

# 基于 NARX-MPC 智能协调控制的机组深度调峰研究

方鑫 周丽峰

江苏利电能源集团，江苏省无锡市，214000；

**摘要：**本文针对机组深度调峰过程中存在的动态响应迟滞与多变量强耦合控制难题，提出一种基于非线性自回归外生模型-预测控制（NARX-MPC）的智能协调控制方法。通过融合长短时记忆网络（LSTM）的时序特征提取能力和非线性自回归外生（NARX）模型的外生变量嵌入机制，构建具有多物理场耦合特性的动态预测模型，精确表征燃料量-蒸汽参数-负荷响应的非线性映射关系。采用多约束滚动时域优化策略，对主蒸汽压力与中间点温度实施前馈-反馈协同控制，通过动态权重调整实现压力-温度耦合关系的解耦优化。实验结果表明，优化后的控制方法显著提升了机组的低负荷爬坡能力，使负荷变化速率提升了40%，同时使主蒸汽压力稳态偏差收敛至±0.5MPa，中间点温度的瞬态波动幅度缩减至±10℃，极大地增强了机组的响应速率、负荷控制精度和系统稳定性。此外，优化后的机组成功实现了20%负荷深度调峰能力，具备良好的智能运行能力和较高的负荷变化速率。

**关键词：**智能协调控制；非线性自回归外生模型；预测控制；深度调峰；长短时记忆网络

**DOI：**10.69979/3060-8767.25.08.027

## 引言

随着经济的快速发展，电力系统中可再生能源的比例不断上升，这使得电力系统中的负荷波动日益增大，调峰问题也变得更加复杂和紧迫。虽然可再生能源的发电容量不断增加，但火力发电仍然是总发电量中的主力<sup>[1]</sup>。为此，采用锅炉火电机组进行深度调峰已成为缓解电力系统峰谷差问题的核心手段，也是推动风能和太阳能等可再生能源并网的关键策略之一。深度调峰不仅能够显著提升电网的调节能力，使其更好地应对负荷变化，还可能带来一些负面影响<sup>[2]</sup>，例如对发电机效率的影响、负荷响应速度的变化以及设备振动的增加等问题<sup>[3]</sup>。因此，如何优化调整诸如主汽压力、主汽温度以及中间点温度等参数<sup>[4]</sup>，确保机组在调峰过程中保持安全、稳定和高效的运行，是实际运行中的重要挑战。

刘文胜<sup>[5]</sup>对某电厂的亚临界600MW机组在深度调峰至30%额定负荷下的锅炉运行进行了研究。实验结果表明，在未进行设备改造和未加入助燃措施的情况下，锅

炉能够在低负荷下保持稳定燃烧，辅机系统能够正常、安全运行，锅炉排放符合超低排放标准，并且基本达到了机组在静态状态下深度调峰至30%额定负荷的预期目标。姜丽民<sup>[6]</sup>提出了一种基于PID控制器的优化控制策略，深入探讨了660MW超临界燃煤机组在深度调峰过程中的控制技术。通过建立燃煤发电机组在不同工况下的变工况模型，分析了锅炉、汽轮机及辅助系统在不同负荷条件下的动态特性。吕建等<sup>[7]</sup>则采用了设定值曲线优化和控制回路逻辑优化等多种调整方法，对350MW超临界机组进行了深度调峰实验。然而，该方法未能调整主汽压力、主汽温度以及中间点温度等关键参数，导致在深度调峰优化控制过程中存在控制不精确等问题，调峰性能不理想。

本文通过对利港电厂8号机组在不同负荷段下的深度调峰实验分析，探讨了深度调峰对锅炉机组运行性能的影响，并提出了一种基于非线性自回归外生模型-预测控制的智能协调控制方法，以更好地满足深度调峰过程中快速负荷变化的需求。

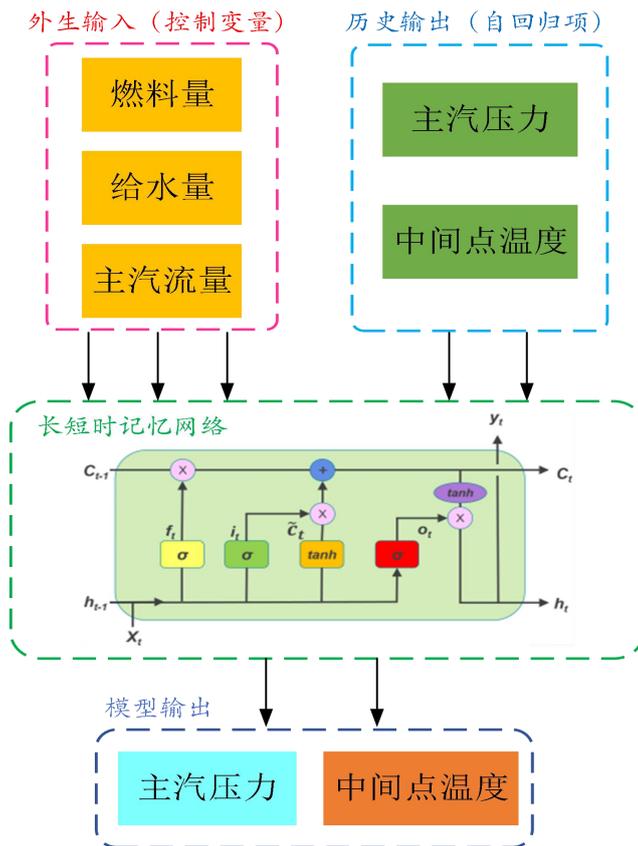


图 1, 基于 NARX 动态建模示意图

## 1 基于非线性自回归外生模型 (NARX) 的动态建模方法

在锅炉机组深度调峰控制中, 主汽压力与中间点温度是决定系统热力平衡与运行安全的核心参数。主汽压力的稳定性直接影响蒸汽输出品质与汽轮机效率, 而中间点温度则反映了锅炉过热器的的工作状态, 其波动可能导致设备热应力增大或效率下降。尤其在深度调峰过程中, 锅炉负荷频繁变化, 系统动态特性呈现显著的非线性与时滞效应, 传统机理建模方法基于质量与能量守恒方程, 虽能提供物理可解释性, 但难以精确描述燃烧波动、传热滞后等复杂动态特性, 导致模型预测精度不足。此外, 主汽压力与中间点温度之间存在的多变量耦合效应进一步增加了建模难度。

为解决上述问题, 本文提出一种基于非线性自回归外生模型的动态建模方法。非线性自回归外生模型作为一种数据驱动建模方法, 通过融合历史输出数据与外部输入变量的非线性映射关系, 能够有效捕捉锅炉系统的动态响应特性。NARX 无需依赖先验物理方程, 仅需采集锅炉运行数据即可构建模型, 尤其适用于变工况条件下的非线性系统建模。其优势在于: 一方面, 通过引入自

回归项(历史输出)与外生输入项(如燃料量、给水量), 能够显式表征系统的时间依赖性; 另一方面, 采用非线性函数可灵活拟合多变量耦合关系, 从而克服机理模型简化假设带来的误差, 为后续机组深度调峰控制提供高精度的动态模型基础。NARX 的核心原理在于利用非线性函数建立当前输出与历史输出、历史及当前输入之间的动态关系。其数学表达式可表示为:

$$y(t) = F(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n_y), u(t-d), u(t-d-1), \dots, u(t-d-n_u)) + \epsilon(t) \quad (1)$$

其中,  $y(t)$  为当前时刻输出变量(主汽压力或中间点温度),  $u(t)$  为输入变量(如燃料量、给水量, 蒸汽流量),  $n_y$  与  $n_u$  分别为输出与输入的时间滞后阶数,  $d$  为输入延迟步长,  $\epsilon(t)$  为建模误差。非线性函数  $F(\cdot)$  通常通过神经网络实现, 本文采用长短期记忆网络(LSTM), 通过隐藏状态传递时间依赖性。LSTM 通过输入门( $i_t$ )、遗忘门( $f_t$ )、输出门( $o_t$ )和细胞状态( $C_t$ )实现时序信息的选择性记忆与遗忘。其核心公式如下:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + b_f) \\ i_t &= \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + b_i) \\ \tilde{C}_t &= \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + b_C) \\ C_t &= f_t \odot C_{t-1} + i_t \odot \tilde{C}_t \\ o_t &= \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, \mathbf{x}_t] + b_o) \\ h_t &= o_t \odot \tanh(C_t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $\sigma$  为 Sigmoid 函数,  $\odot$  为逐元素乘法。当前时刻的输入向量是  $\mathbf{x}_t = [Y_{\text{past}}(t), U_{\text{past}}(t)]$ , 由历史输出  $Y_{\text{past}}$  和外生输入  $U_{\text{past}}$  组成。历史输出量可表示为:

$$\begin{aligned} Y_{\text{past}}(t) &= [P(t-1), P(t-2), \dots, P(t-n_y)], \\ [T(t-1), T(t-2), \dots, T(t-n_y)] \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $n_y$  为历史输出滞后阶数。外生输入量可表示为:

$$\begin{aligned} U_{\text{past}}(t) &= [u_1(t-d), u_1(t-d-1), \dots, u_1(t-d-n_u)], \\ [u_2(t-d), u_2(t-d-1), \dots, u_2(t-d-n_u)], \\ [u_3(t-d), u_3(t-d-1), \dots, u_3(t-d-n_u)] \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$  分别表示燃料量、给水量和主汽流量,  $d$  为输入延迟步长,  $n_u$  为外生输入滞后阶数。在 NARX 框架下, LSTM 作为非线性函数  $F(\cdot)$ , 模型输出为

$$\begin{cases} P(t) = W_p \cdot h_t + b_p \\ T(t) = W_T \cdot h_t + b_T \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $P(t), T(t)$  分别为主汽压力与中间点温度。  $h_t$  为 LSTM 隐藏状态,  $W$  和  $b$  为输出层参数。图 1 显示了基于 NARX 的动态建模。该建模方法通过融合长短期记忆网络的非线性时序建模能力与非线性自回归外生模型的多变量耦合表征特性, 为锅炉机组深度调峰控制提供了关键技术支持。该方法利用 LSTM 的门控机制(遗忘门、输入门)捕捉锅炉燃烧、传热等环节的长时滞效应, 通过外生输入(燃料量、给水量、蒸汽流量)与自回归项(历史主汽压力, 中间点温度)的联合建模, 精准描述负荷剧烈波动下的非线性动态特性, 解决传统模型因简化假设导致的预测误差问题。

## 2 基于模型预测控制(MPC)的主汽压力与中间点温度控制策略

在锅炉机组深度调峰控制中, 主汽压力与中间点温度的控制面临多重复杂挑战。首先锅炉负荷的快速变化导致燃烧效率、传热系数等参数呈现显著非线性, 传统线性控制方法因无法有效处理非线性动态特性, 难以适应深度调峰工况下的快速负荷变化。其次, 主汽压力与

中间点温度受燃料量、给水量、蒸汽流量等多变量共同影响, 且存在双向耦合效应。压力波动会间接改变燃烧效率并进一步影响温度, 这种强耦合特性使得单一控制变量调整易引发系统振荡。此外, 锅炉热力过程存在分钟级滞后效应。燃料量调整到蒸汽压力响应的延迟, 而环境扰动(如煤质变化、烟气含氧量波动)进一步加剧了控制的不确定性。

针对这一问题, 本文采用基于 MPC 的主汽压力与中间点温度控制策略, 该方法通过滚动优化与反馈校正机制, 在多变量约束下实现动态优化控制。其核心原理依赖于高精度预测模型, 基于状态空间模型的预测方程可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t+1) = A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (6)$$

其中状态变量  $\mathbf{x}(t) = [P(t), T(t)]^T$  包含主汽压力与中间点温度, 控制输入  $\mathbf{u}(t)$  包含燃料量, 给水量和主汽流量, 输出为  $\mathbf{y}(t) = [P(t), T(t)]^T$ 。在预测时域  $N$  内, MPC 通过最小化目标函数  $J = \sum_{k=0}^{N-1} (\|\mathbf{y}(t+k|t) - \mathbf{y}_{\text{ref}}\|_Q^2 + \|\Delta \mathbf{u}(t+k)\|_R^2)$  实现跟踪误差与控制量变化率的平衡, 其中  $Q$  和  $R$  为权重矩阵,  $\Delta \mathbf{u}(t)$  抑制控制量突变。同时, 硬约束条件  $P_{\min} \leq P(t+k|t) \leq P_{\max}$  与  $T_{\min} \leq T(t+k|t) \leq T_{\max}$  被直接嵌入优化问题, 确保参数安全边界。每个控制周期根据实时测量值更新模型并重新求解优化问题, 仅实施首步控制量以实现反馈校正。图 2 显示了基于 MPC 的主汽压力与中间点温度控制策略的原理图。

基于 MPC 的主蒸汽压力与中间点温度控制策略为锅炉机组深度调峰运行提供了高效且可靠的技术支撑。该策略通过动态优化锅炉燃烧过程的输入参数, 显著提升了燃烧稳定性, 抑制了因负荷突变导致的燃烧振荡和烟气成分波动, 从而改善机组整体效率。在能量传递层面, MPC 能够协调锅炉与汽轮机之间的动态匹配, 精准调节蒸汽参数, 缩短系统进入稳态的过渡时间, 同时降低关键参数的调节复杂度。此外, 该方法通过实时预测与约束优化, 有效规避超温、超压等潜在风险, 大幅提升运行安全性。实际应用表明, 结合动态模型的控制框架不仅增强了机组的抗干扰能力, 还减少了因频繁启停或参数越限引发的设备损耗, 最终在保障稳定运行的前提下降低维护成本, 推动火力发电向更经济、更智能的方向发展。

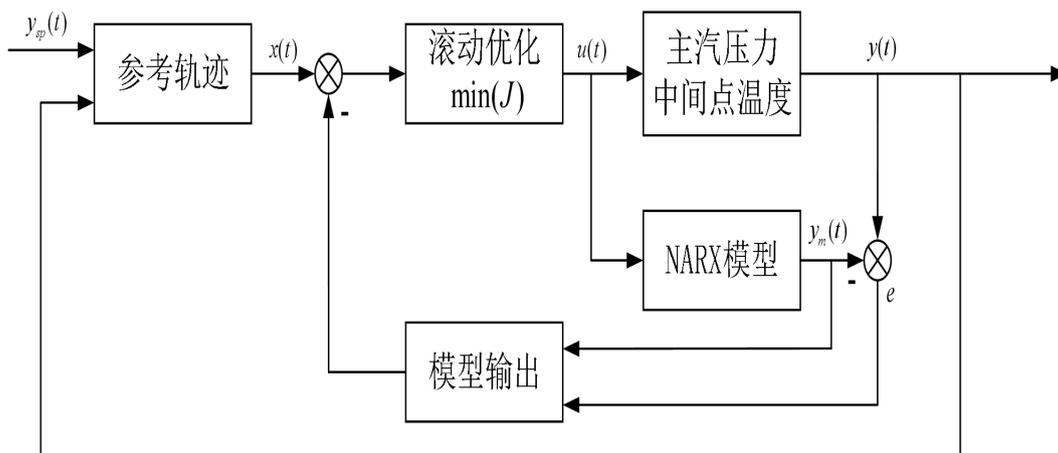


图 2, 基于 MPC 的主汽压力与中间点温度控制策略原理图

### 3 试验与分析

为了验证所提机组深度调峰控制策略的有效性, 本文设计了针对利港 8 号机组的变负荷试验进行测试。利港 8 号机组锅炉为超临界参数变压运行螺旋管圈直流炉, 采用 II 型露天布置、单炉膛、一次中间再热、四角切圆燃烧方式。配备的汽轮机为上海汽轮机厂生产的 N600-

24.2/538/566 一次中间再热、三缸四排汽、单轴、凝汽式汽轮机。2017 年江阴利港发电股份有限公司 8 号机组增容至 650MW。本次对 8 号机组控制策略进行优化, 保证机组不低于 20% 负荷工况具备深度调峰能力。

在所提深度调峰控制策略优化前, 当机组以 5MW/min 的速率从 120MW 逐步上升到 230MW 负荷段投入运行时的曲线如图 3 所示。

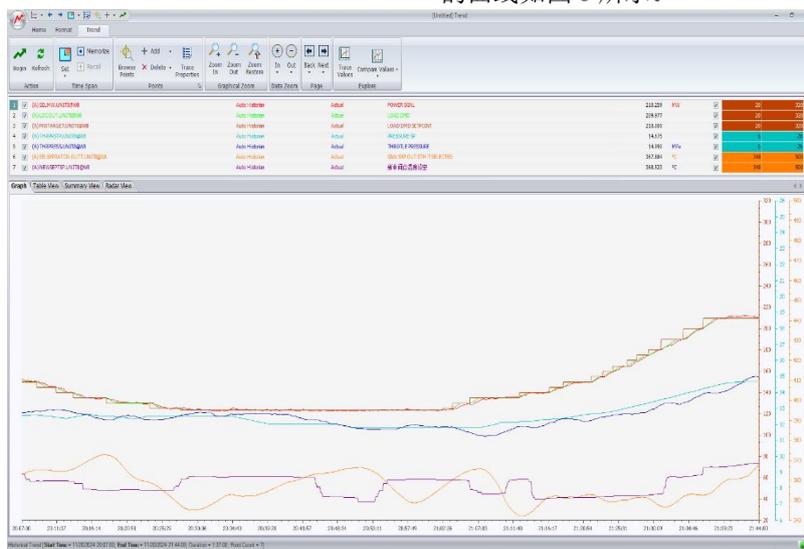


图 3, 优化前 120MW 到 230MW 负荷段机组投入运行曲线图

根据图 3 的运行曲线图可知, 利港电厂 8 号机组在动态调负荷过程中呈现出以下控制特性: 实际负荷响应与调度指令间存在  $\pm 2\text{MW}$  的跟随性偏差, 主蒸汽压力在升负荷启动阶段呈现  $-0.55\text{MPa}$  的显著负向偏移。中间点过热蒸汽温度在动态调节过程中出现  $\pm 14^\circ\text{C}$  的宽幅波动, 其稳态运行区间偏离设计值约  $\pm 10^\circ\text{C}$ 。值得注意的是, 主蒸汽压力控制系统在负荷扰动下表现出持续失稳特征, 具体表现为: 在负荷阶跃变化时产生压力设定

值跟踪失效, 即便负荷波动幅值收窄至稳定工况范围, 系统仍呈现周期性振荡现象, 且在升负荷过渡阶段频繁触发超压保护阈值, 压力参数恢复至稳态的调节周期显著延长。与此同时, 中间点温度在动态调节过程中出现  $14^\circ\text{C}$  峰峰值的振荡行为, 暴露出明显的超温安全隐患。上述耦合性控制失稳问题导致机组 AGC 跟踪性能指标下降, 机组低负荷的爬坡速率下表现较差, 负荷响应慢, 严重制约了机组的深度调峰能力。

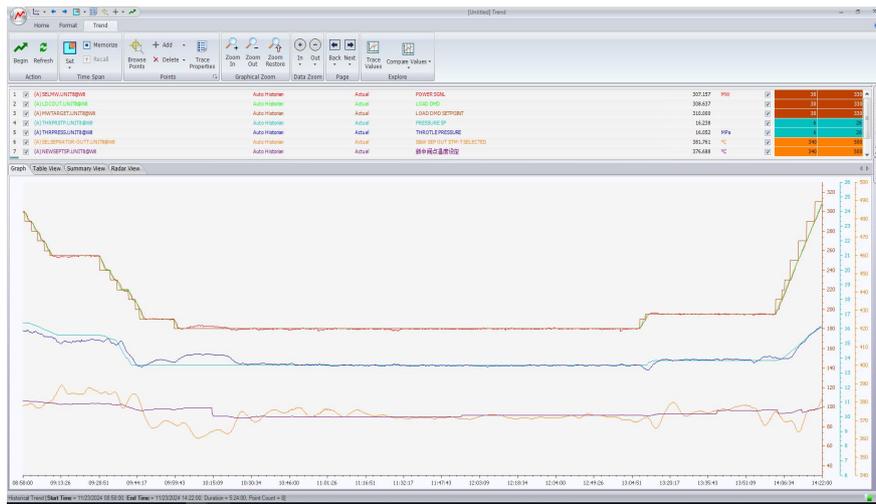


图 4, 优化后 120MW 到 230MW 负荷段机组投入运行曲线图

根据图 4 的曲线显示, 利港电厂 8 号机组在控制系统优化后展现出显著性能提升。当机组执行额定负荷变化率为 6.5MW/min 的指令时, 其功率跟踪过渡过程呈现准线性特征, 未观测到显著振荡模态, 且动态超调率低于设计阈值。主蒸汽压力控制方面, 动态跟踪误差峰峰值收敛至  $\pm 0.5\text{MPa}$  范围, 缓解了原有振荡现象。中间点温度动态响应特性得到改善, 最大瞬态偏差量压缩至  $\pm 10^\circ\text{C}$  范围内, 稳态控制精度达到  $\pm 5^\circ\text{C}$  技术指标, 较原系统波动幅度降低 64.3%。负荷响应速度方面, 机组的

负荷响应速度明显加快, 尤其是在低负荷下, 响应速度提升了 40%。此改进确保了机组能够在低负荷下保持稳定的快速爬坡能力, 适应快速负荷变化。此外, 机组的控制系统具有灵活选择双给泵、双侧风机的功能, 可以根据不同煤种选择三磨或两磨, 进一步提高了调峰控制的适应性与灵活性。综上所述, 优化后系统在变负荷工况下实现多参数协同稳定控制, 降低了人工干预频次, 验证了所提控制在提升机组深度调峰能力的有效性。

表 1: 优化前、后, 负荷段升负荷数据对比

外部变量	实际值 (优化前)	实际值 (优化后)
负荷响应偏差	$\pm 2\text{ MW}$	$\pm 1\text{ MW}$
主汽压力 (MPa)	动态偏差 $< \pm 3.2\%P_o$ , 稳态偏差 $< \pm 2.4\%P_o$	动态偏差 $< \pm 1.1\%P_o$ , 稳态偏差 $< \pm 1.3\%P_o$
中间点温度 ( $^\circ\text{C}$ )	动态偏差 $< \pm 15^\circ\text{C}$ 稳态偏差 $< \pm 6^\circ\text{C}$	动态偏差 $< \pm 10^\circ\text{C}$ 稳态偏差 $< \pm 5^\circ\text{C}$
主汽温度 ( $^\circ\text{C}$ )	动态偏差 $< \pm 14^\circ\text{C}$ 稳态偏差 $< \pm 12^\circ\text{C}$	动态偏差 $< \pm 4.8^\circ\text{C}$ 稳态偏差 $< \pm 3.2^\circ\text{C}$
再热汽温度 ( $^\circ\text{C}$ )	自动未投入, 运行人员 手动控制	动态偏差 $< \pm 7.3^\circ\text{C}$ 稳态偏差 $< \pm 2.4^\circ\text{C}$

基于表 1 所示的负荷段升负荷过程优化对比结果, 所提出的控制策略在多变量协同调节方面展现出显著技术优势。实验数据表明, 优化后的系统实现了功率指令的精确跟踪, 动态跟踪误差被严格限制在设定值可接受的容差带内, 主蒸汽压力波动幅值收敛于  $\pm 0.5\text{ MPa}$  的工程允许范围。热力参数控制方面, 主蒸汽温度与再热蒸汽温度的稳态调节精度分别达到  $\pm 5^\circ\text{C}$  技术规范要求, 中间点温度在动态过渡过程中保持  $\pm 10^\circ\text{C}$  的受控波动范围, 系统全程未出现振荡失稳或保护动作触发现象。主汽温度稳定在不低于额定值  $30^\circ\text{C}$ , 主汽压力稳定在设

计工况范围内, 具备随时供热的能力, 确保机组在各种负荷波动情况下能够持续稳定地提供可靠的热能输出。经过优化后的机组, 负荷变化速率得到显著提高。在现有机组负荷变换速率为 0.8%–1.5%额定功率每分钟的基础上, 优化后的机组 (负荷 50% 以上及 30%–50% 负荷区间) 负荷变化速率可分别达到 2.2% 和 1.5% 额定功率每分钟。大大提升了机组的调峰响应速度和灵活性, 满足了更加严格的负荷变化要求。在负荷调节自动控制方面, 优化后的机组通过改造实现了干湿态转变点以上负荷调节自动控制, 实现了负荷工况下 (包括远离临界点及

以下负荷)的自动调节,且无需人工干预,AGC指令占比不低于95%。实验结果表明,所提出的NARX-MPC框架的智能协调控制方法能够显著提高机组的负荷响应速率、负荷控制精度和系统稳定性。系统的智能调度能力进一步提升,满足了最新一代煤电机组的技术标准。

## 4 结论

本研究针对利港电厂8号机组在深度调峰工况下的动态特性优化问题,提出了一种基于NARX-MPC框架的智能协调控制方法。该方法结合LSTM网络的时序特征提取能力与NARX模型的外生变量显式嵌入机制,构建了一个高精度的动态耦合模型,有效表征了燃料量、蒸汽参数和负荷响应之间的非线性映射关系。通过应用多约束滚动时域优化方法,本文对主蒸汽压力和中间点温度实施了前馈-反馈复合控制。实证研究结果表明,优化后的控制系统显著提高了机组的低负荷爬坡能力,负荷变化速率在低负荷阶段提升了40%,并且主蒸汽压力的稳态偏差收敛至 $\pm 0.50\text{MPa}$ ,中间点温度的瞬态波动幅值缩减至 $\pm 10^\circ\text{C}$ ,有效消除了原控制模式下的超压超温风险。此外,优化后的机组实现了负荷调节过程中的智能运行,AGC指令占比提高至95%,进一步提升了系统的灵活性与调峰响应速度。研究验证了所提方法在深度调峰控制中的有效性,显著提高了利港电厂8号机组的负荷响应速度、系统稳定性和智能调度能力,为未来煤电机组的深度调峰提供了可靠的技术方案。

## 参考文献

[1] 张伟,尹宝聚,王东雪,等. 电力系统协调控制与深

度调峰策略分析[J]. 集成电路应用,2024,41(11):224-225.

[2] 吴连营. 机组AGC及深度调峰控制性能优化[J]. 煤炭科技,2023,44(6):22-26.

[3] 李甲伟,刘新龙,梁祖雄,等. 火电机组深度调峰控制系统优化研究[J]. 自动化仪表,2022,43(07):67-72.

[4] S. Qiu, R. Song, Z. Wang, Z. Du and Y. Zhan, "Research and application of AGC whole process automatic control for thermal power units under low load deep peak shaving conditions," 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAI C), Chongqing, China, 2022, pp. 484-488.

[5] 刘文胜,吕洪坤,蔡洁聪,等. 600MW亚临界锅炉30%额定负荷深度调峰试验研究[J]. 锅炉技术,2019,50(4):7.

[6] 娄丽民. 基于660 MW超临界燃煤发电机组深度调峰中的控制技术分析[J]. 科学技术创新,2025,(02):31-34.

[7] 吕建,白东海,温武. 新型电力系统下基于深度调峰的火电机组控制技术研究[J]. 山西电力,2023(6):49-53.

作者简介:方鑫,出生年月:1982-01-18,性别:男,职称:工程师,从事工程专业:发电厂热控设备的全寿命管理工作,研究集中于发电厂控制系统的协调优化。