



利用蒸汽引射器的热电联供系统技术与经济性

于洪浩¹, 李 飞¹, 徐丁华², 苏湛航¹, 赵 建¹

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 第一设计研究院, 天津 300381;

2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 第六设计研究院, 天津 300381)

摘 要: 结合工程实例, 提出利用蒸汽引射器(以下简称引射器)对 2 台额定发电能力为 660 MW 的发电机组进行余热回收, 采用中压缸抽汽, 引射低压缸排汽, 提高低压缸排汽品位, 实现对热网回水的逐级升温。对热电联供系统工艺流程、设备选型进行分析。针对典型供暖期, 对热电联供系统供暖期总耗煤量、供热耗煤量、发电耗煤量进行测算。将规模相当的热电分供系统(采用传统燃煤锅炉房供热, 燃煤电厂发电)作为比较对象, 测算热电联供系统的节煤量, 热电联供系统供暖期节煤量为 87.32×10^4 t。

关键词: 热电联供; 蒸汽引射器; 余热回收

中图分类号: TU995.7 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-4416(2019)07-0B04-05

1 概述

本文提出利用蒸汽引射器(以下简称引射器)对 2 台额定发电能力 660 MW 发电机组(抽汽凝气式)进行余热回收供热改造, 通过消耗部分中压缸抽汽, 引射低压缸排汽, 提高低压缸排汽品位, 实现对热网回水的逐级升温。

本文中的压力均为绝对压力, 项目所在地为银川, 大气压力取 89.61 kPa。中压缸抽汽、引射器出口混合汽为过热蒸汽, 低压缸排汽、引射器中间蒸汽为饱和蒸汽, 凝汽器出口凝结水、引射器喷水(来自凝汽器)为饱和水。对于过热蒸汽, 根据过热蒸汽温度、压力, 采用 IAPWS-IF97 软件对其比焓进行计算^[1]。对于饱和蒸汽、饱和水, 根据温度确定其比焓^[2]。虽然引射器出口混合汽为稍过热蒸汽, 但过热度非常有限, 在确定其比焓时, 按饱和蒸汽处理。

2 项目概况

某电厂配置 2 台额定发电功率 660 MW 发电机组, 采用超临界燃煤锅炉供蒸汽。发电机组额定工况进汽参数为: 566 °C、24.2 MPa、1 918.03 t/h。

供热系统设计热负荷(考虑热网输配效率)为 1 605 MW, 设计供、回水温度为 125、25 °C, 供热介质设计质量流量为 13 800 t/h, 供暖期采用质调节。供暖室外计算温度、平均温度按 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》附录 A 确定, 供暖室内设计温度取 18 °C, 供暖期为 151 d, 室外温度的延续时间按无因次综合公式法确定^[3]。供暖期室外温度、延续时间、热负荷、供水温度见表 1。

表 1 供暖期室外温度、延续时间、热负荷、供水温度

室外温度/°C	延续时间/h	热负荷/MW	供水温度/°C
-13	120	1 605	125.0
-12	129	1 605	125.0
-11	148	1 605	125.0
-10	161	1 571	122.9
-9	171	1 514	119.3
-8	179	1 458	115.8
-7	185	1 402	112.3
-6	190	1 346	108.9

作者简介: 于洪浩, 男, 工程师, 本科, 从事集中供热工程设计工作。

收稿日期: 2019-01-12; **修回日期:** 2019-03-20

续表 1

室外温度/℃	延续时间/h	热负荷/MW	供水温度/℃
-5	196	1 290	105.4
-4	200	1 234	101.9
-3	203	1 178	98.5
-2	208	1 122	95.0
-1	210	1 066	91.5
0	214	1 010	88.0
1	217	954	84.5
2	219	897	80.9
3	222	841	77.5
4	225	785	74.0
5	227	729	70.5

3 热电联供系统流程

3.1 运行策略

热电联供系统设计工况的工艺流程见图 1。随着室外温度升高,供暖热负荷减小,通过减少中压缸抽汽量降低热网加热器输出热功率。当热网加热器完全退出后,根据实际供暖热负荷调整引射器本体的电动控制阀,调整引射器自用中压缸抽汽、低压缸排汽、喷水质量流量,从而调整引射器前置凝汽器的输出热功率。

供暖期,1、2号前置凝汽器按设计热负荷运行,保持2号机组中压缸设计抽汽质量流量不变(350 t/h),通过调整1号机组中压缸抽汽量调整热网加热器的输出热功率。

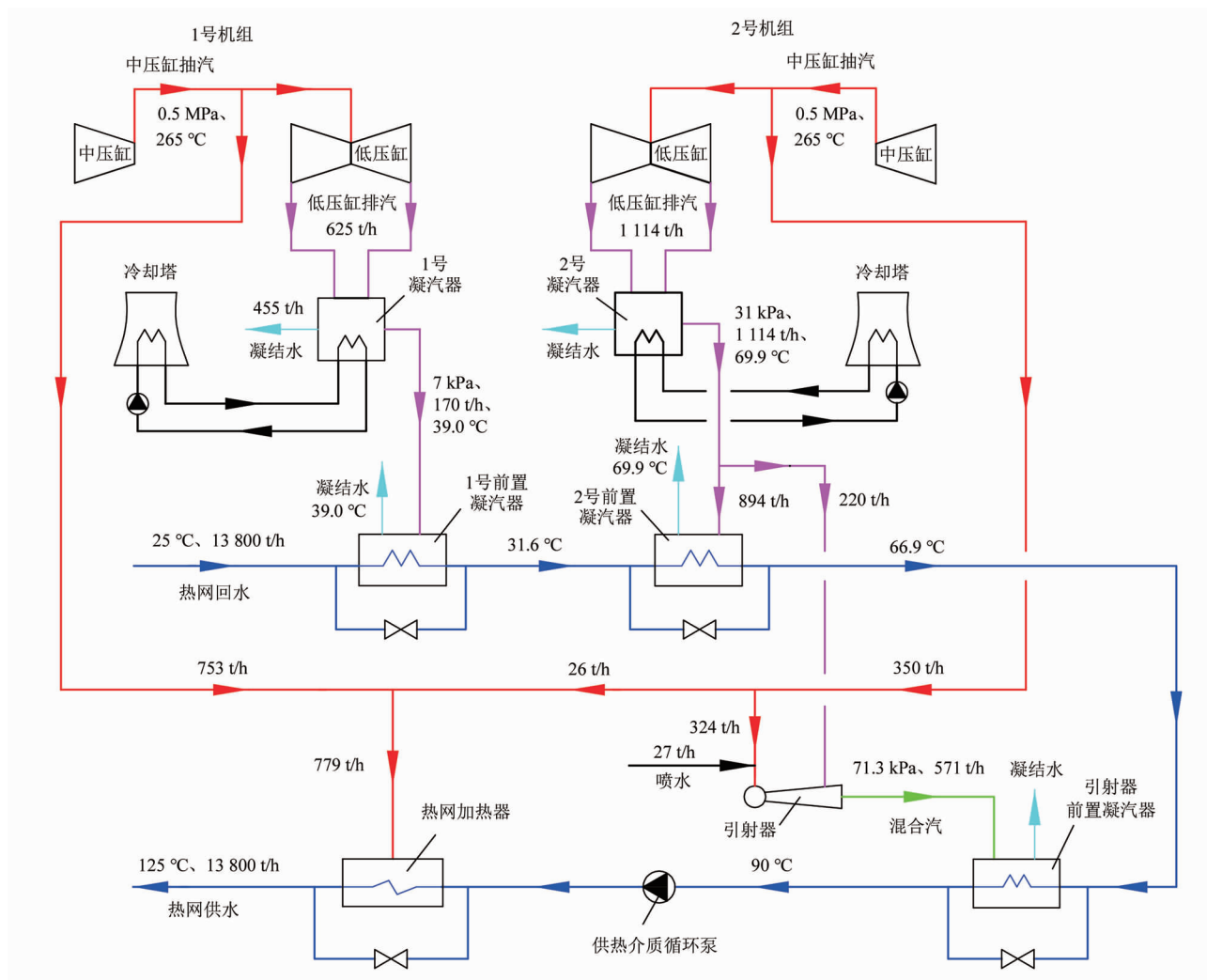


图1 热电联供系统设计工况的工艺流程

3.2 设计工况下的工艺流程

由 1、2 号汽轮机中低压缸连通管分别抽汽,抽汽参数均为 0.5 MPa、265 ℃。1 号汽轮机中压缸抽

汽量为 753 t/h,2 号汽轮机中压缸抽汽量为 350 t/h,总抽汽量为 1 103 t/h。除 324 t/h 中压缸抽汽供引射器使用外,其余 779 t/h 中压缸抽汽供热网加

热器使用。

通过管道将低压缸排汽从1、2号凝汽器中引出,分别进入1、2号前置凝汽器(分别设置于1、2号凝汽器附近)逐级加热热网回水。1号机组低压缸排汽压力为7 kPa,排汽量为625 t/h。2号机组低压缸排汽压力为31 kPa,排汽量为1 114 t/h。1号机组部分低压缸排汽(质量流量为170 t/h)进入1号前置凝汽器加热热网回水,其余低压缸排汽(质量流量为455 t/h)由1号凝汽器冷凝。2号机组部分低压缸排汽(质量流量为894 t/h)进入2号前置凝汽器加热热网回水,其余低压缸排汽(质量流量为220 t/h)进入引射器。

引射器自用中压缸抽汽经喷水(来自1号凝汽器出口凝结水)降温后进入引射器,引射2号机组部分低压缸排汽后,排出压力为71.3 kPa的混合汽(质量流量为571 t/h),作为引射器前置凝汽器供汽。

热网回水分别经1号前置凝汽器、2号前置凝汽器、引射器前置凝汽器、热网加热器,温度由25℃升至125℃。

3.3 设备选型

① 1、2号前置凝汽器

1、2号前置凝汽器高温侧进口蒸汽温度取1、2号汽轮机低压缸排汽压力对应的饱和温度,即39.0、69.9℃。在设计时,将1号前置凝汽器低温侧出口与高温侧进口传热端差取7.4℃,即1号前置凝汽器低温侧出口供热介质温度为31.6℃。将2号前置凝汽器低温侧出口与高温侧进口的传热端差取3℃,即1号凝汽器低温侧出口供热介质温度为66.9℃。1、2号前置凝汽器高温侧出口凝结水温度为饱和温度39.0、69.9℃。

前置凝汽器热功率 Φ_f 的计算式为:

$$\Phi_f = q_{m,L}(h_L - h_w) \quad (1)$$

式中 Φ_f ——前置凝汽器热功率,kW

$q_{m,L}$ ——进入前置凝汽器的低压缸排汽质量流量,kg/s

h_L ——低压缸排汽比焓,kJ/kg

h_w ——前置凝汽器高温侧出口凝结水比焓,kJ/kg

1、2号机组的低压缸排汽比焓分别为2 571.8、2 625.9 kJ/kg,1、2号前置凝汽器高温侧出口凝结水比焓分别为163.4、292.4 kJ/kg。将已知参数代

入式(1),可计算得到1、2号前置凝汽器的设计热功率分别为106.1、579.5 MW。

② 引射器

引射器工作原理见图2。对于热电厂,引射器通过少量中压缸抽汽抽引低压缸排汽,与低压缸排汽相比,混合后的蒸汽(以下称为混合汽)品位有所提高。在引射器入口前对中压缸抽汽(过热蒸汽)进行喷水(取自1号前置凝汽器高温侧出口凝结水)的作用是使中压缸抽汽降温,将中压缸抽汽处理成稍过热蒸汽。引射器在工作过程中遵循质量守恒、能量守恒,考虑通过引射器的气体流速较快,近似将引射器的工作过程视为绝热。

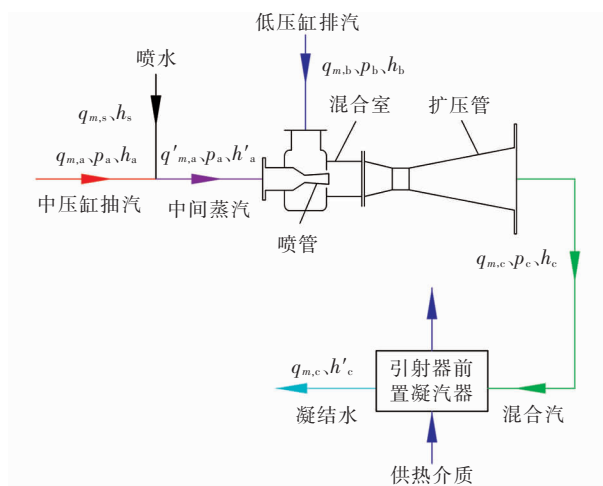


图2 引射器工作原理

计算引射器前置凝汽器热功率的方程组为:

$$q'_{m,a} = q_{m,a} + q_{m,s} \quad (2)$$

$$q_{m,c} = q_{m,a} + q_{m,b} + q_{m,s} \quad (3)$$

$$h_c q_{m,c} = h'_a q'_{m,a} + h_b q_{m,b} \quad (4)$$

$$h'_a q'_{m,a} = h_a q_{m,a} + h_s q_{m,s} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{q_{m,b}}{q'_{m,a}} \quad (6)$$

$$\Phi = q_{m,c}(h_c - h'_c) \quad (7)$$

式中 $q'_{m,a}$ ——引射器中间蒸汽(由喷水减温后引射器自用中压缸抽汽)的质量流量,kg/s

$q_{m,a}$ ——引射器自用中压缸抽汽的质量流量,kg/s

$q_{m,s}$ ——引射器喷水的质量流量,kg/s

$q_{m,c}$ ——引射器混合汽、引射器前置凝汽器出口凝结水的质量流量,kg/s

$q_{m,b}$ ——引射器自用低压缸排汽的质量流

量, kg/s

 h_c ——引射器混合汽的比焓, kJ/kg h'_a ——引射器中间蒸汽比焓, kJ/kg h_b ——引射器自用低压缸排汽比焓, kJ/kg h_a ——引射器自用中压缸抽汽比焓, kJ/kg h_s ——引射器喷水的比焓, kJ/kg μ ——引射比 Φ ——引射器前置凝汽器的热功率, kW h'_c ——引射器前置凝汽器出口凝结水(为饱和水)的比焓, kJ/kg

引射比 μ 由 p_c/p_b 、 p_b/p_a 查表(由引射器生产厂家提供)确定。在式(2)~(7)中, $q_{m,a}$ 、 $q_{m,b}$ 、 $q_{m,s}$ 、 $q_{m,c}$ 、 $q'_{m,a}$ 、 h_c 为未知量,其他为已知量。

引射器前置凝汽器低温侧供热介质出口温度设定为90℃,引射器前置凝汽器(采用混合式凝汽器,低温侧出口与高温侧进口的传热端差可实现0.2~0.5℃)低温侧出口与高温侧进口的传热端差取0.5℃,可确定引射器前置凝汽器高温侧进口蒸汽饱和温度为90.5℃,对应饱和蒸汽压力(即引射器混合汽 p_c)为71.3 kPa。

根据设计条件, $p_c/p_b=2.30$ 、 $p_b/p_a=0.06$,通过查表可确定引射器引射比 μ 为0.63。其他已知参数:引射器前置凝汽器的设计热功率 Φ 为371 MW,自用中压缸抽汽比焓 h_a 为2992.2 kJ/kg,中间蒸汽比焓 h'_a 为2748.1 kJ/kg,自用低压缸排汽比焓 h_b 为2625.9 kJ/kg,喷水比焓 h_s 为292.4 kJ/kg,引射器前置凝汽器出口凝结水比焓 h'_c 为379.1 kJ/kg。

根据以上已知参数,采用式(2)~(7)可计算得到引射器自用中压缸抽汽质量流量 $q_{m,a}$ 为324 t/h、引射器自用低压缸排汽的质量流量 $q_{m,b}$ 为220 t/h,引射器喷水的质量流量 $q_{m,s}$ 为27 t/h,引射器混合汽、引射器前置凝汽器出口凝结水的质量流量 $q_{m,c}$ 为571 t/h。

③ 热网加热器

根据热网加热器低温侧进出口供热介质温度及质量流量,可计算得到热网加热器的设计热功率为562 MW。

4 能耗分析

4.1 供暖期运行参数

供暖期,1、2号前置凝汽器低压缸排汽质量流量保持170.894 t/h,保持2号机组中压缸抽汽质量流量为350 t/h,通过调整1号机组中压缸抽汽量调

整热网加热器的输出热功率。

以室外温度0℃为例进行计算,当室外温度为0℃时,供暖热负荷为1010 MW,1、2号前置凝汽器的输出热功率保持106.1、579.5 MW。由此可计算得到,引射器前置凝汽器实际热负荷为324.4 MW。此时,引射器前置凝汽器低温侧出口供热介质温度为88℃,引射器前置凝汽器低温侧出口与高温侧进口的传热端差仍取0.5℃,可确定引射器前置凝汽器高温侧进口蒸汽饱和温度为88.5℃,对应饱和压力为66.3 kPa。通过查表,可确定引射器引射比为0.72。根据已知参数,由式(2)~(7)可计算得到引射器自用中压缸抽汽质量流量为287 t/h,引射器自用低压缸抽汽质量流量为223 t/h,引射器喷水的质量流量为24.1 t/h,引射器混合汽的质量流量为534 t/h。此时,热网加热器退出运行,引射器用低压缸抽汽质量流量比设计工况稍过量影响不大。采用以上方法,对不同室外温度条件下的系统运行参数进行计算(见表2)。表2中 t_{out} 代表引射器前置凝汽器低温侧供热介质出水温度,单位为℃。 $q_{m,n}$ 代表热网加热器自用中压缸抽汽质量流量,单位为t/h。

由表2可知,随着室外温度上升,引射器前置凝汽器低温侧供热介质出水温度不断下降,室外温度大于或等于0℃时,热网加热器退出运行。由表1、2可计算得到,供暖期中压缸总抽汽量为 193×10^4 t,供暖期低压缸总排汽量为 456×10^4 t。

表2 不同室外温度条件下的系统运行参数

室外温度 /℃	t_{out} /℃	$q_{m,a}$ /(t·h ⁻¹)	$q_{m,b}$ /(t·h ⁻¹)	$q_{m,n}$ /(t·h ⁻¹)
-13	90.0	324	220	779
-12	90.0	324	220	779
-11	90.0	324	220	779
-10	90.0	324	220	732
-9	90.0	324	220	652
-8	90.0	324	220	574
-7	90.0	324	220	496
-6	90.0	324	220	421
-5	90.0	324	220	343
-4	90.0	324	220	265
-3	90.0	324	220	189
-2	90.0	324	220	111
-1	90.0	324	220	33
0	88.0	287	223	0
1	84.5	198	218	0

续表2

室外温度 /℃	t_{out} /℃	$q_{m,a}$ /(t·h ⁻¹)	$q_{m,b}$ /(t·h ⁻¹)	$q_{m,n}$ /(t·h ⁻¹)
2	80.9	146	184	0
3	77.5	110	139	0
4	74.0	73	92	0
5	70.5	37	46	0

4.2 供暖期耗煤量

① 总耗煤量

1、2号机组供暖期总耗热量 $Q_{\text{sum,h}}$ 的计算式为:

$$Q_{\text{sum,h}} = \sum_{i=1}^{19} (t_i P_{i,1} q_{i,1} + t_i P_{i,2} q_{i,2}) \quad (8)$$

式中 $Q_{\text{sum,h}}$ ——1、2号机组供暖期总耗热量, MJ
 t_i ——第 i 个室外温度的延续时间(见表1),
h

$P_{i,1}$ 、 $P_{i,2}$ ——第 i 个室外温度下 1、2 号机组
发电功率, MW

$q_{i,1}$ 、 $q_{i,2}$ ——第 i 个室外温度下 1、2 号机组单
位发电量耗热量, MJ/(MW·h)

抽汽工况下, 机组发电功率、单位发电量耗热量根据机组中压缸抽汽质量流量查汽轮机抽汽工况热平衡图(由汽轮机生产厂家提供)获得。不同室外温度下, 1、2号中压缸抽汽质量流量由表2数据计算得到。由表1中各室外温度延续时间及不同中压缸抽汽质量流量对应的机组发电功率, 可计算得到供暖期1、2号机组总发电量为 $47.4 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

1、2号机组供暖期总耗煤量 $m_{\text{sum,c}}$ 的计算式为:

$$m_{\text{sum,c}} = \frac{Q_{\text{sum,h}}}{\eta_1 \eta_2 Q_L} \quad (9)$$

式中 $m_{\text{sum,c}}$ ——1、2号机组供暖期总耗煤量, kg
 η_1 ——锅炉热效率, 取 0.92
 η_2 ——电厂管道效率, 取 0.98
 Q_L ——标准煤低位发热量, MJ/kg, 取 29.308 MJ/kg

根据已知参数, 由式(9)可计算得到供暖期1、2号机组总耗煤量为 $133.56 \times 10^4 \text{ t}$ 。

② 供热耗煤量

供暖期供热耗煤量 m 的计算式为:

$$m = \frac{Q_h}{\eta_1 \eta_2 Q_L} \quad (10)$$

式中 m ——供暖期供热耗煤量, kg
 Q_h ——供暖期总供热量, MJ

由表1数据, 可计算得到供暖期总供热量为 $1\,537 \times 10^4 \text{ GJ}$, 进而由式(10)计算得到供暖期供热耗煤量为 $58.17 \times 10^4 \text{ t}$ 。

③ 发电耗煤量

供暖期发电耗煤量为总耗煤量与供热耗煤量的差, 可计算得到供暖期发电耗煤量为 $75.39 \times 10^4 \text{ t}$ 。由供暖期1、2号机组总发电量, 可计算得到供暖期单位发电量耗煤量为 $159.1 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

4.3 节煤量

将热电分供系统作为比较对象, 计算分析热电联供系统的节煤量。热电分供系统采用传统燃煤锅炉房供热, 燃煤电厂发电。

热电分供系统燃煤锅炉热效率按 80% 计算, 锅炉房管道效率按 0.98 计算, 根据供暖期供热量可计算得到热电分供系统供暖期耗煤量为 $66.89 \times 10^4 \text{ t}$ 。热电分供系统的单位发电量耗热量按铭牌工况的 $8\,584.7 \text{ kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计算, 发电量仍取热电联产系统发电量 $47.4 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 可计算得到热电分供系统发电耗煤量为 $153.99 \times 10^4 \text{ t}$ 。由以上数据, 可计算得到热电分供系统供暖期总耗煤量为 $220.88 \times 10^4 \text{ t}$ 。最终计算得到, 热电联供项目供暖期节煤量为 $87.32 \times 10^4 \text{ t}$ 。

5 结论

结合工程实例, 提出利用蒸汽引射器对 2 台额定发电能力为 660 MW 的发电机组进行余热回收, 采用中压缸抽汽, 引射低压缸排汽, 提高低压缸排汽品位, 实现对热网回水的梯级升温。对热电联供系统工艺流程、设备选型进行分析。针对典型供暖期, 对热电联供系统供暖期总耗煤量、供热耗煤量、发电耗煤量进行测算。将规模相当的热电分供系统(采用传统燃煤锅炉房供热, 燃煤电厂发电)作为比较对象, 测算热电联供系统的节煤量, 热电联供系统供暖期节煤量为 $87.32 \times 10^4 \text{ t}$ 。

参考文献:

- [1] 徐杰彦, 张晓钰. 基于 IAPWS-IF97 的水和水蒸汽性质计算软件[J]. 发电设备, 2001(5): 33-36.
- [2] 廉乐明, 李力能, 吴家正, 等. 工程热力学[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 251-252.
- [3] 贺平, 孙刚. 供热工程[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 120-121.