

太阳光热发电-超临界二氧化碳循环系统 经济性分析与优化

邓成刚¹, 李伟科¹, 梁展鹏¹, 陈建生², 梁颖宗², 罗向龙²
(1.中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 5106631;
2.广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州 510006)

[摘要] 在太阳能光热发电(CSP)系统中,采用超临界二氧化碳(S-CO₂)布雷顿循环相较于传统蒸汽朗肯循环可获得更高的发电效率。本文建立了塔式CSP-S-CO₂布雷顿循环集成电站系统的数学模型,以最小化电站平准化度电成本(LCOE)为目标,采用联立方程法对集成系统进行了参数优化,并对循环的关键参数进行了敏感性分析。将模型应用于50 MW级塔式CSP-S-CO₂布雷顿循环电站的优化设计,结果表明:当蓄热时长为8 h、透平入口温度520.85 °C、透平和压缩机入口压力分别为25 MPa和8.63 MPa时,可将系统LCOE降低至0.817元/(kW·h),较塔式CSP-蒸汽朗肯循环(0.994元/(kW·h))降低17.81%;蓄热时长越长,系统LCOE越小;存在最优的透平入口温度、分流比和压比,使系统LCOE最小;提升透平与压缩机的等熵效率可显著降低系统LCOE。

[关键词] 太阳能光热发电;超临界二氧化碳布雷顿循环;平准化度电成本;系统优化
[中图分类号] TK123 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rlfid.202010256

[引用本文格式] 邓成刚,李伟科,梁展鹏,等.太阳光热发电-超临界二氧化碳循环系统经济性分析与优化[J].热力发电,2021,50(期):起始页码-终止页码. DENG Chenggang, LI Weike, LIANG Zhanpeng, et al. Economic analysis and optimization for concentrated solar power-supercritical carbon dioxide Brayton cycle system[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(期): 起始页码-终止页码.

Economic analysis and optimization for concentrated solar power-supercritical carbon dioxide Brayton cycle system

DENG Chenggang¹, LI Weike¹, LIANG Zhanpeng¹, CHEN Jiansheng², LIANG Yingzong², LUO Xianglong²
(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510663, China)

Abstract: Compared with the conventional steam Rankine cycle, the supercritical carbon dioxide (S-CO₂) Brayton cycle can achieve higher power generation efficiency when used in concentrated solar power (CSP) system. This paper formulates a mathematical model for the CSP-S-CO₂ Brayton cycle system. The objective is to minimize levelized cost of electricity (LCOE) of the CSP-S-CO₂ Brayton cycle system by optimizing the parameters of the integrated system by equation-based method. Sensitivity analysis is carried out to investigate the impact of key parameters of the cycle. Moreover, the model is applied to optimization design of a 50 MW-level CSP-S-CO₂ power station, and the results show that, the CSP-S-CO₂ power plant achieves a minimum LCOE of 0.817 yuan/(kW·h) with the heat storage capacity of 8 h, turbine inlet temperature of 520.85 °C, turbine inlet pressure of 25 MPa and compressor inlet pressure of 8.63 MPa. The LCOE is 17.81% lower than that of the conventional CSP-steam Rankine cycle power plant (0.994 yuan/(kW·h)). Furthermore, case studies show that, a larger thermal storage capacity results in a lower LCOE. On the other hand, the system achieves the minimum LCOE with a moderate turbine inlet temperature, split ratio and pressure ratio. Finally, improving the isentropic efficiency of the turbine

收稿日期: 2020-10-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0601803)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2017YFB0601803)

第一作者简介: 邓成刚(1974),男,教授级工程师,主要研究方向为新型热力系统设计与优化, dengchengang@gedi.com.cn.

通信作者简介: 罗向龙(1978),男,博士,教授,主要研究方向为热力系统集成优化, lxl-dte@gdut.edu.cn.

and compressor can reduce the LCOE of the system significantly.

Key words: concentrated solar power, S-CO₂ Brayton cycle, levelized cost of electricity, system optimization

太阳能光热发电 (concentrated solar power, CSP) 是一种将太阳辐射能转化为热能再转化为电能的可再生能源发电技术。CSP 具有蓄热成本低、负荷调节灵活等特点,发展前景广阔^[1-2]。根据国际能源署的统计,截至 2018 年, CSP 电站的全球总装机容量已达 5.5 GW,并将在 2022 年增长至 10 GW^[3],发展迅猛。目前, CSP 电站光热转换的方式主要有塔式、槽式和碟式。其中,塔式太阳能电站较槽式和碟式太阳能电站具有更高的运行温度 (565 °C),因此热效率更高,其利用熔融盐作为传热蓄热媒介可实现低成本蓄热。因此,新建的 CSP 电站广泛采用塔式设计^[4]。

然而,由于 CSP 技术仍处于发展阶段,目前 CSP 电站的发电成本依然偏高。现有的塔式 CSP 电站多采用传统蒸汽朗肯循环,但受透平入口温度的限制,其发电效率较低,仅为 16%~17%^[5]。超临界二氧化碳 (S-CO₂) 布雷顿循环因热效率高、设备结构紧凑、与熔融盐换热匹配良好^[6-7]等优点而被认为是与塔式 CSP 集成最具潜力的发电系统。因此,对塔式 CSP 和 S-CO₂ 布雷顿循环集成系统进行经济性优化、降低发电成本,具有重大的经济和工程意义。

目前,关于塔式 CSP-S-CO₂ 系统集成研究主要集中于不同 S-CO₂ 循环形式对集成系统热力学性能的影响,以及循环关键参数对系统的影响,详细综述见文献[8-9]。尽管目前仍缺乏对塔式 CSP-S-CO₂ 电站经济性的研究,但现有研究已为塔式 CSP-S-CO₂ 系统集成热经济性优化在物理性质 (物性) 计算、循环设计以及设备经济模型等方面提供了基础。

Zhao Q 等^[10]对比了 Span-Wagner、Peng-Robinson、Soave-Redlich-Kwong 等 6 种 CO₂ 状态方程的准确性,并指出 Span-Wagner 状态方程^[11]对 CO₂ 物性计算最准确,平均误差为 2.43%。Zhao H 等^[12]分析了 S-CO₂ 简单回热布雷顿循环和再压缩布雷顿循环的焓性能和经济性,结果表明,简单回热循环的回热器投资更低,而再压缩循环的焓效率更高。需要指出,上述分析仅考虑了循环部件的投资费用,而未考虑热源 (如集热系统) 的建设和电站运行费

用。Ma 等人^[13]采用焓经济分析方法对塔式 CSP-S-CO₂ 集成系统进行了关键参数的研究和优化,并建立了线性回归模型以预测在不同透平入口温度下系统的总单位焓成本。

针对采用 S-CO₂ 布雷顿循环的塔式 CSP 电站的经济性优化问题,本文提出了基于联立方程法的数学规划模型。模型内嵌集热和蓄热子系统、S-CO₂ 布雷顿循环、CO₂ 热物性以及电站成本数学模型,实现对集成系统设计变量的同步优化。将模型应用于 50 MW 塔式 CSP 电站设计,并以最小化电站平准化度电成本 (levelized cost of electricity, LCOE) 为目标优化电站的关键运行参数设计,探讨塔式 CSP 电站的优化设计方法。

1 过程描述

塔式 CSP 电站主要由 4 个子系统组成:定日镜场子系统、太阳能塔子系统、蓄热子系统和动力子系统 (S-CO₂ 布雷顿循环)。本文采用再压缩循环,分析并优化塔式 CSP 与布雷顿循环的设计。

图 1 为以熔融盐为传热蓄热介质的塔式 CSP-S-CO₂ 布雷顿循环电站示意。该电站主要包括集热子系统 (包括定日镜场、太阳能塔、集热器)、蓄热子系统 (包括冷、热熔融盐罐) 和 S-CO₂ 布雷顿循环,具体流程如下。

定日镜将太阳辐射反射到太阳能塔最上方的中央接收器的光圈区域,使接收器温度升高以加热流经接收器内部管道的熔融盐。高温的熔融盐一部分进入热熔融盐罐 (热罐) 储存热量,另一部分通过换热器将热能传递给 S-CO₂ 后进入冷熔融盐罐 (冷罐)。高压的 S-CO₂ 在换热器被熔融盐加热后进入透平膨胀做功,之后依次通过高温回热器、低温回热器与低温高压的 S-CO₂ 换热,并在低温回热器出口分流:一部分 S-CO₂ 被直接送入再压缩机进行压缩,另一部分进入冷却器冷却后,被送入主压缩机。主压缩机出口的 S-CO₂ 进入低温回热器进行预热,并在低温回热器出口与再压缩机出口的 S-CO₂ 混合,之后进入高温回热器继续预热,并进入换热器与熔融盐换热形成循环。

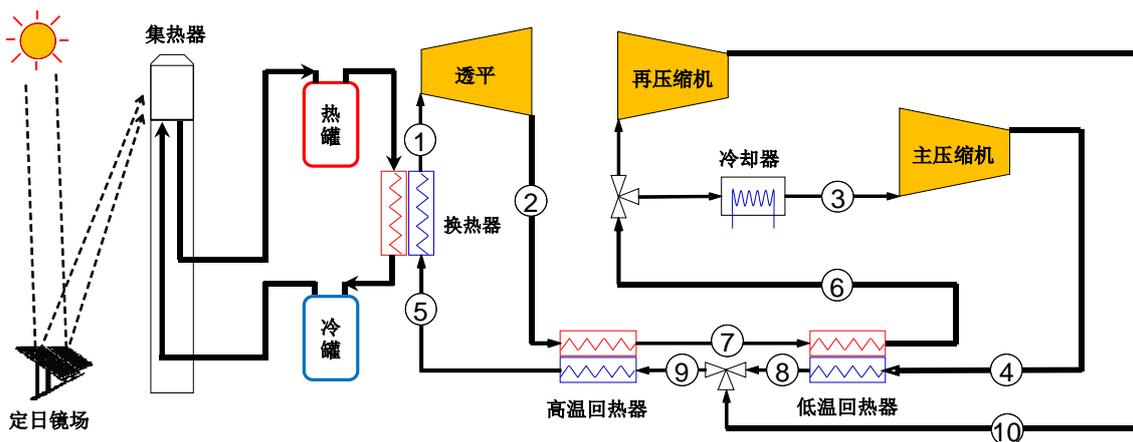


图 1 塔式太阳能-超临界二氧化碳布雷顿循环系统流程示意
Fig.1 Schematic diagram of tower solar-supercritical carbon dioxide Brayton cycle system

2 数学模型

2.1 问题定义

基于上述系统描述，建立了集成 S-CO₂ 布雷顿循环的塔式 CSP 系统的非线性规划 (Nonlinear programming, NLP) 数学模型。模型以最小化塔式 CSP 系统的 LCOE 为目标，服从定日镜场、太阳能塔、集热器、布雷顿循环的运行和经济性约束，主要设计变量包括熔融盐温度和流量，透平、压缩机、回热器和换热器进、出口物流的流量和热物性，各部件的投资费用等。限于篇幅，本节仅列出目标函数和部分主要约束。系统初始参数见表 1。

表 1 系统主要设计参数

Tab.1 Main design parameters of the system

设计参数	数值	设计参数	数值
太阳直射辐射强度/(W·m ⁻²)	700	最小传热温差/K ^[15]	10
辐射视角因子 ^[14]	0.8	蓄热耗资/(元·(kW·h) ⁻¹) ^[16]	168
镜场效率 ^[14]	0.75	贴现率 ^[17]	0.07
空气温度/K	298	蓄热时长/h	8
透平等熵效率	0.85	风速/(m·s ⁻¹)	5
反射率 ^[14]	0.04	定日镜面积/m ³ ^[18]	119.93
压缩机等熵效率	0.8	投资回收期 ^[17]	25
发射率 ^[14]	0.8	电场额定功率/MW	50
管道外径/m	0.019	管道内径/m	0.015 7

模型的主要假设包括：

- 1) 太阳辐射能为定值，系统处于稳态；
- 2) 布雷顿循环的压缩、膨胀、换热过程为绝热过程；
- 3) 膨胀和压缩过程的等熵效率一定；
- 4) 系统的压力损失忽略不计。

2.2 目标函数

模型以最小化塔式 CSP-S-CO₂ 布雷顿循环系统的 LCOE 为目标，目标函数为

$$\min L_{\text{LCOE}} = \frac{F_{\text{TAC}}}{E_{\text{annual}}} \quad (1)$$

式中： E_{annual} 为发电厂的年发电量，kW·h； F_{TAC} 为年化总费用，元。

2.3 热力学模型

2.3.1 定日镜场

定日镜场由若干个定日镜组成，总面积为 A 。镜场接收的总热辐射量 Q_{solar} 与总面积 A 的关系为

$$Q_{\text{solar}} = A \cdot \delta_{\text{DNI}} \quad (2)$$

式中， δ_{DNI} 为太阳直射辐射强度，W/m²。

集热器接收到的辐射量 q_{rec} 与 Q_{solar} 的关系为

$$q_{\text{rec}} = \eta_{\text{sf}} \cdot Q_{\text{solar}} \quad (3)$$

式中， η_{sf} 为定日镜场效率，%。

2.3.2 太阳能塔

太阳能塔包括塔身和集热器 2 部分。聚焦到太阳能塔顶端集热器上的能量一部分被熔融盐吸收，另一部分以对流、辐射、反射和导热的方式损失到周围环境中。集热器中的能量平衡为

$$q_{\text{rec}} = q_{\text{ms}} + q_{\text{loss,cov}} + q_{\text{loss,em}} + q_{\text{loss,ref}} + q_{\text{loss,con}} \quad (4)$$

式中： q_{ms} 为熔融盐从集热器中吸收的热量，J； $q_{\text{loss,cov}}$ 为对流传热损失，J； $q_{\text{loss,em}}$ 为辐射热损失（见式(5)），J； $q_{\text{loss,ref}}$ 为反射热损失，J； $q_{\text{loss,con}}$ 为导热热损失，J。

$$q_{loss,em} = \varepsilon_{avg} \cdot \sigma (t_{re,sur}^4 - T_a^4) A_{re,sur} \cdot F_r \quad (5)$$

式中: ε_{avg} 为平均辐射率, J; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; $t_{re,sur}$ 为集热器表面温度, K; T_a 为环境温度, K; $A_{re,sur}$ 为集热器面积, m^2 ; F_r 为集热器视角因子。

由于相关文献中没有关于太阳能塔高度的计算方法, 本文基于 8 座已建立的塔式太阳能发电系统的基础数据, 根据其定日镜场面积和太阳能塔高度的对应参数值 (图 2), 通过曲线拟合方法得到太阳能塔高度与定日镜场面积之间的关系:

$$H_{tow} = 29.31A^{0.1438}。$$

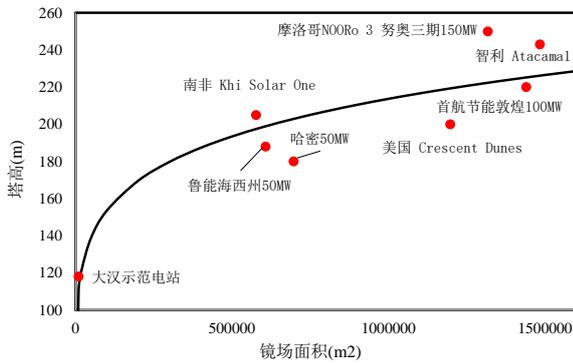


图 2 8 座已建立的塔式太阳能发电系统定日镜场面积与太阳能塔高度

Fig.2 The heliostat field areas and solar tower heights of eight built tower solar power generation systems

2.3.3 蓄热系统

太阳辐射充足时, 冷罐内的低温熔融盐流经集热器被加热至高温后流至热罐, 一部分从热罐流出, 经过换热器与 S-CO₂ 换热并返回冷罐, 剩余部分则存储在热罐中, 当太阳辐射不足时, 用来向循环供应热量。

$$q_{ms} = q_{cycle} + q_{sto} \quad (6)$$

式中: q_{cycle} 为熔融盐与 S-CO₂ 的换热量, J; q_{sto} 为热罐中储存的热量, J。

2.3.4 S-CO₂ 布雷顿循环

S-CO₂ 布雷顿再压缩循环的净输出功 w_{net} 为

$$w_{net} = w_{tur} - w_{mc} - w_{rc} \quad (7)$$

式中: w_{tur} 为透平的输出功, W; w_{mc} 为主压缩机能耗, W; w_{rc} 为再压缩机能耗, W, 其表达式见式(8)——(10):

$$w_{tur} = m_{co_2} (h_1 - h_2) \quad (8)$$

$$w_{mc} = m_{co_2} \cdot \gamma_{sr} (h_4 - h_3) \quad (9)$$

$$w_{rc} = m_{co_2} (1 - \gamma_{sr}) (h_{10} - h_6) \quad (10)$$

式中: h 为物流的比焓, kJ/kg; m_{co_2} 为物流的质量流量, kg/s; γ_{sr} 为 CO₂ 分流至主压缩机的分流比。其中, 比焓等状态参数通过模型内嵌的 Span-Wagner 状态方程计算。

布雷顿循环热效率 η_{cycle} 为

$$\eta_{cycle} = \frac{w_{net}}{q_{cycle}} \quad (11)$$

2.4 经济性模型

塔式 CSP-S-CO₂ 布雷顿循环电站的年度总费用由式(12)计算^[19]:

$$C_{TAC} = C_{ACC} + C_{op} + C_{sm} + C_{emp} \quad (12)$$

式中: C_{ACC} 为年化投资成本, 元; C_{op} 、 C_{sm} 和 C_{emp} 为电站运营成本、服务和维护成本以及工厂员工工资, 元。

年化投资成本 C_{ACC} 为

$$C_{ACC} = C_{TCC} + C_{CRF} \quad (13)$$

式中: C_{TCC} 为总资本成本, 元; C_{CRF} 为资本回收率, %, 其计算见式(14)

$$C_{CRF} = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (14)$$

式中: i 为折现率, %; N 为电站寿命, a。

总资本成本 C_{TCC} 为

$$C_{TCC} = C_{PEC} + C_{site} + C_{instal} + C_{civil} + C_{eng} + C_{cont} \quad (15)$$

式中: C_{PEC} 为采购设备费用, 元; C_{site} 为场地开发费用, 元; C_{instal} 为设备安装费用, 元; C_{civil} 为土木工程费用, 元; C_{eng} 为工程、规划和管理费用, 元; C_{cont} 为意外事故费用, 元。

太阳能电站各部件的投资函数见表 2。

表 2 太阳能电站各部件的投资函数
Tab.2 Investment function of each component

部件	投资成本函数
定日镜 ^[17]	$C_{col} = \left(40 + 11.44 A_{helios}^{0.5} + \frac{3000}{A_{helios}} \right) A_{helios} \cdot N_{helios} \quad (1)$
定日镜接线 ^[17]	$C_{wire-helios} = \left(93.45 A_{helios}^{0.448} \right) N_{helios} \quad (2)$
太阳能塔 ^[17]	$C_{tower} = 1.09025 \times 10^6 \exp\left(0.00879 H_{tower}\right) \quad H_{tower} < 120$ $C_{tower} = 0.78232 \times 10^6 \exp\left(0.01130 H_{tower}\right) \quad H_{tower} \geq 120 \quad (3)$
太阳能塔接管 ^[17]	$C_{wire-tower} = \left(3600 \frac{r_{out}}{1.31} + 420 \frac{r_{in}}{0.87} \right) H_{tower} + \frac{90000}{0.87} \quad (4)$
接收器 ^[17]	$C_{rec} = A_{rec} \left(79 T_{rec,o} - 42000 \right) \quad (5)$
蓄热系统 ^[16]	$C_{storage} = c_{storage} \cdot Q_{storage} \quad (6)$
透平 ^[20]	$Z_{ST} = 479.34 m_{in} \left(\frac{1}{0.93 - \eta_{ST}} \right) \ln\left(\gamma_{PRc}\right) \left[1 + \exp\left(0.036 T_{in} - 54.4\right) \right] \quad (7)$
压缩机 ^[20]	$Z_k = 71.1 m_{in} \left(\frac{1}{0.92 - \eta_k} \right) \gamma_{PRc} \cdot \ln\left(\gamma_{PRc}\right) \quad (8)$
回热器/换热器 ^[20]	$Z_k = 2681 A_k^{0.59} \quad (9)$
冷却器 ^[20]	$Z_k = 2143 A_k^{0.514} \quad (10)$

注： C_{col} 为定日镜的投资成本，元； A_{helios} 为单块定日镜面积， m^2 ； N_{helios} 为定日镜数量； $C_{wire-helios}$ 为定日镜接线的投资，元； C_{tower} 为太阳能塔塔身的投资成本，元； H_{tower} 为太阳能塔高度，m； $C_{wire-tower}$ 为太阳能塔管道的投资成本，元； r_{out} 为管道外径，m； r_{in} 为管道内径，m； A_{rec} 为集热器面积， m^2 ； $T_{rec,o}$ 为集热器出口温度，K； $c_{storage}$ 为度电蓄热耗费，元/(kW·h)； $Q_{storage}$ 为蓄热负荷，kW·h； m_{in} 为 CO_2 的质量流量，kg/s； η_{ST} 为透平的等熵效率，%； γ_{PRc} 为压缩比， T_{in} 为透平入口温度，K； η_k 为压缩机的等熵效率，%； A_k 为第 k 个器件的换热面积， m^2 。

3 结果与讨论

本文模型基于 GAMS 平台建立，采用 CONOPT 求解器进行求解。

3.1 集成系统最优设计

塔式 CSP-S- CO_2 布雷顿循环电站系统最优设计参数见表 3。由表 3 可以看出，系统 LCOE 为 0.817 元/(kW·h)，较目前塔式 CSP-蒸汽朗肯循环的 LCOE (0.994 元/(kW·h))^[21]低 17.81%；其发电效率为 24.25%，较朗肯循环电站 (17%)^[5]高 42.65%。由此可见，塔式 CSP-S- CO_2 布雷顿循环电厂在经济性和能源转换效率方面均优于塔式 CSP-蒸汽朗肯循环电站。

此时，最优的压缩机出口压力为 25 MPa，达到给定范围内的最大值，意味着在给定压力范围内，压缩机出口压力越大，循环热效率越高；透平出口压力为 8.63 MPa，大于 CO_2 的临界压力 7.38 MPa，这是由于再压缩循环再压缩机入口温度远离临界点，过大的压缩比所增加的能耗远超过其所增加的透平输出功。因此，再压缩循环的背压并非越低越

好。S- CO_2 流量为 663.71 kg/s，透平入口温度为 520.85 °C，这是因为透平入口温度变化时集热器热效率与布雷顿循环热效率之间存在耦合关系，这将在错误!未找到引用源。节进一步讨论。

表 3 塔式 CSP-S- CO_2 布雷顿循环电站最优设计参数
Tab.3 Optimal design parameters of tower solar-supercritical carbon dioxide Brayton cycle power station

设计变量	最优值	设计变量	最优值
LCOE/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.817	定日镜数量	4 913
太阳能塔高度/m	198.05	电厂发电效率/%	24.25
透平入口压力/MPa	25.00	透平出口压力/MPa	8.63
透平输出功率/MW	83.14	集热器热效率/%	85.75
主压缩机功耗/MW	11.91	S- CO_2 流量/(kg·s ⁻¹)	663.71
再压缩机功耗/MW	21.23	透平入口温度/°C	520.85
布雷顿循环发电效率/%	37.70	分流比	0.383 5
熔融盐总流量/t	20 936	镜场初投资/元	8.122×10 ⁹
熔融盐入口温度/°C	530.9	太阳能塔初投资/元	3.294×10 ⁸
熔融盐出口温度/°C	370.8	循环初投资/元	4.551×10 ⁷
压缩机出口压力/MPa	25.00	蓄热初投资/元	1.782×10 ⁸

图 3 为集成系统在最优设计参数下的初投资分

布。由图 3 图可见, 电站投资以定日镜场和太阳能塔的费用为主, 二者分别占总投资的 59.49% 和 24.13%。蓄热时长显著影响太阳能塔等设备的规模, 蓄热时长越长, 投资越大, 因此, 3.2 节将分析不同蓄热时长对电站投资及其 LCOE 的影响。另外, S- CO_2 布雷顿循环的初投资大大低于集热子系统, 适当增加循环初投资、改进透平和压缩机等设备的效率有利于提高循环热效率, 从而提高电站整体效率。3.3 节将进一步分析透平和压缩机效率及透平入口温度对布雷顿循环以及电站的影响。

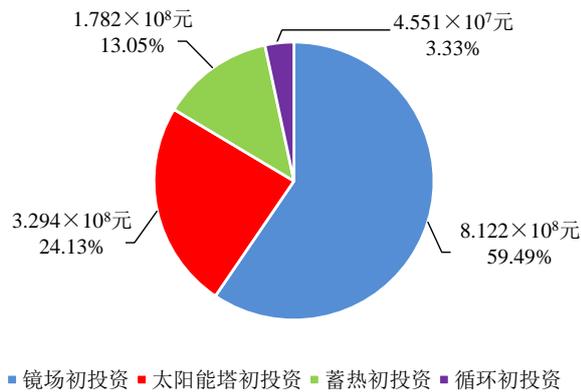


图 3 系统在最优设计参数下的初投资分布

Fig.3 The initial investment distribution of the system with the optimal design parameters

3.2 蓄热时长对 LCOE 的影响

图 4 展示了不同蓄热时长情况下集成系统最小 LCOE 以及各部分的初投资费用。由图 4 可知, 各子系统的初投资随蓄热时长增加而增大, 这是由于蓄热时长增加意味着蓄热系统可储存更多热量, 这需要定日镜场和太阳能塔在有限的时间内输出更多的热量, 因此要求定日镜场面积增大, 太阳能塔高度提高, 集热器面积增大, 从而增大系统初投资。

集成系统的 LCOE 随着蓄热时长的增大呈减小趋势。这可以通过 LCOE 的定义来解释: 当系统蓄热时长为 4 h 时, 系统的 C_{TAC} 为 1.787×10^8 元, 而系统的年发电时长为 4 380 h; 当系统蓄热时长为 16 h 时, 系统的 C_{TAC} 为 3.550×10^8 元, 而系统的年发电时长为 8 760 h; 在额定输出功率不变的情况下, C_{TAC} 增加了 98.63%, 而年发电量增加了 100%, C_{TAC} 的增长速率略低于年发电量的增长速率, 因此在给定的蓄热时长范围内, 系统的 LCOE 整体呈下降趋势, 从 0.819 元/(kW·h)降低至 0.811 元/(kW·h), 降低 0.98%。需要注意的是, 在蓄热时长为 6 h 时, 系统

的 LCOE 低于 7~9 h 时系统的 LCOE。这是由于, 当系统的蓄热时长增加至 7 h 时, 由于定日镜场面积增大, 需要同时增加 1 名镜场技术人员和 1 名控制室操作员, 此时人员费用的增幅大于发电量的增幅, 系统的 LCOE 略微增大。随着蓄热时长继续增大, 发电量的增加将超过额外增加的人员费用, 因此 LCOE 降低。

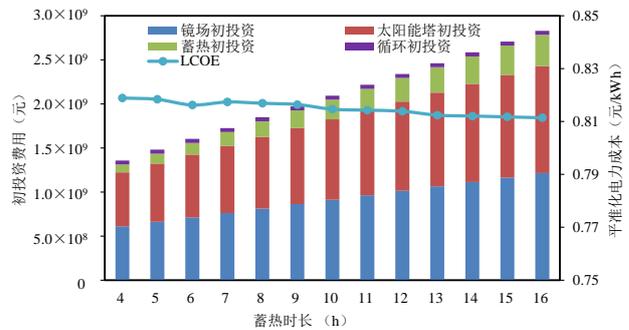


图 4 不同蓄热时长下集成系统各部分初投资费用及 LCOE
Fig.4 The initial investment cost of each part of the system and the LCOE with different heat storage hours

3.3 透平/压缩机等熵效率对 LCOE 的影响

透平及压缩机等熵效率对集成系统最小 LCOE 以及初投资影响较大, 如图 5、图 6 所示。由图 5、图 6 可见, 提高透平和压缩机等熵效率可以增大循环热效率, 降低循环所需热量, 减小定日镜场面积, 降低定日镜场与太阳能塔的初投资, 从而降低集成系统的 LCOE。

当透平等熵效率由 0.7 提升至 0.9 时, 透平初投资从 1.203×10^7 元提高至 7.217×10^7 元, 增加了 499.92%, 布雷顿循环初投资从 2.915×10^7 元提高至 8.705×10^7 元, 增加了 198.63%。但由于循环初投资占总系统初投资比重较小, 当透平等熵效率为 0.7 时, 仅占 1.73%, 当透平等熵效率提升至 0.9 时, 该比重提升至 6.54%。而投资占比最大的定日镜场和太阳能塔初投资分别从 9.979×10^8 元和 4.444×10^8 元下降至 7.642×10^8 元和 3.119×10^8 元, 系统 LCOE 由 0.998 元/(kW·h)下降至 0.795 元/(kW·h), 降低了 20.34%。这意味着, 虽然提高透平等熵效率会导致循环初投资提升, 但对于降低系统其他部分的初投资效果十分显著, 因此, 应在可行的范围内, 尽可能在提升透平效率方面加大投入。

另外, 当压缩机等熵效率由 0.7 提升至 0.9 时, 压缩机的初投资从 4.330×10^6 元增加至 3.334×10^7 元, 增加了 669.98%, 布雷顿循环的初投资从

4.056×10⁷元增加至 6.986×10⁷元，增加了 72.24%，循环初投资占总系统初投资的比重由 2.76%提升至 5.32%，定日镜场和太阳能塔的初投资占比则分别从 58.92%、25.53%下降至 58.77%、22.91%，系统 LCOE 由 0.876 元/(kW·h)下降至 0.785 元/(kW·h)，降低了 10.39%。因此，将投资应用于提升压缩机等熵效率同样可以降低系统其他部分的初投资。

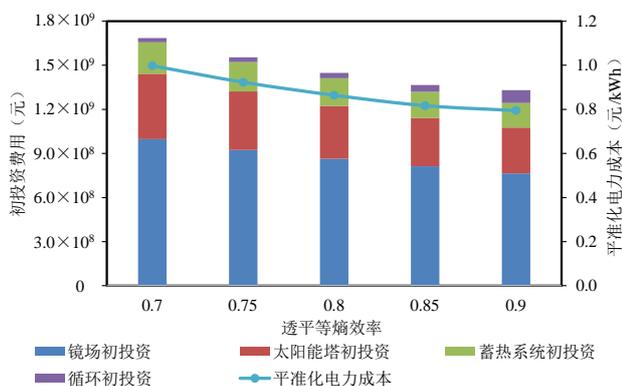


图 5 系统 LCOE 和初投资对透平等熵效率的敏感性分析
Fig.5 Sensitivity analysis of system's LCOE and initial investment on transparency entropy efficiency

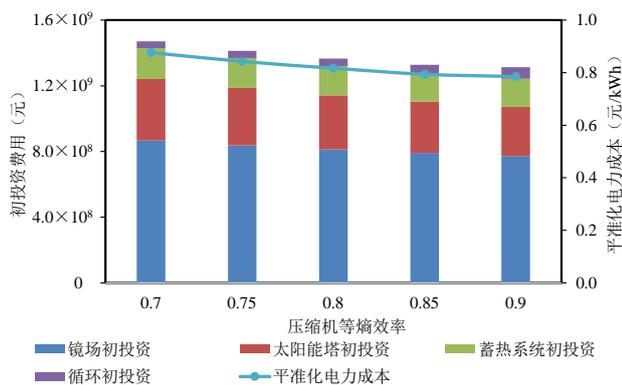


图 6 系统 LCOE 和初投资对压缩机等熵效率的敏感性分析
Fig.6 Sensitivity analysis of system's LCOE and initial investment on isentropic efficiency of compressor

3.4 透平入口温度对 LCOE 的影响

图 7 展示了透平入口温度对集成系统最小 LCOE 的影响。由图 7 可知，透平入口温度在 420~620 °C 时，系统 LCOE 呈现先减小后增大的趋势。这可以通过图 8 中集热器热效率和循环热效率之间的耦合关系进行解释。布雷顿循环热效率随透平入口温度的升高而增大，而集热器热效率随透平入口温度的升高而减小。在透平入口温度为 420~520 °C 时，布雷顿循环热效率占主导地位，升高透平入口温度可以减少系统所需热量，从而减小定

日镜场面积，使定日镜场的投资下降，系统最小 LCOE 降低。在透平入口温度为 520~620 °C 时，集热器热效率对系统能效的影响逐渐增大，由式(5)可见，集热器的辐射热损失与其温度的 4 次方呈线性关系，因此系统能效随透平入口温度的升高而降低。定日镜场的初投资下降速度明显放缓，且随着透平入口温度的升高，太阳能塔（主要为集热器）的初投资明显增大，在这一温度范围内其初投资增大速度超过定日镜场初投资下降速度，使得集成系统的最小 LCOE 逐渐提高。

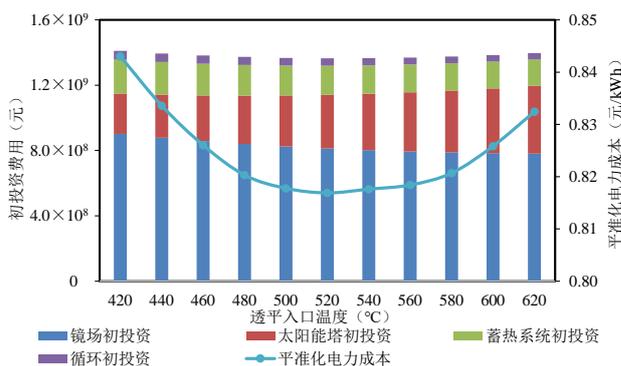


图 7 系统 LCOE 及初投资对透平入口温度的敏感性分析
Fig.7 Sensitivity analysis of system's LCOE and initial investment on turbine inlet temperature

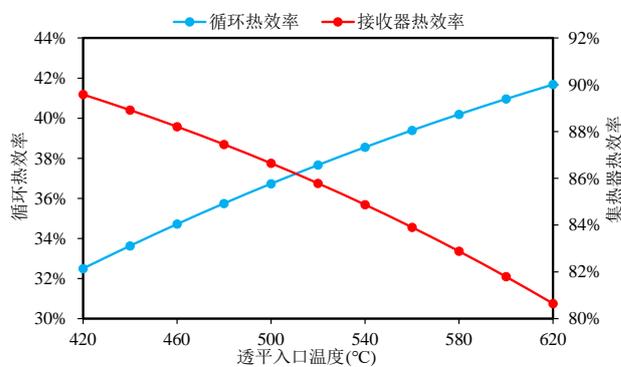


图 8 循环热效率与集热器热效率随透平入口温度的变化
Fig.8 Change of the cycle efficiency and heat collector efficiency with the turbine inlet temperature

3.5 分流比对 LCOE 的影响

图 9 展示了布雷顿循环再压缩分流比对集成系统最小 LCOE 的影响以及各部分的初投资费用。本文分流比为通过再压缩机部分的 S-CO₂ 的流量与循环总 S-CO₂ 流量之比。由图 9 可以看出，随着分流比的增大，系统 LCOE 呈现先减小后增大的趋势。这是由于，虽然分流可以减少需要被冷却的 S-CO₂ 量，以此降低系统焓损失，提高系统效率，减少系统

所需热量,但由于再压缩机入口温度高于 CO_2 临界温度,导致再压缩机的耗功远大于主压缩机的耗功,当分流比提升到一定程度时,由于压缩机耗功增大,系统效率反而减小,使得系统所需热量增大,定日镜场的投资提升,系统 LCOE 增大。当分流比从 0.32 提升至 0.38 时,系统 LCOE 从 0.822 元/(kW·h)降低至 0.817 元/(kW·h),当分流比进一步提升至 0.42 时,系统 LCOE 提高至 0.863 元/(kW·h)。

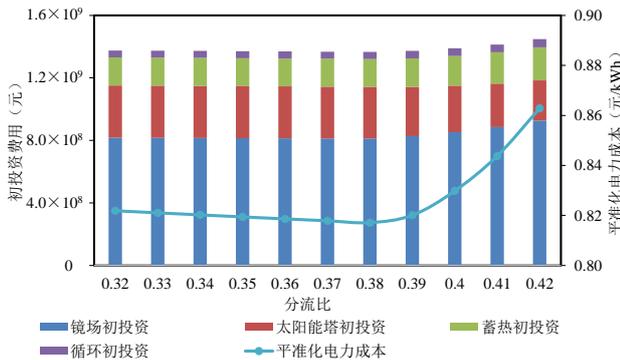


图9 系统 LCOE 和初投资对分流比的敏感性分析
Fig.9 Sensitivity analysis of system's LCOE and initial investment on split ratio

3.6 压比对 LCOE 的影响

图 10 展示了不同压比情况下集成系统的最小 LCOE 以及各部分的初投资费用。

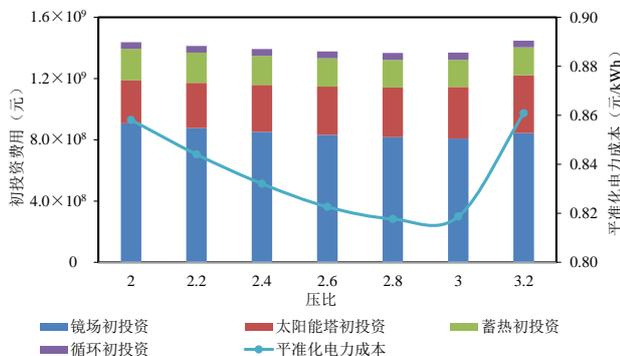


图 10 系统 LCOE 和初投资对压比的敏感性分析
Fig.10 Sensitivity analysis of system's LCOE and initial investment on pressure ratio

由图 10 可知,存在最优压比,使系统 LCOE 最小。当压比从 2.0 提升至 2.8 时,系统 LCOE 从 0.858 元/(kW·h)降低至 0.818 元/(kW·h),当压比进一步提升至 3.2 时,系统 LCOE 提高至 0.861 元/(kW·h)。这是由于,当压比较小时,增大压比可以使流经透平的 S-CO_2 充分做功,降低透平出口温度,减少循环回热量,降低系统的不可逆程度,提高循环热效

率,从而降低系统 LCOE。当压比提高至一定程度时,过大的压比使得压缩机的耗功超过了其所增加的透平输出功,导致系统效率降低,使系统 LCOE 升高。

4 结论与展望

本文针对塔式 CSP-S- CO_2 布雷顿循环电站经济性优化问题,建立了基于联立方程法的数学模型。模型以最小化电站 LCOE 为目标,同步考虑电站的设备、热力学以及热经济性约束,实现了集热、蓄热和动力子系统的同步优化。本文将模型应用于 50 MW 级塔式 CSP 电站的设计,获得了在最小化 LCOE 的目标下塔式 CSP 与 S- CO_2 布雷顿再压缩循环集成的最优设计方案,分析了蓄热时长、透平和压缩机等熵效率以及透平入口温度等关键设计变量对集成系统的影响,结果表明采用 S- CO_2 布雷顿循环的经济性优于传统蒸汽朗肯循环。主要结论如下:

1) 集成系统 LCOE 随系统蓄热时长的增加总体呈下降趋势,但将蓄热时长从 4 h 提高至 16 h 时, C_{TAC} 增加 98.63%,而系统 LCOE 仅降低 0.91%。因此在初始资金有限的情况下,应慎重考虑蓄热时长对系统投资的影响。

2) 提高透平与压缩机的效率虽然大大增加了循环的初投资,但同时也显著降低了定日镜场与太阳能塔初投资,从而降低了系统 LCOE。当透平等熵效率从 0.7 提升至 0.9 时,系统 LCOE 降低了 20.34%;当压缩机等熵效率从 0.7 提升至 0.9 时,系统 LCOE 降低了 10.39%。

3) 由于循环热效率与集热器热效率之间的相互作用,存在最优的透平入口温度,使集成系统 LCOE 最小。

4) 由于透平做功与压缩机耗功的互相影响,存在最优的分流比和压比,使集成系统 LCOE 最小。

[参考文献]

- [1] GONZALO A P, MARUGÁN A P, MÁRQUEZ F P G. A review of the application performances of concentrated solar power systems[J]. Applied Energy, 2019, 255: 113893.
- [2] JU X, XU C, HU Y, et al. A review on the development of photovoltaic/concentrated solar power (PV-CSP) hybrid systems[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 161: 305-327.
- [3] BAHAR H, ABDELILAH Y, COLLIER U, et al. Renewables 2018: analysis and forecasts to 2023[M]. International Energy Agency, 2018: 35-100.
- [4] Renewable Energy World. SAWIN J L, MARTINOT E.

- Renewables bounced back in 2010, finds REN21 global report[J/OL]. (2011-9-29)[2020-12-28].
<https://www.renewableenergyworld.com/2011/09/29/renewables-bounced-back-in-2010-finds-ren21-global-report/#ref>.
- [5] BEHAR O, KHELLAF A, MOHAMMEDI K. A review of studies on central receiver solar thermal power plants[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2013, 23: 12-39.
- [6] LIU M, ZHANG X, YANG K, et al. Optimization and comparison on supercritical CO₂ power cycles integrated within coal-fired power plants considering the hot and cold end characteristics[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 195: 854-865.
- [7] TURCHI C S, MA Z, NEISES T W, et al. Thermodynamic study of advanced supercritical carbon dioxide power cycles for concentrating solar power systems[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2013, 135(4) : 041007.1-41007.7.
- [8] LIU Y, WANG Y, HUANG D. Supercritical CO₂ Brayton cycle: a state-of-the-art review[J]. *Energy*, 2019, 189: 115900.
- [9] WANG K, HE Y L, ZHU H H. Integration between supercritical CO₂ Brayton cycles and molten salt solar power towers: a review and a comprehensive comparison of different cycle layouts[J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 819-836.
- [10] 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.
- [11] SPAN R, WAGNER W. A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple - point temperature to 1100 K at pressures up to 800 MPa[J]. *Journal of physical and chemical reference data*, 1996, 25(6): 1509-1596.
- [12] ZHAO H, DENG Q, HUANG W, et al. Thermodynamic and economic analysis and multi-objective optimization of supercritical CO₂ Brayton cycles[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(8): 081602.1-081602.9.
- [13] MA Y, MOROZYUK T, LIU M, et al. Optimal integration of recompression supercritical CO₂ Brayton cycle with main compression intercooling in solar power tower system based on exergoeconomic approach[J]. *Applied energy*, 2019, 242: 1134-1154.
- [14] 何欣欣, 薛志恒, 陈会勇, 等. 间接式超临界二氧化碳塔式太阳能热发电系统仿真优化[J]. *热力发电*, 2019, 48(7): 53-58.
- CHEN Xinxin, XUE Zhiheng, CHEN Huiyong, et al. Simulation and optimization of solar thermal tower power system with indirect-heated supercritical CO₂ Brayton cycles[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(7): 53-58.
- [15] YANG Z, KANG R, LUO X, et al. Rigorous modelling and deterministic multi-objective optimization of a supercritical CO₂ power system based on equation of state and non-linear programming[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 198: 111798.
- [16] ZURITA A, MATA-TORRES C, VALENZUELA C, et al. Techno-economic evaluation of a hybrid CSP+ PV plant integrated with thermal energy storage and a large-scale battery energy storage system for base generation[J]. *Solar Energy*, 2018, 173: 1262-1277.
- [17] MOHAMMADI K, MCGOWAN J G, SAGHAFIFAR M. Thermo-economic analysis of multi-stage recuperative Brayton power cycles: Part I-hybridization with a solar power tower system[J]. *Energy conversion and Management*, 2019, 185: 898-919.
- [18] AL-SULAIMAN F A, ATIF M. Performance comparison of different supercritical carbon dioxide Brayton cycles integrated with a solar power tower[J]. *Energy*, 2015, 82: 61-71.
- [19] SAGHAFIFAR M, GADALLA M. Thermo-economic analysis of air bottoming cycle hybridization using heliostat field collector: A comparative analysis[J]. *Energy*, 2016, 112: 698-714.
- [20] WU C, WANG S, LI J. Exergoeconomic analysis and optimization of a combined supercritical carbon dioxide recompression Brayton/organic flash cycle for nuclear power plants[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 171: 936-952.
- [21] JI J, TANG H, JIN P. Economic potential to develop concentrating solar power in China: a provincial assessment[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 114: 109279.

(责任编辑 李园)