

报告编码：HD02-PWR-TH006

火电发电厂低压加热器疏水 系统高效节能改造 项目建议书



华北电力大学

二零一五年八月

**项目名称：火电发电厂低压加热器疏水
系统高效节能改造**

报告时间：2015年8月

报告编制人：谢英柏 李永华 弓学敏

摘 要

在火力发电厂的低压加热器采用疏水泵，与疏水逐级自流相比，减少了相邻高一级的抽汽量，使冷源损失减少，可提高系统的经济性。

本项目建议书以 600MW 和 1000MW 机组为例，分析了疏水泵在低压加热器的接入位置和系统的经济性。得到以下结论：

1) 火力发电厂的低压加热器采用疏水泵确实提高了系统的经济性。但是不同容量机组、不同的疏水泵在低压加热器的接入位置所产生的效果是不同的。因此，需要详细掌握机组的参数，进行全面的热力计算。

2) 即使同一类型机组，采用相同的技术改造，也会产生不同的效果。这与设计中，整个回热系统的阻力特性、加热器水位等有关。为防止疏水泵运行中出现的汽蚀、空泵等状况，提高疏水泵的投入率，应根据现场实际对每台机组进行单独设计。

本项目建议书的完成得到了华北电力大学、保定华电电力设计研究院有限公司有关领导、专家和技术人员的大力协助，在此表示衷心的感谢！

目 录

1	前言.....	4
2	600MW 机组低压加热器疏水系统分析	5
	2.1 改造方案分析	5
	2.2 经济性分析	8
3	1000MW 机组低压加热器疏水系统分析	10
	3.1 玉环电厂	10
	3.2 N1000-25/600/600 机组分析.....	11
4	项目建议书单位介绍.....	14
	4.1 华北电力大学	14
	4.2 保定华电电力设计研究院有限公司	16
5	项目组织模式.....	17

1 前言

全球燃煤发电在 2035 年将增长到 12.9MGWh，我国的燃煤发电在很长时间内也将占据绝对主要地位。提高燃煤机组的效率，一方面是提高蒸气参数，如采用 350bar/700℃；另一方面是对已有的热力系统进行优化。特别是对于现有 1000MW 和 600MW 机组，要突破 45%（低位发热量）的数值，热力系统主要是优化回热系统和锅炉排烟热回收系统。

我国火力发电厂的回热系统，通常采用 8 级回热系统，即 3 台高压加热器、1 台除氧器及 4 台低压加热器。一般高压加热器疏水逐级自流入除氧器，而低压加热器疏水方式有很多类型。并且低压加热器的数量也不尽相同。

对于 300~600MW 机组低压加热器的疏水方式主要有采用疏水泵疏水自流、疏水冷却器、接触式低压加热器组等几种连接系统。

对于 1000MW 级别机组大致有 2 种方式：一是沿用美国技术，与我国引进型 300MW 及以上容量的机组相同，疏水逐级自流入凝汽器，每个低压加热器均设下端温差为 5.6℃的内置式疏水冷却段，如哈尔滨汽轮机厂生产的 1000MW 超超临界机组；另一种是采用德国 SIEMENS 公司技术，5 号低压加热器设下端温差为 5.6℃的内置式疏水冷却段，疏水自流入 6 号低压加热器，6 号低压加热器不设内置式疏水冷却段，疏水直接由疏水泵打入 6 号低压加热器出口主凝结水管内，7、8 号低压加热器均不设内置式疏水冷却段，疏水均自流入设在 8 号低压加热器进口凝结水主管上的外置式疏水冷却器，疏水下端温差为 5.6℃，冷却后的疏水流入凝汽器，如上海汽轮机厂为玉环电厂生产的 1000MW 超超临界机组。

不同的疏水方式，在安全与经济方面具有不同的特点。

1) 采用疏水自流连接方式的连接系统简单、运行可靠、不耗厂用电、运行维护方便，但存在排挤低压抽汽的现象，额外增加了冷源损失，热经济性较差。

2) 用疏水泵的连接系统，因其减少了相邻高一级的抽汽量（用疏水泵将本级疏水送入加热器出口凝结水管路中，提高了高一级的进口水温，可以减

少该级加热器的出口端差), 不存在排挤低压抽汽的现象, 使冷源损失减少, 但系统中疏水泵多, 使得系统复杂, 投资增加, 且多耗厂用电, 检修费用和运行费用均增加, 运行可靠性较差。

3) 疏水逐级自流与疏水泵相结合的系统, 在保证足够安全的前提下, 综合考虑了系统的经济性, 使疏水比较方便, 因而被广泛采用。然而疏水泵的位置不同对热经济性的影响也不同, 选择合理的位置及对提高机组热经济性是有一定的帮助。

因此, 本项目的内容主要为:

- 1) 针对不同容量机组, 分析在什么位置增加低压加热器的疏水泵。
- 2) 增加疏水泵后, 分析机组性能的提高幅度。
- 3) 增加疏水泵后, 分析系统的经济性。

2 600MW 机组低压加热器疏水系统分析

2.1 改造方案分析

图 1 为某电厂 N600-16.7/537/537 型机组的原则性热力系统图。若 8 号低加疏水装设疏水泵, 由于低加系统中 7 号低加与 8 号低加间没有凝结水连接管路, 并且 8 号低加的抽汽压力较低, 额定工况下只有 0.0214MPa, 疏水泵易发生汽蚀。因此 8 号低加疏水不具备装设疏水泵的条件。若 7 号低加疏水装设疏水泵, 由于需给两台低加 7A、7B 分别装设疏水泵才能维持低加的正常疏水水位, 同时考虑到其所需的安装空间又较大, 所以 7 号低加疏水不适合安装疏水泵。

因此, 可能的系统优化方案为:

方案一: 5 号低压加热器疏水增设疏水泵, 将该级疏水直接打入其主凝结水管路中。如图 2 (a) 所示;

方案二: 6 号低压加热器疏水增设疏水泵, 使得该级疏水直接打入其主凝结水管路中。如图 2 (b) 所示。

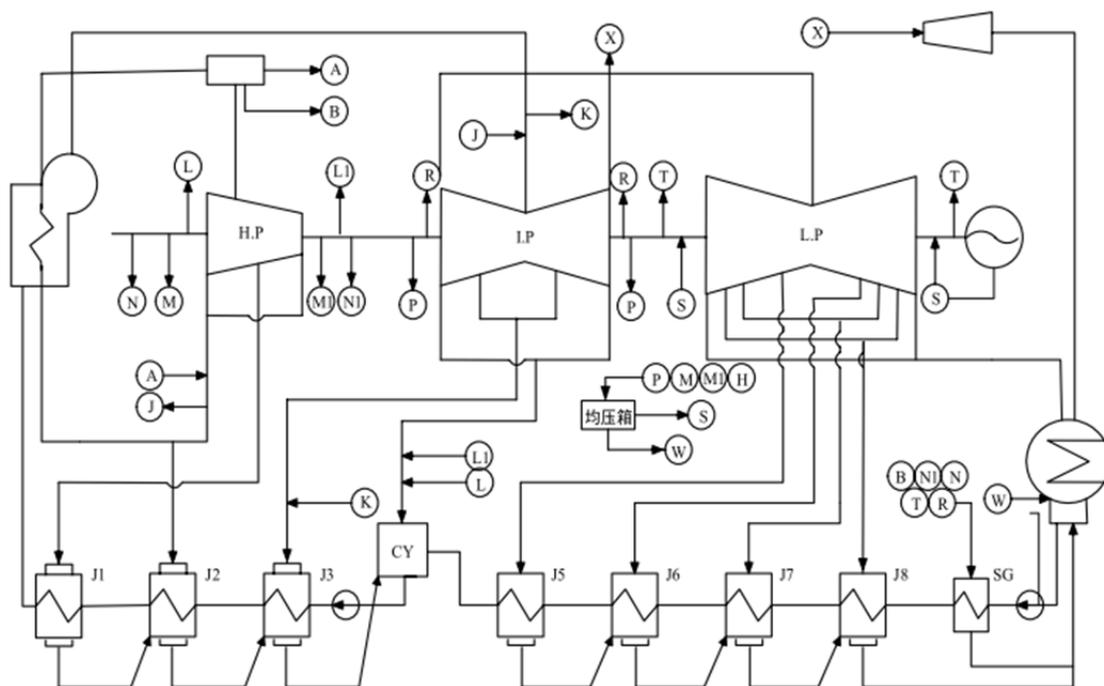


图1 某电厂 N600-16.7/537/537 型机组原则性热力系统图

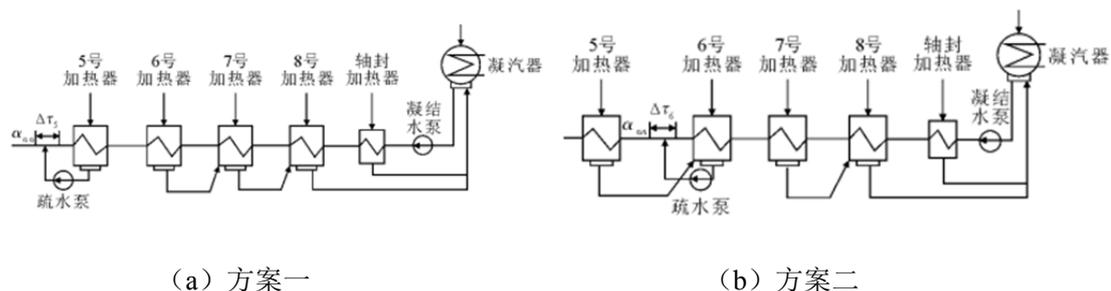


图2 600MW 机组低压加热器疏水系统优化方案

在分析低加疏水系统优化方案的热经济性能时，一般采用等效焓降法进行定量分析。

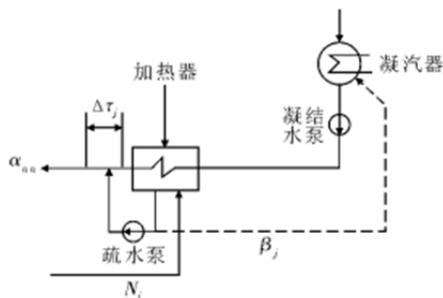


图3 加热器加装疏水泵的系统示意

如图 3 所示，如果加热器不安装疏水泵，疏水将逐级自流入到凝汽器，使疏水热量的利用场所发生了变化。一方面由于主凝结水与疏水混合，主凝结水的焓值提高了 $\Delta\tau_j$ ，其热量 $\alpha_{mn}\Delta\tau_j$ 不再利用于 No.j-1 能级上，因此做功损失为 $\alpha_{mn}\Delta\tau_j\eta_{j-1}$ 。另一方面，疏水逐级自流入凝汽器后，随主凝结水流入 No.j 加热器，吸收热量 $(\tau_j-\Delta\tau_j)\beta_j$ ，所以损失做功 $(\tau_j-\Delta\tau_j)\beta_j\eta_j$ 。由上可知，加热器装设疏水泵后，新蒸汽等效热降的增加值为：

$$\Delta N = \Delta\tau_j\alpha_{mn}\eta_{j-1} + \beta_j(\tau_j - \Delta\tau_j)\eta_j \quad (1)$$

式中， $\Delta\tau_j$ 表示主凝结水因与疏水混合而提高的焓值； α_{mn} 表示混合点混合后的主凝结水份额； β_j 表示流经疏水泵的疏水份额。

在实际计算中还应该考虑 No.j 加热器由汇集式变为疏水放流式（指取消疏水泵）后放热量的变化，所以对 No.j 加热器的放热量由 q_j 修正为 $q_j+\Delta q_j$ 。故加装疏水泵后新蒸汽等效热降变化为：

$$\Delta N = \Delta\tau_j\alpha_{mn}\eta_{j-1} + \beta_j(\tau_j - \Delta\tau_j)\eta_j \frac{q_j}{q_j - \Delta q_j} \quad (2)$$

根据 DL5000-2000《火力发电厂设计技术规程》以及国内外同类型机组的改造经验，选择低压加热器疏水泵为卧式多级离心泵。对于方案一，经过疏水泵的疏水份额 THA 工况下为 0.04741，75%THA 工况下为 0.04455。对于方案二，经过疏水泵的疏水份额 THA 工况下为 0.07450，75%THA 工况下为 0.07026。

考虑装设疏水泵消耗的厂用电量，最终计算结果见表 1。

表 1 低加疏水系统优化的热经济性能计算结果

优化方案	THA 工况			75%THA 工况		
	$\Delta\tau(\text{kJ/kg})$	$\Delta N(\text{kJ/k})$	$\Delta b_s(\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$	$\Delta\tau(\text{kJ/kg})$	$\Delta N(\text{kJ/k})$	$\Delta b_s(\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h}))$
方案一	4.2764	2.0495	-0.4439	3.8090	1.7758	-0.3450
方案二	3.6581	1.4420	-0.2926	2.6461	1.1384	-0.1893

由表 1 可知，在不同工况下，考虑疏水泵的耗电情况后两种低加疏水系统优

化方案都提高了机组的热经济性能,但 5 号低压加热器疏水装设疏水泵的热经济性优于 6 号低压加热器疏水加装疏水泵。其是由于 5 号加热器主凝结水焓值提高而利用于前一级的热量较多,以及凝汽器回收后的疏水又流入本级加热器放热,相当于回收的热量也较多。

2.2 经济性分析

在低压加热器疏水装设疏水泵可以提高经济性。另外,疏水泵采用变频调速控制方式,可消除出口调节阀节流造成的能量损耗,同时可有效地降低泵和电机的空载损耗。

1、节约的标准煤。

由于目前机组负荷并非都在额定工况下运行,假设机组负荷按照 600MW 运行 40%, 450MW 运行 20%小时, 300MW 运行 40%, 平均负荷为 450MW。则装设低压加热器疏水泵全年回收疏水节约的标准煤为: $1598.04 \times 0.4 + 1242.0 \times 0.2 + 691.64 \times 0.4 = 1164.27$ 吨标准煤/年。

2、疏水泵耗电成本。

假设电动机的效率为 98%, 变频器的效率为 97% (含变压器)。额定流量时疏水泵的轴功率为 63kW。那么其耗功为:

$$P = 0.4 \times \frac{63}{0.98 \times 0.97} + 0.2 \times \frac{63 \times 0.75^3}{0.98 \times 0.97} + 0.4 \times \frac{63 \times 0.5^3}{0.98 \times 0.97} = 35.42 \text{ kW}$$

若按年运行时间为 6500 小时, 假设电费以 0.4 元/kWh 计算, 则低压加热器疏水泵年耗电成本为: $35.42 \times 6500 \times 0.4 = 9.2$ 万元。

3、低加疏水泵改造费用。

低加疏水改造所需材料及费用预估见表 2。

表 2 低加疏水改造所需材料及费用预估

名称	要求	数量	预算价格	总计
疏水泵	卧式离心泵 (一用一备)	2	100000	200000
电动闸阀	带电动头	1	50000	50000
手动闸阀		1	3000	3000
止回阀		1	2500	2500
无缝钢管	由现场决定	1000 公斤	6 元/公斤	6000
焊条		40 公斤	7.5 元/公斤	300
法兰		8 片	50 元/片	400
焊丝		15 公斤	40 元/公斤	600
弯头		15 个	平均 280 元/个	4200
低压动力电缆		200 米	250 元/米	50000
变频器控制柜		1	90000	90000
角钢		80 公斤	10 元/公斤	800
电缆桥架		1	500	500
镀锌焊管		100 公斤	20 元/公斤	2000
铜线鼻子		20 个	20 元/个	400
PMOD		1	30000	30000
EMOD		2	20000	40000
继电器模块		1	60000	60000
电缆、屏蔽控缆		3500 米	10 元/米	35000
合计				575700

4、投资回收期

投资回收期是技术方案实现后投资回收需要的年限，在能源方案经济效益评

价方法中常用投资回收期法通过分析和计算节能技术改造方案的投资回收期,可以用来衡量方案的经济效益和方案的合理可行性。这种方法适用于新技术的开发和企业进行技术改造等投资方案的选择和评价。运用投资回收期进行评价决策时,采用的原始投资越少,年利润收入越多,则回收期越短的方案,其经济效果越好。

1) 方案的投资总额

疏水泵改造设备材料费总投资 57.57 万元,考虑安装费,合计投资总额约 65 万元。

2) 年利润总额

机组按每年节约 1164.27 吨标煤,每吨标准煤按 350 元/t 计算,折算人民币 40.75 万元,扣除疏水泵耗电费用 9.2 万元,疏水泵运行时年实际利润为 31.5 万元。

3) 投资回收期

$$\text{投资回收期} = \frac{\text{方案的投资总额}}{\text{年利润总额}} = \frac{65}{31.5} = 2.06 \text{ 年}$$

这说明该方案投资回收期较短,节能效果显著,故方案切实可取。

3 1000MW 机组低压加热器疏水系统分析

3.1 玉环电厂

玉环电厂 1000MW 超超临界机组原配的低压加热器疏水系统见图 4。

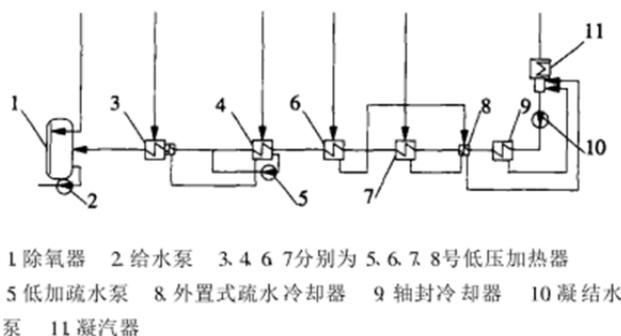


图 4 玉环电厂 6 号低加设疏水泵带外置式疏水冷却器方案

如图 4 所示，该系统中，6 号低压加热器设疏水泵，压力如按 1.47MPa 计，6 号低压加热器疏水经过疏水泵后焓值增加约 1.8kJ/kg，疏水泵电动机消耗的电功率约为 140kW。

如取消 6 号低压加热器疏水泵后，低压加热器疏水逐级自流入凝汽器。

通过比较计算：玉环电厂 1000MW 超超临界汽轮机在 TMCR 工况下，6 号低压加热器设疏水泵比疏水逐级方案多发电约 375kW，汽机热耗率降低约 2.7kJ/(kW·h)。扣除疏水泵的电耗后，约多供电 235kW。在年供电量相同的情况下，机组年节省标准煤约 350t。

3.2 N1000-25/600/600 机组分析

图 5 为某引进型 N1000-25/600/600 机组原则性热力系统图。回热系统采用三高四低一除氧的八级连接方式。

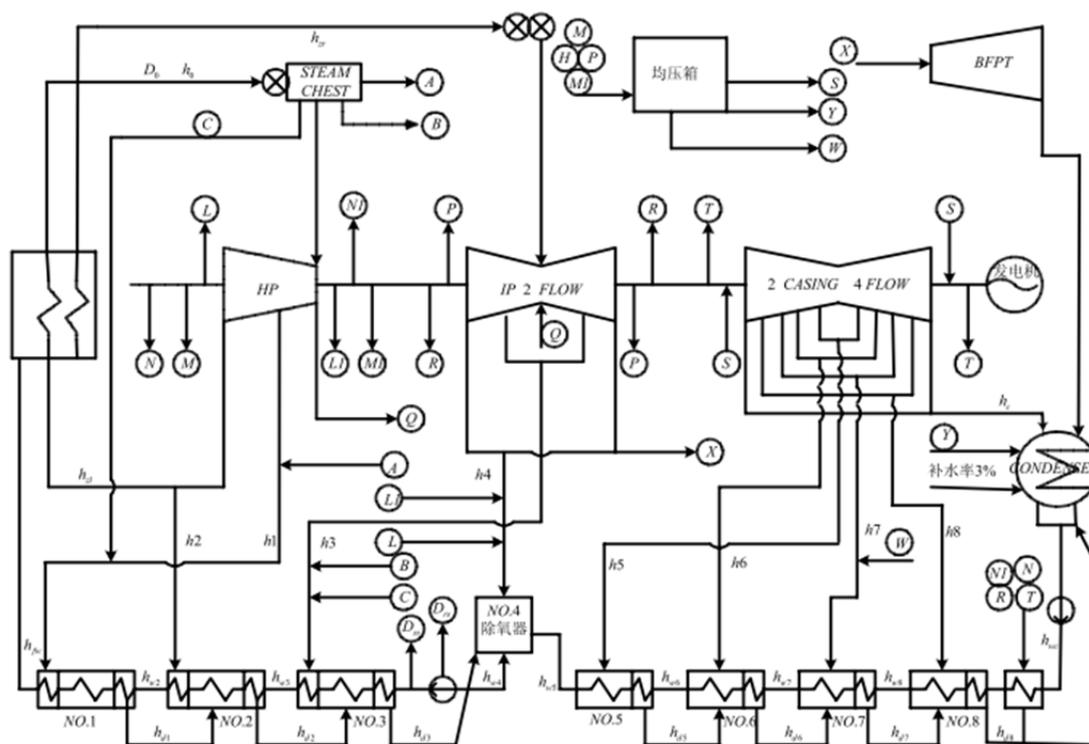


图 5 超超临界 N1000-25/600/600 机组原则性热力系统图

对该机组，原设计方案设为方案一。

增加方案二为：取消 6 号加热器的疏水冷却器，7、8 号疏水仍逐级自流入凝汽器热水井，如图 6 所示。

该方案系统改造简单，不增加任何设备。取消疏水冷却器后，6 号低加的疏水焓比下一级加热器的出口的主凝结水焓值高 99.2kJ/kg （由加热器内蒸汽压力对应的饱和水焓值计算而得），疏水冷却度 $\Delta \gamma_i=76.4\text{kJ/kg}$ ，即疏水端差（下端差）由以前的 5.6°C 变为 23.7°C 。

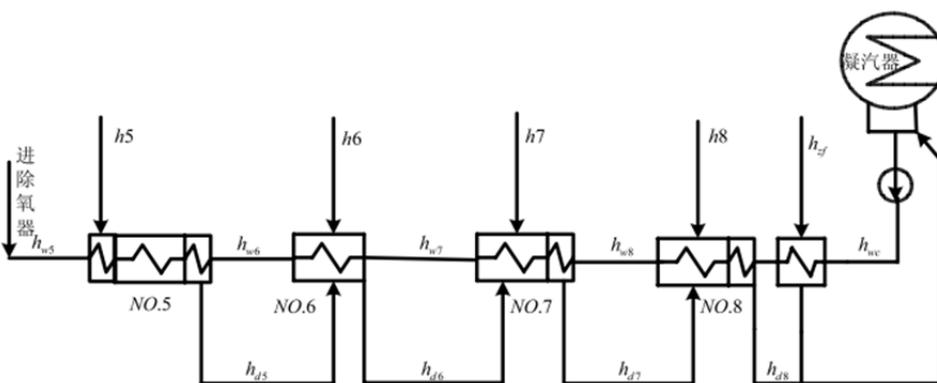


图 6 低加疏水逐级自流且 6 号低加取消疏水冷却器（方案二）

增加方案三为：取消 6 号加热器的疏水冷却器，在 6 号疏水口增设疏水泵，将疏水打至 6 号加热器出口与主凝结水混合后进入 5 号加热器，如图 7 所示。

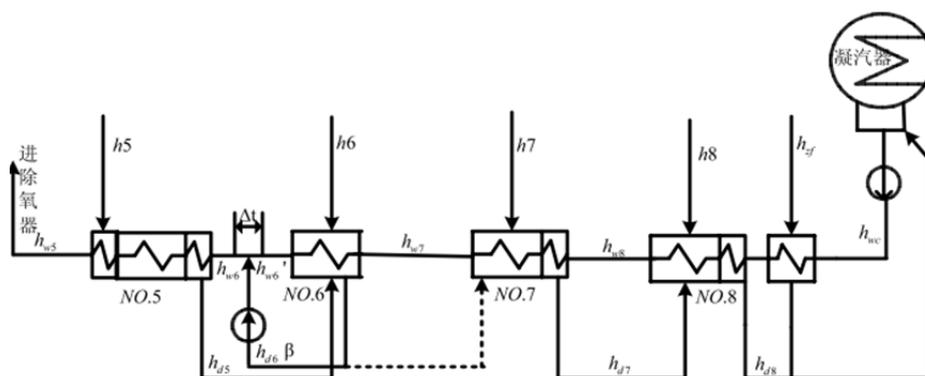


图 7 6 号低加取消疏水自流方式疏水口加装疏水泵（方案三）

疏水泵设置在汽机 0m 处，泵入口选在 6 号低加正常疏水出口处，泵出口联入 6 号低加主凝结水水侧出口处。泵出口、入口均装设逆止门，疏水泵的流量由变频电动机调节。疏水泵的电功率为 315kW ，其出口压力为 1.47MPa ，6 号低压加热器疏水经过疏水泵后焓值增加 1.8kJ/kg 。

6号低加增设疏水泵后，由于6号低加疏水的混合，主凝结水焓值可提高0.93kJ/kg。倘若低加疏水泵故障，6号低加疏水将通过6号低加危疏门流入疏水扩容器。

增加方案四为：本机组7、8号低压加热器为非共壳体设计，双压凝汽器中各凝汽器相对比较独立。考虑取消7号加热器的输水冷却器，在7号疏水口增设疏水泵，将疏水打至7号加热器出口与主凝结水混合后进入6号加热器，如图8所示。

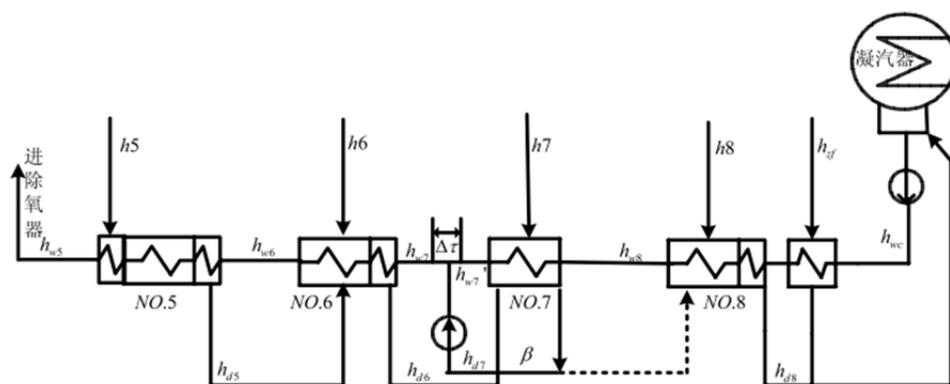


图8 7号低加取消疏水自流方式疏水口加装疏水泵（方案四）

疏水泵的电功率为367KW，其扬程为1.49MPa，7号低压加热器疏水经过疏水泵后焓值增加1.6kJ/kg，7号低加增设疏水泵后，由于7号低加疏水的混合，主凝结水焓值可提高0.84kJ/kg。

以上四种方案的计算结果见表3和表4。

表3 TRL下各优化方案低压加热器的抽汽系数

各方案	各方案中低压加热器的抽汽系数			
	α_5	α_6	α_7	α_8
方案一	0.0275	0.0255	0.0209	0.0151
方案二	0.0275	0.0604	0.0167	0.0139
方案三	0.0272	0.0617	0.0188	0.01382
方案四	0.0275	0.0252	0.0615	0.1253

表 4 各优化方案对机组热经济指标的影响

各方案	η_i (%)	q [kJ/(kw·h)]	b_{fd} [g/(kw·h)]	绝对电效率(%)
方案一	0.4603	7985.4	290.86	44.2613
方案二	0.4600	7988.5	290.97	44.2781
方案三	0.4606	7981.2	290.71	44.2385
方案四	0.4605	7981.9	290.73	44.2389

从上述两表中可以看出：

1) 方案三（1号~3号高加及5号低加有蒸汽冷却段及疏水冷却段，6号低加带疏水泵，7号、8号低加设有疏水冷却段）中6号加热器疏水口增设疏水泵，比方案一中增设内置式疏水冷却器和方案二中无疏水泵和疏水冷却器时，机组热经济性要好的多。

低加疏水采用疏水泵比采用疏水冷却器时热耗率降低 4.2kJ/(kw·h)，煤耗降低 0.15g/(kw·h)，绝对电耗率增加 0.00228。

2) 扣除疏水泵电耗后，方案三要比方案一多发电约 370kW。在年供电量相同的情况下，一台机组年节省标准煤约 342t，节能效果相当显著。

3) 方案四相比方案三，机组多发电约 55kW，疏水泵电耗增加约 52kW，两者几乎相抵。且凝结水泵此时的选型较小，一旦7号疏水泵发生故障后，凝结水泵的工作负荷过大，不利设备安全运行。相比之下，低加布置方式采用方案三的设计方案机组热经济性比较好。但考虑到疏水泵为旋转机械，现场的事故率很高，每年的维修费用较高。因此，实际改造中还应考虑技术成本。

4 项目建议书单位介绍

4.1 华北电力大学

华北电力大学是教育部直属的国家“211工程”重点建设大学。学校校部设

在北京,分设保定校区。学校现有教职工 3 千余人,全日制在校本科生 2 万余人,研究生 7 千余人。学校占地 1600 余亩,建筑面积 100 余万平方米。

学校 1958 年创建于北京,原名北京电力学院。1969 年由北京迁至河北,先后更名为河北电力学院、华北电力学院。1995 年华北电力学院与北京动力经济学院(含华北电力学院北京研究生部)合并组建为华北电力大学。2003 年,在国家电力体制改革中,学校由国家电力公司划转教育部管理,同时组建了由国家电网公司、中国南方电网公司、中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司和中国电力投资集团公司组成的理事会与教育部共建华北电力大学。2013 年,华北电力大学理事会换届,理事会成员单位包括七大电力央企和中国电力企业联合会、华北电力大学等九家单位。

半个多世纪以来,学校承载着为国家能源电力事业培养高素质人才与推进科技进步的历史使命。进入新世纪以后,学校贯彻“学科立校、人才强校、科研兴校、特色发展”的方针,抓紧机遇,加快发展,实现了跨越式快速发展。

学校设有电气与电子工程学院、能源动力与机械工程学院、控制与计算机工程学院、经济与管理学院、环境科学与工程学院、可再生能源学院、核科学与工程学院、数理学院、人文与社会科学学院、外国语学院等十大学院,设有 59 个本科专业。学校拥有“电力系统及其自动化”、“热能工程”2 个国家级重点学科、25 个省部级重点学科,有 5 个博士后科研流动站,5 个一级学科、30 个二级学科博士学位授权点,23 个一级学科、123 个二级学科硕士学位授权点。此外,学校具备 MBA 和工程硕士专业学位授予权,形成了培养本科、硕士、博士的完整教育体系。

学校拥有一支积极进取、素质优良、结构合理的高水平师资队伍。现有专职教师 1810 人,其中中国工程院院士 1 人、双聘院士 5 人、国家“千人计划”6 人、国家“青年千人计划”2 人、“国家高层次人才特殊支持计划”2 人、“973”首席科学家 5 人、国家级教学名师 1 人、国家杰出青年科学基金获得者 7 人、“长江学者”4 人、国家“百千万人才工程”9 人,39 人入选教育部“新世纪优秀人

才支持计划”，4支团队列入教育部“长江学者和创新团队发展计划”。

学校把人才培养作为根本任务，形成了“厚基础、重实践、强能力、求创新”的人才培养特色，成为教育部首批“卓越工程师培训计划”实施高校。学校现有6门国家级精品课程，2个国家级教学名师团队，11个国家级特色专业，3个国家级实验教学示范中心，3个国家级工程实践教育中心，2个国家级虚拟仿真实验教学中心以及10个省部级实验教学中心，学校以“优秀”成绩通过了教育部本科教学工作水平评估。

学校以服务国家重大发展战略为己任，积极参与国家创新体系建设，现有3个国家级科技创新平台、3个教育部重点实验室、16个省部级科技创新平台和研究基地；近年来，学校在新能源发电、特高压、智能电网、高效洁净燃煤发电技术、核电技术等重要领域都取得了巨大成果。“十五”以来，承担国家科技重大专项、“973”、“863”、国家科技支撑计划、国家自然科学基金等纵向课题1900余项，获国家级、省部级科技进步奖173项。新世纪以来，学校科研经费快速增长，科技论文国际三大检索排名在教育部直属高校中排在前列，工程学进入ESI国际前1%行列。

4.2 保定华电电力设计研究院有限公司

保定华电电力设计研究院有限公司，前身为华电保定电力设计研究院，成立于1980年，隶属于华北电力大学，于2004年1月完成了改制工作，成立了有限责任公司。截止2011年底，全公司在册员工82人，直接从事设计生产人员70人，各类管理人员8人；其中具备高级专业技术资格的人员24人，具备中级专业技术资格人员37人，具有国家各类注册执业资格18项人次，是一支符合国际型设计公司发展需要的复合型人才队伍。

公司现为乙级勘察设计单位，是一支电力本行业的专业电力设计队伍。公司持有经电力规划设计总院核准、建设部统一颁发的工程设计资质证书（证书编号为A213007300），主要从事电力系统规划、发电工程（燃煤、燃气、余热、生物

质能、脱硫脱硝等)和输变电工程,以及工业与民用建筑工程的技术咨询、工程设计、项目总承包等业务。可承接单机 100MW 及以下容量机组的电力工程和乙级资质范围内的工业与民用建筑工程。

5 项目组织模式

本项目所涉及的机组类型众多,因此,本项目由中标方组织,项目建议书单位予以配合。

项目建议书单位一,华北电力大学的职责是:按照机组特性,进行计算,计算内容包括回热系统在内的机组的热力计算。确定低压加热器疏水泵的位置。进行技术经济性分析等。同时根据计算结果,进行主要设备选型。

项目建议书单位二,保定华电电力设计研究院有限公司按照计算结果,进行系统布置,达到施工要求。最后进行经济核算。

以上项目建议书单位不负责施工,但对于计算结果和施工图负责。对于项目实施中的出现的问题,可以予以指导。

其它未尽事宜,双方均可友好协商。