

智慧热网水力平衡优化与碳排放关联性

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：本文聚焦智慧热网水力平衡优化与碳排放的关联性。分析了供热管网水力失衡的成因与危害，阐述智慧热网水力平衡优化技术体系。介绍了供热系统碳排放核算方法，剖析水力工况与碳排放的定性关联及其他影响因素。随后构建水力平衡优化与碳排放关联性模型，进行多工况仿真分析。旨在为供热系统水力平衡调控与降碳优化提供理论与实践指导。

关键词：智慧热网；水力平衡；碳排放；节能优化

引言：集中供热系统在保障民生中发挥关键作用，但供热管网水力失衡问题突出，导致能源浪费、碳排放增加，与节能降碳目标相悖。智慧热网借助新一代信息技术，为解决水力失衡提供新途径。研究智慧热网水力平衡优化与碳排放的关联性，有助于明确水力平衡对碳排放的影响机制，制定科学降碳策略，推动供热行业高质量发展，实现节能减排目标。

1 供热管网水力失衡机理与影响分析

1.1 水力失衡的成因分析

供热管网水力失衡是指系统实际水力工况与设计工况偏离，导致各用户或换热站流量分配不均的现象，其成因复杂且涉及系统设计、设备运行、调控管理等多个环节。设计阶段，管网布局不合理、管径选型偏差、阻力计算失误，以及换热站与用户分布不均衡，会导致管网先天阻力失衡，为后续运行埋下隐患。设备运行层面，水泵扬程、流量匹配度不足，阀门磨损、堵塞或调节不当，以及管道结垢、腐蚀导致沿程阻力增大，会破坏系统水力平衡。调控管理滞后也是重要成因，传统供热系统多采用手动调节方式，无法根据室外温度、用户热需求的动态变化实时调整流量，且缺乏精准的水力监测手段，难以及时发现并纠正流量分配偏差。

1.2 水力失衡的危害

供热管网水力失衡会对系统运行、用户体验及能源消耗造成多方面严重危害，是制约集中供热系统高质量发展的关键问题。从用户层面看，水力失衡会导致部分用户室内温度过高，造成能源浪费，而部分用户温度过低，无法满足采暖需求，严重影响居住舒适度，甚至引发用户投诉^[1]。从系统运行层面，流量分配不均会导致水泵能耗大幅增加，为维持系统正常运行，水泵需长期处于高负荷工况，不仅提升运行成本，还会缩短设备使用寿命。另外，水力失衡会导致管网局部压力过高，增加

管道泄漏、阀门损坏的风险，降低系统运行稳定性，增加维护成本。同时，流量不合理分配会造成热源供热量与用户实际需求不匹配，导致能源利用效率低下，进一步增加化石能源消耗，间接加剧碳排放，与供热行业节能降碳的发展目标相悖。

2 智慧热网水力平衡优化技术体系

2.1 智慧热网的内涵与架构

智慧热网是基于物联网、大数据、人工智能等新一代信息技术，实现供热系统全流程智能化监测、调控与管理的新型供热体系，其核心内涵是“感知精准化、调控智能化、管理精细化”，旨在解决传统热网水力失衡、能耗过高、调控滞后等问题。智慧热网整体架构分为感知层、网络层、平台层与应用层四个层面：感知层通过部署流量、温度、压力等各类传感器，实现对管网、换热站、用户等关键节点运行参数的实时采集；网络层负责将感知数据安全传输至平台层，保障数据的实时性与可靠性；平台层通过大数据分析、建模与仿真，实现对系统运行状态的精准研判与优化决策；应用层针对水力平衡优化、能耗控制、故障预警等场景，提供个性化应用服务。该架构实现了供热系统各环节的互联互通，为水力平衡优化提供了技术支撑，推动供热系统从“经验调控”向“精准调控”转型。

2.2 水力平衡优化关键技术

智慧热网水力平衡优化关键技术围绕“精准感知、智能调控、动态优化”展开，涵盖监测、调控、建模等多个领域，是解决水力失衡问题的核心手段。首先，管网水力参数精准监测技术，通过在管网关键节点、换热站及用户端部署智能传感器，实时采集流量、温度、压力等数据，结合数据校准算法，确保监测数据的准确性，为水力平衡分析提供数据支撑^[2]。其次，智能调控技术，包括水泵变频调控、电动阀门精准调节等，通过实

时反馈的水力参数,动态调整水泵转速、阀门开度,实现流量的精准分配,纠正水力失衡。另外,水力平衡建模与仿真技术,基于管网拓扑结构与水力特性,构建水力平衡模型,模拟不同工况下的流量分配情况,预判水力失衡风险,为调控策略制定提供科学依据。同时大数据分析技术可挖掘用户热需求规律,实现水力平衡的动态优化,提升系统运行效率。

2.3 水力平衡评价指标体系

水力平衡评价指标体系是衡量供热管网水力平衡状态、评估优化效果的核心依据,需结合系统运行特点,构建科学、全面、量化的指标体系,涵盖流量分配、压力分布、运行效率等多个维度。核心指标包括流量均匀性指标,用于衡量各用户或换热站实际流量与设计流量的偏差程度,偏差越小,表明流量分配越均匀;压力稳定性指标,反映管网各节点压力波动范围,波动越小,系统水力工况越稳定;水力失调度指标,综合评价管网整体水力失衡程度,数值越低,水力平衡效果越好。还包括能耗指标,如单位面积耗热量、水泵单位流量能耗等,间接反映水力平衡对系统能耗的影响;用户舒适度指标,通过用户室内温度达标率体现水力平衡优化对用户体验的改善。该指标体系可实现对水力平衡状态的精准评价,为优化策略调整提供数据支撑,确保优化效果可量化、可追溯。

3 供热系统碳排放核算与影响因素

3.1 供热系统碳排放源识别

供热系统碳排放源主要分为直接碳排放与间接碳排放两类,精准识别碳排放源是开展碳排放核算、制定降碳措施的前提。直接碳排放主要来源于热源生产环节,包括燃煤、燃气等化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放,这是供热系统碳排放的主要来源,占比超过80%,其中燃煤供热的碳排放强度远高于燃气供热。间接碳排放主要来源于辅助系统运行,包括水泵、风机等动力设备耗电产生的碳排放,以及管网保温损耗导致额外供能产生的间接排放,燃料运输、设备制造与维护等环节也会产生少量间接碳排放。同时需区分可控碳排放与不可控碳排放,热源燃料燃烧产生的直接碳排放、设备耗电产生的间接碳排放为可控碳排放,是后续降碳优化的重点;而燃料运输等环节的碳排放为不可控碳排放,需通过源头管控减少影响,全面识别各类碳排放源,为后续核算与管控提供清晰依据。

3.2 碳排放核算方法

供热系统碳排放核算需遵循“全面覆盖、精准量化”的原则,结合系统碳排放源特点,采用针对性的核

算方法,目前主流方法包括排放因子法、物料衡算法与生命周期评价法。排放因子法是最常用的核算方法,通过确定各类燃料的碳排放因子,结合燃料消耗量,计算直接碳排放,公式为:碳排放总量=燃料消耗量×碳排放因子,该方法操作简便、数据需求低,适用于常规供热系统核算。物料衡算法基于质量守恒原理,通过计算燃料燃烧过程中碳输入量与输出量,精准核算碳排放,适用于对核算精度要求较高的场景,但数据采集难度较大。生命周期评价法涵盖供热系统全生命周期,包括燃料开采、运输、燃烧、设备运行及报废等环节,可全面核算系统碳排放,但核算流程复杂、耗时较长。实际应用中,需结合系统规模、数据可得性,选择合适的核算方法,确保核算结果准确可靠。

3.3 水力工况与碳排放的定性关联

供热管网水力工况与碳排放存在密切的定性关联,水力失衡会显著加剧系统碳排放,而水力平衡优化可有效降低碳排放,二者呈现反向关联关系。当管网存在水力失衡时,流量分配不均会导致部分区域供热量过剩、部分区域供热量不足,为满足所有用户采暖需求,热源需额外增加供热量,导致化石燃料消耗增加,直接碳排放上升。同时水力失衡会导致水泵长期处于高负荷运行状态,耗电量增加,间接碳排放随之提升^[3]。另外,水力失衡引发的管网压力异常、管道泄漏等问题,会进一步增加能源损耗,加剧碳排放。反之,当管网处于水力平衡状态时,流量分配合理,热源供热量与用户需求精准匹配,可减少不必要的能源消耗;水泵运行效率提升,耗电量降低,直接与间接碳排放均会显著减少,实现水力平衡与碳排放的协同优化。

3.4 其他影响碳排放的因素

除水力工况外,供热系统碳排放还受到热源类型、能源利用效率、管网保温水平、用户用热行为等多种因素影响。热源类型是核心影响因素,燃煤热源碳排放强度最高,燃气、热泵等清洁能源热源碳排放强度较低,热源结构优化是降低碳排放的关键。能源利用效率方面,锅炉热效率、换热站换热效率越低,能源浪费越严重,碳排放越多,提升设备效率可有效减少碳排放。管网保温水平不足会导致热量大量损耗,热源需额外供能,间接增加碳排放,完善管网保温措施可降低热量损耗。用户用热行为方面,过度采暖、门窗密封不严等会增加热需求,导致供热量增加,同时用户调节行为不规范也会影响系统水力工况,间接加剧碳排放。室外环境温度、系统运行调控水平等也会对碳排放产生一定影响,需综合考虑各类因素,制定全方位的降碳策略。

4 水力平衡优化与碳排放关联性建模

4.1 基础模型假设与变量定义

为构建水力平衡优化与碳排放的关联性模型,需结合供热系统运行特点,提出合理的基础模型假设,明确模型变量定义,确保模型的科学性与实用性。基础假设主要包括:忽略管网沿程散热损耗,聚焦水力工况对能耗及碳排放的影响;假设用户热需求稳定,不考虑短期波动;忽略管道泄漏、设备故障等异常工况,仅考虑正常运行状态;假设水泵、阀门等设备运行效率恒定,简化模型计算难度。变量定义分为三类:水力平衡变量,包括管网各节点流量、压力、水力失调度等,用于描述水力平衡状态;能耗变量,包括热源燃料消耗量、水泵耗电量等,反映系统能源消耗水平;碳排放变量,包括直接碳排放量、间接碳排放量、碳排放总量等,用于量化碳排放水平。同时定义相关参数,如燃料碳排放因子、水泵耗电碳排放因子等,为模型构建提供数据支撑。

4.2 水力平衡度与能耗关系模型

水力平衡度与能耗关系模型是连接水力平衡优化与碳排放的核心桥梁,旨在量化水力平衡状态对系统能耗的影响,为后续碳排放转化提供基础。模型以水力平衡度为核心输入变量,以系统总能耗为输出变量,结合管网水力特性、设备运行参数构建函数关系。首先,基于水力平衡度的定义,将流量均匀性、压力稳定性等指标整合为综合水力平衡度指标,量化管网水力平衡状态。其次,分析水力平衡度与热源燃料消耗量、水泵耗电量的关联规律,水力平衡度越高,流量分配越合理,热源供热量与用户需求匹配度越高,燃料消耗量越少;同时,水泵运行负荷降低,耗电量减少。通过数据拟合、机理分析等方法,构建水力平衡度与总能耗的二次函数模型,明确二者的量化关系,模型可准确预测不同水力平衡度下的系统能耗,为水力平衡优化提供量化依据。

4.3 能耗与碳排放转化模型

能耗与碳排放转化模型基于碳排放核算原理,将系统总能耗转化为碳排放总量,实现能耗与碳排放的量化关联,为水力平衡优化的降碳效果评估提供支撑。模型分为直接碳排放转化与间接碳排放转化两部分:直接碳排放转化基于热源燃料消耗量与对应燃料碳排放因子,通过排放因子法构建转化公式,计算燃料燃烧产生的直接碳排放量;间接碳排放转化主要针对水泵等动力

设备,基于设备耗电量与电力碳排放因子,计算耗电产生的间接碳排放量。将直接碳排放量与间接碳排放量求和,得到系统碳排放总量,构建能耗与碳排放总量的线性转化模型。同时引入能耗转化效率系数,修正模型误差,确保转化结果的准确性。该模型可实现不同能耗水平下碳排放总量的精准计算,为后续多工况仿真分析及降碳效果评估奠定基础。

4.4 多工况仿真分析

多工况仿真分析基于上述水力平衡度与能耗关系模型、能耗与碳排放转化模型,结合供热系统实际运行场景,模拟不同工况下水力平衡度、能耗与碳排放的变化规律,验证模型的有效性,为水力平衡优化策略制定提供科学依据。仿真工况主要包括设计工况、典型运行工况、水力失衡工况及优化工况,涵盖不同室外温度、用户热需求、管网运行参数等场景^[4]。通过仿真计算,得到各工况下的水力平衡度、能耗及碳排放数据,对比分析水力失衡与水力平衡状态下的能耗、碳排放差异,量化水力平衡优化的降碳效果。模拟不同优化参数(如阀门开度、水泵转速)对水力平衡度、能耗及碳排放的影响,筛选最优优化方案。仿真结果可直观反映水力平衡优化与碳排放的关联规律,为实际供热系统的水力平衡调控与降碳优化提供实践指导。

结束语

智慧热网水力平衡优化与碳排放关联性研究意义重大。通过构建关联性模型并进行多工况仿真分析,清晰呈现了水力平衡优化对降低碳排放的积极作用。未来,应持续完善相关技术与模型,结合实际供热系统精准应用,进一步提升供热系统运行效率,降低碳排放,助力供热行业在节能减排道路上稳步前行,实现绿色可持续发展。

参考文献

- [1]杨少晖.集中供热系统中热网水力平衡调节技术研究[J].中文信息,2024(5):77-78.
- [2]刘有亮.供热运行调节与热网平衡的探讨[J].砖瓦世界,2023(1):205-207.
- [3]高琨.市政集中供热水力平衡的失调及其解决方法探讨[J].居业,2024(5):227-229.
- [4]张鑫,侯玉玲.数字平衡阀在供热水力平衡调控中的应用研究[J].区域供热,2023(6):23-34.