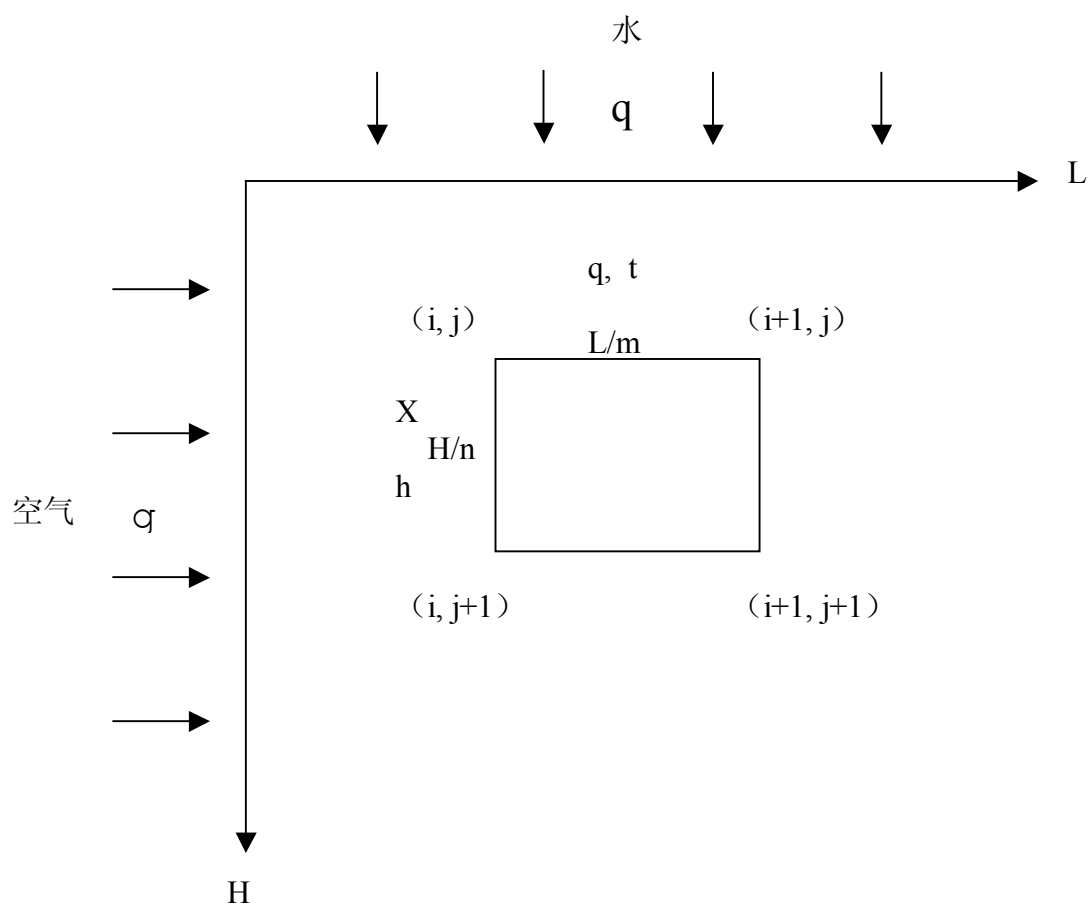


横流式冷却塔热力计算模型

杨烽 easthorse.net yf@easthorse.net

杜成琪 华东电力设计院 dcq@ecepdi.com

在横流塔中，水和空气流动方向相互垂直，由于传热传质过程非常复杂，几乎所有计算模型都忽略蒸发水量损失，也就难以获得满意的计算精度。本文提出了新的横流塔热力计算模型，考虑了蒸发水量损失，从而能够正确计算出塔空气状态，这对自然通风塔的设计非常重要。



图一 横流塔热质传递过程示意图

图一示意了横流塔中的热质传递过程，根据质能守恒定律和热质传递定律：

$$\frac{\partial(gh)}{\partial L} = \frac{\partial(C_w q t)}{\partial H}$$

$$\frac{\partial(gx)}{\partial L} = \frac{\partial(q)}{\partial H}$$

沿深 L 和高 H 方向分别将填料 m 和 n 等分，并取其中任一微元分析有：

$$\frac{1}{2} ((x_{i+1,j+1} + x_{i+1,j}) - (x_{i,j} + x_{i,j+1})) g \frac{H}{n}$$

$$= \frac{1}{4} ((x_{i,j}'' + x_{i+1,j}'' + x_{i,j+1}'' + x_{i+1,j+1}'') - (x_{i,j} + x_{i+1,j} + x_{i,j+1} + x_{i+1,j+1})) \beta_{xv} \frac{L}{m} \frac{H}{n}$$

$$\frac{1}{2} ((h_{i+1,j+1} + h_{i+1,j}) - (h_{i,j} + h_{i,j+1})) g \frac{H}{n}$$

$$= \frac{1}{4} ((h_{i,j}'' + h_{i+1,j}'' + h_{i,j+1}'' + h_{i+1,j+1}'') - (h_{i,j} + h_{i+1,j} + h_{i,j+1} + h_{i+1,j+1})) \beta_{xv} \frac{L}{m} \frac{H}{n}$$

经整理后可得：

$$x_{i+1,j+1} = A_1 (x_{i,j}'' + x_{i+1,j}'' + x_{i,j+1}'' + x_{i+1,j+1}'') - x_{i+1,j} + (1 - 2A_1) (x_{i,j} + x_{i,j+1})$$

$$h_{i+1,j+1} = A_1 (h_{i,j}'' + h_{i+1,j}'' + h_{i,j+1}'' + h_{i+1,j+1}'') - h_{i+1,j} + (1 - 2A_1) (h_{i,j} + h_{i,j+1})$$

其中 $A_1 = U / (2m + U)$ ， $U = \beta_{xv} L / g$ 。再由质量守恒和能量守恒，可以得到：

$$q_{i+1,j+1} = q_{i,j} + q_{i+1,j} - q_{i,j+1} - gA_2 ((x_{i+1,j+1} + x_{i+1,j}) - (x_{i,j} + x_{i+1,j}))$$

$$t_{i+1,j+1} = q_{i,j} t_{i,j} + q_{i+1,j} t_{i+1,j} - q_{i,j+1} t_{i,j+1} - \frac{gA_2}{C_w} ((h_{i+1,j+1} + h_{i+1,j}) - (h_{i,j} + h_{i+1,j}))$$

其中 $A_2 = (mH) / (nL)$ 。由上面推导出的四式，在已知水和空气在 (i, j) ， $(i+1, j)$ 和 $(i, j+1)$ 三点的状态的情况下，可以求得水和空气在 $(i+1, j+1)$ 的状态。

不难获得水气进口的边界条件。先考虑水进口的填料顶部，此时 $j=1$ ， $t_{i,1} = t_1$ ， $q_{i,1} = q_1$ ，同时以下两式成立：

$$gdx = \beta_{xv} (x_{1,1}'' - x) dL$$

$$gdh = \beta_{xv} (h_{1,1}'' - h) dL$$

上述方程组有解析解：

$$x_{i+1,1} = x_{1,1}'' - (x_{1,1}'' - x_{1,1}) e^{(-U_i/m)}$$

$$h_{i+1,1} = h_{1,1}'' - (h_{1,1}'' - h_{1,1}) e^{(-U_i/m)}$$

再考虑空气进口的填料进风口，此时 $i=1$ ， $x_{1,j}=x_1$ ， $h_{1,j}=h_1$ ，同时以下两式成立：

$$dq = \beta_{xv} (x'' - x_1) dH$$

$$C_w t dq + C_w q dt = \beta_{xv} (h'' - h_1) dH$$

可以利用数值法求解上述微分方程组，得到 $q_{1,j}$ 和 $t_{1,j}$ 的值。

获得了顶部和进风口空气和水的状态，就可以逐步求得填料内任意一点的空气和水的状态，直至出口。从而得到出口处水气状态的平均值：

$$t_2 = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (t_{i,n+1} + t_{i+1,n+1})$$

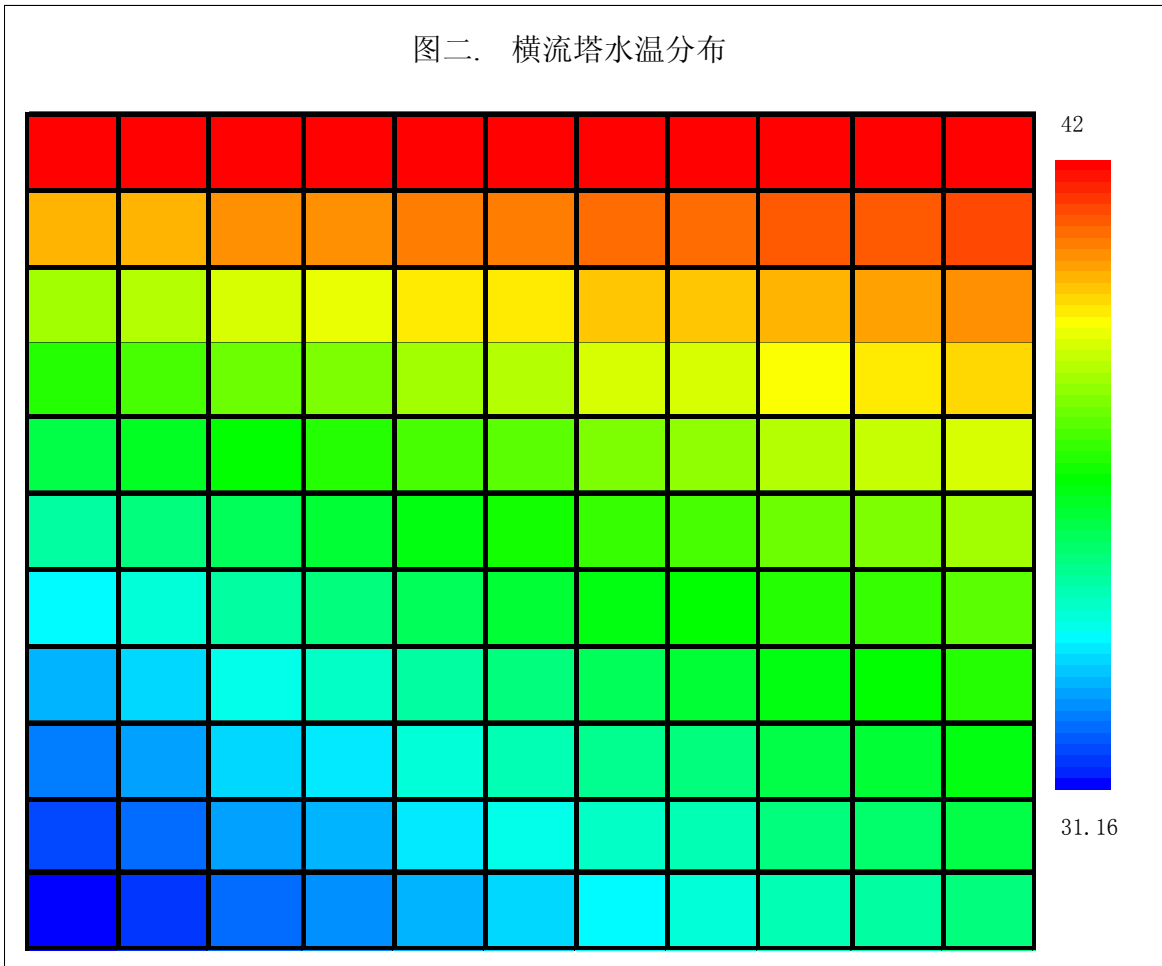
$$q_2 = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (q_{i,n+1} + q_{i+1,n+1})$$

$$h_2 = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (h_{m+1,j} + h_{m+1,j})$$

$$x_2 = \frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (x_{m+1,j} + x_{m+1,j})$$

算例一：假设一横流塔填料高 10 米，深 5 米，淋水密度为 20 吨 / 平方米，气水比为 1.0，进水温度 42 度，大气压力 100400 帕，干球温度 33 度，湿球温度 27 度，填料容积散质系数 2000 公斤 / 立方米时。由本文模型计算的结果是：平均出水温度 33.25

度，塔出口平均气温 35.69 度，平均相对湿度 89.6%。图二显示了横流塔内部的水温分布。



算例二：某横流试验塔填料高 6 米，深 4 米。某填料试验数据如下：大气压力 100400 帕，干球温度 32 度，湿球温度 25 度，进水温度 42 度，出水温度 32 度，淋水密度为 15 吨 / 平方米，气水比为 0.9，试求填料容积散质系数。由本文模型计算的结果为 2995 公斤 / 立方米时。

附表 符号说明

符号	说明	单位
c	等压比热	kJ/kg K
g	干空气质量流率	$\text{t/m}^2\text{h}$
h	焓	kJ/kg
h_{fg}	水的蒸发焓	kJ/kg
K	热量修正系数	
Le_c	对流 Lewis 数	
m	质量流率	kg/h
P	压力	Pa
q	淋水密度	$\text{t/h m}^2\text{h}$
t	温度	K
v	速度	m/s
V	体积	m^3
x	绝对含湿量	kg/kg
α	传热系数	$\text{kJ/Km}^2\text{h}$
β	传质系数	$\text{kg/m}^2\text{h}$
ϕ	相对湿度	
λ	气水比	
γ	比重	kg/m^3
ρ	密度	kg/m^3
θ	干球温度	K
τ	湿球温度	K
上标:		
"	饱和状态	
下标:		
a	干空气	
v	水蒸汽	
w	水	
x	基于干空气混合空气	
1	进口	
2	出口	