

燃煤机组中的智能化调度系统研究

薄庆瑶, 刘德明, 杨占海

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ERA.2026070019

摘 要 : 本文聚焦燃煤机组中的智能化调度系统研究, 构建理论基础与系统架构, 明确系统采用“感知层-数据层-模型层-应用层”四层架构, 实现数据实时采集、实际上, 在模型运算当中开展调度工作得以实现并落地, 这样一来, 这一全链路就已经贯通了; 经过对输入数据开展预处理以及特征工程优化工作, 机组负荷以及边界条件的预测模型、性能和设备状态的预测模型都已经得以建立, 全周期模型的评价以及优化机制需要得以构建; 面向“经济性-环保性-安全性”这三大目标, 开展了一种智能化调度优化模型的建构工作。选用了 NSGA-II 以及 MOPSO 等算法并且进行了改进。设计了“滚动优化结合反馈校正”的闭环机制, 来适配动态变化的工作状况。调度机制开展运作的基础, 从过去依靠操作者的经验, 转变为借助数据以及算法模型共同引领。燃煤机组在调度活动当中的精度得到了提高, 时间要求可以更好地满足, 针对多个目标开展协同优化的成效也有了实质性的提升, 效率高且能够稳定运行的燃煤机组, 能够为新型电力系统来提供技术方面的支撑。

关 键 词 : 双碳目标; 新型电力系统; 燃煤机组; 智能化调度系统

Research on Intelligent Dispatching System in Coal-Fired Units

Bo Qingyao, Liu Deming, Yang Zhanhai

State Power Investment Corporation Limited Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : This paper focuses on the research of intelligent dispatching systems in coal-fired units, establishing a theoretical foundation and system architecture. It specifies that the system adopts a four-tier architecture consisting of the "perception layer-data layer-model layer-application layer," enabling real-time data collection and the implementation of dispatching tasks during model computations, thereby achieving a fully integrated chain. By conducting preprocessing and feature engineering optimization on input data, predictive models for unit load and boundary conditions, as well as for performance and equipment status, have been established. An evaluation and optimization mechanism for full-cycle models needs to be constructed. To address the three major objectives of "economic efficiency-environmental protection-safety," an intelligent dispatching optimization model has been developed. Algorithms such as NSGA-II and MOPSO have been selected and improved. A closed-loop mechanism combining "rolling optimization with feedback correction" has been designed to adapt to dynamically changing operating conditions. The basis for the operation of the dispatching mechanism has shifted from relying on the operator's experience in the past to being jointly guided by data and algorithmic models. The accuracy of coal-fired units during dispatching activities has been improved, time requirements can be better met, and the effectiveness of collaborative optimization across multiple objectives has seen substantial enhancement. Efficient and stably operating coal-fired units can provide technical support for new power systems.

Keywords : dual carbon goals; new power system; coal-fired units; intelligent dispatching system

引言

风电以及光伏的装机规模持续开展扩容工作, 电网承受间歇性波动负荷的压力也在日益加剧。煤炭发电单元由于它具备强大的调控能力, 成为了维系供需平衡的关键支撑力量。机组借助实时响应来调节出力, 保证系统在新能源渗透率提高的背景之下, 依旧能够保持稳定运行, 作为关键的角色, 开展调峰、调频以及应急备用这些工作变得愈发重要, 调度响应所需要的速度和精度, 以及对多种目标进行协调的能力, 都在提高。数据驱动以及智能算法同燃煤机组运行紧密联系在一起, 这样便催生了智能调度体系, 也就是应对传统调度挑战的关键途径, 那么, 燃煤机组调度系统的智能化成了关注的中心。本文对它的理论基础进行了梳理, 开展了对四层总体架构的剖析工作, 明确了数据流转以及决策链路; 关键参数以及状态预测模型基于数据驱动来开展构建, 其目的在于为调度作业提供精准的基础数据支持; 对经济性、环保性以及安全性这三要素开展了多目标优化的设计工作, 面向这个目标来实现了智能算法的构建。这样就形成了滚动优化以及反馈校正的闭环机制; 通过系统层面的整合, 为新型电力系统下燃煤机组的高效协同运行提供技术支撑, 助力能源结构转型与“双碳”目标落地。

一、燃煤机组智能化调度的理论基础与系统架构

（一）燃煤机组运行特性分析

在“碳达峰、碳中和”目标的大背景下，我国明确提出构建以新能源为主体的新型电力系统结构，快速推进能源行业结构转型优化。随着新能源装机占比逐步提高，新能源并网发电对燃煤机组调峰调频能力提出更高要求^[1]。燃煤机组的运行特性因其非线性、强耦合与多干扰的复杂性，成为智能化调度设计的核心依据。机组变负荷运行会引发燃烧效率等关键指标的非线性波动，同时上百个相互耦合的参数使得任何单一调整都可能引发连锁反应，加之煤质波动、指令突变等不确定性因素，导致传统固定调度方案难以精准适配，易出现响应滞后或优化失效。

（二）智能化调度的核心理论

智能化调度依托三大核心理论构建完整技术体系，实现从“经验驱动”到“数据与模型双驱动”的转型^[2]。其利用数据驱动理论挖掘海量运行数据，构建精准预测模型；借助多目标优化理论协同经济、环保、安全三重目标，实现全局最优；并依托实时决策与控制理论进行滚动优化与动态修正，确保调度指令的时效性与准确性，形成闭环决策机制。

（三）智能化调度系统总体架构设计

架构设计基于层阶结构来开展，感知信息、汇聚数据、构建模型以及支撑应用这四个部分会依次进行衔接。每一层级拥有专门的能力，并且保持联动，从而确保调度信息能够顺畅地流动，来实现决策执行。凭借温压流量传感设备以及监控设施，配合 SCADA 网络，操作员会持续开展收集机组运行状态信号的工作，并且捕获环境参数，这样来实现信息获取功能，实时原始数据支撑是借助 5G 工业以太网来开展数据传输得以实现的，数据采集频率不会低于每秒一次。数据捕捉层的信息流到达数字基座之后，系统会先开展预处理工作，把数值补全、离群值清理以及统一格式转换这些工作完成，然后在特征构建阶段会衍生出像趋势斜率这类的刻画指标煤质热值偏差等关键特征，最后将处理后的特征数据分类存储至 InfluxDB 等实时数据库与 MySQL 等历史数据库，实现数据的有序管理与高效调用。特征数据经过处理之后，会被模型层调用，来预测负荷以及设备状态等基础信息；多目标优化模型会生成最优调度方案，并且依据输入的基础预测结果，对给煤量以及风量进行调整，模型精度在经过定期的评定之后，会自动去驱动更新流程的开展，这样它的适配性就得以维持。日常调度模块以及非常规调度模块，和优化建议生成模块，共同把调度方案推送给运维人员，在 Web 或者移动终端界面上对实时工况进行可视化呈现优化结论以及预警异状会支持人员开展介入调配工作，确认之后把调度指令派发给机组控制体系，来实现调度全流程。

二、基于数据驱动的机组关键参数与状态预测模型

（一）数据预处理与特征工程

数据预处理以及特征工程是数据驱动预测模型当中的核心基

础，它的质量会直接决定模型精度以及泛化能力，要围绕燃煤机组数据的特殊性来开展全流程的处理工作 [6]，鉴于数据来源有复杂性，把机组 SCADA 系统的实时数据、历史运维数据以及环境数据开展整合工作，来实现多维度数据集的形成。那么对于原始数据当中的异常值，可以借助 3σ 原则、孤立森林算法等方法来开展识别修正工作，以免对模型训练造成干扰；鉴于通信延迟或者传感器离线所产生的缺失值，需要把数据类型当作依据来选用适配方案，对于时序类参数，借助线性插值、样条插值来进行补充，对于静态类参数，使用同批次均值或者中位数来进行填充，确保数据连续性。数据标准化这个环节需要开展消除量纲差异的工作，运用 Z-score 标准化或者 Min-Max 归一化来把参数映射到统一区间，这样可以防止由于参数量级差异而导致模型权重出现偏移。特征工程环节需要结合燃煤机组运行机理以及数据挖掘技术，来构建具有物理意义以及预测价值的特征集 [7]，把统计、时域特征从时序数据当中提取出来，来捕捉参数动态变化的规律；鉴于领域知识来开展衍生特征的构建工作，进而强化参数的物理关联；借助 Pearson 相关性分析以及互信息熵筛选来挑选和预测目标有着强相关的特征，把冗余特征剔除掉，然后运用递归特征消除也就是 RFE、随机森林特征重要性排序来进一步开展特征维度的优化工作，形成了精简且高效的输入特征矩阵，来为后续模型训练奠定基础。

（二）机组负荷与边界条件预测

机组负荷以及边界条件的预测是智能化调度的前提，需要结合调度时间尺度以及参数影响机制，来构建多场景适配的预测模型 [8]，负荷预测需要把短期和超短期区分开来。短期是针对日前、日内计划的，会融合历史负荷、用电需求以及气象数据，借助 LSTM、GRU 等时序模型来捕捉周期与趋势；超短期是面向实时调整的，运用 Transformer 或者注意力机制模型，迅速去处理负荷突变的情况，保证误差能在 $\pm 2\%$ 以内。同时，边界条件预测方面要把焦点放在关键外部变量上，针对煤质，借助梯度提升树模型去处理它的非线性变化预测工作；针对这个环境，把 ARIMA 以及机器学习混合模型结合起来，来开展对机组影响的修正工作；那么针对电网约束方面，借助时序分类模型来开展特征的识别工作，并且将其转化成权重因子，从而保证预测结果能够契合实际调度需求。

（三）机组性能与设备状态预测

机组性能以及设备状态的预测是保障调度安全性以及经济性的核心，需要分别针对运行效益指标以及设备健康状态来开展构建专项预测模型的工作 [9]，性能预测主要聚焦于热效率、厂用电率以及污染物排放等关键指标，借助 DNN 或者 ELM 模型，依据负荷、煤质等运行参数来开展经济性指标的预测工作；借助 CNN - LSTM 混合模型，会同燃烧参数来开展排放的精准预测工作，从而规避环保风险。设备状态预测方面构建了“健康评估 - 故障预警”双维度的模型，鉴于振动、温度等数据，运用自编码器来开展无监督异常检测工作，能够马上发现设备的细微变化；另一方面，把生命周期数据进行融合以后，借助 Bi-LSTM 或者 TCN 来开展关键部件剩余寿命预测工作，并且对故障风险进行评估。

将设备状态和性能预测结果进行联动，要是设备出现异常，就马上自动去修正性能预测值，从而保证调度决策能够同时兼顾效益以及安全。

（四）预测模型性能评估与优化

为了保证预测模型在动态工况当中可以持续有效，就需要把全周期验证以及优化机制建立起来，评估环节会针对不同任务来开展差异化指标的設置工作，对于连续值预测方面，会借助 MAE、RMSE、MAPE 也就是小于 5% 来对精度进行评估；针对分类预测方面，会重点开展故障召回率（也就是 $\geq 95\%$ ）的考核工作，从而避免出现漏报情况；并且引入 DTW 指标来开展时序趋势一致性的评估工作。优化策略把离线阶段和在线阶段分离开来，离线的时候借助贝叶斯优化以及模型融合来提高基础性能；在线阶段运用增量学习来应对工况漂移，设置好性能监测阈值，要是模型退化了，那就马上自动触发重构。此外，需要借助模型轻量化设计，像剪枝、量化等，来提升响应速度，以满足秒级调度需求。

三、面向多目标的智能化调度优化模型与算法

（一）多目标优化数学模型构建

面向多目标的智能化调度优化模型，需以燃煤机组“经济性 - 环保性 - 安全性”协同最优为核心，构建兼顾物理意义与工程可操作性的数学模型^[10]。其目标函数需量化三大维度，经济性聚焦燃煤、厂用电及设备维护等总运行成本的最小化；环保性根据考核标准动态设置权重，以最小化 NO_x 、 SO_2 等污染物的加权总排放量；安全性则基于设备状态预测，通过加权累加关键设备的风险系数来最小化总运行风险。同时模型约束条件需覆盖机组物理边界、电网调度要求及设备安全禁区，确保调度方案在追求效益的同时不违背运行规律与安全底线。通过耦合目标函数与约束条件，形成完整的多目标优化模型，为后续算法求解提供理论框架。

（二）智能优化算法研究与应用

针对多目标优化模型的复杂特性，需通过算法选型、改进与工程化应用实现高效求解。根据调度场景选型，NSGA-II 适合中长期调度，能生成分布均匀的 Pareto 解集；MOPSO 收敛快，适用于超短期实时调度；MOEA/D 处理高维约束精度高，适合复杂工况。结合机组特性改进算法，为 NSGA-II 引入动态惩罚机制处理约束；为 MOPSO 优化初始化与惯性权重以加速收敛；为 MOEA/D 设计自适应权重向量以匹配动态需求。构建评估体系，以收敛性、多样性、求解效率为核心指标，建立“场景 - 算法”映射机制，实现不同需求下的算法自动选型，确保调度方案兼具实用性与高效性。

（三）滚动优化与反馈校正机制

为应对燃煤机组运行工况的动态变化，需构建“滚动优化 + 反馈校正”的闭环调度机制，将长周期调度拆解为短周期动态调整，确保优化方案的实时性与准确性。滚动优化环节以“预测 - 优化 - 执行”为核心逻辑，确定滚动周期与优化窗口，结合前文超短期负荷预测精度（5-10 分钟预测误差不超过 2%），将滚动周期设为 5 分钟，优化窗口设为 30 分钟，每个周期初利用最新的实

时数据更新优化模型的边界条件，再通过适配的智能算法求解未来 30 分钟的调度方案，仅执行当前 5 分钟的指令，剩余 25 分钟方案作为待优化预案，避免长周期预测误差导致的调度失配。反馈校正机制应当把焦点放在“偏差识别 - 原因分析 - 策略调整”这三个阶段来开展设计。在偏差识别阶段，会实时地对调度指令执行结果以及优化目标值进行对比，并且依据所设定的偏差阈值去判断是否要进行校正；缘由分析阶段，结合前文数据驱动预测模型的结果去区分偏差的来源，要是偏差是由预测误差所导致的，那就调整预测模型输入特征的权重；如果是由于设备异常所导致，那就调用设备状态预测模型来更新风险系数；要是因为外部条件出现变化而导致，那就对目标函数权重进行修正；在策略调整这个阶段，会设计出参数补偿以及权重修正这两类校正策略来开展相关工作。为了保障闭环机制能够稳定运行，就得建立起调度效果评估以及机制迭代的流程。每一个调度日结束之后，要去统计滚动优化的偏差率、校正成功率以及目标函数达成率，要是某指标连续 3 天不契合要求，那就对分析机制参数的适配性开展分析工作，并且进行动态调整。借助这个闭环机制，来实现调度优化从“静态规划”到“动态适应”的转变，保证在工况变化的时候，“经济性 - 环保性 - 安全性”协同达到最优。

四、结束语

本文围绕新型电力系统与“双碳”目标下燃煤机组的调度需求，系统开展了智能化调度系统的理论与技术研究，旨在解决传统调度依赖经验、适配性差、多目标协同不足的核心痛点。未来研究可拓展数据来源，结合数字孪生技术构建多类型机组的虚拟仿真平台，提升模型泛化能力；融合边缘计算技术，将部分预测与优化任务下沉至现场端，进一步缩短调度指令响应时延；探索多机组协同调度模式，结合区域电网整体需求实现集群化智能调度，最大化提升燃煤机组集群对新型电力系统的支撑作用。

参考文献

- [1] 秦铭阳. 基于 ICS 平台的燃煤机组 APS 智能调度系统 [J]. 电工技术, 2023(19): 63-67. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.19.018.
- [2] 肖宇. 厂级燃煤发电机组节能调度系统研究 [D]. 华北电力大学, 华北电力大学 (北京), 2017. DOI: 10.7666/d.Y3263364.
- [3] 丁伟, 林羽廷, 李世明, 等. 考虑燃煤机组健康状态的断面优化调度策略 [J]. 广西电力, 2019, 42(4): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8380.2019.04.001.
- [4] 霍卫卫. 火电机组节能发电调度智能优化算法研究 [D]. 湖南: 湖南大学, 2016.
- [5] 郭凯旋, 黄平平, 曲金星, 等. 集团级火电智能燃煤综合管理平台的应用体系构建 [J]. 煤质技术, 2023, 38(6): 57-65. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7677.2023.06.008.
- [6] 苏帅帅, 熊春辉, 廖煜昊, 等. 基于模糊控制的百万千瓦燃煤火力发电机组调频研究 [J]. 科技资讯, 2024, 22(21): 185-187. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2406-5042-3415.
- [7] 蔡杰进. 大型火电机组优化运行与经济调度研究 [D]. 广东: 华南理工大学, 2007. DOI: 10.7666/d.Y1274924.
- [8] 李岸. 火力发电机组负荷经济分配的智能优化算法研究 [D]. 湖南: 长沙理工大学, 2016.
- [9] 江苏舜高智能科技有限公司. 一种基于人工智能的大型燃煤电站 CO₂ 捕集系统优化调度方法: CN202110646133.6[P]. 2023-08-04.
- [10] 张耘. 电厂 DCS 智能控制系统优化改造 [J]. 光源与照明, 2023(3): 239-241.