

冷却塔计算原理及其应用

杨烽 easthorse.net yf@easthorse.net

杜成琪 华东电力设计院 dcq@eceptdi.com

摘要

本文利用热力学原理和传热传质理论对冷却塔内同时发生的热质传递现象进行了详细的分析，导出了严格的逆流塔和横流塔热力计算模型，并在此基础上开发了一套完整的含自然通风塔、机力通风塔、逆流塔和横流塔的冷却塔工艺计算程序。利用工业塔测试数据进行验证的结果表明，程序计算结果和实测结果有非常好的相关性和一致性。

关键词：冷却塔、逆流塔、横流塔、传热传质、热力计算、自然通风、机力通风

ABSTRACT

This paper analyses simultaneous heat and mass transfer in cooling towers and establishes strict mathematical models for both counter-flow and cross-flow cooling towers. A full package of software, including natural-draught and mechanical-draught, and counter-flow and cross-flow cooling towers, are developed based on proposed models for calculations of size and thermal performance of cooling towers. The computer outputs are compared with field-testing data of industry cooling towers. The results show excellent correlation and consistence between calculated and measured data.

冷却塔计算原理及其应用

杨烽 easthorse.net yf@easthorse.net

杜成琪 华东电力设计院 dcq@eceptdi.com

一. 前言

冷却塔是工业水循环利用的主要设备。冷却塔中水的冷却过程是一个水和空气两相间同时发生热质传递的过程，冷却塔理论的任务就是分析和研究这个特定的过程。从传质过程的表达方式来看，冷却塔热力计算可分为焓差法、压差法和湿差法^[1,2]，国内常用的是压差法和焓差法^[3,4]，但由于其中引入不少简化，既不严格，计算精度也不高，难以适应工业生产发展带来的新要求。

本文通过对冷却塔中水、气两相的传热传质过程的分析，充分利用现代计算机技术，提出了严格的逆流塔和横流塔热力计算模型，同时在此基础上开发了含自然通风和机力通风冷却塔的冷却塔计算软件，并以工程实例验证其正确性。

二. 逆流塔计算模型

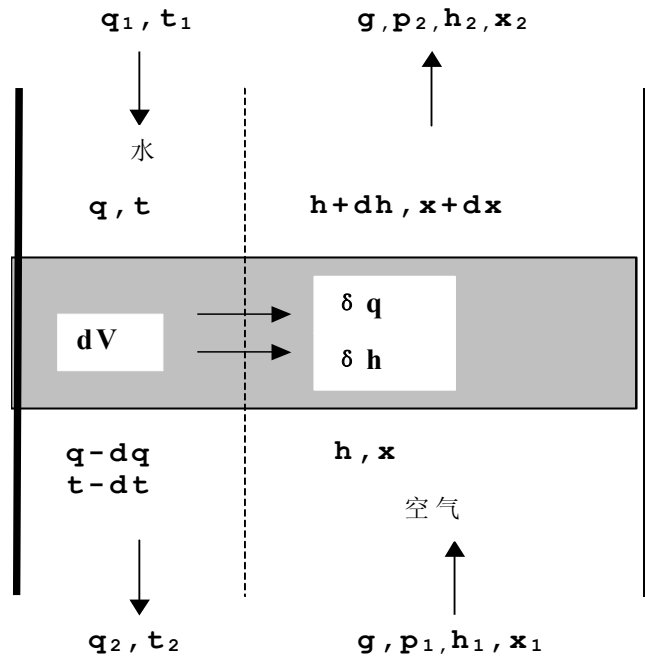
热力学理论表明^[5]：

$$\text{确定系统状态参数数目} = \text{组分数} - \text{相数} + 2$$

在冷却塔中，水是单组分单相系，空气可以看作由干空气和水蒸气组成的双组分单相系，因此需要两个参数来描述水的状态及三个参数来描述空气的状态，可以取 p 、 t 和 p 、 h 、 x 来分别确定水和空气的状态。因为在冷却塔填料区内压力变化仅几毫米水柱，所以常

压下（约 10 米水柱）进行热力计算时可以忽略压力的变化。另外由于水的不断蒸发，需要描述水流量的变化。

图一显示了水和空气之间的热质传递过程，热水由塔顶进入，冷空气由塔底进入；热水自上而下与空气直接接触，进行热质交换而得到冷却，空气则经历一个增温增湿的过程。



图一 逆流塔热质传递过程示意图

设定 0°C 时水的焓值及干空气的焓值为零，在图一取微控制体 dV ，根据质量守恒和能量守恒定律，我们可以得到以下关系式：

$$dq = gdx = \beta_{xv}(x'' - x) dV \quad (1)$$

$$d(c_wqt) = gdh = \alpha(t - \theta)dV + \beta_{xv}(x'' - x)(h_{fg,0} + c_v t) dV \quad (2)$$

定义对流 Lewis 数： $Le_c = \frac{\alpha}{\beta_{xv}(c_a + c_v x)}$

代入 (2) 式并整理得到:

$$gdh = \beta_{xv} (h'' - h + (Le_c - 1) (c_a + c_v x) (t - \theta)) dV \quad (3)$$

其中 h'' 和 h 分别为温度 t 时的水面饱和蒸汽焓和温度为 θ 及湿度为 x 的空气焓:

$$h'' = c_a t + (h_{fg,0} + c_v t) x''$$

$$h = c_a t + (h_{fg,0} + c_v t) x$$

在 (3) 式中取 $Le_c = 1$ 即可得到麦克尔 (Merkel) 方程:

$$gdh = \beta_{xv} (h'' - h) dV \quad (4)$$

国内有些有关冷却塔的书籍以过于简单的方式推导麦克尔方程, 其过程缺乏严格的定义和逻辑, 从而造成了对麦克尔方程不必要的误解, 以至以讹传讹。其实麦克尔方程的主要假定就是 Lewis 关系的成立。

综合以上, 我们可以得到:

$$dp = 0$$

$$gdh = (h'' - h) \beta_{xv} dV$$

$$gdx = (x'' - x) \beta_{xv} dV$$

$$d(c_w q t) = (h'' - h) \beta_{xv} dV$$

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

上述五个方程正好可以描述冷却塔中空气和水的状态。

以水温 t 为自变量, 经整后可得到一组常微分方程:

$$dp = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{C_w q (x'' - x)}{g (h'' - h - C_w t (x'' - x))} \quad (6)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{C_w q (h'' - h)}{g (h'' - h - C_w t (x'' - x))} \quad (7)$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{C_w q (x'' - x)}{h'' - h - C_w t (x'' - x)} \quad (8)$$

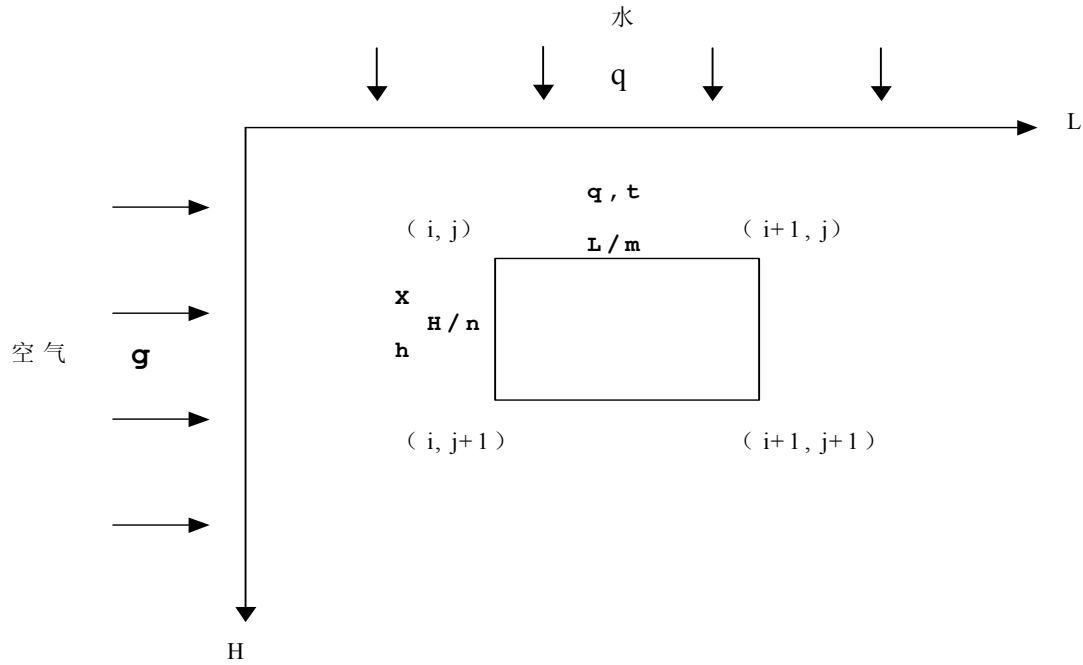
$$\frac{d(\beta_{xv} V)}{dt} = \frac{C_w q}{h'' - h - C_w t (x'' - x)} \quad (9)$$

在已知空气进口状态、进出口水温、进水流量或出水流量的情况下，可以用数值法求解上述微分方程组。

算例一：大气压力 100400 帕，干球温度 30℃，湿球温度 27℃，空气流速 1.5 m/s，进水温度 43℃，出水温度 33℃，淋水密度 10 t/m²/h，由本模型编程求得的容积散热系数为 14177 kg/m³/h，冷却数为 1.418。

三. 横流塔计算模型

在横流塔中，水和空气流动方向相互垂直（图二）。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。



图二 横流塔热质传递过程示意图

横流塔内水气间的热质传递可由图二及(10)和(11)式表示。

$$\frac{\partial(gh)}{\partial L} = \frac{\partial(C_wqt)}{\partial H} \quad (10)$$

$$\frac{\partial(gx)}{\partial L} = \frac{\partial(q)}{\partial H} \quad (11)$$

沿深 L 和高 H 方向分别将填料 m 和 n 等分，并任取其中一体积元分析。沿空气流动方向，利用麦克尔方程及平均焓差法，以下两式成立：

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} ((h_{i+1,j+1} + h_{i+1,j}) - (h_{i,j} + h_{i,j+1})) g \frac{H}{n} \\ &= \frac{1}{4} ((h_{i,j}'' + h_{i+1,j}'' + h_{i,j+1}'' + h_{i+1,j+1}'') - (h_{i,j} + h_{i+1,j} + h_{i,j+1} + h_{i+1,j+1})) \beta_{xv} \frac{L}{m} \frac{H}{n} \\ & \frac{1}{2} ((x_{i+1,j+1} + x_{i+1,j}) - (x_{i,j} + x_{i,j+1})) g \frac{H}{n} \end{aligned}$$

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

经整理后可得:

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

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

其中 $A_1 = U / (2m + U)$, $U = \beta_{xv} L / g$ 。

再沿水流方向应用质量和能量守恒定律, 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:

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

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

再考虑空气进口, 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：

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

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

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

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

算例二^[5]：横流塔填料高 11 米，宽 11 米，深 5.5 米 x 2，水量 3000 t/h，风量 262 万 m³/h；气象参数：大气压力 99992 帕，干球温度 31.6℃，湿球温度 27℃；填料热力特性为： $\beta_{xv} = 291g^{0.29}q^{0.66}$ ；进水温度 43℃，试求出水温度。由本模型计算的结果是：平均出水温度 31.17℃，塔出口平均气温 36.39 度，平均相对湿度 99.45%。

算例三^[5]：横流塔填料高 11 米，深 5.5 米；气象参数：大气压力 99992 帕，干球温度 31.6℃，湿球温度 27℃；进水温度 42℃，出水温度 32℃，淋水密度为 25 t/m²，气水比 0.8，试求填料容积散质系数。由本模型计算的结果为 4169 kg/m³/h，对应的冷却数为 1.835。彭昕在文献 [5] (实例 3) 运用各种方法的计算出的冷却数为 1.526-1.806，因为彭昕的计算方法或忽略蒸发水量损失或采用了其它的简化，其误差是可以预料的。

本数值模型收敛速度相当快，以算例三为例，10x10、20x20、40x40 分格所求得的冷却数分别为：1.826、1.835、1.837，前后结果的相对误差依次为：0.5%和 0.1%，由此可见 20x20 分格足以满足工程计算的精度要求。

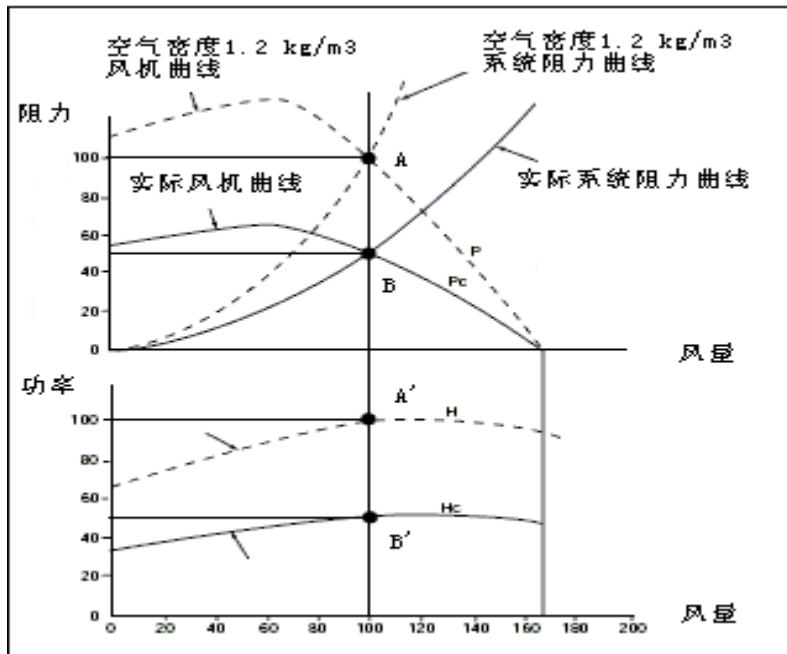
四. 空气动力计算

冷却塔通风方式有自然通风和机力通风两种，在自然通风情形下，空气动力来自冷却塔内外的空气密度差。在机力通风情形下，冷却塔里空气动力来自风机。不管是那种情形，在稳定状态下空气通过冷却塔各部件的压降总和必须和抽力相等。

自然通风冷却塔的通风抽力来自塔进口和塔出口的空气密度差，其值等于密度差乘以有效通风高度，精确的话还要考虑塔顶羽流的抽力。麻烦的是出口空气密度取决于热力计算结果，因此空气动力计算必须和热力计算结合在一起，通过试算才能得到塔的出口空气状态和抽力。

对于机力通风冷却塔，可以作系统总阻力曲线，然后对照风机特性曲线求得对应风量（图三中的 B 点）。但风机厂家一般仅提供标准状态下（空气密度等于 1.2kg/m^3 ）的风机特性曲线，如果用实际系统总阻力曲线与厂家提供的风机特性曲线求解，所得的计算风量将偏大。假定流经风机的体积流量不随空气密度变化而变化，可以按以下步骤计算：

- 假定空气密度等于 1.2 kg/m^3 作系统总阻力曲线，与厂家提供的风机特性曲线相交，求得标准状态下的风量和风速（图三中的 A 点）。
- 假定风量不变，利用实际系统总阻力曲线求得实际工况点 B。
- 利用 A 点所对应的功率值参考选择电动机，B 点所对应的功率值为实耗功率。



图三 风机特性和塔总阻力关系

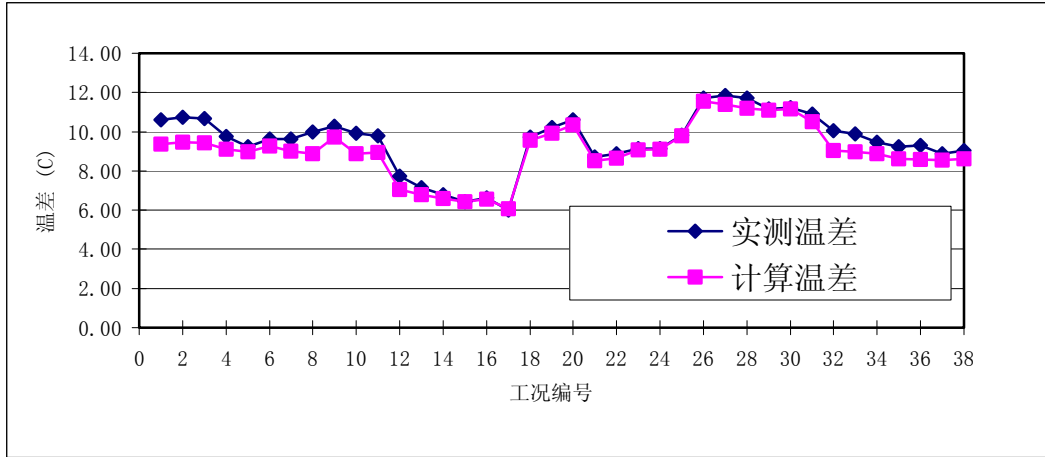
五. 工程验证

在上述冷却塔热力计算模型的基础上，作者开发了一整套冷却塔设计计算软件（网址：<http://www.easthorse.net>）。利用工业塔实测数据，可以对计算程序的正确性进行验证，方法如下：

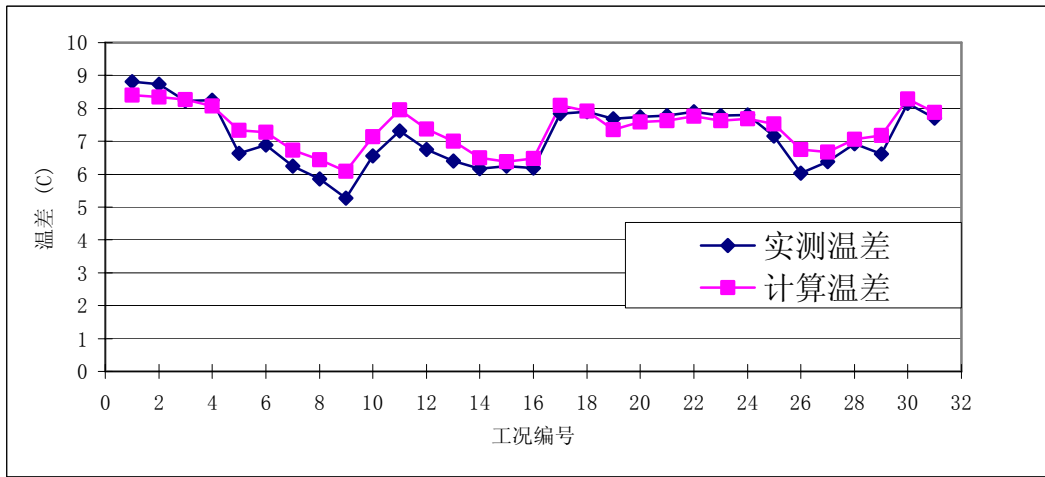
- 在设计工况下，人工调整填料热力修正系数使得程序计算出的进、出水温度与设计值一致。
- 固定热力修正系数，根据冷却塔实测数据，利用本程序计算出水温度及温差。
- 对计算温差与实测温差进行比较。
- 对实测冷却能力（实测温差/计算温差）进行统计分析。

图四至图六显示了平圩电厂、吴泾电厂和聊城电厂三座自然通风冷却塔的实测与计算结果的比较^[6]，可以看出实测温差和计算温差非常符合，有很好的相关性，对应的相关系数分别为 0.97、0.95 和 0.99。

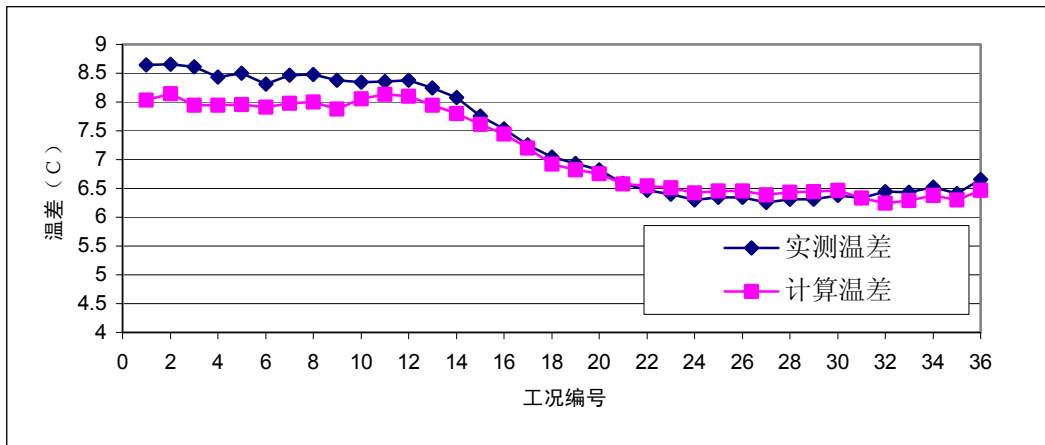
表一汇总了三个冷却塔的冷却能力统计分析结果，从各项统计指标看，它们的实测冷却能力具有很好的统计性，其平均值接近 1.0，标准误差小，99%置信度区间较窄，它的统计意义是：对该塔再进行一次热力性能测试所得到的平均冷却能力值，落在该区间的可能性高达 99%。



图四 平圩电厂 6000m²冷却塔实测与计算结果比较



图五 吴泾电厂 9000m²冷却塔实测与计算结果比较



图六 聊城电厂 8500m²冷却塔实测与计算结果比较

表一 冷却能力统计分析汇总

	平圩塔	吴泾塔	聊城塔
平均值	1.052	0.97	1.023
标准误差	0.0069	0.009	0.005
中值	1.039	0.97	1.021
方差	0.0427	0.050	0.03
范围	0.150	0.18	0.103
最小值	0.987	0.87	0.98
最大值	1.136	1.05	1.08
总和	39.96	29.99	36.81
样本数	38	31	36
99%置信度区间	1.033-1.071	0.943-0.992	1.009-1.037

六. 结论

本文通过对冷却塔内同时发生的传热传质现象进行分析，导出了严格的逆流塔和横流塔热力计算模型，并利用工业塔测试数据对模型进行了验证，统计分析表明模型计算结果和实测结果相符得非常好。

参考文献

- [1] 杨烽. 冷却塔热力计算模式比较. 华东给水排水, 1990年, 第三期
- [2] 杨烽、杜成琪. 冷却塔热力计算模型比较, 冷却塔研究会成立暨技术交流大会论文集, 扬州, 2004年6月, p61-p63
- [3] 工业循环水冷却设计规范, GB/T 50102-2003, 中国计划出版社, 2003年, p53-p58
- [4] 给水排水设计手册(第4册)工业给水处理, p396-p447
- [5] J. H. Keenan, Principle of General Thermodynamics. Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York 1981, p192-p197
- [6] 彭昕. 横流冷却塔热力计算方法比较. 冷却塔研究会成立暨技术交流大会论文集. 扬州, 2004年6月, p128-p133
- [7] 杜成琪、杨烽. 自然通风逆流塔计算程序验证. 冷却塔研究会成立暨技术交流大会论文集. 扬州, 2004年6月, p55-p60

附表：符号说明

符号	说明	单位
c	等压比热	kJ/kgK
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
Le_c	对流 Lewis 数	
P	压力	Pa
q	淋水密度	$\text{t/m}^2\text{h}$
t	水温	K
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	$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$
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	