



中国大唐集团科学技术研究院

China Datang Corporation Science and Technology Research Institute

大唐集团2015年技术监督会议

汽轮机冷端优化治理的几种方法

中国大唐集团科学技术研究院

赵文波

2015年8月

汽轮机冷端优化治理的几种方法

一 汽轮机 冷端系统的重要性

二 汽轮机 冷端系统存在的问题

三 已经开展的机组 冷端治理工作

四 基于一种吸收式热泵改造的冷端优化技术

五 小功率循环水泵优化改造方法

六 空冷与湿冷联合冷却方式

七 尖峰冷却的两种型式

八 空冷机组高背压余热利用

九 几点结论与建议



汽轮机冷端优化治理的几种方法

一 汽轮机冷端系统的重要性

- 1 汽轮机优化治理工作 “优化两端，改造中间，消除缺陷，完善系统”
- 2 机组的真空每变化1KPa，对煤耗的影响如下表：

项目	单位	200MW 湿冷	300MW 亚临界	600MW 亚临界	600MW 超临界	600MW 空冷
煤耗变化	g/kWh	3.8	3.2	3.4	2.3	1.08

- 3 大唐集团火电装机容量近9千万千瓦，发电量约4500亿度，若按集团公司真空平均提高0.5KPa，平均影响煤耗1g/kWh估算，则年可节约标准煤45万吨，折合人民币约2亿元。



汽轮机冷端优化治理的几种方法

二 汽轮机冷端系统存在的问题

- 1 目前集团装机数量最多为300MW和600MW亚临界湿冷机组，约有一半多是亚临界300MW和600MW机组。
- 2 大唐集团300MW和600MW亚临界湿冷机组近两年平均值。

	300MW 亚临界		600MW亚临界		
	真空度	真空严密性	真空度	真空严密性	
2013年	94.26%	59KPa/min	93.85%	122KPa/min	
2014年	94.17%	151KPa/min	94.1%	107KPa/min	

- 3 机组冷端在真空、端差、过冷度等指标方面还存在一定差距；在凝汽器换热、循环水泵电耗、水塔散热等方面还有许多工作可做。



三 机组冷端治理工作综述

电力工业几十年的发展，汽轮机的冷端优化和治理工作归纳起来，有如下方面诸多工作：

I 机组真空系统漏泄治理方面

- 打压法找漏、
- 氦质谱检漏、
- 超声波检漏、
- 凝汽器高位上水找漏、
- 真空泵工作液深度冷却技术、
- 高效水环真空泵技术。
- 其他（发耳）



三 机组冷端治理工作综述

2增强凝汽器换热、治理端差方面

- 凝汽器管束布置优化
- 强化冷却管传热
- 低压缸排汽导流板（七台河）
- 凝汽器补水喷淋装置（乌沙山、景泰）
- 胶球清洗系统改造
- 循环水新型阻垢剂的应用
- 旋转二次滤网
- 高压水冲洗技术。



三 已经开展的机组冷端治理工作

3 冷端运行优化方面

- 基于最低能量消耗（基于收益最大化）的循环水泵运行方式
- 双背压凝汽器抽气系统优化技术
- 循环水泵的出水母管连接改造
- 基于负荷和环境温度的循环水泵运行优化技术
- 双机单塔技术（武安）
- 开式循环水深水冷却技术（吕四港改造）



三 已经开展的机组冷端治理工作

4 降低循环水泵厂用电方面

- 循环水泵高效叶轮技术、
- 循环水泵降低出力技术、
- 循环水泵双速电动机技术、
- 高压变频技术（阳城、佳木斯）



三 已经开展的机组冷端治理工作

5 冷水塔与空冷岛方面

- 冷却塔配水和填料改造
- 旋转式喷溅装置
- 湿冷塔风水匹配强化传热技术
- 空冷岛的喷淋冷却技术
- 空冷岛除灰清洗装置
- 空冷岛冬季防冻监控系统（塔山）
- 空冷三角形散热器加装导流板
- 湿冷塔蒸汽强化散热技术（国外）
- 湿冷塔蒸汽回收节水技术（国外）



汽轮机冷端优化治理的几种方法

三 已经开展的机组冷端治理工作

6 目前主要工作方向

基于提高机组效率、降低厂用电方面所进行的工作。大多数都已经实施，且有较好的工程业绩和效果。

7 低温冷端治理趋势

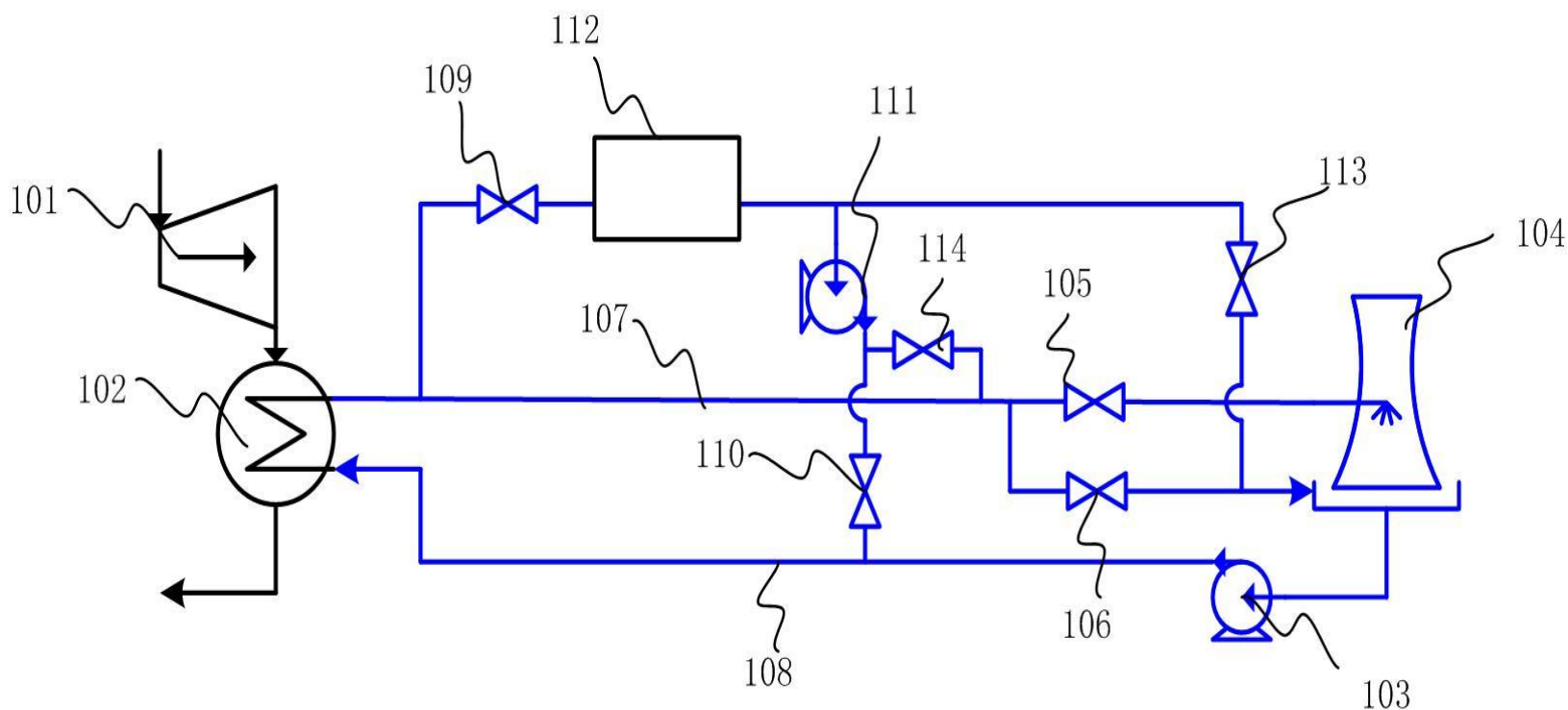
- 冷端精细化优化、改造与管理;
- 机组低位热能利用。（如吸收式热泵回收技术、大温差供热技术、低真空循环水供热、空冷机组高背压供热、双背压双转子技术、3S离合背压供热技术等。后三者实际也是一种供热技术。）



汽轮机冷端优化治理的几种方法

四 基于一种吸收式热泵改造的冷端优化技术

- 1 吸收式热泵的两种改造模式 { 热泵并联于凝汽器出口的循环水管道
串联热泵后面增加升压泵



汽轮机101、凝汽器102、循环水泵103、冷却塔104、



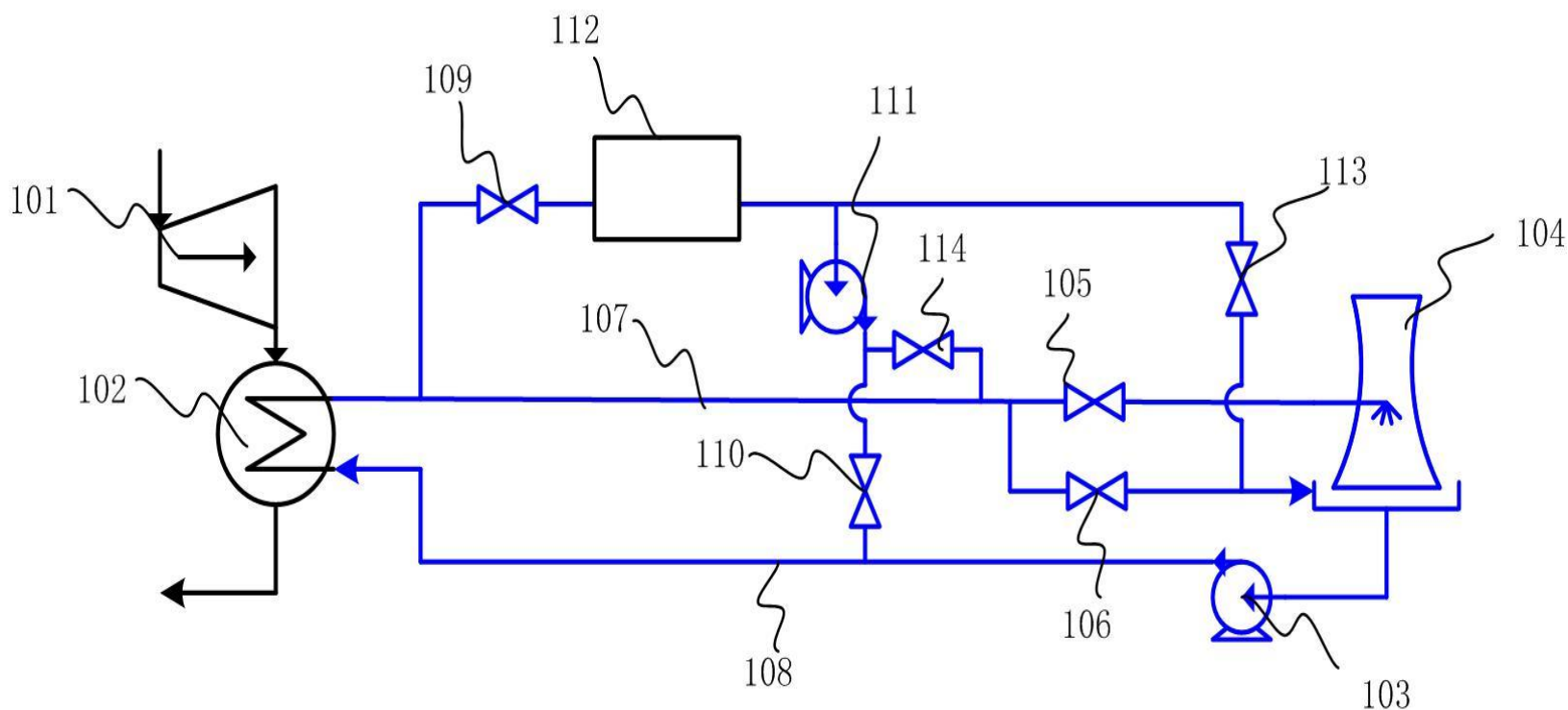
中国大唐集团科学技术研究院

China Datang Corporation Science and Technology Research Institute

汽轮机冷端优化治理的几种方法

四 基于一种吸收式热泵改造的冷端优化技术

2基于热泵改造方式的冷端优化 { (1) 机组启动时的冷却方式
(2) 机组低负荷或环境温度较低时冷却



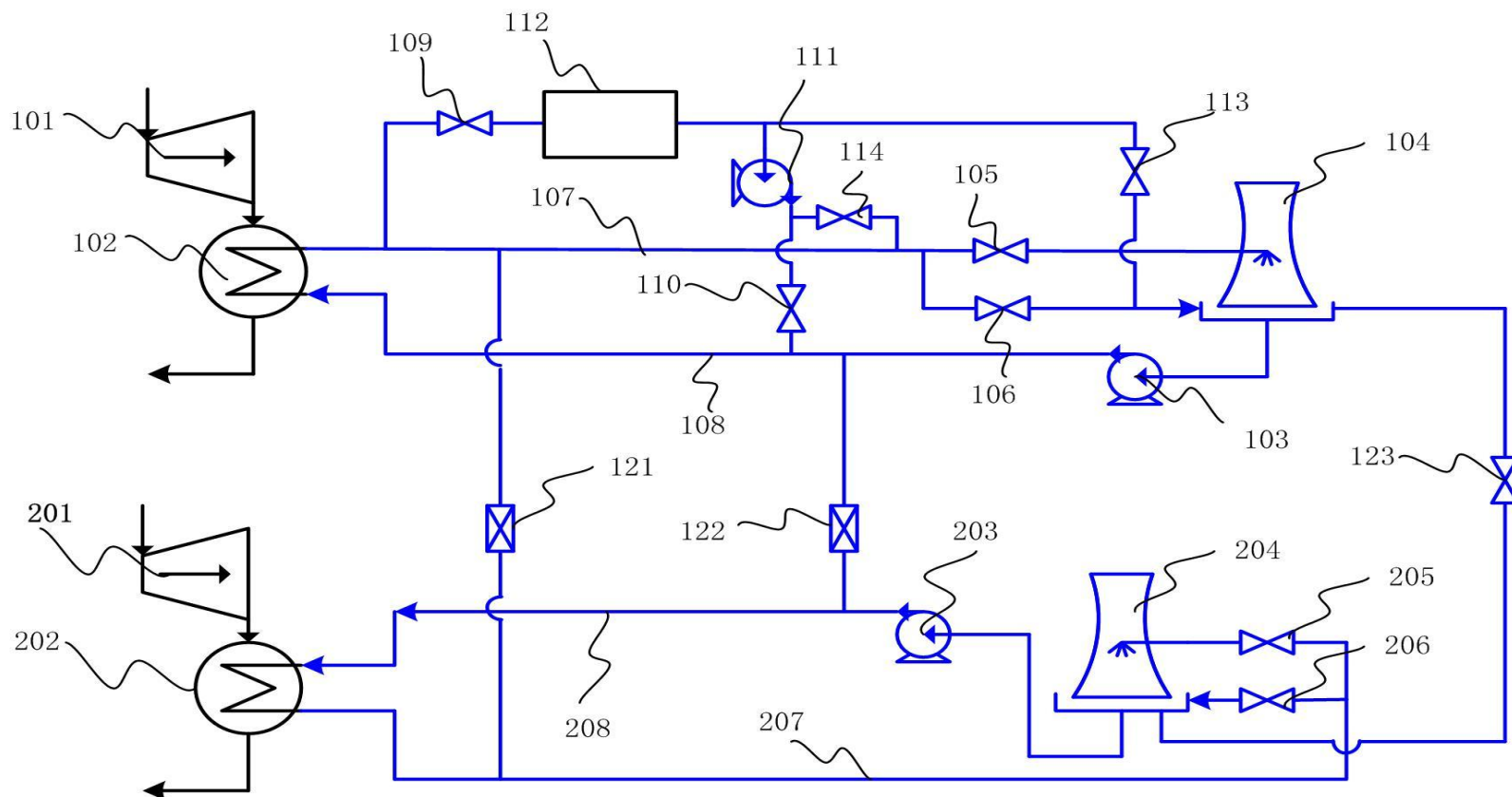
汽轮机101、凝汽器102、循环水泵103、冷却塔104、



汽轮机冷端优化治理的几种方法

四 基于一种吸收式热泵改造的冷端优化技术

3 多台机组运行时的优化冷却方法



四 基于一种吸收式热泵改造的冷端优化技术

4 结论与建议

基于热泵余热回收系统的热电厂冷端优化运行方式，**不需要进行再投资，调节灵活**，将热泵系统改造后的升压泵及其系统，应用于电厂的正常运行时的机组冷却，在满足不同季节的环境温度和负荷变化机组冷却需要的前提下，**有效的节省了厂用电的消耗**。该方法将以往的电厂循环冷却系统与改造后的热泵余热回收系统，进行合理的选择和组合，实为发电厂领域进行深度节能挖潜一种新的方式和方法。



五小功率循环水泵优化改造方法

1 小功率循环水泵优化改造

A 改造方式

按照吸收式热泵优化运行方式，对于没有进行第二种方式热泵改造的机组，可以通过在循环水系统增加并列运行的小功率循环水泵，来实现机组冷端运行的优化和改造。

其效益评估需要基于电厂机组的负荷分布、启动次数、平均环境温度、机组的真空状态以及投资来综合考虑。

B 运行方式

在机组启动初期，运行约4-6个小时，3500KWH/次；

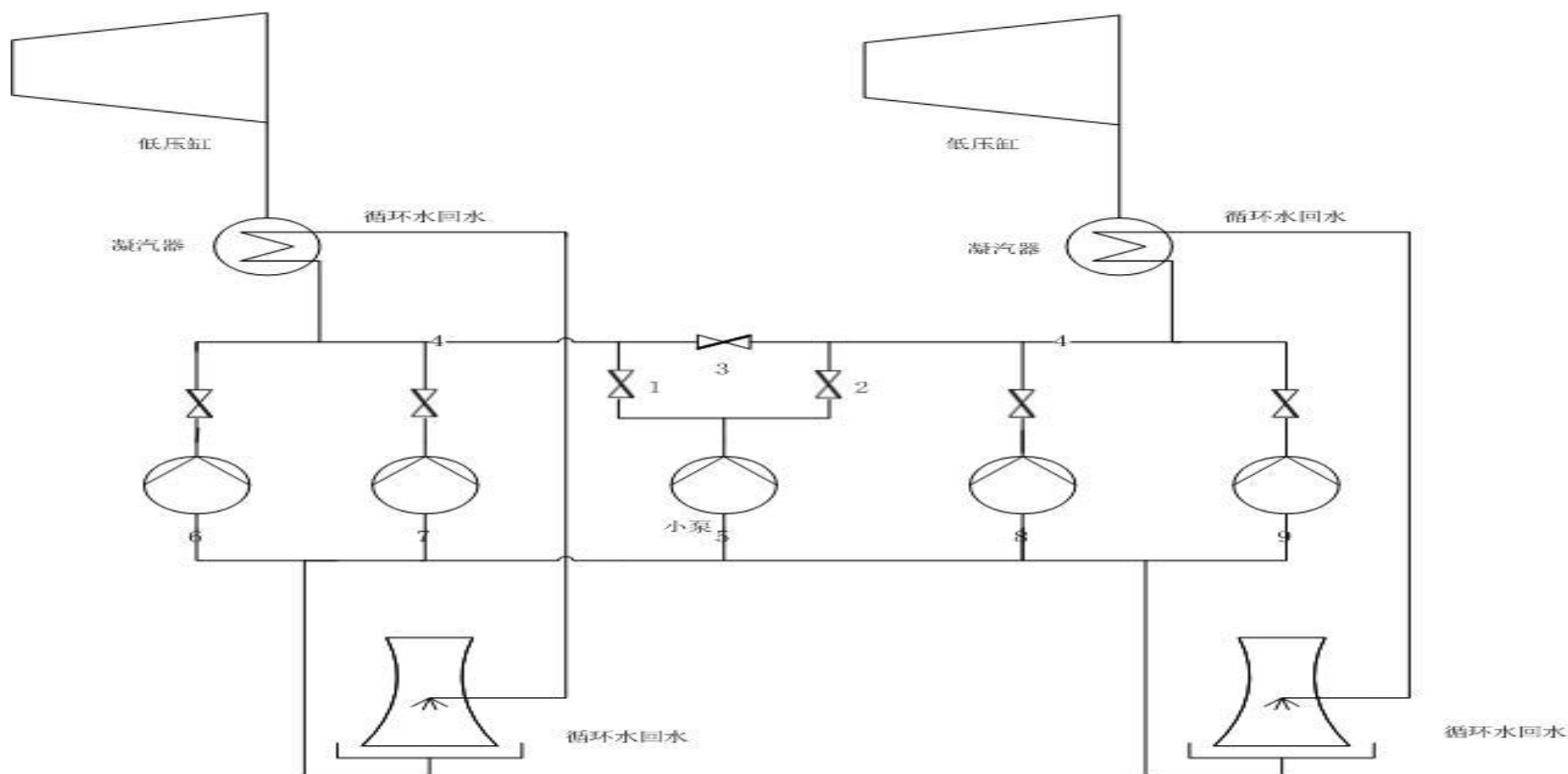
在机组停运时，运行约2-4小时，2100KWH/次。

在冬季或机组低负荷，单独运行或与两台循环水泵高低速优化运行。

汽轮机冷端优化治理的几种方法

五小功率循环水泵优化改造方法

C 小功率循环水泵优化改造示意图



五小功率循环水泵优化改造方法

2 利用循环水排水泵进行的优化改造实例

利用循环水排水泵实现机组循环水系统充水、机组启动冷却和停机冷却。由于在机组冷态启动时首先恢复的系统是循环水系统，然后才能恢复其余系统，待点火这段时间循环水泵只起着提供辅机冷却水的作用，电耗浪费较大。停机后循环水泵运行也只是提供一个冷却水的作用，同样存在电耗浪费大的问题。所以在机组启动和停机过程中，可以利用循环水排水泵实现机组循环水系统冷却。



五小功率循环水泵优化改造方法

3 改造实例及效果

① 机组概况

林州2*350MW级机组，每台机组配置二台立式循环水泵，高速/低速流量分别为20200/19000m³/h，其配备的高/低速电机功率分别为1900/1250kW。循环水系统设置有两台排水泵，每台泵流量为346m³/h，扬程为24m，功率为37KW。

② 排水泵作用

循环水排水泵作用是停机检修时放空进水流道中循环水。

③ 改造方式

改造方式是在循环水排水泵出口母管增加一路去机组循环水泵出口母管，作为循环水系统注水和循环使用。



五小功率循环水泵优化改造方法

3 改造实例及效果

④ 运行方式

a 在机组启动初期，没有蒸汽进入凝汽器或者进入凝汽器的蒸汽很少时，启动两台循环水排水泵直接向循环水母管补水，启动开式水泵；同时利用循环水排水泵的压头，形成水循环，建立真空；当机组点火后再启动循环水泵。

b 当机组停运两小时后，开启排水泵往循环水母管注水门，启动两台排水泵，停运循环水泵，利用排水泵的压力使循环水管道内的循环水流动，代替大容量的循环水泵，达到冷却凝汽器排汽温度的目的。

⑤ 改造效果

在机组启动时，循环水泵可以晚启动约4小时，从而节省厂用电量5000KWh以上，在机组停机时，循环水泵可以少运行约6-8小时，从而节省厂用电量7500KWh以上。



六 空冷与湿冷联合冷却方式

1 优化改造原理

在有空冷机组和湿冷机组并列运行的电厂，利用空冷机组可以高背压运行的特点，利用空冷机组的间接循环冷却水或直接空冷乏汽系统加热临机湿冷机组的凝结水，从而实现两种冷却方式的优势互补，提高全厂经济效益，达到节能减排的目的。

2 THA工况参数与效果

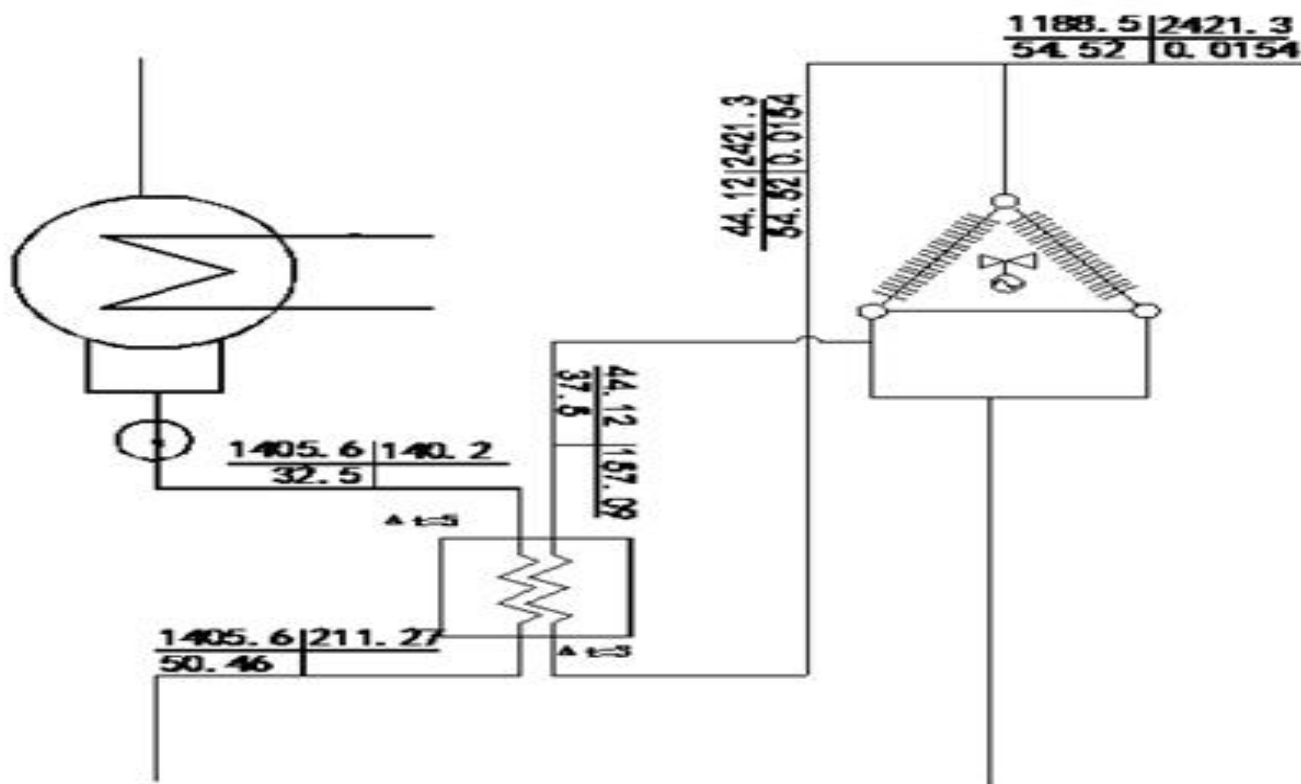
空冷机组和湿冷机组在额定工况下，湿冷机组全部凝结水温度由32℃上升到50℃，**热耗降低约60KJ/KWh，煤耗降低约2.14g/kwh**；空冷机组的排汽约有44T/H被冷却凝结为水，进入到空冷岛的乏汽从设计时的1188T/H降低为1144T/H，机组热耗降低7KJ/KWh，**机组煤耗降低0.25g/kwh**。

TRL工况下湿冷机组的热耗降低约125KJ/KWh，空冷机组的热耗降低17KJ/KWh，对应的煤耗降低值分别为4.5g/kwh和0.6g/kwh。

汽轮机冷端优化治理的几种方法

六 空冷与湿冷联合冷却方式

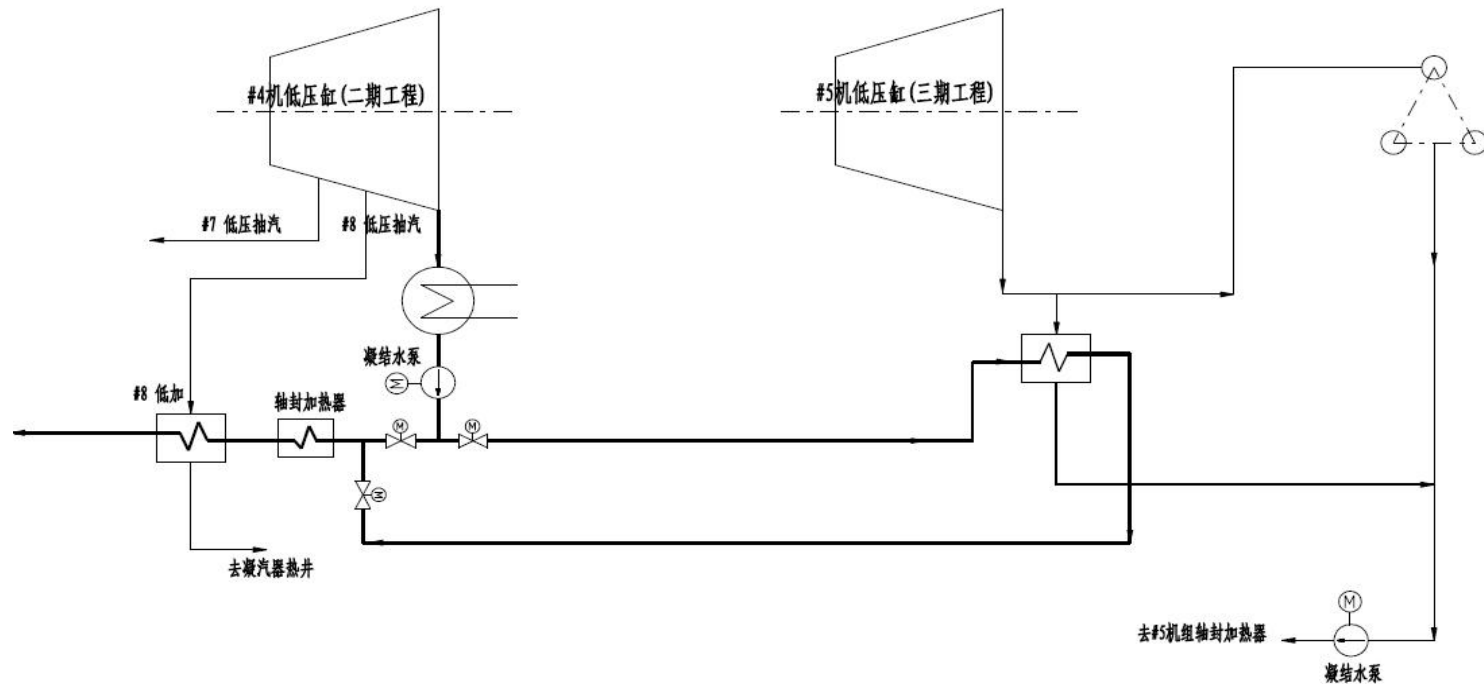
3 小凝汽器式表面换热原则热力系统(THA)



汽轮机冷端优化治理的几种方法

六 空冷与湿冷联合冷却方式

4 小凝汽器式表面换热器示意图（托克托、韩城）



六 空冷与湿冷联合冷却方式

5 改造实例及效果

① 概况与方式

托克托电厂5号机组和6号机组分别为600MW湿冷机组和600MW直接空冷机组，改造是将前期湿冷机组凝结水送至后期空冷机组排汽装置，由空冷汽机低压缸排汽加热后再送回前期空冷机组8号低加入口。

由于凝结水温度提高，可增加湿冷机组发电量，提高经济效益；同时由于空冷机组空冷器凝汽量减少，相应背压可降低，发电热耗也可适当降低，从而减少发电煤耗。相应的提高机组经济效益。

该项目换热量约20MW，空冷机组耗汽量约40t/h，湿冷机组低加汽量减少约35t/h。

② 改造效果

在平均80%负荷的情况下，可降低煤耗1.9g/KWh，空冷机组煤耗降低约0.1g/KWh。

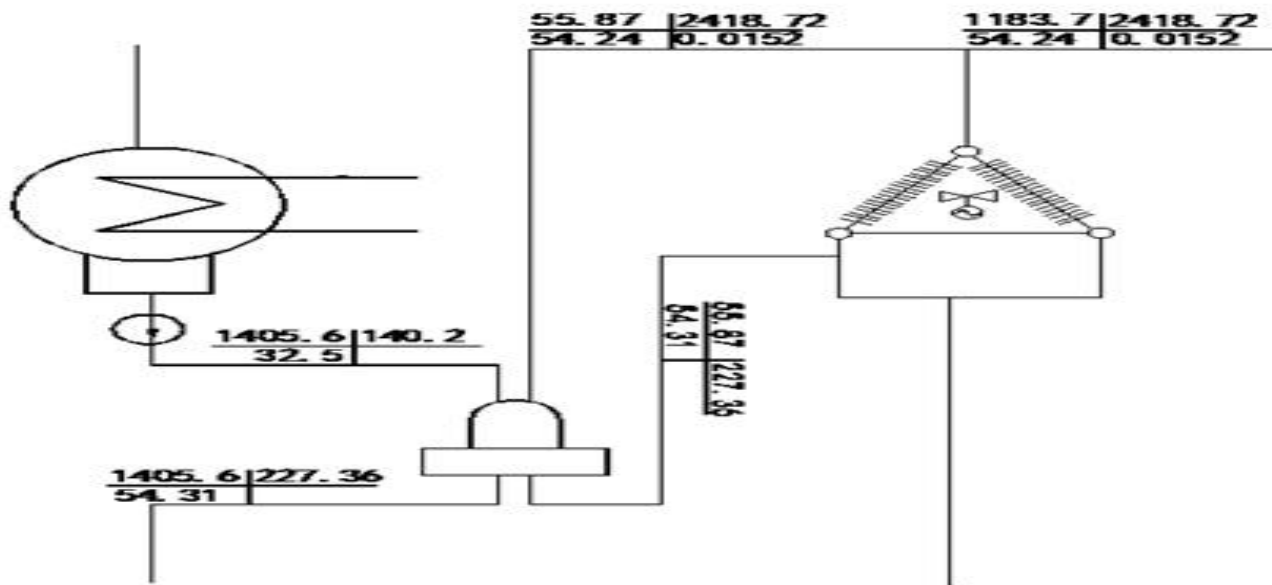
汽轮机冷端优化治理的几种方法

六 空冷与湿冷联合冷却方式

7 混合式换热器实现空冷湿冷机组的联合冷却

将湿冷机组的凝结水全部引入到空冷机组的排汽处，然后通过混合式换热器实现湿冷机组的凝结水对空冷机组乏汽的冷却，加热后的凝结水返回到其温度对应的加热器前面。

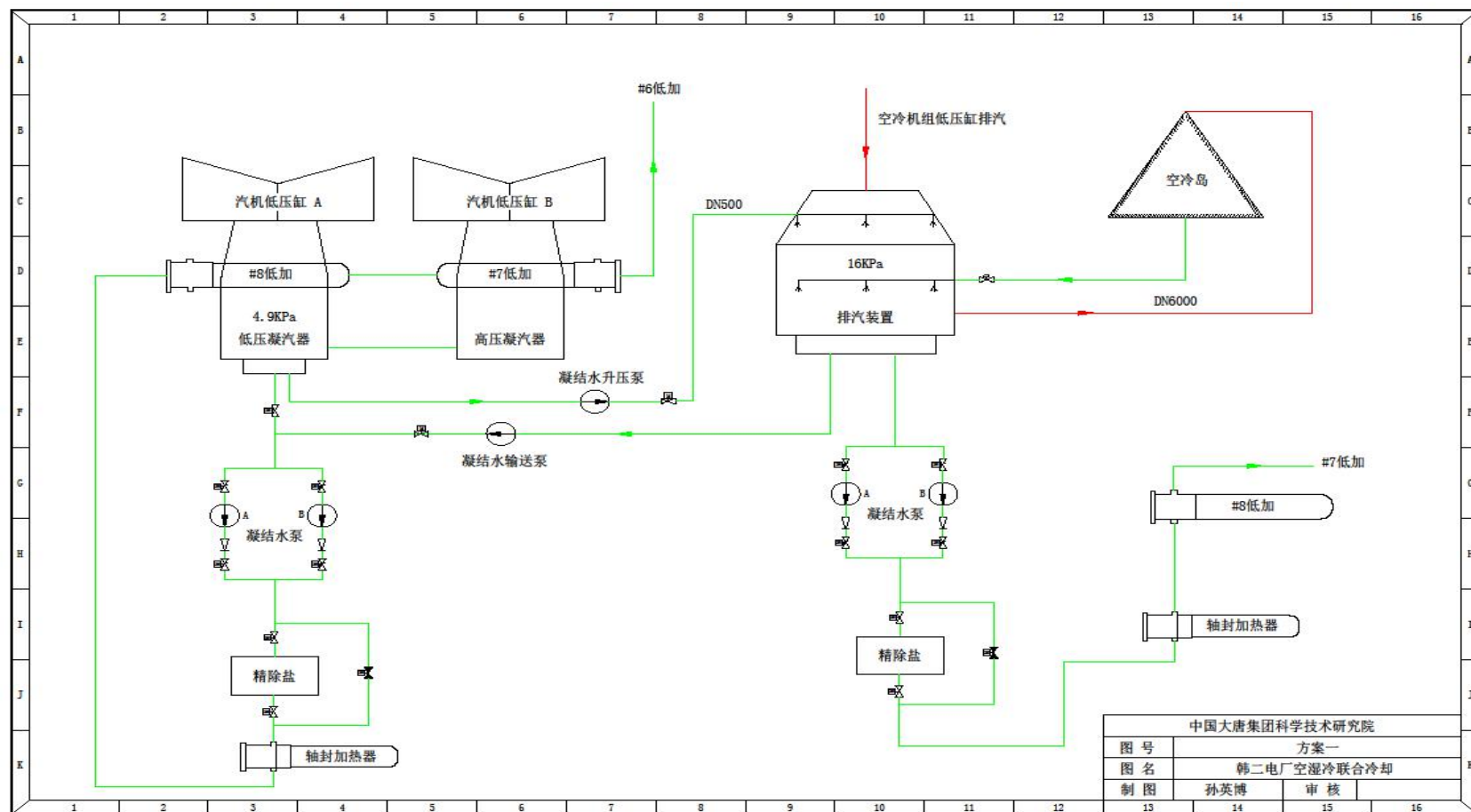
该方式方法，由于没有换热器的端差，其冷却和换热效果较好



汽轮机冷端优化治理的几种方法

七 空冷机组高背压余热利用

8 混合式空湿冷联合冷却原则性热力系统



— 001 —



七 空冷机组高背压余热利用

9 混合式空湿冷联合冷却效果

在额定工况下，湿冷机组凝结水温度由34℃上升到55℃，机组热耗降低约81KJ/KWh，煤耗降低约2.89g/kwh；空冷机组的排汽约有56T/H被冷却凝结为水，热耗降低约10KJ/KWh,机组煤耗降低约0.35g/kwh。

对空冷机组TRL工况也进行了类似的热力计算，湿冷机组的热耗降低137KJ/KWh，空冷机组的热耗降低16KJ/KWh，对应的煤耗降低值分别为4.87g/kwh和0.57g/kwh。



汽轮机冷端优化治理的几种方法

七 空冷机组高背压余热利用

10表面式和混合式空湿冷联合冷却效果汇总

	单位	THA	TRL	70%THA	全年实际工况
空冷真空降低	kPa	-1.3	-2.3	-1	-0.40
湿冷凝结水温升	℃	21	21	21	18
空冷煤耗降低	g/kwh	1.4	3	1	0.4
湿冷煤耗降低	g/kwh	1.9	1.2	1.3	1.1
两台机组平均节煤	g/kwh	1.65	2.1	1.65	0.75

汽轮机冷端优化治理的几种方法

七 空冷机组高背压余热利用

11 空湿冷联合冷却几点结论和建议

- (1) 空冷湿冷联合冷却方式，相对尖峰冷却器的方案，设备投入不多，**可以取得较好的节能量和收益**。但该种方式方法，会受到两台机组运行时的互相牵制和影响。
- (2) 小凝汽器方案较混合式方式，**设备投入少，系统简单，运行稳定可靠，收益可观**。混合式方案在具体改造方式上，推荐增加两台凝泵的改造方案。
- (3) 湿冷机组的节煤量受环境温度的影响不大，**大约在0.9-1.2 g/kWh之间**，空冷机组的节煤量受环境温度的影响有一定变化，**大约在0.4-1.4 g/kWh之间**，环境温度越高，节煤量收益越大。
- (4) 喷淋式换热方式较表面式换热方式，湿冷机组的收益高约接近0.2 g/kWh，空冷机组的收益高约接近0.15-0.2 g/kWh，环境温度越高，收益差值越大。



八 尖峰冷却器改造两种冷却型式

1 利用吸收式热泵凝汽器作为空冷岛的辅助尖峰冷却装置

(1) 改造方式

采用吸收式热泵凝汽器作为空冷岛的辅助尖峰冷却装置。冬季用吸收式热泵技术对外供热，夏季采用吸收式热泵凝汽器作为空冷岛的辅助尖峰冷却装置，用干湿联合空冷器对凝汽器冷却循环水进行冷却降温。用此方法，可以有效的利用热泵改造的设备，同时解决冬季供热和夏季尖峰冷却问题，降低设备改造费用。

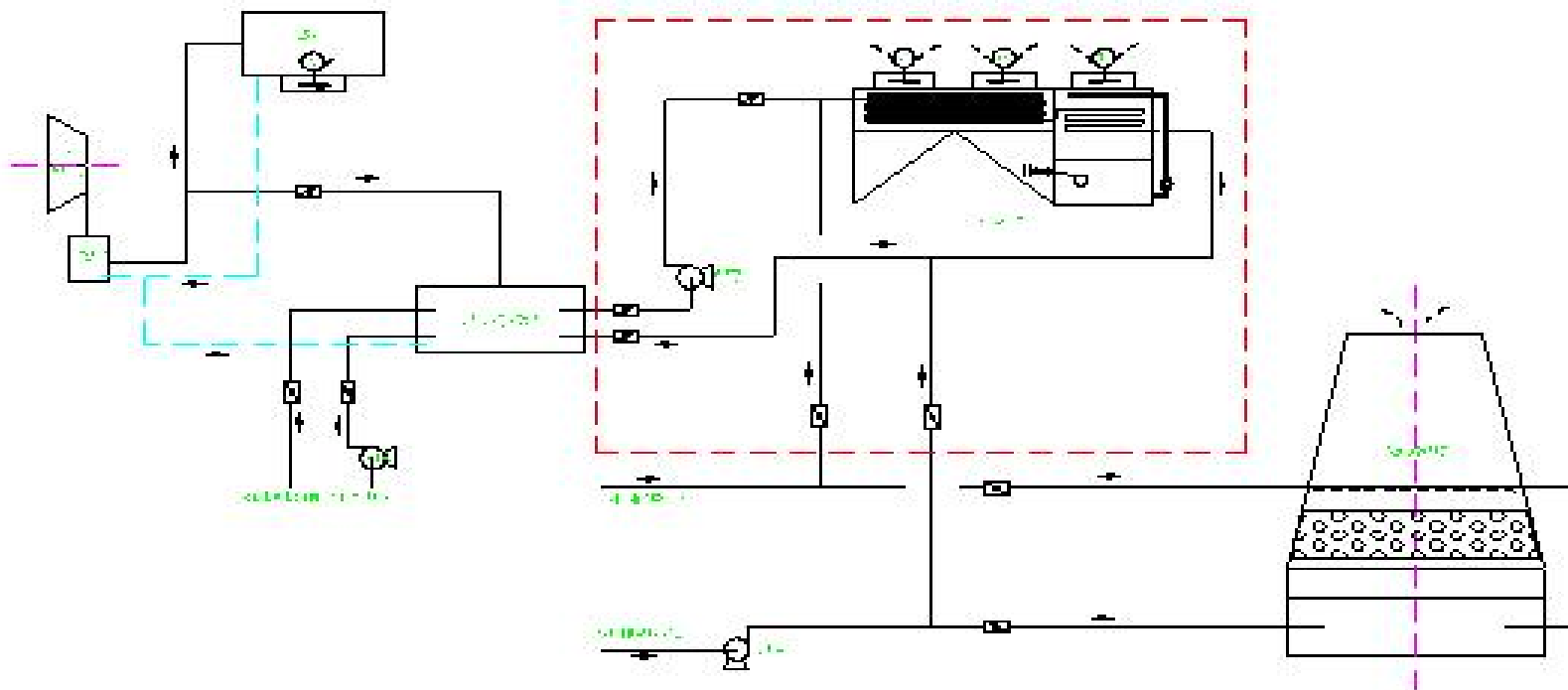
(2) 工艺流程

吸收式热泵在非采暖季停机，热泵凝汽器闲置。在气温较高时，利用闲置的热泵凝汽器作为空冷岛的辅助尖峰冷却装置，通过原有的蒸汽引出管，分流100t/h的乏汽到热泵凝汽器，总循环水量约6000t/h。

汽轮机冷端优化治理的几种方法

八 尖峰冷却器改造两种冷却型式

(3) 改造示意图（云冈）



八 尖峰冷却器改造两种冷却型式

(6) 运行模式

采暖季

11月15日至3月15日，约120天。

过度季

3月15日~5月15日，10月初~11月15日

高温季（夏季）

5月15日~9月30日，约145天。

原



八 尖峰冷却器改造两种冷却型式

(7) 效果与收益

辅助尖峰冷却系统运行效果

直接空冷系统夏季运行背压降低约5KPa。辅机冷却水节水约80t/h。

小机与辅机密闭循环水冷却系统电耗

22台设备，单台风机装机功率33KW，总装机功率726KW。



汽轮机冷端优化治理的几种方法

冷端优化改造几种方式汇总对比

2 利用辅机冷却塔作为辅助尖峰冷却

(1) 系统改造及工作原理

改造利用原有机组两台逆流式自然通风冷却塔，由于在夏季冷却塔还有富裕冷却裕量，在冷却塔的进出口并联小凝汽器，来冷却一台机组的部分排汽。

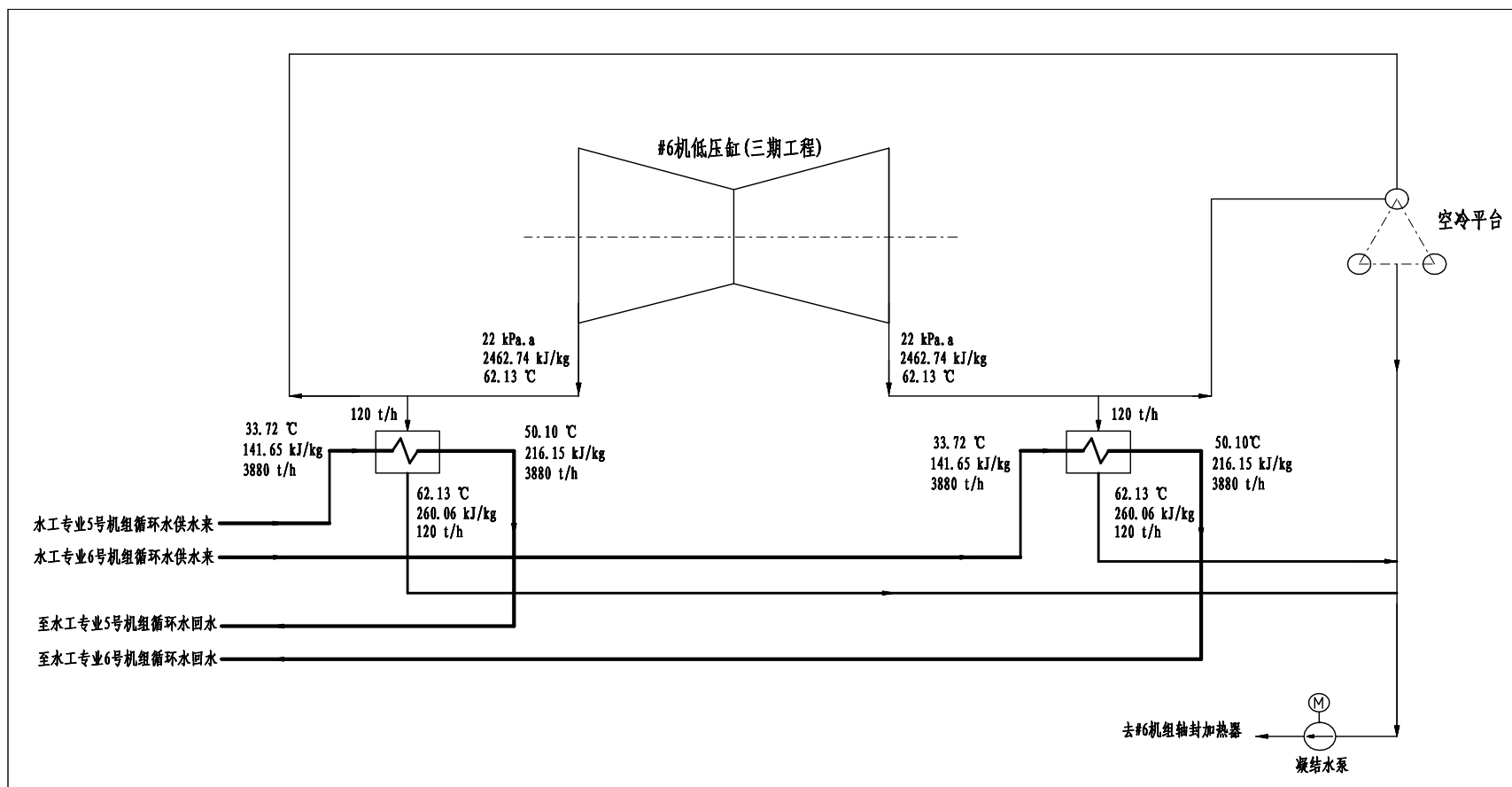
即仅考虑一台机组加装尖峰冷却系统，在该机组空冷岛下设置2台凝汽器。冷却水从两台机组辅机循环水供/回水母管上并联引接去凝汽器。蒸汽自该机组直接空冷系统2根DN6000主排汽管道分别引接进入2台凝汽器，凝结水分别汇入主机直接空冷系统凝结水干管。



汽轮机冷端优化治理的几种方法

冷端优化改造几种方式汇总对比

(2) 利用辅机冷却塔作为辅助尖峰冷却示意图（托克托 运城）



汽轮机冷端优化治理的几种方法

冷端优化改造几种方式汇总对比

(3) 效果及评价

通过对机组投、切尖峰凝汽器两个试验工况的测试和数据处理分析得出：机组在未投入尖峰凝汽器时，机组背压41kPa，热耗为9208kJ/kW.h；在投入尖峰凝汽器后，机组背压降至20 kPa，热耗为8691.4 kJ/kW.h（环境温度约30℃）。

真空降低约20kPa，机组热耗降约400 kJ/kW.h，折合机组降低发电标煤耗约15g/kwh。



表一：空冷湿冷机组联合冷却的几种型式及其特点：

汽轮机冷端优化治理的几种方法

3 冷端优化改造几种方式汇总对比

电厂	容量	方式	优缺点	效果	两台总效果	备注
托克托4号与5号机组	直接空冷600MW 湿冷600MW	1湿冷机组凝结水引到空冷机组； 2 板式换热器方式。	1系统简单； 2 效果较好； 3 投资省。	约66%负荷试验结果： 湿冷煤耗降低约1.73g/KWh， 空冷煤耗降低约0.11g/KWh。	试验80%负荷： 1.91 g/KWh	项目已经实施。
韩二1号与3号机组； 韩二2号与4号机组	直接空冷600MW， 湿冷600MW	1湿冷机组凝结水引到空冷机组； 2 小凝汽器方式。	1系统简单； 2 效果较好； 3 投资省	可研计算结果： 湿冷煤耗降低约1.5g/kwh； 空冷煤耗降低约0.5g/kwh。	可研额定负荷： 约2 g/kwh 夏季工况： 约3 g/kwh	项目已经实施。
韩二1号与3号机组； 韩二2号与4号机组	直接空冷600MW， 湿冷600MW	1湿冷机组凝结水引到空冷机组； 2 混合凝汽器方式。	1效果好； 2 控制与运行复杂；	方案论证： 湿冷煤耗降低约2.0g/kwh； 空冷煤耗降低约0.8g/kwh。	方案论证： 约3 g/kwh 夏季工况： 约4.5 g/kwh	方案论证阶段。
阳城7号与4号、5号、 6号机组	间接空冷600MW， 湿冷3*300MW	1空冷机组循环水分别引到3 台湿冷机组； 2 板式换热器方式。	1效果较好； 2 控制与运行一般；	方案论证： 湿冷煤耗降低约2g/kwh； 空冷煤耗降低约0.9g/kwh。	方案论证： 约2.9g/kwh	方案论证阶段。
阳城7号与1-6号机 组	间接空冷600MW， 湿冷6*300MW	1 6台湿冷机组补水冷却7号 空冷机组； 2 板式换热器方式。	1效果较好； 2 系统简单；	方案论证： 湿冷煤耗升高约0.1g/kwh； 空冷煤耗降低约4g/kwh。	方案论证： 约3.9 g/kwh	方案论证阶段。
运城600MW空冷机 组	直接空冷600MW， 小机湿冷	1空冷机组循环水分别引到3 台湿冷机组； 2 板式换热器方式。	1效果较好； 2 系统简单。	可研论证： 夏季工况降低背压约4kPa， 节煤量约5g/kwh	方案论证： 约5 g/kwh	已经实施
云冈300MW机组	直接空冷300MW， 热泵湿冷	1夏季利用热泵做为凝汽器， 引入干湿冷联合冷却器； 2引入干湿冷联合冷却器。	1效果较好； 2 系统简单。	可研论证： 夏季工况背压降低约5KPa， 供电煤耗减少约6g/kWh。	方案论证： 约6 g/kwh	可研阶段

八 空冷机组高背压余热利用

1 优化改造原理

在供热期利用空冷机组高背压运行，排汽直接加热热网循环水，实现直接供热。

2 改造实例

某300MW抽凝式空冷供热机组，从汽机排汽管上增设一旁路排汽加热热网循环水，冬季供热时，控制运行背压在30KPa左右，排汽温约70℃。

在供热初末期，利用该加热器加热循环水供热；在高峰期，利用原抽汽系统继续加热循环水到一定的供水温度。

3 改造效果

以此方式进行改造和运行后，以DCS系统数据初步估算，全厂供电煤耗下降约13g/KWh。

九 汽轮机冷端优化方面今后的工作

9.1 推广项目

1. 基于冷端实际数值的调节阀门优化技术；
2. 低功率水环真空泵；
3. 自然通风塔综合治理优化技术（宝鸡二发）
4. 开式循环水排水余压利用技术；
5. 海水循环水深水取水技术（设计优化）；
6. 空冷岛温度监控技术（塔山）



汽轮机冷端优化治理的几种方法

九 汽轮机冷端优化方面今后的工作

9.2 试点项目

- 1 基于当地真空的末级叶片优化工作（基建优化项目）
- 2 冷却塔循环水高位收水技术（西北院国华寿光电厂2×1000MW工程）
- 3 胶球集中发球技术（鸡西、清苑）
- 4 凝汽器自清洗除垢强化换热技术（RCCS）（西固）
- 5 凝汽器在线清洗技术（WSD水蜘蛛Water Spider仿生清洗）
- 6 凝汽器固体颗粒清洗法（大唐研究院华东所）
- 7 高效锥体双级泵（冷却喷嘴、叶轮下偏心、启动单级工况）
- 8 空冷岛尖峰冷却 技术（多种技术）



九 汽轮机冷端优化方面今后的工作

9.3 研究项目

1. 热泵系统优化运行技术
2. 自然通风逆流湿式冷却塔风水匹配强化换热技术
3. 空冷岛通风导流优化改造
4. 空冷岛“炉后风”流场优化与控制技术
5. 水塔蒸汽喷射技术



十 结论与建议

1 汽轮机组的冷端优化治理工作虽然有许多方式方法，且已经取得长足进展，但是由于其在机组能耗方面所占有的比重较大以及问题的存在，所以仍然需要人们的重视。

2 机组的冷端治理工作已经从以往传统的真空漏泄治理、提高背压、电量消耗转向低温热源的深度利用方面，且潜力较大。

3 冷端的治理和低位热能的利用，需要个性化。每个电厂都需要根据机组的具体情况和边界条件，采用不同的方式方法。

（冷端工作——问题多、方法多、结果多）



十 结论与建议

4 汽轮机冷端治理工作还有许多工作和项目需要研究、试点、示范和推广。

5 冷端的深度治理和低位热能的利用，既是技术问题，也是一个管理问题和商务问题。其工作成效的取得，也需要在管理制度上、商务模式上给予重视和创新。



➤ 请领导和专家指正！

