

智慧供热平台全流程管控：架构优化与能源效率提升

闻静¹, 陈欣欣², 张哲旸²

1. 北京北燃实业集团有限公司, 北京 100023

2. 北京市煤气热力工程设计院有限公司, 北京 100032

摘要： 本文围绕智慧供热平台全流程管控展开研究，旨在实现架构优化与能源效率提升。设计了多源异构数据融合架构和边缘计算与云端协同机制的智慧供热系统架构。提出热负荷时空预测算法和多目标优化控制策略，构建热网动态调控优化模型。建立能效基准指标和节能潜力分析方法的能源效率量化评估体系。通过水力工况智能平衡技术和热源调度优化模型，探索全流程管控技术实现路径。研究成果在多个实际场景应用中，显著提升了供热系统的调控精度、能源效率和稳定性，为智慧供热发展提供了理论与技术支持。

关键词： 智慧供热平台；全流程管控；架构优化；能源效率；数据融合

Full-Process Management and Control of Smart Heating Platform: Architecture Optimization and Energy Efficiency Improvement

Wen Jing¹, Chen Xinxin², Zhang Zheyang²

1. Beijing Beiran Industrial Group Co., Ltd. Beijing 100023

2. Beijing Gas and Thermal Engineering Design Institute Co., Ltd. Beijing 100032

Abstract: This paper focuses on the full-process management and control of the smart heating platform, aiming to achieve architecture optimization and energy efficiency improvement. A smart heating system architecture with a multi-source heterogeneous data fusion framework and an edge computing and cloud collaboration mechanism is designed. A spatio-temporal prediction algorithm for heat load and a multi-objective optimal control strategy are proposed to construct a dynamic regulation and optimization model for the heating network. An energy efficiency quantification evaluation system is established with energy efficiency benchmark indicators and energy-saving potential analysis methods. The implementation path of full-process management and control technology is explored through intelligent hydraulic balance technology and heat source scheduling optimization models. The research results have significantly improved the regulation accuracy, energy efficiency, and stability of the heating system in multiple practical scenarios, providing theoretical and technical support for the development of smart heating.

Keywords: smart heating platform; full-process management and control; architecture optimization; energy efficiency; data fusion

在全球能源转型与数字化发展的大背景下，供热行业面临着节能减排与提升服务质量的双重挑战。传统供热模式因调控手段有限、能源利用效率低，难以满足现代社会对供热的需求。智慧供热作为一种新兴模式，借助先进的信息技术与智能算法，实现供热系统的精细化管理与高效运行，成为行业发展的必然趋势。

智慧供热平台是实现这一目标的核心枢纽，其全流程管控涉及从数据采集、传输、处理到调控决策的各个环节。优化平台架构，提升能源效率，不仅能降低供热成本，减少环境污染，还能提高用户供热体验。然而，目前智慧供热领域仍存在数据融合困难、调控精度不高、能效评估体系不完善等问题。因此，深入研究智慧供热平台全流程管控，对推动供热行业的可持续发展具有重要的现实意义。

一、智慧供热系统架构设计原理

智慧供热系统的架构设计是实现全流程管控的基石。本章从数据融合与计算协同的角度，解析多层次架构的构建逻辑与智能化调控机理，为后续动态优化与能效提升奠定技术框架基础。

(一) 多源异构数据融合架构

智慧供热是在机电及控制等物理设备基础上进行智能化硬件

改造，连同供热系统的运营服务，共同构建供热信息物联网，通过智能决策系统，为运行管理人员提供决策支持或辅助，形成在保证室内舒适度的前提下，降低运行能耗的供热系统形式^[1]。智慧供热系统的多源异构数据融合架构采用四层拓扑结构体系，形成从数据采集到决策应用的完整闭环。在感知层，部署高精度温度传感器（±0.1℃）、动态压力变送器（量程0-2.5MPa）、电磁流量计（精度等级0.5级）等12类物联网设备，构建三维空间

感知网络,实现热源、管网、用户端的全域状态感知。网络层采用 OPC UA over TSN 通信协议,攻克不同品牌 PLC、DCS 系统的协议壁垒,确保数据时延控制在 50ms 以内,报文传输可靠性达 99.999%。平台层集成 InfluxDB 时序数据库与 Apache Flink 流式计算引擎,建立数据清洗规则库(包含 38 类异常数据过滤算法),实现每秒 12 万数据点的实时处理能力^[2]。应用层开发基于机器学习的负荷预测模块(采用 XGBoost 算法)、故障诊断专家系统(内置 327 个故障特征库)、能效分析平台等七大功能组件,通过 RESTful API 接口向运维系统输出调控策略,形成“数据采集-特征提取-决策输出”的智能处理链条。

(二) 边缘计算与云端协同机制

在边缘计算层,于关键换热站部署搭载 TensorRT 推理引擎的 NVIDIA Jetson Xavier NX 模组,通过轻量化卷积神经网络(CNN)模型实现阀门开度、循环泵频率的毫秒级调控,将传统 SCADA 系统 500ms 级响应时延压缩至 80ms 以内^[3]。云端数字孪生系统采用 Ansys Twin Builder 构建三维热网仿真模型,集成气象预测数据、建筑热工参数等 138 个动态变量,运用联邦学习框架实现跨区域知识共享:各边缘节点每 6 小时上传本地水力工况特征矩阵,云端聚合生成全局优化参数并反向更新边缘模型,形成“分布式学习-集中式优化”的协同进化机制。双向迭代过程中引入滑动时间窗算法(窗口宽度 24 小时),动态调整模型更新频率,在东北某供热企业实测中,该机制使全网热力失衡度下降 61%,调控策略迭代周期从 72 小时缩短至 4.8 小时。

二、热网动态调控优化模型

热网调控的精准性与协同性是能源效率提升的核心环节。本章通过时空预测算法与多目标优化模型的耦合设计,阐述如何在复杂约束条件下实现热力供需的动态平衡与系统能效的全局优化。

(一) 热负荷时空预测算法

热负荷时空预测算法采用 LSTM-GRU 混合神经网络架构,通过门控机制实现长短期时间序列特征的协同捕获。输入层构建 23 维特征向量空间,包含:气象动态参数(温度、风速、日照强度的历史序列及 NWP 数值预报数据)、建筑热工特性参数(围护结构传热系数、窗墙比、热惰性指标)、用户行为特征(分时用热强度曲线、阀门调节频次统计量)^[4]。模型采用多头注意力机制对时空特征进行权重分配,在编码器-解码器框架下实现未来 24 小时热负荷的逐时预测。数据预处理阶段引入小波降噪算法消除传感器采集噪声,通过皮尔逊相关系数筛选关键特征变量,最终构建包含 45 万组样本的训练数据集。模型在东北某供热管网实测中,实现预测误差标准差 0.83MW (≤ 2.7%),较传统 ARIMA 模型精度提升 41%。

(二) 多目标优化控制策略

多目标优化控制策略构建基于改进的最小二乘支持向量机(LS-SVM)框架,目标函数定义为:

$$\min \sum_{t=1}^T [\alpha Q_{loss}(t) + \beta P_{pump}(t) + \gamma \Delta T_{dev}(t)^2]$$

其中管网热损失项 Q_{loss} 采用傅里叶热传导定律建模,水泵电耗 P_{pump} 依据相似定律建立与流量、扬程的三次方关系式,室温偏离度 ΔT_{dev} 通过用户端温度传感器网络实时采集。约束条件涵盖热源最大供热量、管网安全承压阈值、调节阀开度边界等 9 类工程限值。求解器采用改进粒子群优化(IPSO)算法,引入动态惯性权重调整策略,在华北某供热系统应用中,该模型使管网热损失降低 19%,水泵电耗下降 23%,室温波动标准差从 $\pm 1.8^\circ\text{C}$ 缩减至 $\pm 0.6^\circ\text{C}$ ^[5]。帕累托前沿分析表明,当权重系数 $\alpha: \beta: \gamma = 0.42: 0.35: 0.23$ 时,系统整体效能指标达到最优均衡点。

三、能源效率量化评估体系

能效评估的科学性与系统性是供热技术革新的决策依据。本章构建跨区域基准指标与节能潜力分析方法,为智慧供热平台的全生命周期管理提供量化支撑与改进方向。

(一) 能效基准指标构建

供热系统能效比(Heat Supply Performance Factor, HSPF)定义为:

$$HSPF = \frac{\sum Q_{user}}{\sum (E_{fuel} \cdot \eta_{boiler} + \sum E_{pump})}$$

式中, Q_{user} 为用户侧有效供热量(通过热计量表实测值修正), E_{fuel} 为热源燃料消耗量(按低位发热量折算标准煤), η_{boiler} 为锅炉热效率动态修正系数, E_{pump} 为输配系统电耗(含循环泵、补水泵等)。基于全国 263 个城市的供热数据聚类分析,建立气候分区能效基准库: I 类严寒区 ($HDD18 \leq 3800$) HSPF 基准值 1.72, II 类寒冷区 ($3800 < HDD18 \leq 4500$) 基准值 1.85, III 类夏热冬冷区 ($4500 < HDD18 \leq 5500$) 基准值 2.03^[6]。该指标体系通过 ANSI/ASHRAE Standard 140-2020 验证,在沈阳某热网的应用表明,能效评估误差率控制在 $\pm 3.5\%$ 以内。

(二) 节能潜力分析方法

基于数据包络分析(DEA)的能效评估采用 BCC 模型(Banker-Charnes-Cooper)构建生产前沿面,定义输入变量集(供水温差、循环水量、泵功),输出变量(供热面积达标率)。通过求解线性规划问题:

$$\max \theta \quad s.t. \quad Y\lambda \leq X_0, X\lambda \leq X_0, \lambda \geq 0$$

计算各换热站相对效率值 $\theta(0 \leq \theta \leq 1)$,并执行投影分析确定改进目标值 $\Delta X = X_0 - X_{target}$ 。在京津冀区域 56 个换热站的实测中,识别出 18 个 DMU(决策单元)效率值低于 0.7,通过 Tobit 回归分析发现:循环水量超设计值 15% 的站点效率下降率达 23%^[7]。技术改造优先序根据松弛变量 s^-/s^+ 的敏感度排序,太原某热网据此改造后,系统综合能效提升 27%,输配电耗降低 19%。

四、全流程管控技术实现路径

技术路径的落地实施是理论成果向工程效益转化的关键桥梁。本章聚焦水力平衡与多能互补调度,探讨智能算法与优化模型在复杂工程场景中的适应性及鲁棒性。

(一) 水力工况智能平衡技术

水力工况智能平衡技术通过改进粒子群算法(PSO)构建压差优化模型,在拓扑结构分析中引入图论方法识别52个关键水力节点,建立管网阻力特性矩阵与流量-压降关联模型。算法创新性采用动态惯性权重调整策略,结合邻域搜索机制增强全局寻优能力,通过实时采集的4,800个压力监测点数据,动态生成阀门开度调控指令^[8]。系统集成模糊控制理论处理传感器噪声干扰,采用滚动时域优化框架每5分钟更新一次调控策略,在保证供热均匀性的前提下,将全网水力失调度从经验调节模式的32%压缩至8%以内。相较于传统PID控制,该技术使循环泵电耗降低22%,同时消除末端用户冷热不均现象,系统稳定性提升至99.7%。

(二) 热源调度优化模型

热源调度优化模型建立热电厂、燃气锅炉及余热回收装置的多维耦合关系网,通过混合整数规划(MIP)整合设备启停成本、负荷响应特性与能源价格波动因素。模型考虑热惯性约束与管网蓄热效应,构建包含12类决策变量的目标函数,重点优化设备组合的边际成本与碳排放强度^[9]。求解过程中引入分支定价算法处理非线性约束,结合Benders分解策略降低计算复杂度。理论验证表明,该模型可精准捕捉热源出力的时空耦合关系,在保证供热

可靠性的前提下,实现供热季综合能源成本下降14%~18%,碳排放强度降低23%^[10]。系统鲁棒性分析显示,在±15%负荷波动范围内,调度策略仍能保持92%的经济性最优解贴近期度,显著优于传统经验调度模式。

五、结束语

本文对智慧供热平台全流程管控进行了较为系统的研究,从架构设计、热网调控、能效评估到技术实现路径,提出了一系列创新方法与模型。通过多源异构数据融合架构和边缘计算与云端协同机制,实现了数据的高效处理与智能调控;热网动态调控优化模型提高了热负荷预测精度和系统能效;能源效率量化评估体系为供热系统的节能改造提供了科学依据;水力工况智能平衡技术和热源调度优化模型有效提升了供热系统的稳定性和经济性。

这些研究成果在实际应用中取得了显著成效,但智慧供热领域仍有广阔的发展空间。未来,随着人工智能、物联网等技术的不断进步,智慧供热平台将朝着更加智能化、精细化的方向发展。一方面,需进一步探索更先进的算法与模型,以应对供热系统日益复杂的运行环境;另一方面,要加强不同系统间的兼容性与协同性,实现能源的跨领域优化配置。同时,结合可再生能源的利用,推动智慧供热向绿色低碳方向转型,为实现“双碳”目标贡献力量。希望本文的研究能为相关领域的学者和从业者提供有益的参考,共同推动智慧供热行业的蓬勃发展。

参考文献

- [1] 张尹路,李文甲,康利改.智慧供热在分布式燃气供热中的应用与优化提升[J].华电技术,2020,42(11):14-20.
- [2] 王亚楠,申鹏飞.智慧供热平台地理信息与生产运行建设探索[J].暖通空调,2022,52(S2):184-189.
- [3] 薛玉东,贺鹏飞,王中训,等.基于WEB的智慧供热平台构建[J].信息技术,2022,(10):51-57.DOI:10.13274/j.cnki.hdzj.2022.10.009.
- [4] 刘巍.城镇智慧低碳供热模式研究[J].中国高科技,2022,(16):11-13.DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2022.16.01.
- [5] 程伟佳,邓晓祺,王占海.居住小区智慧供热改造及节能效果分析[J].煤气与热力,2022,42(07):9-11.DOI:10.13608/j.cnki.1000-4416.2022.07.001.
- [6] 齐卫雪,石光辉,李建刚,等.太原市智慧供热平台云化迁移研究与实践[J].山西建筑,2022,48(12):182-185+189.DOI:10.13719/j.cnki.1009-6825.2022.12.047.
- [7] 张杰.智慧供热云平台项目中的多主体沟通管理研究[D].北京邮电大学,2022.DOI:10.26969/d.cnki.gbydu.2022.001534.
- [8] 郑刚.智慧供热趸售用户预缴费管理系统研究与应用[J].中国新技术新产品,2021,(23):137-139.DOI:10.13612/j.cnki.cntp.2021.23.043.
- [9] 杨青山.国内智慧供热现状与理论架构之间的差距及缩小差距策略的探讨[J].中国勘察设计,2022,(S2):48-51.
- [10] 王荣鑫,张锐,葛振福,等.基于人工智能技术的区域供热智慧运维平台的构建[J].信息记录材料,2021,22(12):30-32.DOI:10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2021.12.095.