

城市多热源环网热电联产集中供热运行与调节实践

文 / 王学峰 利津县城市供热有限公司

摘要: 为解决城市多热源供热系统运行中存在的调度复杂、水力不稳定与能效偏低等问题, 本文以环网结构下的热电联产集中供热系统为研究对象, 对其热源协调调节机制、热网水力响应特性及系统能效优化路径进行系统分析, 提出基于模型预测控制的热网调节方法与多热源协同运行策略, 构建高效能量调配与智能响应机制。研究内容旨在提升供热系统的运行稳定性与调节灵活性, 以期多热源供热工程的规划设计与运行管理提供理论支持与实践参考。

关键词: 城市多热源; 热电联产; 集中供热运行; 调节

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.18.122

引言

城市集中供热系统正逐步由单一热源模式向多热源耦合结构演进, 多热源环网热电联产模式因其能源利用效率高、运行灵活性强等优势, 成为供热系统发展的主要趋势。其运行特性高度依赖于热源调度协同、水力平衡控制与终端响应能力, 系统复杂性显著提升。如何构建高效调节策略与智能运行机制, 已成为提升系统性能的关键技术课题。

一、城市多热源环网热电联产系统结构特征

城市多热源环网热电联产系统通常构建于以多能源耦合为基础的热力网络中, 其核心结构由多个热源节点、环状主干热网及多级换热站共同构成。各热源节点依据其供热能力、热电比及运行工况进行分层级部署, 主干热网则通过闭环或半闭环方式连接各节点, 确保热力的传输与冗余供热能力。系统内部的水力结构依赖于压差控制、变流量调节及动态平衡机制, 精细实现不同热源间的热负荷动态分摊。热电联产单元主要采用背压式与抽汽式机组, 通过调节抽汽比例与供汽压力实现热电输出协调。整体系统强调热力结构与水力结构的协同响应, 通过分布式控制策略提升运行弹性, 同时确保热负荷响应时的稳定性与热能传递效率。系统拓扑结构设计需兼顾传输距离、热损控制与水力路径优化, 实现多热源间的动态互补与调度协调^[1]。

二、多热源热电联产系统的运行机理

(一) 热负荷动态变化特征

城市热负荷受气象条件、建筑热惯性与用户用热行为等多因素驱动, 呈现显著的时间波动性与空间异质性。在冬季采暖期间, 日最大负荷通常出现在 6:30 ~ 9:30 及 18:00 ~ 21:00, 负荷峰谷比可达到 1.5 以上。典型住宅建筑单位面积热负荷在 40 ~ 60 W/m² 之间, 而商业建筑因设备散热与人员密度不同, 其单位负荷可达 70 ~ 90 W/m²。负荷变化过程中, 建筑物围护结构的蓄热效应导致系统响应滞后约 1 ~ 2 小时,

对调节策略提出高时效性要求。同时, 系统在边缘用户与高层建筑用户侧常面临流量不足或温度衰减问题, 需通过分区调控与差异化供热方式应对热负荷动态不均衡现象。

(二) 热源协同运行机制

多热源系统运行需依据热源特性、经济性指标与区域热负荷分布进行精细化调度与协同控制。主热源一般配置高背压比热电联产机组, 具备优异的热电输出效率, 其热电比常设定在 1.5 ~ 2.5 区间, 适用于基础负荷覆盖; 辅热源则多采用热水锅炉或抽汽供热系统, 具备高灵活性与快速调节能力, 适用于峰值负荷补偿。协同运行过程中, 各热源通过热力耦合点实现有序接入, 采用分时、分区或负荷共享策略以实现动态均衡。调度控制系统需实时分析热网回水温度、各源出力裕度与负荷预测曲线, 通过优先级调度逻辑与负荷切换模型控制各热源出力比例。

(三) 热网水力动态响应

热网水力系统在多热源接入背景下呈现强耦合、高动态性特征, 其瞬态响应能力直接影响热能传输的效率与稳定性。系统中压差调节依赖变频泵组与差压旁通阀联合调控, 以维持各支路流量按设定比例分配。在负荷快速变化条件下, 热网管道内流速波动可达 ±0.5 m/s, 局部压力瞬变幅值超过 30 kPa, 易引发水力失衡与末端供热不足。调节系统需依据实时采集的压差、流量与温度数据, 通过 PID 控制器或模型预测控制算法实施动态流量调整, 确保系统水力稳定运行。为抑制环网结构中的回流风险与压差扰动, 常布设末端压差控制阀与动态平衡阀组, 并辅以区域流量限制策略。在复杂工况下, 系统需依据拓扑结构计算水力路径阻抗, 动态调整水泵启停策略与运行频率, 以实现热源间水力路径的最优匹配与供回水流量的闭环调控, 提升整体水力响应效率与热负荷匹配能力^[2]。多热源热网水力动态响应关键参数见表 1。

表 1 多热源热网水力动态响应关键参数

参数名称	数值范围 / 典型值	说明
流速波动范围	±0.5 m/s	负荷变化时主干管内瞬态流速波动
局部压力瞬变幅值	≤ 30 kPa	热负荷突变或热源切换时产生
热网典型工作压力	0.4 ~ 1.0 MPa	一、二次网常见运行压力范围
动态平衡阀设定压差	20 ~ 35 kPa	控制支路流量的关键参数
供回水温差控制范围	25 ~ 35 °C	保证热量传输效率的关键指标
末端压差调节响应时间	< 30 s	控制系统对压力扰动的响应速度
主循环泵变频调节范围	30 ~ 60 Hz	控制流量以适应不同负荷需求

三、多热源系统的调节策略与运行优化

(一) 热源出力协调调节

在多热源热电联产系统中，实现热源出力的高效协调调节是保障供热质量和运行经济性的核心环节。不同热源具有各自的热电耦合特性、响应速率和启停约束，需在调度控制中综合考虑。通常以热负荷预测结果为基础，构建热源优先级矩阵，按照出力稳定性、单位供热成本与可调节性进行分层调度。典型主热源的最小稳定出力维持在总装机容量的 40% ~ 60%，辅助热源则依据其启停时间常数（一般为 15 ~ 30 分钟）参与中短期调节。在调度过程中，通过线性优化或混合整数优化模型实现日内出力平衡，调节频率保持在 15 分钟一次，以提升调度响应的动态适应性。协调策略需考虑热电分离控制需求，对抽汽量与电负荷曲线进行解耦优化，避免热电耦合引发的系统不稳定。出力调整过程中，需设定热源切换的温差保护阈值（通常为 ≥ 10°C），以降低热冲击风险并提升热交换器使用寿命，确保系统在不同运行场景下保持高度适配性与能效水平 [3]。

(二) 热网动态调节控制技术

热网的动态调节控制技术是多热源系统实现精准供热与快速响应的关键。在复杂环网结构中，各节点热力状态变化频繁，需实时控制供回水温度、流量及压差，以实现热量按需分配。目前广泛应用的技术是基于模型预测控制的热网调度系统，结合热负荷预测模型与热水传输动态模型，在给定预测时域内滚动优化各节点设定参数。系统常集成带流量和温度传感器的智能调节终端，并由 PLC 或 DCS 控制器执行实时指令。在典型应用中，如西门子 SIPART DR21 调节器，具备多回路控制功能与模糊逻辑控制算法，调节精度可达 ±0.5°C，响应周期小于 10s。

(三) 调节工具与手段

多热源热网系统中，调节工具的选择与配置直接关系到系统的响应速度、运行稳定性和能效水平。热储能装置是提升系统调节能力的重要装备，常采用相变储热

罐或水蓄热罐。典型水蓄热罐容积在 200 ~ 5000 m³ 之间，可实现短时调峰与供热削峰填谷，其热损系数控制在 1.5 ~ 3.0 W/m³·K。在泵组控制方面，广泛应用变频调速系统以调节水流分布与能耗水平（见图 1），控制精度可达到 ±0.2 Hz，典型如 ABB ACH580 系列变频器，具备智能负载识别与多段曲线调节功能。在末端设备中，电子差压控制阀通过动态调节压差维持用户支路稳定运行，适应快速负荷波动。此外，热网调节系统中逐步引入基于边缘计算的热力数据网关装置，实现本地快速响应与远程集中控制协同，提高系统运行的实时性与智能化水平。



图 1 变频器的应用

四、多热源热网运行能效分析

(一) 热电协同效率评价指标体系

多热源热电联产系统的综合能效评价依赖于多维指标体系，用于反映热电协同运行的整体效率与能量转换质量。常用核心指标包括热电比、等效热效率、一次能源利用率与单位供热能耗等。热电比反映系统热能与电能的输出关系，通常控制在 1.5 ~ 3.0 之间，以维持热电耦合的协调性；等效热效率则综合考虑电功转换与余热利用，主热源运行时该值应稳定在 80% ~ 88% 之间，部分优化系统可突破 90%。一次能源综合利用率是衡量系统总体节能水平的关键参数，合理结构下应保持在

70%以上。单位供热能耗(kWh/GJ)反映供热过程中的能量消耗强度,应力求控制在50~80 kWh/GJ范围内,以适应节能型城市供热要求。为精细化分析各热源协同效率,可引入源效系数(SRC)与区域负荷响应指数(LRI)等参数,对热源配置结构进行系统性评价,辅助运行策略的动态优化与系统结构的工程再构^[4]。

(二) 系统能耗特征分析

多热源热网系统的能耗构成具有明显的层级性与结构性,主要包括热源端燃料能耗、输配系统电耗以及辅助设备功耗三个层面。其中热源能耗占系统总能耗的70%~85%,直接受燃料热值、锅炉效率与机组出力特性的影响。背压式发电机组的热效率一般在45%~55%之间,抽汽式机组在部分负荷下则可降至35%以下。输配系统的能耗主要来源于主循环泵、区域泵及二次网提升泵,其综合比能耗一般控制在0.1~0.2 kWh/m³·h,对应大中型热网的年电耗在150~300万kWh之间。辅助系统如除氧装置、水处理系统和控制设备亦对整体能耗有非忽略性影响,通常占总能耗的2%~5%。在系统热负荷波动频繁时,泵组频繁启停与高负荷运行将引起能耗异常波动,需通过调频优化与启停策略合理配置运行周期。能耗分析还需考虑输热损失,管网热损一般占供热总量的5%~10%,在管道长度超出50 km的大型热网中尤为显著。

(三) 系统节能潜力与优化方向

在多热源热网系统中,节能优化空间广泛分布于热源配置、负荷调控与系统运行策略各层面。首要节能方向是提升热电联产机组运行负荷率,维持其在最佳热电比区间运转,可提升等效热效率3%~6%。其次,热网水力系统可通过引入区域压差优化控制与动态流量分配技术,降低泵电耗10%~15%。调节工具的智能化升级亦是关键,如采用具备自适应调节算法的智能变频器与温控阀,可有效减少过度流量与不均匀供热导致的能量浪费。此外,在热网结构层面,可通过构建分布式热源协同模型与管网路径优化算法,实现节点热源与用户负荷的热力最短路径匹配,从而降低管网热损约8%。蓄热系统的合理配置与夜间调峰运行亦可实现日内负荷重构,减少高峰时段主机超负荷运行引起的单位能耗上升。

五、存在问题与发展趋势

(一) 当前运行管理中存在的主要问题

多热源热电联产系统在运行管理过程中面临多维度协调不足与系统响应不一致的突出问题。首先,热源出力调度缺乏高精度的协调机制,部分热源在负荷低谷期存在热力冗余现象,出力偏离最优热电比运行区间,导致等效热效率下降5%以上。其次,调度指令传递路径复杂,跨平台数据兼容性差,运行指令的响应滞后时间普

遍超过20s,影响系统对快速热负荷变化的调节能力。第三,缺乏统一的运行绩效评价体系,当前多数系统依赖人工经验调整,导致运行策略缺乏数据支撑,区域能耗水平呈现不均衡状态。此外,部分系统的边缘测控设备配置滞后,末端压差控制阀与智能传感器覆盖率不足60%,直接影响水力调节的实时性与末端热用户的热舒适保障能力,制约了系统整体运行效率的进一步提升^[5]。

(二) 技术发展方向

多热源热电联产系统的技术演进将围绕智能化、集成化与高效化三大方向推进。未来调度系统将向基于人工智能与深度学习算法构建的预测控制平台转型,通过历史运行数据与环境变量构建负荷演化模型,预测精度有望提升至±5%以内。在系统集成方面,热源—管网—用户将通过边缘计算节点形成实时闭环控制体系,控制周期压缩至5秒以内,显著提升响应效率。同时,热储能系统将由传统静态调峰向动态协同储热演进,通过分布式储能单元参与多时间尺度调节,提升日内负荷重构能力。在设备层面,具备双向通信功能的智能调节终端将实现全网互联互通,设备在线率目标维持在98%以上,支持热网远程运维与故障自诊断功能。未来系统构建将更加重视跨能源协同发展,强化与电网、燃气网等多能源系统的数据互联,推动城市能源系统向多能融合、高韧性方向持续演进。

结语

总而言之,城市多热源环网热电联产集中供热系统在实际运行与调节中展现出高度复杂的结构耦合性与调度协同性。通过多热源协同输出、热网动态调节与能效优化控制的有机结合,系统在保障热负荷连续性与供热质量稳定性方面具有显著优势。然而,其运行管理仍面临调度协调不及时、水力控制响应滞后与智能化水平不足等多方面挑战。随着技术持续迭代与系统结构不断完善,城市热网的智能化与低碳化水平将持续提升,未来将朝着多源融合、高效协同与智慧感知一体化方向加速发展。

参考文献

- [1] 王潞潞. 城市多热源环网热电联产集中供热运行与调节实践[J]. 安装, 2025, (05): 38-41.
- [2] 申鹏. 城市集中供热优化运行及节能措施探究[J]. 中国战略新兴产业, 2024, (11): 125-127.
- [3] 朱剑丽. 供热系统平衡调节的方案与运行分析[J]. 居业, 2024, (04): 223-225.
- [4] 薛文军, 于蕾, 宋俊鹏, 等. 多热源联网运行水力工况分析和运行调节研究[J]. 建材技术与应用, 2022, (05): 14-18.
- [5] 杨林. 集中供热系统多热源调度优化分析[J]. 建材与装饰, 2020, (21): 245+248.