(强制对流)；

(2)由暖气片管道内壁至外壁，热传递方式为导热；

(3)由暖气片外壁至室内环境和空气，热传递方式有辐射换热和对流换热。

二、定量计算

本节的定量计算主要是利用热量传递的三种基本方式所对应的定律，即导热的傅里叶定律，对流换热的牛顿冷却公式，热辐射的斯蒂藩—玻耳兹曼定律进行简单的计算。另外，传热过程、热阻综合分析法及能量守恒定律也是较重要的内容。

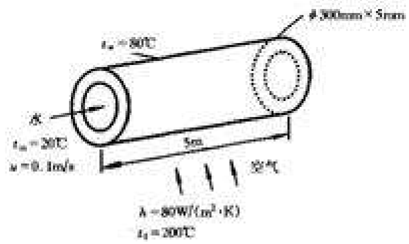


1、一双层玻璃窗，宽 1.1m，高 1.2m，厚 3mm，导热系数为 1.05W/(m·K)；中间空气层厚 5MM，设空气隙仅起导热作用，导热系数为 0.026W/(m·K)。室内空气温度为 25℃。表面传热系数为 20W/(m²·K)；室外空气温度为-10℃，表面传热系数为 15W/(m²·K)。试计算通过双层玻璃窗的散热量，并与单层玻璃窗相比较。假定在两种情况下室内、外空气温度及表面传热系数相同。

解：(1)双层玻璃窗情形，由传热过程计算式：

$$q=\frac{A\left(t_{f1}-t_{f2}\right)}{\frac{1}{h_1}+\sum_{i=1}^{3}\frac{\delta_i}{\lambda_i}+\frac{1}{h_2}}$$

$$=\frac{1.1\times1.2\times\left[25-(-10)\right]}{\frac{1}{20}+\frac{0.003}{1.05}+\frac{0.005}{0.026}+\frac{0.003}{1.05}+\frac{1}{15}}=146.8W$$



(2)单层玻璃窗情形：

$$q=\frac{A\left(t_{f1}-t_{f2}\right)}{\frac{1}{h_1}+\frac{\delta}{\lambda}+\frac{1}{h_2}}=\frac{1.1\times1.2\times\left[25-(-10)\right]}{\frac{1}{20}+\frac{0.003}{1.05}+\frac{1}{15}}=386.5W$$

显然，单层玻璃窃的散热量是双层玻璃窗的 2.6 倍。因此，北方的冬天常常采用双层玻璃窗使室内保温。

2、一外径为 0.3m，壁厚为 5mm 的圆管，长为 5m，外表面平均温度为 80℃。200℃的空气在管外横向掠过，表面传热系数为 80W/(m²·K)。入口温度为 20℃的水以 0.1m/s 的平均速度在管内流动。如果过程处于稳态，试确定水的出口温度。水的比定压热容为 4184J/(kg·K)，密度为 980kg/m³。

解：(1)管外空气与管子之间的对流换热量：

$$\Phi=hA\left(t_f-t_w\right)=h\pi dl\left(t_f-t_w\right)=80\pi\times0.3\times5\times(200-80)=45239\quad W$$

(2)由于过程处于稳态，管外空气所加的热量由管内水带走，因此，

$$\Phi=\rho uA_c c_p\left(t_{out}-t_{in}\right)=\rho u\left[\frac{\pi}{4}(d-2\delta)^2\right]c_p\left(t_{out}-t_{in}\right)=45239\quad W$$

其中 Ac 为管内流通截面积。故出口温度为：

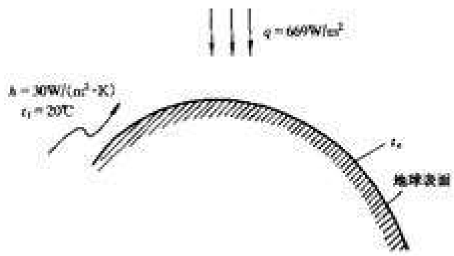
$$t_{out}=\frac{\Phi}{\rho u\left[\frac{\pi}{4}(d-2\delta)^2\right]c_p}+t_{in}=\frac{45239}{980\times0.1\times0.066\times4184}+20=21.7℃$$

3、白天，地球表面接受来自太阳的辐射热流密度为 669W/m2。设地表空气与地面向的表面传热系数为 30W/(m2·K)，空气温度为 20℃。设地球可以看成黑体表面，且地球对太空的辐射可看成是对 0K 黑体空间的辐射。试确定地球表面的平衡温度。

解：由热平衡关系，地球接受来自太阳的辐射热量以两种方式散掉，即与空气的对流换热及与太空的辐射换热，设过程为稳态，有：

$$q=h\left(T_e-T_f\right)+\sigma_b\left(T_e^4-T_{sky}^4\right)$$ 。

将 $q=669W/m^2, h=30W/(m^2\bullet K), T_f=293K, T_{sky}=0K$ 代入上式，得 $T_c\approx300K$



填空题

1、厚度 δ ，导热系数 λ 为常数的大平壁的单位面积导热热阻是 δ /λ 。

2、在地球引力场作用的范围内，单纯的导热只能发生在密实的固体中。因为，当有温差时，液体和气体就会出现__对流现象__，难以维持单纯的导热。

3. 保温材料是指导热系数小于_0.2w/(mk)_的材料。

4. 金属含有较多的杂质，则其导热系数将__减小_。

5、单位面积的热阻总可以写作___⊿t/q__。

6、导热可以在固体、液体及气体中发生。

名词解释

1、热传导：2、传热过程：3、热对流：4、热辐射：5、对流换热：6、辐射换热：7、传热热阻：8、传热系数：9、热流量：

问答题

1、一容器内存热水，将其放在室内，缓慢冷却，试绘出热量由热水传给室内空气的全部热量传递过程。

答：热水与壁对流换热、导热、壁与空气对流换热、壁与壁辐射换热、空气与壁对流换热、导热、壁与空气对流换热、壁发射辐射。

3、什么是对流换热系数？什么是传热系数？它们是否属流体的物性参数？

答：流体与固壁温差 1℃时，单位时间内通过单位面积传递的热量，称为对流换热系数。以 h 表示，单位为 w/(m²℃)；固壁两侧流体温差 1℃时，单位时间内通过单位面积传递的热量为传热系数，单位为 w/(m²℃)；它们都不是物性参数。

第二章、导热理论基础及稳态导热部分

一、傅里叶定律与导热系数

二、导热微分方程及单值性条件

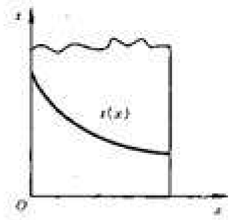
三、一维稳态导热问题的解析解(无限大平板、无限长圆筒壁、球壳)

关于温度分布曲线的绘制

关于温度计套管测温误差

温度计套管是典型的等截面直肋一维稳态导热问题。温度计套管产生误差的原因是由于沿肋高(即套管长度方向)有热量导出和套管表面与流体之间存在换热热阻。因此，要减小测温误差，一方面应减小沿肋高方向的导热量(即增加导热热阻和减小套管根部与外界环境的散热)，另一方面应增加流体与套管壁的对流换热表面传热系数。请提出减小测温误差的措施。

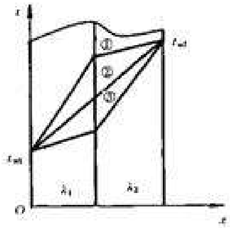
1、一维无内热源、平壁稳态导热的温度场如图所示。试说明它的导热系数 λ 是随温度增加而增加，还是随温度增加而减小?



答:由傅立叶里叶定律，$q = -gradt = -\lambda(x)\dfrac{dt(x)}{dx} = const$

图中[redacted]随 x 增加而减小，因而$\lambda(x)$随 2 增加 x 而增加，而温度 t 随 x 增加而降低，所以导热系数随温度增加而减小。

2、如图所示的双层平壁中，导热系数 λ_1，λ_2为定值，假定过程为稳态，试分析图中三条温度分布曲线所对应的 λ_1和 λ_2的相对大小。

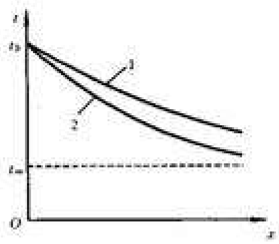


答：由于过程是稳态的，因此在三种情况下，热流量Φ 分别为常数，即：$\Phi = -\lambda A\dfrac{dt}{dx} = const$

所以对情形①：$\left|\dfrac{dt}{dx}\right|_1 \succ \left|\dfrac{dt}{dx}\right|_2$，故$\lambda_1 \prec \lambda_2$；

同理，对情形②：$\left|\dfrac{dt}{dx}\right|_1 = \left|\dfrac{dt}{dx}\right|_2$，故$\lambda_1 = \lambda_2$；

对情形③：$\left|\dfrac{dt}{dx}\right|_1 \prec \left|\dfrac{dt}{dx}\right|_2$，故$\lambda_1 \succ \lambda_2$。

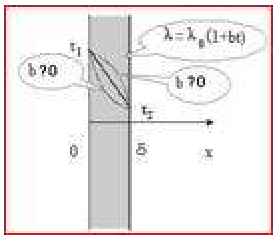


3、两种几何尺寸完全相同的等截面直肋，在完全相同的对流环境(即表面传热系数和流体温度均相同)下，沿肋高方向温度分布曲线如图所示。请判断两种材料导热系数的大小和肋效率的高低?

答：对一维肋片，导热系数越高时，沿肋高方向热阻越小，因而沿肋高方向的温度变化(降落或上升)越小。因此曲线 1 对应的是导热系数大的材料．曲线 2 对应导热系数小的材料。而且，由肋效率的定义知，曲线 1 的肋效率高于曲线 2。

4、用套管温度计测量容器内的流体温度，为了减小测温误差，套管材料选用铜还是不锈钢?

答：由于套管温度计的套管可以视为一维等截面直助，要减小测温误差(即使套管顶部温度 t_H尽量接近流体温度 t_f)，应尽量减小沿套管长度流向容器壁面的热量，即增大该方向的热阻。所以，从套管树料上说应采用导热系数更小的不锈钢。



5、λ 为变量的一维导热问题。某一无限大平壁厚度为 δ ，内、外表面温度分别为 t_{w1}、 t_{w2}，导热系数为 $\lambda=\lambda_0(1+bt)$W/mK，试确定平壁内的温度分布和热流通量。设平壁内无内热源。

$\dfrac{d}{dx}\left(\lambda\dfrac{dt}{dx}\right)=0$， $t\,|_{x=0} = t_{w1}$　　$t\,|_{x=\delta} = t_{w2}$

$\lambda_0(1+bt)\dfrac{dt}{dx}=C_1$, $\lambda_0 t+\dfrac{1}{2}\lambda_0 bt^2=C_1x+C_2$,

$C_2=\lambda_0\left(t_{w1}+\dfrac{1}{2}bt_{w1}^2\right)$, $C_1=-\dfrac{t_{w1}-t_{w2}}{\delta}\lambda_0\left[1+\dfrac{1}{2}b(t_{w1}+t_{w2})\right]$

温度分布：$\left(t+\dfrac{1}{2}bt^2\right)=\left(t_{w1}+\dfrac{1}{2}bt_{w1}^2\right)-\dfrac{t_{w1}-t_{w2}}{\delta}x\left[1+\dfrac{1}{2}b(t_{w1}+t_{w2})\right]$

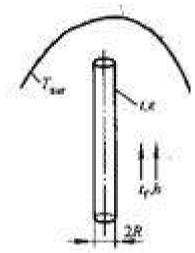
热流通量：$q=-\lambda\dfrac{dt}{dx}=-C_1=\dfrac{t_{w1}-t_{w2}}{\delta}\lambda_0\left[1+\dfrac{1}{2}b(t_{w1}+t_{w2})\right]$

同学们可以根据 $q=-\lambda\dfrac{dt}{dx}=const$ 的特点，按照题 2 的方法分析 b>0 和 b<0 对应图中哪一条曲线。

二、定量计算　定量计算主要题型包括以下几类：

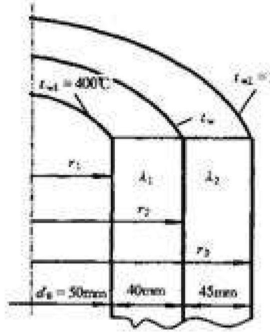
(1)建立物理问题所对应的数学描写(控制方程及定解条件)及傅里叶定律；
(2)平壁、圆管壁、球壳的一维稳态导热计算；
(3)含内热源、变截面、变导热系数的一维稳态导热问题分析求解
(4)一维稳态等截面助及不等截面肋的分析计算；

1、一直径为 d。，单位体积内热源的生成热Φ 的实心长圆柱体，向温度为 t∞的流体散热，表面传热系数为 h。试列出圆柱体中稳态温度场的微分方程式及定解条件。



解：
$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(\lambda r\frac{dt}{dr}\right)+\Phi=0$$
$$r=0,\frac{dt}{dr}|_{r=0}=0;r=\frac{d_0}{2},-\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_{r=\frac{d_0}{2}}=h\left(t|_{r=\frac{d_0}{2}}-t_\infty\right)$$

2、金属实心长棒通电加热,单位长度的热功率等于 Φ_l(单位是 W/m)，材料的导热系数λ，表面发射率ε、周围气体温度为 t_f，辐射环境温度为 T_{sur}，表面传热系数 h 均已知，棒的初始温度为 t_0。试给出此导热问题的数学描述。



解：此导热问题的数学描述
$$\frac{\partial t}{\partial\tau}=a\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial t}{\partial r}\right)+\frac{\Phi_l}{\pi R^2}$$
$$\tau=0,t=t_0=Const$$
$$r=0,\frac{\partial t}{\partial r}|_{r=0}=0$$
$$r=R,-\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial r}\right)_{r=R}=h\left(t|_{r=R}-t_f\right)+\varepsilon\sigma_b\left(T^4|_{r=R}-T_{sur}^4\right)$$

3、外直径为 50mm 的蒸汽管道外表面温度为 400℃，其外包裹有厚度为 40mm，导热系数为 0.11W/(m·K)的矿渣棉，矿渣棉外又包有厚为 45mm 的煤灰泡沫砖，其导热系数λ 与砖层平均温度 t_m 的关系如下：$\lambda=0.099+0.0002t_m$。煤灰泡沫砖外表面温度为 50℃。已知煤灰泡沫砖最高耐温为 300℃。试检查煤灰泡沫砖层的温度有无超出最高温度?并求通过每米长该保温层的热损失。

解：本题的关键在于确定矿渣棉与煤灰泡沫砖交界处的温度，而由题意，煤灰泡沫砖的导热系数又取决于该未知的界面温度，因而计算过程具有迭代(试凑)性质。

先假定界面温度为 tw，如图所示。

则由题意：

$$\Phi_l=\frac{t_{w1}-t_w}{\dfrac{1}{2\pi\lambda_1}\ln\dfrac{d_2}{d_1}}=\frac{t_w-t_{w2}}{\dfrac{1}{2\pi\lambda_2}\ln\dfrac{d_3}{d_2}}$$，而 $\lambda_2=0.099+0.0002\left(\dfrac{t_w+t_{w2}}{2}\right)$,

$$\Phi_l=\frac{400-t_w}{\dfrac{1}{0.11}\ln\dfrac{130}{50}}=\frac{t_w-50}{\dfrac{1}{\lambda_2=0.099+0.0001(t_w+50)}\ln\dfrac{220}{130}}$$

迭代(试凑)求解上式，得：$t_w\approx167℃$。

所以没有超过该保温层的最高温度。通过每米长保温层的热损失：

$$\Phi_l=\frac{400-167}{\frac{1}{2\pi\times0.11}\ln\frac{130}{50}}=168.5 W/m$$

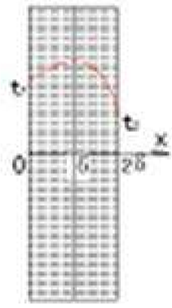
4、一厚度为 2δ 的无限大平壁，导热系数 λ 为常量，壁内具有均匀的内热源 Φ（单位为 W/m^3），边界条件为 $x=0$，$t=t_{w1}$；$x=2\delta$，$t=t_{w2}$；$t_{w1}>t_{w2}$。试求平壁内的稳态温度分布 t(x) 及最高温度的位置 x_{tmax}，并画出温度分布的示意图。

解建立数学描述如下：

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{q_v}{\lambda}=0,\quad x=0\quad t|_{x=0}=t_{w1};\quad x=2\delta\quad t|_{x=2\delta}=t_{w2},$$

$$t(x)=-\frac{q_v}{2\lambda}x^2+C_1x+C_2,\quad C_2=t_{w1}\quad C_1=\frac{t_{w2}-t_{w1}}{2\delta}+\frac{q_v\delta}{\lambda},$$

据 $\frac{dt}{dx}=-\frac{q_v}{\lambda}x+C_1=0$ 可得最高温度的位置 xtmax，即 $x_{tmax}=\frac{C_1\lambda}{q_v}$ 。温度分布的示意图见图。



一维稳态导热温度分布公式汇总

(a) 没有内热源时（第一类边界条件下）		
平壁：$\frac{t-t_2}{t_1-t_2}=1-\frac{x}{\delta}$	圆筒壁（圆柱）：$\frac{t-t_2}{t_1-t_2}=1-\frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)}$	球壁（球壳）：$\frac{t-t_2}{t_1-t_2}=1-\frac{1/r_1-1/r}{1/r_1-1/r_2}$
(b) 有均匀内热源，并相对于坐标呈对称分布		
平壁（总厚度 δ）：$t=\frac{\Phi_v}{2\lambda}\left[\left(\frac{\delta}{2}\right)^2-x^2\right]+t_0$	圆筒壁（圆柱）：$t=\frac{\Phi_v}{4\lambda}\left[\left(\frac{d}{2}\right)^2-r^2\right]+t_0$	球壁（球壳）：$t=\frac{\Phi_v}{6\lambda}\left[\left(\frac{d}{2}\right)^2-r^2\right]+t_0$

注：表中 t_0 代表平壁的中分面，或圆筒壁的轴线、球心的温度。

填空题

1、等温面之间___不能相交_____相交。

2、物质的导热系数不但因物质的种类而异，而且还和物质的_温度、湿度、压力、密度等因素有关。

3、导热系数的单位是__w/(m℃)__w/(mk)_，它的物理意义是物体中温度降度为 1℃/m 时，单位时间内通过单位面积的导热量。它表征物质导热能力的大小。

4、在一般工程条件下，可以认为气体的导热系数 λ 与其_压力_无关，而却随其温度的升高而_增大_。

5、导热理论是从__宏观角度__进行现象分析的，它并不研究物质的微观结构，而把物质看作是_连续介质_。

6、据傅立叶定律表达式可知，要确定热流通量的大小，就必须知道__温度梯度__，亦即知道物体内的_温度场_。

7、对于许多工程材料，在一定的温度范围内，导热系数可以认为是温度的线性函数，即 λ =λ 0(1+bt)。

8、温度梯度是一个___向_量，_正向_朝着温度增加的方向。

9、求解二维不稳态导热问题时，应该有_至少四_个独立的边界条件和_一_个时间条件。

10、对于任何导热过程，完整的数学描写包括_导热微分方程__和_单值性条件_。

11、稳态导热问题第三类边界条件的数学表达式为____。

12、导温系数 a 称作_热扩散系数_，它的单位是_m^2/ s_。；

13、在同样的加热或冷却条件下，物体导温系数的数值越_愈大(小)__，物体内部各处的温度差则越_愈小(大)_。

14、如果温度只随其__空间_变化，而不随_时间_而变化，则该温度场称之为稳态温度场。

15、如果温度不仅随其__空间_变化，而且还随_时间_而变化，则该温度场称之为不稳态温度场。

16、无限长圆筒壁的单位管长导热热阻是__。

17、稳态导热时通过长园筒壁内的不同半径柱面上的热流密度都__不等_。

18、应用加肋片的方法来增强传热时，应把肋片加在__对流换热系数(h)较小__的一侧。

19、对于通过平壁的一维稳态导热，单位面积的导热热阻的单位是_m2℃/w_。

20、由两种不同材料制成的平壁紧密接触时进行的稳态导热过程，若已知 δ 1=δ 2，(t1-t2)＞(t2-t3)，则_λ 1>λ 2_成立。

21、λ 为常数的单层平壁厚度方向的一维稳定导热，无内热源时，其温度分布一定是一条_直线_。

22、按肋片效率的定义可知，当肋片的高度到一定值后再增加时，肋片效率将__减小_。

23、温度梯度是向量，它朝向温度__升高_______的方向。

24、傅立叶定律的适用条件为___适用于稳态导热和不稳态导热______。

25、不同温度的等温面是__不能相交的_。

26、在稳定的温度场中，温度__可以均匀或不均匀__。

27.肋效率定义为________。

名词解释

1、导热系数:2、温度场:3、等温面:4、等温线:5、温度梯度:6、热流通量：7、导温系数：8、复合换热：

问答题

1、何为傅立叶定律？

2、傅立叶定律表达式为 Φ=-λ Agradt，其中的负号“-”表示什么物理意义？

3、何谓导热系数？其物理意义是什么？

4、按照导热能力的大小，怎样排列下述物质才是正确的？λ 铁>λ 水>λ 砖>λ 木材>λ 棉花>λ 空气

5、物质的导热系数大小和哪些因素有关？

6、求解导热问题的边界条件有几类？它们的数学表达式是什么？

7、导温系数的定义式是怎样的？导温系数是说明什么物理特性的？

8、什么是导热微分方程式的单值性条件？

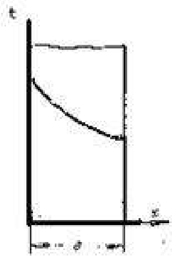
9、推导导热微分方程式的前提条件是什么？

10、求解不稳定导热问题的单值性条件有哪些？答：几何条件、物理条件、时间条件、边界条件。

11、在推导平壁内一维稳定导热计算公式时，作了哪些假设条件？

答：(1)单壁的长和宽比厚度大得多；(2)平壁的两侧面温度分布均匀、稳定；(3)λ 为常数不随温度变化；(4)平壁内无热源。

12、已知导热固体的第三类边界条件为：$-\lambda\left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_s=\alpha(t_s-t_f)$，在什么情况下它将转化为第一类边界条件？什么实际过程可近似符合这一情况？



答：当λ →∞时，t｜w≈tf，即壁温成为已知，这就转化为第一类边界条件。当导热固体的表面发生水沸腾或水蒸汽凝结时的过程可近似符合此情况。

13、根据无内热源平壁稳态导热温度分布，(如图所示)，判断该种材料的导热系数值是随温度升高而增大还是减少？为什么？

答：因为稳态导热（即平壁各处热流密度相等）和 $q=-\lambda dt/dx$，由图可知随着温度的降低，dt/dx 的绝对值逐渐减小，导热系数 λ 随之增大，因此，导热系数值随温度的升高而减小。

14、当导热系数 λ =λ 0(1+bt)时(t 为壁内温度)，大平壁内的温度分布是怎样的？试用图(t-x)表示之。

答：温度分布函数式为：$\lambda_0 t+\frac{1}{2}\lambda_0 b t^2=C_1x+C_2$，显然为二次曲线，图略（见教材）。

15、通过三块紧密相接触的大平板的稳定导热，已知板的厚度 δ 1>δ 2>δ 3，各块平板的壁面温差相等，问：(1)三块板中哪块板的导热系数大？为什么？(2)三块板中哪块板的导热热阻大？为什么？

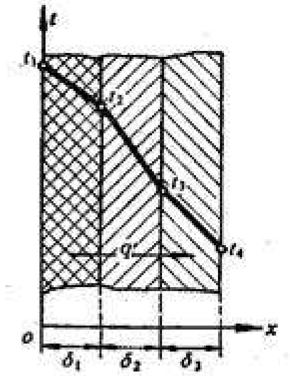
答：(1)λ 1 大；(2)因$R_\lambda=\Delta t/q$，而平壁各处热流密度相等且各块平板的壁面温差相等，因此各块板的导热热阻均相等。

16、什么是接触热阻？工程上减少接触热阻的常用措施有哪些？

答：固体壁面之间不完全平整的接触时，给导热过程带来的额外热阻叫接触热阻。减少接触热阻的常用措施有：加大接触面的压力;合理匹配相接触面的材料;减少表面粗糙度;填充导热系数大而硬度小的材料等。

17、通过复合平壁的导热在什么条件下可近似地当作一维导热问题处理？

答：当组成复合平壁的各种不同材料的导热系数想相不是很大时，可近似地当作一维导热处理。



18、热电偶测温套管的材料用铜好，还是用铁好？为什么？

答：测温套管可当作肋处理，在肋端处$\theta_l=\theta_0/ch(ml)$，其中 m=$\sqrt{hP/\lambda A_l}$，要使测温误差小，θ_l 应较小，则 ch(ml)的值要大，即 ml 要大，这样当 l 一定时，要求 m 大，即取 λ 较小的材料好。由于铁的导热系数较铜小，故取铁好。

19、有一个由导热系数都是常数的三种不同材料组成的多层平壁，它在稳态时的温度分布如图所示；(1)试说明 q 的特点及其计算式；；(2)试说明导热系数的相对大小。

答：(1) $q1=q2=q3$；其计算式为$q=-\lambda_1(dt/dx)_1=-\lambda_2(dt/dx)_2=-\lambda_3(dt/dx)_3$

(2)由图知$(dt/dx)_2>(dt/dx)_3>(dt/dx)_1$，根据(1)，知$\lambda_2<\lambda_3<\lambda_1$。

第三章、非稳态导热

一、非稳态导热基本概念与特点

1．热扩散率。它表示物体传递温度变化的能力。$a=\lambda/\rho c$，其单位为 m²/s。注意 a 与λ 的区别，二者同为物性参数。将一根铁棒一端置于火炉中，另一端很快会感觉烫手，这是由于铁棒的热扩散率 a 较大的缘故。而在冬天将手置于温度相同的铁板或木板上时，铁板感觉更冰凉一些，则是由于铁板吸热系数较木板大的缘故。

2．一维非稳态导热的三种情形

3．Bi 数和 Fo 数的物理意义

Bi 数表示物体内部导热热阻和外部对流热阻的比值，其表达式为$Bi=h\delta/\lambda$。而$Fo=a\tau/\delta^2$表示物体的非稳态导热过程进行的深度。

二、集总参数法

1．方法的实质

集总参数法是当导热体内部热阻忽略不计时．即 Bi→0 时研究非稳态导热的一种方法。其实用判别条件是 Bi＜0.1。这一判别式产生的依据是使整个导热体中温度的不均匀性在 5%以内。此时，温度仅为时间的函数，而与空间坐标没有关系。

2．关于时间常数

在对非稳态流体温度场的测定中，时间常数 $\tau_c = \rho c V / hA$ 常是反映测温元件精度很重要的指标之一，它表征导热体温度随流体温度变化的快慢。它不仅取决于几何参数(V/A)和物性参数(ρ c)，还取决于换热条件(h)。而 h 是过程量，因而在不同换热条件下，时间常数是变化的，不是常数。

3．几点说明

(1)导热体外的换热条件可能是对流换热，也可能是辐射换热，还有可能是对流和辐射的偶合。当外部换热条件为辐射换热或复合换热时，应熟练掌握如何根据能量守恒建立导热微分方程。

(2)由 Bi 数的定义，若表面传热系数 h 或特征尺度(如直径 d)是未知时，事先无法知道 Bi 数的大小。因而可以先假设集总参数法的条件成立，待求出 h 或 d 之后，进行校核。这一点是非常重要的。

1、非稳态导热过程的基本特征

非稳态导热即物体的加热或者冷却过程。它的基本特征是：

(1)导热的同时必定伴随有蓄热或释热，即导热物体热力学能的增减。

(2)同一时刻通过各个等温面的热流密度不再相等，从外表面传入、传出的热量差额即物体热力学能的净变化量。

(3)整个非稳态过程可分为初始温度分布起主要控制作用的非正规状况阶段(或叫初始阶段)，和温度变化具有特定规律的正规状况阶段。一般来说可以认为这两个阶段的分界线是傅里叶数等于 0.2。从理论上讲，正规状况阶段的规律将一直持续无限长时间，因此并不存在所谓第三个阶段。

2\集总参数分析方法(解零维问题)

(1)这是一种相对外部对流热阻而言忽略物体内部导热热阻的近似解法。一般情况下，只要满足适用条件，就可以确保 5%以内的计算精度。

(2)以体积与表面积之比为特征尺寸的**毕渥数** $B_i = h(V/A)/\lambda$ ，且代表了物体内部导热热阻与外部对流热阻的相对比值。注意，毕渥数中的λ 指固体的导热系数。

(3)同样以体积与面积之比为特征尺寸的**傅里叶数** $F_O = a\tau/(V/A)^2$ 代表了非稳态导热过程的无量纲时间进程。

(4)**时间常数** τ_c 反映经历非稳态导热过程的物体对外界环境温度发生突变时作出反应的快慢,是动态测温的一个重要指标。

3、对流边界条件下的一维及多维非稳态导热

(1)对双面对称加热或冷却的一维物体，包括大平壁、长圆柱和球体，可以通过建立数学模型并分析求解，解的结果是一个较复杂的无穷级数之和。

(2)针对 Fo>0.2 的正规状况阶段，计算时可以只取上述级数的第—项。在单对数坐标中，这个阶段中的无量纲过余温度比相对傅立叶数显示出直线关系，即如海斯勒图所表示的那样。

(3)正规状况阶段是非稳态导热过程的主要阶段。它的特点直接来自上述简化的计算方法，即一维物体内任意位置的过余温度对时间的相对变化率都等于常数。该阶段中，初始温度分布的影响已经消失。

(4)可以用一维解乘积的形式计算若干特定多维物体的非稳态导热问题。

4、**半无限大物体**的瞬态导热

(1)半无限大物体非稳态导热分析解的应用价值在于：对实际上有限厚的均质固体来说，在所考虑的时间限度以内，以一般可以接受的工程计算精度作为依据，只要外界温度扰动尚未“穿远”整个厚度，那么在这个时间范围以内，就可以把它当作传热意义上的“半无限大物体”来处理。

(2)在工程计算和物性测试中，必须正确判断穿透厚度和穿透时间。特别注意到：

(a)温度扰动的传播范围是随着时间的推移逐步变厚的。

(b)不能把穿适时间和正规状况阶段的起始时间两个概念混为一谈。

(c)无论哪一类边界条件，半无限大物体的非稳态导热过程都不存在正规状况阶段，它水远处于非正规状况阶段。

5、周期性非稳态导热

壁面温度呈周期性波动的非稳态导热问题有两个基本特征，温度波幅度的衰减和相位的滞后。分析证明，表面温度波推进一个波长时，波幅就衰减到表面波幅值的 0.2%，因此可以得出结论，没有任何温度波动会深入到超过一个波长的深度。相应的表面热流波也呈现出周期性变化的规律。

1、由导热微分方程可知，非稳态导热只与热扩散率有关，而与导热系数无关。你认为对吗?

答：由于描述一个导热问题的完整数学描写不仅包括控制方程，还包括定解条件。所以虽然非稳态导热的控制方程只与热扩散率有关，但边界条件中却有可能包括导热系数λ (如第二或第三类边界条件)。因此上述观点不对。

2、无内热源，常物性二维导热物体在某一瞬时的温度分布为 $t=2y^2\cos x$。试说明该导热物体在 x＝0，y=1 处的温度是随时间增加逐渐升高，还是逐渐降低。

答：由导热控制方程 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{a}\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right)$，得：$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(-2y^2\cos x + 4\cos x\right)$ 当 $x=0, y=1$ 时，$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 2a > 0$ ，故该点温度随时间增加而升高。

3、两块厚度为 30mm 的无限大平板，初始温度为 20℃，分别用铜和钢制成。平板两侧表面的温度突然上升到 60℃，试计算使两板中心温度均上升到 56℃时两板所需时间之比。铜和钢的热扩散率分别为 103×10^{-6}m2／s，12.9×10^{-6}㎡/s。

答：一维非稳态无限大平板内的温度分布有如下函数形式：$\theta(x,\tau) = f\left(Fo, Bi, x/\delta\right)$

两块不同材料的无限大平板，均处于第一类边界条件(即 Bi→∞)。由题意，两种材料达到同样工况时，Bi 数和 x/δ 相同，要使温度分布相同，则只需 Fo 数相等，因此：

$(Fo)_{铜} = (Fo)_{钢}$，即$\left(\frac{a\tau}{\delta^2}\right)_{铜} = \left(\frac{a\tau}{\delta^2}\right)_{钢}$，而δ 在两种情况下相等，因此：$\frac{\tau_{铜}}{\tau_{钢}} = \frac{a_{钢}}{a_{铜}} = \frac{12.9}{103} = 0.125$

二、定量计算

主要包括：列出具体物理问题的数学描写并求解；集总参数法的应用；一维非稳态导热问题的分析解(无限大平板，无限长圆柱，球)，重点是集总参数法和一维非稳态导热问题分析解的应用。

1、一块无限太平板，单侧表面积为 A，初温为 t_0，一侧表面受温度为 t_∞，表面传热系数为 h 的气流冷却，另一侧受到恒定热流密度 q_w 的加热，内部热阻可以忽略，试列出物体内部的温度随时间变化的微分方程式并求解之。设其他几何参数及物性参数已知。

解：由题意，物体内部热阻可以忽略，温度仅为时间的函数，一侧的对流换热和另一侧恒热流加热作为内热源处理，根据热平衡方程可得：

控制方程为：$\rho cV\frac{dt}{d\tau} + hA(t - t_\infty) - Aq_w = 0$；初始条件：$t|_{\tau=0} = t_0$

引入过于温度$\theta = t - t_\infty$，则为$\rho cV\frac{d\theta}{d\tau} + hA\theta - Aq_w = 0$，$\theta|_{\tau=0} = t_0 - t_\infty = \theta_0$

上述控制方程的通解为：$\theta = Be^{-\frac{hA}{\rho cV}\tau} + \frac{q_w}{h}$，由初始条件有：$B = \theta_0 - \frac{q_w}{h}$

故温度分布：$\theta = t - t_\infty = \theta_0 e^{\frac{hA}{\rho cV}\tau} + \frac{q_w}{h}\left(1 - e^{\frac{hA}{\rho cV}\tau}\right)$

2、热处理工艺中，常用银球来测定淬火介质的冷却能力。今有两个直径均为 20mm 的银球，加热到 650℃后分别置于 20℃的静止水和 20℃的循环水容器中。当两个银球中心温度均由 650℃变化到 450℃时，用热电偶分别测得两种情况下的降温速率分别为 180℃／s 及 360℃／s。在上述温度范围内银的物性参数 ρ ＝10500kg／m³，c＝2.62×10²J／(kg·K)，λ ＝360w／(m·K)。试求两种情况下银球与水之间的表面传热系数。

解：本题表面传热系数未知，即 Bi 数为未知参数，所以无法判断是否满足集总参数法条件。为此．先假定满足集总参数法条件，然后验算。

(1)对静止水情形，由$\frac{\theta}{\theta_0} = \exp\left(-\frac{hA}{\rho cV}\tau\right)$

且$\theta_0 = 650 - 20 = 630$，$\theta = 450 - 20 = 430$，$V/A = \frac{R}{3} = \frac{10\times10^{-3}}{3} = 0.00333$，$\tau = \frac{200}{180} = 1.11s$

故：$h = \frac{\rho c}{\tau}\left(\frac{V}{A}\right)\ln\left(\frac{\theta_0}{\theta}\right) = \frac{10500\times2.62\times10^2}{1.11}\times0.00333\times\ln\left(\frac{630}{430}\right) = 3149W/(m^2\cdot K)$

验算 Bi 数：$Bi_v = \frac{h(V/A)}{\lambda} = \frac{3149\times0.00333}{360} = 0.0291 < 0.0333$ 满足集总参数条件。

(2)对循环水情形，同理，$\tau = \frac{200}{360} = 0.56s$

验算$Bi_v = \frac{6299\times0.00333}{360} = 0.0583 > 0.0333$，不满足集总参数法条件。改用诺谟图。

此时，$Fo = \frac{a\tau}{R^2} = \frac{\lambda}{\rho c}\frac{\tau}{R^2} = \frac{360}{10500\times262}\times\frac{0.56}{0.01^2} = 0.727$，$\frac{\theta_m}{\theta_0} = \frac{430}{630} = 0.683$。

查图得$\frac{1}{Bi} \approx 4.5$，故：$h \approx Bi\frac{\lambda}{R} = \frac{360}{4.5\times0.01} \approx 8000W/(m^2\cdot K)$

所以短圆柱中的最低温度：$\left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right) = \left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_p\left(\frac{\theta_w}{\theta_0}\right)_p = 0.68\times0.504 = 0.343$

5、初温为 25℃的热电偶被置于温度为 250℃的气流中。设热电偶热接点可近似看成球形，要使其时间常数τ_c＝1s．问热接点的直径应为多大?忽略热电偶引线的影响，且热接点与气流间的表面传热系数为 300W／(m²·K)，热接点材料的物性：λ=20W／(m·K)．ρ =8500kg／m³，c＝400J（kg·K)。如果气流与热接点间存在着辐射换热，且保持热电偶时间常数不变，则对所需热接点直径之值有何影响?

解:出于热电铜的直径很小，一船满足集总参数法条件，时间常数为$\tau_c = \frac{\rho cV}{hA}$，

故：$V/A = \frac{R}{3} = \tau_c h/\rho c = 1\times300/(8500\times400) = 8.82\times10^{-5}$ m

故热电偶直径：$d = 2R = 2\times3\times8.82\times10^{-5} = 5.29\times10^{-4} = 0.529$mm

验证 Bi 数是否满足集总参数法

$Bi_v = \frac{h(V/A)}{\lambda} = \frac{300\times8.82\times10^{-5}}{20} = 0.0013 << 0.0333$ 故满足集总参数法条件。

若热接点与气流间存在辐射换热，则总表面传热系数 h(包括对流和辐射)增加，由$\tau_c = \frac{\rho cV}{hA}$知，保持$\tau_c$不变时，可使 V/A 增加，即热接点直径增加。

一、填空题

1、立方体试件放在炉内加热，试件的_8 个顶点_部位温度变化最快，原因是单位体积吸热量大(单位体积所具有的换热面积大)。

2、无限长方柱加热或冷却时，其导热过程属于_二维不稳态__导热问题，其导热微分方程式为$\partial t/\partial\tau = a\left[\left(\partial^2 t/\partial x^2\right) + \left(\partial^2 t/\partial y^2\right)\right]$。

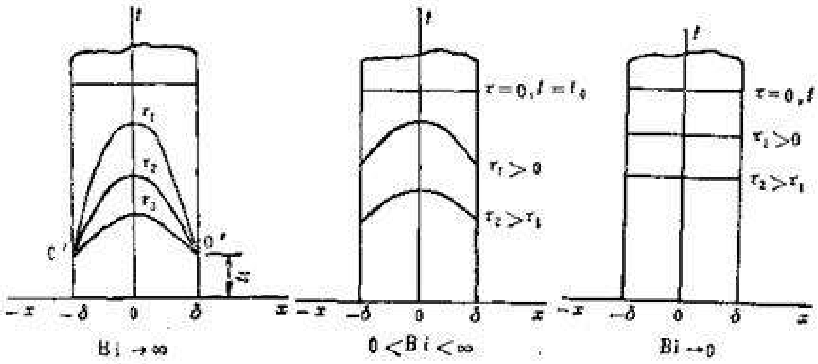
3、当Fo≥0.2时，物体中各点的冷却率m仅取决于__物性参数_、_形状尺寸_和物体表面的边界条件。

4、当导热系数λ=F(t)时，具有内热源的一维不稳态导热过程的微分方程式的形式为_[redacted]_。
5、判别物体是否为集总热容系统的条件是_Bi<0.1_。
6、在不稳态导热的不规则情况阶段，物体内温度分布受_初始温度分布_的影响很大，而在正常情况阶段，物体内部温度分布的特点是_按一定规律变化(或:摆脱了初始温度对温度场的影响)_。
7、当微元体dv的温度变化为dt时，其内能增加值为_$\rho\, c dv dt$_。
8、判别无限大平壁是否处于正常情况阶段的依据是__Fo≥0.2_。
9、短园柱(长为L，直径为D)加热或冷却时，其导热过程属于_二维不稳态_导热问题。
10、对流换热边界条件下物体加热或冷却过程中，物体内的无因次过余温度分布θ(x,τ)/θ$_0$是_Fo,Bi_和无因次座标的函数。
11、物体在加热或冷却过程中，温度分布的变化可划分为_不规则情况阶段_，_正常情况阶段_和新的稳态三个阶段。
12、判别系统在恒温介质中加热或冷却时，是否进入正常情况阶段的条件是__Fo≥0.2_______。(c)

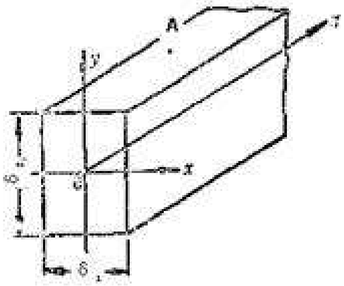
半无限大物体：物体的一端为一无限大平面所限制，另一端伸展至无穷远处(当无限大平壁的厚度$2\delta \geq 8\sqrt{a\tau}$时，可视为半无限大物体)。

1、将碎肉包装成100×100×100mm的立方体，放在冰箱内，其温度为一均匀数值，现将肉块取出放至室内，今要求出经τ时间肉块的中心温度。试简单说明求解的方法和步骤，写出用一维解表示的解的形式。
答：此题属于三维不稳态导热，其解可表示为三个厚度2δ=100mm的无限大平板的一维解的乘积。其步骤为：(1)判别$B_i = h\delta/\lambda$是否小于0.1，若Bi<0.1，则为集总热容系统;若Bi＞0.1，则利用图解法。(2)由$B_i = h\delta/\lambda$，$F_O = a\tau/\delta^2$查得无限大平壁(θ_m/θ_0)的值，立方体中心温度为$t_m = t_f + \left(\theta_m/\theta_0\right)^3 (t_w - t_f)$。
2、设某一房屋外墙处于室内气温t_{f1}，室外气温t_{f2}，且$t_{f1}>t_{f2}$，如果室外气温t_{f2}突然降至t_{f2}'，而t_{f1}保持不变，试在t-x图上画Fo<0.2(不规则情况阶段任一时刻)，Fo=0.2(不规则情况阶段结束)和Fo>0.2(进入稳态阶段)的温度分布。
答：图略。

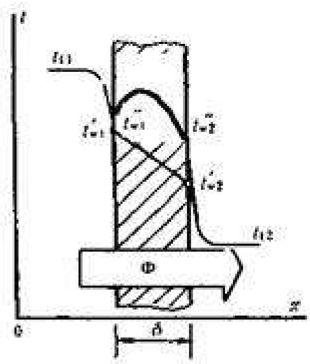
4、试绘出Bi→0，Bi→∞和0<Bi＜∞时厚度为2δ无限大平壁在温度t_f、对流换热系数为h的环境中冷却时，温度随时间的变化情况。



Bi→∞ (a)　　0<Bi<∞ (b)　　Bi→0 (c)



3、用图绘出无限大平壁(初始温度均匀为t_0)在下述条件下加热时壁内温度分布：(1)两侧均处于恒壁温的边界条件下(t_w)；(2)两侧均处于第三类边界条件下(t_f、h)。
答:图略。
5、有一恒温的无限长方柱放入一介质中加热，长方柱断面尺寸为δ1×δ2，试说明求上表面中心点A温度的步骤。
答：无限长方柱的解是由两个一维无限大平壁(δ1和δ2壁厚)的解的乘积而得。查表得:$\left(\theta_w/\theta_0\right)_1$,$\left(\theta_m/\theta_0\right)_2$，两者相乘即可求得A点的温度:$\left(\theta/\theta_0\right)_A = \left(\theta_w/\theta_0\right)_1 \times \left(\theta_m/\theta_0\right)_2$，所以$t_A = t_f + \left(\theta_w/\theta_0\right)_1 \times \left(\theta_m/\theta_0\right)_2 (t_0 - t_f)$。
6、将一厚度为L，初始温度t_0的大平板放入燃烧炉内加热，设炉内气体与试件的对流热系数为h，燃烧炉内温度为t_f，炉墙温度为t_w，试件与炉墙系统的相当发射率为ε，试写出试件受热过程微分方程式及其单值性条件。
答：$\frac{\partial\theta}{\partial\tau} = a\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}$，τ=0，θ=θ0=t0-tf；x=0，$-\lambda\frac{\partial\theta}{\partial x}|_{x=0} = 0$；
$x = L/2$，$-\lambda\frac{\partial\theta}{\partial x}|_{x=L/2} = h\theta|_{x=L/2} + \varepsilon A\sigma_b\left(T|_{x=L/2}{}^4 - T_w{}^4\right)$



8、某一汽车后窗的去霜器是用浇铸在玻璃中且均匀分布的高电阻导线做成的。通电时玻璃内部是均匀发热的，产生的热量从窗的内、外表面通过对流传走，但内侧对流换热系数h。在同一个坐标系中画出去霜器接通之前和接通一段时间后玻璃中的稳态温度分布示意图。
答：如图所示。
接通前温度分布为：t_{f1}→t_{w1}'→t_{w2}'→t_{f2}；接通足够时间后的稳态温度分布为：t_{f1}→t_{w1}''→t_{w2}''→t_{f2}。
9、一块被烧至高温(超过400℃)的红砖，迅速投入一桶冷水中，红砖自行破裂，试简单解释其原因。

答：高温砖放入水中，水在砖面沸腾，换热系数λ 很大，而砖的导热系数和导温系数都小，故 $Bi = hL/\lambda \to \infty$，且砖的温度场极不均匀，产生很大的热应力而使砖破裂。(表面急剧冷却)。

10、什么是集总参数法？

答：不稳态导热的物体当 $Bi<0.1$ 时，可近似地认为物体的温度是均匀的，这种认为物体温度均匀一致，即忽略物体内部导热热阻的分析方法称为集总参数法。

11、物体的加热或冷却过程中温度分布变化的三个阶段的特点是什么？

答：第一阶段是过程开始的一段时间，温度变化从边界面逐渐地深入到物体内部，各处变化率不一样，温度分布受初始温度分布的影响很大，称为不规则情况阶段。随着时间的推移，初始温度分布的影响逐渐消失，进入第二阶段，各处的温度随时间的变化率具有一定的规律，称正常情况阶段。第三阶段是新的稳态阶段，理论上需要经过无限长时间才能达到。

第四章、热传导问题的数值解法

一、物理问题及数学描写

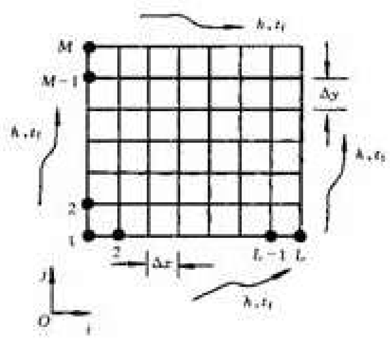
对物理问题忽略次要矛盾，抓住主要矛盾进行合理的简化后，利用能量守恒定律及傅里叶定律等对物理问题的微元体列出相应的方程，得出正确的数学描写(方程及边界条件、初始条件等)。这是数值解正确与否的前提。导热微分方程式是导热问题的通式，具体导热问题可作相应简化，如是否有内热源，是否常物性，是否稳态，问题的维数(一维，二维还是三维)等等。至于边界条件和初始条件的数目，亦与具体问题有关，一般地讲，某一变量(对导热问题，如温度 t)在某一坐标或时间方向(如 x 或τ)所需边界条件的数目，是该变量在该方向最高阶导数的阶数。如对形如 $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}=0$ 的二维导热问题，在 x，y 方向各需两个边界条件。

二、节点离散方程的建立

重点应掌握用热平衡方法获得节点的离散方程。其本质是对节点所代表的控制容积采用傅里叶定律及能量守恒定律。在实际运用此法时应注意以下各点：

(1)该问题是否有内热源？如有应将内热源强度由与节点所代表的控制容积体积相乘，一般将内热源处理成加给控制容积的热量；

(2)注意边界条件的性质，一般有等温、等热流、绝热和对流等形式。对上述各种不同形式的边界节点列热平衡方程时，应注意热量作用的面积。



(3)对稳态问题，所有进入控制容积的热量之和为零；对非稳态问题，则进人控制容积的热量等于该容积在微元时刻的热力学能增量。

(4)对边界条件为第一类时的导热问题，只有内节点离散方程，而无边界节点离散方程。

(5)对流边界节点 $q_w = h(t_f - t_{m,n})$；而对绝热边界节点 qw=0。

(6)对曲线边界，用阶梯形的折线来模拟真实边界。

三、导热量的计算

以图所示的二维无内热源稳态导热问题，采用直角坐标为例，假定 i 和 j 方向各有 L 和 M 个节点，则通过矩形区域左边界(即 i=1)的热流量可分别从导热和对流换热的角度加以计算。

从导热的傅里叶定律角度：

$$\Phi = \sum_{j=2}^{M-1} \lambda \Delta y \frac{t(1,j)-t(2,j)}{\Delta x}$$

而从对流换热角度，则有：

$$\Phi = \sum_{j=2}^{M-1} h\Delta y\left[t_f - t(1,j)\right] + h\frac{\Delta y}{2}\left[t_f - t(1,1)\right] + h\frac{\Delta y}{2}\left[t_f - t(1,M)\right]$$

注意两式相比，没有计及两个角点的导热量，其原因是两个角点(1，1)和(1，M)的控制容积没有直接与内节点相连的公共部分，因而导热量为零。当节点数趋于无穷大时，显然两角点的影响将可忽略不计。

四、非稳态导热数值解法

(1)应注意非稳态导热数值解法在数值处理方法上与稳态导热的不同之处。①由于非稳态导热引入了非稳态项，因而在处理上除应对空间坐标进行离散外，还应对时间坐标进行离散。②温度不仅是空间的函数，而且是时间的函数。在每—处理时层上，相当于求解—个稳态导热问题。③对时间项(非稳态项)的离散还存在两种不同的格式，即显式格式与隐式格式。

(2)采用隐式格式求解非稳态导热问题时，不存在稳定性问题。而采用显式格式时．则有稳定性条件。因为在方程离散过程中对时间项的一阶导数采用向前差分，从而导致离散方程系数可能出现负值。

内节点稳定性要求 $Fo = \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} \le \frac{1}{2}$，则在相同的空间坐标网格(即△x)下，必须采用较小的时间网格步长△τ ，而△τ 的减小则意味着计算工作量的大大增加。同时，边界节点对时间网格步长的要求比内节点更加苛刻。

第五.六章、对流换热

1、对流换热是一种非常复杂的物理现象。它的热流速率方程即牛顿冷却公式。对流换热问题的求解归根结底围绕着如何得到各种不同情况下的表面传热系数，它有局部值和平均值之分。

影响单相流体对流换热强弱的主要因素有流体的流动状态、发生流动的原因、流体的各项有关物性以及表面的几何形状等。

2、边界层理论在研究对流换热现象时扮演了极重要的角色。边界层概念归根结底就是从数量级的观点出发，忽略主流中速度和过余温度 1%的差异。速度边界层和温度边界层的基本观点可以概括地总结为以下的基本内容(针对沿平壁的外部流动)：

(1)速度从零变化到几乎等于主论速度主要发生在紧贴壁面的薄层内：壁面上具有速度梯度的最大值；在壁面法线方向上，讨以把流场划分成边界层区和主流区，主流可视为等速、无粘性的理想流体；壁面法线方向上不存在压力梯度；在沿壁曲方向上流体依次为层流、过渡流和湍流状态。

(2)温度的变化与速度相似(但必须以过余温度，而不是来流温度作为衡量的基准)，过余温度 99%的变化发生在薄薄的热边界层内；壁面上具有最大的过余温度梯度(该值即代表 Nu 数)；在壁面的法线方向上将流场分为热边界层区和等温的主流区，流体与壁面之间的热量传递仅发生在热边界层区里。

3、二维、低速、常物性、无体积力、无内热源的边界层对流换热微分方程组是通过对流场中的任意流体微元分别作质量、动量和能量平衡，并针对高雷诺数按照普朗特的边界层理论进行简化以后得出来的。而对流换热过程微分方程则揭示了流体与壁面之间对流换热的物理本质。

4、边界层对流换热问题的主要求解方法有分析解、实验解、类比方法以及数值解法。

分析解：只能在若干假设条件下求得一些简单问题的解。

实验解：是解决工程对流换热问题不可缺少的基本手段。应当在相似理论指导下才能得到正确有效的结果。

类比方法：建立在流体动量与热量传递规律的相似性上，无论层流还是湍流，只要流动阻力来自流体的分子粘性和湍流“粘性”，均可以运用类比关系通过摩擦系数直接得到对流换热的表面传热系数。对于外部流动和内部流动，最主要的两个类比率关系式是 $St=\frac{C_f}{2}$；适用条件：$\mathrm{Pr}=1$；$St\,\mathrm{Pr}^{2/3}=\frac{C_f}{2}$；适用条件：$\mathrm{Pr}\neq 1$

数值解：通过对边界层微分方程组进行离散化处理求得各节点上流体的速度、温度和压力参数的数值求解方法。由于动量方程中存在非线性的对流项及压力梯度项，使对流换热的数值处理比导热复杂很多。

5、相似理论与相似准则数相似原理是指导用实验方法研究包括对流换热在内的很多工程技术问题的方法理论。它的主要内容可以概括为相似三定理，它们分别回答了实验研究中遇到的四个主要问题：

(1)彼此相似的现象，其对应点的同名相似准则数相等。

实验中模型应该如何选取，应该测量哪些量？模型应保证与实物物理现象相似，应测量相似准则数中所包含的各个物理量，其中的物性由定性温度确定。

(2)描述物理过程的微分方程积分结果可以用相似准则数之间的函数关系来表示。

实验结果应该怎么表示?应该用准则数关联式的形式来表示。

(3)凡同类现象，若同名已定准则数相等．且单值性条件相似，那么这两个现象必定相似。

相似准则数的定义与物理解释

6、掠过平板的强迫对流换热

应注意区分层流和湍流两种流态(一般忽略过渡流段)，恒壁温与恒热流两种典型的边界条件，以及局部 Nu 数和平均 Nu 数。具有末加热起始段的换热对某些工程问题有重要的应用价值。

主要包括对流换热影响因素；边界层理论及分析；理论分析法（对流换热微分方程组、边界层微分方程组）；动量与热量的类比；相似理论；外掠平板强制对流换热基本特点。

1、由对流换热微分方程 $h_x=-\frac{\lambda}{\Delta t_x}\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{y=0}$ 知，该式中没有出现流速，有人因此得出结论：表面传热系数 h 与流体速度场无关。试判断这种说法的正确性?

答：这种说法不正确，因为在描述流动的能量微分方程中，对流项含有流体速度，即要获得流体的温度场，必须先获得其速度场，“流动与换热密不可分”。因此表面传热系数必与流体速度场有关。

2、在流体温度边界层中，何处温度梯度的绝对值最大?为什么?有人说对一定表面传热温差的同种流体，可以用贴壁处温度梯度绝对值的大小来判断表面传热系数 h 的大小，你认为对吗?

答：在温度边界层中，贴壁处流体温度梯度的绝对值最大，因为壁面与流体间的热量交换都要通过贴壁处不动的薄流体层，因而这里换热最剧烈。由对流换热微分方程 $h_x=-\frac{\lambda}{\Delta t_x}\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{y=0}$ ，对一定表面传热温差的同种流体 λ 与△t 均保持为常数，因而可用 $\left(\frac{\partial t}{\partial y}\right)_{y=0}$ 绝对值的大小来判断表面传热系数 h 的大小。

3、简述边界层理论的基本论点。

答：边界层厚度δ 、δ t 与壁的尺寸 *l* 相比是极小值；

边界层内壁面速度梯度及温度梯度最大；

边界层流动状态分为层流与紊流,而紊流边界层内,紧贴壁面处仍将是层流,称为层流底层；

流场可以划分为两个区：边界层区（粘滞力起作用）和主流区，温度同样场可以划分为两个区：边界层区（存在温差）和主流区（等温区域）；

对流换热热阻主要集中在热边界层区域的导热热阻。层流边界层的热阻为整个边界层的导热热阻。紊流边界层的热阻为层流底层的导热热阻。

4、试引用边界层概念来分析并说明流体的导热系数、粘度对对流换热过程的影响。

答：依据对流换热热阻主要集中在热边界层区域的导热热阻。层流边界层的热阻为整个边界层的导热热阻。紊流边界层的热阻为层流底层的导热热阻。导热系数越大，将使边界层导热热阻越小，对流换热强度越大；粘度越大，边界层（层流边界层或紊流边界层的层流底层）厚度越大，将使边界层导热热阻越大，对流换热强度越小。

5、确定对流换热系数 h 有哪些方法?试简述之。

答：求解对流换热系数的途径有以下四种:(1)建立微分方程组并分析求解___应用边界层理论,采用数量级分析方法简化方程组,从而求得精确解,得到了 Re,Pr 及 Nu 等准则及其准则关系,表达了对流换热规律的基本形式。(2)建立积分方程组并分析求解___先假定边界层内的速度分布和温度分布然后解边界层的动量和能量积分方程式求得流动、热边界层厚度,从而求得对流换热系数及其准则方程

式。以上两法目前使用于层流问题。(3)根据热量传递和动量传递可以类比，建立类比律，借助于流动摩擦阻力的实验数据，求得对流换热系数。此法较多用于紊流问题。(4)由相似理论指导实验，确定换热准则方程式的具体形式，提供工程上常用准则方程式，求解准则关联式得到对流换热系数。

6、有若干个同类物理现象,怎样才能说明其单值性条件相似。试设想用什么方法对以实现物体表面温度恒定、表面热流量恒定的边界条件?

答：所谓单值条件是指包含在准则中的各已知物理量，即影响过程特点的那些条件——时间条件、物理条件、边界条件。所谓单值性条件相似,首先是时间条件相似(稳态过程不存在此条件)。然后,几何条件、边界条件及物理条件要分别成比例。采用饱和蒸汽（或饱和液体）加热（或冷却）可实现物体表面温度恒定的边界条件，而采用电加热可实现表面热流量恒定的边界条件。

1、温度为 50℃，压力为 1.01325×105Pa 的空气，平行掠过一块表面温度为 100℃的平板上表面，平板下表面绝热。平板沿流动方向长度为 0.2m，宽度为 0.1m。按平板长度计算的 Re 数为 4×104。试确定：

(1)平板表面与空气间的表面传热系数和传热量；

解：本题为空气外掠平板强制对流换热问题。

(1)由于 Re＝4×104＜5×105，属层流状态。故：$Nu = 0.664 \mathrm{Re}^{1/2} \mathrm{Pr}^{1/3}$

空气定性温度：$t_f = \frac{1}{2}(t_\infty + t_w) = \frac{1}{2}(50+100) = 75℃$

空气的物性参数为 $\lambda = 0.0299 W/(m \cdot K)$，Pr=0.70

故：$Nu = \frac{hl}{\lambda} = 0.664 \times \left(4\times10^4\right)^{1/2} \times (0.7)^{1/3} = 117.9$

$h = \frac{Nu\lambda}{l} = \frac{117.9\times0.0299}{0.2} = 17.6$ W/（m2.K）

散热量 $\phi = hA(t_W - t_\infty) = 17.6\times0.2\times0.1\times(100-50) = 17.6$ W

填空题

1、根据数量级分析知：沿边界层厚度方向的压力梯度 $\partial p/\partial x$ = 零(0)，可以认为沿流动方向任何 X 截面处边界层内的压力分布与_边界层外主流区_处压力分布相同。

2、流体掠过平板时，层流边界层厚度沿流动方向比紊流边界层增加得_慢_（快和慢）。层流边界层内的局部，平均对流换热系数 h 沿流动方向 X 是逐渐_减小_（增加或减小）。

3、流体掠过平板紊流换热时，其对流换热热阻仍集中在_层流底层_。因此，_通过改善流动状况，使层流底层的厚度减小_是强化对流换热的主要途径之一。

4、由于物性随温度变化，在对流换热条件下，流场内各处温度不同，自然各处的物性亦异。因此在计算中是以某一特征温度--定性温度来确定物性的。定性温度的选择有以下三种：流体平均温度、_壁面平均温度_、_流体与壁面的算术平均值_。

5、普朗特提出的紊流边界层概念，认为紊流边界层仅由__层流底层_和_紊流核心区_组成。

6、在流动条件相同时，空气的对流换热系数比水的对流换热系数_小，这是因为_空气的导热系数、密度、比热比水小_。

7、边界层理论的基本依据为：在流动边界层内，流体的运动由_粘性流体运动微分方程(N，S 方程)_方程来描述，而在主流区内，流体的运动由_无粘性理想流体运动方程(伯努利方程)_方程来描述。

8、对于 Pr>>1 的流体，其流动边界层的厚度 δ _远大于_热边界层的厚度 δ t；而对于 Pr<<1 的流体，其流动边界层的厚度 δ _远小于_热边界层厚度 δ t。

9、动量微分方程是从分析微元体的_动量守恒_中建立起来的，它描述了流体的_速度场_。能量微分方程是从分析微元体的_能量守恒_中建立起来的，它描述流体的_温度场_。

10、流体沿平板作二维稳态受迫流动换热时，层流边界层厚度 δ 随板长 X 的变化关系为 $\delta = CX^{1/2}$。(系数用常数表示)

11、对流换热微分方程式描述了_对流换热系数 h 与流体温度场_之间的关系，对于给定流体和已定的换热温差，则对流换热系数 h 取决于_壁面处流体的温度梯度_。

12、与流动边界层有关的守恒关系式是__质量守恒_定律和_牛顿第二运动__定律。

13、确定对流换热系数的方法有⑴建立微分方程组并分析求解。⑵建立积分方程组并求解，⑶_建立类比律，已知摩擦系数推算出对流换热系数；_⑷__由相似理论指导实验，确定换热准则方程式的具体形式__。

14、动量积分方程式建立的依据是_牛顿第二运动定律_；能量积分方程式建立的依据是_能量守恒定律_。

15、用摩擦系数数据来求对流换热系数的理论依据是_动量传递和热量传递_之间的_类比_关系。

16、平板层流速度边界层厚度正比于流体的运动粘度的__1/2_次方。对于 Pr≈1 的流体，平板层流热边界层厚度与速度边界层厚度之比近似地等于_1__。

17、流体以层流掠过平板时，在 X 长度内平均放热系数 h 比 x 处的局部放热系数 h_x 大；平均放热系数 h 为局部放热系数 h_x 的 2 倍。

18、相似理论对实验研究对流换热问题的指导意义在于：通过相似分析的方法，把影响现象众多物理量组成若干相似准则。用_相似准则_把同一类现象中看来似乎是没有关系的个别现象归纳为相似现象群。再用_相似准则_方程式反映了一类现象中无数相似现象群之间的规律。

19、柯尔本类比律用_$Pr^{2/3}$ 考虑物性影响_对雷诺类比律进行修正，从而可适用于 Pr_不等于 1_的流体。

20、判别现象相似的条件是：凡同类现象_单值性条件相似_，_同名已定准则相等_，现象必相似。

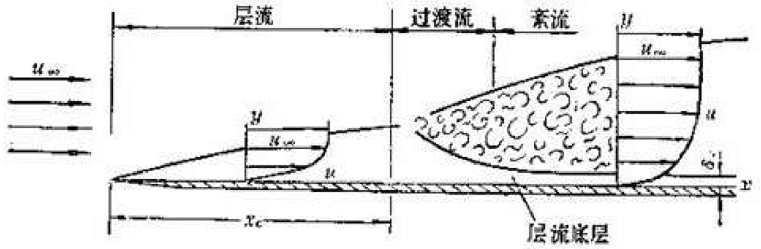
21、在紊流传递过程中，除了有和层流一样的分子扩散运动传递作用外，还存在流体质点_紊流脉动的附加作用_传递动量和热量。

22、对于普朗特数等于 1 的流体，平板表面无因次速度和无因次温度分布曲线_完全相同_，其流动边界层厚度 δ _等于_热边界层厚度 δ t。

23、雷诺类比律反映了_换热系数和摩擦系数__之间的关系，它只适用于 Pr_=1_的流体。

24、格拉晓夫准则的数值反映__浮升力与粘性力_之比。

25、如果两现象的流体受迫运动相似，必然是_Ra 或（GrPr）_准则相等。
26、如果两对流换热现象相似，必然是_Nu 同名相似__准则相等。
27、同一流体以同一速度，同一温度流过两根圆管。已知 1 为铜管，2 为钢管，两根管子的直径、长度、粗糙度和壁温均相同，但导热系数λ 1(铜)>λ 2(钢)，则两圆管的对流换热系数__h1=h2
28、当流体在长圆管内受迫流动时，流动边界层的最大厚度δ 圆管半径 R 的关系是___δ =R
29、对于普朗特数 P=1 的流体，如果流动边界层和热边界层都从同一地点开始发展，流动边界层的厚度δ ㎝，热边界层厚度δ t 间的关系是______δ t=δ 。
4、流动边界层和热边界层的状态决定了边界层热量传递过程，紊流换热热阻将主要取决于__层流底层的导热过程
5、某流体在两根几何尺寸完全相同的圆管内受迫流动换热，一管保持壁面温度均匀并恒定不变，另一管保持壁面热流均匀并恒定不变。若两管中流体的 Re 和 Pr 数分别相等，此两管内的换热现象是_________不相似
6、物理现象相似的一个重要性质是：彼此相似的现象，它们的同名相似准则____必定相等
7、已定准则是指________全部由已知量构成的准则。
名词解释
1、层流边界层: 2、热(温度)边界层：3、流动(速度)边界层：4、层流底层：5、努谢尔特准则 Nu： $Nu = hL/\lambda$，它反映了对流换热的强弱程度，是换热表面层内的无因次温度梯度。
6、瑞利准则 Ra： $Ra = ul/a$，它反映流体流动过程中的惯性力和所受到的粘滞力之间的比例关系。可以用 Ra 数来标志流体流动的状态，在准则方程式中，Ra 数反映流动状态对换热的影响。
7、雷诺类比律：雷诺类比律反映了换热系数和摩擦系数之间的定量关系，即已知摩擦系数，就可以由类比律算出对流换热系数。对于纵掠平板紊流换热 $St=C_f/2$。这种类比关系建立在动量传递和热量传递的类比。雷诺类比律只适用于 Pr=1 的流体。
8、普朗特准则 Pr： $\Pr = \nu / a$，它是一个完全由物性参数构成的准则，反映流体物性对换热的影响。Pr 数反映了流体中分子的动量扩散和热量扩散的相对比值。Pr=1 时，ν =a，速度边界层和温度边界层的厚度相等，$\delta=\delta_t$。Pr＜1 即 ν ＜a，温度场的传递速度比速度场快，则 $\delta_t>\delta$ 。Pr>1 时情况相反，$\delta_t<\delta$ 。
9、格拉晓夫准则 Gr： $Gr = g\Delta t\alpha_v l^3/\nu^2$，它反映流体在自由流动过程中浮升力和粘滞力之间的相对大小。Gr 数的增大，表明浮升力作用增长。在准则方程式中，Gr 数反映在自由流动中流体运动状态对换热的影响。
问答题
1、试引用边界层概念来分析并说明流体的导热系数、粘度对对流换热过程的影响。
答：(1)λ 大的流体，当层流底层厚度相同时，层流底层的导热热阻小，因而对流换热系数 h 就大；(2)粘性大的流体，则流过壁面时的滞止作用就大，在相同的流速下其边界层的厚度就较厚，因此减弱了对流换热，对流换热系数 h 较低。
2、何谓紊流(湍流)边界层？并简述其构成特点。
答：流体在边界层内的流动处于紊流(湍流)状态时的边界层，称为紊流边界层。在紊流边界层中，除了紊流核心区之外，在靠近壁面附近的一个薄层内，由于流体的速度很低，仍处于层流状态，称为层流底层，在层流底层和紊流核心区之间还存在一个缓冲层。在紊流边界层中，流体的运动无规律，充满了漩涡和脉动，使流体微团穿过流线产生涡旋对流混合运动，大大加强了动量和能量的传递。但在层流底层，热量的传递仍然是依靠分子扩散运动所产生的导热作用。由于旋涡混合对流方式传递热量远比导热作用强，故紊流边界层的温度梯度在层流底层最大，在紊流核心区变化平缓。
3、绘图说明气体掠过平板时的流动边界层和热边界层的形成和发展。



答：当温度为 tf 的流体以 u∞速度流入平板前缘时，边界层的厚度δ =δ t=0，沿着 X 方向，随着 X 的增加，由于壁面粘滞力影响逐渐向流体内部传递，边界层厚度逐渐增加，在达到 Xc 距离(临界长度 Xc 由 Rec 来确定)之前，边界层中流体的流动为层流，称为层流边界层，在层流边界层截面上的流速分布，温度分布近似一条抛物线，如图所示。在 Xc 之后，随着边界层厚度δ 的增加，边界层流动转为紊流称为紊流边界层，即使在紊流边界层中，紧贴着壁面的薄层流体，由于粘滞力大，流动仍维持层流状态，此极薄层为层流底层δ t，在紊流边界层截面上的速度分布和温度分布在层流底层部分较陡斜，近于直线，而底层以外区域变化趋于平缓。
4、流体沿平板流动时，为什么板面边界层厚度沿着流动方向越来越厚？为什么紊流边界层的厚度增长得比层流边界层快？
答：流体流过平板时，在进口处的边界层最薄，因为只有和壁面直接接触的一层极薄的流体受到壁面粘滞力的作用而降低了速度，随着流体向前流动，由于边界层内速度慢的流体对边界层外速度快的流体产生粘滞作用，使边界层逐渐增厚。在层流边界层中，能量和动量的传递是依靠分子的扩散运动，其边界层厚度发展得较慢，而紊流边界层中除与层流边界层中同样存在依靠分子扩散运动外，还有更主要的由宏观的涡流扩散运动来传递能量和动量，使其边界层迅速增厚。
5、在对流换热过程中，紧靠壁面处总存在一个不动的流体层，利用该层就可以计算出交换的热量，这完全是一个导热问题，但为什么又说对流换热是导热与对流综合作用的结果。
答：流体流过静止的壁面时，由于流体的粘性作用，在紧贴壁面处流体的流速等于零，壁面与流体之间的热量传递必然穿过这层静止的流体层。在静止流体中热量的传递只有导热机理，因此对流换热量就等于贴壁流体的导热量，其大小取决于热边界层的厚薄，而它却受到壁面流体流动状态，即流动边界层的强烈影响，故层流底层受流动影响，层流底层越薄，导热热阻越小，对流换热系数 h 也就增加。∴是对流和导热的综合作用。
6、简述边界层理论的基本论点。
答：当流体流过壁面时由于摩擦力的作用，使壁面附近的流体速度减低，直至到零。我们把减速的区域称为流动边界层，流动边

界层的特征为：⑴边界层厚度δ 与壁的尺寸 l 相比是极小值；⑵边界层内壁面法线方向速度变化率最大，即 $\partial u_x/\partial y$ 很大；⑶边界层流动状态分为层流与紊流，而紊流边界层内，紧贴壁面处仍将是层流，称为层流底层；⑷流场可以划分为两个区：边界层区和主流区。边界层区是流体粘性起作用的区域，它的运动可由粘性流体运动微分方程描述。主流区速度梯度为 0，可视为无粘性的理想流体，它的运动由伯努利方程描述。

以上四点就是边界层理论的基本论点。

7、流动边界层的意义是指什么？热边界层的意义是什么？边界层厚度是怎样定义的？

答：流动边界层的意义是指流体经壁面时，由于流体的粘性，使流体在靠近壁面处产生了较大的流速的变化，这个区域就是流动边界层，在流动边界层中粘性起作用。热边界层是指流体流经壁面时，由于流体的导热性能以及流体的温度与壁温的不同，使流体在靠近壁面处产生了较大的温度变化，这个区域称热边界层。流动边界层厚度是指速度达到主流速度的 99%的点到壁面的距离。温度边界层厚度是指边界层中温度达到主流温度的 99%的点到壁处面的距离。

8、分别说明强化单相对流换热、沸腾换热和膜状凝结换热的基本途径。

答：强化单相对流换热主要途径是通过各种措施来减薄层流底层的厚度。强化沸腾换热的主要途径是增加传热面上的汽化核心和汽泡产生的频率。强化膜状冷凝换热主要途径是降低冷凝液膜的厚度。

9、在层流边界层和紊流保边界层中的热量传递有何区别？

答：对于层流边界层，壁面法线方向的热量传递靠导热方式，边界层内温度分布呈抛物线。对于紊流边界层，层流底层的热量转移靠导热，而在底层之外的紊流区，除导热方式之外，主要靠涡旋扰动的对流混合作用，边界层内的温度分布在底层区较陡斜，而在紊流区变化平缓呈正截抛物线形式。

10、确定对流换热系数 h 有哪些方法？试简述之。

答：求解对流换热系数的途径有以下四种:(1)建立微分方程组并分析求解___应用边界层理论，采用数量级分析方法简化方程组，从而求得精确解，得到了 Re，Pr 及 Nu 等准则及其准则关系，表达了对流换热规律的基本形式。(2)建立积分方程组并分析求解___先假定边界层内的速度分布和温度分布然后解边界层的动量和能量积分方程式求得流动、热边界层厚度，从而求得对流换热系数及其准则方程式。以上两法目前使用于层流问题。(3)根据热量传递和动量传递可以类比，建立类比律，借助于流动摩擦阻力的实验数据，求得对流换热系数。此法较多用于紊流问题。(4)由相似理论指导实验，确定换热准则方程式的具体形式。提供工程上常用准则方程式，求解准则关联式得到对流换热系数。

11、导温系数和导热系数对对流换热系数的影响有什么不同？

答：导热系数λ 值增大，对换热有利。因为λ 大，边界层(特别是层流底层)内的热阻减小，从而增大换热系数。导温系数 a 值增大，对换热不利，因为 a 的增大，使温度分布均匀，减少边界层内的温度梯度 $\partial t/\partial y|_w$，从而减小换热系数。

12、对于不可压缩流体沿平板受迫流动时的稳态换热现象，需要哪些微分方程式来描述？

答：对流换热现象涉及流体运动和换热两个方面，它可以用一组微分方程式来描述。其中对流换热微分方程是直接用来求解对流换热系数的方程，它把换热系数同壁面上流体的温度梯度关联起来，只要求得温度梯度，就可用它来求 h。但为了确定温度梯度，必须知道流体内的温度分布规律，即温度场。为求取温度场，则必须事先解出流体内的速度分布规律，即速度场。速度场由流体运动微分方程和连续性方程求解确定。温度场则由能量方程解得。这四个方程总称为对流换热微分方程组。

13、何谓定型尺寸？通常如何选择？

答：在无因次准则数中所包含的换热面尺寸叫做定型尺寸。通常是选取对流体运动和换热发生主导影响的尺寸作为定型尺寸，例如管内受迫流动换热过程则取内径 d_i，管外受迫流动换热过程则取外径 d_o，对非圆形管道取当量直径 d_e。

14、何谓定性温度？通常如何取法？

答：在无因次准则数中的物性参数λ 、α 、ρ（ν ）、c_p 等是随流体温度而变化。用于决定这些物性的温度称为定性温度。定性温度的取法大致有以下三种：

(1)流体的平均温度： $t_f=(t_f'+t_f'')/2$；(2)壁面的平均温度： t_w；(3)流体和壁面的平均温度： $t_m=(t_w+t_f)/2$；

15、雷诺类比的主要假设，以及雷诺类比律适用条件。

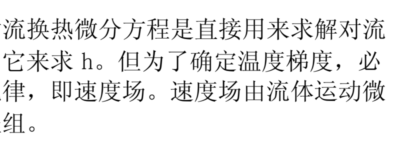
答：雷诺类比建立在一个简化了的模型基础上，即视边界层为一层结构紊流模型，不论边界层内流动是层流还是紊流均遵守雷诺类比方程：$\frac{q}{\tau}=-c_p\frac{dt}{du}$，雷诺类比律 $St=C_f/2$ 只适用于:(1)Pr≈1 的流体；(2)流体阻力只有摩擦阻力的场合(不包括形状阻力)，因此只适用于管内流动以及没有边界层脱离的外掠流动。

16、什么样的现象是同类现象？什么样的现象是相似现象？

答：凡描述现象的微分方程组的形式和实质内容都相同的现象是同类现象。单值性条件相似，同名已定准则相等的同类现象是相似现象。

17、定义普朗特数，为什么它是很重要的？

答：普朗特数是运动粘度与导温系数之比，即 Pr=ν /a。首先，它的数值只与流体的物性有关，反映了流体的重要物性，即反映了流体传递动量与传递热量的能力的相对大小。对于纵掠平板的层流换热情况，若其流动边界层和热边界层从同一点开始发展，则当 Pr=1 时 $\delta=\delta_t$，当 Pr>1 时 $\delta>\delta_t$，当 Pr<1 时 $\delta<\delta_t$。



18、写出自由流动换热的准则关系式(幂函数形式)。

答：函数式:Nu=f(Gr，Pr)；幂函数形式:$Nu=C(Gr\cdot Pr)^n$。

19、什么叫相似倍数？什么叫相似准则？举例说明它们之间的联系和差别。

答：一个物理现象中的任一物理量 y_1 和另一同类物理现象中的相对应同类物理量 y_2 成比例，其比例系数 $C_y=y_1/y_2$ 称之为相似倍数。用以判断现象相似的无量纲数称之为相似准则。举例:一组三角形彼此几何相似。

其中 a1/a2=b1/b2=C1 称之为相似倍数(1)；a1/b1=a2/b2=L1 称之为相似准则(2)。式(1)表示两个三角形相似的性质一对应边成比例。揭示现象相似的性质。式(2)表示一个三角形中的某个无量纲量必然与相似现象中的对应的无量纲量相等。揭示现象(三角形)相似的充分和必要条件。

20、、何谓对流换热微分方程式，试说明其用途。