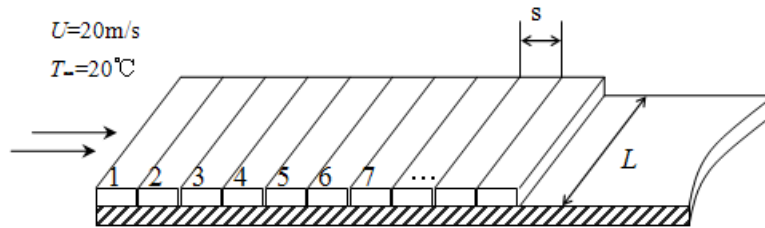


第六章教学案例



图一

问题提出：

电子设备设计要考虑电子元件的冷却问题，如图一所示，某电子设备设计在一块基板上依次安装数块元件。通过基板上的空气对流来冷却，基板上不同位置上元件所允许的最大功率如何确定？

问题分析：

空气掠过平板时形成边界层，边界层内为层流换热，流动之后经过过渡区发展为湍流，层流与湍流传热能力差别较大，因此需分别计算基板上元件安装位置的对流传热系数。根据牛顿冷却公式计算最大传热量。

数学建模：

空气温度为 20°C，横向掠过平板，速度为 20m/s。预安装的元件表面的最高温度不能超过 100°C。元件尺寸为 $s=40\text{mm}$, $L=200\text{mm}$ ，忽略元件之间的安装间隙。忽略元件与环境的导热以及辐射传热。计算安装在 1、5、12 和 15 位置的元件的最大允许功率。

定量计算：

定性温度： $t_m = (t_{\square} + t_w) / 2 = (20 + 100) / 2 = 60^\circ\text{C}$

查空气物性表为

$$\nu = 18.97 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \text{Pr} = 0.696, \lambda = 2.90 \times 10^{-2} \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$$

首先要明确空气在掠过元件时是否已经达到湍流：

$$x_c = \frac{u_{\square} Re_c}{\nu} = \frac{20 \times 5.0 \times 10^5}{18.97 \times 10^{-6}} = 0.474\text{m}$$

$$\frac{x_c}{s} = \frac{0.474}{0.04} = 11.8, \text{ 这说明 1,5 位置处于层流区, 12 位置处于过渡区, 15 位置处于湍流区}$$

(1) 1 和 5 位置可以使用流体外掠平板层流分析理论求解。

根据教材 (5-22d) 式： $Nu_l = 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3}$

$$1 \text{ 位置上的元件表面上 } Nu_l = 0.664 \left(\frac{20 \times 0.04}{18.97 \times 10^{-6}} \right)^{1/2} \times 0.696^{1/3} = 120.8$$

$$\text{元件表面传热系数 } h = \frac{Nu_s \lambda}{s} = \frac{120.8 \times 2.90 \times 10^{-2}}{0.04} = 87.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ gK})$$

$$\text{元件最大散热量: } \phi_1 = hA(T_s - T_{\square}) = 87.6 \times 0.2 \times 0.04 \times (100 - 20) = 56.1\text{W}$$

5 位置可以根据教材 (5-22a) 式: $h_x = 0.332 \frac{\lambda}{x} (\text{Re}_x)^{1/2} (\text{Pr})^{1/3} = 8.79x^{-1/2}$ 计算传热系数

$$h = \frac{1}{s} \int_0^s h_x dx = \frac{1}{s} \int_0^s 0.332 \frac{2.90 \times 10^{-2}}{x} \left(\frac{20 \times 5 \times 0.04}{18.97 \times 10^{-6}} \right)^{1/2} \times 0.696^{1/3} dx = 20.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{gK})$$

$$\text{最大散热量: } \phi_5 = hA(T_s - T_\infty) = 20.7 \times 0.2 \times 0.04 \times (100 - 20) = 13.2 \text{ W}$$

(2) 12 位置 ($0.44\text{m} \leq x \leq 0.48\text{m}$) 而 $x_c = 0.474\text{m}$, 该位置处于过渡区。

按照教材 (5-35b) $Nu_m = (0.037\text{Re}^{4/5} - 871)\text{Pr}^{1/3}$ 计算出 1 至 12 区域的平均传热系数

h_{1-12} :

$$Nu_{1-12} = (0.037 \left(\frac{20 \times 12 \times 0.04}{18.97 \times 10^{-6}} \right)^{4/5} - 871) \times 0.696^{1/3} = 427.9$$

$$h_{1-12} = \frac{Nu_{1-12} \lambda}{12 \times 0.04} = \frac{427.9 \times 2.90 \times 10^{-2}}{12 \times 0.04} = 25.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{gK})$$

按照教材 (5-22d) $Nu_l = 0.664\text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$ 计算出 1 至 11 区域的平均传热系数 h_{1-11} :

$$Nu_{1-11} = 0.664 \left(\frac{20 \times 11 \times 0.04}{18.97 \times 10^{-6}} \right)^{1/2} \times 0.696^{1/3} = 400.7$$

$$h_{1-11} = \frac{Nu_{1-11} \lambda}{11 \times 0.04} = \frac{400.7 \times 2.90 \times 10^{-2}}{11 \times 0.04} = 26.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{gK})$$

则第 12 位置的局部传热系数

$$h_{12} = 12 \times h_{1-12} - 11 \times h_{1-11} = 12 \times 25.9 - 11 \times 26.4 = 20.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{gK})$$

$$\text{散热量 } \phi_{12} = hA(T_s - T_\infty) = 20.4 \times 0.2 \times 0.04 \times (100 - 20) = 13.1 \text{ W}$$

(3) 15 位置 ($0.56\text{m} \leq x \leq 0.60\text{m}$)

按照教材 (5-35b) $Nu_m = (0.037\text{Re}^{4/5} - 871)\text{Pr}^{1/3}$ 计算出 1 至 15 区域的平均传热系数

h_{1-15} :

$$Nu_{1-15} = (0.037 \left(\frac{20 \times 15 \times 0.04}{18.97 \times 10^{-6}} \right)^{4/5} - 871) \times 0.696^{1/3} = 662.2$$

$$h_{1-15} = \frac{Nu_{1-15} \lambda}{15 \times 0.04} = \frac{662.2 \times 2.90 \times 10^{-2}}{15 \times 0.04} = 32.0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{gK})$$

计算出 1 至 14 区域的平均传热系数 h_{1-14} :

$$Nu_{1-14} = (0.037 \left(\frac{20 \times 14 \times 0.04}{18.97 \times 10^{-6}} \right)^{4/5} - 871) \times 0.696^{1/3} = 585.3$$

$$h_{1-14} = \frac{Nu_{1-12} \lambda}{14 \square 0.04} = \frac{585.2 \square 2.90 \square 10^{-2}}{14 \square 0.04} = 30.3 \text{ W/(m}^2 \text{gK)}$$

则第 15 位置的局部传热系数

$$h_{15} = 15 \square h_{1-15} - 14 \square h_{1-14} = 15 \square 32.0 - 14 \square 30.3 = 55.8 \text{ W/(m}^2 \text{gK)}$$

$$\phi_{15} = hA(T_s - T_{\square}) = 55.8 \square 0.2 \square 0.04 \square (100 - 20) = 35.7 \text{ W}$$

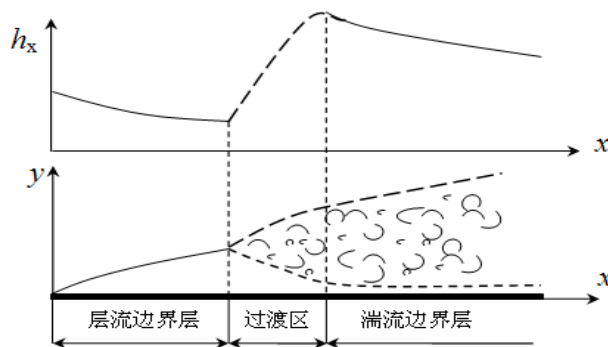
在对安装在 1、5、12 和 15 位置处的元件，为了保证表面温度不超过 100℃，允许的最大功率分别为 56.1W、13.2W、20.4W 和 35.7W。

讨论：

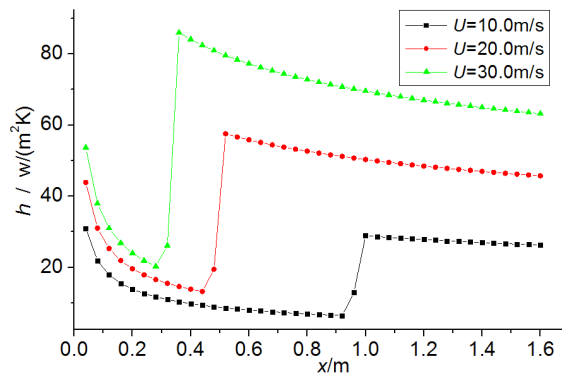
(1) 在计算局部传热系数时的一个常用错误是：在计算区域对 Nu_x 求平均值。正确的做法是对 h_x 求平均值。

(2) 为了保证元件的散热条件，在不同的位置，允许的最大功率的值差别较大。如图二从平板前缘开始，随着层流边界层增厚， h_x 将较快的降低；进入过渡区时，层流向湍流转变， h_x 则因湍流传递作用而又迅速增大，并明显高于层流，随后，由于湍流底部的层流边界层厚度增加， h_x 呈缓慢下降趋势。

(3) 图三给出了在空气流速分别为 10.0m/s、20.0m/s 和 30.0m/s 时，表面传热系数随着位置不同的变化。由图可见随着流动速度的增加，流动转化成湍流的临界距离减少；在层流区的相同位置，对流传热系数略微增加，说明此处边界层的厚度由于速度的增加而减小。空气速度增加也会明显增加湍流区的对流传热系数。因此，提高空气流速，对于层流区内的元件的对流传热强化作用有限，但是能够减小层流区的范围，并且可以明显的强化湍流区元件的对流传热，增大元件的允许功率。



图二 空气外掠平板边界层内流动示意图



图三 元件表面局部对流传热系数与距离板端间距的关系