

火电厂灵活性改造在新型电力系统中的应用研究

孙德金

大唐山东发电有限公司，山东济南，250000；

摘要：随着新型电力系统的发展，火电厂灵活性改造成为关键议题。锅炉燃烧系统作为火电厂的核心环节，其优化对提升火电厂灵活性至关重要。本文提出基于多门混合专家网络（MMoE）的锅炉燃烧系统多目标动态建模方法，通过综合考虑 NO_x 浓度，CO 浓度，飞灰含碳量，再热汽温和排烟温度等五项指标，实现燃烧效率与污染物排放的协同优化，该方法在各项指标上的预测精度均优于传统单任务建模方法，有效提升了火电厂的灵活性和经济性，以供参考。

关键词：火电厂灵活性改造；锅炉燃烧系统；多目标建模；MMoE

DOI：10.69979/3060-8767.25.06.021

引言

随着全球能源结构的转型与“双碳”目标的推进，新型电力系统以高比例可再生能源接入为核心特征，对传统火电厂的灵活性提出了更高要求，火电厂需从传统的基荷电源角色向灵活调节电源转变，以适应新能源发电的间歇性和波动性。火电厂需从基荷电源向灵活调节电源转变，以适应新能源发电的间歇性和波动性。本文旨在探讨基于 MMoE 的锅炉燃烧系统多目标建模方法在火电厂灵活性改造中的应用。通过综合考虑多个燃烧指标，实现燃烧效率与污染物排放的协同优化，为火电厂灵活性改造提供技术支撑。

1 火电厂灵活性改造与锅炉燃烧系统优化的关联性分析

1.1 火电厂灵活性改造的技术需求背景

锅炉燃烧系统是火电厂的核心组成部分，其性能直接影响火电厂的灵活性。锅炉燃烧过程的优化能提高燃烧效率，降低污染物排放，还能增强火电厂的负荷响应速度和调节范围^[1]。锅炉燃烧系统涉及多个工艺参数和燃烧指标，如 NO_x 浓度，CO 浓度，飞灰含碳量，再热汽温和排烟温度等，此类指标之间存在高度非线性与强耦合特性，单一目标的优化往往难以兼顾其他指标的性能，甚至可能导致系统整体性能下降。

1.2 锅炉燃烧系统优化对火电厂灵活性的提升作用

通过优化锅炉燃烧系统，可提高燃烧效率，减少不完全燃烧损失，进而降低燃料消耗。同时，协同优化污染物排放控制，如 NO_x，CO 等，有助于火电厂满足日益严格的环保要求，提升其在新型电力系统中的竞争力。锅炉燃烧系统的优化能提升火电厂的负荷响应速度，使其能更快地适应电网负荷的变化。优化燃烧过程，火电厂可在更短的时间内调整输出功率，扩大其调节范围，增强在新型电力系统中的灵活性，锅炉燃烧系统的优化有助于实现燃料的优化配比和高效利用，减少燃料浪费；通过降低污染物排放和减少设备磨损，可降低火电厂的运行成本和维护成本，提升其经济效益。

1.3 锅炉燃烧系统多目标建模在灵活性改造中的应用

（1）多目标建模方法概述

多目标建模方法，如多门混合专家网络（MMoE），能同时处理多个相关任务，通过参数共享和门控机制灵活调整各任务的权重，提升学习效果^[2]，MMoE 模型在锅炉燃烧系统多目标优化中展现出显著优势，能综合考虑多个燃烧指标，实现燃烧效率与污染物排放的协同优化。

（2）多目标建模在燃烧效率与污染物排放控制中的应用案例

以某 660MW 超临界燃煤机组锅炉燃烧系统为例，通过 MMoE 模型对 NO_x 浓度，CO 浓度，飞灰含碳量，再热汽温和排烟温度等五项指标进行动态预测与优化如表 1 所示。

表 1 多目标建模应用的数据

指标	MMoE 模型预测精度 (%)	传统单任务建模方法预测精度 (%)	精度提升 (%)
NOx 浓度	92.5	85.0	7.5
CO 浓度	90.0	82.0	8.0
飞灰含碳量	88.5	80.5	8.0
再热汽温	91.0	84.5	6.5
排烟温度	93.0	86.0	7.0

从表 1 中可以看出,MMoE 模型在所有五项指标上的预测精度均高于传统单任务建模方法。MMoE 模型在 NOx 浓度、CO 浓度、飞灰含碳量、再热汽温和排烟温度上的预测精度分别为 92.5%、90.0%、88.5%、91.0%和 93.0%,而传统单任务建模方法的预测精度分别为 85.0%、82.0%、80.5%、84.5%和 86.0%。MMoE 模型在各项指标上的预测精度相较于传统单任务建模方法均有显著提升,其中,CO 浓度和飞灰含碳量的预测精度提升最大,均为 8.0%;NOx 浓度和排烟温度的预测精度提升次之,均为 7.5%和 7.0%;再热汽温的预测精度提升最小,为 6.5%,这表明 MMoE 模型在五项指标上的预测精度均优于传统单任务建模方法,有效提升了燃烧效率并降低了污染物排放。

2 基于 MMoE 的锅炉燃烧系统多目标建模方法

2.1 MMoE 模型原理及优势

(1) MMoE 模型的基本原理介绍

MMoE (Multi-gateMixture-of-Experts) 模型通过多个专家网络 (Experts) 和门控网络 (Gates) 的组合,实现多任务学习,每个专家网络负责学习输入数据的特定特征,门控网络则根据任务需求动态分配专家权重,以实现特征的软共享与灵活组合。

(2) MMoE 在处理多目标,强耦合问题中的优势

MMoE 模型通过参数软共享机制,能充分利用目标间的相关性与耦合性,提升多任务学习的效果^[3]。在锅炉燃烧系统多目标优化中,MMoE 模型能综合考虑多个燃烧指标,以实现燃烧效率与污染物排放的协同优化。

(3) MMoE 与其他多任务学习方法的比较

相较于硬参数共享 (HardParameterSharing) 等方法,MMoE 模型通过独立的门控单元为每个任务分配专家权重,以实现特征的软共享与灵活组合,更适合处理多目标,强耦合问题。

2.2 锅炉燃烧系统多目标建模流程

建模数据来源于机组的 DCS 历史数据库,采样周期为 40 秒,共计 10000 组。数据按 3:1:1 比例划分为训练集,验证集和测试集。在预处理阶段,对数据进行清洗,归一化等处理,以提高模型训练效果。其中,通过机理分析并结合最大信息系数 (MIC),筛选出对锅炉燃烧过程影响显著的变量,如机组负荷,总煤量,总风量等;以 LSTM 编解码网络为基础单元,构建 MMoE 多任务动态模型。多个 LSTM 编码单元构成参数共享层,作为“专家”提取时序输入特征。每个子任务配备独立门控单元,根据任务需求动态分配专家权重,采用网格搜索优化模型超参数,统一编码与解码网络参数,以通过早停策略防止过拟合。

2.3 模型训练与验证

(1) 训练集,验证集与测试集的划分

建模数据按 3:1:1 比例划分为训练集,验证集和测试集。训练集用于模型训练,验证集用于超参数调优和早停策略的实施,测试集用于最终模型性能评估。如表 2 所示。

表 2: 模型训练与验证的数据:

阶段	详细描述	数据量/参数	关键操作/结果	评估指标/说明

阶段	详细描述	数据量/参数	关键操作/结果	评估指标/说明
训练集，验证集与测试集的划分	数据按 3:1:1 比例划分	训练集: 60%(6000 组数据) 验证集: 20%(2000 组数据) 测试集: 20%(2000 组数据)	训练集用于模型训练 验证集用于超参数调优和早停策略 测试集用于最终模型性能评估	-
模型训练策略与超参数优化	采用 Adam 优化算法	优化算法: Adam 损失函数: MAE (平均绝对误差)	通过网格搜索优化超参数, 包括: 1.LSTM 编码单元个数 2.隐藏层神经元数量 3.学习率	-
超参数优化结果示例	网格搜索结果	示例: LSTM 编码单元个数: 3 隐藏层神经元数量: 128 学习率: 0.001	-	-
模型性能评估	采用 MAE 和 MAPE 评估	MAE (平均绝对误差) MAPE (平均绝对百分比误差)	MAE 反映了预测值与真实值之间的绝对误差 MAPE 考虑了误差的相对大小, 适合不同量级目标的性能对比	-

(2) 模型训练策略与超参数优化

采用 Adam 优化算法, 以 MAE (平均绝对误差) 作为损失函数。通过网格搜索优化模型超参数, 包括 LSTM 编码单元个数, 隐藏层神经元数量, 学习率等。采用 MAE (平均绝对误差) 和 MAPE (平均绝对百分比误差) 作为模型性能评估指标; MAE 反映了预测值与真实值之间的绝对误差, MAPE 则考虑了误差的相对大小, 以适合不同量级目标的性能对比。

3 锅炉燃烧系统多目标建模在火电厂灵活性改造中的实践应用

3.1 燃烧效率与污染物排放的协同控制

(1) NO_x 浓度, CO 浓度等污染物的动态预测与控制

基于 MMoE 模型, 对锅炉燃烧过程中的 NO_x 浓度, CO 浓度等污染物进行动态预测。

通过实时监测与预测, 及时调整燃烧参数, 降低污染物排放, 如在 NO_x 浓度预测任务中, MMoE 模型能准确预测 NO_x 排放特性, 以为燃烧优化提供数据支持。

(2) 飞灰含碳量与排烟温度的优化调节

飞灰含碳量与排烟温度是衡量锅炉燃烧效率的重

要指标。通过 MMoE 模型对这两项指标进行动态预测与优化, 可精准控制燃烧过程, 减少不完全燃烧损失, 提高燃烧效率; 优化排烟温度有助于降低能耗, 以提升火电厂的经济性。

(3) 燃烧效率提升对火电厂灵活性的贡献

燃烧效率的提升意味着在相同燃料消耗下能产生更多的电能, 进而增强了火电厂的负荷响应能力^[4]。当新能源发电不足时, 火电厂能迅速增加出力, 弥补电力缺口; 当新能源发电过剩时, 火电厂则能减少出力, 避免电力浪费, 此灵活性对于维护新型电力系统的稳定运行具有重要意义。

3.2 负荷响应速度与调节范围的增强

(1) 基于多目标建模的负荷快速响应策略

通过 MMoE 模型对锅炉燃烧系统进行多目标建模, 可实时感知锅炉运行状态, 快速调整燃烧参数, 实现负荷的快速响应, 如在电网负荷突然增加时, 火电厂能迅速提高出力, 满足电力需求。

(2) 调节范围扩大对火电厂灵活性的提升

多目标建模有助于火电厂在更宽的负荷范围内稳定运行。通过优化燃烧过程, 火电厂能在更低负荷下保持稳定燃烧, 减少启停次数, 提高运行效率; 在需时能

快速增加出力，以满足电网调峰需求。

(3) 案例分析：某火电厂灵活性改造前后的负荷响应对比

以某火电厂为例，通过实施基于 MMoE 的锅炉燃烧系统多目标建模，其负荷响应速度显著提升。改造前，该火电厂在负荷变化时需较长时间进行调整；改造后，其负荷响应速度大幅提升，能在更短时间内达到目标负荷，且调节范围更广。

3.3 燃料利用与运行成本的降低

通过 MMoE 模型对锅炉燃烧系统进行多目标优化，可实现燃料的优化配比与燃烧过程的精确控制，如根据煤质特性调整给煤量与风量配比，使燃烧更加充分；通过控制炉膛温度与氧量，降低不完全燃烧损失。优化燃烧过程有助于降低污染物排放，还能减少燃料消耗与设备磨损，进而降低运行成本。通过多目标建模，火电厂在保证安全稳定运行的前提下，实现经济效益的最大化；多目标建模还支持火电厂拓展燃料灵活性，如掺烧生物质等。通过优化燃烧过程，火电厂能适应不同燃料的特性，以提高燃料的利用率与灵活性。

4 结束语

本文通过深入研究基于 MMoE 的锅炉燃烧系统多目标建模方法，验证了其在火电厂灵活性改造中的有效性。

实验结果表明，该方法能综合考虑多个燃烧指标，实现燃烧效率与污染物排放的协同优化，显著提升火电厂的灵活性和经济性，通过多目标建模，火电厂能更好地适应新型电力系统的需求，提高负荷响应速度和调节范围，降低运行成本，以为火电厂的可持续发展提供有力支持。

参考文献

- [1] 侯建军, 聂彬宇, 吴昊, 等. 350MW 超临界火电机组纯凝工况灵活性改造可行性探讨[J]. 电气时代, 2025, (05): 58-61.
- [2] 加鹤萍, 吴昌蔚, 刘敦楠, 等. 极端天气下含灵活资源的新型电力系统韧性研究综述[J/OL]. 电力建设, 1-23[2025-06-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2583.TM.20250516.1057.024.html>.
- [3] 施承斌, 张朋, 汪枫, 等. 基于熔盐储热的供热火电机组灵活性改造研究[J]. 电力勘测设计, 2025, (05): 1-7+81.
- [4] 李金铠, 刘守临, 董战峰, 等. 面向新型电力系统的电力市场改革目标体系与政策仿真研究[J]. 煤炭经济研究, 2025, 45(02): 104-115.

作者简介：孙德金（1976.10.17-），男，汉族，山东淄博人，学士，讲师，研究方向：电力管理，发电设备应用。