

DOI: 10.19666/j.rlfed.202212298

基于 LNG 冷能利用的燃气轮机/超临界 二氧化碳循环关键参数经济性研究

张锦坤¹, 王 渡¹, 任 鑫¹, 王廷举², 万明元², 王志刚¹

(1.上海电力大学能源与机械工程学院, 上海 201306; 2.博努力(北京)仿真技术有限公司, 北京 100085)

[摘 要] 超临界二氧化碳(S-CO₂)循环具有循环效率高、设备尺寸小、运输安装方便、易于达到临界点等优势。考虑到液化天然气(LNG)具有的巨大冷能,不仅可以作为冷却剂应用于联合循环系统,且换热后的天然气既可以作为联合循环的燃料输入,剩余部分又可供城市用户。故提出了一种基于 LNG 冷能利用的燃气轮机/S-CO₂联合循环系统,选择合适成本公式对循环发电系统的投资成本、运行收益以及回收周期进行计算分析;对联合循环系统中一些关键参数的变化(如最高温度、最高压力、最低温度、最低压力和分流比)对 S-CO₂循环的发电特性、经济性影响进行研究。结果表明:每个单参数的增大都会使设备投资成本呈现先增大后减小的趋势,但是发电量的大小对收益的影响占主导地位;以收益作为衡量标准,最高温度越高越好,最低温度越低越好,其他参数下均存在最佳值使收益达到最大;对关键参数以累计收益最大为优化目标进行遗传算法优化,优化后的回收周期为 5.86 年,20 年累计收益为 22.87 亿元。

[关 键 词] 超临界二氧化碳循环; LNG; 参数分析; 投资成本; 运行收益

[引用本文格式] 张锦坤, 王渡, 任鑫, 等. 基于 LNG 冷能利用的燃气轮机/超临界二氧化碳循环关键参数经济性研究[J]. 热力发电, 2023, 52(6): 109-118. ZHANG Jinkun, WANG Du, REN Xin, et al. Economic study on key parameters of gas turbine/supercritical carbon dioxide cycle based on LNG cold energy utilization[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(6): 109-118.

Economic study on key parameters of gas turbine/supercritical carbon dioxide cycle based on LNG cold energy utilization

ZHANG Jinkun¹, WANG Du¹, REN Xin¹, WANG Tingju², WAN Mingyuan², WANG Zhigang¹
(1.Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China; 2.Bernouly (Beijing) Simulation Technology co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: The supercritical carbon dioxide cycle has many advantages, such as high cycle efficiency, small equipment size, convenient transportation and installation, and easy to reach the critical point. Considering the huge cold energy of LNG, it can not only be used as coolant in the combined cycle system, but also the natural gas after heat transfer can be used as fuel input in the combined cycle, and the rest can be supplied to urban users. A gas turbine/supercritical carbon dioxide combined cycle system based on the utilization of LNG cold energy is proposed in this paper. Select the appropriate cost formula to calculate and analyze the investment cost, operating income and recovery cycle of the circulating power generation system in detail. The influence of some key parameters (such as maximum temperature, maximum pressure, minimum temperature, minimum pressure and shunt ratio) on the power generation characteristics and economy of the supercritical carbon dioxide cycle in the combined cycle system was studied. The results show that with the increase of each single parameter, the cost of equipment investment will first increase and then decrease, but the effect of power generation on income is dominant. Taking the yield as the measurement standard, the higher the maximum temperature, the better, the lower the minimum temperature, the better. Under other parameters, there are optimal values to maximize the yield. The key parameters were optimized

收稿日期: 2022-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52076126)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52076126)

第一作者简介: 张锦坤(1995), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大型电站热力系统优化及经济性分析, jinkunzhang163@163.com.

by genetic algorithm to maximize the cumulative income. After optimization, the recovery cycle was 5.86 years, and the cumulative income (20 years) was 2.287 billion yuan.

Key words: supercritical carbon dioxide cycle; LNG; parameter analysis; cost of investment; profit from operation

超临界二氧化碳 (S-CO₂) 循环具有循环效率高^[1], S-CO₂ 透平尺寸小^[2], CO₂ 不可燃、无毒、无腐蚀性, 热力性质稳定、安全性高、传热能力强、储量丰富, 价格低廉, 制取方便, 容易达到临界点等优点^[3-4], 近些年来成为循环系统的研究热点。

对于燃气轮机余热利用的研究如下。2018 年 Shengya Hou 等^[5]提出了 1 种采用 S-CO₂ 再压缩循环、蒸汽动力循环和有机朗肯循环对燃气轮机排烟回收利用, 对燃气轮机压比、S-CO₂ 循环压比、S-CO₂ 循环分流比、蒸汽动力循环蒸发温度、共沸混合物中异戊烷的质量分数等关键参数对成本的影响进行研究。2018 年 Akshay Khadse 等^[6]以透平进口温度、夹点温差、压缩机压力比和二氧化碳质量流量为优化变量, 以输出功率最大为优化目标对燃气轮机/S-CO₂ 循环系统进行遗传算法优化, 得出了循环系统最佳的设计点。2019 年 Dhinesh Thanganadar 等^[7]对 5 个级联 S-CO₂ 循环进行燃气轮机发电的余热利用进行对比研究, 并采用燃气轮机压力比作为优化变量对循环系统性能进行优化, 在最佳的压力比下, 每个循环的成本均低于蒸汽朗肯循环。2020 年 Ruizhi Su 等^[8]提出了 1 种采用 S-CO₂ 再压缩循环和跨临界二氧化碳循环 (T-CO₂) 回收燃气轮机余热的新型联合循环系统, 并对透平入口温度、最高压力和回热器效率等参数进行分析。

对于 LNG 冷能利用的研究如下。2021 年 Tri Tjahjono 等^[9]提出了采用 LNG 的冷能冷却 T-CO₂、有机朗肯循环 (ORC), 并将换热后的天然气为燃料送入燃烧室燃烧, 高温烟气作为 T-CO₂ 和 ORC 的热源, 该循环系统的效率可以达到 54.3%。2021 年 Yan Cao 等^[10]提出了一个燃气轮机/S-CO₂/ORC 联合循环系统, 并采用 LNG 作为冷却介质冷却 S-CO₂ 循环工质, 并以平准电力成本 (LCOE) 最小为优化目标采用遗传算法对联合循环系统进行优化。

天然气具有较高的氢碳比, 对环境的污染较小, 硫的含量比较低, 相比较于其他燃料的燃烧产物污染物较少^[11], 而且低温腐蚀现象不明显, 可以使排烟温度降得更低, 能极大地利用烟气中的能量。燃气轮机发电系统燃料多为天然气, 考虑到 LNG 具有的巨大冷能, 不仅可以作为冷却剂应用于联合循环系统, 且换热后的天然气既可以作为联合循环的

燃料输入, 剩余部分又可供城市用户。大多数学者的研究内容停留于简单 S-CO₂ 循环配置, 而且在燃气轮机/S-CO₂/LNG 循环系统领域发表的相关文献较少。本文提出了一种基于 LNG 冷能利用的燃气轮机/S-CO₂ 联合循环系统, 探究燃气轮机/S-CO₂/LNG 关键参数对联合循环系统的经济性影响, 这对该联合循环系统未来能否投入实际运行具有重要意义。

1 联合循环系统介绍

联合循环系统模型的建立采用 EBSILON 仿真软件。该软件是一款通用热力学建模组态软件, 主要用于热力系统循环热平衡计算和仿真, 广泛地用于电站热力系统设计、优化、改造和运行过程。在进行热力学计算时, 热力学物性参数选用 REFPROP 10.0 数据库中的数据, 该数据库能较准确地预测热力学性质^[12]。

在循环系统中所有的设备都遵循质量和能量平衡, 质量平衡式为:

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_o \quad (1)$$

能量平衡式为:

$$\sum \dot{m}_i h_i - \sum \dot{m}_o h_o + \sum Q + W = 0 \quad (2)$$

式中: \dot{m} 为质量流量, kg/s; Q 为热流, kW; W 为轴功, kW; h 为比焓, kJ/kg; 下标 i 为入口, o 为出口。

用燃气轮机和空气压缩机的多方过程效率作为输入, 空气压缩机出口温度为:

$$T_{AC,o} = T_{AC,i} \left[\left(\frac{P_{AC,o}}{P_{AC,i}} \right)^{\frac{R}{c_p \eta_{AC}}} \right] \quad (3)$$

燃气轮机出口温度为:

$$T_{GT,o} = T_{GT,i} \left[\left(\frac{P_{GT,o}}{P_{GT,i}} \right)^{\frac{R \eta_{GT}}{c_p}} \right] \quad (4)$$

式中: p 为压力, MPa; R 为气体常数; η 为多变过程效率; $\overline{c_p}$ 为平均比热容, J/(kg·°C); T 为温度, °C;

下标 AC 为空气压缩机, GT 为燃气轮机。

S-CO₂ 透平的等熵效率为:

$$\eta_{ST} = \frac{h_{ST,i} - h_{ST,o}}{h_{ST,i} - h_{ST,o,s}} \quad (5)$$

S-CO₂ 压缩机的等熵效率为:

$$\eta_{SC} = \frac{h_{SC,o,s} - h_{SC,i}}{h_{SC,o} - h_{SC,i}} \quad (6)$$

泵的等熵效率为:

$$\eta_{pump} = \frac{h_{pump,o,s} - h_{pump,i}}{h_{pump,o} - h_{pump,i}} \quad (7)$$

式中: $h_{ST,o,s}$ 为透平理想等熵出口焓, kJ/kg; $h_{SC,o,s}$ 为压缩机理想等熵出口焓, kJ/kg; 下标 SC 为压缩机, ST 为透平。

在建模过程中对循环系统作了以下假设^[13]:

- 1) 系统工作在稳定状态下;
- 2) 忽略循环中的动能和势能;
- 3) 忽略循环中管道的压力损失;
- 4) 压缩机效率为 88%, S-CO₂ 透平效率 92%, 热交换器效率为 95%, 发电机效率 98%, 换热器压损 0.5%;

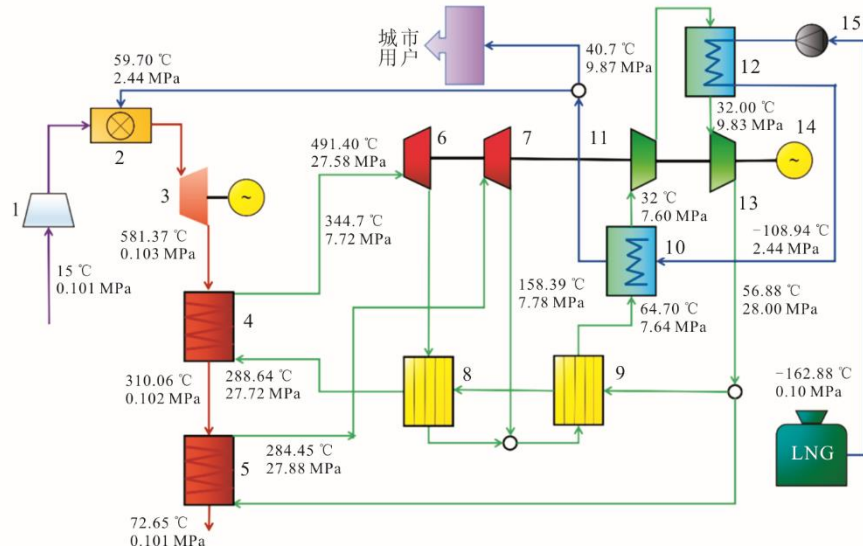
5) LNG 储罐中工质温度为 -162 °C, 压力为 0.1 MPa, 通过控制器调整流量变化使 S-CO₂/LNG 换热器换热固定端差为 5 °C。

通过上述系统假设, 进行联合循环系统的建模, 联合循环系统如图 1 所示。联合循环效率和底部循环的效率定义式为:

$$\eta_{net} = \frac{W_{GT,net} + W_{SC,net}}{m_{fuel} Q_{LHV}} \quad (8)$$

$$\eta_{bottom} = \frac{W_{SC,net}}{\Delta Q_{in}} \quad (9)$$

式中: $W_{GT,net}$ 为燃气轮机系统输出功率, kW; $W_{SC,net}$ 为 S-CO₂ 循环系统输出功率, kW; m_{fuel} 为燃料量, kg/s; Q_{LHV} 为燃料的低位发热量, kJ/kg。



1—空气压缩机; 2—燃烧室; 3—燃气轮机; 4、5—烟气换热器; 6、7—S-CO₂透平; 8、9—回热器; 10、12—冷却器; 11、13—S-CO₂压缩机; 14—发电机; 15—泵。

图 1 联合循环系统配置
Fig.1 Combined cycle system configuration

1.1 顶部循环

联合循环系统中, 顶部循环为燃气轮机发电系统, 具体的工质流程为: 空气经空气压缩机被压缩送入燃烧室和燃料发生化学反应生成高温高压的烟气, 高温高压烟气进入燃气轮机做功, 从燃气轮机排除的烟气进入烟气换热器向底部循环释放热量。燃气轮机系统以西门子型号为 SGT5-4000F 模型作为参考, 关键参数见表 1。

燃气轮机排烟温度为 581.37 °C, 且排烟流量为 688.00 kg/s。烟气中仍具有大量的热量, 所以采用底部循环进行余热利用, 从而最大限度的提高能源利用率。

表 1 燃气轮机系统关键参数
Tab.1 Key parameters of the gas turbine system

项目	数值
燃气轮机功率/MW	288.31
燃料量/(kg·s ⁻¹)	14.50
排烟流量/(kg·s ⁻¹)	688.00
排烟温度/°C	581.37
燃气轮机循环效率/%	38.90

1.2 底部循环

S-CO₂ 循环在 450~750 °C 下具有较高的热效率, S-CO₂ 透平具有较高的功率输出, 且在临界点附近 S-CO₂ 压缩机功耗较少, 所以在该排烟温度下采用 S-CO₂ 循环比其他余热利用循环具有更高的循

环效率。S-CO₂ 循环的透平和印刷板式换热器较小, 设备紧凑^[13], 集成方便, 便于运输和安装, 所以在运输和安装以及占地面积方面也具有较大优势。有学者对不同循环进行了对比, 发现间冷循环效率更高, 本文采用中间冷却 S-CO₂ 循环。

S-CO₂ 间冷循环系统工质流程为: 从一级烟气换热器 (HE1) 冷端出来的高温高压流体进入高温透平 (HT) 做功, 然后依次进入高温回热器 (HTR) 和低温回热器 (LTR) 向低温侧工质释放热量; 之后分别进入两级冷却器和两级压缩机, 从二级压缩机 (SC2) 出来的流体经过分流器被分为 2 部分, 一部分依次进入低温回热器、高温回热器和 HE1 完成 1 个循环, 另一部分流体直接进入二级烟气换热器 (HE2) 吸收烟气中的热量, 然后进入低温透平 (LT) 做功, 从 LT 出来的流体汇入主干进入 LTR。在 LNG 冷能利用部分流程为: 从 LNG 储罐中出来的 LNG 经过升压泵增压, 然后依次进入二级冷却器 (IC) 和一级冷却器 (PC) 换热, 之后分为 2 部分, 一部分进入燃烧室作为能量来源, 另一部分供给城市用户。虽然有很多学者对联合循环系统的热效率进行研究, 但并没有对经济性进行分析, 所以本文针对基于 LNG 冷能利用的燃气轮机/S-CO₂ 联合循环系统的投资成本和收益进行计算。

2 经济模型

对于新型联合循环系统, 虽然循环效率作为评判循环系统性能的标准之一, 但也要考虑 1 个联合循环系统是否能够投入到实际运行生产中。通过合适的成本公式对循环发电系统的投资成本、运行收益以及回收周期都进行计算, 这样新型的联合循环系统才有实际应用价值。联合循环系统中主要设备有: 燃机发电系统、烟气换热器、超临界二氧化碳透平、高温回热器、低温回热器、冷却器、压缩机和升压泵。成本公式见表 2。表 2 中: m_{fuel} 为燃料质量流量, kg/s; Q_{LHV} 为低位发热量, kJ/kg; C_{FC} 为燃料价格, 元/s; P_n 为现值因子; C_{TPC} 为 S-CO₂ 发电系统成本年值, 元; J_{mt} 为维护成本增长率, 取 3%; n_{Lab} 为雇佣劳动力的数量; C_{Lab} 为职工工资, 元; J_{Lab} 为工资增长率, 取 1%。总投资成本包括设备总成本、辅助设备成本以及安装费用。辅助设备成本和安装费用以设备总成本 C_{cost} 的 30% 计算^[14]。

$$C_{\text{cost}} = C_{\text{GT}} + C_{\text{EX}} + C_{\text{ST,ax}} + C_{\text{TR}} + C_{\text{LS}} + C_{\text{pum}} + C_{\text{IG}} + C_{\text{SG}} \quad (10)$$

表 2 成本公式
Tab.2 cost formula

项目	成本公式
燃气轮机系统 ^[15]	$\begin{cases} W(2.339 \times 10^4 \times W^{-0.0064} - 2.145 \times 10^4), & W < 100 \\ W(1.08 \times 10^5 \times W^{-0.53} + 49), & W \geq 100 \end{cases}$
烟气换热器 ^[16]	$632\,900 \times Q^{0.6}$
S-CO ₂ 透平 ^[16]	$182\,600 \times W_{\text{ST}}^{0.5561}$
回热器 ^[16]	$49.45 \times UA^{0.7544}$
冷却器 ^[10]	$4\,122 \times A^{0.6}$
泵 ^[17]	$2\,100 \times \left(\frac{W_{\text{pum}}}{10}\right)^{0.26} \times \left(\frac{1 - \eta_{\text{is,pum}}}{\eta_{\text{is,pum}}}\right)^{0.5}$
S-CO ₂ 压缩机 ^[16]	$1\,230\,000 \left(\frac{W_{\text{SC}}}{1\,000}\right)^{0.3992}$
发电机 ^[16]	$108\,900 \left(\frac{W_{\text{SG}}}{1\,000}\right)^{0.5463}$
燃料成本 ^[18]	$m_{\text{fuel}} Q_{\text{LHV}} C_{\text{FC}} \times 10^6$
维护成本 ^[18]	$\sum_{n=1}^{20} (0.15 P_n C_{\text{TPC}} (1 + J_{\text{mt}})^{n-1})$
人工成本 ^[18]	$\sum_{n=1}^{20} (P_n n_{\text{Lab}} C_{\text{Lab}} (1 + J_{\text{Lab}})^{n-1})$
保险成本 ^[18]	$\sum_{n=1}^{20} (0.0025 P_n C_{\text{TPC}})$

式中: C_{GT} 为燃机系统成本, 元; C_{EX} 为烟气换热器成本, 元; $C_{\text{ST,ax}}$ 为 S-CO₂ 透平成本, 元; C_{TR} 为回热器成本, 元; C_{LS} 为冷却器成本, 元; C_{pum} 为成本, 元; C_{IG} 为泵成本, 元; C_{SG} 为发电机成本, 元。

表 2 中现值因子 P_n 为:

$$P_n = \frac{1}{(1+r)^n} \quad (11)$$

式中: r 为贴现率, 取 8%。

发电系统成本年值为:

$$C_{\text{TPC}} = 1.3 \xi C_{\text{cost}} \quad (12)$$

年发电收益为:

$$S_{\text{in}} = P_{\text{tot}} S_{\text{FIT}} - 3\,600 T_{\text{N}} C_{\text{F}} \quad (13)$$

式中: P_{tot} 为总发电量, 包括燃机发电量和超临界二氧化碳循环发电量, kW; S_{FIT} 为上网电价, 元/(kW·h); T_{N} 为年运行时间, 6000 h; ξ 为发电系统成本系数, 取 1.87。

20 年运行收益:

$$S_{\text{in20}} = \sum_{n=1}^{20} (S_{\text{in}} P_n) - C_{\text{mt}} - C_{\text{Lab}} - C_{\text{ins}} - C_{\text{cost}} \quad (14)$$

式中: C_{mt} 为维护成本, 元; C_{Lab} 为人工成本, 元; C_{ins} 为保险成本, 元。

新提出的联合循环系统通过上述成本函数以及收益进行计算, 与传统的联合循环系统相比更加节能且运行收益更大, 效率可以达到 56.9%, 20 年累计收益可以达到 21.26 亿元。而在关键参数相同的前提下, 传统的燃气轮机/S-CO₂ 联合循环系统 20 年累计收益仅为 20.95 亿元。

3 关键参数的影响

在 S-CO₂ 循环系统中设计参数的选择十分重要,一些关键参数的变化(如最高温度、最高压力、最低温度、最低压力和分流比)会影响到 S-CO₂ 循环的发电特性,对联合循环系统的循环效率产生影响,也会对投资成本和收益有很大影响,所以对关键参数的变化进行经济分析显得尤为重要。

在进行单参数分析时,只改变研究变量的变化对投资和收益的影响,其他参数保持不变。初始设计参数为:最高温度 491 °C,最高压力 28 MPa,最低温度 32 °C,最低压力 7.64 MPa,分流比 0.35,CO₂ 质量流量 1 290 kg/s。

3.1 最高温度 (S-CO₂ 高温透平入口温度)

最高温度直接影响 S-CO₂ 透平的做功能力,是 S-CO₂ 循环的重要参数之一。通过仅改变最高温度,探究联合循环系统发电特性的变化以及投资运维成本和收益的变化情况。最高温度变化范围为 404~504 °C,其中上限值取决于该支路流量大小和换热器的性能,通过能量平衡计算得到最大的换热温度为 504 °C。最高温度的不同会影响到烟气换热器的选取,当最高温度变化时换热面积的大小、材料选型以及管壁厚度都要考虑在其中,最高温度对联合循环系统的影响如图 2 所示。

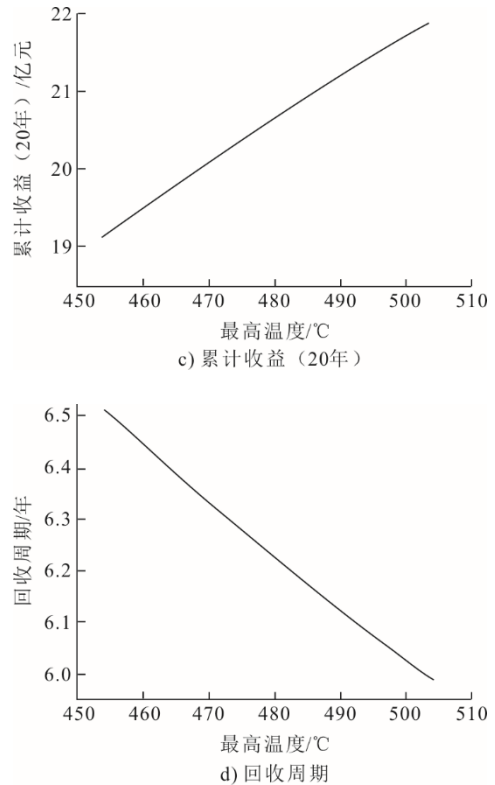
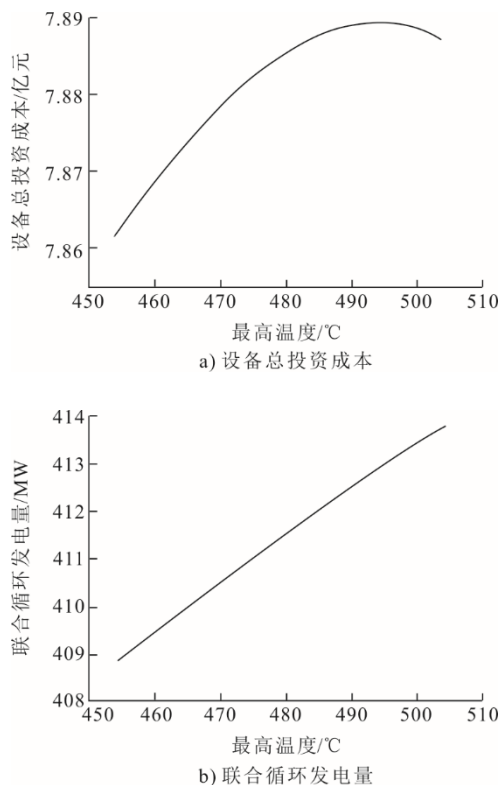


图 2 最高温度对联合循环系统的影响
Fig.2 Influence of maximum temperature on combined circulation system

由图 2a)可见,随着最高温度的升高,设备总投资成本呈现先升高后降低的趋势。造成这一现象的原因为随着最高温度的升高,一级烟气换热器 (HE1) 的换热量增大,HE1 的成本随之升高,但是 HE1 的换热量增大会导致烟气中的能量减少,所以二级烟气换热器 (HE2) 的换热量减少,HE2 的成本降低,高温透平 (HT) 成本增加,LT 的成本降低,因此造成了设备投资成本先增大后减小的趋势。由图 2c)可见,随着最高温度的增加,20 年累计收益随之增加。其主要原因在于随着最高温度的增大,联合循环系统的发电量增大(图 2b))。由图 2d)可见,随着最高温度的增加,回收周期逐渐减少。其主要原因在于随着最高温度的增大,年收益逐渐增大。

3.2 最高压力 (压缩机出口压力)

在最低压力不发生改变的情况下,最高压力的大小直接影响 S-CO₂ 透平的做功能力,是 S-CO₂ 循环的关键参数之一。选取最高压力范围为 25~30 MPa,其上限值取决于材料的最大承压能力。目前,大多数文献中最高压力均采用 30 MPa 作为最高压力的上限。最高压力对联合循环系统的影响如图 3 所示。

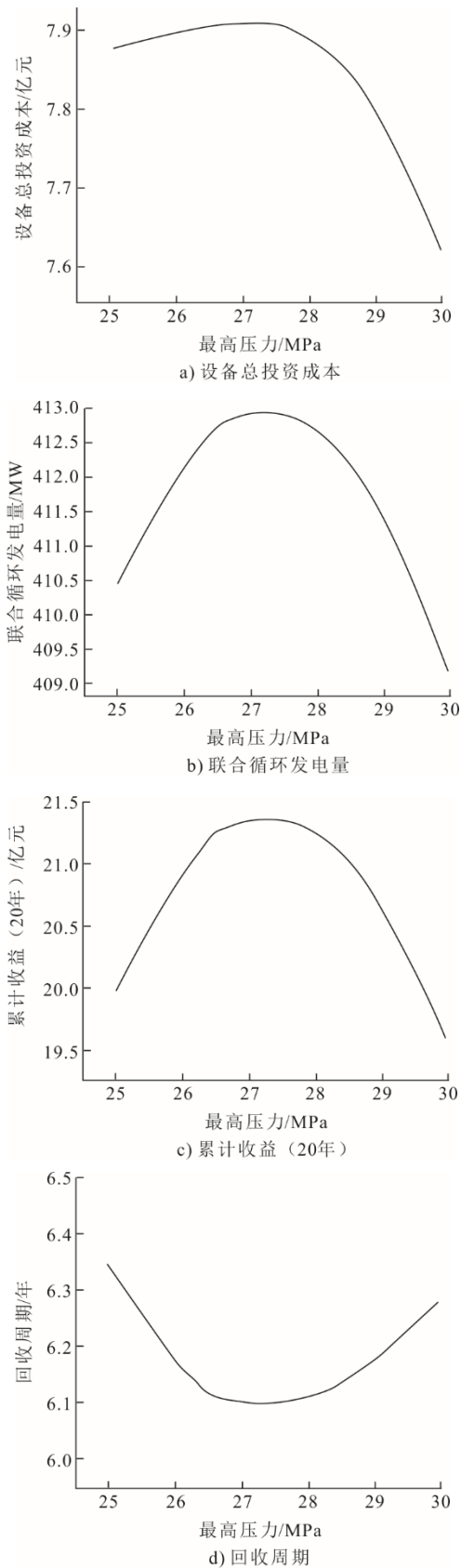


图3 最高压力对联合循环系统的影响

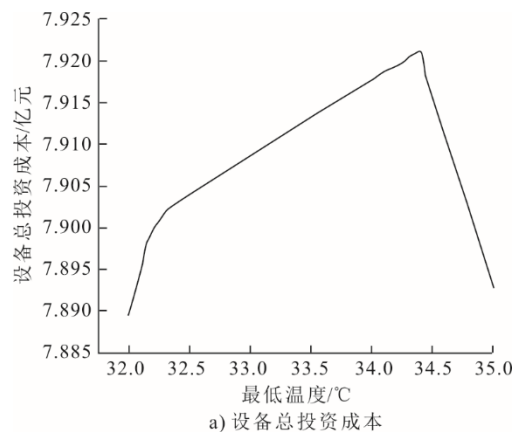
Fig.3 Influence of maximum pressure on combined circulation system

由图 3a)可见,随着最高压力的增大,设备总投

资成本呈现先上升后下降的趋势。其原因为当最低压力、最高温度不变,随着最高压力增大,HT 压比增大,HT 出口温度降低,低温侧 CO_2 换热量降低,进入 HE1 的温度降低,HE1 吸热量增大,HE1 成本增大,HE2 吸热量降低,HE2 成本降低。同理,HT 成本增大,LT 成本降低。由图 3c)可见,随着最高压力的增加,20 年累计收益的变化趋势为先增大后减少。由图 3d)可见,随最高压力的增加,回收周期的变化趋势为先减少后增大。虽然随着最高压力的增大设备总投资成本呈现先增大后降低的趋势,但随着最高压力的增大总发电量也呈现先增大后降低的趋势。由上述分析可以看出:存在 1 个压力最佳点 27.3 MPa 使累计收益达到最大 (21.38 亿元);存在 1 个压力的最佳点 27.4 MPa 使回收周期最小 (6.10 年)。

3.3 最低温度 (压缩机入口温度)

最低温度关乎到 S- CO_2 流体的临界点特性,对压缩机的工作状态具有重要的影响,是 S- CO_2 循环的关键参数之一。S- CO_2 流体在临界点附近物性参数变化较大,探究其在最低温度的变化对联合循环的影响十分重要。选取温度变化的范围为 32~35 $^{\circ}\text{C}$,下限的大小取决于 CO_2 流体的临界点,考虑到稳定性的问题将下限定为 32 $^{\circ}\text{C}$ 。最低温度对联合循环系统的影响如图 4 所示。由图 4a)所示,随着最低温度的增大,设备总投资成本呈现先上升后下降的趋势。其原因为随着最低温度的增大,压缩机功耗增大,成本升高,HE1 和 HE2 的吸热量减少,HE 的成本降低。HE1 的换热量减少会造成烟气温度发生变化,由于换热器性能的原因,HE1 烟气侧出口的温度呈现先升高后降低的趋势,受 HE1 的影响 HE2 在 34.4 $^{\circ}\text{C}$ 时换热量下降的斜率增大,造成了设备总投资成本在 34.4 $^{\circ}\text{C}$ 时出现转折点。综上所述,设备投资成本呈现先上升后下降的趋势。



a) 设备总投资成本

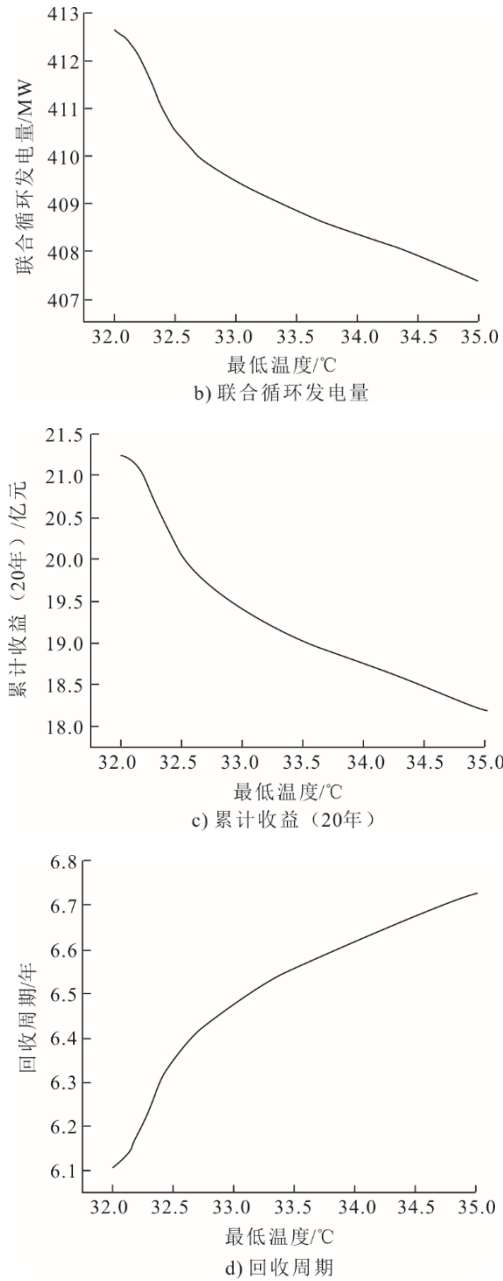


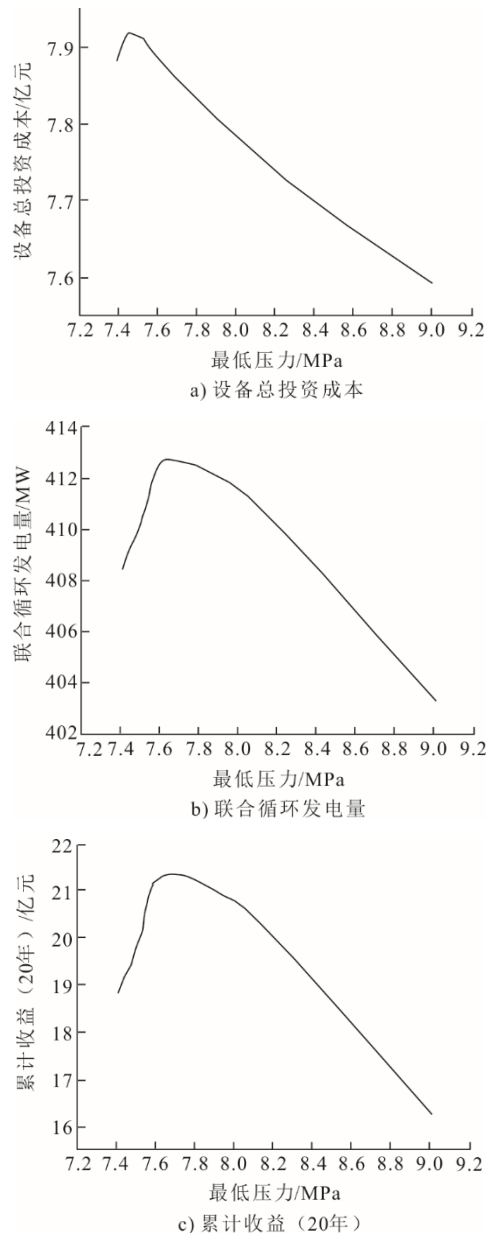
图 4 最低温度对联合循环系统的影响
Fig.4 Effect of minimum temperature on combined circulation system

由图 4c)可见,随着最低温度的增加,20 年累计收益逐渐减少。其主要原因在于随着最低压力的增加,压缩机功耗增大,HT 输出功率不变,LT 输出功率先增大后趋于平缓。由图 4d)可见,随着最低温度的增加,回收周期逐渐增大。综上所述,最低温度越低,越靠近临界点对收益越有利,但同时也要考虑靠近临界点的稳定性问题。

3.4 最低压力 (压缩机入口压力)

最低压力的大小直接影响 S-CO₂ 流体的临界点特性和透平的做功能力,是 S-CO₂ 循环的关键参数

之一。S-CO₂ 流体在临界点附近物性参数变化较大,探究在最低压力的变化对联合循环的影响十分重要。选取最低压力变化的范围为 7.4~9.0 MPa,其下限值取决于 CO₂ 流体的临界点,考虑到稳定性的问题将下限定为 7.4 MPa。最低压力对联合循环系统的影响如图 5 所示。由图 5a)可见,随着最低压力的增大,设备总投资成本呈现先上升后下降的趋势。其原因为:随着最低压力的增大,压缩机 1(SC1)的压比减小,SC1 成本降低;随着最低压力的增大,HT 入口温度和压力不变,压比减小,做功能力减弱,出口温度增大,进入回热器中的热量增大,回热器成本增大,HE1、HT 成本降低。而 HE2 中的换热量增大,LT 做功能力增大,HE2 成本升高、LT 成本升高。



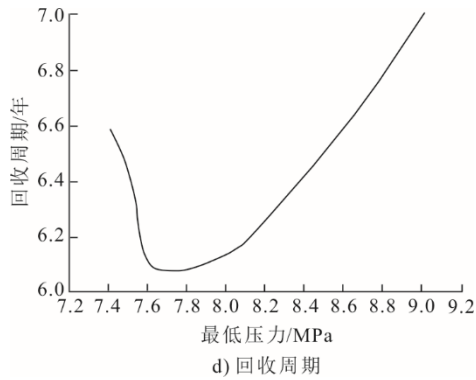


图5 最低压力对联合循环系统的影响
Fig.5 Effect of minimum pressure on combined circulation system

由图5c)可见,随着最低压力的增加,20年累计收益先增大后减小。总的发电量呈现先增大后减小的趋势,而发电量是影响累计收益的主要因素。由图5d)可见,随着最低压力的增加,回收周期先减小后增大。从以上数据可以看出:存在1个压力的最佳点7.66 MPa,使累计收益达到最大(21.33亿元);存在1个压力的最佳点7.72 MPa使回收周期最小(6.08年)。

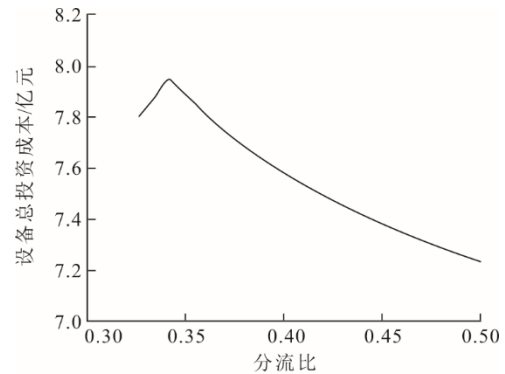
3.5 分流比(流入烟气回热器的流量与总质量流量的比值)

分流比的大小会影响到S-CO₂循环的吸热量和各支路透平的做功能力,是S-CO₂循环的重要参数之一。探究分流比的变化对联合循环的影响十分重要。选取分流比变化的范围为0.326~0.600。因为S-CO₂循环的最高温度是个定值,其下限的选取取决于换热器性能和质量流量的大小,根据能量平衡计算得到下限为0.326。

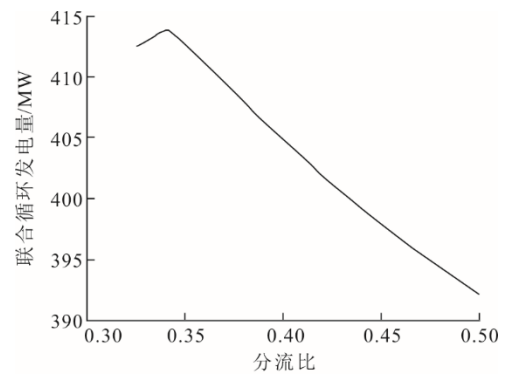
由图6a)可见,随着分流比的增大,设备总投资成本呈现先上升后下降的趋势。其原因为随着分流比的增大,进入HE1的流量减少,进入HE2的流量增多,HE1的换热量减少、HE2的换热量增大,HE1的成本减少、HE2成本升高。HE1的换热量减少,HTR的换热量也会减少,HTR成本降低;LT出口流体进入LTR,使LTR换热量呈现先增大后减小的趋势,成本变化趋势与之类似。

由图6c)可见,随着分流比的增加,20年累计收益先增大后减小。其主要原因在于在分流比为0.344时,LT输出功率有1个转折点,随着HE1的换热量减少,HE2的换热量增大,但分流比也在增大,二者变化的斜率不同导致了转折点的产生。由图6d)可见,随着分流比的增加,回收周期先减小后增大。从以上数据可以看出,存在1个分流比的最

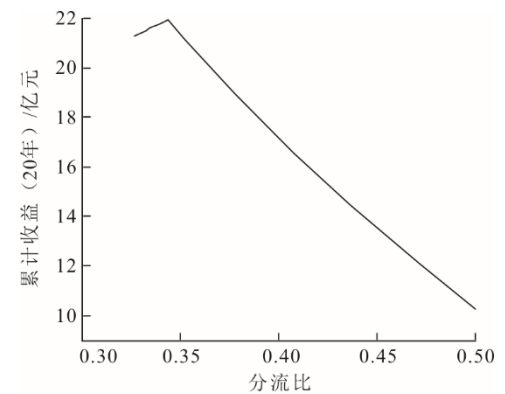
佳点0.342使累计收益达到最大(21.93亿元),使回收周期最小(6.02年)。



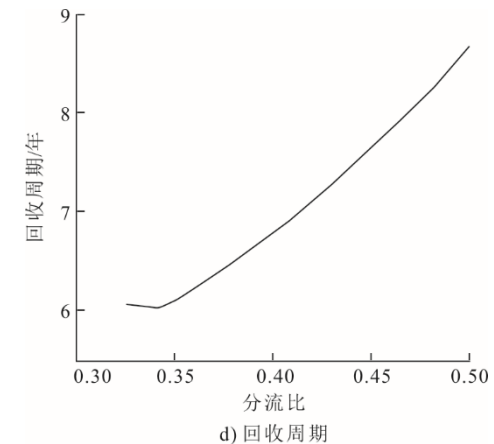
a) 设备总投资成本



b) 联合循环发电量



c) 累计收益(20年)



d) 回收周期

图6 分流比对联合循环系统的影响
Fig.6 Effect of shunt ratio on combined circulation system

3.6 多参数优化

对联合循环系统的关键参数进行研究,不仅要考虑单参数的影响,还要从全局的角度对循环系统的关键参数进行优化分析。采用遗传算法以最高压力、最低压力、最高温度、最低温度和分流比作为优化变量,以累计收益作为优化目标进行优化。各参数的优化范围见表 3,优化前后参数对比见表 4,系统性能见表 5。

表 3 多参数优化范围

Tab.3 The scope of multi-parameter optimization

项目	范围
最高温度/℃	441.00~541.00
最低温度/℃	32.00~35.00
最高压力/MPa	25.00~30.00
最低压力/MPa	7.40~9.00
分流比/%	0~100.00

表 4 关键参数优化结果

Tab.4 Key parameter optimization results

项目	优化前	优化后
最高温度/℃	491.00	511.17
最低温度/℃	32.00	32.00
最高压力/MPa	30.00	26.66
最低压力/MPa	7.60	7.61
分流比/%	35.00	34.57

由表 5 可见,与传统的系统相比该系统的循环效率可达到 57.53%;总发功率为 415.61 MW,比传统系统多 2.76 MW;回收周期为 5.86 年,比传统系统缩短 1.03 年;20 年累计收益达到 22.87 亿元,比传统系统增加 1.4 亿元。

表 5 系统性能

Tab.5 System performance

参数	传统系统	新系统
联合循环效率/%	57.20	57.53
发电功率/MW	412.85	415.61
回收周期/年	6.89	5.86
年收益/亿元	1.68	1.76
累计收益(20 年)/亿元	21.47	22.87

4 结 论

S-CO₂ 循环系统关键参数的变化(如最高温度、最高压力、最低温度、最低压力和分流比)会影响 S-CO₂ 循环的发电特性,对联合循环系统中的循环效率产生影响。本文选取了适合各设备的成本公式,以及维护成本、保险成本、人工成本、回收周

期、20 年累计收益等成本模型,探究各关键参数对联合循环系统的经济影响。

1) 每个单参数的增大都会使设备投资成本呈现先增大后减小的趋势,但是考虑到收益和回收周期等因素时,投资成本对其影响不大,发电量的大小占主要作用。

2) 随着最高温度的增加,累计收益增大,回收周期都会减少。随着最高压力的增加,存在 1 个压力的最佳点 27.3 MPa 使累计收益达到最大(21.38 亿元);存在 1 个压力的最佳点 27.4 MPa 使回收周期最小(6.10 年);随着最低温度的增加,累计收益逐渐减小,回收周期逐渐增大。随着最低压力的增加,存在 1 个压力的最佳点 7.66 MPa 使累计收益达到最大(21.33 亿元);存在 1 个压力的最佳点 7.72 MPa 使回收周期最小(6.08 年);随着分流比的增加,存在一个分流比的最佳点 0.342 使累计收益达到最大(21.93 亿元),使回收周期最小(6.02 年)。最高温度和最低温度对联合循环系统累计收益的影响呈现单调趋势,而最高压力、最低压力和分流比的变化对累计收益的影响存在最佳点。对单参数进行研究时,分流比的调整会使累计收益最大达到 21.93 亿元。

3) 对联合循环系统以最高压力、最低压力、最高温度、最低温度和分流比作为优化变量,以累计收益作为优化目标进行遗传算法优化,优化后的回收周期为 5.86 年,20 年累计收益为 22.87 亿元。

4) 在未来新型联合循环发电系统投入运行时,专注于烟气换热器的研发以提高联合循环最高温度,以及在运行过程中通过控制算法稳定最低温度,能够使联合循环系统具有更大效益。

[参 考 文 献]

- [1] CABEZA L F, DE GRACIA A, FERNÁNDEZ A I, et al. Supercritical CO₂ as heat transfer fluid: a review[J]. Appl ThermEng, 2017, 125: 799-810.
- [2] AKBARI A D, MAHMOUDI S M S. Thermo-economic analysis & optimization of the combined supercritical CO₂ (carbon dioxide) recompression Brayton/organic Rankine cycle[J]. Energy, 2014, 78: 501-512.
- [3] WHITE M T, BIANCHI G, CHAI L, et al. Review of supercritical CO₂ technologies and systems for power generation[J]. Appl ThermEng, 2021, 185: 116447.
- [4] LEE J, LEE J I, YOON H J, et al. Supercritical carbon dioxide turbomachinery design for water-cooled Small modular reactor application[J]. NuclEng Des, 2014, 270: 76-89.
- [5] HOU S, ZHOU Y, YU L, et al. Optimization of a novel cogeneration system including a gas turbine, a

- supercritical CO₂ recompression cycle, a steam power cycle and an organic Rankine cycle[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 172: 457-471.
- [6] KHADSE A, BLANCHETTE L, KAPAT J, et al. Optimization of supercritical CO₂ brayton cycle for simple cycle gas turbines exhaust heat recovery using genetic algorithm[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2018, 140(7): 071601.
- [7] THANGANADAR D, ASFAND F, PATCHIGOLLA K. Thermal performance and economic analysis of supercritical carbon dioxide cycles in combined cycle power plant[J]. *Appl Energ*, 2019, 255: 113836.
- [8] SUR, YU Z, XIA L, et al. Performance analysis and multi-objective optimization of an integrated gas turbine/supercritical CO₂ recompression/transcritical CO₂ cogeneration system using liquefied natural gas cold energy[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 220: 113136.
- [9] TJAHJONO T, EHYAEI M A, AHMADI A, et al. Thermo-economic analysis on integrated CO₂, organic rankine cycles, and NaClO plant using liquefied natural gas[J]. *Energies*, 2021, 14(10): 2849.
- [10] CAO Y, DHAHAD H A, TOGUN H, et al. Proposal and thermo-economic optimization of using LNG cold exergy for compressor inlet cooling in an integrated biomass fueled triple combined power cycle[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(29): 15351-15366.
- [11] GU H, ZHU H, SI F. Optimization research on load dispatch in gas-steam combined cycle units[J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020, 42(7): 1-15.
- [12] ZHAO Q, MECHERI M, NEVEUX T, et al. Selection of a proper equation of state for the modeling of a supercritical CO₂ Brayton cycle: consequences on the process design[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(23): 6841-6853.
- [13] CHO S K, KIM M, BAIK S, et al. Investigation of the bottoming cycle for high efficiency combined cycle gas turbine system with supercritical carbon dioxide power cycle[C]. *American Society of Mechanical Engineers*, 2015, 56802: V009T36A011.
- [14] MARCHIONNI M, BIANCHI G, TASSOU S A. Techno-economic assessment of Joule-Brayton cycle architectures for heat to power conversion from high-grade heat sources using CO₂ in the supercritical state[J]. *Energy*, 2018, 148: 1140-1152.
- [15] WORLD G T. *Gas turbine world, 2021 GTW handbook*[Z]. Pequot Publishing, Inc. Fairfield, CT. 2021.
- [16] WEILAND N T, LANCE B W, PIDAPARTI S R. CO₂ power cycle component cost correlations from DOE data spanning multiple scales and applications[C]. *American Society of Mechanical Engineers*, 2019, 58721: V009T38A008.
- [17] ROSTAMZADEH H, GHAEBI H, VOSOUGHI S, et al. Thermodynamic and thermoeconomic analysis and optimization of a novel dual-loop power/refrigeration cycle[J]. *Appl ThermEng*, 2018, 138: 1-17.
- [18] 王渡, 陈豪, 陈颖, 等. 燃气-超临界二氧化碳联合循环经济性研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(10): 39-46.
WANG Du, CHEN Hao, CHEN Ying, et al. Economic research for gas-supercritical carbon dioxide combined cycle[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(10): 39-46.

(责任编辑 杨嘉蕾)