

自动化与信息化协同视角下地热暖通工程的低碳环保运行机制研究

王宇轩

中石化绿源地热能开发(陕西)有限公司 陕西 咸阳 712000

摘要: 地热暖通工程作为可再生能源建筑系统的重要组成部分,其低碳运行需求日益凸显。文章研究了地热系统中自动化与信息化协同机制的结构配置,分析了基于动态调节、负荷预测与能效评估的运行策略,探讨了数据采集、融合建模与异常识别的支撑体系,构建了具有集成控制能力和节能优化逻辑的运行机制。研究成果可为地热暖通系统的节能改造与智能运行提供技术支撑,提升绿色建筑领域能源利用效率与数字化管控水平。

关键词: 地热暖通工程; 自动化控制; 信息化集成; 低碳运行

DOI:10.12417/3083-5526.25.01.010

1 引言

在建筑碳排放约束趋严与可再生能源利用加速推进的背景下,地热暖通系统以其清洁稳定的供能特性成为低碳建筑的重要支撑。地热系统运行中仍存在热量调控滞后、能效监测粗放与运行能耗不均等问题,制约其节能潜力释放。引入自动化与信息化协同机制,有助于构建基于实时反馈、精准调节与动态响应的运行模式。文章围绕系统结构设计、能效控制策略与数据支撑体系展开技术分析,探索地热暖通工程在复杂工况下的低碳运行路径,为其在新型建筑能源系统中的规模化部署提供可实施的工程依据。

2 系统结构与控制技术基础

地热暖通工程通常采用一次换热、二次循环和终端采暖三级结构布局,其中一次系统以地热井为热源,负责将浅层地热能量经换热装置传递至中间热交换环节;二次系统构建闭式热水循环回路,借助循环泵驱动实现热能在楼宇各层间的高效输送;终端采暖部分包含地板辐射、风机盘管或低温散热器等形式,直接与室内负荷响应连接。系统在结构分区上需设置独立的换热站与平衡分配节点,通过控制阀组实现压力与流量的分区调节。在自动化控制适配方面,需对各分层节点嵌入温度、压力与流量监测点,并预设与控制平台的数据接口,实现热源输出、输配过程与终端响应之间的多级协调运行逻辑,确保各层系统在不同负荷条件下具备联动调控能力与能效协同基础。

3 协同机制下的能效控制策略

3.1 供回水温差的动态调节策略

地热系统运行中,供回水温差直接反映热交换效率与终端负荷匹配情况。调节策略基于实时温度传感器采集的一次侧井口水温、二次侧供回水温度及流量数据,构建动态反馈回路,在控制平台中设定目标温差区间,并对温差偏离值进行连续计算与响应调整^[1]。控制逻辑中,若回水温度持续低于设定下限,系统通过调节地热泵出水温度或调升换热器传热效率,提升热源输出等级;若回水温度高于上限,系统降低循环泵频率或部分关闭分区流量阀,缓解热量过剩造成的能效损失。

调节过程需考虑外部气温变化与室内负荷浮动的耦合影响,系统在控制算法中引入动态修正因子,对外界扰动做出灵敏响应。在控制执行层,通过PID调节器输出调节指令至变频驱动装置,调整地热泵运行频率与泵组流量。在数据平台中,供回水温差趋势与调节响应时间持续记录并形成闭环调优机制。

3.2 机组启停的智能调度逻辑

地热机组的启停决策直接影响系统能耗与响应效率,需构建基于负荷预测的调度模型实现精细化控制^[2]。调度逻辑采用近24小时负荷曲线与气象预测数据作为输入,结合区域室温历史变化数据,利用多因子回归模型预测未来2至4小时的热负荷峰值与波动幅度。预测模型输出负荷阈值后,系统与现有机组运行状态进行对比,判断是否需新增或暂停地热单元,避免出现长时间超负荷运行或低负荷高能耗维持状态。

作者简介: 王宇轩,1996.8,男,汉,陕西,中石化绿源地热能开发(陕西)有限公司,初级工程师,大学本科,自动化。

调度算法在调度周期内每 15 分钟更新一次判断指标，实时对比预测负荷与实际运行负荷偏差，若偏差超过设定范围，系统将触发快速调度响应模块。执行层中各机组设有独立启停控制接口，调度中心输出逻辑指令后，机组响应延迟小于 10 秒，保障调度决策的即时性与连续性。启停控制同时联动水泵组与换热单元运行状态，确保各设备在热源切换过程中参数匹配稳定。该机制可避免频繁启停引发的热冲击与系统不稳定，有效控制单位热量成本与设备运行周期。

3.3 能效评估的实时计算方法

地采暖通系统的低碳运行需构建稳定、精度高、可追踪的能效评估体系，系统能效不仅受热量传输路径的完整性影响，还与换热效率、流量分布、设备启停频率及末端响应耦合紧密。基于自动化与信息化协同控制的运行环境，评估模块需实时接入供回水温度、流量、电能输入、热量输出等多个维度的运行数据，在控制平台中完成数据清洗、指标映射与区间划分操作^[3]。每个分区设有热量表与智能电表，采集当前单位时间内热量输送值与电能消耗值，再依据设定采样周期形成连续计算流。系统需匹配高频采样能力与数据传输稳定性，确保输入数据与设备行为同步更新，为后续能效动态分析提供基础保障。

在计算结构中，平台针对不同楼层、管段、热用户单元设置独立能效评估路径，将采集到的能耗数据按时间序列存储并打标签，形成按区域划分的能效数据库。系统运行状态由平台进行周期性计算，生成反映当前各区域供热效率的量化指标。数据建模过程中引入历史工况对比维度，分析各时段、各区域能效表现与设定基线的偏离程度。在供热异常波动、高负荷持续或设备启停频繁阶段，能效结果呈现明显偏移，平台依据偏离阈值触发局部控制策略优化。计算结果除用于实时调节参考，也作为后期节能运行效果评估与策略调整的重要依据，构成完整的闭环反馈结构。

4 环保运行的数据支持体系

4.1 温度流量等关键参数采集方式

地采暖通系统的能效控制与智能响应依赖于高频、高精度的运行数据采集机制，在系统节点布设温度、流量与压力等多类型传感器是构建数据支持体系的基础^[4]。供热源出口与换热器进出口设置 Pt100 型温度传感器，测量范围 -50℃ 至 150℃，误差控制在 ±0.15℃ 以内，采样周期设定为 10 秒，用于实时反映热源传输温度稳定性；楼层环路及总管线流量监测采用超声波流量计，安装于回水主管、分支管及热量分户节点，响应时间小于 1 秒，支持正反向测量；压力测量采用数字压力变送器，覆盖供水泵前后、换热器进出口及

末端分配阀口位置，量程 0~1.6MPa，精度等级为 0.2 级，具备瞬态压力捕捉能力。在系统数据总线层，所有传感器接入 Modbus-RTU 协议或 CAN 总线，接入边缘控制器完成预处理，统一上传至数据中台，并与控制策略联动形成闭环。为保证数据连续性与稳定性，所有传感设备支持电磁屏蔽与掉电存储功能，具备日数据冗余与 72 小时缓存能力。

为构建高频响应的数据采集网络，系统在关键位置部署温度、流量与压力传感器，具体测点参数配置如下表 1 所示。

表 1 地采暖通系统关键测点参数配置表

测点位置	参数类型	安装位置说明	设备型号	量程或范围	精度	采样频率 (秒)
地热井出水管	温度	地热源出口段	Pt100	-50 ~ 150℃	±0.15℃	10
换热器进口主管	温度	一次换热入口	Pt100	-50 ~ 150℃	±0.15℃	10
二次供水主管	流量	二次系统供水总管	USM-3000	0 ~ 100m³/h	±0.5m³/h	5
二次回水主管	流量	二次系统回水总管	USM-3000	0 ~ 100m³/h	±0.5m³/h	5
用户支路入户管	流量	三号楼供热支管	USM-3000	0 ~ 25m³/h	±0.2m³/h	5
换热器出口	压力	二次侧出口前阀组	DPT-1600	0 ~ 1.6MPa	0.2 级	5
环路末端地板回水口	温度	用户地板采暖回水末端	Pt100	-50 ~ 150℃	±0.15℃	10
供水泵出口	压力	泵组出口压力控制点	DPT-1600	0 ~ 1.6MPa	0.2 级	5

该表涵盖供热系统从地热井至用户末端的关键测点，温度测点覆盖地热源出口、一次换热入口与回水末端，便于判断热量损失与换热效率；流量测点布置在供回水主管及用户支管，支持区域能耗分项计算与负荷匹配分析；压力监测集

中于泵出口与换热器出水口，有助于监控水力平衡状态与阻力变化趋势。采样频率设定在 5–10 秒之间，可满足控制平台对高频动态变化的响应需求，设备精度控制在 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 和 $\pm 0.5\text{m}^3/\text{h}$ 以内，满足自动调节的反馈精度要求。

4.2 多源数据的融合建模路径

地热系统运行状态受供热工况、建筑热负荷与环境扰动等多因素影响，为实现精准的能耗建模与响应预测，需构建基于多源数据融合的输入特征体系^[5]。在模型设计中，输入变量包括系统采集端的实时温度、流量、压力与能耗数据，用户侧的用热历史记录与分时段热负荷曲线，以及气象平台提供的外部环境温度、湿度、风速与日照数据。各类数据在时间维度统一以 5 分钟为最小采样粒度，在空间维度按楼栋、楼层、支管等逻辑区域划分索引标签，构成高维稀疏输入矩阵。建模过程采用 LSTM 时间序列网络与 CNN 结构结合方式，将局部负荷波动与宏观趋势特征分别提取后融合，输出为预测时间段内的目标热负荷与能耗区间。

模型训练采用滑动窗口方式构建训练样本序列，确保数据连续性与预测结果平滑性，损失函数中加入温差偏移惩罚项，提升模型在极端负荷下的精度表现。特征构建阶段引入标准化与主成分压缩策略，避免多源输入维度失衡与冗余干扰对建模精度的负面影响。在模型部署端，融合模型接入运行监控平台 API，实时输出短期能耗预测结果与热负荷调度建议，结合当前系统参数自动调节换热器设定温度或提前启动预热流程。该建模路径可大幅提升供热策略前瞻性，降低系统响应滞后引起的能耗浪费与终端不适。

4.3 异常能耗的自动识别机制

地热系统在长周期运行过程中可能出现设备失调、参数漂移或用户行为异常等情况，导致能耗突变或能效下降。为实现高时效的状态识别与响应调节，系统构建基于滑动窗口算法与行为判别模型的能耗异常识别机制。滑动窗口模块对单位时间内的能耗数据进行滚动聚合，设定标准阈值区间并计算实时偏移量，识别如短时能耗激增、热量输出异常稳定或泵频不合理波动等模式。每个窗口周期内，系统提取能效比 η 值序列、供回水温差波动、负荷与热量匹配度等多维特

征作为输入，送入判别模型进行状态分类。

行为判别模型采用改进的 K-Means 与孤立森林算法组合结构，K-Means 用于常规运行状态聚类建模，孤立森林用于识别极端偏离点。当新输入特征落入孤立区间且偏离主群簇时，系统判定为异常状态，并结合具体特征项进行类型判断，如“局部换热效率下降”“回水温度异常高”“供热量高负荷无响应”等结果标签。识别结果联动告警模块，系统同步启动调节流程、设备检测或区域负荷重分配策略。此机制具备实时响应与持续自适应能力，可覆盖异常状态识别、分类与响应三阶段，提升系统稳定运行水平与数据驱动下的智能纠偏能力。

5 结论

研究构建了面向地热暖通系统的自动化与信息化协同运行机制，完成了系统分层结构与控制单元集成方式的技术配置，建立了基于温差调节、负荷预测与实时能效评估的能耗优化策略，设计了覆盖温度、流量与压力多维参数的采集体系，构建了融合多源数据的建模路径与异常识别机制，形成了闭环控制与数据驱动一体化的运行模式。技术成果具备在复杂建筑工况下的适应能力与工程复制价值，为低碳建筑供热系统的智能运行提供了可推广的技术支撑，未来可在算法优化与平台拓展方面持续深化。

参考文献：

- [1] 宋兆立. 信息化背景下洗煤厂控制自动化技术实践策略[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (22): 160–162.
- [2] 陈智敏. 以 PLC 为基础的电气自动化控制水处理系统[J]. 水上安全, 2024, (16): 44–46.
- [3] 王鹏. 关于化工生产中自动化控制系统应用的探析[J]. 化肥设计, 2024, 62 (01): 43–45.
- [4] 王琰. 建筑暖通施工技术要点与暖通工程造价成本控制[J]. 四川水泥, 2021, (08): 125–126.
- [5] 吕宁. 浅论民用建筑暖通工程的施工技术[J]. 现代物业 (中旬刊), 2020, (07): 110–111.