

基于 LightGBM 的集中供热系统预测控制策略研究

王荣鑫¹, 葛振福¹, 侯晨晨², 王越洋²

(1. 淄博市热力集团有限责任公司; 2. 淄博热力有限公司, 山东 淄博 255000)

摘要: 针对城市集中供热系统大时滞非线性、换热站负荷预测与调控过度依赖人工经验、系统预测及调控过程不精细、不及时以及系统能耗偏高等现状, 提出了一种基于轻梯度提升机 (Light Gradient Boosting Machine, LightGBM) 的集中供热系统预测控制策略。首先, 结合供热系统气候补偿工艺原理, 建立了基于 LightGBM 换热站回水温度预测模型, 用以确保回水温度预测目标的及时性与可靠性; 其次, 设计了基于移动加权平均算法的预测函数, 结合 PID 控制算法实现了集中供热系统的精准负荷预测与高性能调控。实践结果表明, 所提出的基于 LightGBM 的集中供热系统预测控制策略, 可及时精准地预测换热站运行负荷且具有更好的超前控制效果, 有效地提高了集中供热控制系统的可靠稳定性能。

关键词: 集中供热系统; LightGBM; 负荷预测; 移动加权平均; 预测控制

中图分类号: TP 273

文章编号: 1000-0682(2024)03-0038-04

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.007

Research on predictive control strategy for central heating system based on LightGBM

WANG Rongxin¹, GE Zhenfu¹, HOU Chenchen², WANG Yueyang²

(1. Zibo Heating Group Co., Ltd.; 2. Zibo Heating Co., Ltd., Shandong Zibo 255000, China)

Abstract: A predictive control strategy for centralized heating systems based on Light Gradient Boosting Machine (LightGBM) is proposed to address the current situation of large time delay nonlinearity in urban centralized heating systems, excessive reliance on manual experience in load prediction and regulation of heat exchange stations, imprecise and untimely system prediction and regulation processes, and high system energy consumption. Firstly, based on the principle of climate compensation technology in heating systems, a LightGBM heat exchange station return water temperature prediction model was established to ensure the timeliness and reliability of the return water temperature prediction target. Secondly, a prediction function based on the moving weighted average algorithm was designed, and combined with the PID control algorithm, precise load prediction and high-performance regulation of the centralized heating system were achieved. The practical results show that the proposed LightGBM based predictive control strategy for central heating systems can accurately predict the operating load of heat exchange stations in a timely manner and has better advanced control effects, effectively improving the reliability and stability performance of the central heating control system.

Keywords: central heating system; LightGBM; load forecasting; moving weighted average algorithm; predictive control

收稿日期: 2024-02-19

第一作者: 王荣鑫 (1975—), 男, 山东淄博人, 本科, 高级工程师, 研究方向为智慧供热系统研发, 智能传感器应用等。

通信作者: 葛振福 (1989—), 男, 山东淄博人, 硕士, 工程师, 研究方向为供热系统自动化控制, 智慧供热系统研发等。

0 引言

随着人们对供热质量与供热服务的更高追求, 兼具节能降耗及提升用户体验的智慧供热控制策略

在行业应用中的关注度日益提升^[1-2]。在集中供热系统中,换热站的负荷预测及控制仍然过度依赖人工经验,负荷预测的精确度与控制性能指标也不尽人意。因此,对供热负荷进行实时高精度预测并实现系统高性能控制,是实现集中供热系统稳定可靠运行及节能降耗的重要途径^[3-4]。

供热系统换热站负荷预测方法主要包括历史经验法、气候补偿线性回归法等;换热站温度控制方法主要依靠基于传统 PID 算法的控制策略^[5-6]。虽然传统负荷预测及调控策略有较好的适用性及便捷性,但考虑预测准确率低、控制性能不高等问题,不利于实现系统节能降耗与最优控制。

鉴于此,该文在集中供热控制系统的基础上,针对传统供热系统能耗偏高、大惯性大时滞等特点^[7-8],提出了一种基于 LightGBM 算法^[9-10]与移动加权平均算法相结合的目标回水温度预测与控制系统,分别设计了基于 LightGBM 算法的回水温度目标值预测模型、基于移动加权平均算法预测函数的双闭环控制策略。最后,对文中所提出的负荷预测与控制策略进行详实的实践应用分析,证实基于 LightGBM 的集中供热系统预测控制策略的优越性与工程参考价值。

1 基于 LightGBM 的目标回水温度预测模型

1.1 基于 LightGBM 预测模型特征变量选取

集中供热系统在运行过程中,二级网目标回水温度主要受室外天气温度、光照强度、二级网供水温度、二级网回水温度、一级网瞬时热量、一级网调节阀开度、建筑物保温特性等因素的影响。综合考虑现场计量条件与参数影响力等因素,最终选取表 1 所示参数作为目标回水温度 LightGBM 预测模型的特征变量。

表 1 二级网供水温度预测模型变量

输入	室外天气温度/℃
	室外天气温度历史值/℃
	二级网供水温度/℃
	二级网供水温度历史值/℃
	二级网回水温度历史值/℃
输出	二级网目标回水温度/℃

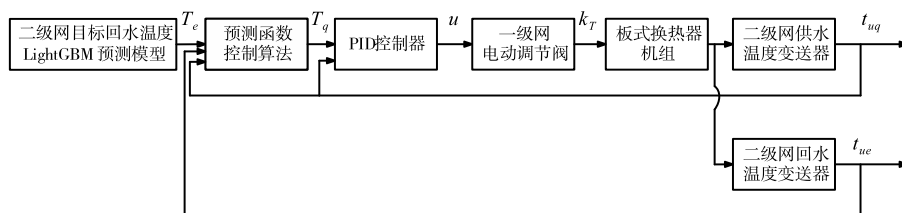


图 2 基于 LightGBM 的集中供热系统双闭环预测控制系统结构

1.2 LightGBM 预测模型结构

由于集中供热系统具有大时滞和大惯性特性,选取室外天气温度、二级网供水温度输入变量的实时值与二阶时延值作为模型输入,同时将二级网回水温度的二阶时延值也作为模型输入以提高预测精度,二级网目标回水温度的预测实时值作为模型输出,基于 LightGBM 的二级网目标回水温度预测模型架构如图 1 所示。

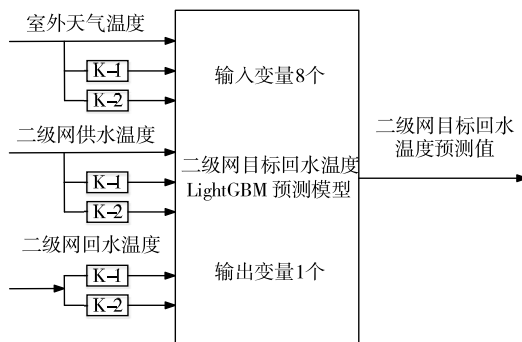


图 1 二级网目标回水温度 LightGBM 预测模型结构

2 集中供热系统预测控制策略

目前,在集中供热系统中,基于传统 PID 算法的温度控制策略应用较为广泛,虽然该控制策略部署简单且便于实现,但仍存在响应速度缓慢、时滞性较大、抗干扰能力弱等问题。因此,对供热系统的超前预测及稳定控制是提高系统安全可靠性能、实现节能降耗的重要保障。

2.1 基于 LightGBM 的集中供热系统预测控制系统结构

在传统换热站控制系统中,二级网回水温度定量控制较为稳定且应用广泛,因此,该文在原有二级网回水温度定量控制的基础上,设计基于 LightGBM 的集中供热系统双闭环预测控制系统结构如图 2 所示。

其中, T_e 为 LightGBM 预测模型输出目标回水温度, T_q 为预测函数控制算法输出目标供水温度; u 为 PID 控制器输出值, 经 D/A 转换器后为 4 ~ 20 mA 电流, K_T 为一级网电动调节阀开度, t_{uq} 为二级网供水温度, t_{ue} 为二级网回水温度。

系统工作时, 首先由 LightGBM 预测模型依据室外天气温度 t_{out} 等特征信息预测输出目标回水温度 T_e , 然后通过预测函数控制算法输出目标供水温度 T_q , 以双闭环形式实现集中供热系统的安全可靠运行, 确保集中供热系统的超前预测与精准控制。

2.2 基于移动加权平均算法的预测函数

2.2.1 基于移动加权平均算法的误差生成

结合图 2, 由 LightGBM 预测模型输出目标回水温度值 T_e 与实际回水温度信号 t_{ue} 作差生成第 k 时刻误差值, 即:

$$r(k) = T_e(k) - t_{ue}(k) \quad (1)$$

根据供热系统实际运行情况, 可设计第 k 时刻记录 $r(k)$ 的判决条件及阈值 T_H 如下式:

$$\begin{cases} R(k) = r(k), & r(k) > r(k-1) + T_H \\ R(k) = r(k), & r(k) < r(k-1) - T_H \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R(k)$ 为第 k 时刻满足记录条件的误差值。

进而推导出第 k 时刻基于移动加权平均算法的误差 $\bar{R}(k)$:

$$\bar{R}(k) = \frac{\omega \cdot R(k) + \psi \cdot (R(k-1) + R(k-2) + \cdots + R(k-n))}{\omega + n \cdot \psi} \quad (3)$$

式中: n 为满足式(2)条件的误差值记录数量; ω, ψ 分别为第 n 时刻误差值与前 $n-1$ 时刻误差合计值的权重值。

系统运行时, 可根据集中供热系统的时滞特性与建筑物的保温特性等参数, 适时调整误差记录数值 n 、阈值 T_H 以及权重值 ω, ψ , 以实现最优控制。

2.2.2 预测函数控制算法设计

根据集中供热系统特性及式(3), 可设计基于移动加权平均算法的预测函数如下:

$$\begin{cases} T_q(k) = t_{ue}(k) + \bar{R}(k), & |T_e(k) - t_{ue}(k)| \geq T_L \\ T_q(k) = t_{uq}(k-1), & |T_e(k) - t_{ue}(k)| \leq T_L \end{cases} \quad (4)$$

式中: T_L 为预测函数的判断阈值, 根据系统特性, 一般取 $T_L \in (0, 0.5)$ 。

结合图 2, 在明确移动加权平均误差 $\bar{R}(k)$ 的前提下, 当第 k 时刻时, 便可根据预测函数阈值判断,

令 $T_q(k) = t_{ue}(k) + \bar{R}(k)$ 或 $T_q(k) = t_{uq}(k-1)$, 从而实现集中供热系统超前预测控制, 并进一步确保系统的稳定性。

3 实践研究

为验证文中所述基于 LightGBM 的集中供热系统预测控制策略的有效性, 以集中供热节能片暖单系统为控制对象, 结合 sagemaker 与 CITECT 2018 上位平台, 部署基于 LightGBM 的回水温度目标值预测模型, 在施耐德 M340 PLC 中部署基于移动加权平均算法的预测函数控制器以及 PID 控制器, 具体实践结果如下。

3.1 系统参数整定

3.1.1 LightGBM 参数整定

考虑 LightGBM 算法模型参数较多, 全部进行系统调参将消耗较多时间与系统内存, 最终选取以下主要参数进行调整:

- (1) 决策树的方式: 选取默认“gbdt”;
- (2) 树的最大深度 D : 选取 $D=20$;
- (3) 叶子节点数 L : 选取 $L=31$;
- (4) 最小叶子节点样本数 S : 选取 $S=20$;
- (5) 最小叶子节点样本权重 ω : 选取 $\omega=0.73$ 。

LightGBM 模型的其他参数选择默认值。

3.1.2 基于移动加权平均算法的预测函数参数整定

根据集中供热系统的时滞特性与建筑物的保温特性, 取记录 $r(k)$ 的判决阈值 $T_H=0.5$, 取误差记录数值 $n=10$, 取权重值 $\omega=0.5, \psi=0.5$, 取预测函数的判断阈值 $T_L=0.1$ 。

3.2 基于 LightGBM 回水温度预测模型分析

为验证 LightGBM 回水温度预测模型性能, 该文以 BP 神经网络回水温度预测模型作为参照模型, 并选取与 LightGBM 回水温度预测模型相同的特征变量, 分别对两种预测模型的预测效果与误差指标进行对比分析, 系统工作时, 基于 LightGBM 与 BP 的回水温度预测效果如图 3 所示。

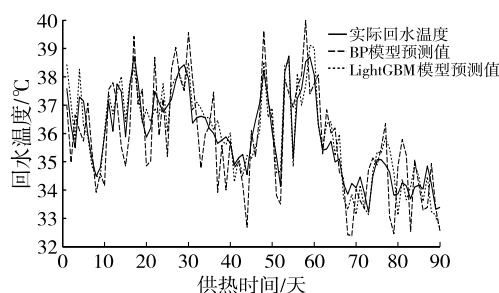


图 3 基于 LightGBM 模型与 BP 模型的回水温度预测效果图

分别对两种预测模型的均方根误差 $RMSE$ 、平方绝对误差 MAE 以及预测准确率 η 等指标进行对比分析,则 LightGBM 模型与 BP 模型的误差指标如表 2 所示。

表 2 LightGBM 模型与 BP 模型的误差指标

预测模型	误差指标		
	$RMSE$	MAE	η
LightGBM	1.89	1.35	96.8%
BP	2.73	2.07	87.6%

从图 3 和表 2 可以看出,基于 LightGBM 的回水温度预测模型相对于 BP 预测模型,具有更好的预测效果,回归程度更显著,预测跟踪速度也相对较快。

3.3 基于预测函数双闭环控制效果分析

为验证文中所述基于移动加权平均预测函数及 PID 算法的双闭环控制策略的有效性,文中与基于 PI 算法的单闭环控制策略进行对比。运行时间为 24 h,并在第 12 h 时刻加入幅值 10% 的阶跃突变扰动信息,分别对两种控制策略的响应特性、鲁棒性能进行对比分析。

设置回水温度目标值 $T_e = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$,基于 PI 单闭环和基于移动加权平均预测函数 + PID 双闭环控制策略的集中供热系统二次网回水温度控制的响应曲线及误差曲线如图 4~5 所示。

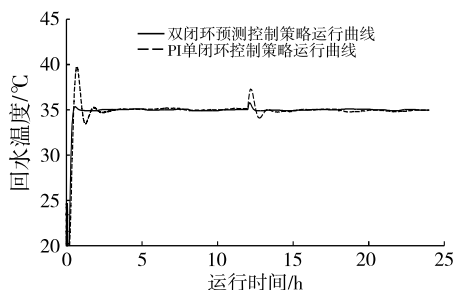


图 4 两种控制策略下集中供热系统二次网回水温度响应曲线图

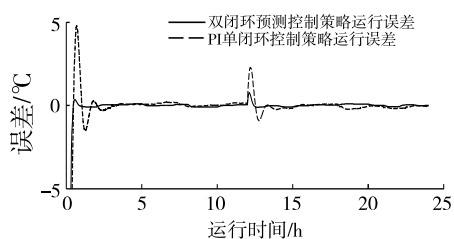


图 5 两种控制策略下集中供热系统误差曲线图

由图 4~5 可得到基于两种控制策略下的集中供热二次网回水温度控制系统的响应性能指标如表 3 所示。

表 3 两种控制策略下的集中供热二次网回水温度控制系统的响应性能指标

	t_r/min	t_s/min	$\sigma/\%$	$e_{ss}/^{\circ}\text{C}$	$\delta/^{\circ}\text{C}$
PI	48.5	70	13.4	0.85	2.78
预测控制	47.6	57	1.5	0.57	0.27

表中: t_r 为上升时间; t_s 为调整时间; σ 为最大超调量; e_{ss} 为稳态误差; δ 为加入阶跃扰动信号后的最大误差。

(1) 响应特性分析

由图 4 和表 3 可知,基于移动加权平均预测函数及 PID 算法的双闭环供热控制系统的响应速度、超调、稳态误差等各项性能指标都优于基于 PI 控制的单闭环系统。究其原因在于移动加权平均预测函数控制策略兼具分析历史与超前预测的能力,使供热系统在满足回水温度控制快速响应的同时,一定程度上解决了供热系统大时滞与大惯性问题。

(2) 鲁棒性分析

由图 5 和表 3 可以出,当加入阶跃扰动时,基于移动加权平均预测函数供热控制系统波动幅度明显小于基于 PI 控制的供热系统。其原因是,基于移动加权平均预测函数控制策略充分参考历史控制趋势,并对带扰动的反馈值进行加权平均,削弱了外界扰动对系统的影响,有着更强的鲁棒性。

4 结论

该文针对集中供热系统在负荷预测与调控中过度依赖人工经验以及系统能耗偏高等问题,结合 LightGBM 预测模型,提出了一种基于移动加权平均算法的预测控制策略,并进行实践验证,结论如下:

(1) LightGBM 预测模型能及时准确地预测供热系统回水温度及负荷变化,可在降低人工成本的同时节约系统运行能耗,为供热企业实现精细化运行调控提供了保障;

(2) 基于移动加权平均算法的供热系统双闭环控制策略,因充分考虑历史控制因素,具有较好的响应特性与鲁棒性,且算法简洁易部署,具有较高的工程应用价值;

(3) 建立供热系统从热源侧到管网侧再到用户侧的全过程数字化模型,实现供热系统的全面智能化运行,是下一步将研究的课题。

参考文献:

- [1] 张亚东. 智慧供热系统运行实践[J]. 区域供热, 2023 (06): 47-53.

(下转第 46 页)

供热系统调节前、后二次管网的供水温度相同,24 小时内回水温度变化反映了管网的热力失调状况,实施智慧供热调控方案前,回水温度数据波动较大,方案实施后,回水温度偏差明显减小,整个供热系统相对稳定,运行状况得到有效改善。

5 结论

针对传统供热系统操作人员控制劳动强度大、操作繁琐、调控不及时,系统存在不能有效解决管网平衡、监控系统运行状态等问题,为提高供热系统的安全性、稳定性和经济性,应用模糊 PID 控制算法对供热系统进行优化控制,通过 BLE 无线网络进行现场运行数据的实时传输,设计了基于 BLE 无线网络的智慧供热系统。通过系统测试表明,系统运行稳定、功耗低,能降低故障对系统的影响、对管网实现精准调控,具有良好的应用价值。

参考文献:

- [1] 李可昕,张丽英.集中供热监控系统的设计[J].科学技术创新,2023(19):81-84.
- [2] 郑立军,赵笑言,刘伟,等.智慧化供热调节方法研究与应用[J].节能,2023,42(10):63-66.
- [3] 陈俊娜.城市集中供热系统节能改造分析[J].能源与节能,2023(07):65-67.
- [4] 李嵘,郑庆红,王晓瑜.基于改进大数据频繁项集挖掘算法的中深层地热能供热潜力评估方法[J].微型电脑应用,2023,39(10):23-26.
- [5] 郭春梅,李家璇,贺中禄,等.智慧供热对集中供热节能减排影响的调研与分析[J].资源节约与环保,2023(07):1-4.
- [6] 徐宏,赵畅,王赫杨.基于智慧供热的集中供暖系统运行控制[J].自动化应用,2023,64(23):10-12.
- [7] 蔡晓明.关于供热系统热网运行调节技术的研究[J].智能建筑与智慧城市,2023(06):103-105.
- [8] 赵笑言,郑立军,林海卫,等.基于机器自学习的供热系统热负荷预测[J].节能,2023,42(08):81-84.
- [9] 王洁瑜,魏鹏刚,杨文栋.基于 BP 神经网络的智慧供热管控系统研究与应用[J].西北水电,2023(03):42-50.
- [10] 石宗瑞,王军.基于模糊理论和 PID 算法的电力系统控制方法[J].微型电脑应用,2022,38(07):110-113.
- [11] 王晓兰,石圣昀,王惠中.基于模型预测控制的谐振式无线电能传输系统[J].电子设计工程,2022,30(23):143-147.
- [12] 方修睦,杨大易,周志刚.智慧供热系统数据运行核查方法研究[J].暖通空调,2024,54(01):69-74+139.
- [13] 孙鹏.城市集中供热系统热负荷预测与二次网节能控制方法[J].区域供热,2023(06):54-60.
- [14] 王雅然,宋子旭,由世俊,等.集成奇异谱分析与神经网络的热负荷预测算法[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(06):573-578.
- [15] 赵广昊,薛贵军,张亦睿.变论域 Smith-Fuzzy-PID 在集中供热系统二网控制中的应用[J].华北理工大学学报(自然科学版),2023,45(04):50-57.
- [16] 马可心,刘剑,刘伟,等.模糊理论结合 PID 控制方法在集中供热系统中的应用[J].热科学与技,2021,20(06):601-606.
- [17] 刘春蕾,蔡阳,丁一博,等.串级模糊自适应 PID 控制的分时分区温控系统[J].区域供热,2023(05):99-105+111.
- [18] 薄盛,王海超,赵洁,等.集中供热系统供暖建筑室温控制算法研究综述[J].煤气与热力,2023,43(03):9-17.
- [19] 汪明元,王振红,陈松庭.基于 LightGBM 算法的海洋土压缩参数预测模型[J].浙江工业大学学报,2024,52(01):17-24.
- [20] 马良玉,袁乃正.基于 CFSFDP 与 LightGBM 的风电机组异常状态预警研究[J].太阳能学报,2023,44(05):401-406.

(上接第 41 页)

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！