

燃气－蒸汽联合循环余热回收系统性能研究

闫明月¹ 刘德俊¹ 商丽艳² 韦丽娃³ 陈树军⁴

- (1. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 抚顺 113001;
2. 辽宁石油化工大学化学化工与环境学部, 抚顺 113001;
3. 辽宁石油化工大学机械工程学院, 抚顺 113001;
4. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 青岛 266580)

摘 要 燃气发电是我国城市供电的主要形式之一, 针对 LNG 接收站一体的电厂发电模式进行研究, 提出一种新型燃气－蒸汽联合循环热电联供系统, 利用超临界 CO₂ 布雷顿循环结合有机朗肯循环 (ORC) 辅助发电, 将 LNG 作为冷源, 对烟气余热进行三级利用。通过构建热力学和经济模型, 以 Aspen Plus 软件模拟值为基础, 结果表明: 在消耗燃料 1.704 kg/s(LNG) 的条件下, 联合循环净发电功率可达 45 MW, 供热量 41.5 MW, 余热利用率, 热效率和炯效率分别为 88.50%, 52.79% 和 46.69%。结合热－经济学与参数分析, 利用 Matlab 优化后的最小单位发电成本为 0.1529 CNY/kWh。考虑到碳排放价格, 供电、供热、供气收益, 燃料价格和设备成本, 电厂每年的理想收益可达 2989.5 万元。

关键词 天然气; 热电联产; 超临界二氧化碳; 热－经济分析; 优化

中图分类号: TE09 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2021)04-0854-11

Research on Performance of Gas-Steam Combined Cycle Waste Heat Recovery System

YAN Ming-Yue¹ LIU De-Jun¹ SHANG Li-Yan² WEI Li-Wa³ CHEN Shu-Jun⁴

- (1. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;
2. Department of Chemistry, Chemical Engineering and Environment, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;
3. School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 11300, China;
4. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao 266555, China)

Abstract Gas-fired power generation is one of the main forms of urban power supply in China. A new type of gas-steam combined cycle cogeneration system is studied for the power generation mode of an integrated LNG receiving station, using supercritical CO₂ Brayton cycle combined with organic Rankine cycle (ORC) auxiliary power generation, using LNG as a cold source, and three-stage utilization of flue gas waste heat. By constructing thermodynamic and economic models, based on Aspen Plus software simulation, the results show that: under the condition of fuel consumption of 1.704 kg/s(LNG), the combined cycle net power generation can reach 45MW, the heat supply is 41.5MW, the waste heat utilization rate, energy efficiency and exergy efficiency are 88.50%, 52.79% and 46.69%, respectively. Combining thermo-economics and parameter analysis, Matlab is used to optimize the minimum unit power generation cost. Taking into account the price of carbon emissions, the benefits of power supply, heating and gas supply, fuel prices and equipment costs, the annual ideal revenue of power plants can reach 2989.5 million yuan.

Key words natural gas; combined heat and power; supercritical CO₂; thermo-economic analysis; optimization

收稿日期: 2020-09-02; 修订日期: 2021-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51306210)

作者简介: 闫明月 (1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事中低温余热利用, E-mail: 2249912802@qq.com。通信作者: 刘德俊, 男, 副教授, E-mail: ldj8448@163.com。

符 号 表

h	焓, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	下标	
L/G	液态/气态	1, 2, 3, ...	流程节点
m	质量流量, $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	cold	冷烟回收
p	压力, MPa	ex	烟
Q	热量, MW	H_2O	水/水蒸气
s	熵, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	in/out	入口/出口
T	温度, K	k	循环设备
\dot{W}	功, MW	net	净值
η	效率, %	P	泵
ε	设备效率, %	th	热
		wh	余热回收

0 引 言

为达到清洁、高效、生产安全的目的,越来越多的发电厂使用天然气作为燃料,燃气电厂的发电模式、供电能力及其评价标准也在众多文章中被研究。热电联产系统是目前发展前景较好,技术较成熟的一种发电形式。Khaljani^[1]对热电联产系统进行热-经济分析和环境分析,通过对系统关键参数的灵敏度分析,实现对循环的热力学性能的优化,并提升经济性。Gholizadeh等^[2]进一步对比了有无回热过程对系统性能的影响,得出了有回热过程的循环能量利用率更高,单位花费率较少。两位学者均通过经典的热电联产系统进行全面的成本与产品的讨论,但对生产过程中的副产品带来的经济效益缺乏分析。虽然热电联产具备良好前景和发展潜力,但燃气成本高、收益小,烟气余热大量浪费仍是如今发电厂面临的主要问题。针对热电厂烟气进行余热利用的系统设计也层出不穷,单从云^[3]对比了压气站燃气轮机烟气有无热回收装置,结果表明加入余热利用系统可使烟效率提升 17.5%,节省燃气约 $1.03\times 10^6\text{ m}^3/\text{a}$,文章内容的分析只在节能层面,并没有深入地进行经济讨论。张高强^[4]以 PG9171E 型燃气-蒸汽联合循环电厂为研究对象,从余热锅炉效率和联合循环效率角度探讨优化方法,得出了可以通过改变蒸汽参数来提高输出功率的结论但同样欠缺了对系统经济性能的分析。张丽等^[5]提出了一种天然气液化和 CO_2 捕集相结合的余热回收发电系统并加以优化,将液化后的天然气储存以备调峰时供电供气使用,所得余热回收效率为 34.2%,虽然将 LNG 用途进行了多级利用,但所作的经济分析不够具体全面。陈晓欣^[6]对比常规余热利用系统与 R123 为工质的 ORC 余热利用系统,结果显示采用 ORC 的系统输出功率增加了 6.99 MW,供电煤耗降低了 $1.7749\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,优化效果显著,但燃煤电厂

虽燃料低廉,废气中却含有大量污染物,处理过程复杂反而导致成本升高。由此可见,无论是哪种形式的发电厂,余热利用是主要的辅助发电形式,并且多以 ORC 为主,在多循环联合发电的系统中,采用 ORC 在热效率和经济效益上均具有明显优势,但不同的研究中都存在着评价标准单一,分析目标不全面等问题。

热电联供的形式并不仅仅拘泥于几种常见的朗肯循环形式,随着新型热力学循环的不断问世, CO_2 为工质的循环逐渐受到瞩目,超临界条件下的 CO_2 特征显著,其临界压力 (7.3 MPa) 和温度 (304.11 K) 很容易实现;临界条件下扩散系数较大,价格低廉易获得;低黏度和低表面张力的性质可使做功能力显著提升^[7],因此,超临界 CO_2 布雷顿循环 (S- CO_2) 以其绿色无污染及较强的做功能力迅速占据优势。Muto等^[8]证明将 SCO_2 循环用于化石燃料为原料的发电厂是切实可行的。郑雅文等^[9]分析了分流布雷顿循环和 ORC 联合循环的优势,结果显示单一流循环效率始终比联合循环至少 2%,并且新循环在 ORC 窄点上仍有提升效率的前景。Akbair等^[10]利用 EES 软件对超临界再压缩布雷顿循环联合朗肯循环 (SCRB/ORC) 进行优化分析,发现在原循环基础上烟效率升高了 11.7%,总花费率减少了 5.7%,循环性能有明显提升。针对 S- CO_2 的研究主要集中在热源温度 873.15 K 以上,可与燃气轮机出口温度相匹配,因此将 S- CO_2 引入余热循环系统是较为合理的选择。

在对热电联产系统的探索中,上述的研究大多集中关注热力循环的表现性能^[3,4,6],或是单纯计算发电所带来的经济效益^[5],对系统除发电外的副产品分析不够全面^[1,2],无法做到全面整体的评价循环性能。本文在此基础上,针对 LNG 接收站一体的

发电厂的运行模式进行探究,设计了一种新型的燃气-蒸汽联合循环系统,通过预热空气、S-CO₂布雷顿循环和余热锅炉将余热分三级利用,达到充分利用烟气废热、寻求净输出功最大化的目的。利用液化天然气(LNG)作为冷源,既合理利用了LNG气化时释放的冷能,又能为燃气电厂提供燃料,使联合循环实现高效节能的目标。此外,通过热经济学和热环境学建模对系统性能加以分析和优化,将供热收益、供电收益、供气收益、碳排放价格等集中考虑,计算出系统整体收益,对新型电厂进行更全面准确的分析。

1 系统工艺设计

本文设计了一种带余热回收的新型热电联供系统,如图1所示。空气经空压机(AC)压缩后预热至指定状态,与天然气一同送入燃烧室(CC)中,在1573.15 K,1 MPa的条件下模拟燃烧。产生的大量高温高压烟气首先经过燃气轮机(GT)发电,GT做功为电厂供电的主要占比。做功后的乏汽仍具备高品质热能,引入多股流换热器(MHE)将余热合理分配。

为提高MHE能效,使超临界工质与乏汽更好

地匹配,本文采用简单闭合式超临界布雷顿循环作为余热回收的一级利用系统,空气(2)在MHE中预热为余热的二级利用,余热锅炉(HRSG)是对余热的最后一级利用。在S-CO₂循环中,工质在MHE中吸热至873.15 K(11)进入透平膨胀机(Tur1)做功,采用内部回热器(IHE)回收部分高品质热量,由于在临界点周围快速变化的流体性质有助于减少S-CO₂压缩耗功,引入冷凝器(EVA1)对CO₂降温使其达到压缩条件(13),压缩(COMP)后进入IHE回热,再至MHE吸热完成一个循环。

由EVA1引入的余热利用双相流朗肯循环进行辅助发电,充分提高余热利用率。考虑ORC工质与CO₂的温度匹配、双相流朗肯循环间的化学稳定性和热力学性能表现,参考制冷剂安全性,在表1给出的几种常见工质中,设置冷凝温度较高的R113和蒸发温度较低的R1150分别为顶部和底部ORC的循环工质。蒸发器(EVA2)为关联两个ORC的关键设备,工质R113和R1150分别在其中冷凝和汽化,之后进入各自的循环中,实现了能量分级利用。为S-CO₂和ORC供热后,烟气进入HRSG进行热交换,以水蒸汽的形式传递能量。LNG经泵(LP)加压,经COND1和COND2两次换热后升温,最终气化至环

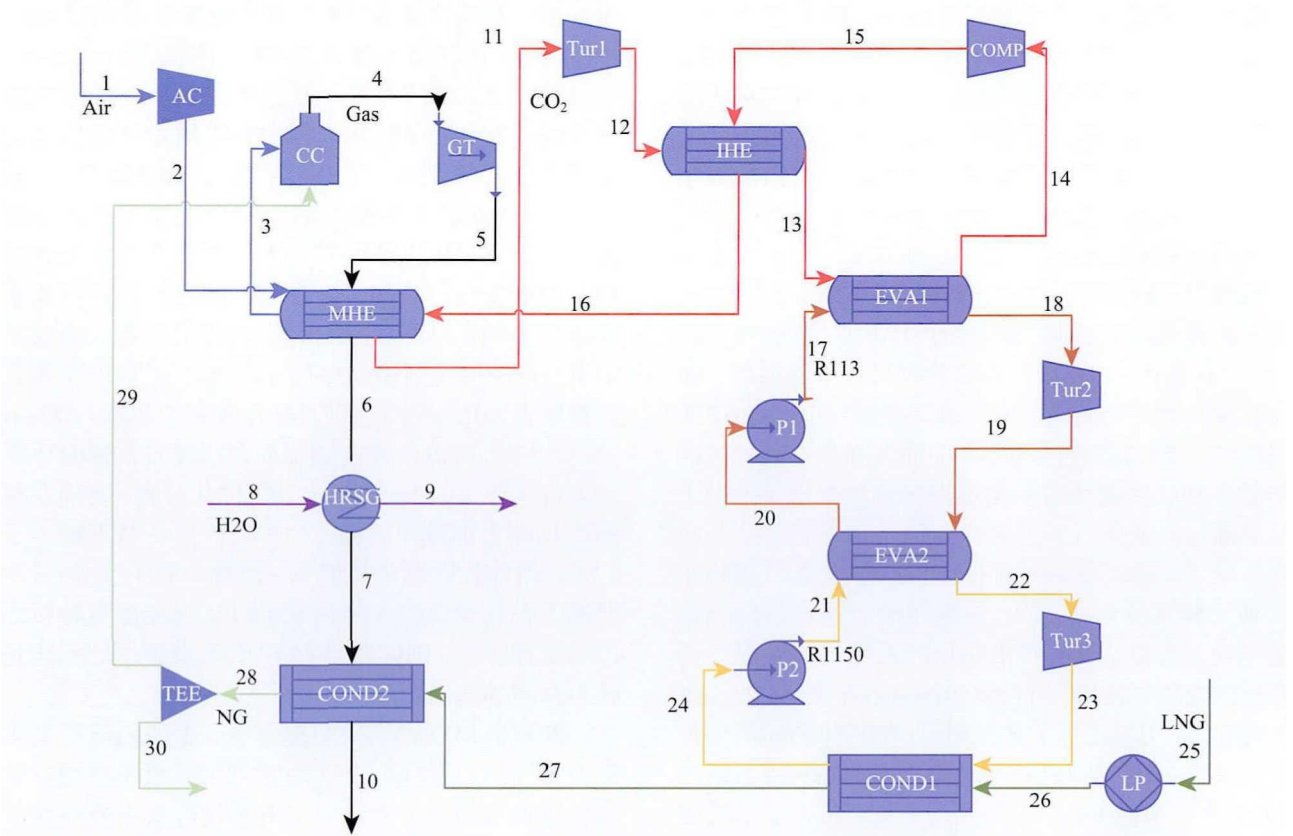


图 1 联合循环示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the cogeneration system

表 1 可参考的 ORC 工质基本物性^[13]

Table 1 Basic physical properties of ORC working fluids^[13]

	R600	R113	Propylene	R245fa	R134a	R1150
冷凝温度/°C	-0.6	47.61	-47.71	15.19	-26.09	-103.8
熔点温度/°C	-138.3	-35	-185.2	-102.1	-104.3	-169.2
临界温度/°C	152	214.1	92.42	154	101	9.915
安全性	A3	A1	A3	B1	A1	A3

*A1 代表无毒且不可燃, A3 代表无毒且易燃, B1 代表毒性较高且不可燃

境温度并从分离器 (TEE) 流出。出口的天然气可直接供给居民燃气或作为动力燃料参与燃烧。三个子循环的 T - S 图在图 2 中给出。

2 热力学建模

本系统模拟结果由 Aspen Plus 给出, 为准确评估热-经济学表现性能, 部分主要参数如表 2 所示, 参数设置基于下列前提:

- 1) 假定系统在稳定条件下运行;
- 2) LNG 成分为纯甲烷;
- 3) 各设备中的压降与摩擦损失忽略不计;

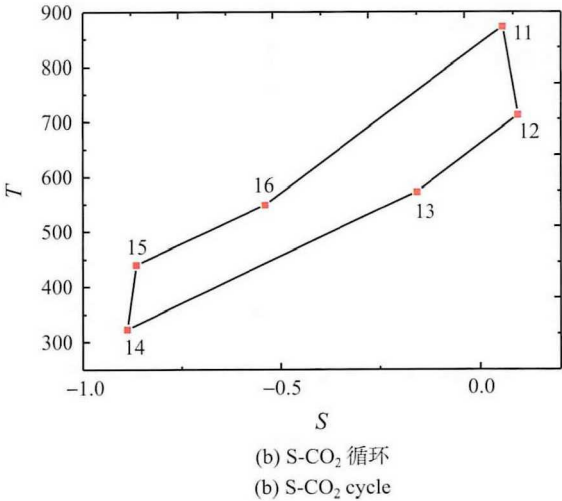
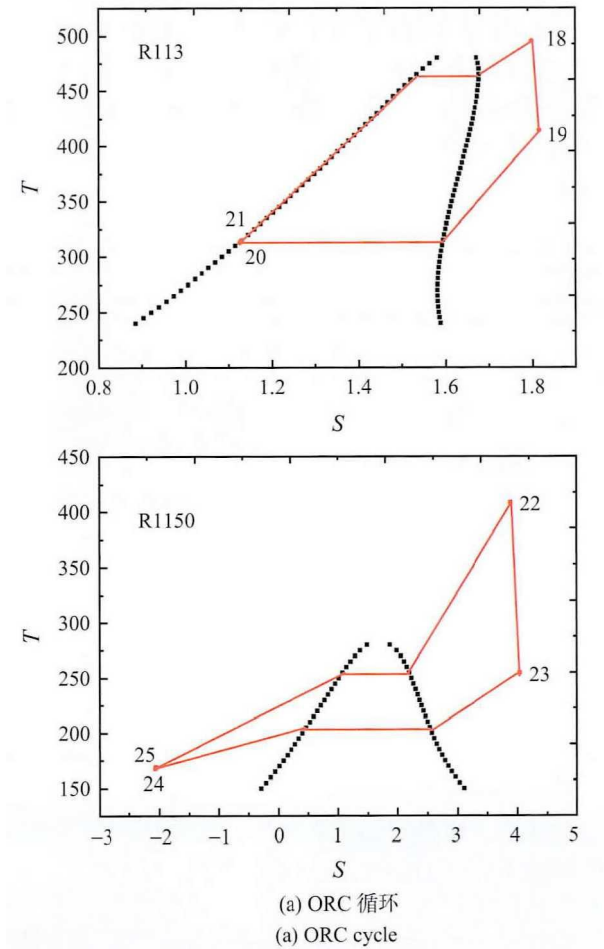


图 2 循环 T - S 图
Fig. 2 T - S diagram of cogeneration cycle

- 4) 工质在进出透平或压缩机前后均为饱和气(液)态^[14];
- 5) 进入系统的空气和水均在环境的温度 (298.15 K) 和压力 (0.1013 MPa) 下^[10];
- 6) 工业电价为 0.7173 CNY/kWh, 工业热蒸汽价格 200 CNY/t^[15], 人民币兑美元汇率为 1 USD 兑 7.1448 CNY^[16];

表 2 系统模拟参数设置

Table 2 Parameters used in the modeling

工况参数	取值
GT (AC) pressure ratio	10
LHV/(kJ/kg)	49303
LNG Pump/MPa	5
Compressor discharged pressure/MPa	3
Turbine isentropic efficiency $\eta_{\text{Turbine}}/\%$	0.87
Compressor isentropic efficiency $\eta_{\text{COMP}}/\%$	0.87
HRSG inlet water pressure/MPa	3.5
HRSG inlet water temperature/K	298.18
Pump pressure ratio	20

2.1 热力学模型

在对热力学效率建模过程中, 进入和流出每个组件的质量能量均守恒, 热力学第一定律用于评估系统做功能力和对外界吸收能量转换程度, 热力学第二定律分析能量的品级与可用能的利用程度。

进入系统的总热量由天然气低热值计算^[17]

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \dot{m}_{\text{NG}} \text{LHV}$$

(1)

烟气余热 (5) 的热量

$$\dot{Q}_{\text{wh}} = \dot{m}_5 (h_5 - h_0)$$

(2)

HRSG 供热量

$$\dot{Q}_{\text{H}_2\text{O}} = \dot{m}_9 (h_9 - h_8)$$

(3)

空压机 (AC) 和燃气轮机 (GT) 的能量平衡方程可表示为

$$\dot{W}_{AC} = \dot{m}_{air} (h_{out} - h_{in})$$

(4)

$$\dot{W}_{GT} = \dot{m}_{gas} (h_{in} - h_{out})$$

(5)

系统净输出功

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{GT} + \sum \dot{W}_{Tur} \sum \dot{W}_P \dot{W}_{COMP} \dot{W}_{AC}$$

(6)

系统热效率

$$\eta_{th} = (\dot{W}_{net}) / \dot{Q}_{in}$$

(7)

IHE 回热度表示为 [18]

$$\varepsilon_{IHE} = (T_{12} - T_{13}) / (T_{12} - T_{15})$$

(8)

烟分为热机械烟和化学烟, 热机械烟可分为三部分 [19]: 物理烟 E_{ph} , 动能有效能 E_{kn} 和潜在能 E_{pt}

$$E_{th} = E_{ph} + E_{kn} + E_{pt}$$

(9)

图 3 为系统烟流示意图。利用黑箱法将系统内部烟归为整体, 只考虑进出系统的烟流及系统输出的有用烟。在本文的研究中, 天然气燃烧热作为系统烟的主要来源, 因此热量烟主要为天然气的化学烟(低位热值), 忽略天然气的热机械烟。其他工质未发生化学反应, 故只考虑热机械烟对系统的影响, 并忽略了动能和潜在能量的影响, 工质的烟值表示为式 (10) 的形式 [20]

$$\dot{E}_x = \dot{E}_{ph} = \dot{m} (h - h_0 - T_0 (s - s_0))$$

(10)

其中, h 和 s 分别代表指定条件下的比焓和比熵, 下标 0 指环境条件的值。

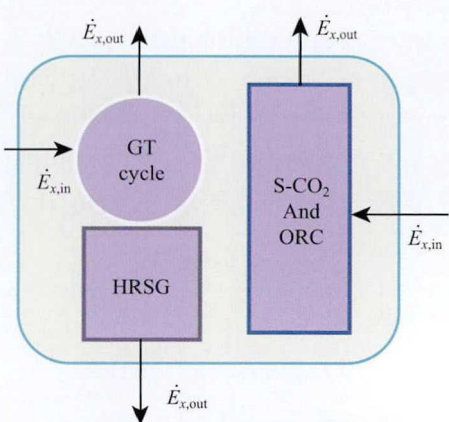


图 3 余热三级利用烟示意图
Fig. 3 Exergy schematic diagram of waste heat utilization

系统烟效率 [21] 及冷烟利用率 [22] 定义为

$$\eta_{ex} = (\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{H_2O}) / (\dot{E}_{x,LNG} + \dot{E}_{x,NG})$$

(11)

$$\eta_{ex-cold} = \dot{W}_{net-ORC} / (\dot{E}_{x,in} - \dot{E}_{x,out})$$

(12)

2.2 经济分析建模

2.2.1 热 - 经济学建模

热 - 经济学建模用于计算设备投资花费, 基于设备工作能力, 通过设备耗能与设备成本间的相互转换, 求得设备购买成本 (Purchase Equipments Cost, PEC)。 \dot{Z}_k 代表设备 k 的资本花费, 其中包括设备投资 (Capital Investment, CI) 和操作维修 (Operation Management, OM) 费用, 计算公式如下 [23,24]

$$\dot{Z}_k = \dot{Z}_k^{CI} + \dot{Z}_k^{OM} = (CRF \times PEC_k \times \varphi_r) / N$$

(13)

$$CRF = [i(1+i)^{bl}] / [(1+i)^{bl} - 1]$$

(14)

$$C_{tot} = \sum \dot{Z}_k + C_{fuel} + C_{CO_2} + C_W$$

(15)

式中, CRF 为资本回收因子 (Capital Recovery factor), φ_r 为维护因子; N 代表设备运行时长, 以小时 (h) 为单位; i 代表利率; bl 为系统的使用年限, 相关数值在表 3 中给出, 设备的 PEC 公式在表 4 中给出 [2]。式 (15) 为总投资花费 (Total investment cost, C_{tot}), 表示为设备的资本花费总和、燃料费、碳排放税收和所需电费之和, 用以判断对系统经济产生影响的参数及其影响趋势。

表 3 系统模拟参数设置

Table 3 Parameters used in the modeling

Parameters	Value
Annual operating hours N/h	8000
Components expected life bl/a	20
Interest rate $i/\%$	6
Maintenance factor φ_r	1.06

2.2.2 环境经济模型

二氧化碳过度排放是造成温室效应的主要原因之一, 未来在碳排放税收上控制温室气体进入大气必然成为节能减排的主要手段。本文利用天然气燃烧进行发电, 故烟气中必然含有一定量的 CO_2 。为验证本系统的环保型, 这一部分建模讨论发电量与二氧化碳排放量间的关系, 拟定 CO_2 排放价格为 0.0145 USD/kg [17,25], 热电厂在符合烟气排放规定内对经济收益的影响。

环境分析是根据二氧化碳在特定的时间段内的排放量来计算的, 如以下公式 [26,27]

$$x_{CO_2} = y_{CO_2} \dot{E}_{np} t_{working}$$

(16)

表 4 PEC 公式

Table 4 The correlations referenced for PEC of the components

Component	Purchase equipment cost (PEC)	Exchange ratio
Air compressor	$((71.10\dot{m}_{air})/(0.9\eta_{sc}))(P_{out}/P_{in})\ln(P_{out}/P_{in})$	1267/1027
Combustion chamber	$(46.08\dot{m}_a/(0.995-P_{out}/P_{in}))[1+\exp(0.018T_{out}-26.4)]$	1267/1027
Gas turbine	$(479.34\dot{m}_g/(0.92-\eta_{sc}))\ln(P_{in}/P_{out})[1+\exp(0.036T_{in}-54.4)]$	1267/1027
Evaporator	$309.143(A_{eva})+231.915$ $A_k=\frac{\dot{Q}_k}{U_k\Delta T}$	1267/1027
Turbine	$6000(\dot{W}_T^{0.7})$	1267/1027
Compressor	$91562(\dot{W}/445)^{0.67}$	1267/1027
Pump	$3540(\dot{W}_p)^{0.71}$	1267/1027
Heat exchanger	$310(A_{HE})+190$	1267/1194
Condenser	$1773(\dot{m}_{steam})$	1267/1027
HRSG	$6570\left[\left(\frac{\dot{Q}_{ec}}{\Delta T_{lm,ec}}\right)^{0.8}+\left(\frac{\dot{Q}_{ev}}{\Delta T_{lm,ev}}\right)^{0.8}\right]+21276\dot{m}_w+1184.4\dot{m}_g^{1.2}$ $\Delta T_{lm}=(\Delta T_o-\Delta T_i)/\ln(\Delta T_o/\Delta T_i)$	1267/1027

其中, x_{CO_2} 是指在特定时间内的碳排放量, 拟定时间段为每天 (d); $t_{working}$ 是在该时间段内的工作时长, 单位为 h/d; y_{CO_2} 是与能量单位相关的碳排放数值, kg/kWh (CO_2); \dot{E}_{np} 是在该能量单位下的产品能量率, kW。

通过式 (16) 所得的碳排放量, 再与经济结合构成环境 – 经济学分析。环境经济价值是通过计算一天内释放的碳排放量和单位碳排放价格来确定。确定碳价是建议限制温室气体产量的解决方案之一, 国际碳价格介于 0.013 USD/kg (CO_2) 和 0.016 USD/kg (CO_2) 之间 [28], 在该条件的约束下, 通过完善系统各模块以达到高效利用燃料的目标。

环境成本参数 C_{CO_2} 算法如下

$$C_{CO_2}=x_{CO_2}c_{CO_2} \tag{17}$$

3 结果与讨论

3.1 热力学分析

为验证本文参数设置的合理性, 参考文献 [1] 中的主要物流热力学参数设置, 在本文系统同样采用文献 [1] 中 AC、CC、GT、HRSG 等热电联产主要设备的情况下, 列出数据如表 5 所示。通过引入 S- CO_2 以及 ORC 对余热进行多级利用, 借助 Aspen Plus 模拟结果计算, 在消耗燃料 1.704 kg/s(LNG) 的条件下, 净发电功率 45 MW, 达到小型发电厂发电量要求, 余热锅炉提供的饱和蒸汽的热量 41.5 MW, S- CO_2 /ORC 联合循环提供电力值为 8.64 MW。烟气余热 79.92 MW, 余热回收率 88.50%, 热效率为 52.79%。LNG 在进入冷凝器之前首先通过 LP 加

压至 5 MPa, 进入系统的 LNG 冷能焓值为 111.56 MW, 系统总焓效率为 46.69%, LNG 冷焓利用率为 56.32%。

表 5 部分工质流参数设置 [1]

Table 5 Main working fluid flows parameter settings [1]

节点	工质	T/K	P/MPa	$\dot{m}/(kg/s)$	\dot{E}_x/MW
1	air	298.15	0.1013	94.75	0
2	air	609.4	1.013	94.75	28.384
3	air	809.4	1.013	94.75	40.263
4	gas	1573.2	1	96.454	111.377
5	gas	1004.3	0.1	96.454	39.341
8	water (L)	298.15	3.5	15.4	0.0511
9	water (G)	515.7	3.5	15.4	14.718
10/29	fuel	298.15	5	1.704	86.487

3.2 参数分析

参数分析是对循环中某一特定参数进行的专门讨论, 研究其在循环中的重要性和参数自身变化趋势对循环整体性能的影响。当改变某一参数值时, 其他条件应保持不变。

3.2.1 热力性能分析

图 4 以系统热效率、焓效率及热蒸汽供应量为目标函数, 讨论了燃气轮机进口温度对循环的影响。当烟气流量不变的情况下, 流经 GT 的热流量的焓降决定输出功大小。由于 GT 是系统发电的主要设备, 其发电功率将直接影响系统热力学效率。在燃烧压力为 1 MPa 的条件下, 增加烟气进口温度, 系统热力学效率呈线性上升趋势, 主要原因是进口焓 h_4 和出口焓 h_5 均随烟气的升高而增大, 但 h_4 的增幅要高于 h_5 , 故净输出功持续增加, 热效率和焓效

率显著上升。因为 GT 出口温度也随之增加, 为保证 S-CO₂ 循环和空气预热所吸收的热量不变, 需要调节热蒸汽量来增大 HRSG 的吸热能力, 因此提高了供热收益。此外, 增加 GT 进口温度的同时也会加剧系统的不可逆损失和设备损耗, 所以选择合适的燃烧温度有利于节约能量, 减少设备负荷并延长生命周期。

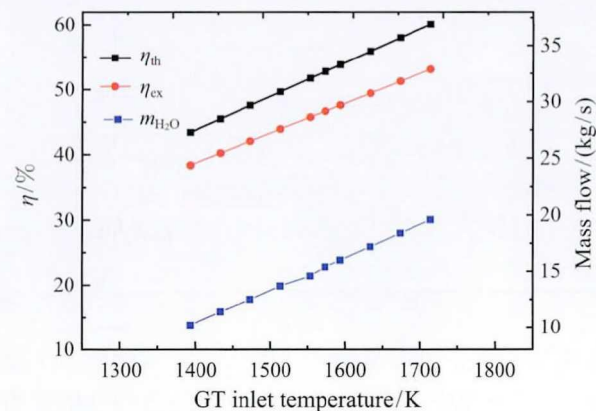
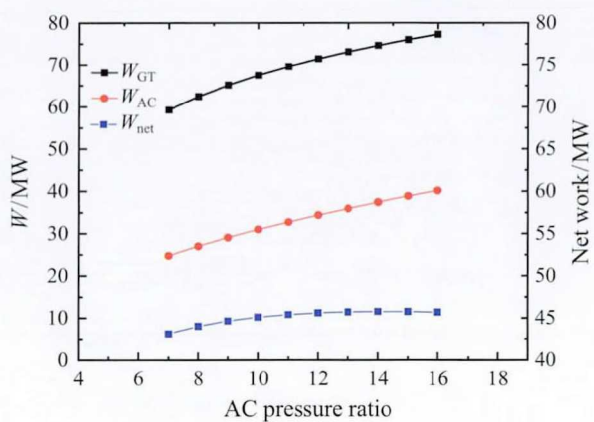


图 4 燃气轮机进口温度对热力学效率和热蒸汽量的影响
Fig. 4 Effect of gas turbine inlet temperature on thermodynamic efficiency and amount of hot steam

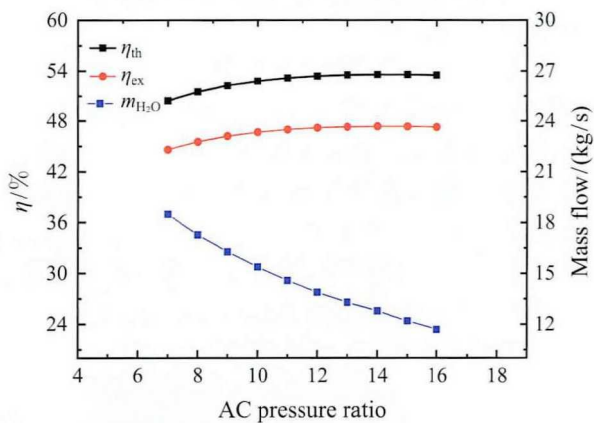
图 5 具体分析了 AC 压比变化对系统输出功和效率的影响。由图 5 (a) 可以看出, AC 压比对 GT 做功量与自身耗功量都有影响, 这是由于二者在随压比增高的同时的焓降均有所增加。但随着压比的不断增大, GT 做功并不能无限制持续增长, 在 PR(压比) 接近 14 时净输出功达到最大值, 此后膨胀做功无法弥补空压机功耗, W_{net} 呈现缓慢下降趋势, 热效率和焓效率与净输出功变化规律一致, 如图 5 (b) 所示。压比的提高带动了 GT 排气温度的下降, 故热蒸汽量不断减少。虽然压比变化可带来最大收益, 但考虑到系统的负荷能力及电厂供电量的伸缩性, PR 不应过高。

图 6 分别描述了 Tur1 进口压力和进口温度对输出功和 S-CO₂ 循环内部回热器效能的影响。从 6 (a) 中可以看出, Tur1 输出功始终随进口条件的升高而增加, 这是由于透平膨胀机和燃气轮机有相似的做功原理, 在将热能转变为机械能的过程中焓值降低, 焓差越大输出功越多。在图 6 (b) 中展现的是 IHE 随 S-CO₂ 循环条件的变化形势, Tur1 进口温度和压力越高, 回热器效能越好。当联合循环压比不变时, T_{13} 和 T_{15} 为定值, 根据回热度计算公式, T_{12} 上升有助于回热器整体效能的提高; 当压比发生改变时, T_{12} 随着膨胀比的升高而逐渐下降, T_{15} 则随着压缩比的升高而逐渐增加, 在这两个参数的

共同作用下, 入口温度 ≤ 913.15 K 时, IHE 回热度随着 Tur1 入口压力的升高有所降低, 超过这个温度后, 回热度有向反方向变化的趋势, 产生这种变化的原因主要是夹点温差在两个温度参数变化过程中逐渐缩小, 在热源温度达到特定值后, 变化趋势发生改变。



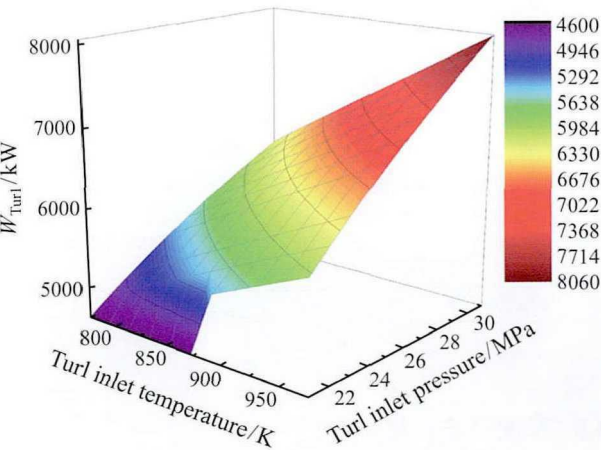
(a) AC 压比对 GT 输出功、AC 耗功和净输出功的影响
(a) The effect of AC pressure ratio on GT output work, AC power consumption and net output work



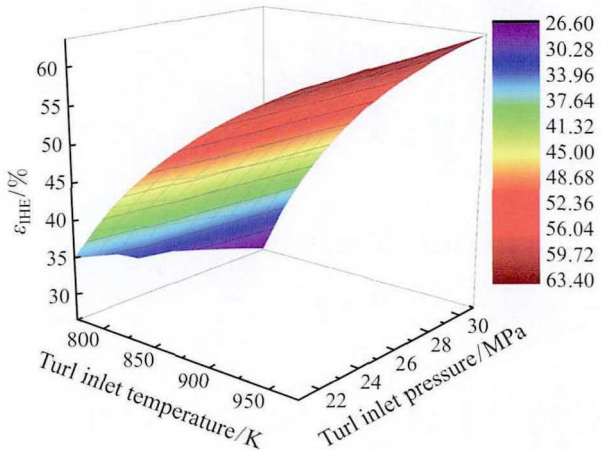
(b) AC 压比对热力学效率和热蒸汽量的影响
(b) Effect of AC pressure ratio on thermodynamic efficiency and amount of hot steam

图 5 AC 压比对部分循环参数的影响
Fig. 5 The influence of AC pressure ratio on partial parameters

图 7 描绘了在不同的 Tur1 进口压力和进口温度下, S-CO₂/ORC 联合循环对余热利用率的影响。保证三级余热利用总量不变, 在指定的循环最高压力下, 增加 Tur1 的进口温度, 余热利用率呈线性大幅增长。进口温度不变时, 余热回收率也随 Tur1 进口压力的升高而增大。这种变化趋势是因为在循环吸收的余热总量不变的情况下, 工质进口温度和进口压力的增加都会带动 Tur1 的发电量上升, 因此, 余热回收率不断优化。



(a) Tur1进口压力和进口温度对输出功的影响
(a) The effect of Tur1 inlet pressure and inlet temperature on Tur1 output work



(b) Tur1进口压力和进口温度对S-CO2循环内部回热器效能的影响
Fig. 6 (b) Effect of inlet pressure and inlet temperature of Tur1 on the efficiency of internal heat exchanger of S-CO2 cycle

图6 Tur1进口压力和进口温度对部分循环参数的影响
Fig. 6 The influence of Tur1 inlet pressure and inlet temperature on partial parameters

图8显示了当Tur1进口温度为873.15 K时,压缩机进口温度,即S-CO₂循环最低温度对IHE回热效能和余热回收率的影响。因S-CO₂/ORC联合循环的换热位置为EVA1,所以热源出口温度对两部分循环均有影响。当循环最低温度(≥304.11 K)逐渐增大时,工质R113蒸发温度降低,导致Tur2做功减少并且出口温度降低,同样的变化影响了透平3,联合循环的整体输出功降低。同时,COMP进口温度的增加使其耗功量变大,这两个因素同时作用,使余热回收率逐渐恶化。而IHE回热度却有着相反趋势,这源于T₁₅的增大令式(7)中分母变小,致使回热度总体上升。

3.2.2 热经济性分析

图9和图10分析了影响功率的各类参数与总投

资花费间的关系。图9中的变量为影响S-CO₂循环的主要因素:Tur1进口温度、进口压力和压缩机进口温度。从曲线走向可知,随着温度和压力的升高,总投资始终呈上升趋势,压缩机进口温度和Tur1进口压力的影响较大,Tur1进口温度影响小。主要原因是在式(15)的变量中,C_{fuel}不变,C_{CO₂}和C_w与系统净功和耗功有直接关系,ΣZ_k占比较小但变化幅度较大,当这三个变量分别增大时,Tur1进口温度的改变直接导致净功的增加,故C_{CO₂}是让费用增加的主要因素;Tur1进口压力增加的同时不仅提升净功,也会增加压缩耗功,C_{CO₂}和C_w同时增大,所以曲线走势幅度大;压缩机进口温度的升高会使系统耗功明显增加,导致净功虽然增加但幅度较小,所以曲线趋势介于上述两个变量之间。

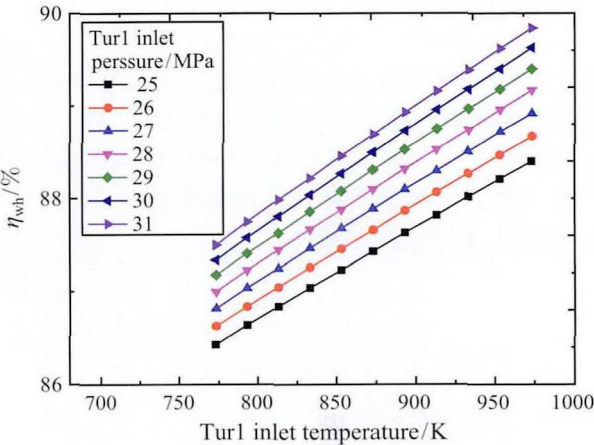


图7 Tur1进口压力和进口温度对S-CO₂/ORC联合循环余热回收率影响

Fig. 7 Effect of inlet pressure and inlet temperature of Tur1 on S-CO₂/ORC combined cycle waste heat recovery rate

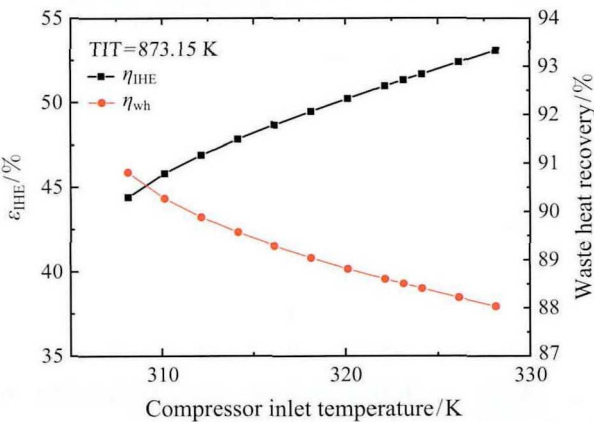


图8 压缩机进口温度对内部回热器和余热回收率的影响
Fig. 8 Effect of compressor inlet temperature on internal heat exchanger and waste heat recovery

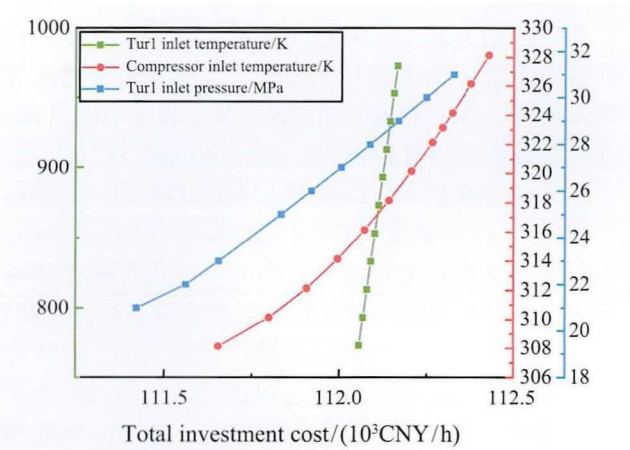


图 9 Tur1 进口温度和进口压力, 压缩机进口温度对总投资花费的影响

Fig. 9 Effect of Tur1 inlet temperature and inlet pressure, compressor inlet temperature on total investment cost

图 10 中分析的两个变量主要针对 GT 循环, 由于 AC, GT, CC 等设备在 $\sum \dot{Z}_k$ 中占比较大, 所以在讨论 T_4 和 AC 压比对总资本投资花费的影响时, \dot{Z}_k 是不能忽略的因素。 T_4 增大时, 系统净功、CC 和 GT 的设备成本均增加, 而在 AC 变化时, 不仅这三项增加, AC 产生的较大耗功对自身成本和 C_W 、 C_{CO_2} 都有影响, 所以曲线增幅大。

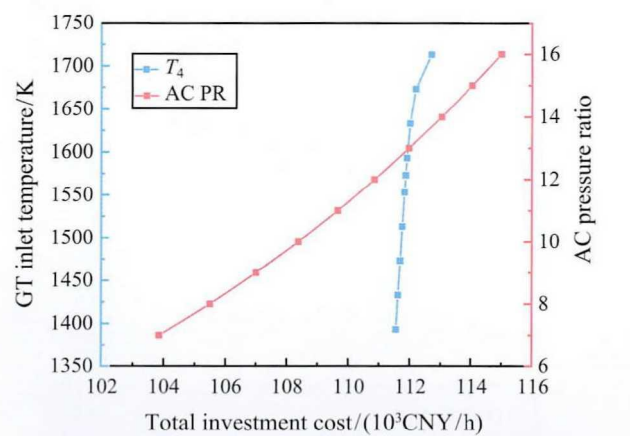


图 10 GT 进口温度和 AC 压比对总投资花费的影响

Fig. 10 The influence of GT inlet temperature and AC pressure ratio on the total investment cost

3.2.3 环境经济性分析

在对环境经济分析过程中, 烟气始终作为热源与其他工质进行热交换, 中间没有分流过程, 因此整个系统的 CO_2 排放量为定值, 即燃料燃烧生成的 x_{CO_2} 含量, 单位为 $kg/d (CO_2)$ 。工作时长根据设备运行总时长 $t_{working}$ 为 22.857 h/d, 根据系统净输出功 45.123 MW, 及表 6 中列出的其他参数, 求得二氧化碳排放价格为 5575.585 USD/d, 折合人民币

39836.44 CNY/d。

表 6 热 - 环境经济分析结果

Table 6 Thermal-environmental economic analysis results

Parameters	y_{CO_2}	\dot{E}_{up}
system	0.4612	45123.9 kW
	kg/kWh (CO_2)	
Parameters	x_{CO_2}	C_{CO_2}
system	4.75×10^5	39836.44
	kg/d (CO_2)	CNY/d

3.3 系统经济优化

通过对上述参数的分析, 结合热力学和经济分析的影响, 可以总结出系统发电的成本与收益同各个因素之间呈非线性关系。为达到优化目的, 以平均发电成本 (LCOE) 最小值为目标函数, GT 进口温度、AC 压比、Tur1 进口温度和进口压力、COMP 进口温度等变量设定为优化循环的自变量, 具体目标函数和约束条件如下:

目标函数:

$$\min (LCOE) = \frac{\sum \dot{Z}_k + C_{fuel} + C_{CO_2}}{\dot{W}_{net}}$$

约束条件:

$$St. \begin{cases} 1323.15 \text{ K} \leq T_4 \leq 1773.15 \text{ K}; \\ 7.5 \leq PR \leq 12; \\ 833.15 \text{ K} \leq T_{11} \leq 923.15 \text{ K}; \\ 24 \leq P_{11} \leq 33; \\ 308.15 \text{ K} \leq T_{14} \leq 326.15 \text{ K}; \\ \dot{W}_{net} = \dot{W}_{GT} + \dot{W}_{Tur1} + \dot{W}_{Tur2} + \dot{W}_{Tur3} - \dot{W}_{COMP} - \dot{W}_{AC} - \dot{W}_{LP} - \dot{W}_{P1} - \dot{W}_{P2}; \\ C_{fuel} = \text{const}; \\ C_{CO_2} = \text{const} \end{cases} \quad (18)$$

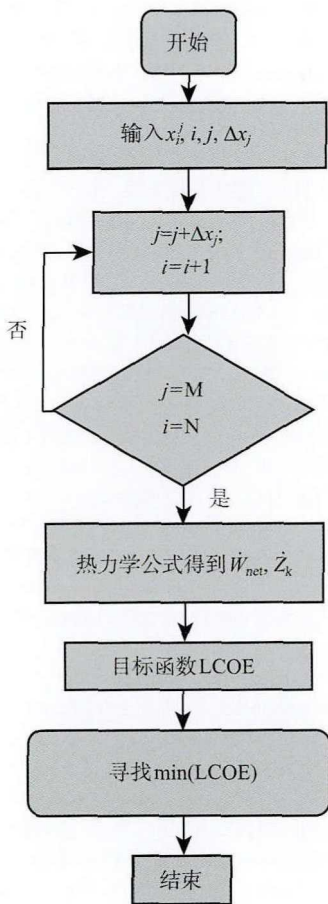
约束条件是由 Aspen Plus 灵敏度分析确定的边界值, k 为设备代号, 利用 Matlab 建立非线性约束优化模型, 用图 11 建立的模型方法求解:

得到 LCOE 结果为 0.1529 CNY/kWh, 此时 $T_4 = 1687.15 \text{ K}$, AC 压比为 12, 高压透平 Tur1 进口温度和压力分别为 913.15 K, 33 MPa, COMP 进口温度为 314.15 K。目标函数整体较设定参数优化 16.35%。优化后的设备资本投资及操作维护花费用如表 7 所示。系统总资本投资为 223.48 USD/h, 折合人民币 1596.72 CNY/h。

表 7 设备投资及操作与维护费用

Table 7 Equipment investment and operation and maintenance costs

Component	AC	CC	GT	MHE	HRSG
$\dot{Z}_k/\text{USD}\cdot\text{h}^{-1}$	68.54	9.68	27.26	0.32	26.34
Component	Tur1	COMP	IHE	EVA1	—
$\dot{Z}_k/\text{USD}\cdot\text{h}^{-1}$	38.03	3.8	0.51	0.86	—
Component	Tur2	P1	EVA2	Tur3	COND
$\dot{Z}_k/\text{USD}\cdot\text{h}^{-1}$	18.53	1.15	0.27	22.56	0.31
Component	P2	LP	HE	TOTAL	—
$\dot{Z}_k/\text{USD}\cdot\text{h}^{-1}$	0.94	1.95	2.43	223.48	—



注: i 为操纵变量的离散值编号, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 即 T_4 、PR、 T_{11} 、 P_{11} 、 T_{14} ; j 为操纵变量对应范围值; 表示相应变量的步长; M 为边界上限。

图 11 求解最优值模型图

Fig. 11 Optimal solution model diagram

4 结 论

本文提出了一种可用于 LNG 接收站一体的发电厂的新型热电联供系统, 通过三级余热回收系统最大程度利用燃料燃烧释放的能量, 并在此基础上对 LNG 冷能加以利用, 从热经济学和环境经济学的

角度全面分析了系统主产品和副产品带来的经济效益。得到主要结论如下:

- 1) 本文设计了一种在天然气流量 1.704 kg/s 的条件下, 净发电功率 45 MW , 供热量 41.5 MW 的小型热电联产系统, 热效率、炯效率和余热利用率分别为 52.79% 、 46.69% 和 88.50% , LNG 冷炯利用率为 56.32% 。在对影响系统性能的参数分析中, GT 进口温度和 AC 压比的增大均有提高热力学效率的趋势, 但受 GT 做功能力的影响, AC 压比在上升中可以得到最佳效率值; Tur1 的进口压力与进口温度始终和输出功、余热回收率呈线性上升关系, S- CO_2 的内部回热器效能随进口温度的升高逐渐优化, 在进口压力增加的过程中回热效率先减小后缓慢增大; 压缩机进口温度可以增进回热器效能, 但会降低余热回收率, 二者在 309.12 K 处可维持平衡。
- 2) 热电厂每天消耗 LNG 量为 843 t , 其中有 703 t 气化后可作为居民燃气出售, 取 LNG 进口价 3850 CNY/t , 燃气价格 2.63 CNY/m^3 。通过参数分析, 以最小平均发电成本为目标函数, 利用 Matlab 优化后得到最优供电成本 0.1529 CNY/kWh 。综合考虑发电经济效益、热蒸汽回收效益、电厂设备投资、碳排放价格的综合考虑, 电厂每天可带来的理想收益为 85414.37 CNY , 年 (按 350 天计算) 净收益可达 2989.5 万元。

参 考 文 献

[1] Khaljani M, Khoshbakhti S R, Bahlouli K. Comprehensive Analysis of Energy, Exergy and Exergo-economic of Cogeneration of Heat and Power in a Combined Gas Turbine and Organic Rankine Cycle [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 97: 154-165

[2] Gholizadeh T, Vajdi M, Mohammadkhani F. Thermodynamic and Thermoeconomic Analysis of Basic and Modified Power Generation Systems Fueled by Biogas [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 463-475

[3] 单从云, 李华. 压气站燃气轮机烟气余热利用方案 [J]. 油气储运, 2018, 37(11): 1286-1290

SHAN Congyun, LI Hua. Utilization Scheme of Flue Gas Waste Heat in Compressor Station [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(11): 1286-1290

[4] 张高强, 付忠广, 王树成, 等. 燃气 - 蒸汽联合循环进气冷却系统对机组性能影响研究 [J]. 中国电力, 2018, 51(12): 36-41

ZHANG Gaoqiang, FU Zhongguang, WANG Shucheng, et al. Research on the Influence of Gas-steam Combined Cycle Intake Air Cooling System on Unit Performance [J]. China Electric Power, 2018, 51(12): 36-41

[5] 张丽, 王文武, 张智恩, 等. 一种天然气液化和 CO_2 捕集相结合的余热回收发电系统 [J]. 化工学报, 2019, 70(1): 261-270

ZHANG Li, WANG Wenwu, ZHANG Zhien, et al. A Waste Heat Recovery Power Generation System Combining Natural Gas Liquefaction and CO_2 Capture [J]. CIESC Journal, 2019, 70(1): 261-270

- [6] 陈晓欣, 胥建群, 张方, 等. 基于 ORC 烟气余热利用系统的工质筛选及节能分析 [J]. 汽轮机技术, 2018, 60(5): 335–339
CHEN Xiaoxin, XU Jianqun, ZHANG Fang, et al. Separation of Working Fluids and Energy Saving Analysis Based on ORC Flue Gas Waste Heat Utilization System [J]. Turbine Technology, 2018, 60(5): 335–339
- [7] Olumayegun O, Wang M, Oko E. Thermodynamic Performance Evaluation of Supercritical CO₂ Closed Brayton Cycles for Coal-fired Power Generation with Solvent-based CO₂ Capture [J]. Energy, 2019, 166: 1074–1088
- [8] Muto Y, Ishiyama S, Kato Y, et al. Application of Supercritical CO₂ Gas Turbine for the Fossil Fired Thermal Plant [J]. Journal of Energy and Power Engineering, 2010, 4(9): 7–15
- [9] 郑雅文, 徐进良, 杨绪飞. 超临界 CO₂ 分流循环及联合循环的热力学分析 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 814–822
ZHENG Yawen, XU Jinliang, YANG Xufei. Thermodynamic Analysis of Supercritical CO₂ Shunt Cycle and Combined Cycle [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(03): 814–822
- [10] Akbari A D, Mahmoudi S M S. Thermoeconomic Analysis & Optimization of the Combined Supercritical CO₂ (Carbon Dioxide) Recompression Brayton/organic Rankine Cycle [J]. Energy, 2014, 78: 501–512
- [11] Olumayegun O, Wang M, Oko E. Thermodynamic Performance Evaluation of Supercritical CO₂ Closed Brayton Cycles for Coal-fired Power Generation with Solvent-based CO₂ Capture [J]. Energy, 2019, 166: 1074–1088
- [12] 潘振, 仇阳, 乔伟彪, 等. 以燃煤废气为热源的 LNG 冷能三级利用系统 [J]. 化工进展, 2016, 35(11): 3720–3726
PAN Zhen, QIU Yang, QIAO Weibiao, et al. LNG Cold Energy Three-stage Utilization System Using Coal-fired Exhaust Gas as Heat Source [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(11): 3720–3726
- [13] 于立军, 朱亚东, 吴元旦著. 中低温余热发电技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2015: 1–197
YU Lijun, ZHU Yadong, WU Yuandan. Medium and Low Temperature Waste Heat Power Generation Technology [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2015: 1–197
- [14] Zhang L, Pan Z, Yu J, et al. Multiobjective Optimization for Exergoeconomic Analysis of an Integrated Cogeneration System [J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(5): 1868–1881
- [15] 铁能集团. 2019 年电费收费标准 [EB/OL]. [2019-7-30]. http://bid.coal.com.cn/Member/Company_419936.htm
- [16] 美元人民币汇率网. 今日美元汇率 [EB/OL]. [2019-7-30]. <https://www.usd-cny.com/>
- [17] Caglayan H, Caliskan H. Energy, Exergy and Sustainability Assessments of a Cogeneration System for Ceramic Industry [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 136: 504–515
- [18] Sarkar J, Bhattacharyya S. Optimization of Recompression S-CO₂ Power Cycle with Reheating [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(8): 1939–1945
- [19] Darabadi Z A, Khoshbakhti S R, Mirmasoumi S, et al. Extensive Thermodynamic and Economic Analysis of the Cogeneration of Heat and Power System Fueled by the Blend of Natural Gas and Biogas [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 164: 329–343
- [20] Garousi F L, Mahmoudi S M S, Rosen M A. Exergoeconomic Comparison of Double Effect and Combined Ejector-double Effect Absorption Refrigeration Systems [J]. Applied Energy, 2013, 103: 700–711
- [21] 熊永强, 华贲. 利用液化天然气冷能捕集 CO₂ 的动力系统的集成 [J]. 化工学报, 2010, 61(12): 3142–3148
XIONG Yongqiang, HUA Ben. Integration of Power System for CO₂ Capture by LNG Cold Energy [J]. CIESC Journal, 2010, 61(12): 3142–3148
- [22] 张丽, 马贵阳, 潘振, 等. 基于 SAGD 稠油开采余热利用的冷热电三联供系统 [J]. 工程热物理学报, 2018, 39(9): 1890–1898
ZHANG Li, MA Guiyang, PAN Zhen, et al. Thermodynamic Analysis of Combined Cooling Heating and Power (CCHP) System Based on Waste Heat Recovery in Heavy Oil Extraction with Steam Assisted Gravity Drainage (SAGD) Process [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(9): 1890–1898
- [23] Singh D B, Tiwari G N. Exergoeconomic, Enviroeconomic and Productivity Analyses of Basin Type Solar Stills by Incorporating N Identical PVT Compound Parabolic Concentrator Collectors: A Comparative Study [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 135: 129–147
- [24] Soltani S, Mahmoudi S M S, Yari M, et al. A Comparative Exergoeconomic Analysis of Two Biomass and Cofiring Combined Power Plants [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 76: 83–91
- [25] Caglayan H, Caliskan H. Thermodynamic Based Economic and Environmental Analyses of an Industrial Cogeneration System [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 158: 1–9
- [26] Caliskan H. Thermodynamic and Environmental Analyses of Biomass, Solar and Electrical Energy Options Based Building Heating Applications [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 1016–1034
- [27] Caliskan H. Novel Approaches to Exergy and Economy Based Enhanced Environmental Analyses for Energy Systems [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 156–161
- [28] Den E M G J, Hof A F, Mendoza B A, et al. The Copenhagen Accord: Abatement Costs and Carbon Prices Resulting From the Submissions [J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(1): 28–39