

燃煤发电机组瞬态过程高效灵活清洁协同的 能势动态匹配技术及应用

严俊杰, 刘明, 王朝阳, 赵永亮, 种道彤

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 燃煤发电正逐步由主体电源转变为支撑性和调节性电源, 长期频繁运行于调峰调频等瞬态过程。现有节能减排技术主要聚焦于稳态, 难以有效应对瞬态运行的新需求, 存在瞬态过程能耗高、变负荷速率不足、瞬态污染物排放超标等三大技术难题。该项目以热力系统瞬态过程的动态响应时间尺度与能质转化速率为切口, 建立了通过物质流调控能量流以提高机组瞬态过程性能的能势匹配新机制, 将节能理论从稳态工况拓展到瞬态过程; 提出了燃煤机组瞬态过程能耗定量诊断方法, 开发了前馈蓄热状态的风-煤-水多物质流协同调控的能势动态匹配技术; 揭示了调控物质流将蓄热迅速转化为作功提升变负荷速率的机理, 开发了蓄热有序利用高效灵活协同的能势动态匹配技术; 建立了前馈换热设备蓄热时变特性实现温度场与多物质浓度场精准耦合的机制, 开发了协同调控烟气、空气、水等多介质温度流量实现多场精准耦合的能势动态匹配技术, 实现污染物排放全工况达标与余热深度利用。

关键词: 燃煤发电; 调峰调频; 瞬态过程; 能势匹配; 蓄热有序利用

中图分类号: TM621 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202511009 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0095-09

Efficient, Flexible, and Clean Synergistic Energy-Potential Dynamic Matching Technology and Its Application for Transient Processes in Coal-Fired Power Generation Units

YAN Junjie, LIU Ming, WANG Chaoyang, ZHAO Yongliang, CHONG Daotong

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Coal-fired power generation is gradually transitioning from a primary power source to a supporting and regulating source, frequently operating under transient processes such as peak and frequency regulation. Existing energy-saving and emission-reduction technologies primarily focus on steady-state conditions, making it difficult to effectively address the new demands of transient operation. This leads to three major technical challenges: high energy consumption during transient processes, insufficient load change rates, and excessive pollutant emissions during transient processes. Through the dynamic response time scale of thermal system transient processes and the rate of energy-quality transformation, this study establishes a new mechanism for energy potential matching that improves the transient performance of power units, extending energy-saving theories from steady-state conditions to transient processes. It develops a quantitative diagnostic method for transient energy

收稿日期: 2023-06-01。

作者简介: 严俊杰(1967—), 男, 教授, 博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划资助

项目(2022YFB4100400)。

网络出版时间: 2023-07-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20230705.0927.004>

consumption in coal-fired units is developed and invents a dynamic matching technology for energy potential through the collaborative control of wind, coal, and water flows in thermal energy storage states. In addition, it reveals the mechanism of rapidly converting thermal storage into work output to improve load change rates through material flow regulation, leading to the invention of an efficient, flexible, and synergistic energy-potential dynamic matching technology for orderly thermal storage utilization. Furthermore, a mechanism is established to achieve precise coupling between temperature fields and multi-material concentration fields by feedforwarding the time-varying characteristics of heat exchanger thermal storage, and an energy-potential dynamic matching technology that synergistically regulates the temperature and flow of multiple media (including but not limited to flue gas, air, water) is invented, ensuring full-compliance pollutant emissions across all operating conditions and deep waste heat recovery.

Keywords: coal-fired power generation; peak shaving and frequency regulation; transient process; energy potential matching; orderly utilization of heat storage

1 研究背景

安全稳定的电力生产供应是国民经济发展的基石^[1],燃煤发电是保障我国电力安全稳定供应的“压舱石”^[2]。能源电力低碳转型对于实现碳达峰、碳中和目标至关重要^[3]。随着“双碳”目标的提出,我国将建立“清洁低碳、安全高效”的能源体系^[4-5],加快构建新型电力系统^[5-6],燃煤发电正逐步由主体电源转变为支撑性和调节性电源^[7],其运行特征由稳态工况为主向调峰调频为主转变,导致燃煤发电机组将长时间处于变负荷瞬态过程^[8]。然而,燃煤发电机组的变负荷速率受限导致灵活性不足,且机组长时间处于变负荷瞬态过程时效率下降、污染物排放超标。因此,实现燃煤发电高效灵活清洁协同运行既是我国能源领域的重大战略需求,也是电力行业节能减排的前沿技术。

燃煤发电运行灵活性已成为能源电力行业的研究热点。德国 Agora 能源转型论坛针对燃煤电厂运行灵活性展开调研并总结出研究报告,分析了提升燃煤电厂灵活性的潜力和局限性,并提出了改造燃烧器、增设小粉仓等提高机组运行灵活性的系列方案^[9]。中国学者研究发现:通过改变燃煤发电机组热力系统构型,例如采用凝结水节流^[10]、高加抽汽节流等^[11],利用热力系统内部蓄能可提升机组变负荷速率^[12],提升机组调峰调频效果。当灵活性需求进一步增加时,在燃煤机组热力系统中耦合储热装置^[13-17]或耦合储能循环^[18-19],可扩大机组负荷运行范围及提高负荷调节速率^[20-21]。采用调整热力系统构型或在热力系统内增加储能设备/耦合储能循环时,将改变热力系统结构,影响热力系统的能量

转换效率。为减少应用灵活性措施引起的循环效率降低,可通过优化热工控制策略,有序利用系统内外蓄能,协同提升机组运行灵活性及高效性^[22-24]。此外,燃煤发电机组运行在低负荷工况及快速变负荷调峰过程中,受运行工况热力参数限制,污染物脱除反应区温度场和污染物浓度场将出现锅炉脱硝及除尘效率降低、锅炉排烟余热利用不充分等问题,难以兼顾燃煤发电机组在灵活运行时的高效性与清洁性^[25]。研究结果表明:采用旁路烟道^[26-27]、零号高加^[28-29]等改变热力系统构型以及动态调整工质参数等方法^[25],可提高机组在宽负荷范围运行的清洁性并保障余热利用效率^[30]。

随着新型电力系统建设进程,可再生能源发电的装机比例已经突破 50%,燃煤发电灵活运行需求日益增加^[31-33]。因此,开发燃煤发电机组高效灵活清洁协同运行技术并进行规模化应用是我国能源电力行业面临的重大急迫需求。

2 难点问题

该项目针对燃煤发电机组存在瞬态过程能耗高、变负荷速率不足、瞬态污染物排放超标等三大技术难题展开研究。该项目的总体研究思路如图 1 所示,以热力系统瞬态过程的动态响应时间尺度与能质转化速率为切口,揭示了燃煤发电机组瞬态过程性能下降的根本原因是流动、传热、传质以及污染物脱除等过程响应时间尺度不一致,建立了通过物质流调控能量流以提高燃煤发电机组瞬态过程性能的能势动态匹配新机制,开发了能流时空调控、蓄热有序利用、多场精准耦合实现燃煤发电机组瞬态过程高效灵活清洁协同的能势动态匹配新技术,研制了

能耗分析诊断软件、高效/高效灵活/高效清洁前馈控制器及控制系统等系列产品,降低了燃煤发电

组瞬态过程能耗,提升了燃煤发电机组运行灵活性,实现了污染物的全工况排放达标与余热深度利用。

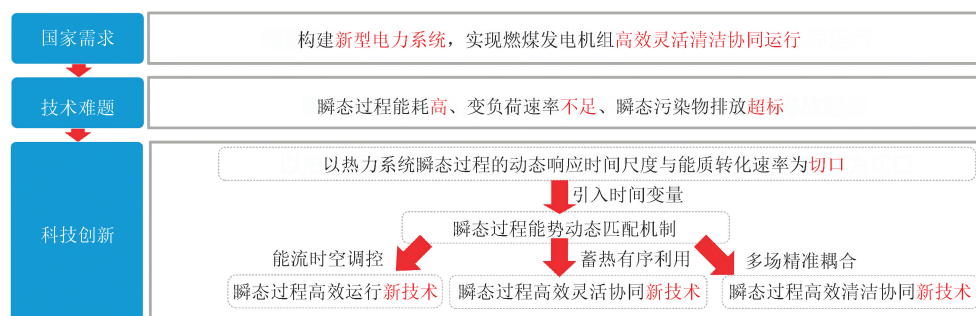


图 1 项目总体研究思路

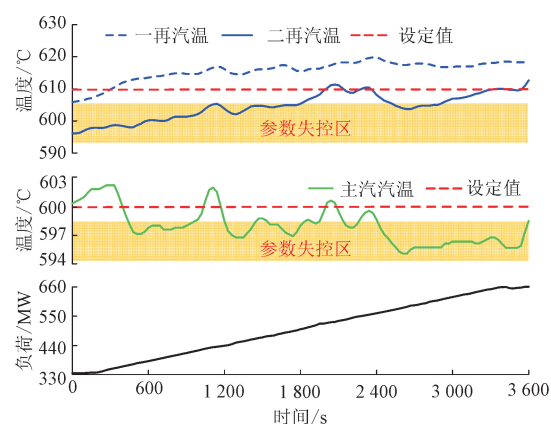
Fig. 1 Overall research framework

3 主要科技创新

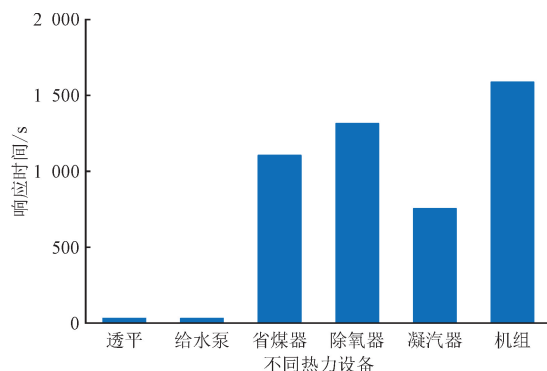
3.1 燃煤机组瞬态过程能势动态匹配机制

该项目建立了燃煤发电机组瞬态过程的能势动态匹配新机制。发现了换热设备是燃煤发电机组瞬态过程性能的决定因素,揭示了换热设备附加不可逆损失的主要成因是流动与传热响应时间尺度不一致,建立了通过物质流调控能量流以提高燃煤发电机组瞬态过程性能的能势动态匹配新机制,将节能理论从稳态工况拓展到瞬态过程,为高效灵活清洁协同运行奠定了理论基础。

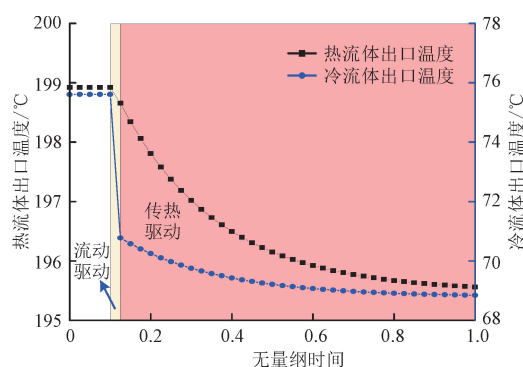
通过研究燃煤发电机组变负荷过程的瞬态性能,项目团队发现惯性和延迟引起机组变负荷瞬态过程热力参数失控(如图 2(a)所示),并导致瞬态过程能耗增加、变负荷速率不足和瞬态污染物排放超标。进而,研究了物质流调节过程中燃烧、换热、流体运输、热功转化等热力设备的动态响应特性,发现燃烧、流体运输、热功转化等设备的响应时间尺度均为秒级,而换热设备的响应时间尺度与燃煤发电机组同为千秒级,是影响燃煤发电机组瞬态过程性能的决定因素,如图 2(b)所示。为此,建立了换热设备瞬态过程不可逆性分析模型,发现了换热设备在瞬态过程中存在附加不可逆损失,揭示出附加不可逆损失的产生机理是驱动流量和换热量非稳态变化的压力波传输和非稳态传热的响应时间尺度差异大,导致瞬态过程中各能量流的能势不匹配,如图 2(c)和(d)所示。研究获得了运行参数对换热设备附加不可逆损失的影响规律,发现热力设备蓄热状态是制约瞬态过程能势匹配的关键,通过物质流调控可改变蓄热速率,建立了提高燃煤发电机组瞬态过程性能的能势动态匹配新机制,即调控换热设备物质流变化速率改变蓄热状态实现瞬态过程的能势动态匹配。



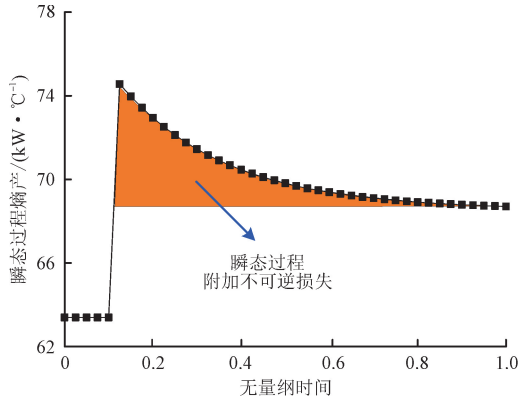
(a) 瞬态过程热力参数失控



(b) 机组热力设备瞬态响应时间尺度



(c) 换热设备瞬态过程流体温度变化



(d) 换热设备瞬态过程附加不可逆损失

图 2 燃煤电站瞬态过程热力参数特性与节能潜力挖掘

Fig. 2 Thermal parameters characteristics and energy-saving potential during the transient process in coal-fired power plants

3.2 燃煤机组瞬态过程能流时空调控技术

该项目开发了能流时空调控实现瞬态过程高效运行的能势动态匹配技术。提出了燃煤发电机组瞬态过程能耗定量诊断方法,明晰了不同类型燃煤发电机组瞬态过程的蓄热时空分布规律,开发了前馈蓄热时空状态的风-煤-水多物质流协同的能势动态匹配技术。

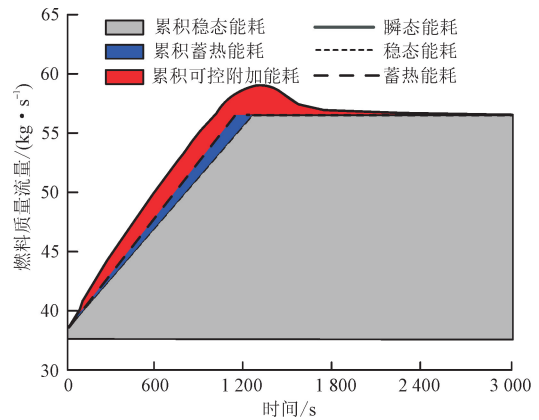
项目团队发现燃煤发电机组瞬态过程存在附加能耗,并将附加能耗分为由机组瞬态过程蓄热变化引起的蓄热能耗以及由热力参数偏离基准值引起的可控附加能耗,如图 3(a)所示,提出了瞬态过程能耗定量分析诊断技术,其技术特征是:燃煤发电机组瞬态过程可控附加能耗为瞬态过程能耗减去稳态基准能耗,再减去瞬态过程蓄热能耗后的值,表达式如下

$$\Delta b_s = \frac{\int_0^{\tau_0} (\dot{B}(\tau) - \dot{B}_s(\tau)) d\tau - \Delta Q_{th}/Q}{W} \frac{Q}{Q_{net}} \quad (1)$$

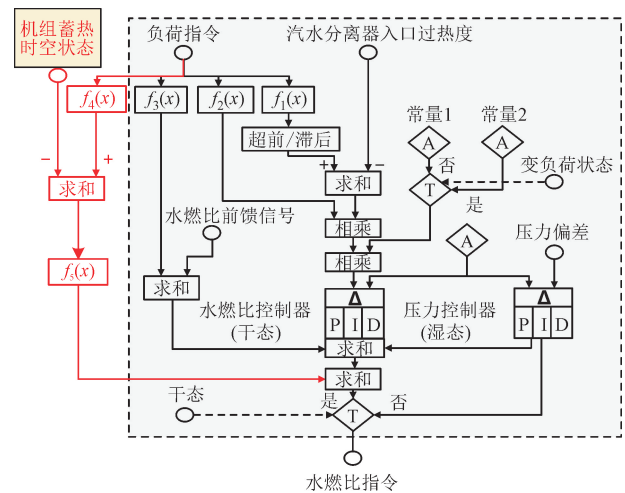
式中: Δb_s 为瞬态过程可控附加能耗; $\dot{B}(\tau)$ 为瞬态能耗; $\dot{B}_s(\tau)$ 为稳态能耗; τ_0 为变负荷过程所需时间; ΔQ_{th} 为累积蓄热偏差; Q 为燃煤种的低位发热量; Q_{net} 为标煤低位发热量; W 为变负荷过程累积发电量。

明晰了可控附加能耗的产生根源是燃煤发电机组蓄热时空状态与理想状态的偏差导致热力参数在瞬态过程中失控,提出了采用多状态点的时变热力参数表征不同类型燃煤发电机组蓄热时空分布规律的方法,开发了前馈蓄热时空状态的风-煤-水多物质流协同的动态调控技术,其技术特征是:将蓄热时空状态作为前馈引入燃煤发电机组风-煤-水控制逻辑,如图 3(b)所示,协同动态调控风、煤、水等多物

质流量,研制了瞬态能耗分析诊断软件,如图 3(c)所示,降低了燃煤发电机组瞬态过程能耗,实现了燃煤发电机组瞬态过程的能势动态匹配。



(a) 瞬态过程能耗定量分析诊断方法



A—需输入参数; T—需进行判断与选择; 实线—执行指令; 虚线—判断; $f_1(x) \sim f_5(x)$ —根据机组运行状态确定的插值函数。

(b) 基于蓄热时空状态的多物质流协同控制逻辑



(c) 燃煤发电机组瞬态能耗分析软件界面

图 3 燃煤发电机组能流时空调控的瞬态过程节能技术

Fig. 3 Energy-saving technology during the transient process for coal-fired power plants based on the spatiotemporal regulation of energy flow

场、多物质浓度场的惯性和迟延特性不一致,揭示了污染物瞬态超标的原因是温度场、浓度场与污染物脱除过程的时空不匹配,进而建立了温度场与污染物浓度场、脱除剂浓度场精准耦合的机制,即前馈尾部换热设备蓄热时变特性动态调节工质侧流量温度实现烟气温度场、换热设备壁面温度的精准调控。

开发了多场精准耦合的能势动态匹配技术,其技术特征在于:以污染物生成和脱除的时变特性、迟延规律及尾部换热设备蓄热为前馈,协同调控锅炉尾部烟道内烟气、空气、水等多介质的温度和流量,如图 5 所示,精准耦合温度场与多物质浓度场,实现了瞬态过程余热高效回收与污染物高效脱除协同。

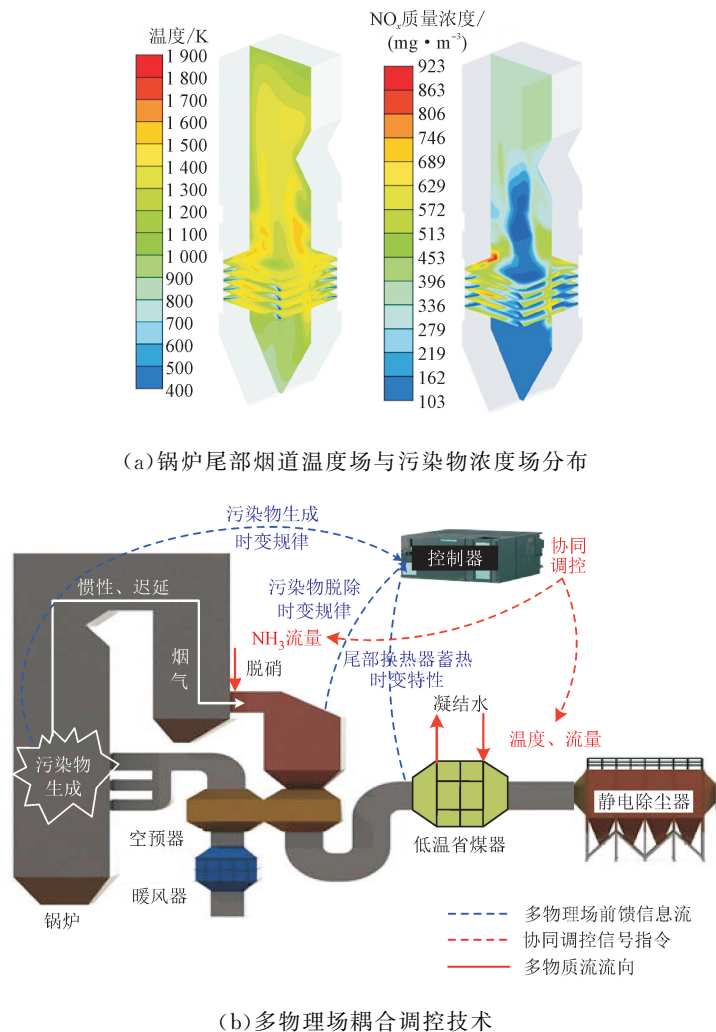


图 5 多场精准耦合实现高效清洁协同调控技术

Fig. 5 Efficient and clean synergistic control technology based on multi-field precision integration

4 国内外研究对比

与国内外同类技术相比,该项目建立了燃煤发电机组瞬态过程能势动态匹配机制,开发了燃煤发电机组瞬态过程高效运行技术、高效灵活协同技术、高效清洁协同技术等,性能指标更先进。具体体现在:将燃煤发电节能领域从稳态工况拓展至瞬态过程;提升了燃煤发电机组变负荷速率,实现了燃煤发电机组高效灵活协同运行;将燃煤发电机组污染物高效脱除拓展至瞬态过程,在污染物排放达标的前

提下实现了余热深度利用。

5 推广应用情况

该项目开发了能流时空调控、蓄热有序利用、多场精准耦合实现燃煤发电机组瞬态过程高效灵活清洁协同的能势动态匹配新技术,研制了瞬态能耗分析诊断软件、高效/高效灵活/高效清洁前馈控制器及控制系统等系列产品,研究成果已规模化应用于中国各大电力设计院和科研院所,指导燃煤发电机组的升级改造,显著增强这些机构的技术实力,同时

拓展了其业务范围。该项目成果应用于动力装备制造企业,提高了其市场竞争力。该项目成果应用于我国现役燃煤电厂,用于指导燃煤发电机组瞬态过程高效灵活清洁协同运行。

6 研究前景与市场价格

6.1 研究前景

在“双碳”目标的背景下,中国将进一步加快新型电力系统的建设进程,燃煤发电机组将更频繁、更深度参与电网调峰和调频任务。燃煤发电机组瞬态过程高效灵活清洁协同的能势动态匹配系列技术将在未来煤电发展、电力稳定供应、能源安全等方面发挥日益重要的作用。此外,项目组正基于该项目系列技术进一步开发“固碳”“减碳”技术,获得煤炭化学能梯级利用与二氧化碳捕集能耗最小的一体化技术,攻克传统燃煤发电过程二氧化碳捕集能耗高的难题,有望实现燃煤发电机组高效灵活清洁与低碳的协同,在中国能源电力行业实现碳中和发挥重要作用。

6.2 市场价格

该项目成果具有可实施性强、投资回报率高的优点,在能源动力领域有广阔的应用前景,特别适合于燃煤发电机组的“三改联动”升级改造,并可支撑国防建设,进一步推广的潜在经济效益巨大。该项目开发了燃煤发电机组瞬态过程高效灵活清洁协同的能势动态匹配系列关键技术,增强了电网对新能源电力的消纳能力,支撑了我国先进煤电技术自主化,并在我国电力生产、设备制造、供热供汽工程等国民经济主战场进行了应用,引领了“双碳”背景下燃煤发电技术的发展。

参考文献:

- [1] 饶宏, 韩丰, 陈政, 等. 我国电力安全供应保障策略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(2): 100-110.
RAO Hong, HAN Feng, CHEN Zheng, et al. Strategy for guaranteeing power supply security of China [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(2): 100-110.
- [2] 国家能源局. 煤电仍将长时期承担保障电力安全的重要作用 [EB/OL]. (2022-04-29) [2023-06-10]. http://www.nea.gov.cn/2022-04/29/c_1310579709.htm.
- [3] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [4] 中华人民共和国国家发展改革委. 构建清洁低碳安全高效能源体系 为实现碳达峰碳中和作出应有贡献 [EB/OL]. (2021-11-01) [2023-06-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/jd/202111/t20211101_1302486.html.
- [5] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [6] LI Jianglong, HO M S, XIE Chunping, et al. China's flexibility challenge in achieving carbon neutrality by 2060 [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 158: 112112.
- [7] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知: 发改能源〔2022〕210 号 [EB/OL]. (2022-03-22) [2023-06-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220322_1320016.html.
- [8] 赵永亮, 许朋江, 居文平, 等. 燃煤发电机组瞬态过程灵活高效协同运行的理论与技术研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2080-2099.
ZHAO Yongliang, XU Pengjiang, JU Wenping, et al. Overview of theoretical and technical research on flexible and efficient synergistic operation of coal-fired power units during transient processes [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2080-2099.
- [9] Agora Energiewende. Flexibility in thermal power plants: with a focus on existing coal-fired power plants [EB/OL]. (2017-06-06) [2023-06-10]. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/Flexibility_in_thermal_plants/115_flexibility-report-WEB.pdf.
- [10] WANG Wei, LIU Jizhen, ZENG Deliang, et al. Modeling for condensate throttling and its application on the flexible load control of power plants [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95: 303-310.
- [11] ZHAO Yongliang, WANG Chaoyang, LIU Ming, et al. Improving operational flexibility by regulating extraction steam of high-pressure heaters on a 660 MW supercritical coal-fired power plant: a dynamic simulation [J]. Applied Energy, 2018, 212: 1295-1309.
- [12] WANG Wei, LIU Jizhen, ZENG Deliang, et al. Modeling and flexible load control of combined heat and power units [J]. Applied Thermal Engineering, 2020,

- 166; 114624.
- [13] RICHTER M, OELJEKLAUS G, GÖRNER K. Improving the load flexibility of coal-fired power plants by the integration of a thermal energy storage [J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 607-621.
- [14] WANG Baigong, MA Huan, REN Shaojun, et al. Effects of integration mode of the molten salt heat storage system and its hot storage temperature on the flexibility of a subcritical coal-fired power plant [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 58: 106410.
- [15] ZHANG Kezhen, LIU Ming, ZHAO Yongliang, et al. Design and performance evaluation of a new thermal energy storage system integrated within a coal-fired power plant [J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 50: 104335.
- [16] CHEN Chengxu, GE Zhihua, ZHANG Youjun. Study of combined heat and power plant integration with thermal energy storage for operational flexibility [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219(Part B): 119537.
- [17] CAO Ruifeng, LU Yue, YU Daren, et al. A novel approach to improving load flexibility of coal-fired power plant by integrating high temperature thermal energy storage through additional thermodynamic cycle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 173: 115225.
- [18] WANG Di, LIU Deying, WANG Chaonan, et al. Flexibility improvement method of coal-fired thermal power plant based on the multi-scale utilization of steam turbine energy storage [J]. *Energy*, 2022, 239 (Part D): 122301.
- [19] 王迪, 司龙, 谢欣言, 等. 耦合超临界二氧化碳储能循环燃煤机组动态特性仿真 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(6): 2142-2152.
- WANG Di, SI Long, XIE Xinyan, et al. Simulation of dynamic characteristics of coal-fired unit coupled with supercritical carbon dioxide energy storage cycle [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2142-2152.
- [20] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43 (22): 8772-8789.
- OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LYU Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(22): 8772-8789.
- [21] 郭越, 徐飞, 陈磊, 等. 适用于一次调频能力在线监测的锅炉蓄热系数计算方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(5): 1872-1880.
- GUO Yue, XU Fei, CHEN Lei, et al. Identification of boiler heat storage coefficient for online monitoring of primary frequency regulation capability of steam unit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(5): 1872-1880.
- [22] WANG Chaoyang, LIU Zefeng, FAN Mengyang, et al. Enhancing the flexibility and efficiency of a double-reheat coal-fired power unit by optimizing the steam temperature control: from simulation to application [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 217: 119240.
- [23] WANG Zhu, LIU Ming, ZHAO Yongliang, et al. Flexibility and efficiency enhancement for double-reheat coal-fired power plants by control optimization considering boiler heat storage [J]. *Energy*, 2020, 201: 117594.
- [24] WANG Chaoyang, ZHAO Yongliang, LIU Ming, et al. Peak shaving operational optimization of supercritical coal-fired power plants by revising control strategy for water-fuel ratio [J]. *Applied Energy*, 2018, 216: 212-223.
- [25] YIN Junjie, LIU Ming, WU Qingyang, et al. Optimized fluegas denitrification control strategy to enhance SCR performance during load-cycling transient processes in coal-fired power plants [J]. *Fuel*, 2023, 344: 127837.
- [26] 张国柱, 刘明, 张钧泰, 等. 集成新型锅炉烟气热能回收系统的 600 MW 机组全工况性能分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(12): 3588-3596.
- ZHANG Guozhu, LIU Ming, ZHANG Juntao, et al. Performance analyses of a 600 MW coal-fired power plant integrated with a novel boiler exhaust heat recovery system at overall working conditions [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(12): 3588-3596.
- [27] 高伟, 刘明, 赵永亮, 等. 采用烟气旁路的燃煤机组脱硝系统变负荷过程的经济性分析 [J]. *能源环境保护*, 2023, 37(1): 13-20.
- GAO Wei, LIU Ming, ZHAO Yongliang, et al. Economic analysis of denitration system in a coal-fired power plant with flue gas bypass during load cycling processes [J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(1): 13-20.
- [28] 张国柱, 李冰心, 李亚维, 等. 采用给水加热实现 660 MW 超临界机组宽负荷脱硝的理论研究 [J]. *动力工程学报*, 2018, 38(1): 50-54.
- ZHANG Guozhu, LI Bingxin, LI Yawei, et al. Theoretical study on wide load denitration of a 660 MW supercritical unit by retrofitting the feedwater heating system [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2018, 38(1): 50-54.
- [29] 李冰心, 张国柱, 陈伟雄, 等. 采用蒸汽喷射器的低负荷给水加热系统变工况性能研究 [J]. *西安交通大*

学学报, 2017, 51(1): 65-71.

LI Bingxin, ZHANG Guozhu, CHEN Weixiong, et al. Analysis on the performance of low-load feed water heating system with jet heat pump under variable working conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1): 65-71.

- [30] CHEN Weixiong, ZHANG Guozhu, LI Bingxin, et al. Simulation study on 660 MW coal-fired power plant coupled with a steam ejector to ensure NO_x reduction ability [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 550-561.

- [31] 严新荣, 高翔, 于鹏峰, 等. 燃煤发电机组灵活运行安全性挑战与对策研究 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11): 4318-4335.

YAN Xinrong, GAO Xiang, YU Pengfeng, et al. Research on safety challenges and countermeasures of flexible operation for coal-fired units [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(11): 4318-4335.

- [32] 王庆华, 刘吉臻, 樊欢豹, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 锅炉系统及汽轮发电机系统 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7136-7166.

WANG Qinghua, LIU Jizhen, FAN Huanbao, et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition: boiler system and turbine generator system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7136-7166.

- [33] 刘吉臻, 王庆华, 张效宁, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 燃煤耦合储能系统及智能控制系统 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6855-6882.

LIU Jizhen, WANG Qinghua, ZHANG Xiaoning, et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition: coal-fired coupled energy storage system and smart control system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6855-6882.

(编辑 武红江)

团队介绍:

西安交通大学能源系统优化与控制(ESOC)团队围绕能源系统优化与节能、热工测量与控制两个方向, 针对能源动力系统中能源的清洁与高效转换、能源动力系统安全与高效运行展开研究工作, 主要研究方向包括热能利用过程的流动与传热、热力系统与设备的仿真与诊断、热电冷多联产及高效发电技术、热力系统节能技术研究与应用、多能互补与储能、烟气协同治理、激光等离子测量、热工控制理论与技术等。近五年团队共承担国家级项目 20 余项、横向合作课题等 100 余项; 获得国家科技进步二等奖 1 项、中国专利优秀奖 1 项、教育部自然科学一等奖 1 项、陕西省高等教育教学成果奖特等奖 1 项、陕西省科技进步一等奖 2 项、中电联电力创新大奖 1 项; 累计发表论文 500 余篇, 被 SCI/EI 收录 200 余篇; 授权中国发明专利 100 余项、授权美国发明专利 10 余项。



团队负责人: 严俊杰



团队合影