



60-F23341C-S01-23

甘肃能化庆阳 2×660MW 煤电项目

初步设计阶段

## 冷端优化专题报告

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

<b>1</b>	<b>项目概况 .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>工程自然条件简介 .....</b>	<b>1</b>
2.1	气候条件 .....	1
2.2	常规气象参数 .....	2
<b>3</b>	<b>空冷系统 .....</b>	<b>8</b>
3.1	空冷系统特点 .....	8
3.2	机械通风直接空冷系统 .....	8
3.3	自然通风直接空冷系统 .....	9
3.4	表面式凝汽器间接空冷系统 .....	10
3.5	混合式凝汽器间接空冷系统 .....	11
<b>4</b>	<b>空冷系统的选择结论 .....</b>	<b>12</b>
<b>5</b>	<b>散热器的管型优化与确定 .....</b>	<b>12</b>
5.1	间接空冷散热器管型 .....	12
5.2	本工程优化比选管型 .....	16
<b>6</b>	<b>间接空冷塔冷端优化 .....</b>	<b>16</b>
6.1	间接空冷系统优化方法、优化技术、经济参数的取值 .....	16
6.2	设计温度、气压、湿度 .....	17
6.3	汽机排汽主要参数 .....	18
6.4	有关优化参数取值 .....	18
6.5	优化方案组合 .....	19
6.6	优化方案结果分析 .....	20



【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空冷系统的配置进行优化，提出适合于本工程空冷系统配置方案供参考。

## 1 项目概况

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。降水各季分配不均，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。

2.2 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 2.2-1、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
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/m<sup>2</sup>。

(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/m<sup>2</sup>。

(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：

$$q=735(1+2.64\lg p)/\left(t+6\right)^{0.791}$$

式中：

q-----暴雨强度(L/s/hm²)

p-----设计重现期(a)

t -----降水历时(min)

2.2.1 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				



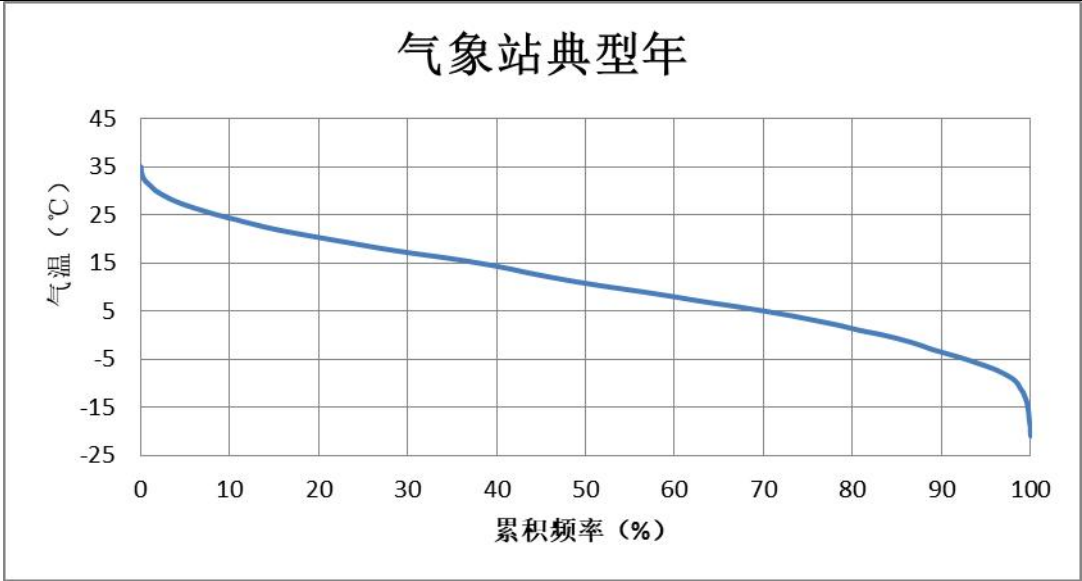


图 2.1.1 宁县气象站典型年湿球温度累积频率曲线

宁县气象站全年、夏季、冬季风向玫瑰图见图2.2.2。

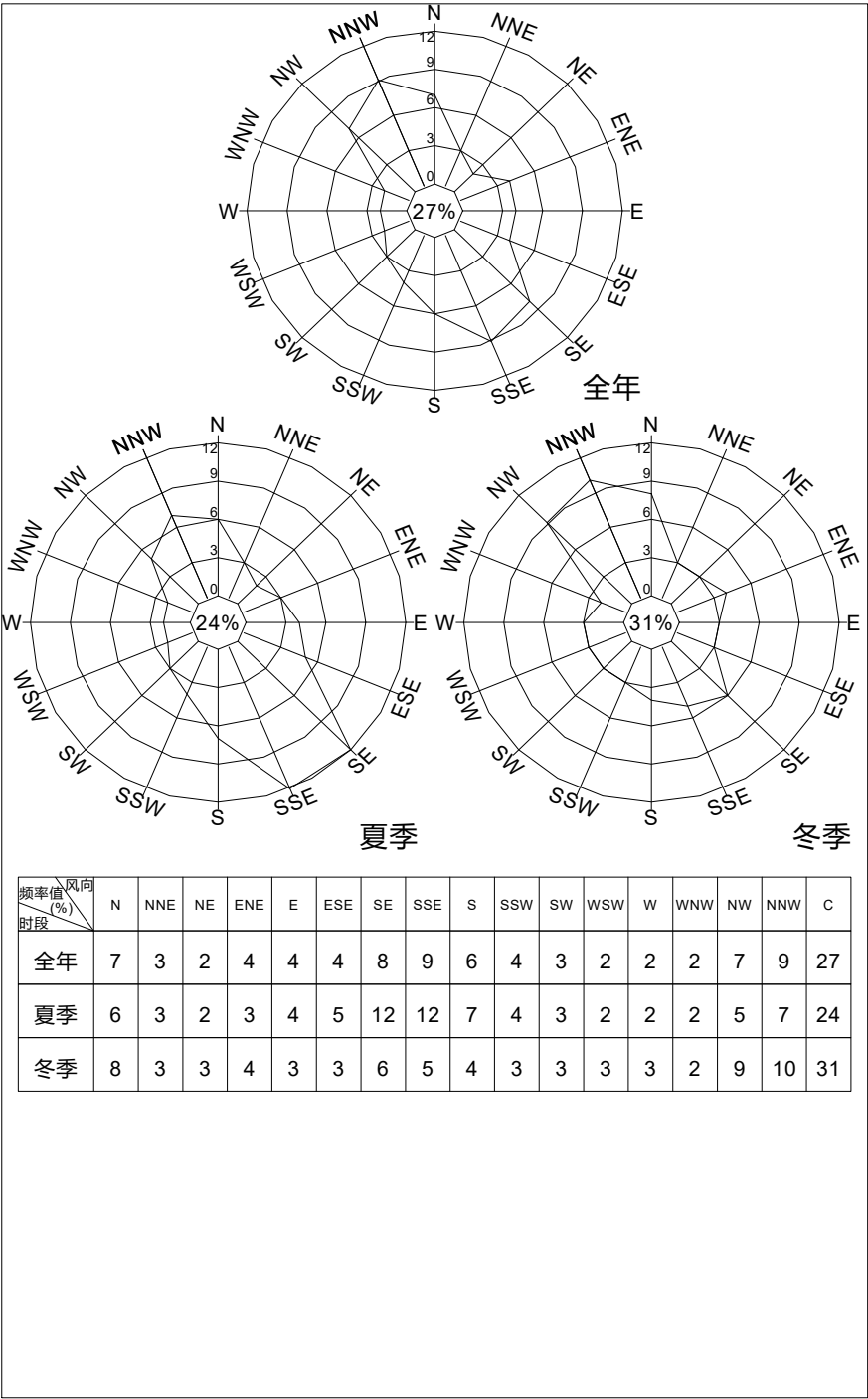


图 2.1.2 宁县气象站全年、夏季、冬季风向玫瑰图

### 3 空冷系统

#### 3.1 空冷系统特点

空冷系统分为直接空冷系统和间接空冷系统。直接空冷系统根据通风方式分为机械通风和自然通风。间接空冷系统根据配用的凝汽器分为表面式凝汽器和混合式凝汽器。

#### 3.2 机械通风直接空冷系统

该系统亦称为 ACC 系统，它是指汽轮机的排汽直接用空气来冷凝，空气与蒸汽间通过散热器进行热交换。其工艺流程为汽轮机排汽通过粗大的排汽管道至室外的空冷凝汽器内，轴流冷却风机使空气流过散热器外表面，将排汽冷凝成水，凝结水再经泵送回锅炉。

机械通风直接空冷系统如图 3.2-1。

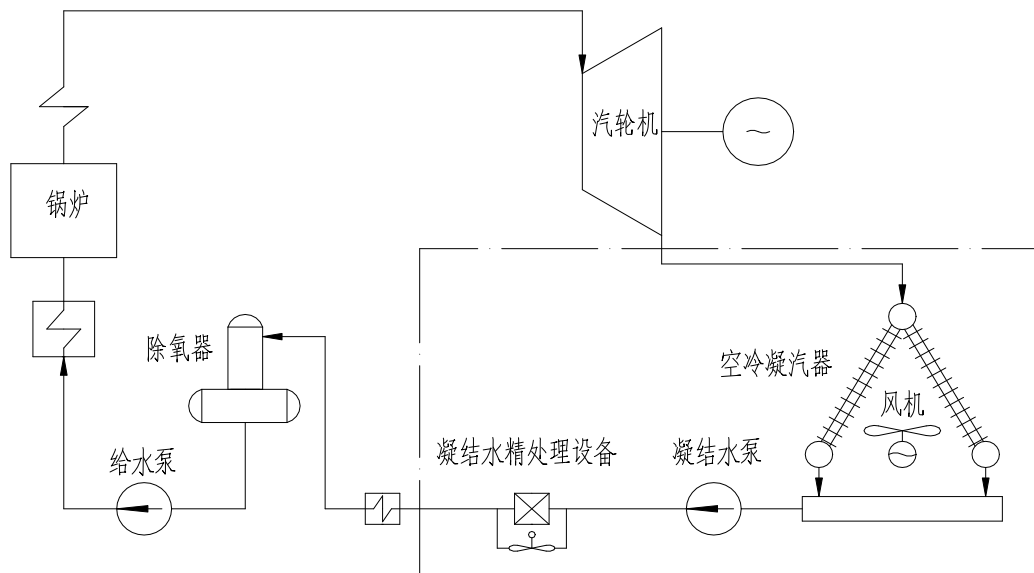


图 3.2-1 机械通风直接空冷系统

其主要特点有：

- ✓ 占地面积小。空冷器布置在汽机房前的高架平台上，平台下布置有变压器及配电间，合理利用了空间，可比间接空冷系统节省用地。
- ✓ 系统调节灵活，直接空冷系统可通过改变风机转速或停运部分风机来调节进风量，调节相对灵活，冬季运行时对防冻有利。
- ✓ 运行费用稍高。直接空冷全年风机耗电与间冷循环水泵耗电基本相当，但直接空冷优化方案的背压通常高于间冷优化方案的背压，因此煤耗较高。

- ✓ 受环境风影响大。
- ✓ 运行时噪音大。
- ✓ 真空系统庞大。汽轮机排汽需由大直径管道引出，冷凝排汽需要较大的冷却面积，从而导致真空系统的庞大。

### 3.3 自然通风直接空冷系统（NDC 系统）

自然通风直接空冷系统，亦称为 NDC 系统，其流程为汽轮机排汽通过大直径的排汽管道送到竖直布置在自然通风冷却塔外的空冷凝汽器进行冷凝，利用自然通风冷却塔供风，凝结水由回水管路引出，经泵送回汽轮机的凝结水处理系统，经处理后再送回锅炉。冷却介质为环境空气，自然通风塔塔内外空气密度差产生的抽力而形成空气流动，使冷空气掠过空冷凝汽器外表面与汽轮机排汽进行热交换，以带走管内蒸汽凝结释放的热量。

自然通风直接空冷系统如图 3.3-1。

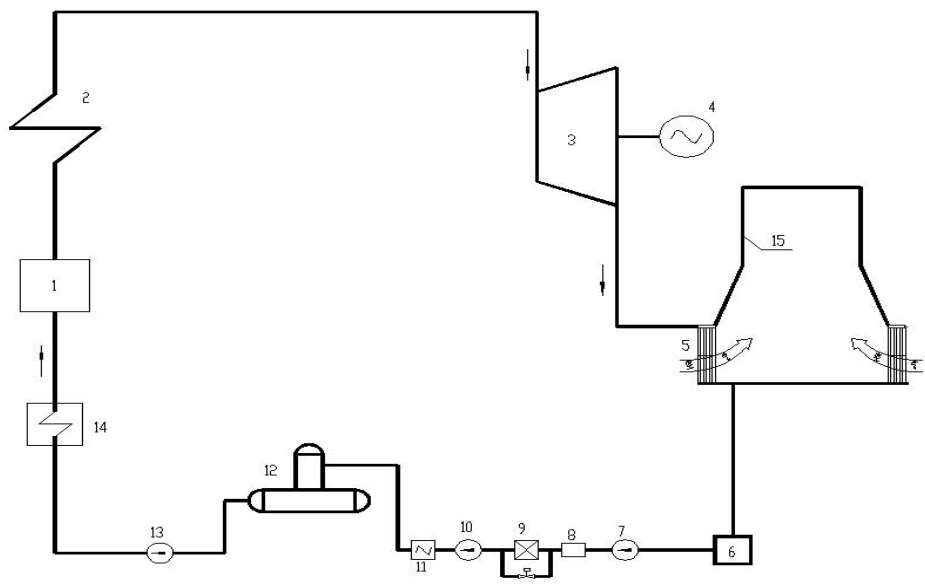


图 3.3-1 自然通风直接空冷机组原则性汽水系统图（散热器塔外竖直布置）

主要特点：

- ✓ 节能降耗，降低厂用电率。ACC 系统需配置强制通风的轴流风机，厂用电率较高。而 NDC 系统不需要通风用的轴流风机，降低了发电厂的厂用电率。
- ✓ 运行基本无噪声。
- ✓ 自然通风冷却塔受环境大风影响较机械通风直接空冷小，热风出口比冷却塔进

- 风口高，基本不存在热风回流问题。
- ✓ 主厂房的布置方位不受风向的影响，冷却塔布置位置相对灵活。
  - ✓ 可通过改变百叶窗开度或卷帘高度来调节进风量。
  - ✓ 冷却塔需要离开主厂房一定的距离，排汽管道较长。真空系统容积大；需合理布置，控制排汽管道压降。
  - ✓ 风筒式冷却塔占地面积大。

3.4 表面式凝汽器间接空冷系统

表面式凝汽器间接空冷系统是指以水为中间介质冷却汽轮机排汽，将排汽与空气之间的热交换分两次进行：一次为蒸汽与冷却水之间在表面式凝汽器中换热；一次为冷却水和空气在空冷塔里换热。系统流程为：汽机排汽进入凝汽器与凝汽器管束内的冷却水进行表面换热，凝汽器循环水排水由循环水泵供至空冷塔内的空冷散热器，空冷塔冷却水出水再回到汽机房凝汽器内作闭式循环。该系统根据散热器布置方式不同分为水平布置表凝间冷和垂直布置表凝式间冷。

水平布置表凝间冷系统指冷却散热器水平布置在冷却塔内，散热器材质为钢管、钢翅片。

垂直布置表凝间冷系统指冷却散热器垂直布置在冷却塔进风口外侧。

表面式凝汽器间接空冷系统流程如图 3.3-1。

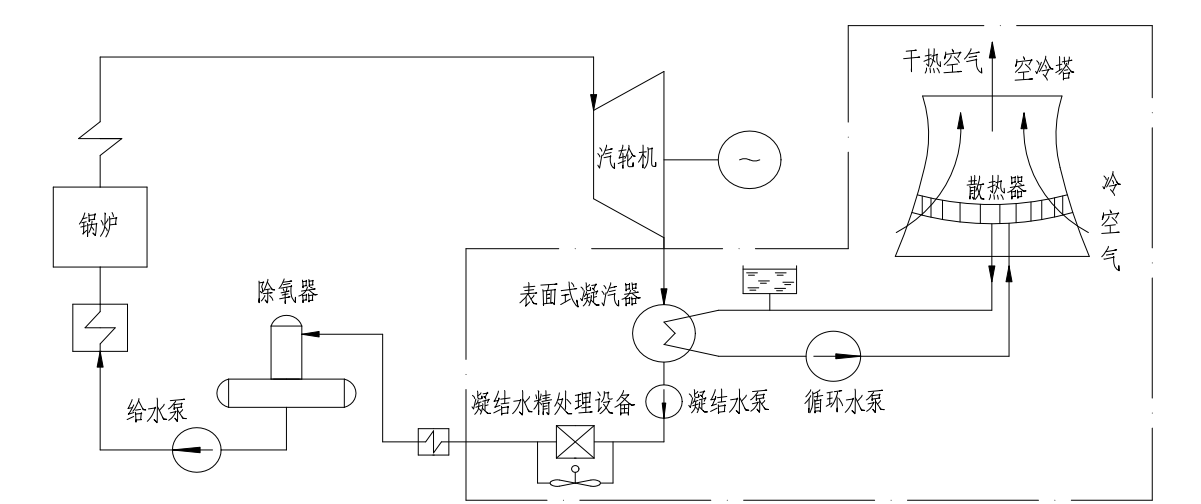


图 3.3-1 表面式凝汽器间接空冷系统流程

其主要特点有：

✓ 冷却水和凝结水分成两个独立系统，其水质可按各自水质标准和要求进行处理，系统便于操作。

✓ 循环水系统为闭式循环，没有直接空冷系统众多的风机，但有循环水泵，其耗电与直冷系统风机相当。

✓ 防冻控制较繁琐。

✓ 自然通风冷却塔占地面积大。

✓ 环境风对冷却效果有一定影响。

### 3.5 混合式凝汽器间接空冷系统(海勒 Heller 系统)

混合式凝汽器间接空冷系统采用具有凝结水水质的循环水，在混合式凝汽器中喷成水膜与汽轮机排汽直接混合将其凝结。混合后的水大部分经循环水泵送到空冷塔内的空冷散热器冷却，通过水轮机调压并回收部分能量后再进入凝汽器。少量的混合水经凝结水泵送到凝结水精处理装置处理后，经凝结水增压泵送到汽轮机回热系统。

带混合式凝汽器的空冷系统又称海勒（Heller）系统，典型的海勒系统散热器采用福哥型散热器，散热器垂直布置。

混合式凝汽器间接空冷系统见图 3.4-1。

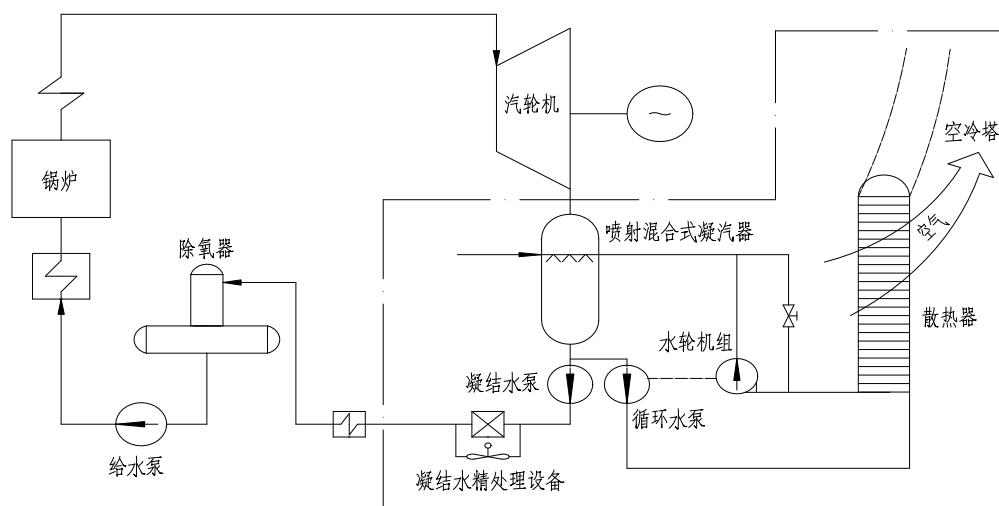


图 3.4-1 混合式凝汽器间接空冷系统

系统的主要特点与表面式凝汽器间冷系统基本相同，其差别为：

采用混合式凝汽器其端差较小；

✓ 循环水与凝结水相混合，对水质控制要求较高。

- ✓ 设有水轮机以回收能量，系统设备较多，控制较复杂。
- ✓ 当系统散热器为福哥型时，其基管及翅片均为纯铝制成，由于其材质刚度、挠度所限，及整个系统的配置等因素，该系统散热器均垂直布置。

## 4 空冷系统的选择结论

本工程做了空冷塔配置选择优化专题，详见《两机一塔、一机一塔比选优化专题报告》（60-F23341C-S01-22）。根据该报告结论，本工程主机冷却方式推荐采用二机一塔的表凝式间接空冷系统。

本报告根据以上结论，对二机一塔的表凝式间接空冷系统进行优化，选出最优配置。

## 5 散热器的管型优化与确定

### 5.1 间接空冷散热器管型

间接空冷系统是将冷却汽轮机排汽热量的中间介质——循环冷却水送入由翅片管束组成的冷却器内，由横掠翅片管外侧的空气进行冷却的空气对流冷却系统。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。

#### 5.1.1 常用散热器管型介绍

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，其中铝制散热器又可分为四排管和六排管两大类，钢制散热器又可分为钢管钢翅和钢管铝翅片两大类。

##### 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：

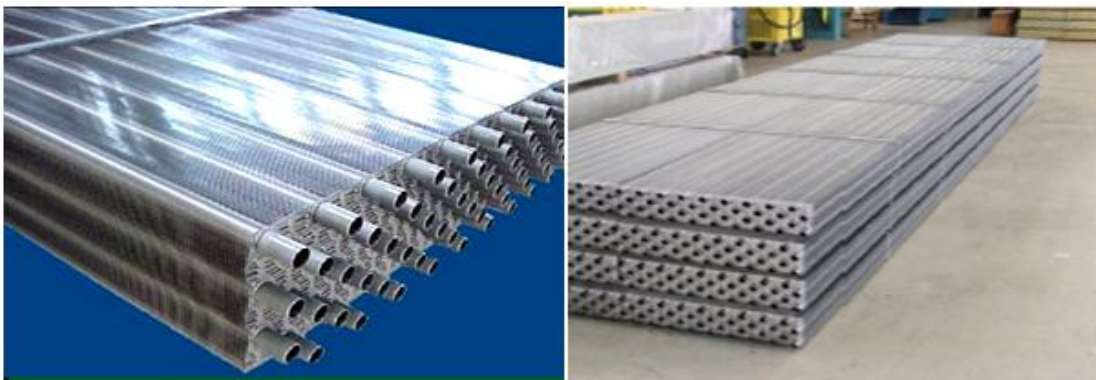


图 3—1 福哥型翅片管

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 6 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，翅化比约 83 左右。随着技术不断进步以及机组规模不断增大，原有 6 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，近年来开发出四排管新管型，与 6 排管相比，基管管径调整为 25mm，壁厚调整为 1.0mm，翅片间距调整为 3.2~3.8mm，翅片厚度调整为 0.3 mm，翅化比约 60~70 左右。管径加大，降低了水侧阻力，翅化比降低，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。铝制 4 排管和 6 排管散热器技术特点总结详见表 4-1。

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 36×14mm，壁厚 1.5mm，翅片尺寸 54×34mm，厚度 0.3mm，翅片间距 2.5mm，每片散热器管束尺寸 2424×204×12500mm。

下图所示为典型的小管径的热浸锌椭圆管绕椭圆翅片管。

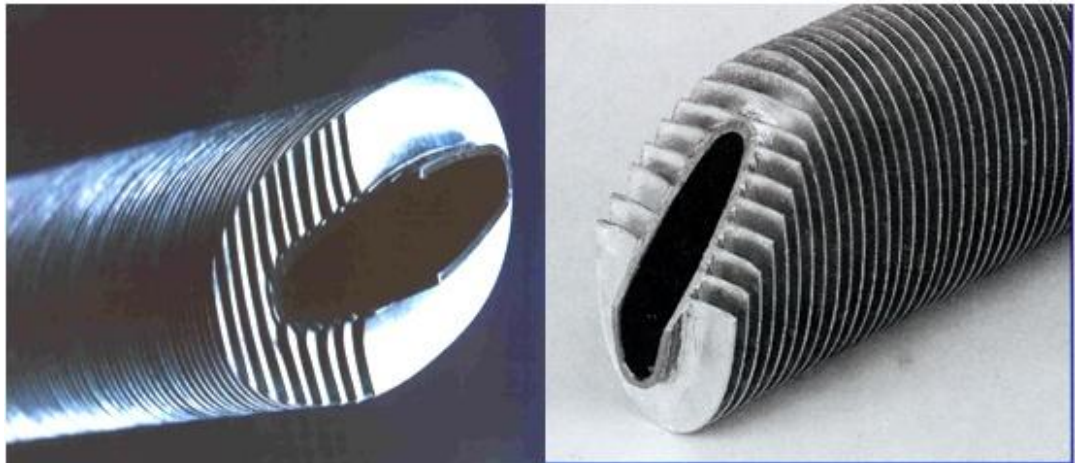




图 3-2 热浸锌椭圆管绕椭圆翅片管。

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：

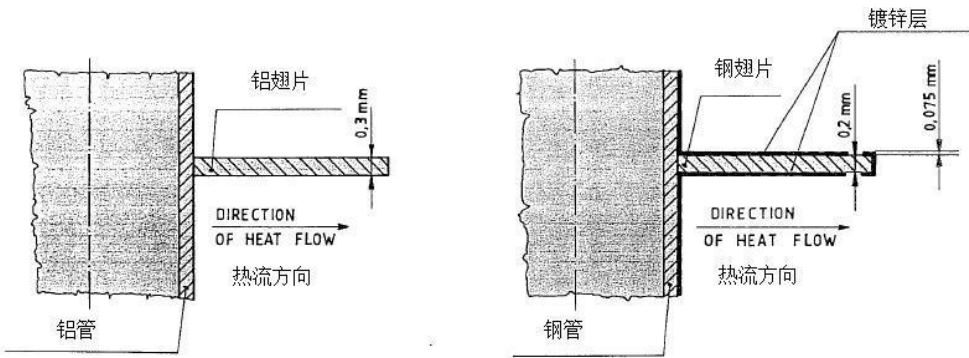


图 3-3 钢制和铝制散热器剖面结构草图

虽然从材料的导热特性来看，铝>锌>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。其技术特点分析详见表 3-1。

表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
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，能耐受高压水清洗（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

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)
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。

5.2 本工程优化比选管型

最近两年，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等优点。因此，本工程散热器管型采用铝制散热器。

根本工程的循环水量规模，本工程推荐采用小六排管铝制散热器双层布置。

6 间接空冷塔冷端优化

6.1 间接空冷系统优化方法、优化技术、经济参数的取值

6.1.1 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：

1) 年费用最小法基本公式：NF=P(AF<sub>CR</sub>)+μ

式中：

NF— 年费用值；

P—总投资现值；

AFCR— 年固定分摊率；

$\mu$ — 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。

2) 年固定分摊率： $AFCR=CR+MR$

式中：

CR— 资金回收系数，按式计算；

MR—大修等费率，可取2.0%。

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

式中：

i— 投资回收率，8~10%；

n—工程经济使用年限，可取n=20。

#### 6.1.2 空冷系统优化计算程序

空冷系统优化采用我院编制的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，该程序已在我院多个工程应用。

空冷系统优化计算，采用年总费用最小法。

### 6.2 设计温度、气压、湿度

在空冷系统的设计中，合理选取当地大气干球温度的某一个能够体现厂址环境气温特点的代表值就叫设计气温。选取设计气温不仅要有翔实、可靠能代表电厂厂址气象特征的多年气象资料，从中分析确定气温典型年及逐时干球温度的统计，而且还应综合考虑气候变化趋势等多种因素。

#### (1) 设计气温

国外设计气温的确定主要有“年平均气温法”、“6000小时法”、“5℃以上加权平均气温法”、“30%频率曲线法”等4种方法；国内设计气温采用“5℃加权平均气温法”。各方法综述如下：

a) 年平均气温法：典型年小时历时频率曲线图上由某个气温以上曲线与横坐标包围的面积和由该气温以下曲线与横坐标包围的面积相等处所对应的温度。

b) 6000小时法：典型年气温从低到高排列所对应的6000小时的气温。

c) 30%频率曲线法：典型年频率曲线图上30%频率所对应的气温。

d) +5℃加权平均气温法：在典型年的小时气温统计表上从5℃开始直到最高值取其

加权平均值为设计气温（5℃以下按5℃计算）。

根据《火力发电厂水工设计规范》DL/T5339-2018 第6.1.3条规定：设计气温宜根据典型年干球温度统计，按5℃年加权平均气温法（即：5℃以下按5℃计，5℃以上按实际值的逐时温度加权平均值）确定。本工程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。

夏季工况设计气温按照典型年逐时温度累积小时数统计从高到低累计不超过200小时考虑。

空冷系统计算采用的气象条件：

- (1)

设计温度：

13℃
- 夏季工况温度：

30℃
- (2)

设计大气压：

879.7 hpa
- 夏季大气压力

876.7 hpa
- (3)

设计相对湿度：

0.68
- 夏季相对湿度：

0.77

6.3 汽机排汽主要参数

本报告中空冷方案的主机参数为现阶段与主机厂配合的热平衡图参数。

表8.1 主机各工况排汽参数

序号	名称	单位	TMCR 纯凝工况	夏季 TRL 工况
1	主机排汽量	t/h	1006.76	1092.28
2	焓值	kJ/kg	2399.2	2551.8
3	小机排汽量	t/h	108.92	136.48
4	焓值	kJ/kg	2478.2	2587.5

6.4 有关优化参数取值

优化经济参数的选用，根据本工程计算取值。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) 按照成本电价0.27567元/度进行优化计算。
- (2) 按照标煤价（含税）为610元/t进行优化计算。
- (3) 资金回收系数：8%，年维修费用率：2.0%，年固定分摊率：12.5%。
- (4) 循环水管道费用包括管材安装费及施工费用

间接空冷的空冷散热器、凝汽器等单位面积造价，按照目前工程招标价格计算。

- (5) 电厂经济运行年限：20年。
- (6) 对间接空冷系统，凝汽器的端差如小于2.8℃则以 2.8℃计。
- (7) 机组年利用小时：5500h。

6.5 优化方案组合

本报告间接空冷优化计算遵循以下几条原则：

- (1) 满足设计工况及夏季考核工况下的运行要求，并留有一定的余量满足安全运行的要求。
- (2) 空冷散热器面积应与冷却塔尺寸组成合理的搭配。
- (3) 满足安全运行的前提下，所选方案年总费用较低。

由于间冷系统的组合方案众多，本工程经过大量试算后，本次循环水系统优化的凝汽器面积、冷却倍率、散热器冷却三角数、循环水管管径分别按照以下几个方案进行组合：

- (1) 空冷散热器

散热器材质为铝质，按照小六排管优化。

- (2) 凝汽器面积分别按照下列3组优化：

38000(m²)、40000(m²)、42000 (m²)

- (3) 冷却倍率按下列3组数据优化：

45、50、55

- (4) 散热器冷却三角数按下列4组数据优化：

216个、220个、224个、228个，冷却三角高度35.5m（分两层布置）

冷却塔冷却规模组合

序号	冷却三角数	冷却塔高(m)	冷却塔出口直径(m)
1	216	219	113
2	220	223	115
3	224	227	117
4	228	231	119

- (5) 为了便于对更为复杂的变量进行计算分析，循环水母管管径按经济流速范围，取下列1组数据计算：

主管：DN3000

支管：DN2000

本次初设按照不同数量的冷却三角、凝汽器面积和不同的塔形组合成4x3x3=36个方案进行循环水系统优化,表中仅列出前25个方案数值。

序号	年总费用 (万元)	设计工况 背压(kPa)	冷却 倍率	三角个 数(个)	散热器总面 积(m²)	凝汽器面 积(m²)	冷却塔 高(m)	塔出口 直径 (m)	循环水主 管管径 (mm)	循环水支 管管径 (mm)
1	8009.5	9.5	45	216	3055944.8	2×38000	219	113	3000	2000
2	8025.65	9.4	45	216	3055944.8	2×40000	219	113	3000	2000
3	8029.35	9.3	45	220	3112610.3	2×38000	223	115	3000	2000
4	8046.2	9.2	45	220	3112610.3	2×40000	223	115	3000	2000
5	8054.75	9.4	45	216	3055944.8	2×42000	219	113	3000	2000
6	8061.5	9.1	50	216	3055944.8	2×38000	219	113	3000	2000
7	8062	9.1	45	224	3169275.7	2×38000	227	117	3000	2000
8	8067.65	9.1	50	216	3055944.8	2×40000	219	113	3000	2000
9	8075.25	9.2	45	220	3112610.3	2×42000	223	115	3000	2000
10	8078.05	9	45	224	3169275.7	2×40000	227	117	3000	2000
11	8084.7	9	50	220	3112610.3	2×38000	223	115	3000	2000
12	8089.95	9.1	50	216	3055944.8	2×42000	219	113	3000	2000
13	<b>8090.9</b>	<b>8.9</b>	<b>50</b>	<b>220</b>	<b>3112610.3</b>	<b>2×40000</b>	<b>223</b>	<b>115</b>	<b>3000</b>	<b>2000</b>
14	8104.75	8.9	45	228	3225941.2	2×38000	231	119	3000	2000
15	8107.15	9	45	224	3169275.7	2×42000	227	117	3000	2000
16	8112.9	8.9	50	220	3112610.3	2×42000	223	115	3000	2000
17	8119.5	8.8	50	224	3169275.7	2×38000	227	117	3000	2000
18	8121.15	8.9	45	228	3225941.2	2×40000	231	119	3000	2000
19	8125.95	8.7	50	224	3169275.7	2×40000	227	117	3000	2000
20	8148.15	8.7	50	224	3169275.7	2×42000	227	117	3000	2000
21	8150.2	8.8	45	228	3225941.2	2×42000	231	119	3000	2000
22	8165.7	8.6	50	228	3225941.2	2×38000	231	119	3000	2000
23	8172.4	8.6	50	228	3225941.2	2×40000	231	119	3000	2000
24	8194.4	8.5	50	228	3225941.2	2×42000	231	119	3000	2000
25	8204.15	8.8	55	216	3055944.8	2×40000	219	113	3000	2000

6.6 优化方案结果分析

本次优化计算中，排名靠前的背压在 9~9.5kPa 之间。目前主机按照背压 9 kPa 招标，

故背压高于 9 kPa 的方案不选用。按照年总费用最低排序，冷却倍率为 45 倍、50 倍的方案靠前，但冷却倍率为 45 倍的方案设计背压均偏高，从总体趋势分析，冷却倍率 50 倍的方案背压低于 45 倍的方案，煤耗费用远低于 45 倍的方案，故推荐采用冷却倍率为 50 倍的方案。凝汽器面积 38000m<sup>2</sup> 和 40000 m<sup>2</sup> 的方案排名靠前，考虑到主厂房的布置以及凝汽器长期运行后热交换能力下降等因素，本工程建议选用凝汽器面积不小于 40000 m<sup>2</sup> 的方案。冷却三角数 216 个和 220 个的方案排名靠前，综合考虑主机背压、防冻、度夏等因素，建议选择冷却三角数为 220 个的方案 13，背压略低于主机设计背压。

通过循环水系统的优化，二台机组推荐的空冷系统配置参数如下：

设计气温： 13.0 °C，设计背压：9kPa

夏季设计气温：30.0°C，夏季设计背压：27kPa。

循环水冷却倍率：50倍

散热器管型：18mm铝管铝翅片6排管（双层布置）

冷却三角数：220个

散热器散热面积：311.26万m<sup>2</sup>

凝汽器面积：40000m<sup>2</sup>

循环水母/支管道：DN3000/DN2000

空冷塔人支柱零米直径30：171.2m

散热器外沿直径：181.2m

进风口高度：40.5m

出口直径：115.0m

空冷塔塔高度：223.0m