

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.031

基于 S-CO₂ 循环动态的燃煤发电系统热力学模型优化

侯立强, 王文斌, 刘伟庆

(中国电建集团 山东电力建设第一工程有限公司, 山东 济南 250102)

摘要:为提升系统效率和灵活性,对超临界二氧化碳循环的燃煤发电系统的热力学模型进行优化。结果显示,超临界二氧化碳储能循环系统在透平压比 4.0 和压缩机入口压力 7 600 kPa 时效率达 58.3%,优于多数现有系统。透平压比和工质流量增大可提升效率,而汽轮机效率提高则降低效率。由此证明超临界二氧化碳储能循环系统能有效提高燃煤发电的经济性和环境友好性,为探索能源存储技术提供新方向。

关键词:S-CO₂ 循环; 燃煤发电; 热力学模型; 效率优化; 效率; 能量存储

中图分类号:TK115 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)04-0158-05

Optimization of Thermodynamic Model for Coal-fired Power Generation System Based on S-CO₂ Cycle Dynamics

Hou Liqiang, Wang Wenbin, Liu Weiqing

(POWERCHINA SEPCO1 Electric Power Construction Co., Ltd., Jinan 250102, China)

Abstract: In order to improve system efficiency and flexibility, the thermodynamic model of a coal-fired power generation system based on supercritical carbon dioxide (S-CO₂) cycle is optimized. The results show that the S-CO₂ energy storage cycle system achieves an efficiency of 58.3% at a turbine pressure ratio of 4.0 and a compressor inlet pressure of 7 600 kPa, outperforming most existing systems. Increasing the turbine pressure ratio and working fluid flow rate can improve efficiency, while an increase in steam turbine efficiency reduces it. This demonstrates that the S-CO₂ energy storage cycle system can effectively enhance the economic efficiency and environmental friendliness of coal-fired power generation, providing a new direction for exploring energy storage technologies.

Keywords: S-CO₂ cycle; coal-fired power generation; thermodynamic model; efficiency optimization; exergy efficiency; energy storage

0 引言

燃煤发电作为一种传统的能源供应方式,具有高效率 and 稳定性,在全球能源结构中占据着重要地位。然而,燃煤发电作为一种传统的能源供应方式其灵活性较差,难以适应可再生能源并网的需求,同时也面临着环境污染和碳排放的挑战^[1-3]。而超临界二氧化碳 (supercritical CO₂, S-CO₂) 循环作为一种新型的能量存储技术,因其具有高效率、高密度和环境友好性等特点而受到广泛关注。与传统的压缩空气储能系统相比, S-CO₂ 循环具有更高的能量密度和转换效率,且其系统更加紧凑,易于集成到现有的燃煤发电系统中^[4-6]。因此,为提高燃煤发电机的灵活性,研究构建了基于 S-CO₂ 循环动态的燃煤发电系统热力

学模型,通过优化 S-CO₂ 循环的关键参数,提高系统的往返效率和焓效率,以期提升燃煤发电系统的灵活性和效率提供新的思路。

1 基于 S-CO₂ 循环动态的燃煤发电热力系统

1.1 S-CO₂ 循环数学模型构建

S-CO₂ 循环系统,主要包括压缩机、加热机、换热器等设备。根据各设备的特性,研究构建了 S-CO₂ 循环系统的数学模型。压缩机功率模型为

$$m_{cd,com}^{in} h_{cd,com}^{in} + P_{cd,com} = m_{cd,com}^{out} h_{cd,com}^{out} \quad (1)$$

式中: $m_{cd,com}^{in}$ 和 $h_{cd,com}^{in}$ 分别表示压缩机的 S-CO₂ 进口流量和进口焓; $P_{cd,com}$ 表示压缩机的功耗; $m_{cd,com}^{out}$ 和 $h_{cd,com}^{out}$ 分别表示压缩机的 S-CO₂ 出口流量和出口焓。加热器能量平衡方程^[7-8]为

第一作者简介:侯立强(1979—),男,山东德州人,高级工程师,本科,研究方向为电力方向,houliqiang687945@163.com。
通信作者简介:王文斌(1973—),男,山东泰安人,高级工程师,本科,研究方向为电力方向,wenbinwangq@163.com。

$$\begin{cases} Q_{cd,h} = m_{cd,h}^{out} h_{cd,h}^{out} - m_{cd,h}^{in} h_{cd,h}^{in} \\ m_{sw,h}^{in} h_{sw,h}^{in} = m_{sw,h}^{out} h_{sw,h}^{out} + Q_{cd,h} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Q_{cd,h}$ 表示加热器的换热量; $m_{cd,h}^{out}$ 和 $h_{cd,h}^{out}$ 分别表示加热器的 S-CO₂ 出口流量和出口焓; $m_{cd,h}^{in}$ 和 $h_{cd,h}^{in}$ 分别表示加热器的 S-CO₂ 进口流量和进口焓; $m_{sw,h}^{in}$ 和 $h_{sw,h}^{in}$ 分别表示加热器的蒸汽进口流量和进口焓; $m_{sw,h}^{out}$ 和 $h_{sw,h}^{out}$ 分别表示加热器的蒸汽出口流量和出口焓。对于冷却器而言,其能量平衡方程^[9-11]为

$$\begin{cases} m_{cd,con}^{in} h_{cd,con}^{in} = m_{cd,con}^{out} h_{cd,con}^{out} + Q_{sw,con} \\ Q_{sw,con} = m_{sw,con}^{out} h_{sw,con}^{out} - m_{sw,con}^{in} h_{sw,con}^{in} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $m_{cd,con}^{in}$ 和 $h_{cd,con}^{in}$ 分别表示冷却器的 S-CO₂ 进口流量和进口焓; $m_{cd,con}^{out}$ 和 $h_{cd,con}^{out}$ 分别表示冷却器的 S-CO₂ 出口流量和出口焓; $Q_{sw,con}$ 表示冷却器的换热量; $m_{sw,con}^{out}$ 和 $h_{sw,con}^{out}$ 分别表示加热器的蒸汽出口流量和出口焓; $m_{sw,con}^{in}$ 和 $h_{sw,con}^{in}$ 分别表示加热器的蒸汽进口流量和进口焓。

在 S-CO₂ 循环系统中, S-CO₂ 工质首先通过压缩机被增压至循环中的最高压力。随后, 高压工质流经回热器的热端, 吸收热量后被输送至反应堆。在反应堆中, 工质进一步被加热至循环的最高温度, 然后进入透平进行能量转换, 即做功。做功后, 工质进入回热器的冷端, 在这里它释放热量, 降低自身的温度^[12-14]。接着, 工质流入冷却器, 在其中被冷却至系统最低温度。最后, 经过冷却的工质返回压缩机入口, 从而完成一个完整的循环周期。

1.2 S-CO₂ 循环动态模型构建

为反映 S-CO₂ 循环系统的动态特性, 研究构建了动态数学模型。由于压缩机的工作过程可以视为等熵压缩过程, 因此其出口焓计算公式为

$$h_{com}^{out} = h_{com}^{in} + \frac{h_{com}^{out0} - h_{com}^{in}}{\eta_{com}} \quad (4)$$

式中: h_{com}^{out} 表示压缩机的出口焓; h_{com}^{in} 表示压缩机的进口焓; h_{com}^{out0} 表示压缩机的等熵出口焓; η_{com} 表示压缩机的效率。对于透平模型而言, 其建模方法与压缩机一致, 均采用性能曲线进行分析建模。其性能曲线的归一化公式与式(4)一致。与压缩机类似, 透平的工作过程同样可以视为等熵过程, 因此其出口焓计算公式^[15-17]为

$$h_{tur}^{out} = h_{tur}^{in} - (h_{tur}^{out0} - h_{tur}^{in}) \eta_{tur} \quad (5)$$

式中: h_{tur}^{out} 表示透平的出口焓; h_{tur}^{in} 表示透平的进口焓; h_{tur}^{out0} 表示透平的等熵出口焓; η_{tur} 表示透平的效

率。对于压缩机汽轮机模型而言, 由于其工质为蒸汽, 与压缩机和透平的工质不同, 因此其出口焓为

$$h_{cst}^{out} = h_{cst}^{in} - \eta_{cst} (h_{cst}^{in} - h_{cst}^{out0}) \quad (6)$$

式中: h_{cst}^{out} 表示压缩机汽轮机的出口焓; h_{cst}^{in} 表示压缩机汽轮机的进口焓; η_{cst} 表示压缩机汽轮机的效率; h_{cst}^{out0} 表示压缩机汽轮机的等熵出口焓。对于换热设备模型而言, 其流体焓值的计算公式^[18-19]为

$$\begin{cases} m_{h,c}^{out} \frac{dh_{h,c}^{out}}{dt} = m_{h,c}^{in} h_{h,c}^{in} - m_{h,c}^{out} h_{h,c}^{out} + Q \\ m_{h,h}^{out} \frac{dh_{h,h}^{out}}{dt} = m_{h,h}^{in} h_{h,h}^{in} - m_{h,h}^{out} h_{h,h}^{out} - Q \end{cases} \quad (7)$$

式中, $m_{h,c}^{out}$ 和 $m_{h,h}^{out}$ 分别表示换热器的冷端和热端的出口工质质量流量; $h_{h,c}^{out}$ 和 $h_{h,h}^{out}$ 分别表示换热器的冷端和热端的出口焓; t 表示时间; $m_{h,c}^{in}$ 和 $m_{h,h}^{in}$ 分别表示换热器的冷端和热端的进口工质质量流量; Q 表示换热量。对于节流阀模型而言, 由于其并不做功, 且其中流体的流动速度快, 因此其进出口焓值相等。

1.3 基于 S-CO₂ 循环的燃煤发电热力系统构建

当前的发电方式仍以燃煤发电为主, 但由于其灵活性较差, 导致可再生能源难以大规模并入电网。因此, 为提高燃煤发电机的灵活性, 研究在其中引入了 S-CO₂ 循环。尽管 S-CO₂ 循环中的压缩机主要负责电能转化为机械能, 这在一定程度上限制了系统循环效率的提升。而通过借鉴“弹性抽汽”这一技术, 可以将汽轮机抽汽作为系统的能量源, 进而有效减少系统的能量损耗^[20-21]。上述方法不仅降低了汽轮机的抽汽流量, 提高了机组负荷, 还提高了发电系统的经济性和环保性。基于 S-CO₂ 循环的燃煤发电热力系统如图 1 所示。

由图 1 可知, S-CO₂ 循环储能系统包含汽轮机、换热器、高/低压储气罐、高/低温储热罐、透平和压缩机等关键设备。S-CO₂ 循环在储能模式下, 能通过增加压缩机汽轮机的抽汽流量来驱动压缩机, 使得 S-CO₂ 工质在压缩后温度和压力升高。然后通过换热器将热量传递给导热油, 储存在蓄热罐中, 同时低温高压的 S-CO₂ 工质储存在高压罐中, 实现热能和压力的储存, 以降低燃煤机组的负荷^[22-24]。在释能模式下, S-CO₂ 储能循环系统停止压缩机汽轮机运行, 将低温高压的 S-CO₂ 通过换热器与导热油进行热交换, 然后

S-CO₂进入透平膨胀做功,驱动发电机发电。透平出口的 S-CO₂通过换热器 C 使用汽轮机凝结水进一步降温,而汽轮机凝结水在换热器 D 中冷却导热油,实现能量的梯级利用。导热油在储冷罐

中降温,锅炉凝结水在加热器中升温,回收余热。透平的做功降低了汽轮机抽汽流量,增加了燃煤机组负荷,满足了系统升负荷需求。基于 S-CO₂循环的燃煤发电热力系统参数如表 1 所示。

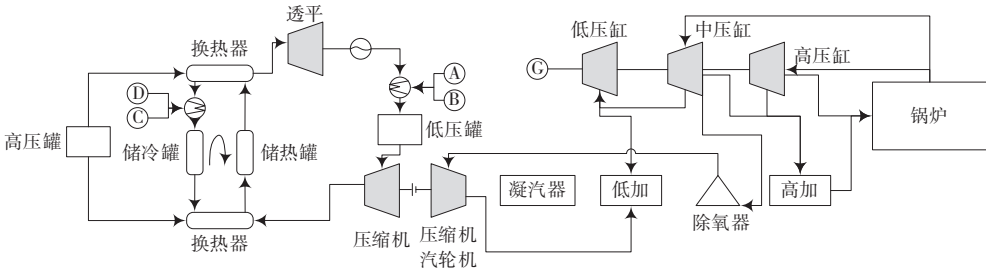


图 1 基于 S-CO₂循环的燃煤发电热力系统

表 1 基于 S-CO₂循环的燃煤发电热力系统参数

项目	参数	数值
流体流量/ (kg/s)	CO ₂ 流量	50
	压缩机汽轮机抽气流量	12
	导热油流量	50
温度/℃	压缩机入口温度	35
	环境温度	25
	热导热油温度	123
	冷导热油温度	50
设备效率	压缩机效率	0.9
	压缩机汽轮机效率	0.8
	透平效率	0.9
压力/MPa	压缩机入口压力	8.0
	换热器压力损失	0.1
	高压罐压力损失	0.3
	低压罐压力损失	0.3
时间/h	储能时间	1
	释能时间	1
压力比	压缩机压力比	5
	透平压力比	5

和 7.8 MPa;压缩机出口的压力及其等熵效率分别为 29 MPa 和 90%;透平入口温度及压力分别为 411 ℃ 和 29 MPa,其等熵效率为 93%。此时,S-CO₂循环数学模型的仿真结果如表 2 所示。

表 2 S-CO₂循环数学模型的仿真结果

参数	仿真值	参考值
压缩机出口温度/℃	116.1	116.3
压缩机功率/MW	4.9	5.0
透平出口温度/℃	265.5	266.4
透平功率/MW	13.8	13.6

表 2 中各参数仿真值与参考值的相对误差均不超过 2%,吻合效果良好。可见,研究构建的 S-CO₂循环数学模型能实现准确的热力学分析。S-CO₂循环动态模型的输入信号及验证结果如图 2 所示。

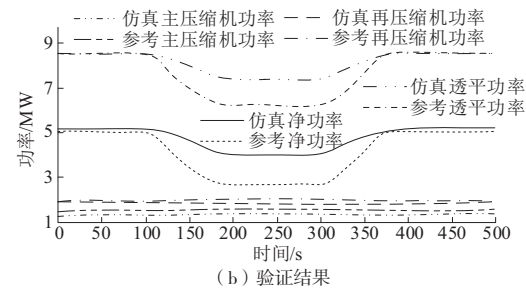
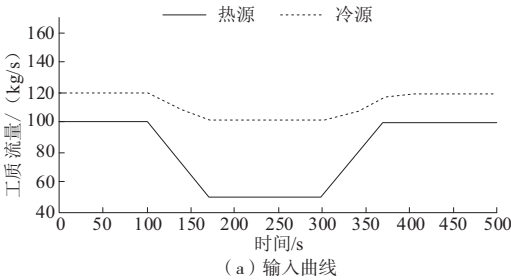


图 2 S-CO₂循环动态模型的输入信号及验证结果

2 基于 S-CO₂循环的燃煤发电热力系统分析

2.1 模型验证

为了保证热力学分析的有效性,对 S-CO₂ 循环数学模型及动态模型分别进行了验证。S-CO₂ 循环数学模型的边界条件如下:压缩机入口的工质流量为 100 kg/s,相应温度及压力分别为 35 ℃

由图 2 可知,各仿真参数与参考参数虽然存在明显偏差,但其变化趋势基本一致,并且净功率与透平功率的输出曲线与输入曲线变化趋势一致。这表明研究构建的 S-CO₂ 循环动态模型能实现对动态特性的准确分析。

2.2 S-CO₂ 循环系统性能分析

为了分析 S-CO₂ 循环系统的性能影响因素,研究对压缩机汽轮机效率、工质流量等因素进行了敏感性分析。不同因素对 S-CO₂ 循环系统性能的影响如图 3 所示。

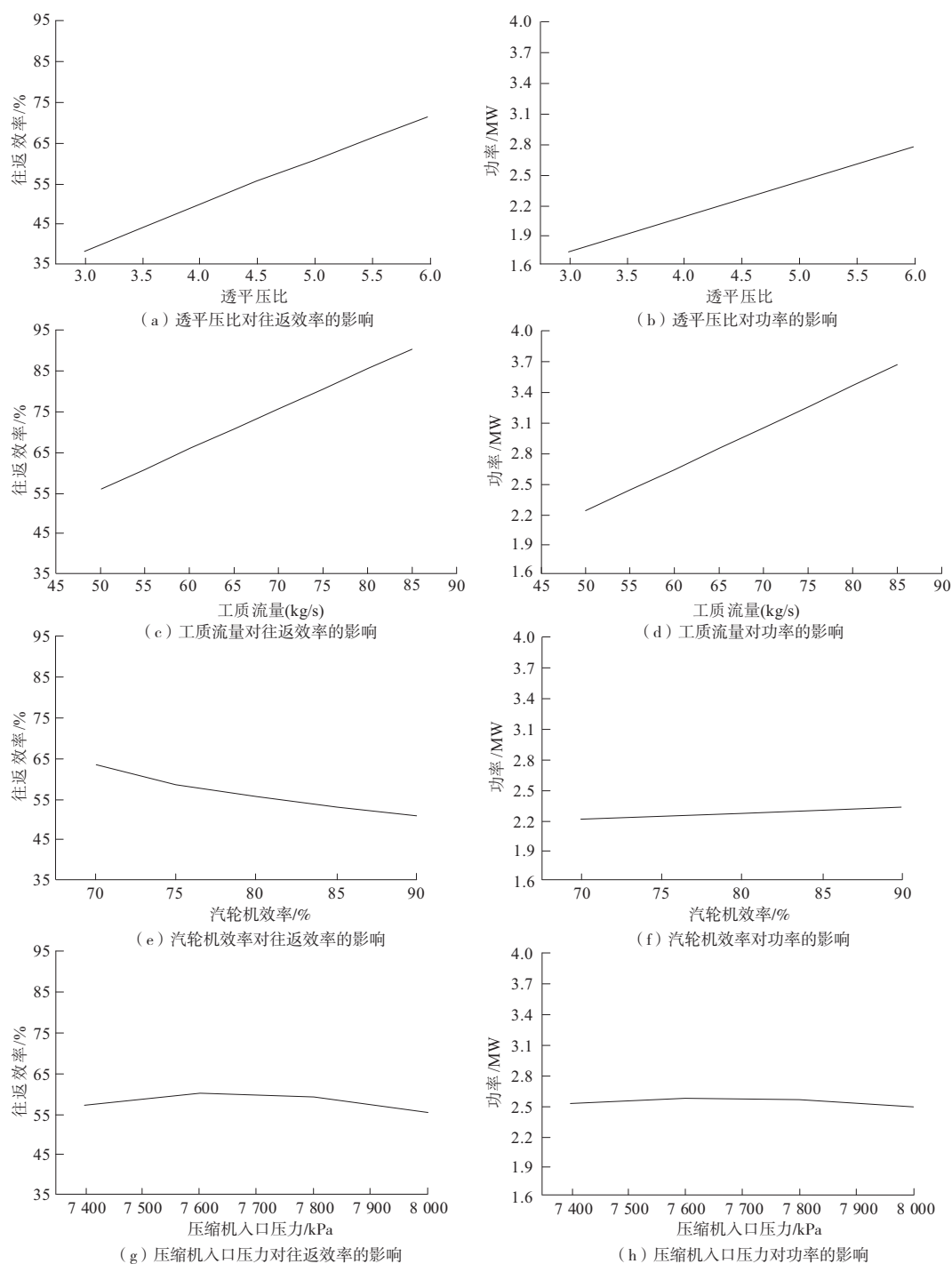


图 3 不同因素对 S-CO₂ 循环系统性能的影响

由图 3 可知,随着透平压比和工质流量的增加,系统的往返效率逐渐升高;随着汽轮机效率的增加,往返效率则逐渐降低;而随着压缩机入口压

力的增加,系统的往返效率先上升后下降。当压缩机入口压力为 7 600 kPa 时,系统的往返效率达到最大,为 58.3%。汽轮机效率和压缩机入口压

力对系统的功率影响较小,而随着透平压比和工质流量的增加,系统的功率逐渐升高。当透平压比为4.0时,系统的功率为2.1 MW。上述结果表明:透平压比和工质流量对系统的性能影响显著。这是因为压缩机的功耗主要取决于压缩汽轮机的做功情况,在压缩机功耗不变时,随着工质流量的增加,系统在释能阶段的做功随之增加,进而提高了系统的往返效率。同时,随着透平压比的增加,系统的释能发电负荷也随之增加,导致系统的往返效率升高。不同储能系统的效率如表3所示。

表3 不同储能系统的效率 单位: %

压缩空气储能系统	往返效率
S-CO ₂ 储能循环系统	55~90
压缩空气储能	52~70
先进绝热压缩空气储能	60
耦合燃煤机组的压缩空气储能	79
非补燃压缩空气储能	72
耦合燃煤机组的压缩空气储能	38~50

由表3可知,研究提出的S-CO₂ 储能循环系统的往返效率高于现有其他压缩空气储能系统,其往返效率位于55%~90%之间。虽然可能略低于耦合燃煤机组的压缩空气储能系统,但研究提出的系统更加简单,且稳定性更好。

3 结语

为了提高燃煤发电机的灵活性,研究构建了基于S-CO₂循环的燃煤发电热力系统,并对其性能进行了分析。研究表明:通过优化透平压比和工质流量,系统的往返效率可显著提升,最高可达58.3%,这一效率在现有压缩空气储能系统中表现优异,位于55%~90%的高效区间。此外,敏感性分析揭示了透平压比和工质流量对系统性能的正面影响,而汽轮机效率和压缩机入口压力则表现出复杂的影响模式。这些发现不仅为S-CO₂循环系统的优化提供了科学依据,也为提高燃煤发电系统的灵活性和经济性提供了新的思路。但由于S-CO₂储能循环系统的低压罐压力较小,导致其储存过程中的体积需求较大。因此,未来要研究跨临界二氧化碳储能循环与燃煤发电机组耦合的热力学特性和控制方法,以优化系统性能。

参考文献:

[1] 金晴龙,夏少军,吴志祥. 回热型S-CO₂循环基本性能

分析与优化[J]. 热能动力工程,2022,37(7):15-26.

- [2] 方明惠,曹丽华,丛钰. 基于S-CO₂的强化壳管式蓄热单元传热性能优化[J]. 动力工程学报,2023,43(2): 275-282.
- [3] 李洪,任燕,章立新,等. 板式扩散焊矩形微通道换热器中S-CO₂流动与传热特性的数值模拟[J]. 动力工程学报,2022,42(12):1174-1182.
- [4] 张瑞原,苏文,周乃君. 基于新型S-CO₂动力循环的内燃机余热回收[J]. 工程热物理学报,2022,43(1): 27-34.
- [5] Broadbent P J, Carr C M, Lewis D M, et al. Supercritical carbon dioxide (SC-CO₂) dyeing of cellulose acetate: an opportunity for a "greener" circular textile economy[J]. Coloration Technology, 2023, 139(4): 475-488.
- [6] 姜悦茂,王哲,夏睿,等. 主机废气余热驱动的分部加热式S-CO₂动力循环设计与性能优化[J]. 工程热物理学报,2022,43(9): 2347-2356.
- [7] 杨竞择,杨震,段远源. 不同装机容量下S-CO₂塔式太阳能热发电系统的热力及经济性能分析[J]. 太阳能学报,2022,43(9): 125-130.
- [8] 陈垚,赵兵涛,杨其国,等. 200 kW级S-CO₂径流式透平的结构设计及性能模拟[J]. 热能动力工程,2022, 37(11): 22-27.
- [9] Sezer Okur P, Ciftci D, Ciftci O N. Formation of hollow solid lipid microparticles from natural waxes using supercritical carbon dioxide[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2024, 101(6): 601-612.
- [10] 严如奇,丁雪兴,徐洁,等. 基于湍流模型的S-CO₂干气密封流场与稳态性能分析[J]. 化工学报,2021, 72(8): 4292-4303,封3.
- [11] 李逍霄,周金泉,徐肖肖,等. 超临界CO₂水平管内动态冷却传热特性数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(11): 4127-4137.
- [12] 孙铭泽,马宁,李浩然,等. 中低温超临界CO₂及其混合工质布雷顿循环热力学分析[J]. 化工学报, 2022, 73(3): 1379-1388.
- [13] 应振镇,杨天锋,陈冬,等. 用于太阳能超临界CO₂布雷顿循环的流态化颗粒换热试验与模拟[J]. 太阳能学报,2022,43(3): 274-281.
- [14] 孙玉伟,吴健,刘勇,等. 集成超临界二氧化碳布雷顿循环发电装置的船舶电力系统暂态稳定性分析[J]. 上海海事大学学报,2022,43(1): 104-113.
- [15] 张文伟,王维庆,王海云,等. 考虑碳捕集技术的风光-富氧燃煤发电系统容量优化配置[J]. 电力系统自动化,2023,47(13): 176-189.
- [16] 宋睿哲,孔梦迪,叶学民,等. 集成碳捕集及太阳能系统的燃煤发电机组的环境评估[J]. 动力工程学报, 2023, 43(12): 1615-1625.

(下转第286页)

- 网技术,2024,48(3):1331-1340.
- [8] Xue L W, Hu W S, Liu G P. Learning with remote laboratories: Designing control algorithms with both block diagrams and customized C code schemes[J]. Computer Applications in Engineering Education, 2022, 30(5): 1561-1576.
- [9] Fan Y D, Xu B, Wang J G, et al. Transport vibration and shock characteristics of A110 kV/40MVAVehicular mobile transformer[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(8): 1110-1120.
- [10] Burkard J, Biela J. Design of a protection concept for a 100-kVA hybrid transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3543-3557.
- [11] 夏炳森,李翠,林文钦,等. 基于相关矩阵和动态集合覆盖的配电网故障诊断方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(3): 535-542.
- [12] 董杰,赵宇,李省,等. 考虑可控负荷参与的主动配电网故障分场景恢复策略[J]. 燕山大学学报, 2022, 46(2): 166-176.
- [13] 宫宇,张莲,李涛,等. ACP SO 和分层定位模型在含 PV 配电网故障定位中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(4): 213-221.
- [14] Fan Y D, Xu B, Wang J G, et al. Transport vibration and shock characteristics of A110 kV/40MVAVehicular mobile transformer[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(8): 1110-1120.
- [15] Burkard J, Biela J. Design of a protection concept for a 100-kVA hybrid transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3543-3557.
- [16] 夏炳森,李翠,林文钦,等. 基于相关矩阵和动态集合覆盖的配电网故障诊断方法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2022, 34(3): 535-542.
- [17] Maharjan L, Tajyuta T, Maruyama K, et al. Development and verification test of the 6.6 kV 200 kVA transformerless SDBC-based STATCOM using SiC-MOSFET modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(12): 13687-13696.
- [18] 邓志祥,潘建兵,黄灿英,等. 基于傅里叶变换与最大关联距离相结合的配电网故障选线新方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 95-103.

收稿日期:2025-03-06

(上接第 162 页)

- [17] 伍权. 超临界二氧化碳增压流化床燃煤发电系统方案及特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6698-6708.
- [18] 徐进良,田贺,孙恩慧,等. 小容量超临界二氧化碳燃煤发电系统的一维设计及回热器紧凑性分析[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 438-451.
- [19] 韩中合,郭董阳,陈东旭,等. 部分冷却二氧化碳循环燃煤发电系统热力学性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(10): 63-70.
- [20] 郭源东,孙恩慧,徐进良,等. 冷却器热量回收在 S-CO₂燃煤发电系统中的优化方案研究[J]. 中国科学:技术科学, 2024, 54(2): 225-235.
- [21] 杨名,段立强,佟勇婧,等. 超超临界二次再热燃煤发电系统空预器传热优化及系统性能分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(4): 889-897.
- [22] 张军亮,高过斌,贾树旺,等. 汽轮机高位布置燃煤发电系统调频动态特性模拟研究[J]. 汽轮机技术, 2024, 66(1): 38-44.
- [23] 扶禹,刘明,张顺奇,等. 耦合蒸汽储能的燃煤发电系统调频能力研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(10): 2986-2994.
- [24] 邢刚,郑毫楠,徐进良,等. 超临界二氧化碳燃煤发电系统锅炉耐热钢选材分析[J]. 热力发电, 2023, 52(6): 157-164.

收稿日期:2024-12-20