

AI 算法在供热管网动态调控中的低碳应用

胡泽文

山西省城乡规划设计研究院有限公司 山西 太原 030000

摘要: 本文聚焦AI算法在供热管网动态调控中的低碳应用。先阐述供热系统热力-水力耦合模型、碳排放来源及动态调控需求等基础理论,接着介绍数据驱动负荷预测、动态优化算法等关键技术,剖析了低碳应用机制、路径及配套支撑,最后构建低碳动态调控模型并通过仿真验证。旨在为供热系统低碳运行提供理论支撑与实践指导,推动行业向低碳化转型。

关键词: AI算法; 供热管网; 动态调控; 低碳优化; 数字孪生

引言: 在全球“双碳”目标背景下,供热行业作为高耗能、高排放领域,低碳转型迫在眉睫。供热管网运行复杂,负荷波动大,传统调控模式难以满足低碳与精准供热需求。AI算法凭借强大的数据处理与优化能力,为供热管网动态调控带来新契机。本文深入探讨AI算法在其中的应用,剖析基础理论、关键技术及应用路径,为供热系统的低碳化、智能化运行提供参考。

1 供热管网动态调控与低碳基础理论

1.1 供热系统热力-水力耦合模型

供热系统热力-水力耦合模型是实现管网动态调控与低碳运行的核心基础,其核心是精准描述管网内热量传递与水流运动的相互作用机制,破解热力与水力参数耦合失衡导致的能源浪费问题。该模型以流体力学、传热学为理论支撑,整合管网拓扑结构、设备参数、环境条件等多源数据,构建节点流量、压力与温度的耦合方程组,明确水泵扬程、阀门开度等操作参数与管网热力输出、能耗之间的关联关系。模型需兼顾稳态与瞬态特性,既能够模拟额定工况下的热力-水力平衡状态,也能精准捕捉室外温度波动、热负荷变化等动态场景下的参数响应规律,为后续动态调控策略制定、低碳优化提供可靠的理论支撑与仿真基础,同时为碳排放量化与控制提供数据支撑,是连接基础理论与工程应用的关键纽带。

1.2 碳排放来源解析

供热管网系统碳排放来源具有多环节、多类型特征,精准解析其来源是实现低碳调控的前提。碳排放主要分为直接排放与间接排放两大类,直接排放源于热源生产环节,包括燃煤、燃气锅炉燃烧产生的CO₂、NO_x等温室气体,是管网碳排放的主要组成部分;间接排放则来自辅助系统运行,涵盖循环水泵、加压设备、控制系统等耗电环节,以及管网保温损耗导致的额外热源消耗所引发的碳排放。管网泄漏、换热效率低下、调控不合理等

问题,为保证末端达到供热效果,只能通过热源多出力、增大流量等“大水漫灌”的方式解决,会进一步加剧能源浪费,间接增加碳排放总量^[1]。通过对各环节碳排放系数、影响因素的量化分析,明确不同环节碳排放占比与关键控制点,区分可控与不可控碳排放来源,可为后续针对性制定低碳调控策略、优化能源结构、降低碳排放强度提供精准依据,推动供热系统向低碳化转型。

1.3 动态调控需求分析

供热管网动态调控需求源于系统运行的复杂性、负荷的波动性以及低碳发展的刚性要求,核心是实现“按需供热、精准调控、低碳节能”的运行目标。从系统运行层面看,室外环境温度、建筑热负荷、管网参数等均处于动态变化中,传统固定参数调控模式无法适配动态工况,易出现供热量过剩或不足、水力失调等问题,导致能源浪费与用户舒适度下降,亟需动态调控实现参数实时优化。从低碳发展层面看,“双碳”目标下,供热行业作为高耗能、高排放领域,需通过动态调控降低能源消耗、减少碳排放,满足环保政策要求。

2 AI算法在动态调控中的关键技术

2.1 数据驱动的负荷预测

数据驱动的负荷预测是AI算法应用于供热管网动态调控的前提与基础,其核心是通过挖掘多源数据关联关系,实现热负荷的精准预测,为调控策略制定提供科学依据。该技术以供热系统历史运行数据、环境数据、用户数据等为输入,包括室外温度、湿度、光照、建筑面积、用户用热习惯、管网运行参数等多维度数据,通过数据清洗、特征提取、归一化等预处理操作,消除数据噪声与冗余。采用机器学习、深度学习等AI算法,如LSTM、BP神经网络、随机森林等,构建负荷预测模型,实现短期、中期热负荷的精准预测,克服传统基于经验公式预测的局限性。精准的负荷预测能够提前预判热负

荷变化趋势,指导热源出力调整、管网参数优化,避免供热量与实际需求脱节,有效降低能源浪费,为动态调控提供精准的数据支撑,是实现低碳运行的关键前提^[2]。

2.2 动态优化算法

动态优化算法是AI实现供热管网精准调控的核心技术,其核心是在满足用户热舒适度、系统运行安全的前提下,实现能耗与碳排放的最小化。该算法以供热系统热力-水力耦合模型为基础,结合实时负荷预测数据、管网运行状态数据,构建多目标优化函数,目标函数涵盖碳排放强度、能源消耗、运行成本等核心指标,约束条件包括管网压力、温度阈值、设备运行极限等。通过遗传算法、粒子群优化、强化学习等AI优化算法,对水泵扬程、阀门开度、热源出力等调控参数进行实时寻优,动态调整运行策略,适配热负荷与环境的动态变化。与传统固定调控算法相比,动态优化算法具有响应速度快、优化精度高、适应性强的优势,能够在复杂动态工况下实现多目标平衡,有效提升管网运行效率,降低碳排放,推动供热系统向精准化、低碳化运行转型。

2.3 边缘计算与实时决策

边缘计算与实时决策技术是解决供热管网动态调控实时性需求的关键。它打破传统集中式调控响应滞后的局限,实现调控指令快速生成执行。边缘计算把数据处理、算法运算能力下沉到管网边缘节点,靠近传感器等设备,能实时采集管网运行、负荷、环境等数据,避免数据传云端产生延迟,提高处理效率。结合AI算法,边缘节点可实时分析负荷、诊断运行状态、优化调控参数,快速生成决策指令,控制水泵等设备,实时调整管网参数。此外,边缘计算与云端平台协同,边缘节点负责实时决策,云端负责数据存储等,兼顾实时与全局需求。

3 AI算法在供热管网动态调控中的低碳应用机制与路径

3.1 核心应用机制

AI算法在供热管网动态调控中的低碳应用机制,核心是构建“数据采集-分析预测-优化决策-执行反馈”的闭环体系,实现碳排放全流程精准管控。其核心逻辑是通过多源数据采集模块获取管网运行、环境、负荷等各类数据,经边缘计算与AI算法处理后,完成负荷预测与运行状态诊断;基于诊断结果与低碳目标,通过动态优化算法生成最优调控策略,指导热源、管网、终端设备协同运行;通过执行器落实调控指令,同时将运行反馈数据回传至算法模型,实现模型迭代优化,形成闭环调控。该机制以“按需供能、精准调控”为核心,通过AI算法破解热力-水力耦合失衡、负荷波动适配不足等问题,

减少能源浪费,降低碳排放;通过实时反馈与模型迭代,持续提升调控精度与低碳效益,实现供热系统运行与低碳目标的深度融合,为管网低碳动态调控提供稳定、高效的运行机制。

3.2 算法选型与优化

AI算法选型与优化是保障供热管网低碳动态调控效果的关键,需结合管网运行特点、调控需求与低碳目标,选择适配性强、优化效果好的算法,并通过参数调整、模型融合实现性能提升。针对负荷预测环节,短期预测优先选用LSTM、GRU等深度学习算法,适配负荷的时序特性,提升预测精度;中长期预测可结合随机森林、XGBoost等算法,兼顾多因素影响^[3]。针对动态优化环节,简单工况可选用粒子群优化、遗传算法,复杂工况可采用强化学习算法,实现调控参数的实时寻优。算法优化需聚焦低碳目标,通过调整算法权重,强化碳排放指标在优化函数中的占比,同时结合管网实际运行数据,对算法参数进行迭代调整,解决算法泛化能力不足、收敛速度慢等问题。可通过多算法融合,弥补单一算法的局限性,实现负荷预测与调控优化的协同提升,最大化发挥AI算法的低碳调控效能。

3.3 全流程低碳应用路径

AI算法在供热管网动态调控中的全流程低碳应用路径,涵盖“热源-管网-终端”三个核心环节,形成全链条、一体化的低碳调控体系。在热源环节,通过AI负荷预测算法精准预判热负荷需求,优化热源出力调度,减少燃煤、燃气消耗,降低直接碳排放;通过算法优化锅炉燃烧效率,减少能源浪费。在管网环节,利用AI动态优化算法与边缘计算技术,实时调整水泵扬程、阀门开度,解决水力失调问题,降低管网散热损耗与水泵能耗,减少间接碳排放;通过管网泄漏检测算法,及时发现泄漏点并处理,避免能源浪费。在终端环节,结合用户用热数据与AI算法,实现个性化供热调控,避免供热量过剩,提升用户舒适度的同时降低能耗。通过全流程数据协同与模型迭代,实现各环节调控协同,形成“热源优化-管网调控-终端适配”的低碳应用路径,推动供热系统全流程低碳化运行。

3.4 配套技术与体系支撑

AI算法在供热管网动态调控中的低碳应用,需依托完善的配套技术与体系支撑,确保算法落地实施与调控效果稳定。配套技术方面,需构建全覆盖的物联网监测体系,部署温度、压力、流量等各类传感器,实现管网运行数据、环境数据、负荷数据的实时采集,为AI算法提供充足的数据支撑;搭建边缘计算与云端协同的算力

平台,满足算法实时运算与数据存储需求;完善管网节能改造技术,提升管网保温性能、设备运行效率,为低碳调控奠定硬件基础。体系支撑方面,需建立健全标准规范体系,明确AI算法应用的技术要求、碳排放量化标准与调控目标;构建专业的技术运维团队,负责算法模型迭代、设备维护与调控策略优化;建立激励机制与考核体系,将低碳调控效果纳入运维考核,推动相关技术与策略的落地执行,形成“技术支撑-体系保障-考核激励”的完整支撑体系。

4 低碳动态调控模型构建与验证

4.1 模型架构设计

低碳动态调控模型架构设计以“低碳优先、精准调控、协同高效”为核心,整合数据层、算法层、决策层、执行层四个核心模块,实现供热管网动态调控与碳排放管控的深度融合。数据层负责多源数据的采集、预处理与存储,涵盖管网运行参数、环境数据、负荷数据、碳排放数据等,通过物联网监测系统与数据管理平台,确保数据的实时性、准确性与完整性。算法层是模型核心,集成负荷预测算法、动态优化算法、碳排放量化算法等,实现数据解析、负荷预测、参数优化与碳排放评估。决策层基于算法层输出结果,结合低碳目标、系统运行约束,生成最优调控决策指令,明确热源出力、水泵运行、阀门开度等参数调整方案。执行层负责将决策指令落实到各类设备,同时将设备运行反馈数据回传至数据层,实现模型闭环迭代。架构设计需兼顾扩展性与实用性,适配不同规模管网的运行需求,为后续模型验证与工程应用奠定基础。

4.2 碳排放量化模型

碳排放量化模型是低碳动态调控的核心组成部分,其核心是精准量化供热管网各环节碳排放总量与强度,为调控策略优化与效果评估提供量化依据。该模型以生命周期理论为基础,涵盖供热系统“热源生产-管网输送-终端用热”全流程,明确各环节碳排放核算边界与核算方法。针对直接排放,采用排放系数法,结合热源燃料消耗量、燃料碳排放系数,量化锅炉燃烧产生的碳排放;针对间接排放,结合电网平均碳排放系数、设备耗电量,量化辅助系统运行产生的碳排放。引入管网散热损耗、泄漏损

失等影响因素,构建碳排放与调控参数的关联模型,明确水泵扬程、阀门开度、热源出力等参数对碳排放的影响规律^[4]。模型需具备动态更新能力,可根据燃料类型、设备效率、运行工况的变化,实时调整排放系数与核算模型,确保碳排放量化的精准性与时效性。

4.3 仿真验证平台

仿真验证平台是检验低碳动态调控模型有效性、可靠性的关键载体,其核心是构建与实际供热管网高度一致的仿真环境,模拟不同工况下模型的调控效果与低碳效益。平台以实际管网拓扑结构、设备参数、运行数据为基础,整合热力-水力耦合仿真模块、AI算法模块、碳排放量化模块,实现管网运行状态、调控过程、碳排放变化的全流程仿真。通过设置不同场景,包括室外温度波动、热负荷变化、设备故障等,模拟低碳动态调控模型的运行过程,对比调控前后的能源消耗、碳排放总量、用户舒适度等指标,验证模型的调控精度与低碳效益。通过仿真平台优化模型参数与调控策略,解决模型在实际应用中可能出现的响应滞后、优化不足等问题,确保模型能够适配实际运行工况,为后续工程落地提供可靠的技术支撑,推动低碳动态调控模型的产业化应用。

结束语

AI算法在供热管网动态调控中展现出巨大低碳应用潜力,通过构建完整理论体系、关键技术及全流程应用路径,能有效降低碳排放,提升运行效率。配套技术与体系的支撑确保了算法落地实施。未来,随着技术发展,需持续优化算法模型,加强实践应用,推动供热行业低碳化发展,为实现“双碳”目标贡献力量。

参考文献

- [1]陈继平,邓科峰,赵晓辉.综合能源系统供热管网动态耦合模型研究[J].电力勘测设计,2023(3):43-50.
- [2]刘哲.供热管网分时分区动态节能调控方法研究[J].科学技术创新,2025(22):135-138.
- [3]胡月波,孙宗宇,石磊,等.基于物联网的集中供热管网智能动态平衡调控方法研究[J].建筑技术,2025,56(2):163-167.
- [4]温青梅,戴振宇,杨龙刚.城镇集中供热一次管网动态调节延时分析[J].区域供热,2023(1):74-77.