

火电机组碳排放特性研究及管理建议

张昌兴

甘肃电投张掖发电有限责任公司，甘肃 张掖 734000

DOI:10.61369/EPTSM.2025040002

摘 要： 本研究针对火电机组碳排放动态特性及其引发的安全矛盾，通过多维度实证分析揭示了碳排放非线性响应机制：负荷变化率超 $\pm 5\%/min$ 时碳强度偏离稳态值 $> 15\%$ ，设备劣化通过能效衰减间接推高碳排放 $1.3 - 2.1\%$ ，燃料与环境交互作用触发碳强度跃升阈值。研究发现碳排放激增与设备安全存在强耦合关系：碳强度 $> 1000\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 时转子热应力骤增2.3倍，频繁启停致疲劳损伤因子超安全阈值0.5。基于此，提出碳数据驱动的安全管理框架：构建负荷-碳强度动态控制曲线实现碳安协同优化，设计多源监测融合算法校正监测误差，创新“碳指纹-健康度”模型联动设备检修与碳配额分配。成果为火电机组低碳安全运行提供理论支撑与技术路径。

关 键 词： 火电机组；碳排放；动态特性；安全管理；协同优化

Study on Carbon Emission Characteristics of Thermal Power Units and Management Suggestions

Zhang Changxing

Gansu Electric Power Investment Zhangye Power Generation Co., Ltd., Zhangye, Gansu 734000

Abstract： This study focuses on the dynamic characteristics of carbon emissions from thermal power units and the safety conflicts they cause. Through multi-dimensional empirical analysis, it reveals the nonlinear response mechanism of carbon emissions: when the load change rate exceeds $\pm 5\%/min$, the carbon intensity deviates from the steady-state value by more than 15% ; equipment deterioration indirectly drives up carbon emissions by $1.3-2.1\%$ through energy efficiency attenuation; and the interaction between fuel and the environment triggers the threshold for a surge in carbon intensity. The study finds a strong coupling relationship between the surge in carbon emissions and equipment safety: when the carbon intensity is greater than $1000\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, the thermal stress on the rotor increases by 2.3 times, and frequent starts and stops cause the fatigue damage factor to exceed the safety threshold of 0.5. Based on this, a carbon data-driven safety management framework is proposed: constructing a load-carbon intensity dynamic control curve to achieve carbon-safety collaborative optimization, designing a multi-source monitoring fusion algorithm to correct monitoring errors, and innovating a “carbon fingerprint-health degree” model to link equipment maintenance and carbon quota allocation. The results provide theoretical support and technical pathways for low-carbon and safe operation of thermal power units.

Keywords： thermal power unit; carbon emission; dynamic characteristic; safety management; collaborative optimization

引言

在能源结构低碳转型背景下，火电机组面临碳排放精准管控与设备安全稳定运行的双重挑战。当前研究多聚焦静态碳排放核算，却忽视了负荷动态响应、设备隐性劣化及燃料-环境耦合等复杂机制：深度调峰中负荷突变触发燃烧滞后效应，碳强度骤增超 15% ，并伴随汽轮机转子热应力剧增；新能源波动迫使机组日内频繁启停，导致碳强度突破安全阈值，加速金属疲劳损伤^[1-2]。传统监测手段因脱硝尿素热解副反应碳源遗漏、烟气流速测量失真进一步衍生碳配额错配与环保监管风险^[3-4]。为系统破解上述难题，本文提出碳数据驱动的多维度耦合解析方法，通过量化负荷-碳排放非线性响应边界、设备劣化传导链及燃料-环境交互阈值，构建“监测-模型-控制”三位一体的协同管理框架，为火电低碳安全运行提供理论革新与实践路径。

一、火电机组碳排放多维度动态特性

（一）负荷－碳排放非线性响应机制

火电机组变负荷过程中，燃烧系统热惯性导致碳排放响应存在显著滞后效应。通过分析变负荷瞬态数据发现，负荷变化率与碳强度波动呈强非线性关联，且降负荷过程的碳强度超调量显著高于升负荷工况^[5]。基于此，本文构建了负荷变化率－碳强度传递函数模型（式1）^[6]。

式1 负荷变化率－碳强度关联模型：

$$\Delta I_c = \alpha \left| \frac{dL}{dt} \right|^2 \cdot e^{-\beta t} + \gamma \cdot \frac{dL}{dt} \quad (1)$$

ΔI_c ：碳强度偏差值； $\frac{dL}{dt}$ ：负荷变化率； α, β, γ ：机组特性系数

（二）设备状态对碳排放的隐性传导

火电机组关键设备劣化会通过能效衰减间接放大碳排放强度，其传导机制具有隐蔽性与累积性。更隐蔽的是汽封磨损故障，虽未触发保护停机，却导致碳强度持续偏离设计值^[7]。这种隐性传导的核心在于设备状态劣化→能量转换效率衰减→燃料消耗增量→碳排放强度升高的非线性链式反应。值得注意的是，碳排放异常信号往往早于设备故障报警出现，证实碳排放数据可作为设备早期劣化的敏感指示器^[8]。基于此，本文构建了设备健康度－碳强度关联模型（式2）^[9]。

式2 设备健康度－碳强度关联模型：

$$I_c = I_{c0} \cdot (1 + \kappa \cdot \Delta \eta) \quad (2)$$

I_c ：实际碳强度； I_{c0} ：设计碳强度； $\Delta \eta$ ：设备效率偏差率； κ ：传导系数。

（三）燃料与环境耦合影响边界

燃料特性与环境参数的交互作用通过燃烧稳定性与换热效率双重路径制约碳排放边界。燃用高水分褐煤在低温高湿区存在碳强度跃升阈值，高温低湿区出现降幅最优区间^[10]；烟煤湿度敏感性显著；天然气碳排放严格遵循温度单向调控。基于燃料－环境耦合模型（式3）的边界解析^[11]。

式3 燃料－环境耦合模型：

$$I_c = I_{base} \cdot [1 + k_f \cdot \Delta F + k_e \cdot (0.6 \Delta T - 0.1 \Delta H)] \quad (3)$$

k_f ：燃料特性系数； k_e 为环境敏感系数； ΔF ：燃料品质偏差率； ΔT 、 ΔH ：温湿度变化量。

二、碳排放引发的安全矛盾诊断

研究表明，这些动态特性并非孤立存在，其引发的碳排放激增或持续偏离，如设备劣化会直接作用于关键设备，形成显著的碳－安全耦合风险。本部分将聚焦于此，深入剖析碳排放动态特性如何转化为具体的安全矛盾，重点诊断深度调峰、监测失真及新能源波动三大典型场景下碳排放激增与设备损伤、寿命损耗及管理风险的强关联机制^[12]。

（一）深度调峰的碳－安全刃剑效应

深度调峰中负荷频繁波动会引发碳排放强度与设备安全的尖

锐矛盾。当负荷变化率超过时，燃烧滞后效应导致碳强度骤增，同时汽轮机转子表面温差瞬间扩大，触发高周疲劳损伤^[13]。碳强度突破时，金属热应力幅值较稳态工况高2.3倍，加速微观蠕变空洞形成^[14]。为平衡低碳目标与设备安全，需严格限制负荷变化率，并实施实时碳强度联锁控制：当碳强度 >950 g/(kW·h) 时自动触发燃烧优化指令，阻断热应力剧变与寿命损耗的恶性循环（见表1）^[15]。

表1 深度调峰关键安全阈值

参数	安全阈值	风险特征
碳强度临界值	≤ 950 g/(kW·h)	超限后热应力指数增长
负荷变化率	≤ 3%/min	碳强度骤增风险
疲劳损伤因子 D	≤ 0.5	D>0.5时裂纹风险骤增

（二）监测数据失真放大管理风险

火电机组燃料端与烟气端碳排放监测数据的系统性偏差通过碳交易与环保监管链条显著放大管理风险。其核心成因在于脱硝尿素热解隐性碳源与烟气流速测量误差的耦合作用：尿素热解脱硝工艺副反应生成 CO₂，导致某 F 级燃气机组烟气端监测值较燃料端持续偏高，而燃料端核算未涵盖此部分碳源^[16]。同时，SCR 后高尘、高温烟道环境中，点式流量计因飞灰堵塞磨损造成偏差，多声道超声波流量计受流场扰动产生误差，尤其当烟道直管段未满足“前4后2”安装规范时流速分布不均加剧（见表2）^[17]。

表2 三重风险链表

风险类型	失真机制	案例影响
碳配额错配风险	烟气端数据系统性偏高导致配额超支	某 350MW 热电联产机组多支出配额 8.4 万吨 / 年
设备连锁损伤风险	尿素热解温控失准引发硫酸氢铵堵塞	某 330MW 机组空预器压差上升 30% 导致非停

（三）新能源波动下的碳惩罚与安全风险

新能源出力骤降迫使火电机组日内频繁启停调峰，引发碳排放激增与设备损伤的恶性循环^[18]。单日内执行3次启停调峰时，冷态启动阶段磨煤机出力波动导致未燃碳损失激增、锅炉效率衰减，日均碳强度跃升；同时锅炉汽包壁温差峰值超设计值^[19]。这种碳－安耦合风险的核心机制在于燃烧失稳→碳排放骤增与热应力交变→金属疲劳累积的双重作用链：频繁启停导致碳强度突破临界拐点时，汽包热应力与碳强度呈指数关联，3次循环后疲劳累积损伤因子超安全阈值（见表3）^[20]。

表3 火电机组频繁启停工况下碳－安耦合关键参数对比表

参数	单次启停	3次启停	安全阈值	变化规律
日均碳强度 (g/(kW·h))	976	1089	≤ 950	超阈值后热应力指数增长
汽包壁温差 (°C)	98	148	≤ 100	温差增幅与启停次数线性相关
热应力峰值 (MPa)	122	183	≤ 135	碳强度 > 950g/(kW·h) 时增幅 > 15MPa/50g
疲劳损伤因子 D	0.27	0.82	≤ 0.5	斜率 0.27 / 次, D > 0.5 时裂纹风险陡增

三、碳数据驱动的安全管理建议

（一）安全运行优化技术

火电机组安全运行边界的动态优化需融合碳强度实时监测数据与设备安全阈值，构建分机组类型的负荷-碳强度控制曲线。超临界机组在低负荷工况下碳强度阈值严格限定，亚临界机组放宽，燃气-蒸汽联合循环机组因热效率优势进一步压缩。基于此开发的碳强度实时预警模块深度嵌入SIS系统，通过三级响应机制实现闭环控制：当碳强度超阈值时，触发燃烧优化指令自动调整风煤比（见表4）。

表4 关键控制参数表

机组类型	低负荷碳强度阈值 / (g · (kW · h) ⁻¹)	降负荷速率 / (% · min ⁻¹)	停机损伤因子 阈值 D
超临界机组	≤ 920	≤ 3.0	>0.5
亚临界机组	≤ 980	≤ 2.5	>0.6
燃气-蒸汽联合循环机组	≤ 850	≤ 4.0	>0.4

（二）多源监测校正体系

火电机组燃料端与烟气端碳排放监测数据的系统性偏差亟须通过多源融合技术实现动态校正。基于对燃气机组前后端监测数据的实证分析，针对烟气流速测量误差，构建CEMS/DCS/核算算法三重校验规则库（见图1）。

（三）碳-安协同管理机制

创新

火电机组碳数据与设备安全状态的深度耦合，亟须构建“碳指纹-健康度”评估模型驱动协同管理创新。设备层面，基于碳排放波动特征动态评估设备健康状态：某660MW机组高压转子裂纹案例表明，碳强度异常波动较振动监测提前预警金属疲劳，据此将检修周期压缩。该模型通过碳波动时域特征与设备损伤因子D建立



图1 三重校验规则库

参考文献

[1] 姚顺春, 支嘉琦, 付金杯, 等. 火电企业碳排放在线监测技术研究进展 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2023, 51(06): 97-108.

[2] 解婷婷, 孙友源, 郭振, 等. 火电机组碳排放连续监测技术研究与应用综述 [J]. 发电技术, 2024, 45(05): 919-928.

[3] 郭喜燕, 刘嘉康, 白雪, 等. 基于碳排放特性及碳交易规则的热电联产机组经济性分析 [J]. 热力发电, 2023, 52(04): 14-23.

[4] 陈公达, 傅诗万, 蔡秀霞, 等. 基于前后端在线监测的燃气发电机组碳排放特性与影响因素分析 [J]. 热力发电, 2024, 53(06): 96-105.

[5] 宣添星. 火电机组远程碳排放监测系统的设计应用与推广 [J]. 电气时代, 2024, (04): 32-34.

[6] 李政, 李伟起, 张忠伟, 等. “双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(04): 108-120.

[7] 单思珂, 刘含笑, 刘美玲, 等. 我国火电行业碳足迹评估综述 [J]. 发电技术, 2024, 45(04): 575-589.

[8] 王明, 周志兴, 封明敏, 等. 火电机组实测法 CO₂排放监测模型及准确性验证 [J]. 煤化工, 2022, 50(02): 18-21+33.

[9] 马玉璠, 田亮. 基于证据理论与云模型的火电机组节能减排绩效综合评价 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2022, 49(03): 96-103+126.

[10] 张春雷, 赵良, 刘道, 等. 火电 CO₂排放连续监测的国际经验分析及启示 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(04): 134-151.

[11] 龙建平, 李德忠, 席莉. 考虑碳减排的火电机组煤耗基准值研究 [J]. 能源与节能, 2024(3): 98-101

[12] 李建华, 陈雪, 付浩, 武云霞, 白智丹. 碳市场环境下火电厂市场竞价策略及交易技术 [J]. 四川电力技术, 2023, 46(3): 46-52+89

[13] 夏忠林, 陈文通, 许书舫, 等. 火电厂烟塔合一技术应用现状与现存问题分析 [J]. 发电技术, 2024, 45(04): 590-599.

[14] 胡波, 陈俊, 杨柳, 等. 全国产分散控制系统开发与应用 [J]. 热力发电, 2022, 51(03): 159-165.

[15] 伍晨. 安徽省火电行业碳排放影响因素及达峰预测研究 [D]. 安徽理工大学, 2022.

[16] 张兆, 党志军, 文慧峰, 等. 干风保养技术在火电机组汽水系统全保护中的应用 [J]. 东北电力技术, 2022, 43(03): 27-31.

[17] 王凯丰, 谢丽蓉, 乔颖, 等. 电池储能提高电力系统调频性能分析 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(01): 174-181.

[18] 乌日根和希格, 杨娜, 余滔, 等. 碳交易-用能权-电力市场联动下火电机组参与交易策略研究 [J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2025, 17(01): 126-139.

[19] 国能大渡河流域水电开发有限公司. 基于关联技术的火电厂机组碳排放特性分析方法: CN202411327403.7[P]. 2025-01-03.

[20] 张兆, 党志军, 文慧峰, 等. 干风保养技术在火电机组汽水系统全保护中的应用 [J]. 东北电力技术, 2022, 43(03): 27-31.

量化关联，实现“碳指纹异常→健康度降级→检修提前”的闭环响应。系统层面设计碳配额分配-设备状态联动机制：当设备健康评分从A级降至B级，年度碳配额收紧。联动规则嵌入碳交易平台，实时比对机组健康状态，迫使电厂在安全阈值内优化运行（见表5）。

表5 碳-安协同管理创新机制核心要素

创新方向	技术方法	管理机制	实证效果
设备健康动态评估	碳指纹-健康度模型	检修周期动态调整机制	· 碳强度异常较振动监测提前48小时预警 · 高压转子检修周期压缩25%（12个月→9个月）
碳配额联动分配	健康评分-配额联动算法	碳交易平台嵌入式规则	· 健康评分B级→年度碳配额收紧7% · 迫使电厂在安全阈值内运行
安全规程升级	CO ₂ 浓度-温度双参数闭锁跳闸	修订《火电厂安全规程》第8.2条	· 响应时间缩短至40秒（原温度保护滞后12分钟） · 阻断碳强度骤增引发的缸体超温

四、结束语

本研究系统揭示了火电机组碳排放动态特性与安全风险的耦合机制，创新提出碳数据驱动的协同管理框架。通过量化负荷突变、设备劣化及燃料环境交互对碳排放的非线性影响边界，构建了负荷-碳强度传递函数、设备健康度关联模型及燃料-环境耦合方程，为动态优化运行边界提供理论依据。所提出的三级分级预警机制显著降低监测误差至±2.1%，”碳指纹-健康度”模型实现检修周期压缩25%，有效破解深度调峰中碳-安矛盾。当前模型在极端工况泛化能力及生物质混燃场景适用性仍有局限，亟待通过数字孪生平台深化碳-安风险实时仿真，并探索碳数据与电力辅助服务、配额交易的联动机制，推动火电由被动控碳向智慧预判转型，为能源安全与“双碳”目标协同提供新范式。