

基于人工智能的火电机组热控系统优化与故障诊断研究

冯栋, 张向伟, 何龙, 巩家庆, 姬广丰
华能兰州热电有限责任公司, 甘肃 兰州 730104
DOI:10.61369/EPTSM.2025040010

摘要 : 本文针对火电机组热控系统运行复杂和易受干扰及故障频发等问题, 研究人工智能技术在此领域的应用。介绍热控系统组成、功能及运行挑战并阐述神经网络、机器学习等人工智能算法, 通过数据处理来实现热控系统参数与控制策略优化, 进而为火电机组智能化运行提供支撑。

关键词 : 人工智能; 火电机组; 热控系统; 系统优化; 故障诊断

Research on Optimization and Fault Diagnosis of Thermal Control System for Thermal Power Units Based on Artificial Intelligence

Feng Dong, Zhang Xiangwei, He Long, Gong Jiaqing, Ji Gangfeng
Huaneng Lanzhou Thermal power Co., LTD., Lanzhou, Gansu 730104

Abstract : This paper addresses the complex operation, susceptibility to interference, and frequent failures of thermal control systems in thermal power units, exploring the application of artificial intelligence (AI) technology in this field. It introduces the components, functions, and operational challenges of thermal control systems, and explains AI algorithms such as neural networks and machine learning. By processing data, these algorithms optimize the parameters and control strategies of thermal control systems, thereby supporting the intelligent operation of thermal power units.

Keywords : artificial intelligence; thermal power unit; thermal control system; system optimization; fault diagnosis

引言

随着能源需求增长与环保要求提升, 火电机组需更高效和稳定运行。然而其热控系统结构复杂且运行干扰因素多, 设备老化易引发故障, 传统控制与诊断方法难以满足需求。人工智能技术凭借强大的数据处理与学习能力为热控系统优化与故障诊断带来新契机, 成为当前火电机组研究的关键方向。

一、火电机组热控系统概述

(一) 热控系统的组成与功能

火电机组热控系统是一个高度集成且复杂的自动化体系, 其核心目标是实现对机组运行过程中各类热工参数的精准监测与有效控制, 保障机组安全稳定又高效运行。从系统架构来看主要由硬件设备与软件控制系统两大部分组成。

硬件设备层面, 热控系统包含众多关键组件, 传感器作为系统的“感知器官”, 承担着采集温度、压力以及流量和液位等各类热工参数的重要任务。例如在锅炉系统中温度传感器实时监测

炉膛温度, 为燃烧控制提供关键数据; 压力传感器则时刻检测蒸汽压力来保障系统运行安全。执行器是热控系统的“手脚”, 依据控制指令对设备进行操作, 如电动调节阀通过改变开度调节介质流量, 气动执行机构控制风门挡板, 调整风量以优化燃烧过程。而控制器则是系统的“大脑”, 接收传感器采集的数据并经过运算处理后向执行器发出控制指令, 常见的控制器有可编程逻辑控制器 (PLC) 和分布式控制系统 (DCS) 的控制器模块^[1]。

软件控制系统方面, 分布式控制系统 (DCS) 是火电机组热控系统的核心软件架构。它采用分散控制和集中管理的模式, 将整个系统划分为多个现场控制单元 (FCU) 和操作站单元。现场控制单元

部署在设备现场，负责对本地设备进行实时监测与控制，实现数据采集、信号处理和控制算法的执行。例如在汽轮机的现场控制单元中会对汽轮机的转速、振动等参数进行实时采集和分析，并根据预设控制策略调节进汽阀门以确保汽轮机稳定运行。操作站单元通常设置在电厂的主控制室，为操作人员提供人机交互界面，操作人员可通过操作站实时监控机组运行状态来进行参数调整和设备启停等操作，同时操作站还能对各现场控制单元上传的数据进行集中处理和存储，生成运行报表和趋势曲线从而便于运行人员分析机组运行状况^[9]。

从功能角度分析，热控系统具备多种关键功能，自动检测功能能够持续采集和分析机组运行的各类参数并通过模拟量测量仪表、巡回检测数字式显示仪表等设备来实现对温度、压力、流量等参数的精确测量和实时显示，一旦参数超出正常范围，系统立即发出报警信号，提醒操作人员采取措施。自动调节功能是热控系统的核心功能之一，它基于反馈控制原理，根据设定值与实际测量值的偏差来自动调整控制量，使系统参数稳定在目标范围内。以锅炉汽温调节为例，当检测到蒸汽温度偏离设定值时自动调节系统会迅速调整减温水流量或燃烧工况，使汽温恢复到正常水平。自动保护功能在机组出现异常工况或故障时发挥关键作用，通过实时监测机组状态和参数，一旦检测到危及设备安全的情况，如汽轮机超速、锅炉超压等，系统立即触发保护动作，自动停机或采取相应的保护措施来防止事故扩大，进而保障设备和人员安全^[9]。此外热控系统还具备远方控制和程序控制功能，远方控制允许操作人员在控制室远程操作现场设备，提高操作的便捷性和安全性；程序控制则按照预先设定的程序和逻辑，自动完成设备的启动和停止以及一系列复杂的操作流程，减少人工干预以提高生产效率和操作准确性（如下表）。

表1 火电机组热控系统组成及功能

组成部分	细分内容	主要功能
硬件设备	传感器	采集温度、压力、流量、液位等热工参数（如锅炉炉膛温度、蒸汽压力）
	执行器	依据控制指令操作设备（如电动调节阀调节介质流量、气动执行机构调整风量）
	控制器	接收传感器数据，运算后向执行器发指令（如PLC、DCS 控制器模块）
软件控制系统	分布式控制系统（DCS）	分散控制与集中管理，含现场控制单元（实时监测本地设备）和操作站单元（人机交互、集中管理）

（二）热控系统运行特点与挑战

火电机组热控系统运行有复杂性和强耦合性的特点，其系统里有很多设备和控制回路，各部分之间相互关联且相互影响。一个参数变化可能会引起其他多个参数波动，牵一发而动全身，比如锅炉燃烧时燃料量变化不仅会影响炉膛温度，还会影响蒸汽流量、压力和汽包水位等参数。同时热控系统运行容易受到多种因素干扰，外部环境的温度和湿度变化，内部设备的老化以及磨损等都可能让系统运行不稳定。而且火电机组在不同负荷下热控系统的动态特性会变，这对控制系统的适应能力要求很高^[10]。

另外火电机组运行时间越长，热控系统的设备越容易老化，

故障发生的概率也会增加。常见故障有传感器故障、执行器故障、控制器故障等，而这些故障如果不能及时发现和处理就可能会导致机组运行异常，甚至引发安全事故。据统计，热工专业造成的机组非停占比很大，主要原因是设备问题和人为因素。设备原因包括设备本身有设计缺陷、老化、故障等，人为因素会引起设备误动或拒动。所以如何提高热控系统的可靠性并且能够及时准确地诊断和处理故障是当前火电机组运行面临的重要问题^[10]。

二、人工智能技术在火电机组热控系统中的应用基础

（一）常用人工智能算法介绍

1. 神经网络算法

神经网络算法模拟人类大脑神经元的结构和功能，它由很多神经元节点相互连接而成，通过学习大量数据来建立输入和输出之间的复杂关系。在火电机组热控系统中神经网络可以用来建立热工过程模型、预测参数变化趋势和诊断故障等，比如训练神经网络模型后可以根据当前运行参数准确预测未来一段时间的蒸汽温度和压力等参数，为提前调整控制策略提供依据。常见的神经网络模型有多层感知器（MLP）、径向基函数神经网络（RBF）、递归神经网络（RNN）和它的变体长短期记忆网络（LSTM）等。其中 MLP 适合处理简单的非线性映射问题；RBF 有局部逼近能力且学习速度快；RNN 和 LSTM 更擅长处理时间序列数据，能捕捉热工过程中的动态变化信息^[10]。

2. 机器学习算法

机器学习算法能让计算机通过数据学习模式并进行预测，包括监督学习、无监督学习和半监督学习等类型。在火电机组热控系统中监督学习算法可以用于故障分类和诊断，通过收集大量已知故障类型的样本数据来训练分类模型，如支持向量机（SVM）、决策树、随机森林等，让它们能根据新的故障特征准确判断故障类型。无监督学习算法可以发现数据中的潜在模式和异常点，比如用聚类算法对热控系统的运行数据进行分析并区分正常和异常数据，有助于及时发现潜在故障。半监督学习算法结合少量标注数据和大量未标注数据进行学习，在标注数据难获取时很有用^[11]。

（二）火电机组热控系统数据特征与处理

火电机组热控系统运行时会产生大量数据，这些数据有多维度、非线性、时变性等特征。其中多维度是指数据包括温度、压力、流量、液位等多种热工参数；非线性是因为热工过程复杂，参数之间不是简单的线性关系；时变性是因为机组运行工况会随时间变化，数据特征也会跟着变^[10]。

为了有效利用这些数据，需要进行一系列处理。首先是数据采集，通过各种传感器和数据采集设备来实时获取热控系统的运行数据；然后进行数据清洗，去掉数据中的噪声、异常值和缺失值。对于噪声数据可以用滤波算法处理，对于异常值可以通过设阈值、用统计方法或机器学习算法识别并剔除，而对于缺失值可以用插值法、均值填充法、基于模型的预测填充法等填补^[10]。

接着进行数据特征提取和选择，从原始数据中找出能反映系统运行状态的关键特征，减少数据维度并提高算法的运行效率和

准确性。特征提取方法有主成分分析（PCA）、线性判别分析（LDA）、小波变换等；特征选择方法有基于统计检验的方法、基于信息增益的方法、基于机器学习模型的方法等^[10]。

最后还要对处理后的数据进行归一化或标准化处理，把数据映射到特定区间，如 [0, 1] 或 [-1, 1]，消除不同特征之间量纲和数量级的影响，让算法能更好地收敛和学习。

三、基于人工智能的火电机组热控系统优化

（一）热控系统参数优化

1. 建立优化模型

以火电机组的运行效率、经济性和安全性等为优化目标，综合考虑热控系统中各个设备和参数之间的关系来建立数学优化模型。比如以机组发电效率最大为目标，把锅炉燃烧效率、汽轮机热效率、热控系统控制精度等作为约束条件。其中模型中的决策变量包括燃料量、风量、给水量、蒸汽压力等热控系统的关键参数，通过优化调整这些决策变量去让目标函数达到最优。

2. 优化算法应用

把建立的优化模型和人工智能算法结合起来，求出最优的参数组合，可以用遗传算法、粒子群优化算法、模拟退火算法等智能优化算法。以遗传算法为例，先对决策变量进行编码并生成初始种群；然后通过选择、交叉和变异等操作来不断更新种群，让种群中的个体逐渐接近最优解。每一代迭代时根据优化模型计算每个个体的适应度值，判断其好坏，经过多代进化，最后得到满足优化目标的最优参数组合。粒子群优化算法模拟鸟群觅食，每个粒子代表一个可能的解，粒子根据自身历史最优位置和群体全局最优位置调整飞行速度和位置来找到最优解。模拟退火算法从一个初始解开始，通过随机扰动产生新解，按一定概率接受较差的解，避免陷入局部

最优解，随着温度降低，最终找到全局最优解。

（二）热控系统控制策略优化

1. 基于强化学习的控制策略设计

针对火电机组热控系统在不同工况下的复杂动态特性，设计基于强化学习的控制策略。首先要确定强化学习中的智能体、环境、状态、动作和奖励，智能体是热控系统的控制器，而环境是整个火电机组热控系统；与此同时状态可以选热控系统的关键运行参数，如蒸汽温度、压力、流量、机组负荷等；动作是控制器对执行器发出的控制指令，如调节阀门开度、调整电机转速等。奖励函数的设计很重要，它要能反映系统的运行性能，比如机组发电效率提高、能耗降低以及参数更稳定等都可以作为奖励。系统运行状态好，接近或达到优化目标时给正奖励；运行出现偏差或故障时给负奖励。

2. 仿真与实际应用验证

在仿真环境中验证基于强化学习的控制策略，用火电机组的详细仿真模型能够模拟各种工况下热控系统的运行情况，观察智能体在不同状态下的决策和系统的响应效果。和传统控制策略（如PID控制）对比，看基于强化学习的控制策略在控制精度、响应速度、抗干扰能力等方面的优势，仿真结果显示基于强化学习的控制策略能让热控系统更快响应工况变化，更准确地跟踪设定值，面对干扰时更稳定，也有效提高了系统的控制性能。

四、结束语

本文将人工智能应用于火电机组热控系统，在系统优化与故障诊断方面取得显著成果，有效提升了机组运行效率与稳定性。未来随着人工智能技术不断发展可进一步深化其在热控系统中的应用，探索多算法融合并加强与实际运行场景结合，为火电机组智能化升级提供更有有力保障。

参考文献

- [1] 贺兵. 基于人工智能的发电机组协调系统实时优化控制分析 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(11): 226-227.
- [2] 杜文. 数据驱动下的智能发电系统应用架构及关键技术 [J]. 中国高科技, 2024, (16): 114-116.
- [3] 刘晓莎, 刘林林, 寿德武. 基于智能算法的火电机组变负荷控制策略优化 [J]. 湖南邮电职业技术学院学报, 2024, 23(01): 36-40.
- [4] 王宇鹏. 浅谈人工智能应用于火电厂的发展前景 [C]// 中国电力技术市场协会. 2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集（上册）. 新疆华电高昌热电有限公司, 2023: 684-685.
- [5] 马颖骏. 火电机组热控现场故障自动检测系统设计 [J]. 自动化与仪器仪表, 2019, (10): 52-55.
- [6] 冯海波. 电厂单元机组热控系统的分散控制系统改造设计 [J]. 河南科技, 2021, 40(34): 37-39.
- [7] 姜晓强. 基于粗糙集-BP神经网络的火电机组热控电源自动配置模型 [J]. 自动化应用, 2022, (07): 35-37.
- [8] 王腾, 张丽, 迟青青. 基于模糊PID的火电厂热控系统优化控制方法 [J]. 电气技术与经济, 2024, (12): 253-255.
- [9] 李锐. 提高火电厂热控系统可靠性技术研究 [J]. 仪器仪表用户, 2023, 30(09): 99-101+40.
- [10] 徐伯梁. 火电厂热控系统的可靠性研究 [J]. 科学家, 2017, 5(11): 70-71.