

智能化燃气供热系统的设计与节能效益分析

陈 策

(中国雄安集团智慧能源有限公司, 河北 保定 071700)

摘要 智能化燃气供热系统通过整合高效燃烧调控、排烟热量回收、数据驱动调节方案及分布式感知组件, 实现热源与负荷间的精确适配及动态调控。系统架构采用模块化搭建方式, 具备灵活布置与远程监测功能。燃气供应前端通过对燃气管道、调压设施及安全阀门等关键部位实施智能化改造, 集成压力、流量与泄漏检测传感器, 并融合实时数据采集与控制策略, 有效保障燃气供应稳定性与安全性, 为锅炉高效燃烧提供基础支持。调控方案融合负荷预测算法与燃气—空气比例调节机制, 大幅提高热效率与燃气使用效率。能效评价体系纳入单位燃气消耗量、热能利用效率等指标, 结合运行数据开展回归优化, 为节能性能提升提供即时反馈支持。

关键词 智能控制; 燃气供热; 燃气设计; 热效率优化; 排烟余热回收

中图分类号: TU996

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2025.27.021

0 引言

随着城市供热需求的不断增加, 传统燃气供热系统在能源消耗、调控精度等方面已无法满足节能降耗的要求, 智能化调控技术的应用, 为供热系统运行效率的提升开辟了新路径。本文聚焦系统设计要素与节能原理, 搭建系统性分析框架, 致力于厘清设计与节能之间的内在关联。

1 智能化燃气供热系统的组成结构

1.1 系统总体结构与功能分区

智能化燃气供热系统一般包含燃气锅炉主机、热交换装置、供热管网、燃气计量与控制单元、智能控制中心及辅助能效设备等核心模块。燃气锅炉作为热源的核心部件, 承担着燃气能源向热能的转换任务; 热交换模块负责完成热量在一次侧与二次侧之间的传递过程; 供热管网则承担热媒(如热水或蒸汽)的输送与回流工作^[1]。锅炉前端的燃气供给系统包括燃气输送管道、调压稳压设备及安全切断装置, 结合智能传感器网络, 实现对燃气流量、压力及泄漏状态的多点实时监测与联动响应。燃气计量与控制单元可对燃气流量实施实时调节与精密控制, 防止供气不足或能源浪费; 智能控制中心作为系统“大脑”, 协调各子系统运行状态, 实时优化供热策略。

1.2 数据采集与控制模块配置

在智能化供热系统中, 高效精准的数据采集是保障系统优化运行的基础。系统通常部署多种传感器采集关键运行参数, 包括温度、压力、流量及燃气浓度等, 传感器合理分布于锅炉出/回水口、管网节点、燃气

阀组及主要换热单元, 确保监测数据全面且反馈及时。其中, 燃气端设置流量计、压力传感器和可燃气体浓度检测器, 可对调压装置后燃气状态进行闭环监控, 有效提升燃烧系统运行的稳定性与安全性。数据采集模块通过模拟量与数字量输入通道统一接入控制核心, 实现连续上传与状态判断。控制终端配置包括PLC控制器、嵌入式智能调节单元、远程通信模块及HMI人机交互界面, 用于参数设定、运行监控与报警提示。终端布设遵循“集中布点、就近控制”原则, 提升系统响应速度并简化布线结构, 降低延迟与干扰风险。

1.3 系统互联互通与信号链设计

为实现系统内设备的高效协同与数据同步, 智能化燃气供热系统广泛采用标准化工业通信协议, 如Modbus RTU、Modbus TCP/IP、RS485及CAN总线等, 其中Modbus因其良好兼容性被大量应用。各功能模块通过屏蔽双绞线、以太网或无线网络互联, 形成清晰的信号层级架构。

底层设备如传感器和执行器通过RS485串口接入PLC控制单元, 中间层利用现场总线整合多个PLC节点, 上层则由监控平台通过TCP/IP协议与中央控制系统通信^[2]。系统通信结构设计重点保障数据传输的稳定性与准确性, 提升整体运行的可靠性。

2 控制策略与运行机制优化

2.1 分布式控制与集中管理集成

在智能化燃气供热系统中, 使分布式控制与集中管理达成协同, 是提高运行效率和响应速度的核心所在, 分布式控制的核心表现为现场终端对局部运行状

态的实时感知与即时调节，如锅炉局部温度的细微调整、换热单元的开关逻辑把控等都属于此范畴，这些控制单元拥有一定的自主运行能力，能依照预设阈值完成局部的闭环控制，进而减轻系统运行时的压力并加快整体响应节奏。中央管理系统则承担着全局协调职责，依托系统整体运行数据对各模块开展统一调度工作，借助集中式数据分析与策略优化平台，系统可根据热负荷分布状况动态调整供热量分配方式，实现分级响应与协同控制的有机结合，两者借助高速数据总线和标准化协议实现信息互通，构建起“分散执行、集中调度”的复合型控制架构，在维持系统稳定性的基础上，推动智能化调控高效落实。

2.2 供热量调节算法与负荷匹配

在供热系统运行期间，用户端热负荷会受到日夜时段变化、季节交替更迭、天气状况改变等因素影响而呈现动态波动特点，为确保热能供需保持平衡，智能化燃气供热系统依靠精准的供热量调节算法与负荷预测模型实施实时调整。常用算法包含比例积分微分（PID）控制、自适应模糊控制、基于回归分析的负荷建模算法等类型。这些算法通过收集室外温度、末端水温、建筑热惯性等多项参数，动态预测下一时间段所需供热功率，以此调节锅炉出水温度、燃气供给量及循环泵转速，实现热量供需的精准契合。系统还能预先设置多种运行模式（如工作日/节假日模式、昼夜切换模式等），在不同负荷场景中自动转换调节逻辑，提升运行灵活性与节能效果。智能控制终端接收负荷预测结果后，可快速响应指令进行微幅调节，避免设备频繁启停与波动升温，保障供热质量的稳定。

2.3 故障预警与异常运行自适应调整

智能控制系统具备自学习能力，能够在长期运行中记录各类故障发生的时点、参数特征与应对措施，逐步形成面向多种异常状态的知识库。通过对历史数据的分析比对，系统能不断优化识别模型，提高对非典型工况的判断准确性。在异常状态解除后，系统将依据当前参数智能修正运行策略，实现运行平稳过渡。例如：当锅炉发生短时故障并重新启动时，系统可自主控制燃烧输出的恢复节奏，避免热冲击对换热部件产生损伤。该机制的引入不仅提升了运行稳定性，也为实现全生命周期的智能运维提供了基础支撑^[3]。

2.4 燃气管道泄漏检测与预警系统设计

燃气供热系统的安全性高度依赖管道的密封稳定。为精准识别泄漏隐患，系统引入多层级检测技术与实

时预警机制，构建“感知—判断—响应”闭环架构。泄漏检测主要依靠传感器监测与声学、红外图像等辅助手段。其中，MEMS型甲烷传感器、电化学可燃气体检测器能实时感知周围气体浓度，一旦浓度超过设定阈值（如低于10%LEL），即触发一级预警。系统通过多点传感器融合算法，将浓度、压力、温度等参数进行综合分析，结合趋势滑动平均与突变识别方法，提高早期识别准确率，降低误报率。预警机制分三级响应：一级为提示性通知；二级启动通风并报警提示运维人员；三级则执行紧急切断主燃气阀门，启动联动报警，并向远程监控平台发出高危信号。

3 节能关键环节与控制策略

3.1 排烟热能回收与余热利用方式

在燃气供热系统运行过程中，排烟温度通常会达到160℃以上，未经处理的高温烟气直接排放会造成大量热能损失，所以，排烟热能回收成为节能控制的首要环节。常用的热回收装置是冷凝式换热器，其安装在锅炉排烟口之后，能够对烟气中的显热和部分潜热进行回收，通过将换热器内的低温水引入并与烟气进行热交换，不仅能把排烟温度降低到60℃以下，还能使锅炉的热效率提高约5%~8%。

在控制策略方面，系统需要监测烟气温度、烟气含湿量以及换热器进出口水温，以此实现热回收效率的动态调节，当系统负荷较低、烟气温度偏低时，控制系统会自动调整旁通阀门开启角度，防止烟气凝结导致换热器堵塞；而在负荷较高、烟气温度充足的情况下，则维持全量回收运行模式，同时，通过流量调节泵精确控制冷却水流速，让换热器换热效率始终保持在高效区间，保障排烟热量得到最大程度利用。

3.2 燃气燃烧效率的动态调整方案

燃气燃烧效率直接关系到系统的能源消耗水平，因此对燃烧状态的精准控制是节能运行的核心内容，燃烧效率主要受空气与燃气混合比例、火焰温度、燃烧强度以及残氧浓度等因素影响，系统通过配备燃烧控制器与氧含量传感器，持续监测燃烧室内残氧量与烟气组分，实现燃气与助燃空气的动态匹配，通常控制目标是将残氧含量控制在3%~5%之间，确保燃烧充分的同时避免过剩空气带来的热损耗。

燃烧效率的控制算法依托闭环控制逻辑，在采集氧含量与烟气温度等实时数据后，自动调节燃气阀门开度及鼓风机风量输出，当燃气热值发生波动或环境温度变化导致燃烧状态偏离目标值时，系统能够迅速

做出响应，通过修正供气量与风量比例，恢复稳定的燃烧状态，为保障燃烧效率持续高效，系统还可根据运行工况调整点火频率与火焰长度，优化火焰形态，进一步减少燃气浪费与排放热损^[4]。

3.3 控制周期与能耗响应协调机制

控制周期是影响系统响应灵敏度与节能效率的重要参数。过长的控制周期可能导致能量供给滞后、效率下降，而过短则会引起频繁调节，增加设备磨损与运行波动。

在系统设计中，通常将温度控制周期设定为 30 秒至 60 秒，压力控制周期为 5 秒至 15 秒，流量调节响应时间控制在 10 秒以内。这些参数配置有助于在保证控制精度的同时，兼顾系统稳定性与设备寿命。

4 节能效益评估与系统调优方向

4.1 节能效果的量化指标体系设计

为科学评估智能化燃气供热系统的节能效果，需建立一套多维度、可量化的指标体系。常用的能效评估指标主要包括：

锅炉热效率（η）： $\eta = (\text{有效热量输出} \div \text{燃气输入热值}) \times 100\%$ ，反映锅炉系统整体能效水平；单位供热能耗（E）： $E = \text{燃气消耗量} \div \text{供热量}$ ，常用单位为 Nm³/GJ；平均负荷利用率（L）： $L = \text{实际热负荷} \div \text{设计热负荷}$ ，衡量系统运行与设计匹配程度；能耗降低率（R）： $R = (\text{基准能耗} - \text{当前能耗}) \div \text{基准能耗} \times 100\%$ ，用于对比节能改造前后差异。

4.2 热能利用率与单位耗气量分析

热能利用率是衡量系统节能性的核心指标，其高低取决于热量从锅炉产生到用户端释放的全过程损耗控制，通过合理控制热交换损失、管道保温热损以及末端控制失配问题，可显著提高热能有效利用比例，常见目标值为 85% 以上，优质系统可达到 90% 以上^[5]。

单位耗气量分析侧重于每单位热能输出所对应的燃气消耗量，在实际运行中，应对不同负荷水平下的燃气使用效率进行横向比较，找出高能耗运行段并进行参数优化。

4.3 系统运行数据的回归优化机制

在系统长期运行阶段，海量历史运行数据已成为节能优化工作的核心资源，借助对运行数据的统计梳理、模型构建及回归分析，能够实现运行参数的动态校准与系统策略的不断完善。

系统需对关键指标（如负荷波动、锅炉启停频次、

燃气阀门开度、回水温度等）开展连续监测记录，进而构建历史数据库。在此基础上运用多元回归或机器学习算法，针对燃气消耗与各参数间的相关性完成模型搭建：

$$Y=aX_1+bX_2+cX_3+d$$

式中，Y 为单位耗气量，X₁ 为外部环境温度，X₂ 为热负荷变化，X₃ 为供回水温差，a、b、c 为模型系数。

建模工作完成后，系统能够自动判别何种运行条件下能耗处于较高水平，进而给出参数调节方案，包括提高供水温度设定值、增加循环泵运行时长等，模型内置滚动修正功能，伴随新数据的持续纳入，权重因子将得到自动更新，让优化路线更符合实际运行状况，推动节能控制朝着智能化、数据化与自我进化的方向发展。

5 结语

智能化燃气供热系统在结构设计、控制策略与节能机制等方面呈现出突出优势，模块化组成与分布式控制的有机融合，既提高了系统运行的响应速度，也强化了供热调节的精确程度与稳定性能。在节能领域中，系统依靠排烟热回收、燃烧优化与周期控制等多环节配合，实现热效率提升与能耗降低的双重成效。燃气部分通过智能化输配结构、调压稳控技术及多点安全检测技术，确保供气稳定与安全联动，进一步保障燃烧效率与系统可靠性。依托数据驱动的运行评估与调优体系，为系统持续改进提供科学支撑，为现代供热系统的高效、安全运转筑牢基础。

参考文献：

- [1] 王朝. 燃气锅炉的节能运行及效益分析 [J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(09):141-142, 144.
- [2] 何勇, 张伟程. 浅谈燃气锅炉余热回收消白技术的应用 [J]. 特种设备安全技术, 2022(01):11-13, 20.
- [3] 王朝. 基于集中供热系统的燃气锅炉控制策略改进及其节能效益 [J]. 科技与创新, 2024(11):106-108, 111.
- [4] 罗秀文, 冀佩璇. 燃气节能技术与管理探析 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(05):117-118, 141.
- [5] 梁鹏飞, 郝世超, 张冲, 等. 基于热泵技术的燃气锅炉余热回收节能效益分析 [J]. 上海节能, 2018(07):541-545.