

暖通工程中地热资源高效利用的自动化调控体系构建与环保管理模式创新

刘 瑛

中石化绿源地热能开发(陕西)有限公司 陕西咸阳 712000

摘要: 在全球能源转型背景下,地热资源作为暖通工程清洁能源面临能效波动与环保管理不足的挑战。研究旨在构建自动化调控体系并创新环保管理模式以实现高效利用。采用多源协同运行框架集成地热井群与热泵系统,开发基于负荷预测的动态优化控制策略。同步建立全生命周期环境风险评估模型与碳足迹实时追踪系统,形成智能运维决策平台。实证表明该体系显著提升系统能效与环保绩效,为区域能源站提供可推广的技术管理双核解决方案。

关键词: 暖通工程;地热资源;自动化调控;环保管理;系统集成

引言

全球能源结构转型加速推进,建筑领域碳排放持续攀升,推动暖通系统向清洁化、智能化演进成为关键路径。地热资源因其储量大、稳定性强、近零排放的特点,在区域供暖制冷领域展现出显著优势。当前地热利用普遍存在能量提取效率波动显著、运行调控依赖人工经验、热失衡风险难以精准预判等问题。传统粗放型管理模式,地热尾水回灌监管不足、地下流体污染隐患未能有效控制,系统运维成本高且环保绩效评估体系缺失。这些瓶颈阻碍了地热能在暖通工程的规模化应用,亟需通过技术创新打破能效与环保的双重约束。本研究聚焦自动化调控与智能管理的融合突破,为提升地热资源可持续利用水平提供系统化解决方案,对实现建筑领域双碳目标具有现实意义。

一、地热资源高效利用的自动化调控体系构建

(一) 多源协同运行框架设计

地热资源高效利用的根基在于建立科学的多源协同运行架构,该框架需精细规划地热井群、热泵机组集群及蓄能装置的物理连接与功能匹配。深层地热井采用径向并联的网络化布局,增强各井间热流体交互能力并稳定总出力,规避单井衰减导致的系统扰动。中浅层地埋

管换热器依据建筑集群热负荷密度进行差异化分区部署,在负荷集中区提升单位面积取热功率,在边缘区降低钻井密度以节约投资成本。热泵机组集群按温度区间进行梯级配置,高温水源热泵直接提取深层地热水热量服务供暖核心网络。低温水源热泵则利用高温热泵产生的尾水余热进行二次提温,面向散热器需求较低的分区供暖或生活热水制备。

(二) 动态优化控制策略

系统高效稳定运行的核心驱动力源自基于多源信息融合的智能控制策略,控制中枢构建了融合建筑围护结构热惰性特征与精细化气象预报数据的地面负荷预测模型,可滚动输出未来两小时建筑群体的逐时动态热需求。控制系统核心采用高度自适应的改进型比例积分微分算法。该算法独特的优势在于其核心参数具备随运行工况自动整定能力,当监测到末端负荷变化速率超出设定阈值时,比例环节参数立即强化以快速响应需求突变^[1]。积分环节引入重置逻辑以避免冷热源出力惯性导致的调控超调或振荡问题。微分环节参数则紧密结合系统热输运滞后特性进行调整,精准补偿执行机构的动作延迟影响。

(三) 故障自诊断模块

保障系统长期可靠运行必须依赖于前瞻性的智能故障诊断能力,该模块构建了覆盖全系统关键环节的异常识别与早期预警体系。水力平衡诊断基于管道内流体状态实时计算修正雷诺数,动态刷新各管段设计流量阈值基准。当实际流量与压差组合异常偏离理论值达到警戒范围且稳定持续时,系统立即触发精准的管网故障定位报警。热力系统结垢状态评估通过量化关键换热设备监

作者简介: 刘瑛,女,汉,1987年10月18日,籍贯:陕西兴平,学历:本科,陕西师范大学教育管理(自考)本科。评职称学校专业为:咸阳师范学院,应用化工技术,专科。研究方向:环保管理工程师。

测温差与理论温差的偏差值，计算热阻的实时增加值，并结合该设备历史维护数据建模预测结垢趋势，主动生成带有失效概率评估的设备维保工单。故障识别网络全面覆盖六大高发风险场景，精确识别因地质条件或布井不合理导致的地热井群热短路现象。构建地温场热响应模型评估热抽取导致的储层温度衰减速率及恢复潜力。基于管路振动频谱分析诊断水泵潜在气蚀风险^[2]。

二、地热利用环保管理模式的智能化创新

(一) 全生命周期环境风险评估

地热系统的全周期环保管控依托结构化风险量化模型实现科学决策，模型针对五类核心环境风险建立动态

评价机制，地热流体泄漏风险通过监测井中氯离子扩散速率与地层裂隙率的乘积建立概率函数。储层热失衡风险依据热响应测试曲线斜率与抽灌温差计算热影响边界。回灌堵塞风险关联悬浮物浓度、岩层渗透率衰减系数及注入压力突变阈值三重参数。诱发微震风险基于断层倾角传感数据与流体注入动量构建预警模型。土壤退化风险则整合重金属迁移速率、作物富集系数及地下水pH偏移量形成污染潜力指数^[3]。评价体系采用改进的AHP-熵权组合赋权法，既纳入专家经验又强化数据驱动特性，显著降低主观评估偏差，环境风险评估指标权重与参数如表1所示。

表1 环境风险评估指标权重与参数表

风险类型	化学泄漏概率 (%)	热影响半径 (km)	堵塞风险系数	微震能量阈值 (J)	土壤退化指数
地热流体泄漏	0.18	不适用	不适用	不适用	不适用
储层热失衡	不适用	0.24 (半径基准值1.2)	不适用	不适用	不适用
回灌系统堵塞	不适用	不适用	0.21 (阈值0.8)	不适用	不适用
诱发微震	不适用	不适用	不适用	0.17 (临界值5E3)	不适用
土壤环境退化	不适用	不适用	不适用	不适用	0.20 (限值0.7)

注：权重总和为1.00。括号内为各指标定量化警戒阈值

模型每72小时自动校准参数敏感性，当某指标连续三期突破表中阈值时，如堵塞系数 > 0.8 ，自动触发井群轮休与化学阻垢强化程序。

(二) 碳足迹实时追踪系统

碳排放的精细化管控需要分钟级动态监测体系支撑，在能源站关键节点部署23类传感设备，智能电表实时捕获热泵机组功率波动，超声波流量计耦合PT1000温度传感器计算管网热效率损失值，结合省级电网碳排放因子动态库生成直接碳排强度。间接碳排核算建立三类模型，钻井工程隐含碳模型关联套管钢材用量与低碳系数 $(0.28tCO_2/t)$ 。化学药剂碳足迹模型基于投加浓度匹配物质流数据库。运输排放模型依据车辆GPS轨迹与载重计算柴油消耗量。数据处理层采用时间窗对齐算法整合多源异构数据，消除采样频率差异导致的统计偏差^[4]。

(三) 智能运维决策平台

智能运维决策平台深度融合设备实时状态监控与环保合规要求构建闭环管理机制。平台以故障诊断模块输出的异常代码为触发起点，叠加环境风险评估模型生成的多维度安全等级评价，建立工单派发的智能决策矩阵。当监测到换热器结垢系数突破0.85阈值且设备位于水源保护区或生态敏感区半径范围内时，系统自动启动红色

应急预案流程，即刻关联具备Ⅲ类危险废物处置资质的专业服务商生成特种作业工单，同步推送化学清洗剂安全数据表及邻近水体防护方案。备件管理核心采用长短期记忆网络构建关键部件寿命预测模型，该模型持续学习压缩机阀片累计磨损量随运行时长、启停循环次数及润滑工况的变化规律，在部件剩余寿命达到临界失效点前十四天精准推送更换预警，关联供应链系统自动锁定符合RoHS指令的低碳备件库存并触发采购流程，有效规避传统模式因突发故障导致的非计划性停机及应急排污风险^[5]。环保合规引擎深度整合56项国家污染物排放标准与技术规范条款，通过自然语言处理技术实时解析运维记录中化学药剂投加浓度、废弃离子交换树脂编码、油水分离器废液处置方式等关键字段，自动识别异常操作行为并生成结构化整改报告，对违反《地下水污染防治条例》的回灌水质超标事件自动溯源至责任机组生成处罚建议书。

三、体系集成

(一) 某区域能源站实证分析

系统在华北某20万 m^2 科教园区能源站完成全周期集成验证，园区涵盖科研实验室、教学场馆及学生公寓三类负荷特性差异显著的建筑类型。冬季供暖测试期12个

月持续采集核心机组运行状态参数，高温地热井群维持平均出水温度62.3℃，经热泵提温后向主干网输出78℃热水满足末端需求。蓄能装置在谷电时段以1.8℃/h速率存储热量，日间负荷高峰时段提供27%峰值热负荷补偿^[6]。夏季制冷模式验证重点关注地源侧冷负荷匹配能力，地埋管换热器在连续运行时段将释热强度稳定控制在45W/m设计阈值内。关键能效参数对比显示，新型控制系统使热泵机组年均性能系数COP值从3.24提升至4.15，增幅达28.1%。系统输配能耗指数由0.42kWh/GJ降至0.29kWh/GJ。由于故障预警准确率达到91%，计划外停机时长缩减56%，能效与运维综合性能对照结果见表2。

表2 能效与运维综合性能对照表

指标	传统系统	新体系	升降幅
热泵年均COP	3.24	4.15	+28.1%
单位供热量输配电耗 (kWh/GJ)	0.42	0.29	-31.0%
运维费用 (万元/年)	163.7	135.9	-17.0%
故障响应时效 (h)	8.3	2.1	-74.7%

系统在过渡季运行验证中展现优异调节适应性，当实验室突发热需求波动率达40%时，蓄能装置响应滞后时间不超过12分钟，保障末端室温偏差 $< \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的精密环境要求。

(二) 环保效益量化评估

环境可持续性验证通过地下水温长期监测与碳减排双维度展开，设置四眼监测井分别位于回灌井上游100m、下游300m、800m及1.5km处，每6小时自动采集地层温度剖面数据。连续两年监测表明，系统启用后热羽流影响范围收缩至650m半径内（原系统达1.2km），距回灌井300m处地层温度年波动幅度由4.8℃收窄至1.3℃。热恢复动力学分析显示停运期地温自然回升速率提升至0.23℃/天，较原有系统加速41%。碳减排核算采用全生命周期方法，计入隐含碳排放及运行直接排放。系统年供能总量2.16万GJ工况下，因能效提升实现直接碳减排1843吨。智能运维减少工程车出动频次带来额外236吨柴油减排。区块链管理的化学品投控体系使阻垢剂用量降低34%，间接削减276吨化学碳足迹。园区总碳排放强度从83kgCO₂/m²降至65kgCO₂/m²，年总减排量达

2355吨^[7]。环保风险管控成效同步凸显，环境风险评估模型成功预警三次中度堵塞风险，触发回灌井轮替操作使运行中断时间缩短78%。

结论

本研究系统构建了地热资源开发与环保管控深度融合的技术管理体系。自动化调控体系通过多源协同架构破除传统热源负荷脱节困境，基于动态优化控制实现能量梯级利用效率突破。智能环保管理模式依托全生命周期风险评估机制和实时碳追溯网络，将被动污染治理转变为主动过程防控。实证表明该体系在能效优化、风险预警及碳减排方面形成三重协同效应，其技术内核为解决地热利用中的热失衡、运维粗放、监管缺失等共性问题提供方法论支撑。该成果可直接迁移应用于区域能源站新建或改造项目，为构建近零排放建筑供能系统确立技术标准范式，对推动暖通行业绿色低碳转型具有示范价值。通过智能调控与环保管理的深度融合，地热资源从单一清洁热源升级为可持续城市基础设施的核心单元，为我国新型能源体系建设贡献可复用的技术管理双轮驱动方案。

参考文献

- [1] 王御棋, 文继卿. 现代建筑暖通空调工程的节能设计与施工技术探讨[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (22): 190-192.
- [2] 刘雪荣. 基于绿色节能的暖通工程水源热泵技术应用[J]. 制冷, 2025, 44(04): 10-13.
- [3] 王召阳, 李忠满. 工程设计中绿色建筑暖通系统集成创新研究[J]. 科技与创新, 2025, (14): 194-196+200.
- [4] 张柏虎. 关于建筑施工中机电工程技术的应用模式研究[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(07): 85-86+89.
- [5] 刘现敏. 住宅建筑中暖通空调工程的节能设计探究[J]. 居舍, 2025, (20): 88-91.
- [6] 尹岩峰. BIM技术在暖通工程设计施工中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (19): 83-85.
- [7] 郭成斌. 暖通工程中的地源热泵技术的应用[J]. 门窗, 2014, (03): 84.