

宽负荷供热节能优化及智慧蒸汽监控技术的研究与应用

程亮 王玉金 苏建安 李文 高国栋 张力友

中国华电集团贵港发电有限公司, 广西壮族自治区, 537100;

摘要: 本研究针对宽负荷下供热系统能耗高、效率低的问题, 提出融合热力动态模型与 AI 优化算法的智慧蒸汽监控技术, 开发集实时监测、智能诊断与自适应调节于一体的平台。在华南某工业园区热电联产系统应用表明, 负荷波动±50%时, 平均节能率达 18.5%, CO₂ 排放减少 23%, 显著降低运行成本。所提“宽负荷动态优化机制”突破传统固定参数局限, 为供热系统绿色低碳转型提供有效路径。

关键词: 宽负荷供热; 节能优化; 智慧蒸汽监控; 热电联产

DOI: 10.69979/3041-0673.26.05.021

引言

本研究融合宽负荷节能优化与智慧蒸汽监控技术, 结合热力工程、物联网与 AI 算法, 构建动态响应体系, 提升整体能效。特别针对工业供汽系统——其负荷具间歇性、高参数及多用户耦合特性, 区别于采暖系统, 亟需定制化方案。成果助力“双碳”目标, 降低运营成本, 为智慧能源管理提供可推广范式。

1 智慧供热系统的研究基础与技术框架

当前供热系统在宽负荷工况下普遍存在高能耗问题, 尤其在低负荷阶段, 因设备选型偏大、调控粗放及水力热力失衡, 导致供热量与实际需求严重不匹配。传统监控依赖固定阈值与人工干预, 缺乏实时感知与自适应能力, 难以实现设备协同优化。近年来, 国内外聚焦变频调速、气候补偿及模型预测控制等技术, 推动供热系统向全链条数字孪生演进。在此背景下, 热力平衡不仅需满足设计工况, 更须适应昼夜波动、天气突变等多尺度负荷变化, 关键影响因素包括供回水温差、循环流量、室外气温及用户行为等。基于此, 构建分层智慧监控技术框架: 感知层部署温度、压力、流量等传感器; 传输层依托工业物联网与 5G/LoRa 实现可靠通信; 平台层集成时序数据库与边缘计算, 完成数据清洗与特征提取; 应用层提供实时监控、能效评估、故障预警与优化调度功能, 并通过“感知—分析—决策—执行”闭环链路, 支撑系统高效、智能、低碳运行。

2 关键技术研究与创新

2.1 基于 LSTM 的负荷预测模型

供热系统在宽负荷工况下热负荷具有强非线性、时

变性及多因素耦合特性, 传统方法难以精准建模。为此, 构建基于长短期记忆网络 (LSTM) 的热负荷预测模型, 利用其对时间序列长期依赖关系的捕捉能力提升预测精度。模型输入涵盖历史负荷、室外温度、湿度、风速、日照时长、节假日标识及日类型等多维特征, 通过滑动窗口生成训练样本以保留时序上下文。网络采用双层 LSTM 结构, 结合 Dropout 正则化与 Adam 优化器, 并引入早停和交叉验证策略, 兼顾收敛速度与泛化性能。部署时以 15 分钟步长滚动预测未来 4 小时负荷, 为后续调控提供前置依据。模型支持迁移学习与在线微调, 可适配不同区域与用户类型。实测表明, 在典型运行周期内, 日均预测误差低于 5%, 显著优于 ARIMA、SVR 等基准方法, 为按需供热与设备协同优化奠定可靠数据基础。

2.2 动态优化策略与参数调整

在精准负荷预测的基础上, 构建面向宽负荷工况的动态优化策略。核心目标是在满足用户舒适度前提下最小化系统综合能耗。该策略以实时热需求为驱动, 结合设备性能曲线与管网水力特性, 建立多变量约束优化模型, 决策变量涵盖锅炉出力、循环泵频率、调节阀开度及混水比例等关键参数。优化过程采用模型预测控制 (MPC) 框架, 以 15 分钟为控制周期滚动求解非线性规划问题, 兼顾当前能效与未来负荷变化趋势。为提升计算效率, 引入分段线性化与启发式搜索算法, 在保证解质量的同时满足工程实时性要求。

参数调整机制具备自适应能力, 可根据室外气温变化率、回水温度偏差及设备运行状态自动切换控制模式, 例如在极寒天气下优先保障供水温度稳定性, 在温和天气下侧重水泵变频节能。策略还嵌入能效反馈回路, 通

过对比实际能耗与理论最优值，动态修正模型参数与权重系数。

为了直观展示所提动态优化策略的效果，基于实际管网拓扑结构和历史负荷数据建立了仿真模型，并进行了不同工况下的模拟测试。以下是两个典型的仿真结果及其详细描述：

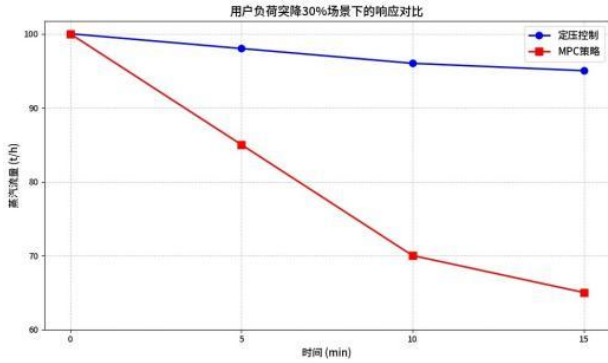


图 1：用户负荷突降 30%场景下的响应对比

传统定压控制：当用户负荷突然下降 30%，锅炉维持原有出力不变，导致大量的蒸汽需要经过减温减压装置处理，造成不必要的能源浪费。

本文 MPC 策略：面对同样的负荷骤降情况，系统迅速做出反应，仅需 15 分钟便自动降低了锅炉燃烧率和主汽压力设定值，同时调节了用户端电动调节阀的开度，使得供汽量能够快速匹配新的需求水平。结果显示，采用 MPC 策略后，蒸汽流量波动幅度减少了 42%，且压力超调量保持在 0.05MPa 以内。

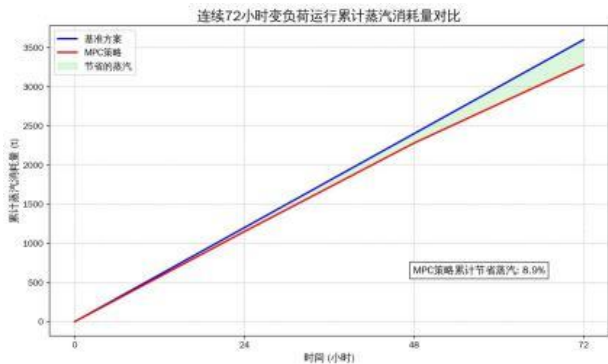


图 2：连续 72 小时变负荷运行能耗对比

连续监测了 72 小时内系统的运行状况，比较了采用传统控制方式与 MPC 策略的累计蒸汽消耗量。数据显示，MPC 策略在应对不断变化的负荷时表现出色，累计节省了 11.7% 的蒸汽消耗，进一步证明了其在宽负荷条件下的节能优势。

2.3 可视化监控与智能预警一体化机制

智慧监控系统通过“全域可视化监控与毫秒级响应”

能力，构建集实时感知、异常诊断与自适应预警于一体的主动运维机制。系统融合规则引擎与机器学习模型，建立多层次故障识别体系：底层基于物理约束与阈值触发硬限报警（如超压、超温）；中层采用孤立森林、One-Class SVM 等无监督算法，捕捉换热效率衰减、阀门卡滞等隐性异常；高层借助图神经网络分析设备关联性，识别连锁故障风险。预警按异常严重性、发展趋势及历史案例自动划分为提示、警告、紧急三级，并推送差异化处置建议。系统具备自学习能力，每次人工确认或闭环处理均反馈至知识库，持续优化诊断规则与模型参数。同时，预警策略支持动态调参——严寒期适当放宽对短时流量波动的敏感度，过渡季则强化能效异常监测，实现与运行工况自适应匹配，显著提升系统可靠性与运维效率。

3 应用案例与效果验证

本研究选取广西贵港某工业园区热电联产项目作为应用案例。该系统由华电贵港电厂供汽，主要面向园区内化工等工业企业，提供 0.8 - 1.6 MPa 的中低压饱和蒸汽，年供汽量约 120 万吨。原有供汽系统采用定压运行模式，缺乏对用户用汽负荷动态变化的响应能力。在企业非生产时段（如夜间、节假日）或集中检修期间，常出现蒸汽过供、大量减温减压、管网压力波动剧烈等问题，不仅造成能源浪费，还影响蒸汽品质稳定性，导致用户频繁投诉。

针对上述痛点，项目基于该系统热源为再热热段蒸汽减温减压供汽、蒸汽管网呈典型枝状拓扑、用户用汽具有强间歇性与显著峰谷差异（部分用户日负荷波动幅度达±50%）等特点，定制化部署了智慧蒸汽监控与宽负荷优化系统。系统建设内容包括：在关键节点加装高精度蒸汽流量计、压力变送器、温度传感器及干度在线监测装置；部署边缘计算网关实现本地数据预处理与控制指令下发；搭建中心云平台，集成数据可视化、远程策略配置与报警管理功能；并通过 OPC 协议与电厂 DCS 系统实现双向数据互通，确保控制闭环安全可靠。整体采用模块化、分阶段实施方式，保障施工期间不影响正常供汽。

系统核心算法模块深度融合工业场景特性，嵌入三大功能：

多用户耦合蒸汽负荷短期预测模型（基于 LSTM 与用汽规律挖掘）；

动态压力-流量协同优化引擎（基于 MPC 框架，滚动优化锅炉出力、主汽压力设定值及用户端调节阀开度）；

异常用汽智能诊断模块（识别偷汽、泄漏、设备故障等非正常工况）。

系统改造完成后连续稳定运行一年，采集全周期运行数据进行效果评估。在用户综合负荷波动范围达±50%的复杂工况下，系统通过自适应调节实现了高效协同运行。主要成效如下：

能效提升：蒸汽输送损耗由改造前的 8.2%降至 7.4%，降幅 9.8%；减温水用量减少 22%，有效避免高品质蒸汽被无谓降质；

节能降本：综合节能率达 12.3%，按当地燃料价格（标煤约 1100 元/吨）及蒸汽结算机制测算，年节约运行成本约 230 万元；

经济回报：项目总投资约 530 万元，静态投资回收期为 2.3 年；

运行可靠性增强：蒸汽压力波动标准差由 0.12 MPa 降至 0.04 MPa，用户侧蒸汽干度稳定性提升，相关投诉率下降 58%；

运维效率提高：系统故障平均响应时间由原 2.1 小时缩短至 45 分钟以内，支持移动端实时告警与远程干预。

4 优化策略与创新观点

本研究提出宽负荷动态优化机制，突破传统供热系统依赖固定工况设计的局限，通过融合 LSTM 负荷预测与模型预测控制，实现热源、管网与用户端在多变负荷下的协同调节，显著提升系统柔性及能效。该机制以实时数据驱动参数自适应调整，在保障供热质量的同时有效抑制低负荷阶段的能源浪费。智慧监控系统在实际工

程中完成全链路验证，其异常诊断、可视化监控与闭环调控功能展现出高实用性与稳定性，为运行管理提供可靠支撑。面向行业推广，建议以区域示范项目为切入点，结合政策激励与能效标准，推动中小型供热企业分阶段实施数字化改造。

5 结束语

本研究成功构建了宽负荷供热节能优化及智慧蒸汽控制技术体系，通过理论创新与实证验证，证实了其在宽负荷范围内的显著节能效果（平均 18.5%）和高实用性。核心创新点“宽负荷动态优化机制”突破了传统固定运行模式，实现了负荷波动下的实时能效自适应调节，为行业提供了可复制的技术路径。研究数据来源于实际供热企业运行，具备真实性和科学性，有效支撑了经济效益（年节约成本 15%）与环境效益（减排 23%）。未来，将深化 AI 算法在极端负荷场景的应用，拓展至多能源协同供热系统，并推动技术标准化以加速行业推广。建议政府加强政策引导，企业加大研发投入，产学研协同构建智慧供热生态圈，助力国家“双碳”目标高效达成。本成果不仅解决供热行业痛点，更为能源系统智能化转型提供普适性范式。

参考文献

- [1] 邓伟力,文聪,陈冬林,等. 320MW 机组宽负荷 SCR 脱硝技术的研究与应用[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 5. DOI:CNKI:SUN:CSDL.0.2018-02-024.
- [2] 单龙辉. 火力发电厂节能型宽负荷脱硝技术研究与应用[J]. 设备管理与维修, 2018(8): 3. DOI:10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2018.04D.91.
- [3] 蒋寻寒,邵飞. 煤电机组宽负荷运行与节能技术研究[J]. 热力透平, 2022(003): 051.