

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212267

基于向心涡轮机发电的工业供热蒸汽能量 梯级利用系统性能分析

张波¹, 李峰¹, 余志文², 顾煜炯², 石磊³, 赵文博⁴

(1. 华电章丘发电有限公司, 山东 济南 250216;

2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206;

3. 石家庄良村热电有限公司, 河北 石家庄 052160;

4. 华北电力大学国家火力发电工程技术研究中心, 北京 102206)

[摘要] 针对纯凝机组工业供热改造普遍存在供热供需参数不匹配的现象, 考虑工业供热高温高压工况下的适用性, 提出采用向心涡轮机膨胀做功的方式对抽汽进行供需参数匹配, 实现抽汽能量梯级利用。以某国产 330 MW 热电联产机组工业供热改造为例, 构建了热力系统模型, 对比传统直接减温减压和采用向心涡轮机发电 2 种供热参数匹配方案的系统性能, 评估系统不同供热流量和变工况下各性能指标的变化规律。计算结果表明, 与减温减压方式相比, 相同供热参数下向心机涡轮供热参数匹配方案的综合效益显著, 额定工况下主机发电煤耗率可降低 0.89 g/(kW·h), 抽汽焓效率可达 97.66%, 直接经济效益相对提升 1.04%, 碳交易成本相对减少 0.34%, 且系统各方面相对性能优势随系统供热流量的增加而扩大。

[关键词] 工业供热; 向心涡轮机; 热能梯级利用; 系统综合评估

[引用本文格式] 张波, 李峰, 余志文, 等. 基于向心涡轮机发电的工业供热蒸汽能量梯级利用系统性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(8): 87-95. ZHANG Bo, LI Feng, YU Zhiwen, et al. Performance analysis of cascade utilization system for industrial heating steam energy based on centripetal turbine power generation[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(8): 87-95.

Performance analysis of cascade utilization system for industrial heating steam energy based on centripetal turbine power generation

ZHANG Bo¹, LI Feng¹, YU Zhiwen², GU Yujiong², SHI Lei³, ZHAO Wenbo⁴

(1. HuadianZhangqiu Power Generation Co., Ltd., Jinan 250216, China;

2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. Shijiazhuang Liangcun Thermal Power Co., Ltd, Shijiazhuang 052160, China;

4. National Thermal Power Engineering & Technology Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: There is a common mismatch between heating supply and demand parameters for industrial heating retrofits of pure condensing thermal power units, and the benefits of thermal power plants can be improved by adopting a reasonable matching scheme of supply and demand parameter. Aiming at the phenomenon of energy mismatch caused by the excessively high extraction parameters of the unit in the industrial heating scene, considering that it is suitable for high-parameter industrial heating, this paper proposes a scheme of using the centripetal turbines for cascade utilization of extraction steam. Taking the industrial heating transformation of a domestic 330 MW cogeneration unit as an example, the thermal system model was constructed to comprehensively evaluate the performance indicators changes of the system from three aspects: thermal performance, exergy environment and economic performance. We also comprehensively compared the effect of upgrading the direct heat reduction and pressure reduction method to the radial turbine power generation steam energy cascade utilization scheme. The calculation results show that under the same heating parameters, compared with the traditional method of temperature reduction and pressure reduction, the comprehensive benefits of the industrial heating steam energy

修回日期: 2022-12-15 网络首发日期: 2023-04-27

基金项目: 中国华电集团科技项目 (CHDK21-02-163)

Supported by: China Huadian Group Technology Project (CHDK21-02-163)

第一作者简介: 张波 (1981), 男, 高级工程师, 主要研究方向为能源动力, zqczhb@163.com。

cascade utilization scheme based on centripetal turbine power generation is significant. The specific performance is that under rated conditions, the gross coal consumption rate for power generation can be reduced by 0.89 g/(kW·h), the extraction exergy efficiency can reach 97.66%, and the direct economic benefit is relatively increased by 1.04%, and the carbon transaction cost relative reduction of 0.34%. In addition, the relative advantages of all aspects performance of the system will expand with the increase of the amount of steam extracted by the system for industrial heating.

Key words: industrial heating; centripetal turbine; energy cascade utilization; comprehensive evaluation of the system

节能减排是我国经济实现可持续发展的基本国策, 电力行业的节能减排是国家节能减排战略体系的重要组成部分。目前我国城市集中供热和工业供热主要靠小型供热机组, 但是其能耗高, 能源利用率低, 大型热电联产机组利用锅炉大容量、高效率的特点在小型燃煤锅炉替代、降低机组能耗、以及工业供热等方面具有优势, 并正在成为发展趋势^[1-2]。同时, 对于 300 MW 级及以下纯凝机组, 供电煤耗率水平难以满足国家能源发展政策的要求, 热电联产改造成为其生存的关键途径^[3]。

余炎等^[4]针对超临界 350 MW 等级机组工业抽汽供热的需求, 提出对外供热的研究方案和热力系统布置, 并进行详细的经济性计算对比, 从投资收益、技术安全性分析了其可行性。许朋江等^[5]以某 330 MW 机组汽轮机中低压联通管抽汽为例计算了不同电负荷、不同抽汽压力和不同抽汽流量工况下机组运行状态, 分析了热耗特性、调压临界特性、能耗临界特性。李慧君等^[6]基于供热变工况分析, 得出机组不同工况的最佳初压。孙士恩等^[7]针对现有供热机组进行供热抽汽端口改造进行变工况性能分析, 以寻找最佳的机组改造和运行方式。

在大型热电联产机组供热过程中, 普遍存在抽汽参数与实际需求参数不匹配的问题。现阶段发电厂为调整抽汽参数至指定的压力和温度, 通常采用减温减压器作为降温降压的热力设备^[8], 但其一方面通过节流元件增加局部阻力, 使蒸汽能量白白损失; 另一方面通过减温水蒸发吸收蒸汽热量实现高温蒸汽降温, 会大大增加减温水的投用量, 降低机组效率^[9]。因此, 科学合理地选择火电机组抽汽供热改造方式, 减少供热过程中存在的能量不匹配现象, 降低节流或能量损失, 提高供热系统运行经济性, 已成为供热机组普遍面临的技术难题之一^[10-11]。莫子渊等^[12]针对超临界 600 MW 机组采暖供热改造, 耦合螺杆膨胀机和吸收式热泵对供热蒸汽压差能量进行梯级利用, 并计算证明改造后系统性能得到较大提升。但是, 对于大型热电联产机组工业供热, 供需

参数匹配过程中一般具有蒸汽温度压力等级高、可利用压差小, 膨胀比低, 可利用焓降较小的特点^[13], 螺杆膨胀机并不适用。

本文针对纯凝机组工业供热改造中供需参数匹配过程存在严重蒸汽压力能损失的问题, 在抽汽参数 537.0 °C、3.0 MPa (绝对压力, 下同) 等级、蒸汽可利用压差小、膨胀比低的条件下, 将高效离心涡轮机应用于 300 MW 等级汽轮机再热蒸汽工业供热系统, 代替传统方案的减温减压器进行供需参数匹配, 高效回收蒸汽压差能发电, 充分利用高品质蒸汽的能量, 实现工业供热蒸汽能量梯级利用。并以某发电厂 330 MW 热电联产机组工业供热系统为对象, 计算系统改造节能量和经济效益, 评价系统可行性和经济性, 可为大型热电联产机组工业供热系统改造提供相关参考。

1 热电联产机组工业供热及供热改造方案介绍

1.1 某 330 MW 热电联产机组工业供热概况

为满足日益增长的工业供热需求, 某 330 MW 热电联产机组采用高压再热蒸汽段抽汽对外工业供热。THA 工况下抽汽压力 3.0 MPa, 抽汽温度 537.0 °C, 供热管网所需蒸汽压力 1.5 MPa, 温度 420 °C, 此参数下所对应的供热减温减压等熵焓降为 94.62 kJ/kg。根据机组负荷变化, 抽汽压力会在 2.05~4.14 MPa 变化, 温度基本保持在 537.0 °C, 工业供热蒸汽流量在 20~44 t/h。

与采暖供热不同, 工业供热具有供热蒸汽参数高、热负荷波动大等显著特点。而且供汽参数与用户需求参数不匹配, 直接采用减温减压进行供需参数匹配的方式存在高品质热能严重浪费的问题。

纯凝机组工业供热抽汽与供热管网参数匹配是供热改造的核心问题之一, 常用的 3 种供热改造方案为减温减压器方案、蒸汽压力匹配器方案及小型背压式膨胀机方案。

1.2 典型供热改造方案

1.2.1 减温减压器供热方案

减温减压器供热系统，也可称为直接抽汽供热系统，由减压系统、减温系统、安全保护装置等组成，通过对机组抽出的一次蒸汽进行减温减压，使输出的二次蒸汽压力、温度满足供热要求。纯凝机组再热抽汽供热减温减压方案系统流程如图 1 所示。直接减温减压方式所需的装置较为简单，也易于对供热蒸汽进行调节控制，因而国内大量机组进行抽汽供热改造时均采用该方式，但该供热过程中存在非常大的蒸汽节流能量损失和焓损失。

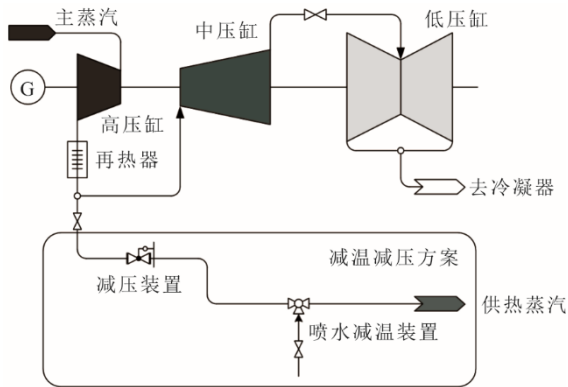


图 1 减温减压方案系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the temperature reduction and decompression scheme system

1.2.2 蒸汽压力匹配器供热方案

蒸汽压力匹配器供热系统由喷嘴、吸入室、混合室及扩压管等部件组成（图 2）。压力匹配器的基本原理是利用高压蒸汽膨胀加速降压，将低压蒸汽引射并混合，再经扩压器减速增压到需要的参数。

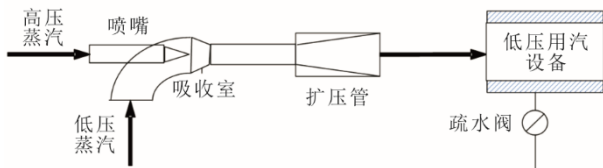


图 2 蒸汽压力匹配器结构组成

Fig.2 Structural composition of steam pressure matcher

采用压力匹配器的机组热再抽汽供热方案系统流程如图 3 所示。相比于直接抽汽供热方案，该方案可以部分利用高压蒸汽的压力能并提高低压蒸汽品位，但该装置存在内部湍流掺混的焓损失，且压力匹配器对低压抽汽的升压比和高压汽源的压力都有一定限制，通常其低压抽汽的升压比不超过 2.5，而驱动蒸汽即高压汽源的压力与低压抽汽

的压力之比不小于 4。此外，该方案对供热机组负荷及热用户负荷的稳定性均要求较高，在供热机组变工况时，抽汽参数变化使压力匹配器工作条件恶化，严重时甚至无法正常工作。

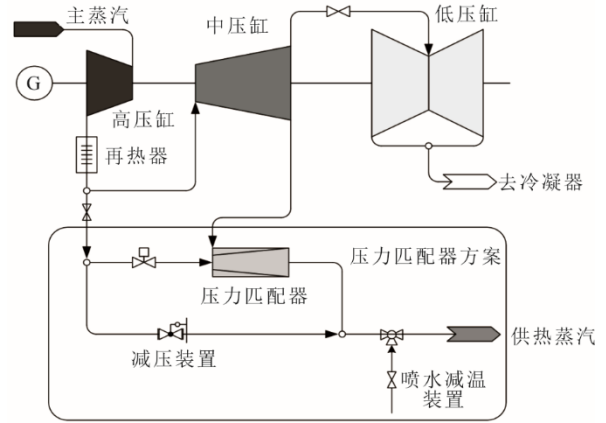


图 3 压力匹配器方案系统

Fig.3 Pressure matcher scheme system

1.3 热电联产机组工业供热蒸汽能量梯级利用方案

针对工业供热机组普遍存在的供汽参数与用户需求参数不匹配、高品质能源浪费严重的问题，为提高能源利用效率，蒸汽先通过一套动力设备（如向心涡轮机、小型背压汽轮机、螺杆膨胀机）膨胀做功后再对外供热，同时回收蒸汽中的高品位能量，实现蒸汽能量的梯级利用，形成热电联产机组蒸汽能量梯级利用系统（图 4）。

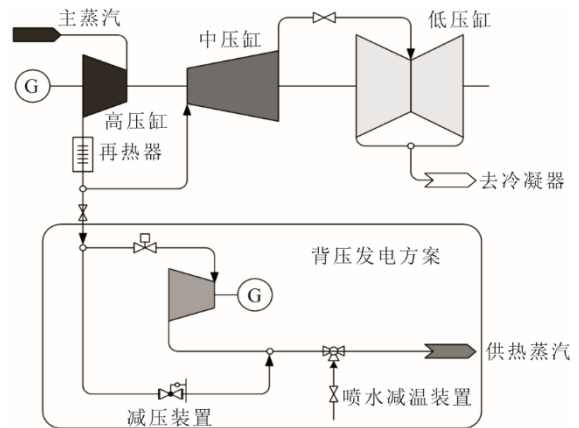


图 4 热电联产机组工业供热蒸汽能量梯级利用系统示意

Fig.4 Schematic diagram of the industrial heating steam energy cascade utilization system of the cogeneration unit

结合 330 MW 级热电联产机组工业供热自身特点，对比常用动力设备的适用性。该动力机械额定进汽压力 3.0 MPa，额定进汽温度 530 °C，额定排汽压力 1.6 MPa，额定流量 30 t/h，由于机组负荷变化，抽汽压力在 2.05~4.14 MPa 波动。

小型背压汽轮机由于自身结构限制,在此小流量小压差工况下运行时,末级叶片易进入鼓风状态,引起非正常停机^[14],工况安全性差,因此不适用于本方案;螺杆膨胀机在供热蒸汽能量梯级利用领域能够很好地适应供热蒸汽压差和焓降小、膨胀比低的工况,但当蒸汽压力高于3 MPa时,将造成螺杆膨胀机进出口压力增大,对螺杆产生较大的径向力,易导致机械变形。当蒸汽温度高于400℃时,螺杆膨胀机转子与汽缸需兼容更大的热态变形量,导致预留间隙过大,机组效率随之降低,因此本工况不宜选用螺杆膨胀机作为做功设备^[15];向心涡轮机相比于轴流式透平具有体积小、转速高、单级比焓降大、适用于小流量工况及结构紧凑的特点,其设计转速一般高达每分钟几万转,高转速可带来明显的效率提升,内效率可达到70%~85%,并且变工况适应性好^[16],向心涡轮机的结构如图5所示。

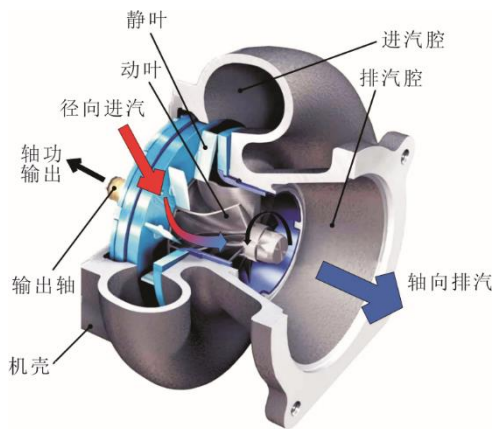


图5 向心涡轮机的结构

Fig.5 Overall structure of a centripetal turbine

综上所述,向心涡轮机技术适用于本方案高参数、小膨胀比蒸汽做功的场景。因此,本文热电联产机组工业供热参数匹配改造采用向心涡轮机发电方案对蒸汽压差能进行回收利用,实现工业供热蒸汽能量梯级利用。向心涡轮发电机组配有减速齿轮箱,具体系统整体结构如图6和图7所示。

2 系统模型及能量分析

2.1 系统建模

基于向心涡轮机发电的热电联产机组工业供热蒸汽能量梯级利用系统可分为主机系统和蒸汽能量梯级利用系统2个子系统。

2.1.1 系统控制方程

主机系统锅炉、汽轮机、凝汽器等设备的数学

模型与文献[17-19]相同。蒸汽能量梯级利用系统在稳态条件下每个控制量的主要控制方程为质量守恒和能量守恒方程为:

$$\sum_{in} \dot{m}_{in} = \sum_{out} \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{m}_{in} \left(h_{in} + \frac{v_{in}^2}{2} + gz_{in} \right) \\ = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{m}_{out} \left(h_{out} + \frac{v_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: \dot{m} 为质量流量, kg/s; \dot{Q} 为热量, J/s; \dot{W} 为功, W; h 为工质流体的焓值, J/kg; v 为工质流速, m/s; z 为工质流体的高度, m; 下角标 in 和 out 分别为流入和流出。

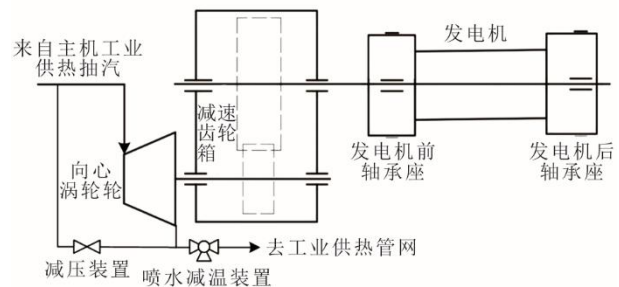


图6 基于向心涡轮机的工业供热蒸汽能量梯级利用系统整体结构

Fig.6 Overall structure of a centripetal turbine based industrial heating steam energy stepped utilization system

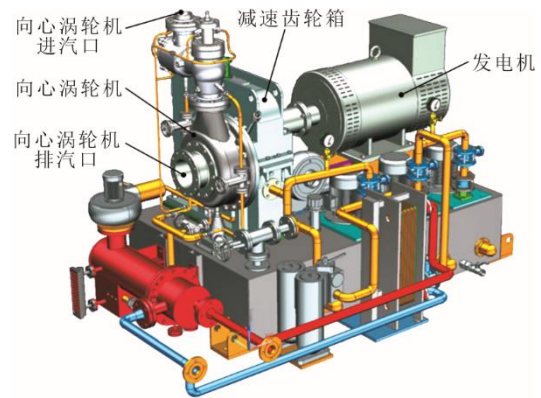


图7 向心涡轮发电机组整体结构

Fig.7 The overall structure of the centripetal turbine generator unit

2.1.2 向心涡轮机模型

主机系统从汽轮机高压再热蒸汽段抽汽到蒸汽能量梯级利用系统,经过蒸汽能量梯级利用系统的向心涡轮机膨胀做功后温度和压力下降,参数与供热要求匹配后对外工业供热,向心涡轮机通过高速齿轮减速箱减速后驱动发电机发电。向心涡轮机组的电功率输出为:

$$\dot{W}_T = \eta_G \dot{m}_{WF} (\Delta h)_{Tg} \quad (3)$$

式中： \dot{m}_{WF} 为向心涡轮机工质质量流速，kg/s； $(\Delta h)_{Tg}$ 为向心涡轮机工质的理想比焓降，J/kg； η_G 为向心涡轮机组发电效率，由式(4)计算得出。

$$\eta_G = \eta_s \eta_m \eta_g \quad (4)$$

式中： η_s 为向心涡轮机的等熵效率； η_m 为向心涡轮机机组的机械效率，包括向心涡轮机本体机械效率 η_{mc} 和变速齿轮箱传动效率 η_{mt} ，由式(5)计算得出； η_g 为发电机效率。

$$\eta_m = \eta_{mc} \eta_{mt} \quad (5)$$

2.2 系统评估

2.2.1 系统性能指标

电厂进行供热改造时，系统供电供热煤耗率、抽汽供热过程焓效率等指标可直接反映系统改造后性能的提升水平^[20]。

其中，抽汽供热过程焓效率为：

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}_R}{\dot{E}_{x_{in}}} \quad (6)$$

式中： \dot{W}_{net} 为向心涡轮机组净输出功率，W； \dot{E}_R 为供热输出焓，J/kg； $\dot{E}_{x_{in}}$ 为抽汽供热过程输入焓，J/kg。

2.2.2 系统经济性指标

电厂进行供热改造，其主要目的是追求高效供热所提升的经济收益。采用直接经济效益进行供热评价，可得到运行机组经济效益的客观信息。

供热机组在供热工况下运行时，其直接经济效益计算公式为^[21-22]：

$$Y_0 = Y_E + Y_H - C_F \quad (7)$$

式中： Y_0 为单位时间供热机组的运行经济效益； Y_E 为单位时间供热机组对外供电收入； Y_H 为单位时间机组对外供热收入； C_F 为单位时间供热机组燃料成本。

在 2 种供热方案负荷相同的前提下，改造后供热机组的相对运行经济效益计算公式为^[23-24]：

$$\Delta Y_0 = (Y_{E,R} - Y_{E,N}) - (C_{F,R} - C_{F,N}) \quad (8)$$

式中：下角标 R 为改造增加蒸汽能量梯级利用系统的工况，N 为初始未改造前工况。

热电机组碳交易成本计算如下^[25]：

$$F_{cqt} = c_k (E_o - E_q) \quad (9)$$

式中： c_k 为碳交易价格； E_o 为热电机组碳排放量； E_q 为热电机组碳配额。

$$E_q = \lambda P_{ZS} \quad (10)$$

$$E_o = \gamma P_{ZS} \quad (11)$$

式中： P_{ZS} 为热电机组热出力和电出力折算为机组

在纯凝工况下的电出力； λ 为单位电量碳排放分配系数，由国家发改委发布的“区域电网基准线排放因子”确定，取为 0.789 t/(MW·h)； λ 为热电机组单位出力的碳排放强度，根据某电厂热力性能实测数据取为 1 099 g/(kW·h)。

3 系统仿真结果与分析

330 MW 机组再热抽汽可通过直接减温减压或向心涡轮机发电 2 种方式实现工业供热，对比分析了 2 种方案下的热力学性能。热力学性能分析模型的主机系统选取某电厂 330 MW 热电机组实际参数（表 1）。机组工业供热要求蒸汽压力 1.5 MPa，温度 420 °C。原系统通过节流降压以及喷水降压实现供热参数匹配，而新系统利用向心涡轮机发电替代上述过程，再辅以喷水降温，保证在供热参数一致前提下进行改造前后系统性能的对比分析。

表 1 某电厂 330 MW 热电联产机组相关参数
Tab.1 Relevant parameters of a 330 MW cogeneration unit in a power plant

| 项目 | 数值 |
|--------------------------------|----------|
| 主蒸汽流量/(t·h ⁻¹) | 1 002.20 |
| 主蒸汽压力/MPa | 16.67 |
| 再热蒸汽压力/MPa | 3.34 |
| 再热蒸汽温度/°C | 537.00 |
| 锅炉效率 | 0.91 |
| 煤价/(元·t ⁻¹) | 880.00 |
| 上网电价/(元·(kW·h) ⁻¹) | 0.41 |
| 碳交易价格 (元·t ⁻¹) | 120.00 |
| 工业供汽流量/(t·h ⁻¹) | 30.00 |
| 工业供汽压力/MPa | 1.50 |
| 工业供汽温度/°C | 420.00 |

根据某电厂 330 MW 热电联产机组实际运行数据，确定向心涡轮额定进汽流量为 30 t/h，进汽参数为 3.0 MPa、530 °C，排汽压力为 1.6 MPa，根据以上边界条件对向心涡轮机组进行总体设计选型，确定向心涡轮机、减速系统、发电机及辅助系统的配置和有关技术参数。

针对该电厂 330 MW 机组工业抽汽供热参数，要求向心涡轮机设计参数如见表 2。

表 2 向心涡轮机设计参数
Tab.2 Design parameters of centripetal turbine

| 项目 | 数值 |
|---------------------------|-------|
| 进汽压力/MPa | 3.0 |
| 进汽温度/°C | 530.0 |
| 排汽压力/MPa | 1.6 |
| 排汽流量/(t·h ⁻¹) | 30.0 |
| 排汽温度 (最低值) /°C | 430.0 |

根据要求,模型选取某厂 B1.5-3.0/1.6//530 型向心涡轮机,性能参数见表 3,机组配套减速系统和发电机配置技术参数见表 4 和表 5。

表 3 向心涡轮机性能参数
Tab.3 Centripetal turbine performance parameters

| 序号 | 项目 | 数值 |
|----|---------------------------------|-------------------|
| 1 | 型式 | 高速向心涡轮 |
| 2 | 型号 | B1.5-3.0/1.6//530 |
| 3 | 运行方式 | 定压/滑压 |
| 4 | 额定进汽流量/(t·h ⁻¹) | 30 |
| 5 | 额定功率/kW | 1 310 |
| 6 | 最大功率/kW | 1 580 |
| 7 | 进汽压力/MPa | 3.00 |
| 8 | 进汽温度/°C | 530 |
| 9 | 最高允许进汽压力/MPa | 4.14 |
| 10 | 最高允许进汽温度/°C | 540 |
| 11 | 背压排汽压力/MPa | 1.60 |
| 12 | 汽耗/(kg·(kW·h) ⁻¹) | 22.9 |
| 13 | 设计内效率(等熵效率)/% | 75.0 |
| 14 | 机械效率/% | 98.5 |
| 15 | 额定转速/(r·min ⁻¹) | 30 000 |
| 16 | 调速范围/(r·min ⁻¹) | 29 100~30 450 |
| 17 | 超速保护动作转速/(r·min ⁻¹) | 31 500 |
| 18 | 进、排汽方向 | 上部进汽,轴向排汽 |

3.1 模型验证

在本研究中,以某电厂 330 MW 热电机组夏季阀全开工况为设计工况,即在主机主蒸汽阀前蒸汽压力

16.67 MPa、主蒸汽阀前蒸汽温度 537.0 °C、再热蒸汽温度 537.0 °C、主蒸汽阀前蒸汽流量 1 021 t/h、排汽压力 11.8 kPa、补水率 0.0% 的边界条件下,对比分析了不同工况下本文所建模型(图 8)发电功率计算值与电厂主机热力性能测试热平衡图的差异,验证模型的准确性,结果见表 6。由表 6 可知,电厂热力性能实测数据和当前计算结果差异非常小,计算最大误差为 0.317%,说明模型准确可靠。

表 4 减速齿轮箱参数
Tab.4 Gearbox parameters

| 设计功率/kW | 速比 | 中心距/mm | 传动齿轮类型 | 齿轮精度等级 | 传动效率/% |
|---------|------|--------|--------|--------|--------|
| 1 500 | 10.0 | 550 | 圆柱斜齿轮 | GB-4 | ≥98.0 |

表 5 发电机参数
Tab.5 Generator parameters

| 型号 | 额定功率/kW | 额定转速/(r·min ⁻¹) | 额定电压/V | 效率/% |
|-----------|---------|-----------------------------|--------|-------|
| YFKS500-2 | 2 000 | 3 000 | 6 300 | ≥96.3 |

表 6 模型验证
Tab.6 Model validation

| 工况 | 设计值/MW | 计算值/MW | 相对误差% |
|--------|---------|---------|----------|
| VWO | 357.203 | 357.248 | 0.012 6 |
| THA | 330.054 | 330.126 | 0.021 8 |
| 75%THA | 247.575 | 247.42 | -0.062 6 |
| 50%THA | 165.046 | 165.569 | 0.317 0 |
| 40%THA | 132.006 | 131.717 | -0.219 0 |

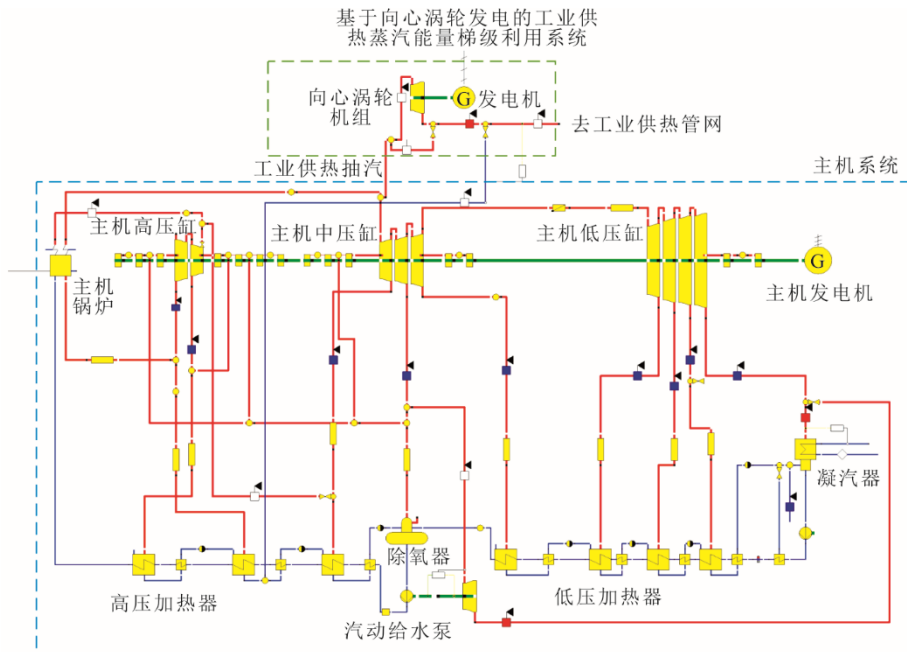


图 8 系统模型
Fig.8 System model

3.2 系统性能分析

工业供热蒸汽压差能量高效回收利用的核心设备为向心涡轮机，系统变工况下向心涡轮机的内效率会随工况变化而改变，其是系统性能的关键影响因素，模型中向心涡轮机的具体内效率曲线根据该向心涡轮机厂商实验测试及计算数据得出，如图 9 所示。减速齿轮箱传动效率和发电机效率值则较高且变工况下变化微小，对系统性能影响微弱，因此假定模型变工况下减速齿轮箱传动效率和发电机效率恒定不变，取变速齿轮箱传动效率 $\eta_{\text{m}}=98.0\%$ ，发电机效率 $\eta_{\text{g}}=96.3\%$ 。

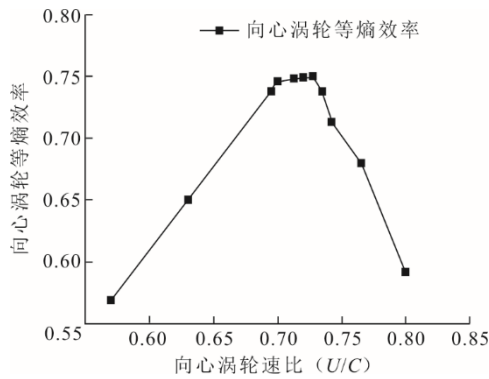


图 9 向心涡轮机内效率曲线

Fig.9 Adiabatic efficiency curve of centrifugal turbine

发电煤耗率是评估系统能源利用效率的主要指标，可以直观体现系统改造后的性能提升效果。供热改造前后发电煤耗率如图 10 所示。

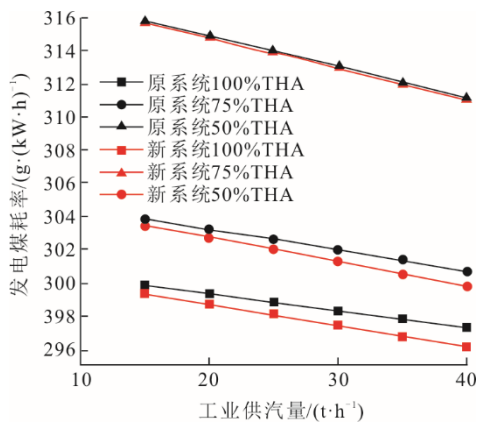


图 10 供热改造前后发电煤耗率

Fig.10 Standard coal consumption rate of power generation before and after heating renovation

由图 10 可见：2 系统的发电煤耗率都随机组负荷的升高而降低，且改造为向心涡轮机发电的热电联产机组工业供热蒸汽能量梯级利用系统相较于改造前系统煤耗率有所降低；在主蒸汽流量较高时，2 个系统的煤耗率差随工业供汽量的提高而增

大；在 50%THA 工况下，2 个系统煤耗差很小，这主要是因为主蒸汽流量较低时，抽汽口的压力接近供热所需压力，故可用压差很小，改造前后系统差别不是很大；在 100%THA、工业供热蒸汽流量为 40 t/h 工况下，2 个系统的发电煤耗率差达到最大值 1.17 g/(kW·h)。

焓评估是热力性能过程分析的重要组成部分。该分析可以探索供热过程中能量品质的折损情况，从而可以采用有效的改进方法来提升其热力学性能。2 个系统供热过程的焓效率如图 11 所示，由于改造后系统供热过程中利用透平对抽汽压差进行了利用，故其抽汽过程的焓效率高于原系统。由于抽汽压力随着主蒸汽流量的升高而增大，故 2 个系统的供热过程焓效率差也随之增大。在一定的主蒸汽流量下，随着抽汽流量的提高，抽汽压力会有所下降，故原系统供热过程抽汽焓效率随抽汽流量增大而有所升高。在 100%THA、工业供热蒸汽流量为 15 t/h 工况下，原系统与新系统供热过程焓效率差达到最大值 6.76%。

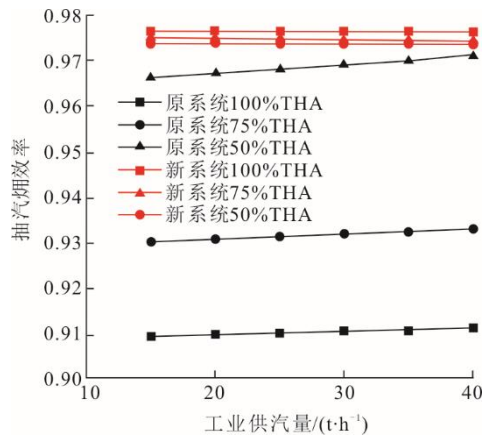


图 11 供热改造前后供热过程焓效率

Fig.11 Heating exergy efficiency before and after heating renovation

3.3 系统经济性分析

电厂进行供热改造后，利用直接经济效益评价供热改造的效果，是最直观的评价方法之一。图 12 为根据式(8)计算的供热改造前后系统相对经济效益。由图 12 可见，在不同工况下，改造后系统的相对经济效益均为正值，并且随着主蒸汽流量和工业供热汽量的增大而增大。故系统在电热负荷较高时，其相对经济效益也较高。

图 13 是供热改造前后系统从经济层面考虑碳交易机制的相关特性结果。由图 13 可见，改造后系统的碳交易成本减小量趋势与系统相对经济效益一致，

该参数是系统相对经济效益对碳排放的量化指标。

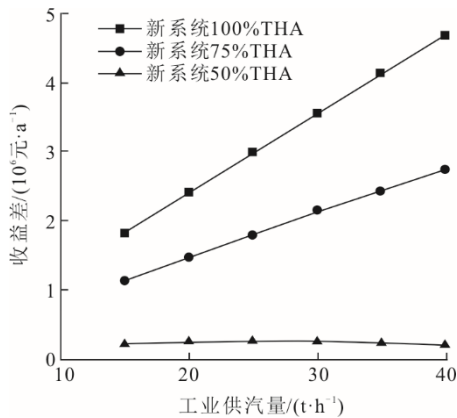


图 12 供热改造前后系统相对经济效益

Fig.12 Relative economic benefits of the system before and after heating renovation

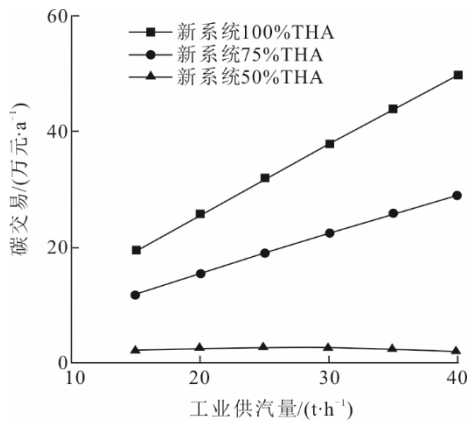


图 13 供热改造前后系统相对减小碳交易额

Fig.13 Relative reduction of carbon trading volume of the system before and after heating renovation

表 7 为额定工况下（100%THA、工业供热汽流量为 30 t/h）改造前后系统热力性能、烟环境及经济性的关键参数。

表 7 额定工况下改造前后系统关键参数对比

Tab.7 Comparison of key parameters of the system before and after renovation under rated operating conditions

| 项目 | 原系统 | 新系统 | 差值 |
|---|--------------|--------------|-----------|
| 发电煤耗率/(g·(kW·h) ⁻¹) | 298.26 | 297.37 | -0.89 |
| 抽汽烟效率/% | 91.03 | 97.66 | 6.63 |
| 总发电量/MW | 323.09 | 324.17 | 1.08 |
| 系统可持续性指标 SI | 11.15 | 42.75 | 31.60 |
| 收益/(10 ⁶ 元·a ⁻¹) | 349.49 | 353.11 | 3.62 |
| 碳排放/(t·a ⁻¹) | 2 612 577.60 | 2 603 818.52 | -8 759.08 |
| 碳交易/(万元·a ⁻¹) | 31 350.93 | 31 245.82 | -105.11 |

由表 7 可见，基于向心涡轮机发电的热电联产机组工业供热方案相比于直接减温减压方案，能够有效回收蒸汽中的高品位能量并降低抽汽供热过程中的烟损失，由此产生显著的环境和经济收益。

4 结 论

本文针对工业供热机组抽汽参数过高导致供需能量不匹配的现象，提出采用适用于工业供热高参数工况的向心涡轮机进行抽汽能量梯级利用。并以某 330 MW 纯凝机组工业供热改造为例，构建了热力系统模型。通过定义供电煤耗率、烟效率、SI、直接经济效益和碳交易成本，从热力性能、烟环境和经济性能 3 方面综合评估供热系统性能，并全面比较直接减温减压方式更换为向心涡轮机发电蒸汽能量梯级利用方案的改造效果，得到如下结论。

1) 向心涡轮机具有体积小、转速高、单级比焓降大、变工况适应性好和内效率高等特点，适用于参数较高、可利用压差较小和流量较小的工业供热改造方案。

2) 与传统减温减压方式相比，采用向心涡轮机组发电的工业供热系统热力性能提升显著，并且在能源环境友好和经济性方面得到很大提升。在额定工况和相同工业供热量条件下，改造后发电煤耗率可降低 0.89 g/(kW·h)，抽汽供热过程烟效率可达 97.66%，相对提升 7.28%，总发电量可提升 1.08 MW，直接经济效益相对提升 1.04%，碳交易成本减少 0.34%。

3) 变工况时，采用向心涡轮机的工业供热改造系统和原系统的发电煤耗率均随 THA 和供热流量的增大而减小，发电煤耗率差值随供热抽气量的增大而增大；改造后抽汽供热过程烟效率在变工况时相对保持稳定，变工况适应性更好；改造后相对经济性指标均随 THA 和供热流量的增大而增大。

4) 向心涡轮机方案能够有效回收蒸汽中的高品位能量，并大幅降低抽汽供热过程中的热损失，由此带来显著的综合收益。

[参 考 文 献]

- [1] 戈志华, 杨佳霖, 何坚忍, 等. 大型纯凝汽轮机供热改造节能研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 25-309. GE Zhihua, YANG Jialin, HE Jianren, et al. Energy saving research of heating retrofitting for large scale condensing turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(17): 25-30.
- [2] 谷军生, 姜占文, 吴俊杰. 余热梯级利用在热网改造场景中的应用浅析[J]. 汽轮机技术, 2020, 62(6): 473-474. GU Junsheng, JIANG Zhanwen, WU Junjie. The analysis of cascade utilization of surplus heat in heat network retrofitting system[J]. Turbine Technology, 2020, 62(6): 473-474.
- [3] 王金星. 大型燃煤热电联产系统研究现状和展望[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(6): 90-98. WANG Jinxing. Research status and prospect for large coal-fired combined heat and power generation system[J].

- Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2019, 46(6): 90-98.
- [4] 余炎, 金益波, 杨红霞, 等. 超临界 350 MW 机组采用背压式给水泵小汽轮机工业供热研究[J]. 动力工程学报, 2018, 38(10): 849-854.
YU Yan, JIN Yibo, YANG Hongxia, et al. Study on taking backpressure BFPT exhaust of 350 MW supercritical unit as industrial heat source[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2018, 38(10): 849-854.
- [5] 许朋江, 徐睿, 邓佳, 等. 330 MW 机组采暖抽汽对发电热经济性的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6257-6264.
XU Pengjiang, XU Rui, DENG Jia, et al. Analysis of the influence of heating steam extraction of 330 MW units on the thermal economy of power generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6257-6264.
- [6] 李慧君, 喻桥. 基于变工况分析的供热机组初压优化[J]. 热能动力工程, 2014, 29(4): 397-401.
LI Huijun, YU Qiao. Optimization of the initial pressure of a heat supply unit based on an analysis of the off-design operating conditions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2014, 29(4): 397-401.
- [7] 孙士恩, 高新勇, 庞建锋. 工业抽汽机组供热改造的变工况热经济性分析[J]. 汽轮机技术, 2016, 58(4): 301-304.
SUN Shien, GAO Xinyong, PANG Jianfeng. Economic analysis on the variable condition of industrial extraction unit for heating rebuilding [J]. Turbine Technology, 2016, 58(4): 301-304.
- [8] 段坚. 热电联产减温减压器供热优化分析[J]. 中国冶金, 2015, 25(10): 70-72.
DUAN Jian. Optimization analysis on heat supply of combined heat and power temperature and pressure reducter[J]. China Metallurgy, 2015, 25(10): 70-72.
- [9] 周翔. 浅谈减温减压器系统的设置及工艺计算[J]. 科技创新导报, 2015, 12(22): 153-154.
ZHOU Xiang. A brief discussion on the setting and process calculation of the desuperheater and pressure reducer system[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(22): 153-154.
- [10] 戈志华, 孙诗梦, 万燕, 等. 大型汽轮机高背压供热改造适用性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3216-3222.
GE Zhihua, SUN Shimeng, WAN Yan, et al. Applicability analysis of high back-pressure heating retrofit for large-scale steam turbine unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3216-3222.
- [11] 付怀仁, 包伟伟, 张敏, 等. 当前主流供热改造技术的灵活性及经济性分析[J]. 热力透平, 2019, 48(2): 99-104.
FU Huairan, BAO Weiwei, Zhang Min, et al. Flexibility and economic analysis of mainstream current heating transformation technology[J]. Thermal Turbine, 2019, 48(2): 99-104.
- [12] 莫子渊, 顾煜炯, 陆树银, 等. 600 MW 超临界供热机组能量梯级利用及对比分析[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(4): 55-62.
MO Ziyuan, GU Yujiong, LU Shuyin, et al. Energy cascade utilization and comparative analysis of 600 MW supercritical heating unit[J]. Electric Power Science and Engineering, 2021, 37(4): 55-62.
- [13] 赵盼龙, 张东明, 陈理帅. 大型供热机组蒸汽压力能回收利用方案研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(8): 91-96.
ZHAO Panlong, ZHANG Dongming, CHEN Lishuai. Research on the recycle and utilization scheme of steam pressure energy of thermal supply units[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(8): 91-96.
- [14] 殷戈, 谭锐, 蔡培, 等. 背压机技术在供热优化改造中应用研究[J]. 汽轮机技术, 2018, 60(5): 389-396.
YIN Ge, TAN Rui, CAI Pei, et al. Research on application of back pressure machine technology in heating optimization[J]. Turbine Technology, 2018, 60(5): 389-396.
- [15] SMITH I K, STOSIC N, KOVACEVIC A. Power recovery from low grade heat by means of screw expanders[M]. Elsevier, 2014: 1.
- [16] 舒士甄. 叶轮机械原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991: 1.
SHU Shizhen. Principle of turbomachinery[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991: 1.
- [17] HAMED H, ABDULHAMID N M A, SAEID N. Mathematical modeling and validation of a 320 MW tangentially fired boiler: a case study[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 232-242.
- [18] CELIS C, PINTO GUSTAVO R S, TEIXEIRA T, et al. A steam turbine dynamic model for full scope power plant simulators[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 593-602.
- [19] 张益波, 任佳, 潘海鹏, 等. 一类热定型机换热器的动态建模方法[J]. 化工学报, 2011, 62(8): 2360-2366.
ZHANG Yibo, REN Jia, PAN Haipeng, et al. A kind of dynamic modeling method for heat exchangers of heat setting machine [J]. CIESC Journal, 2011, 62(8): 2360-2366.
- [20] DINCER I, ROSEN M A. Exergy: energy, environment and sustainable development[M]. Newnes, 2012: 1.
- [21] 马晓丽. 300 MW 级供热机组热负荷与电负荷多季节适应性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 1.
MA Xiaoli. Study on multi-season adaptability of thermal load and electrical load of 300 MW heating unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 1.
- [22] 杨海生, 刘春报. 大型发电机组供热的相对经济效益评估方法及应用[J]. 汽轮机技术, 2013, 55(1): 55-58.
YANG Haisheng, LIU Chunbao. Evaluation method and application of relative economic benefit of heat supply for large generating sets[J]. Turbine Technology, 2013, 55(1): 55-58.
- [23] 王晓维. 含多种供能模式热电厂电热协调优化调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1.
WANG Xiaowei. Research on multi-season adaptability of heat load and power load of 300 MW class cogeneration unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [24] 杨海生, 张拓, 唐广通, 等. 低压缸零出力技术对供热机组深度调峰性能影响及调峰补偿标准探讨[J]. 热能动力工程, 2020, 35(6): 268-273.
YANG Haisheng, ZHANG Tuo, TANG Guangtong, et al. Influence of zero-output technology of low-pressure cylinder on deep peak regulation performance of heating unit and compensation standard for peak regulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2020, 35(6): 268-273.
- [25] 李敏超. 计及多类型储能的热电联合系统低碳经济调度研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2020: 1.
LI Minchao. Research on low-carbon economic dispatching of electric-heat combined system considering multi-type energy storage[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2020: 1.

(责任编辑 邓玲惠)