

自然通风逆流塔计算程序验证

杜成琪 华东电力设计院 dcq@eceptdi.com

杨烽 easthorse.net yf@easthorse.net

1. 前言

我国电力系统于八十年代在平圩电厂建设中引进了比利时哈蒙公司的整套自然通风冷却塔设计制造技术，包括设计图纸、计算技术和计算程序、淋水填料、配水系统和除水器。1992年8月西安热工所对该冷却塔进行了考核试验和热力特性试验，结果表明该塔设计能力与实测值基本相符。由于哈蒙冷却塔计算程序特有的热力计算原理，该程序难以在国内得到广泛使用。为此作者结合了哈蒙程序计算特点和国内传统，开发了一套新的冷却塔计算程序。本文先对该程序计算方法作一简单介绍，然后利用冷却塔实测数据对该程序进行校验。

2. 程序计算原理

本计算程序的热力计算原理仍遵循焓差法，但精确地考虑了蒸发水量损失。计算模型由下列常微分方程组表达：

$$\frac{dx}{dt} = \frac{C_w m_w (x'' - x)}{m_a (h'' - h - C_w t (x'' - x))}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{C_w m_w (h'' - h)}{m_a (h'' - h - C_w t (x'' - x))}$$

$$\frac{dm_w}{dt} = \frac{C_w m_w (x'' - x)}{h'' - h - C_w t (x'' - x)}$$

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

取步长 $(t_1 - t_2) / 100$ ，用四阶 Runge-Kutta 法可以非常精确地求解上述方程组。

哈蒙程序分配水层、填料层和雨区三段计算塔的热力性能，考虑到国内填料热力性能实验装置的实际情况，本程序仍采用整体计算法，并通过填料热力修正系数进行修正。

本程序对冷却塔通风阻力分人字柱、进风口、雨区、填料层、配水层、除水器和塔出口等 7 段计算，可以通过阻力修正系数修整对全塔通风阻力进行调整。

3. 程序验证方法

利用平圩电厂冷却塔实测结果^[1]可以对本程序的正确度进行验证，平圩电厂冷却塔尺寸和设计参数如下：

塔高：129.95 米

底部直径：94.58 米

喉部直径：55.77 米

出口直径：59.35 米

进风口高度：7.74 米

淋水面积：6183 平方米

冷却水量：61396 立方米 / 时

进水温度：43.74 °C

出水温度：34.0 °C

大气压力：101300 Pa

干球温度：30.0 °C

湿球温度：27.1 °C

该塔使用的淋水填料为无锡塑料厂引进哈蒙技术生产的复合波填料，水科院冷水所对该填料进行了热力和阻力性能测定，结果如下：

$$N=1.623 \lambda^{0.558}$$

$$\beta_{xv}=1753.6(g/1000)^{0.547}(q/1000)^{0.416}$$

$$\Delta P=\gamma(0.538+0.03628q-0.00020893q^2)v^M \text{ (mm H}_2\text{O)}$$

其中 $M=1.953-0.0073379q-0.00093561q^2$

具体验证步骤如下：

1. 利用水科院冷水所对复合波填料的实验室测试结果，根据平圩冷却塔的设计工况，首先推算该填料用于工业塔的热力修正系数，方法如下：运行本程序并填入平圩电厂冷却塔实际尺寸及设计参数，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。
2. 得到了该填料的热力修正系数后，根据平圩电厂冷却塔实测数据，利用本程序计算出水温度。
3. 将本程序计算出水温度与实测出水温度进行比较，并对比较结果进行统计分析。

表一 平圩电厂冷却塔实验数据

工况	大气压力(Pa)	干球温度(C)	湿球温度(C)	水量(t/h)	进水温度(C)	出水温度(C)
1	100193	25.38	20.94	61920	39.45	28.84
2	100127	25.68	21.13	61920	39.70	28.95
3	100160	25.48	21.06	61920	39.58	28.90
4	100400	22.06	21.92	62640	38.99	29.22
5	100400	22.77	21.01	63000	38.56	29.32
6	100400	22.69	21.40	62640	39.08	29.44
7	100400	22.93	21.34	63360	38.84	29.22
8	100400	22.94	21.21	63000	38.58	28.60
9	100400	22.78	21.41	62640	39.68	29.40
10	100850	26.28	23.02	64260	40.23	30.30
11	100850	26.39	22.95	64000	40.26	30.48
12	100700	28.48	23.36	62640	38.31	30.57
13	100692	28.61	23.48	62020	38.00	30.86
14	100652	28.66	23.56	63180	37.85	31.07
15	100580	28.46	23.83	62800	37.71	31.27
16	100575	28.41	23.60	62800	37.75	31.11
17	100550	28.14	23.77	62640	37.12	31.12
18	100700	25.18	22.68	34920	37.61	27.87
19	100700	25.23	23.13	34920	38.21	28.01
20	100700	25.68	23.07	34920	38.85	28.24
21	100560	27.02	23.51	34920	37.21	28.51
22	100528	27.27	23.28	34920	37.29	28.40
23	100473	27.56	23.03	34920	37.69	28.54
24	100473	27.59	22.98	34920	37.69	28.54
25	100423	27.52	22.70	34920	38.30	28.48
26	100420	26.40	21.32	34920	39.33	27.60
27	100384	28.20	21.12	34920	39.40	27.57
28	100280	29.12	21.04	34920	39.32	27.59
29	100200	29.00	21.12	34920	39.20	28.05
30	100200	29.03	21.17	34920	39.31	28.10
31	100200	28.92	22.52	34920	39.27	28.38
32	100520	26.67	22.23	61920	39.88	29.83
33	100500	27.60	22.27	61920	40.02	30.13
34	100416	28.56	22.16	61920	40.02	30.54
35	100382	28.20	22.48	61920	39.77	30.54
36	100320	28.68	22.48	61920	39.83	30.54
37	100312	27.40	23.44	61920	40.00	31.11
38	100326	27.24	23.44	61920	40.03	30.98

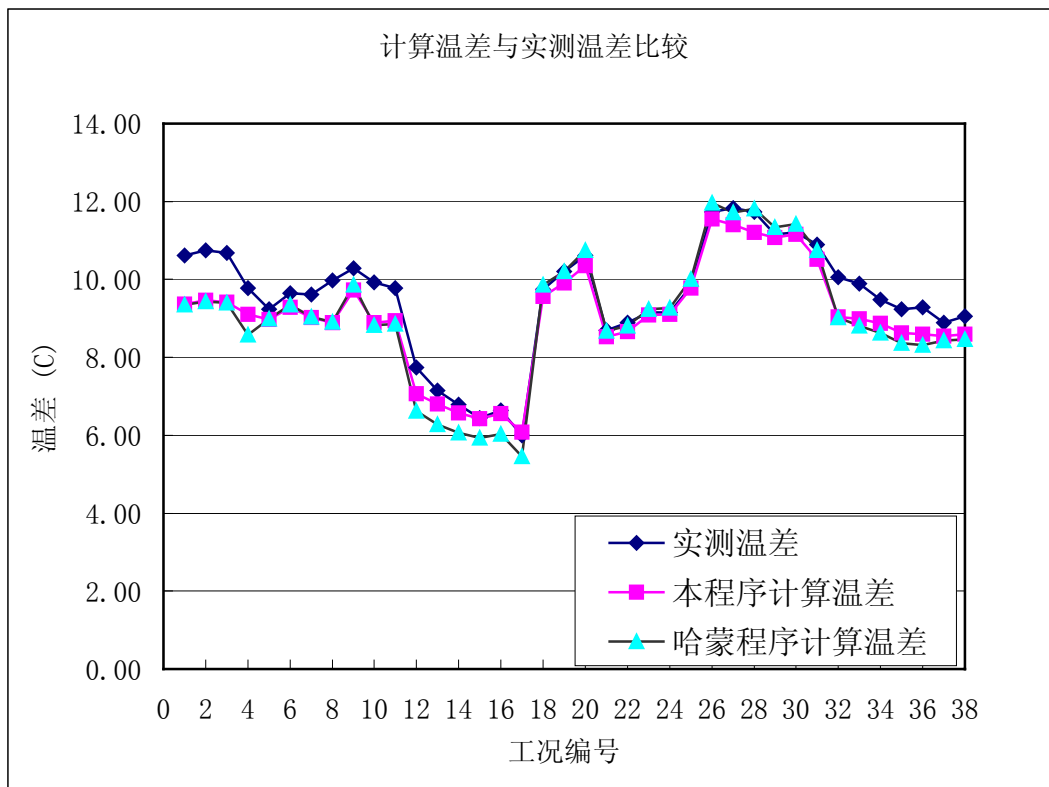
表二 平圩电厂冷却塔计算结果

工况	实测温差(C)	计算温差(C)	冷却能力(%)	哈蒙计算温差(C)	哈蒙冷却能力(%)
1	10.61	9.37	113.23	9.35	113.23
2	10.75	9.46	113.64	9.44	113.88
3	10.68	9.42	113.38	9.40	113.62
4	9.77	9.10	107.36	8.57	114.00
5	9.24	8.98	102.90	8.99	102.78
6	9.64	9.28	103.88	9.35	103.10
7	9.62	9.02	106.65	9.03	106.53
8	9.98	8.89	112.26	8.90	112.13
9	10.28	9.73	105.65	9.86	104.26
10	9.93	8.89	111.70	8.82	112.59
11	9.78	8.94	109.40	8.86	110.38
12	7.74	7.06	109.63	6.62	116.92
13	7.14	6.80	105.00	6.27	113.88
14	6.78	6.58	103.04	6.07	111.70
15	6.44	6.43	100.16	5.93	108.60
16	6.64	6.55	101.37	6.03	110.12
17	6.00	6.08	98.68	5.46	109.89
18	9.74	9.57	101.78	9.86	98.78
19	10.20	9.91	102.93	10.20	100.00
20	10.61	10.36	102.41	10.75	98.70
21	8.70	8.52	102.11	8.67	100.35
22	8.89	8.66	102.66	8.81	100.91
23	9.15	9.08	100.77	9.24	99.03
24	9.15	9.10	100.55	9.27	98.71
25	9.82	9.78	100.41	10.00	98.20
26	11.73	11.55	101.56	11.96	98.08
27	11.83	11.40	103.77	11.72	100.94
28	11.73	11.20	104.73	11.81	99.32
29	11.15	11.08	100.63	11.33	98.41
30	11.21	11.15	100.54	11.42	98.16
31	10.89	10.51	103.62	10.75	101.30
32	10.05	9.03	111.30	9.02	111.42
33	9.89	8.99	110.01	8.81	112.26
34	9.48	8.88	106.76	8.63	109.85
35	9.23	8.62	107.08	8.37	110.27
36	9.29	8.59	108.15	8.31	111.79
37	8.89	8.55	103.98	8.43	105.46
38	9.05	8.60	105.23	8.46	106.97

4. 程序验证结果

表一摘自西安热工所平圩电厂冷却塔热力性能试验报告，共 38 个测试工况。经试算，复合波填料的热力修正系数为 0.97，表二列出了对应表一实测数据由本程序计算的出水温度。作为比较，哈蒙程序的计算结果一并列入。

图一显示了计算结果与实测结果的比较，可以看出不管是本程序的计算温差，还是哈蒙程序的计算温差，它们与实测温差都有很好的相关性。本程序的计算温差与实测温差的相关系数为 0.965，相比之下，哈蒙程序的计算温差与实测温差的相关系数为 0.953。另外，本程序的计算温差与哈蒙程序的计算温差的相关系数更高达 0.996。



图一 计算结果与实测结果比较

定义冷却塔测试冷却能力为：实测温差 / 计算温差，还可以对比较结果进行统计分析，结果见表三。根据本程序的计算结果，该塔冷却能力的平均值为 105.2%，99%置信度区间为 1.033—1.071，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，在 1.033 与 1.071 之间的可能性高达 99%。

对比本程序的计算结果和哈蒙程序的计算结果，从各项统计指标看，由本程序计算出的冷却能力具有更好的统计性，比哈蒙程序的计算结果更能与实测数据相符。

表三 冷却能力数据统计分析结果

	本程序计算冷却能力	哈蒙程序计算冷却能力
平均值	1.052	1.062
标准误差	0.00693	0.00993
中值	1.039	1.068
方差	0.0427	0.0612
范围	0.150	0.188
最小值	0.987	0.981
最大值	1.136	1.169
总和	39.96	40.36
样本数	38	38
99%置信度区间	1.033-1.071	1.035-1.089

5. 更多验证

5.1 上海吴泾第二发电有限责任公司 2 号 9000m²逆流式自然通风冷却塔

上海吴泾第二发电有限责任公司 2 号 9000m²逆流式自然通风冷却塔尺寸和设计参数如下：

塔高：150.60 米

喉部直径：65.79 米

出口直径：71.97 米

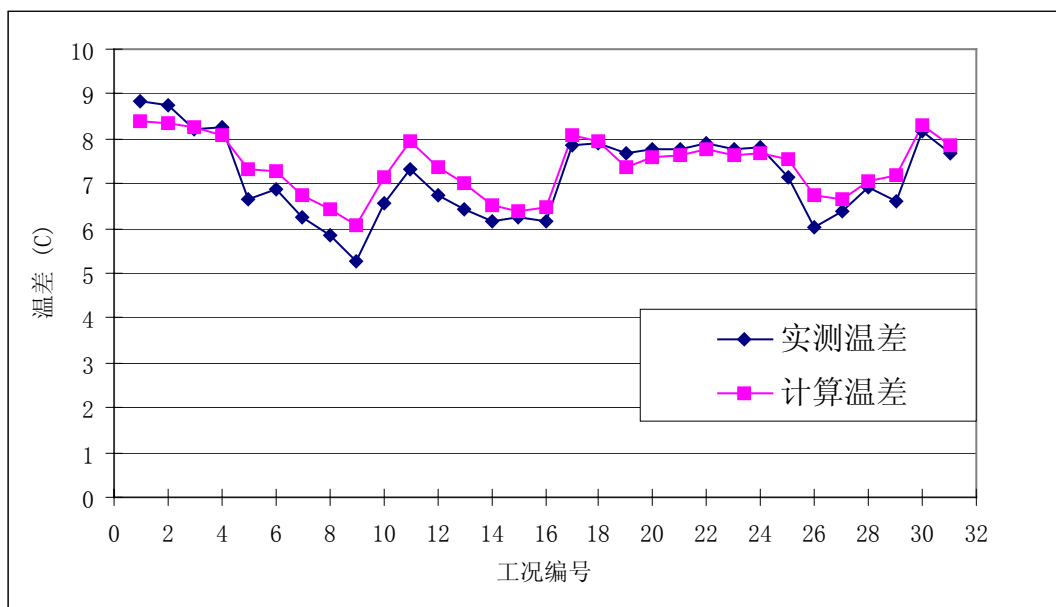
进风口高度：9.8 米

淋水面积：9000 平方米

冷却水量：74160 立方米 / 时

进水温度：40.43 °C
 出水温度：32.2 °C
 大气压力：100400 Pa
 干球温度：30.0 °C
 湿球温度：27.0 °C

该塔采用 PVC 双斜波淋水填料和 B0160—45 型除水器，热力修正系数为 1.0。结果本程序的计算温差与实测温差的相关系数为 0.95，平均冷却能力为 0.97 (具体见图二和表四)。



图二 吴泾 9000m² 逆流塔计算结果与实测结果比较

表四 吴泾 9000m² 逆流塔冷却能力数据统计分析结果

	冷却能力
平均值	0.97
标准误差	0.009
中值	0.97
方差	0.050
范围	0.18
最小值	0.87
最大值	1.05
总和	29.99
样本数	31
99%置信度区间	0.943-0.992

5.2 山东聊城电厂一号逆流式自然通风冷却塔

山东聊城电厂一号逆流式自然通风冷却塔尺寸和设计参数如下：

塔高：145.0 米

喉部直径：62.342 米

出口直径：67.97 米

进风口高度：10.034 米

淋水面积：8500 平方米

冷却水量：63063 立方米 / 时

进水温度：41.97 °C

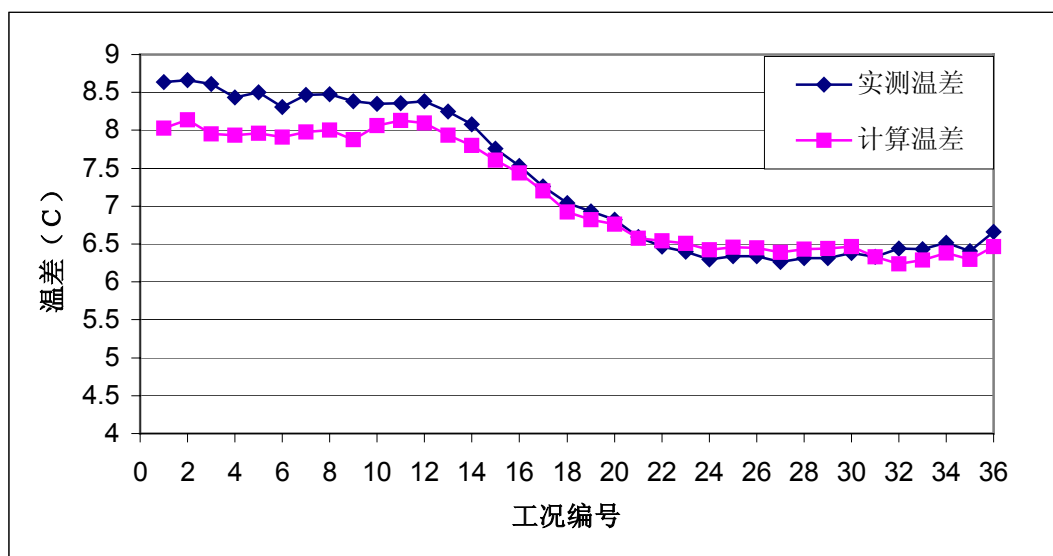
出水温度：32.46 °C

大气压力：99800 Pa

干球温度：29.1 °C

湿球温度：26.9 °C

该塔采用 S 波塑料淋水填料和 B0160—45 型除水器。根据设计工况，经试算取热力修正系数为 0.828。结果由本程序所得到的计算温差与实测温差的相关系数为 0.99，平均冷却能力为 1.023（具体见图三和表五）。



图三 聊城电厂一号塔计算结果与实测结果比较

表五 聊城电厂一号塔冷却能力数据统计分析结果

	冷却能力
平均值	1.023
标准误差	0.005
中值	1.021
方差	0.03
范围	0.103
最小值	0.98
最大值	1.08
总和	36.81
样本数	36
99%置信度区间	1.009-1.037

5.3 国电宁夏石嘴山发电有限责任公司 1 号塔

国电宁夏石嘴山发电有限责任公司 1 号逆流式自然通风冷却塔尺寸和设计参数如下：

塔高：102.6 米

喉部直径：45.41 米

出口直径：48.708 米

塔底直径：82.404 米

进风口高度：7.185 米

淋水面积：4500 平方米

冷却水量：36300 立方米 / 时

进水温度：39.34 °C

出水温度：29.64 °C

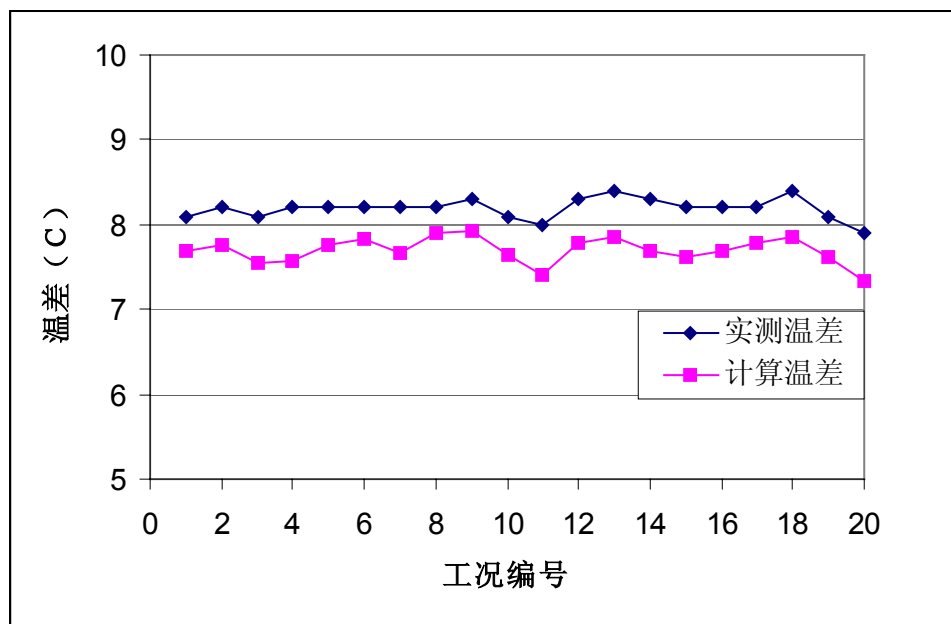
大气压力：88430 Pa

干球温度：23.9 °C

湿球温度：18.9 °C

该塔根据西北电力设计院原设计，采用 XB-1 型填料和 B0145-42 型除水器，设计进出水温差为 9.7 °C，设计出水温度为 26.6 °C。工程实际采用 S 波塑料淋水填料，根据国电热工研究院的计算，其设计工况出塔水温为 29.64 °C。

根据国电热工研究院的计算结果，利用本程序经试算取热力修正系数为 0.7。结果由本程序所得到的计算温差与实测温差的相关系数为 0.803，平均冷却能力为 1.064（具体见图四和表六）。



图四 宁夏石嘴山电厂一号塔计算结果与实测结果比较

表六 宁夏石嘴山电厂一号塔冷却能力数据统计分析结果

	冷却能力
平均值	1.064
标准误差	0.003
中值	1.066
方差	0.013
范围	0.048
最小值	1.037
最大值	1.085
总和	21.28
样本数	20
99%置信度区间	1.056-1.072

参考文献

- [1]. 西安热工所；安徽淮南平圩发电厂自然通风冷却塔热力性能试验报告，1992 年。
- [2]. 国家电力公司热工研究院电站运行技术中心，上海吴泾第二发电有限责任公司；上海吴泾第二发电有限责任公司 2 号 9000 m² 逆流式自然通风冷却塔热力性能试验报告，2001 年 9 月。

[3]. 中国水利水电科学研究院；HY-2003-03-42，山东聊城电厂一号冷却塔测试报告，2003年9月。

[4]. 国家电力公司热工研究院电站运行技术中心；TPRI/T2-RB-026-2003，国电宁夏石嘴山发电有限责任公司1号4500 m²自然通风冷却塔热力性能试验报告，2003年7月。

附表 符号说明

符号	说明	单位
A	面积	m ²
c	等压比热	kJ/kg K
g	干空气质量流率	t/m ² 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	t/h m ² 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	kJ/Km ² h
β	传质系数	kg/m ² 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	