

甘肃能化庆阳 2×660MW 煤电项目

初步设计阶段

间接空冷塔两机一塔、一机一塔 比选优化专题报告

中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group

2024年 11 月 西 安

目 录

1	工程概况	1
2	工程自然条件简介	1
2.1	气象条件	2
2.2	设计气象参数选取	9
2.3	主机参数	9
2.4	优化方法、优化依据及计算程序	9
3	间冷系统方案选择	11
3.1	散热器布置方式的确定	11
3.2	散热器选型	12
4	间接空冷塔方案配置	17
4.1	二机一塔间接空冷系统配置	17
4.2	一机一塔间接空冷系统配置	20
5	间接空冷系统经济比较	24
5.1	间冷系统方案投资费用	24
5.2	运行费用	24
5.3	年总费用	25
6	结论与建议	25

【内容摘要】主机排汽冷却系统是火力发电厂较为重要的系统之一，其投资较大，直接关系到电厂的安全满发和经济运行，影响工程获得的效益。本专题报告从技术、经济和保证主机安全等方面对二机一塔间接空冷系统及一机一塔间接空冷系统进行比较，提出适合于本工程的空冷系统配置方案供参考。

1 工程概况

甘能化庆阳电厂（2×660MW 机组）工程为新建工程为甘肃能化九龙川煤矿配套建设煤电一体化项目，本期拟建设 2×660MW 超超临界间接空冷燃煤机组，厂址位于甘肃省宁县境内。

甘肃省陇东地区是国家规划的 14 个大型煤炭基地之一，境内煤炭资源丰富，探明资源量 359.8 亿吨（其中庆阳 271.8 亿吨），保有资源量 184 亿吨。九龙川矿井地处西北地区甘肃省宁县，资源储量丰富，煤质好，开采条件较好，适宜建设现代化大型矿井。本工程所在宁县具备建设大规模煤电基地的有利条件，电源建设成本及发电成本相对较低。

宁县地方工业弱小，没有大型工业企业支撑，本项目的建设将有力带动全县财政税收、建筑建材、商贸服务、餐饮、住宿、食品加工、运输、基础建设等众多行业的发展，有效地推动当地经济建设的发展，缓解就业压力，增加居民收入，提高生活水平，对地方经济的发展具有重要意义。

本期工程，供煤煤矿已具备建设条件；供水水源利用城市中水和煤矿疏干水；主机采用高参数大容量空冷机组。高效节能环保型电厂是本工程的建设目标。

本工程计划在 2024 年 12 月开工，第一台机组计划于 2027 年 5 月建成投产，第二台机组计划于 2027 年 6 月建成投产。

2 工程自然条件简介

2.1 气象条件

2.1.1 气候条件

宁县深居内陆属温带季风气候区。冬季漫长寒冷，雨雪少；春季转瞬即逝，冷暖变化大；夏季短促，气温高，降水集中；秋季降温快，初霜也来得早。气候干燥，气温日较差大，光照充足，太阳辐射强。降水各季分配不匀，降水较多主要集中在 6~9 月。

厂址附近有宁县气象站，宁县气象站建站于 1957 年，是国家基本气象站，位于宁县早胜镇“乡村”，北纬 35°25′、东经 108°00′，海拔高度为 1221.2m。2004 年迁站至北纬 35°31′、东经 107°55′，海拔高度为 979.4m，2017 年迁站至北纬 35°32′、东经 107°53′，海拔高度为 1135.3m。宁县气象站位于电厂西北方向约 19km 处，电厂海拔约 1230m。宁县气象站与电厂海拔、自然地理环境接近且两者间无较大阻挡物，故确定本工程常规气象条件采用宁县气象站观测资料统计。

2.1.2 常规气象参数

(1) 基本气象要素值

根据宁县气象站多年观测资料，统计得宁县气象站基本气象要素年值和月值见表，详见表 2.1-1、表 2.1-2。

表 2.1-1 宁县气象站累年基本气象要素统计值表

项目	单位	数值	备注
平均气压	hPa	879.7	
平均气温	℃	8.9	
最热月平均气温	℃	21.9	
最冷月平均气温	℃	-5.5	
极端最高气温	℃	38.2	2005.6.19

项目	单位	数值	备注
极端最低气温	℃	-27.1	1991.12.28
平均水汽压	hPa	9.2	
平均相对湿度	%	68	
年平均降水量	mm	565.4	
一日最大降水量	mm	119.5	2013
年平均蒸发量	mm	1379.9	
平均风速	m/s	1.9	
最大风速（定时 2min 平均）	m/s	21	1973.12.30
最大积雪深度	cm	24	1993.3.17
平均雷暴日数	d	24.1	
平均沙暴日数	d	0.4	
平均大风日数	d	4.0	
平均雾日数	d	26.8	

表2.1-2 宁县气象站累年逐月气象要素统计值

月份	平均气压 (hPa)	平均温度 (℃)	平均风速 (m/s)	平均 相对湿度(%)	平均 降水量 (mm)	平均蒸发量 (mm)
1	884.0	-5.5	1.6	60	4.9	37.4
2	882.1	-2.2	2.0	60	7.6	50.6
3	880.1	3.6	2.2	63	21.8	93.3
4	877.9	10.6	2.4	60	36.7	154.6
5	876.5	15.4	2.2	63	51.9	189.4
6	873.5	19.6	2.1	66	66.6	207.6
7	872.3	21.9	2.1	73	115.7	201.7
8	875.1	20.7	1.9	77	108.9	172.0
9	880.2	15.3	1.6	79	78.3	108.8
10	884.0	9.2	1.7	76	49.3	79.7
11	885.5	2.1	1.7	71	19.0	47.9
12	885.5	-3.7	1.7	63	4.7	36.8
平均 或合计	879.7	8.9	1.9	68	565.4	1379.9

(2) 设计风速

根据宁县气象站历年实测 10min 平均最大风速系列采用极值 I 型法统

计计算，并参照国家《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 中的风压等值线图，暂定电厂厂址处五十年一遇 10m 高 10min 平均最大风速为 23.7m/s，其相应的风压为 0.35kN/m²。

(3) 设计雪压

根据宁县气象站历年最大积雪深度资料，采用极值 I 型法统计计算，并结合周围地区及《建筑结构荷载规范》GB50009-2012 中的全国基本雪压分布图分析后认为，电厂五十年一遇雪压应采用 0.30kN/m²。

(4) 三十年一遇极端最低气温

根据宁县气象站历年极端最低气温资料系列，采用 P-III 型频率计算并结合周边工程，确定三十年一遇极端最低气温为 -27.0℃。

(5) 累积频率为 10% 的气象条件

根据宁县气象站近 5 年夏季（6、7、8 月）逐日平均干球温度、气压、相对湿度等资料求得对应的逐日平均湿球温度，再将逐日平均湿球温度从大到小进行累积频率统计，求得累积频率为 5% 的的日平均湿球温度为 22.3℃，相应平均干球温度为 25.5℃，相对湿度为 75%，平均气压为 876.9Pa，平均风速为 1.5m/s；累积频率为 10% 的的日平均湿球温度为 21.3℃，相应平均干球温度为 24.2℃，相对湿度为 77%，平均气压为 876.7Pa，平均风速为 1.8m/s。

(6) 暴雨强度公式

宁县暴雨强度公式如下：

$$q=735(1+2.641gp)/(t+6)^{0.791}$$

式中：

q-----暴雨强度(L/s/hm²)

p-----设计重现期(a)

t -----降水历时(min)

2.1.3 空冷气象条件

因为宁县气象站 2004 年迁站至北纬 35° 31′ 、东经 107° 55′ ，海拔高度为 979.4m，2017 年迁站至北纬 35° 32′ 、东经 107° 53′ ，海拔高度为 1135.3m。两次迁站海拔高度差距有 155.9m，海拔高度变化较大，因此，空冷气象数据采用 2017～2023 年逐时观测数据进行统计。由于厂址距宁县气象站 19km，厂址和气象站之间地形和地貌有一定差别，必然导致气温、风速和风向有一定的变化，建议在建设场地进行空冷气象对比和低空逆温观测及分析，根据观测及分析结果，对气象站的统计参数进行修正。

按照《电力工程气象勘测技术规程》DT/T5158-2021 中典型年的选取方法。典型年选取按如下过程：求出宁县气象站中最近 7 年的年平均气温，然后再求出最近 5 年内各年按小时气温统计的算术年平均值，将算术年平均值与最近 7 年的年平均气温最相近的一年作为典型年。在确定典型年时，若有多个年份气温与累年年平均气温相近时，应选择高于累年年平均气温的年份作为典型年。最终确定典型年为 2021 年。

典型年逐时干球温度累积频率统计成果见表 2.1-3，典型年逐时干球温度累积频率曲线图见图 2.1.1。

表2.1-3 典型年（2021年）逐时干球温度累积频率统计表

气温 分级（℃）	出现 时数	累积 时数	累积频率 （%）	气温分级 （℃）	出现 时数	累积 时数	累积频率 （%）
-------------	----------	----------	-------------	-------------	----------	----------	-------------

35.9~35.0	5	5	0.06	6.9~6.0	316	5842	66.69
34.9~34.0	3	8	0.09	5.9~5.0	296	6138	70.07
33.9~33.0	13	21	0.24	4.9~4.0	269	6407	73.14
32.9~32.0	28	49	0.56	3.9~3.0	237	6644	75.84
31.9~31.0	52	101	1.15	2.9~2.0	233	6877	78.5
30.9~30.0	49	150	1.71	1.9~1.0	194	7071	80.72
29.9~29.0	80	230	2.63	0.9~0.0	235	7306	83.4
28.9~28.0	94	324	3.7	-0.1~-1.0	191	7497	85.58
27.9~27.0	123	447	5.1	-1.1~-2.0	161	7658	87.42
26.9~26.0	147	594	6.78	-2.1~-3.0	132	7790	88.93
25.9~25.0	159	753	8.6	-3.1~-4.0	166	7956	90.82
24.9~24.0	185	938	10.71	-4.1~-5.0	161	8117	92.66
23.9~23.0	182	1120	12.79	-5.1~-6.0	139	8256	94.25
22.9~22.0	203	1323	15.1	-6.1~-7.0	136	8392	95.8
21.9~21.0	245	1568	17.9	-7.1~-8.0	101	8493	96.95
20.9~20.0	266	1834	20.94	-8.1~-9.0	84	8577	97.91
19.9~19.0	272	2106	24.04	-9.1~-10.0	52	8629	98.5
18.9~18.0	268	2374	27.1	-10.1~-11.0	27	8656	98.81
17.9~17.0	309	2683	30.63	-11.1~-12.0	31	8687	99.17
16.9~16.0	341	3024	34.52	-12.1~-13.0	19	8706	99.38
15.9~15.0	299	3323	37.93	-13.1~-14.0	17	8723	99.58
14.9~14.0	260	3583	40.9	-14.1~-15.0	8	8731	99.67
13.9~13.0	219	3802	43.4	-15.1~-16.0	9	8740	99.77
12.9~12.0	243	4045	46.18	-16.1~-17.0	3	8743	99.81
11.9~11.0	265	4310	49.2	-17.1~-18.0	6	8749	99.87
10.9~10.0	303	4613	52.66	-18.1~-19.0	8	8757	99.97
9.9~9.0	328	4941	56.4	-19.1~-20.0	1	8758	99.98
8.9~8.0	302	5243	59.85	-20.1~-21.0	2	8760	100
7.9~7.0	283	5526	63.08				

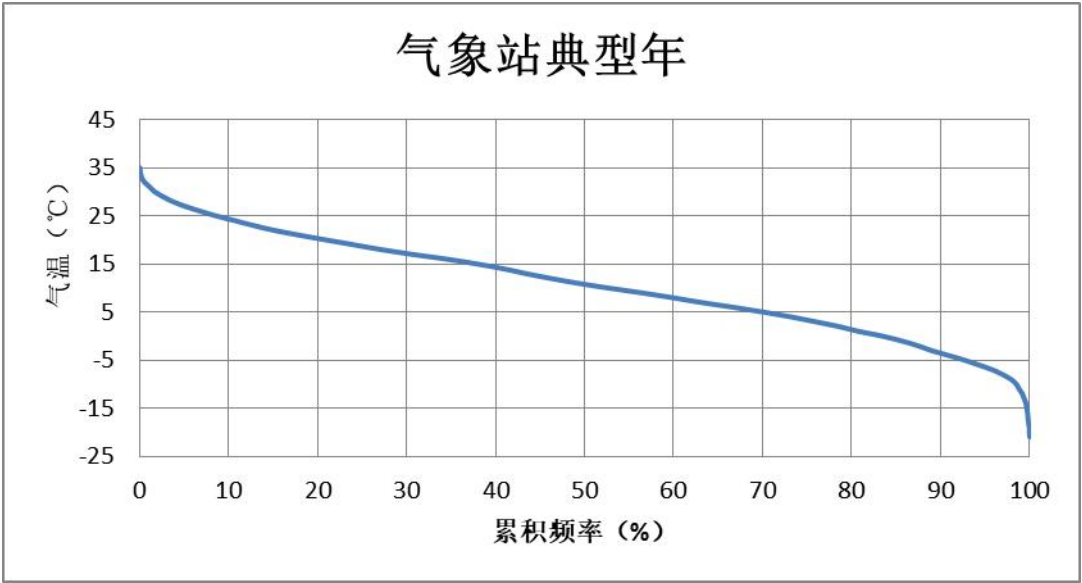


图 2.1.1 宁县气象站典型年湿球温度累积频率曲线

宁县气象站全年、夏季、冬季风向玫瑰图见图2.2.2。

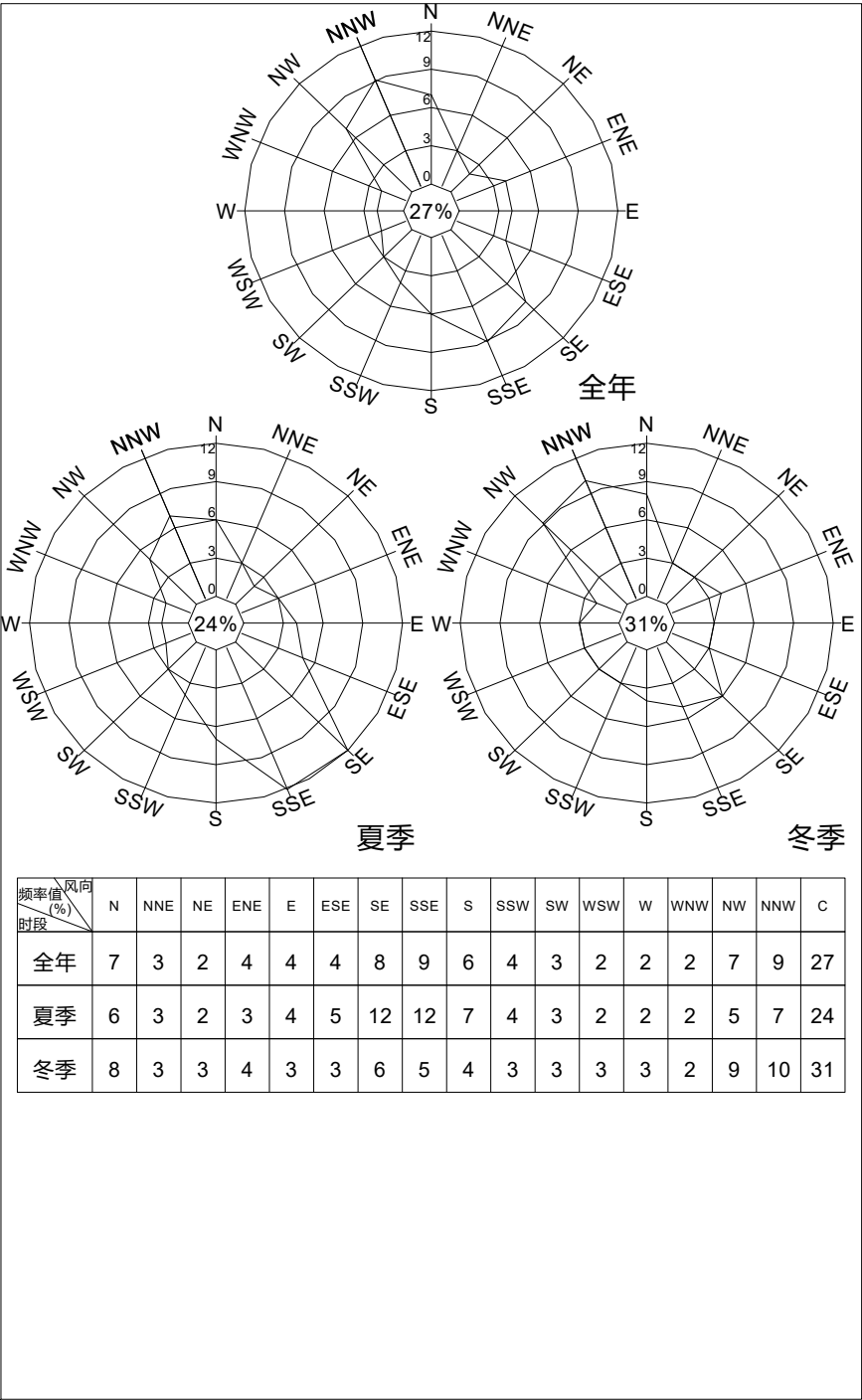


图 2.1.2 宁县气象站全年、夏季、冬季风向玫瑰图

2.2 设计气象参数选取

空冷系统设计气温根据“典型年逐时干球温度统计表”，采用“年利用小时数合计”的逐时数据，按“5℃法”统计，即：5℃以下按 5℃计，5℃以上按实际值的逐时温度加权平均值。本工程优化计算采用：

- (1) 设计温度：13℃
夏季工况温度：30℃
- (2) 设计大气压：879.7 hpa
夏季大气压：876.9 hPa
- (3) 相对湿度：0.68
夏季相对湿度：0.77
- (4) 设计环境风速：冷却塔零米以上 10m 高环境风速 4m/s。

2.3 主机参数

本阶段间接空冷系统汽轮机主要热力数据见表 2.5-1：

表 2.5-1 汽轮机不同工况热力数据（（1×660MW））

项目 \ 工况	TMCR 工况 b	TRL 工况 b
主机排汽量 (t/h)	1006.76	1092.28
主机排汽焓 (kJ/kg)	2399.2	2551.8
小机排汽量 (t/h)	108.92	136.48
小机排汽焓 (kJ/kg)	2478.2	2587.5
设计背压 (kPa)	9	27

2.4 优化方法、优化依据及计算程序

2.4.1 优化计算方法

空冷系统优化计算，采用年总费用最小法，即采用动态经济分析年费用法，将具体的冷却系统方案各项投资以一定分摊率分解成投资的年费用，

将汽轮机组功率增量（或热耗变化引起的燃料费用）以及循环水泵功耗的收益或损失费用的代数和作为年运行费用。把投资和运行成本两个因素统一起来，即将各方案的基建投资按动态考虑复利因素，换算成项目经济使用年限内，每年年末的等额偿付成本，再加上年运行费用，构成该方案的年费用，各方案中年费用最小者为最佳组合方案。计算结果中的年总费用不是各方案的实际年总费用值，而是各方案比较的相对值。

空冷系统年总费用 NF，根据《火力发电厂水工设计规范》DL/T5339-2018 规定按下式计算：

● 年费用最小法基本公式： $NF=P(AFCR)+\mu$ （式 2.6-1）

式中：

NF— 年费用值；

P—总投资现值；

AFCR— 年固定分摊率；

μ — 年运行费用，包括冷却系统电耗、机组功率增量收益或运行煤耗。

● 年固定分摊率： $AFCR=CR+MR$ （式 2.6-2）

式中：

CR— 资金回收系数，按式计算；

MR—大修等费率，可取 2.0%。

● 资金回收系数： $CR=\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}$ （式 2.6-3）

式中：

i— 投资回收率，8~10%；

n—工程经济使用年限，可取 n=20。

2.4.2 空冷系统优化计算程序

空冷系统优化采用我院编制的间接空冷系统优化计算程序。该程序是我院自主开发的间接空冷系统优化计算软件，2006 年，我院在编制直接空冷系统优化计算软件同时，又组织力量编制间接空冷系统优化程序，2008 年底基本完成程序编制工作，已在多个项目中应用。

陕西省勘察设计协会于 2012 年 7 月对我院的“间接空冷系统优化计算软件”进行了鉴定。鉴定委员会认为：“间接空冷系统优化计算软件”系统完整、算法先进、功能强大，在实际工程设计应用中取得了显著成效。其变工况计算设计及梯度法、遗传算法引入为国内首创，软件总体水平达到国际先进水平。该软件获得省勘察设计优秀软件一等奖。

2.4.3 有关优化参数取值

优化经济参数的选用，根据本工程招标文件取值。其它优化参数根据《火力发电厂水工设计规范》（DL/T5339-2018）取值。

（1）比较煤价

在优化计算中，按照成本电价 0.27567 元/度进行优化计算，煤价按照 610 元/吨计算。

（2）资金回收系数：8%，年维修费用率：2.0%，年固定分摊率：12.5%。

（3）空冷散热器单位面积造价，按照目前工程招标价格计算。

（4）电厂经济运行年限：20 年。

（5）机组年利用小时：5500h。

3 间冷系统方案选择

3.1 散热器布置方式的确定

本工程采用表凝式凝汽器间接空冷系统，根据空冷散热器布置方式可分为水平布置和垂直布置两类；水平布置占地面积比垂直布置略大，考虑到本工程的可用占地面积有限以及环境因素，本工程拟采用散热器垂直布置方案。

3.2 散热器选型

空冷散热器作为主要元件在整个传热过程中起到至关重要的作用，并且其造价也在间冷系统总造价中占据相当比重，因此本部分对工程中常用散热器技术特点进行分析，并根据本工程特点进行散热器管型优选。

根据散热器所采用的材质，可将其分为铝制散热器和钢制散热器两类。

1) 铝制散热器

铝制散热器以 FORGO 型散热器为代表进行说明，又称板片式翅片管，如下图所示：

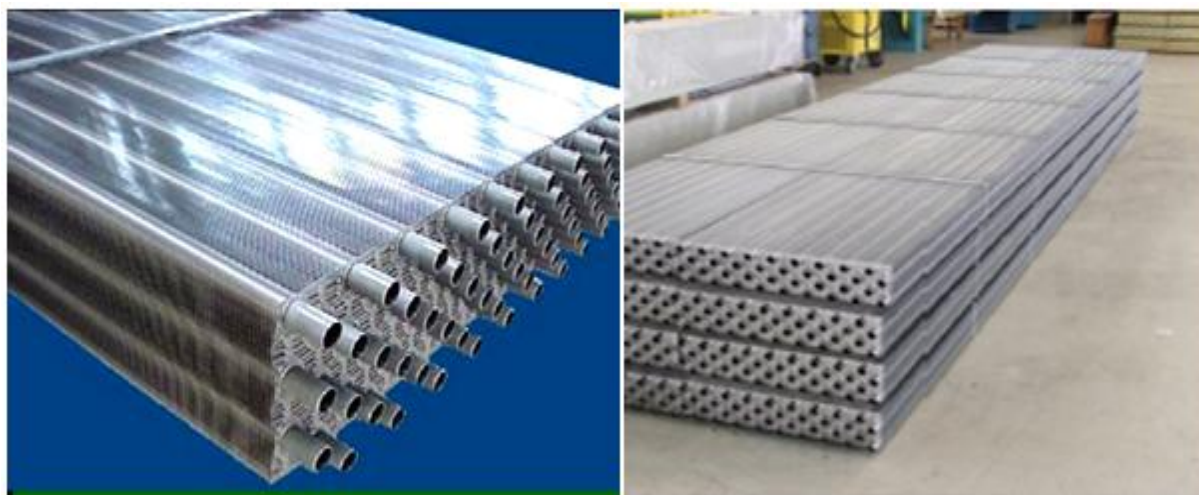


图 3.2—1 福哥型翅片管

福哥型换热元件采用全铝制，具有良好的导热性和防腐性。间接空冷系统中常见的冷却三角为自支撑单元，支撑为一个刚性的热镀锌钢框架，

框架的截面为三角形。热交换柱即铝制散热器管束放在两侧，第三侧为进气侧。进气侧安装有电动百叶，起到防冻保护和控制气体流量的作用。冷却元件的每端有管板，采用 O 型环密封。冷却三角放置在刷过漆的碳钢支腿（冷却三角支撑）上，支腿焊接在基板上。冷却三角的顶部锚固在冷却塔钢结构上。

早期 FORGO 型散热器采用六排管，基管管径约 18mm，壁厚 0.75 mm，翅片间距 2.88 mm，翅片厚度 0.35 mm，翅化系数约 83 左右。随着技术不断进步以及机组规模不断增大，原有六排管管型双流程运行时水阻过大，单流程运行时散热性能又会有所降低。为适应大规模间接空冷机组的冷却特点，近年来开发出基管管径约 25mm 的四排管新管型，与 18mm 六排管相比，除基管管径调整为 25 mm 外，壁厚调整为 1.0 mm，翅片间距调整为 3.2～3.8 mm，翅片厚度调整为 0.3 mm，翅化系数约 60～70 左右。管径加大，降低了水侧阻力，翅化系数降低，减少了气侧阻力，新管型强化气侧换热效果的同时减少了铝材用量，在价格上也有一定的优势。25mm 的四排管近几年在 600MW 级的电厂间冷系统中大量应用。但对于 1000MW 级或更大规模的冷却系统，25mm 的四排管也同样存在双流程运行时水阻过大和冷却塔尺寸过于庞大的问题。最新型六排管基管同四排管，基管管径约 25mm，壁厚 1 mm，翅片间距 4 mm，翅片厚度 0.35 mm，翅化系数约 91 左右，加大了翅片间距，总的翅化系数比四排管高，在同等面积下水侧阻力比普通基管 18mm 的六排管和基管 25mm 的四排管都减少了，同时由于翅化系数的提高，冷却塔的迎风面积减少，可减小间冷塔的底部直径，同时由于加大了翅片间距，气侧阻力也减少了，因此同四排管相比在同样的散热负荷下，会出现采用新型六排管的散热面积虽加大了，但间冷塔底部直径减小，冷却塔高度降

低。25mm 的六排管适用于大规模冷却流量的特点，它通过增加管排数降低管束流速，翅片宽度加大提高换热效果，通过加大翅片间距弥补通风阻力增加的不利影响。铝管铝翅片散热器技术特点总结详见表 3.2-1。

2) 钢制散热器

工程上常用的钢制散热器有钢管钢翅片和钢管铝翅片两种。直冷系统一般采用单排管或 3 排管，既有钢管钢翅又有钢管铝翅；间冷系统较多采用钢管钢翅 4 排管型式，椭圆基管外径 36X14mm，壁厚 1.5mm，翅片尺寸 54X34mm，厚度 0.3mm，翅片间距 2.5mm，每片散热器管束尺寸 2424X204X12500mm。

下图所示为典型的小管径的热浸锌椭圆管绕椭圆翅片管。

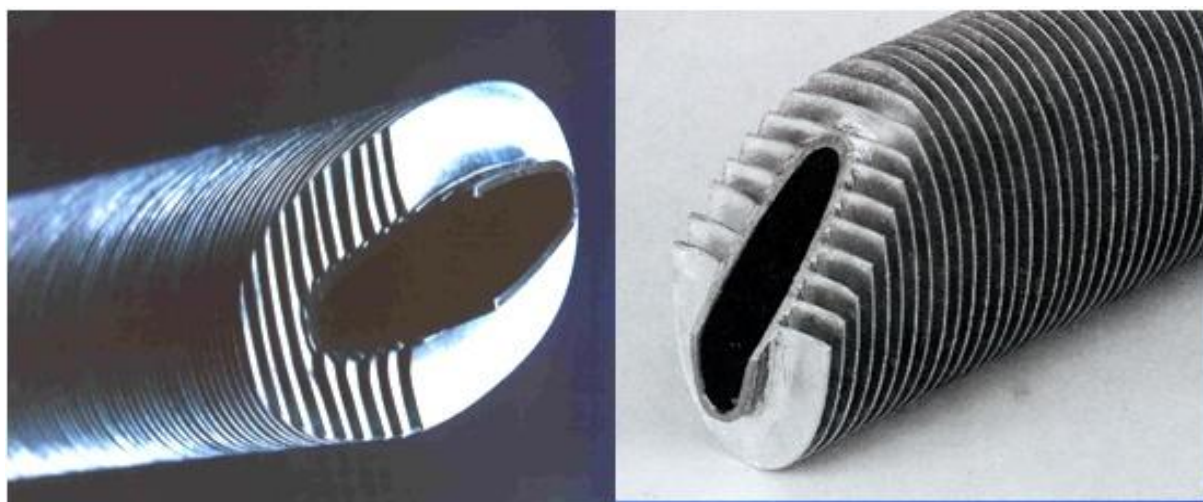


图 3.2-2 热浸锌椭圆管绕椭圆翅片管。

低碳钢热交换器必须有一层防腐层，目前广泛采用的是热镀锌表层保护。钢制和铝制散热器细部结构如下图所示：

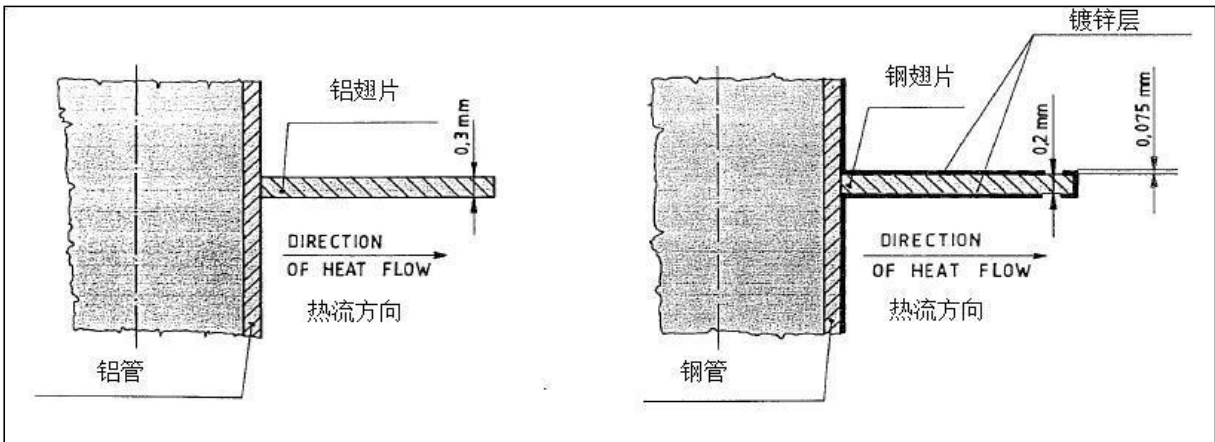


图 3.2-3 钢制和铝制散热器剖面结构草图

虽然从材料的导热特性来看，铝大于锌大于低碳钢，但由于碳钢管在材料强度上有优势，可以通过降低翅片厚度来增加换热效果。由于钢制散热器具有强度高、防冻性能好的优点，在许多工程中得到应用。

常用空冷散热器技术特征及优缺点的比较见表3.2-1。

表 3.3-1 常用空冷散热器技术特征及优缺点的比较

No.	内容	钢管钢翅片 (四排管)	18mm 铝管铝翅片 (六排管)	25mm 铝管铝翅片 (四排管)	25mm 铝管铝翅片 (新型六排管)
1	基管 / 翅片形状	椭圆	圆管方翅片	圆管方翅片	圆管方翅片
2	基管直径 (mm)	36*14 *1.5	18 *0.75	25*1	25*1
3	翅片管 加工工艺	缠绕(带预应力), 热浸镀锌	大套片	大套片	大套片
4	翅片尺寸 (mm)	54*34	150*2400	133*2666	200*2666
5	管束间 连接方式	焊接	橡胶圈密封连接	橡胶圈密封连接	橡胶圈密封连接

No.	内容	钢管钢翅片 (四排管)	18mm 铝管铝翅片 (六排管)	25mm 铝管铝翅片 (四排管)	25mm 铝管铝翅片 (新型六排管)
6	换热效率	水侧换热效果较铝管差,气侧换热效果优于六排管铝制散热器,整体换热性能比铝制六排管略优	由于板翅片的特殊设计(槽/凸齿片)对于低空气流速情况可以适用	由于板翅片的特殊设计(槽/凸齿片)对于低空气流速情况可以适用,且气侧热交换效率很高,换热效率高	由于板翅片的特殊设计(槽/凸齿片)对于低空气流速情况可以适用,且气侧热交换效率很高,换热效率高,适用于换热流量规模较大的情况
7	抗冻性能	材质强度高,且椭圆形管子受压可以进行形变(变圆),防冻性能较好。	防冻性能较弱	基管管径较大,可以采用较高流速,防冻性能较好	基管管径较大,可以采用较高流速,防冻性能较好
8	化学水处理要求	全钢系统,对循环水水质要求相对较低	钢铝复合系统,对循环水水质要求相对较高	钢铝复合系统,对循环水水质要求相对较高	钢铝复合系统,对循环水水质要求相对较高
9	抗脏污环境的能力	椭圆形钢管尾流区小,不易积灰	采用整体板翅片,易冲洗	采用整体板翅片,易冲洗	采用整体板翅片,易冲洗
10	清洗水压力 (m)	结构更坚固,能承受高压水清洗(120 左右)	一般小于 80	一般小于 80	一般小于 80
11	施工与安装	重量较重	重量轻,便于安装和支撑	重量轻,便于安装和支撑	重量轻,便于安装和支撑
12	防腐性能	钢翅片表面需镀锌保护层,厚度约 70μm;机组停运时一般应配备充氮系统进行保护	气侧和水侧的表面都采用稳定的铝-氧化层保护覆盖	气侧和水侧的表面都采用稳定的铝-氧化层保护覆盖	气侧和水侧的表面都采用稳定的铝-氧化层保护覆盖
13	使用寿命	5-10 年后热镀锌层开始损耗,有锈蚀可能,但仍满足寿期要求。	正常使用,可满足设计寿命。	正常使用,可满足设计寿命。	正常使用,可满足设计寿命。

近年来间接空冷散热器招标结果大多采用铝制散热器,该管型具有整体换热性能较高、造价低等优点。因此,本工程散热器管型采用铝制散热器。

六排管、四排管及新型六排管适用的冷却水量依次增大，则具体选择应根据冷却规模系统、散热器和冷却塔的造价、电价等因素通过技术经济比较确定。由于本工程厂区占地面积受限且机组容量为 660MW、机组背压较低。为提高空间利用率，控制冷却塔体积，本工程一机一塔采用四排管散热器，二机一塔采用六排管散热器双层布置。

4 间接空冷塔方案配置

根据上述初步分析，本工程按以下两个冷却塔配置方案进行比较：

方案一：两机一塔（18mm 六排管）

两台机组合用一座冷却塔，按 18mm 铝管铝翅片六排管散热器塔外垂直双层布置进行配置。

方案二：一机一塔（25mm 四排管）

一台机组设一座冷却塔，按 25mm 铝管铝翅片四排管散热器塔外垂直布置进行配置。

4.1 二机一塔间接空冷系统配置

表凝式间接空冷系统采用单元制，一台机组配一台凝汽器、三台 33.5% 的循环水泵组及相应的散热器、一根 DN3000 循环水进水母管，一根 DN3000 循环水出水母管。两台机设置一座空冷塔，空冷塔采用自然通风冷却塔，为钢筋混凝土结构。两台机的循环水泵布置在一座循环水泵房内，循环水泵房靠近空冷塔布置。室外循环水管埋地敷设。

经过计算，表凝式间接空冷（ISC）系统主要设计参数如下：

表 4.1-1 2×660MW 机组表凝式间冷系统主要设计参数如下（两机一塔）

序号	项 目	散热器塔外垂直布置
1	散热器冷却面积 (万 m ²)	311.26
2	冷却倍数	50
3	设计气温 (°C)	13
4	设计背压 (kPa)	9
5	夏季气温 (°C)	30
6	夏季背压 (kPa)	27
7	散热器三角个数 (个)	220 (双层)
8	冷却塔底部零米柱直径 (m)	171.2
9	冷却塔底部散热器外侧直径 (m)	181.2
10	冷却塔高度 (m)	223
11	冷却塔进风口高度	40.5
12	冷却塔出口直径 (m)	115
13	喉部直径 (m)	110
14	散热器管型	18mm 六排管 (散热器高 35.5m)

4.1.1 间接空冷系统主要配置

(1) 空冷散热器配置

间接空冷 ISC 系统的冷却散热器采用垂直布置方式。

空冷散热器两个冷却柱组成一个冷却三角，三角形另外一边安装百叶窗，控制进风量，在冬季低气温季节关闭百叶窗，避免散热器冻结。

两台机共配置 220 个冷却三角，每台机 8 个冷却扇区，每个扇区设单独的进、出水母管，可单独控制。两台机的冷却扇区相互间隔沿间冷却塔外垂直布置，共 16 个冷却扇区。

(2) 空冷却塔

空冷却塔采用自然通风冷却塔，为钢筋混凝土结构。

(3) 循环水泵

循环水泵布置在循环水泵房内，二台机组设置 1 座循环水泵房。

循环水泵：一台机配 1 台定速循环水泵，2 台双速泵，单台水泵参数如下：

a. 水泵型式：卧式离心泵

流量：5.17m³/s

扬程：24.0m

轴功率：1400 kW

b. 电动机：

功率：1700 kW

电压：10kv

(4) 循环水管

1 台机组配循环水进、出水母管各 1 根，直径均为 DN3000mm，采用焊接钢管。室外循环水管埋地敷设。

(5) 其它附属设备

a. 充水和排水系统

储水箱布置在冷却塔内，由碳钢焊接而成。冷却塔的储水箱具有储存该冷却系统所有冷却管、散热器和地面环管内水量的能力。每个冷却扇段都有一个向储水箱排水的排放系统。每个排水箱都有通气口和人孔。储水箱的冷却水可通过 2×50%的潜水泵再升压到冷却水系统中。

本工程一座间冷塔设 8 座储水箱，水箱采用加固的钢结构，水箱设人孔、通气管、爬梯等附属设施。

储水箱主要技术参数如下（两台机组）：

二台机组储水箱的数量：8 座

每座储水箱的有效容积：550m³

输水泵 4 台，每台参数如下：

$Q \sim 500\text{m}^3/\text{h}$; $H \sim 55\text{m}$; $N=132\text{KW}$; $V=380\text{v}$ 。

b. 排气系统

每个冷却扇段都有其独立的排气系统，一个冷却扇段设一个排气立管，该冷却扇段管束的排气管均与其公共排气立管连接。冷却扇段的排气立管都直接通向大气，并具有一定的高度，以防止在正常的和稳定的运行条件下冷却水溢流。

c. 在塔内设高位水箱，主要用于冷却水温度变化时循环水膨胀之用。本工程一座空冷塔设 4 座膨胀水箱，水箱采用加固的钢结构，水箱设人孔、通气管、爬梯等附属设施。膨胀水箱主要技术参数如下：

每座膨胀水箱的有效容积： 150m^3 。

d. 散热器清洗系统

为保证散热器的散热性能，需冲洗散热器外表面，可根据当地的环境污染情况，定期冲洗。散热器的清洗设备是一个带喷嘴的集管设备，集管架上都配有喷嘴，通过支架在冷却塔散热器上下部轨道移动。水可以通过增压泵从循环水管道进行提取。在清洗过程中，该集管设备旋转，可以高效地清洗散热器的表面。

间接空冷系统冲洗也可采用高压水枪进行冲洗。

冲洗次数根据当地的环境污染情况确定，根据类似环境电厂的运行经验，一般每年进行一次或两次清洗。

4.2 一机一塔间接空冷系统配置

表凝式间接空冷系统采用单元制，一台机组配一台凝汽器、3 台套 33.5% 的循环水泵组及相应的散热器、一根 DN3000 循环水进水母管，一根 DN3000

循环水出水母管。一台机设一座空冷塔，空冷塔采用自然通风冷却塔。两台机的循环水泵布置在各自循环水泵房内，循环水泵房靠近间冷塔布置。室外循环水管埋地敷设。

经过计算，表凝式间接空冷（ISC）系统主要设计参数如下：（1×660MW）

表 4. 1-1 1×660MW 机组表凝式间冷系统主要设计参数如下（一机一塔）

序号	项 目	散热器塔外垂直布置
		混凝土塔
1	散热器冷却面积（万 m ² ）	154.6
2	冷却倍数	50
3	设计气温（℃）	13.0
4	设计背压（kPa）	9
5	夏季气温（℃）	30
6	夏季背压（kPa）	27
7	散热器三角个数（个）	158
8	冷却塔底部零米柱直径（m）	131.4
9	冷却塔底部散热器外侧直径（m）	141.4
10	冷却塔高度（m）	172
11	冷却塔进风口高度	29
12	冷却塔出口直径（m）	88
13	喉部直径（m）	84
14	散热器管型	25mm 四排管（散热器高 25.5m）

4. 1. 2 间接空冷系统主要配置

(1) 空冷散热器配置

间接空冷 ISC 系统的冷却散热器采用垂直布置方式。

空冷散热器两个冷却柱组成一个冷却三角，三角形另外一边安装百叶窗，控制进风量，在冬季低气温季节关闭百叶窗，避免散热器冻结。

塔外配置 158 个冷却三角，沿间冷塔外垂直布置，共分为 10 个冷却扇区，每个扇区设单独的进、出水母管，可单独控制。

(2) 空冷塔

空冷塔采用自然通风冷却塔，为钢筋混凝土结构。

(3) 循环水泵

循环水泵布置在循环水泵房内，每台机组设置 1 座循环水泵房。

循环水泵：闭式系统，每台机组配 1 台定速循环水泵，2 台双速水泵，单台水泵参数如下：

a. 水泵型式：卧式离心泵

流量：5.17m³/s

扬程：24.5m

轴功率：1430 kW

b. 电动机：

功率：1750 kW

电压：10kV

(4) 循环水管

一台机组配循环水进、出水母管各一根，直径均为 DN3000mm，采用焊接钢管。室外循环水管埋地敷设。

(5) 其它附属设备

a. 充水和排水系统

储水箱布置在冷却塔内，由碳钢焊接而成。冷却塔的储排水箱具有储存该冷却系统所有冷却管、散热器和地面环管内水量的能力。每个冷却扇段都有一个向储排水箱排水的排放系统。每个排水箱都有通气口和人孔。

储排水箱的冷却水可通过 2×50%的潜水泵再升压到冷却水系统中。

本工程一座间冷塔设 1 座贮水箱，水箱采用加固的钢结构，水箱设人孔、通气管、爬梯等附属设施。

贮水箱主要技术参数如下（一台机组）：

每台机组贮水箱的数量：4 座

每座贮水箱的有效容积：550m³

输水泵 2 台，每台参数如下：

Q=500m³/h；H=～55m；N=132KW；V=380v。

b. 排气系统

每个冷却扇段都有其独立的排气系统，一个冷却扇段设一个排气立管，该冷却扇段管束的排气管均与其公共排气立管连接。冷却扇段的排气立管都直接通向大气，并具有一定的高度，以防止在正常的和稳定的运行条件下冷却水溢流。

c. 在塔内设高位水箱，主要用于冷却水温度变化时循环水膨胀之用。本工程一座空冷塔设 1 座膨胀水箱，水箱采用加固的钢结构，水箱设人孔、通气管、爬梯等附属设施。膨胀水箱主要技术参数如下（一台机组）：

膨胀水箱的数量：2 座

每座膨胀水箱的有效容积：150m³

d. 散热器清洗系统

为保证散热器的散热性能，需冲洗散热器外表面，可根据当地的环境污染情况，定期冲洗。散热器的清洗设备是一个带喷嘴的集管设备，集管架上都配有喷嘴，通过支架在冷却塔散热器上下部轨道移动。水可以通过增压泵从循环水管道进行提取。在清洗过程中，该集管设备旋转，可以高

效地清洗散热器的表面。

间接空冷系统冲洗也可采用高压水枪进行冲洗。

冲洗次数根据当地的环境污染情况确定，根据类似环境电厂的运行经验，一般每年进行一次或两次清洗。

5 间接空冷系统经济比较

5.1 间冷系统方案投资费用

间冷系统方案投资费用详见表 5-1。

表 5-1		投资比较表（2×660W）		单位：万元
序号	工程或费用	方案一：两机一塔	方案二：一机一塔	
1	建筑工程费	16450	18639	
2	设备购置费	13027	12936	
3	安装工程费	2675	2651	
4	购地费用	498	513.8	
5	合计	32650	34739.8	
6	差价	基准	2089.8	

5.2 运行费用

间冷系统方案运行费用详见表 5-2。

表 5-2		年运行费用比较表（2×660MW）		单位：万元
序号	工程或费用名称	方案一：两机一塔	方案二：一机一塔	
1	循环水泵轴功率（kw）	8400	8580	
2	轴功率差值（kw）	基准	180	
3	年耗电差价（万元）	基准	20.47	

注：

(1) 比较电价按照售出电价 0.27567 元/kw.h 进行。

(2) 水泵利用小时数按照全年 5500 小时计算。

(3) 全年加权电耗水泵按 0.75 的系数折减。

5.3 年总费用

表 5-4		年总费用比较表（2×660W）		单位：万元
序号	工程或费用名称	方案一：两机一塔	方案二：一机一塔	
1	总投资费用	32650	34739.8	
2	总投资差	基准	2089.8	
3	年固定费用差	基准	261.225	
4	年耗电差价	基准	20.47	
5	年总费用差价	基准	281.695	

注：

(1) 机组年利用小时数按 5500 小时。

(2) 年固定费用率按 12.5%计算。

6 结论与建议

间接空冷系统采用两机一塔方案和一机一塔方案目前技术成熟，都有运行业绩。

从投资费用看，一机一塔混凝土塔方案比两机一塔混凝土塔方案增加投资 2089.8 万元。

从运行费用看，一机一塔方案年运行费用较两机一塔方案运行费用高 20.47 万元。

从年总费用看，一机一塔较两机一塔方案高 281.695 万元。

从全厂总平面来看，两机一塔方案占地相对较小，总投资及年总费用较一机一塔方案低，故推荐两机一塔方案。

