

燃煤发电厂深度调峰灵活性改造安全风险分析和控制措施研究

余之航

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年3月4日; 录用日期: 2026年3月16日; 发布日期: 2026年4月16日

摘要

在“双碳”目标引领下, 我国能源结构加速转型, 新能源装机规模持续扩大, 火电机组逐步从主体性电源转变为提供灵活性调节能力的基础性电源, 深度调峰灵活性改造成为必然趋势。然而, 现役部分燃煤发电机组在深度调峰灵活性改造过程中安全风险突出, 严重制约改造工作的顺利推进。本文以上海地区某燃煤发电厂亚临界630 MW机组为研究对象, 依托企业现有安全管理信息平台, 围绕深度调峰灵活性改造过程中的安全风险进行分析, 辨识出危险源, 针对锅炉炉膛检修、脱硝催化剂更换等重点高风险作业, 运用作业危害分析法细化作业步骤风险, 调整LEC法取值标准, 识别出较大以上安全风险, 建立分级管控机制, 形成全流程安全风险控制体系。

关键词

火电机组, 灵活性改造, 安全风险, “双碳”目标

Study on Safety Risk Analysis and Control Measures for Deep Peak Regulation and Flexibility Retrofit of Coal-Fired Power Plants

Zhihang Yu

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: March 4, 2026; accepted: March 16, 2026; published: April 16, 2026

Abstract

Driven by the “Dual Carbon” goals, China’s energy structure is undergoing an accelerated transformation with the continuous expansion of installed new energy capacity. Thermal power units

have gradually evolved from the main power source to a fundamental power source providing flexible regulation capacity, making the flexibility retrofit for deep peak regulation an inevitable trend. However, prominent safety risks exist during the deep peak regulation flexibility retrofit of some in-service coal-fired power units, which severely hinder the smooth progress of the retrofit work. Taking a subcritical 630 MW unit of a coal-fired power plant in Shanghai as the research object and relying on the enterprise's existing safety management information platform, this paper conducts an analysis of the safety risks throughout the deep peak regulation flexibility retrofit process and identifies hazard sources. For key high-risk operations such as boiler furnace maintenance and denitrification catalyst replacement, refine the risks of operation steps by applying Job Hazard Analysis (JHA), adjust the value criteria of the LEC method, identify safety risks of relatively high level and above, establish a hierarchical control mechanism, and form a whole-process safety risk control system.

Keywords

Thermal Power Unit, Flexibility Renovation, Safety Risk, Dual Carbon Goal

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国内外经济、能源和环保形势的发展，燃煤火力发电企业的发展进入了新常态，俄乌冲突这只巨型“蝴蝶”，持续扇动着翅膀，在能源领域形成的飓风，席卷了欧洲，横扫了全世界[1]。面临着经济增长方式的转变、资源约束、环境保护、市场竞争等多方面的严峻挑战，国家节能减排要求的不断提升、电能过剩现象日趋明显、高效低耗新电源点的不断投运等现实因素使燃煤电厂的经营形势变得日益严峻[2]。

在能源体系加速升级的进程中，大型新能源基地建设正迅猛推进，导致装机容量过剩问题日益凸显。一方面，弃风弃光现象严重且短期内难以有效缓解；另一方面，常规燃煤机组利用小时数显著下滑，部分电厂已陷入资不抵债的“僵尸”困境。尤为棘手的是，随着去产能力度持续加大，煤炭价格高位运行的风险仍将长期存在，这使得燃煤发电企业的盈利空间急剧萎缩，其生存发展已成为亟待破解的现实难题。

依据中国电力企业联合会发布的《中国电力行业年度发展报告 2025》[3]，非化石能源发电新增装机成为新增装机的主体，风电与太阳能发电在新增装机总容量中的占比高达 82.6%。在国内，伴随调峰形势日益严峻、调峰考核力度加大以及深度调峰补偿措施的完善，部分电厂开始试点实施深度调峰改造。自 2016 年以来，国内主要发电企业已实施一定规模的煤电机组灵活性改造，改造难度大，对机组经济性影响也不小[4]-[6]。事实上，现役部分机组的运行时长普遍超过二十年，设备相对陈旧、技术相对滞后，能够正常运行的最低负荷高于 40%，难以契合电网未来对煤电机组深度调峰能力的要求[7]。全面且系统地解决现役亚临界机组在深度调峰等方面的突出需求，同时确保“老机组”在“新改造”过程中的安全风险问题得到妥善处理，需要创新性与系统性兼备的方案[8]。

2. 改造目标及内容

火力发电灵活性作为衡量电力系统灵活性的关键指标之一，亦是电力系统灵活性的核心构成要素。

火力发电灵活性通常指火力发电机组的运行灵活性，具体体现为其应对出力大幅波动、快速响应负荷变动、频率起伏以及可再生能源间歇性并网所引发的各类不确定性的能力。主要技术指标涵盖调峰幅度、爬坡速率、启停时长以及运行稳定性等方面。当前，国内火力发电灵活性改造的核心目标在于增强机组对电力系统波动性变化的适应能力，主要围绕降低最小技术出力、缩短启停时长、加快升降负荷速度这三个方向推进[9]。其中，降低最小出力，即拓展调峰范围、强化深度调峰能力，是目前应用最为广泛、成效最为显著的改造目标。这一改造不仅有助于提高电网对风能、太阳能等可再生能源的消纳能力，还为构建以新能源为主体的新型电力系统提供了重要支撑。

3. 改造风险识别

3.1. 项目概况及特点

本文以上海某燃煤发电厂#1 机组深度调峰灵活性改造项目为实践，以降低最小出力为深度调峰灵活性改造目标，开展安全风险分级控制工作研究。该电厂#1 机组于 2000 年 7 月投入商业运营。2019 年 6 月，#1 机组由 60 万千瓦增容至 63 万千瓦。

机组主要设备方面，锅炉为 600 MW 亚临界、控制循环、一次中间再热、单炉膛平衡通风、固态连续排渣、全钢构架、半紧身封闭的Ⅱ型汽包炉，采用正压直吹式制粉系统，6 台 HP963 型中速磨煤机，在锅炉满负荷时 5 台投运，一台备用；汽轮机为亚临界、一次中间再热、四缸四排汽、凝汽式汽轮机。通流增容节能综合升级改造后整个通流部分共 67 级叶片，其中高压缸 1+12 级、中压缸 2×11 级、低压缸 2×2×8 级；发电机为 QFSN-600-2 型 600 MW 级水氢氢发电机，配励磁机。

3.2. 改造前机组主要问题

参考已经进行改造的机组，在深度调峰工况下的燃烧稳定性、环保性能与经济性的变化规律[2]。通过实施 20%和 30%额定计算负荷(ECR)的系列测试试验，对锅炉在低负荷工况下的运行状态与性能表现进行了系统地评估。研究重点聚焦于锅炉在 20%及 30% ECR 负荷点的实际运行参数、燃烧稳定性以及效率特性，并深入剖析了制约锅炉在更低负荷条件下实现安全、高效、稳定燃烧的关键限制性因素[10]-[12]。这些因素主要涉及以下几个方面：

- 1) 100%负荷试验期间锅炉燃烧较差，其间锅炉经济性较差。
- 2) 100%负荷下 A、B 侧空预器平均漏风率超过 8%，漏风率偏大。
- 3) 机组在低负荷试验期间，30%试验工况下主汽温度为 513℃，再热蒸汽温度为 491℃；20%试验工况下主汽温度为 492℃，再热蒸汽温度为 470℃。均偏度锅炉热力计算书中 35% MCR 工况下设计参数。
- 4) 机组在 20%和 30%试验负荷期间汽包水位波动幅度较大，汽包水位存在振荡波动。
- 5) 机组在低负荷时锅炉燃烧存在波动，煤火检信号波动明显。
- 6) 机组在低负荷试验期间，二次风箱压力较低 DCS 中均显示为负值，无法为日后长期低负荷下稳定燃烧提供有力的保障。
- 7) 机组在低负荷运行期间炉膛出口氮氧化物浓度增加，为了满足环保要求需要持续维持较高喷氨量，长期运行会增加空预器的堵塞隐患。
- 8) 脱硝温度偏低。机组负荷在 205 MW 负荷下脱硝入口 A、B 侧烟气温度低于 300℃，通过运行调整仍不能满足锅炉脱硝系统正常运行。
- 9) 水平烟道存在积灰风险。机组进行深度调峰后，整体烟气温度降低，烟气流速减缓，在 30%负荷下，水平烟道处的烟气流速在 3 m/s 左右。如长时间的低负荷运行将使水平烟道会出现堵灰的风险，进而影响机组的安全运行。

3.3. 改造主要存在风险

通过摸底试验,燃煤发电厂实现#1 机组 20%额定负荷(120 MW)无油助燃稳定运行,满足电网深度调峰要求[13]。主要改造方向分为 5 项,锅炉本体改造(锅炉低负荷稳燃)、脱硝系统改造、小汽轮机系统改造(小机汽源无扰切换)、控制系统改造、新增二级再热减温水改造[14][15]。

从现场经验判断,安全风险集中在涉及锅炉、汽轮机等主要设备的改造,涉及控制系统的改造,作业风险较低。其中:

锅炉系统组件,包括锅炉主体(炉膛、汽包、水冷壁、省煤器、空预器)、燃烧组件(B/C 层燃烧器、磨煤机、一次风管道)、烟道组件(水平烟道、脱硝入口烟道),涉及低负荷稳燃改造、水平烟道防积灰改造、磨煤机动态分离器改造等工程。汽轮机系统组件,涵盖汽轮机主体(高中压缸、低压缸、转子)、小汽轮机系统(新增冷再汽源管道、液压调节系统)、回热系统(高/低压加热器、除氧器),重点进行小机汽源无扰切换改造、汽轮机低负荷运行安全性评估相关工程。脱硝系统组件,包含 SCR 反应器、省煤器水旁路系统(新增阀门组、旁路管道)、喷氨格栅、氨区设备(液氨储罐、蒸发器),涉及省煤器水旁路改造、喷氨控制系统优化、催化剂更换等工程。

4. 改造风险分析与评价

危险源辨识作为风险控制的核心环节,需全面涵盖改造全流程中的“人、机、料、法、环”五要素。深度调峰灵活性改造项目与新建燃煤发电项目在实施过程中有一定的相似之处,但在一些特定方面所面临的风险十分显著,例如:不仅需要考虑到施工过程中对于电厂既有机组设备的影响,重点关注新旧设备、控制系统之间的兼容性问题,还需要尽可能保证设备改造过渡期间机组具有较完整的供电及调峰功能,否则可能直接影响电厂的正常运营秩序和调峰任务的顺利完成。实施期间还需要严格遵守电厂各类生产及保供要求,不仅受到工作计划批复的限制,且受电力保供、调峰任务约束,单次施工时间有限,可能造成工期的延误。

本次辨识工作组组建了一支专业的辨识团队,该团队由 3 名安全管理人员、锅炉、汽机、电气专业各 2 名技术人员、5 名一线操作工以及 2 名相关方专业工程师构成。团队结合改造技术方案与历史事故案例,运用“作业条件危险性分析法(LEC)+ 安全检查表法(SCL)+ 预先危险性分析法(PHA)”的组合方法开展辨识工作。主要开展如下工作:

明确本次技术改造所涵盖的具体范围,包括锅炉、汽轮机、脱硝系统等核心设备,并以此为基础,全面梳理改造过程中涉及的各个作业环节。同时,系统收集国内外同类项目的事故案例、相关设备的技术规范以及安全作业标准等资料,为后续三类方法——风险识别方法、安全控制方法与效果评估方法的有效应用提供充分的数据与信息支撑。

PHA(预先危险性分析)前置分析阶段主要聚焦于改造项目所涉及的新工艺、新设备及新型操作流程,例如小机汽源的无扰切换和省煤器水旁路的改造工程。该阶段需系统识别其中可能存在的各类危险类型,明确其触发条件,并初步评估一旦危险发生可能带来的后果,从而为后续安全管理提供初步依据。

SCL(安全检查表)全面排查阶段则基于 PHA 的分析结论,融合“人、机、料、法、环”五个维度,制定具有针对性的检查清单。该环节覆盖改造全过程的所有作业点、设备状态及周边环境,通过逐项核查,全面识别包括显性及隐性危险源在内的各类风险因素,确保隐患排查无死角。

LEC(作业条件危险性评价)量化评级阶段针对 SCL 所辨识出的各项危险源,结合改造作业的具体特点,对 LEC 评价方法中的取值标准进行适应性调整,通过量化计算各项风险值(D 值)准确划分风险等级,并最终形成可动态更新的风险清单,为后续落实分级管控措施提供清晰、可靠的依据[16][17]。

4.1. 原辅材料类风险分析

在改造过程中，需重点关注所涉及原辅材料的各项理化特性，尤其是针对其可能存在的燃烧性、爆炸性以及腐蚀性等潜在危险，进行系统识别与详细评估，具体风险情况见表 1：

Table 1. Hazard sources of raw and auxiliary materials

表 1. 原辅材料类危险源

风险点名称	类别	危险源描述	可能导致的事故	现有控制措施
锅炉炉膛	有限空间	改造期间进入炉膛作业，通风不良导致氧含量低于 19.5%；炉膛内积灰坠落	中毒窒息、物体打击	1) 作业前强制通风 ≥ 30 分钟；2) 每 30 分钟检测气体浓度；3) 炉膛顶部设置防护网
脱硝省煤器水旁路阀门	承压设备	新增阀门密封面损伤；阀门操作不当导致水击(低负荷切换时流量骤变)	管道泄漏、水击损伤设备	1) 阀门出厂前密封性试验；2) 操作时缓慢开启(开度 $\leq 10\%/min$)；3) 管道加装缓冲器
小汽轮机新增汽源管道	压力管道	管道焊接质量缺陷(未焊透、夹渣)；支吊架间距过大导致管道振动	管道爆管、设备损坏	1) 焊接后 100%射线检测；2) 支吊架间距按规范设置(≤ 6 m)；3) 运行中监测振动值(≤ 5 mm/s)
发电机氢冷系统	易燃易爆系统	改造期间氢纯度下降(设计 $\geq 96\%$ ，低负荷时可能低于 92%)；氢管道法兰泄漏	氢气爆炸、火灾	1) 每小时检测氢纯度；2) 法兰加装泄漏检测仪；3) 氢区禁止动火
脱硫吸收塔	有限空间	内部检修时浆液残留导致滑倒；吸收塔内二氧化硫浓度超标(>50 ppm)	滑倒伤害、中毒窒息	1) 作业前清理浆液；2) 佩戴便携式 SO_2 检测仪；3) 塔内铺设防滑垫

4.2. 生产工艺类风险分析

结合深度调峰改造的工艺调整，系统化地识别在低负荷运行、系统切换等关键操作环节中可能出现的各类潜在风险，具体分析见表 2：

Table 2. Hazard sources of production processes

表 2. 生产工艺类危险源

风险点名称	类别	危险源描述	可能导致的事故	现有控制措施
锅炉低负荷稳燃	燃烧工艺	20%额定负荷时 B/C 层燃烧器火焰不稳定(煤火检信号波动 $> \pm 5\%$)；一次风风速过低(< 25 m/s)导致煤粉沉积	炉膛灭火、煤粉爆炸	1) 燃烧器改造后冷态试验验证；2) 一次风风速实时监测；3) 配备微油点火备用系统
脱硝系统烟温调整	工艺参数	省煤器水旁路投用时 SCR 入口烟温波动(设计 $\geq 300^\circ C$ ，实际可能低于 $290^\circ C$)；喷氨量调整滞后导致 NO_x 超标	脱硝效率下降、空预器堵塞	1) 烟温实时闭环控制；2) 喷氨系统新增智能预测算法；3) 定期清理空预器积灰

续表

小机汽源 无扰切换	系统 切换 工艺	冷再汽源与四抽汽源切换时压力差 > 0.5 MPa; 切换速度过快(>10%/s)导致小机转速波动	小机超速、 给水泵出力 不足	1) 加装压力平衡阀; 2) 切换速度闭环控制; 3) 转速超驰保护投入
机组 AGC 响应	调控 工艺	改造后 30%~100%负荷 AGC 投入时负荷变化率 < 2%/min (设计要求 ≥ 3%/min); 一次调频响应时间 > 1 s	电网考核、 机组不稳定	1) DCS 逻辑优化(PID 参数整定); 2) 一次调频动态试验验证; 3) 负荷指令跟踪偏差报警

4.3. 人员行为类危险源辨识

聚焦并深入改造作业人员的日常操作习惯与长期形成的行为模式, 全面强化其安全防范意识和主动风险识别能力, 系统性地识别和评估各类违章作业行为、不规范操作动作及由人为失误导致的潜在风险隐患, 具体开展措施见表 3:

Table 3. Hazard sources of human behaviors

表 3. 人员行为类危险源

风险点名称	类别	危险源描述	可能导致的事故	现有控制措施
高处作业 (烟囱防腐)	违章作业	作业人员未系安全带(或高挂低用不规范); 跨越临空面无防护	高处坠落	1) 作业前安全交底(签字确认); 2) 现场安全员全程监护; 3) 临空面设置防护栏杆
动火作业 (锅炉焊接)	违章作业	未办理动火工作票(或票证不全); 动火点 5 m 内有易燃物(如保温棉)	火灾	1) 动火票分级审批(一级动火由厂长审批); 2) 易燃物清理或覆盖; 3) 配备 2 具 4 kg 干粉灭火器
有限空间作业 (脱硝催化剂更换)	误操作	未检测气体直接进入; 作业中通风设备停运未发现	中毒窒息	1) 气体检测合格后方可进入; 2) 通风设备专人监护; 3) 外部设置应急救援人员
电气操作 (GIS 开关操作)	误操作	操作前未核对设备名称编号; 带负荷拉隔离开关	触电、设备爆炸	1) 操作前“三核对”(名称、编号、位置); 2) 操作票双人监护; 3) 防误操作闭锁装置投入

4.4. 场所环境类危险源辨识

考虑改造作业的现场环境因素, 需全面识别温度、湿度、照明、通风、噪声、空气质量等条件对操作安全的具体影响, 具体分析见表 4:

Table 4. Hazard sources of site environment

表 4. 场所环境类危险源

风险点名称	类别	危险源描述	可能导致的事故	现有控制措施
锅炉炉膛内 作业环境	受限空间 环境	炉膛内照明不足(照度 < 50 lux); 粉尘浓度超标(>10 mg/m ³)	跌倒、粉尘吸入	1) 加装防爆照明灯(每 5 ml 盏); 2) 佩戴防尘口罩; 3) 作业人员定时轮换(≤1 小时/次)

续表

夏季户外作业(管架改造)	高温环境	环境温度 > 35℃时作业人员中暑；脚手架表面温度 > 50℃导致烫伤	中暑、灼烫	1) 避开高温时段(11:00~15:00 暂停作业)；2) 配备藿香正气水；3) 脚手架表面铺设隔热垫
冬季作业(脱硝烟道检修)	低温环境	管道结冰导致阀门卡涩；作业人员冻伤	阀门操作失灵、冻伤	1) 管道伴热系统投入；2) 穿戴防寒服(零下 10℃加穿保暖内衣)；3) 作业间隙进入暖棚休息
夜间作业(输煤系统改造)	照明环境	输煤栈桥照明照度 < 30 lux；作业点阴影区域未补充照明	物体打击、跌倒	1) 新增 LED 投光灯(每 10 ml 盏)；2) 作业点手持手电筒备用；3) 夜间作业人数 ≥ 2 人

5. 改造风险应对

5.1. 风险等级判定

暴露频率(E)调整：改造期间，锅炉炉膛、脱硝反应器等有限空间作业频次增加(原每月 1 次，改造期间每周 2 次)，E 值从“6 (逐日暴露)”调整为“10 (连续暴露)”；

事故后果(C)调整：改造后脱硝系统新增省煤器水旁路，若发生管道泄漏，可能导致省煤器爆管(原后果为“设备损坏，C = 7”)，调整为“多人受伤 + 设备停运，C = 15”；

可能性(L)调整：磨煤机动态分离器改造后，煤粉细度控制精度提升，煤粉自燃可能性降低(原 L = 3)，调整为“L = 1”。改造前后取值对比情况，见表 5：

Table 5. Hazard sources of site environment

表 5. 改造前后取值对比表

事故/事件类型	改造前(D 值)	改造后(D 值)	取值变化原因	风险等级变化
锅炉炉膛有限空间中窒息	L = 3, E = 6, C = 15, F = 1.2 (D = 324)	L = 3, E = 10, C = 15, F = 1.2 (D = 540)	改造期间作业频次增加(E 从 6 → 10)；炉膛内作业环境复杂(C 维持 15)	重大风险(橙)→特大风险(红)
脱硝省煤器管道泄漏	L = 3, E = 6, C = 7, F = 1.1 (D = 138.6)	L = 3, E = 6, C = 15, F = 1.2 (D = 324)	改造后管道压力波动大(C 从 7 → 15)；系统影响范围扩大(F 从 1.1 → 1.2)	较大风险(黄)→重大风险(橙)
磨煤机煤粉自燃	L = 3, E = 6, C = 15, F = 1.2 (D = 324)	L = 1, E = 6, C = 15, F = 1.2 (D = 108)	动态分离器改造提升煤粉细度(L 从 3 → 1)；防控措施加强(如温度监测)	重大风险(橙)→较大风险(黄)
小机汽源切换超速	L = 1, E = 6, C = 40, F = 1.3 (D = 312)	L = 1, E = 10, C = 40, F = 1.3 (D = 520)	改造期间切换频次增加(E 从 6 → 10)；小机转速控制要求高(C 维持 40)	重大风险(橙)→特大风险(红)

5.2. 风险等级管控要求

根据调整后的风险等级，制定分级管控策略：

1) 特大风险(红，D ≥ 320)：如炉膛有限空间中窒息、小机汽源切换超速，由总经理牵头管控，制

定专项方案(如炉膛作业“双人双监护”、小机超速保护冗余),每周组织风险评估。

2) 重大风险(橙, $160 \leq D < 320$): 如脱硝省煤器管道泄漏、发电机氢爆炸,由分管副总经理管控,每月开展专项检查,落实防控措施(如管道探伤、氢纯度监测)。

3) 较大风险(黄, $70 \leq D < 160$): 如磨煤机煤粉自燃、高处作业坠落,由部门负责人管控,每两周检查措施落实情况。

4) 一般风险(蓝, $20 \leq D < 70$): 如化学酸碱泄漏、夜间照明不足,由班组负责人管控,每日班前会强调防控要求。

5) 极低风险($D < 20$): 如工具遗落、环境杂物,由作业人员自行管控,做好日常清理。

6. 结语

在“双碳”目标驱动能源结构转型的背景下,燃煤机组深度调峰灵活性改造是适应电力系统新能源消纳的重要举措,而改造过程中的安全风险防控则是确保项目顺利实施以及机组后续安全稳定运行的关键所在。本文以上海地区某亚临界 630 MW 燃煤机组为研究对象,依托企业现有的安全管理信息平台,围绕深度调峰灵活性改造的全流程,综合运用 LEC 法、安全检查表法以及作业危害分析法,完成了“人、机、料、法、环”全要素的危险源辨识工作。针对改造作业的实际特点,对 LEC 法的取值标准进行调整,精准识别出较大及以上的安全风险,构建并形成五级风险分级管控机制,同时从技术、管理、应急三个维度制定管控措施,建立起全流程的安全风险控制体系。

本次研究针对锅炉炉膛检修、脱硝催化剂更换、小机汽源切换等高风险作业制定了具有针对性的管控措施,有效解决了现役老旧机组改造中安全管控与现场作业实际不匹配的问题,提升了安全防护措施的实用性与可操作性。研究形成的危险源辨识清单、风险分级标准以及管控方案,可为同类型亚临界燃煤机组开展深度调峰灵活性改造提供实践参考,其辨识成果也能为电厂“两票”管理、安全技术交底、隐患排查治理以及应急管理等工作提供数据支撑。

燃煤机组深度调峰灵活性改造的安全风险管理是一项系统性工程,后续可结合机组改造后的长期运行数据,对风险清单和管控措施进行动态优化,并融合智能化监测、数字化管控等技术手段,进一步提升改造作业以及机组低负荷运行阶段的安全防控水平。在煤电机组向电力系统灵活性调节电源转型的过程中,需将安全管理贯穿于改造设计、施工、调试及运行的全生命周期,实现改造效益与安全保障的协同发展,为电力系统的安全稳定运行以及“双碳”目标的稳步推进提供基础支撑。

参考文献

- [1] 冯伟忠,毛健雄.新形势下我国发展先进煤电的战略和技术经济性分析[J].中国电力企业管理,2022(28):50-53.
- [2] 严新荣,胡志勇,张鹏威,等.煤电机组运行灵活性提升技术研究与应用[J].发电技术,2024,45(6):1074-1086.
- [3] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告 2025 [EB/OL].
<https://cec.org.cn/detail/index.html?3-348152>,2025-08-12.
- [4] 马凯,岳克伟,何陆灿,等.超超临界二次再热机组汽温调节与灵活调峰技术研究进展[J].电力科技与环保,2026,42(1):90-103.
- [5] 张立伟,冯任卿,张毓清,等.考虑火电灵活性改造及深度调峰的风光火储系统容量优化配置[J].现代电力,2025,42(4):722-733.
- [6] 郑永辉,李强,郭景洲,等.集成蒸汽喷射器的亚临界 600 MW 火电机组抽汽蓄能灵活性改造技术分析[J].锅炉技术,2025,56(5):67-77.
- [7] 冯伟忠,李励.“双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J].发电技术,2022,43(3):452-461.
- [8] 赵悦婧.煤电角色生变:“十四五”压舱石,“十五五”靠什么? [N].中国电力报,2025-12-25(001).

- [9] 黄玉靖. 燃煤机组深度调峰工况下稳定运行策略分析[J]. 云南电业, 2026(1): 33-38.
- [10] 赫广迅, 祝海义, 刘鑫, 等. 煤电汽轮机超低负荷深度调峰能力探索[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(S2): 326-334.
- [11] 张文浩. 面向深度调峰的汽轮机主汽压力抗扰动控制方法[J]. 电气技术与经济, 2026(2): 216-219.
- [12] 唐贵基, 高一博, 宋亚军, 等. 基于汽轮机转子应力分析的 1000 MW 机组深度调峰运行优化[J]. 热能动力工程, 2026, 41(2): 133-139+172.
- [13] 李桐, 李亚军. 600MW 级火力发电机组深度调峰影响因素及对策[C]//中国国土经济学会. 2026 智慧城市建设与创新发展的论文集. 神木: 国能锦界能源有限责任公司, 2025: 138-141.
- [14] 王云鹤, 项学新, 孙佰仲. 电站锅炉深度调峰工况下水动力安全性研究[J]. 电力设备管理, 2026(1): 49-51.
- [15] 毛翠骥, 蒋晓锋, 邓庚庚. 面向机组深度调峰的褐煤锅炉热一次风优化改造[J]. 发电设备, 2026, 40(1): 31-35.
- [16] 何立峰, 钟健翔, 屠建飞. 基于 LEC-熵权法的车间生产违规行为危险等级评估[J]. 宁波大学学报(理工版), 2026, 39(1): 92-97.
- [17] 别念, 杨振斌. 基于层次分析法和作业条件危险性评价法的电力有限空间作业安全风险评估[J]. 科技和产业, 2025, 25(1): 90-97.