

Smith 预估补偿与积分分离 PID 在供热控制系统中的应用

王荣鑫¹, 葛振福¹, 侯晨晨²

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

摘要:针对供热控制系统时延性较大、传统 PID 策略控制精度不高、易产生超调与静态误差等问题,提出了一种史密斯(Smith)预估补偿与积分分离 PID 相结合的供热系统控制策略。首先,设计了供水温度控制系统的 Smith 预估补偿器,以降低热惰性因素对控制性能的影响;其次,给出了积分分离策略,用于消除静态误差;最后,将 Smith 预估补偿器与积分分离 PID 在 PLC 控制系统中进行部署调试,并进行实践研究。实践证明,Smith 预估补偿与积分分离 PID 相结合的控制策略能最大限度地减弱大时延对供热系统的影响,有效提升系统的控制精度与控制性能。

关键词:供热系统;供水温度控制;Smith 预估补偿;积分分离 PID;PLC 控制器

中图分类号:TP273

文章编号:1000-0682(2024)04-0071-04

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.04.014

Application of Smith predictor compensation and integral separation PID in heating control system

WANG Rongxin¹, GE Zhenfu¹, HOU Chenchen²

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

Abstract: A heating system control strategy combining Smith predictor compensation and integral separation PID is proposed to address the issues of high time delay, low precision of traditional PID strategy control, and easy generation of overshoot and static errors in heating control systems. Firstly, a Smith predictor compensator was designed for the water supply temperature control system to reduce the impact of thermal inertness on control performance. Secondly, an integral separation strategy was proposed to eliminate static errors. Finally, deploy and debug the Smith predictor compensator and integral separated PID in the PLC control system, and conduct practical research. Practice has proven that the control strategy combining Smith's predictor compensation and integral separation PID can minimize the impact of large time delays on the heating system, effectively improving the control accuracy and performance of the system.

Keywords: heating system; water supply temperature control; Smith predictor compensation; integral separation PID; PLC controller

0 引言

随着供热控制技术的不断发展,大时延补偿与高性能控制策略在供热系统中的应用备受供热行业

与企业的关注。在供热系统供水温度控制过程中,大时延、超调、控制性能不佳等一直是制约系统控制性能与控制精度且亟待解决的问题^[1-2]。因此,削弱系统时延影响、减小超调量、提升控制性能是实现供热系统运行稳定及节能降耗的重要手段^[3]。

供热系统供水温度控制策略主要依赖 PLC 嵌入式 PID 控制算法^[4-5],虽部署便捷,调试简单,但存在缺少滞后补偿、控制性能不高、静态误差较大等问题。

收稿日期:2024-03-13

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。

鉴于此,该文在基于传统 PID 供水温度控制系统的基础上,针对供热系统受时延影响大、控制精度不高现状,提出了一种 Smith 预估补偿^[5]与积分分离 PID^[6-9]结合的控制方法。最后,在 PLC 控制器中部署调试两种策略,并进行了实践应用分析,体现了 Smith 预估补偿与积分分离 PID 策略在供热控制系统中的应用价值。

1 供热控制系统数学模型建立

换热站供热控制系统框架结构如图 1 所示,控制器为 PID,嵌入于 PLC 中,执行单元为一次网电动调节阀,板式换热器为控制对象,温度变送器为反馈环节。

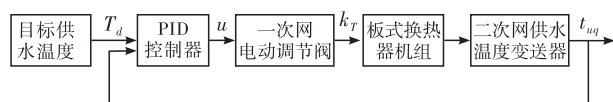


图 1 换热站供热控制系统框架结构图

供热系统二次网供水温度控制系统可视为一个二阶系统^[10],式(1)~(3)分别为采用系统辨识法求得供热系统执行器、控制对象及反馈单元的数学模型传递函数。

一次网调节阀的传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{0.8}{s} \quad (1)$$

板式换热器的传递函数为:

$$G_2(s) = \frac{5e^{-80s}}{120s+1} \quad (2)$$

温度变送器的传递函数为:

$$G_3(s) = 1 \quad (3)$$

则整体供热系统的数学模型可表达为:

$$G(s) = \frac{5}{150s^2 + 1.25s + 1} e^{-80s} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,二次网供水温度控制系统时滞约为 80 s,时延性较高。

2 供热系统 Smith 预估补偿器设计

结合图 1 及式(4)可以推导出供热系统二级网供水温度控制 Smith 预估补偿器的传递函数如式(5)所示:

$$D(s) = \frac{5(1 - e^{-80s})}{150s^2 + 1.25s + 1} \quad (5)$$

图 2 为供热系统的时延补偿算法与补偿实现的框架原理。

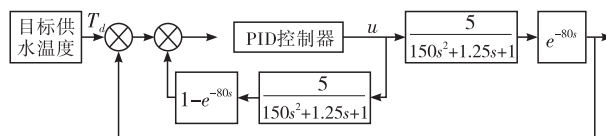


图 2 供热系统的时延补偿算法与补偿实现的框架原理图

当系统运行时,Smith 预估补偿器可以及时对供热系统时延影响进行反向抵消并实时补偿,以削弱时延对系统的影响。为提升控制精度,在实际应用中也可根据供热面积、供热率、建筑物特性等因素影响,适当调整补偿时间与补偿系数。

3 供热系统积分分离 PID 设计

在二次网供水温度 PID 控制过程中,由于积分环节的存在,在系统启停或大幅调整设定值时,人工调参复杂耗时且精度不高,会造成 PID 控制器的积分堆积现象,导致系统振荡,甚至造成供热安全事故。

为避免以上现象,引入了积分分离算法,其原理是当二次网供水温度与目标值偏离较明显时,取消 PID 的积分 I 调节;当二次网供水温度与目标值接近时,增加 PID 的积分 I 调节,减小稳态误差并提高系统精确度。

设置积分引入与取消的临界阈值 ε ,供热系统供水温度反馈值与目标值的最大偏离值为 $|e|$,则积分分离控制逻辑设计如下:

(1)当 $|e| > \varepsilon$ 时,移除积分环节,使系统超调量消除或减小,避免系统发散或震荡,提升安全性。

(2)当 $|e| \leq \varepsilon$ 时,引入积分环节,减小系统静态误差,实现精细化调控。

4 下位机 PLC 部署架构与程序设计

4.1 系统部署架构

在图 1 的基础上,分别引入第 2、3 节所设计的 Smith 预估补偿器与积分分离 PID 控制器,则系统整体部署架构如图 3 所示。

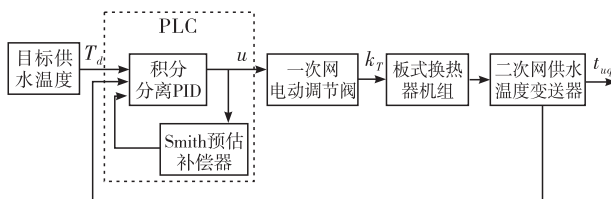


图 3 改进后的供热系统控制算法在 PLC 中的部署架构原理图

考虑 Smith 预估补偿与积分分离 PID 算法较为简单,因此将两种算法部署于供热系统下位机 PLC

控制器中,不必新增控制芯片与扩展模块,在满足控制性能的同时,可节约硬件成本,且能在不具备网络通讯的条件下实现二次网供水温度控制系统的独立自主运行。

4.2 PLC 程序部署

为提高编程效率,简化部署步骤,Smith 预估补偿与积分分离 PID 算法均采用 FBD 模块与 ST 语言相结合的设计方法,设计 Smith 预估补偿与积分分离 PID 在 PLC 中的部署主程序如图 4 所示。

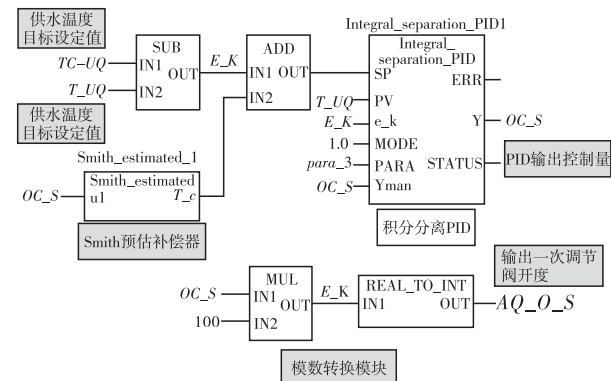


图4 Smith 预估补偿与积分分离 PID 在 PLC 中的部署主程序

图 4 中,Smith 预估补偿与积分分离 PID 模块分别为 Smith_estimated_1, Integral_separation_PID_1, 两种算法的子程序设计分别采用 ST 语言与 FBD 语言在 PLC 中部署实现。

5 实践研究

为验证文中所设计控制算法的实用性,以非节能地暖供热系统为控制对象,在西门子 1200 PLC 中部署 Smith 预估补偿器与积分分离 PID 算法,实践分析结果如下。

5.1 系统参数整定

- (1) 系统时延: $\tau = 80$ s;
- (2) 积分引入与取消的临界阈值: $\varepsilon = 2.2$;
- (3) 比例系数: $K_p = 0.015$;
- (4) 积分系数: $T_i = 1.5$ s;
- (5) 微分系数: $T_d = 0.3$ s。

5.2 控制特性分析

为验证 Smith 预估补偿器与积分分离 PID 算法在供热系统供水温度控制的性能,该文以传统 PID 控制算法作为对比,分别对系统的动态响应特性与静态误差进行对比分析,测试验证时长为 24 h,则引入 Smith 预估补偿器与积分分离算法前后的控制效果如图 5 所示。

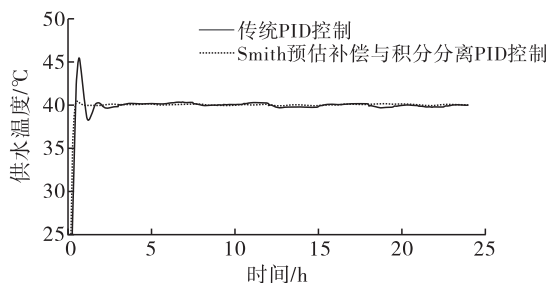


图5 供水温度控制效果对比分析图

引入 Smith 预估补偿器与积分分离算法前后的误差分析如图 6 所示。

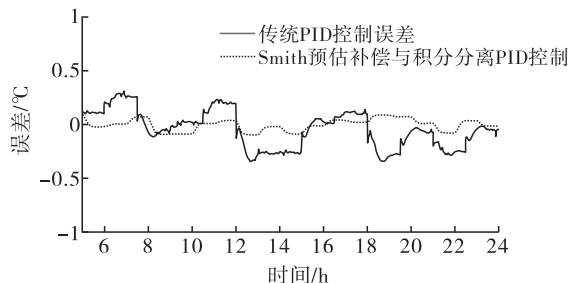


图6 供水温度控制误差对比分析图

由以上两图可得到引入 Smith 预估补偿器与积分分离算法前后的系统动态响应特性与静态误差指标如表 1 所示。

表1 供热系统控制特性指标对比

	系统峰值 时间 t_r/min	系统调整 时间 t_s/min	为系统超 调量 $\sigma/\%$	静态误差 $e_{ss}/^\circ\text{C}$
引入前	47.7	71	13.4	0.45
引入后	45.3	51	1.5	0.27

改进并部署调试后的供热系统控制响应更及时,超调量与静态误差也相对较小,其原因是 Smith 预估补偿器与积分分离算法的应用能一定程度上削弱时延与超调对系统的影响,提高了系统精度与响应速度。

5.3 系统鲁棒性分析

为验证改进并部署调试后供热系统的鲁棒性,在第 10 h 时刻加入阶跃扰动信息,分别对引入 Smith 预估补偿器与积分分离算法前后的系统鲁棒性能进行对比分析,如图 7 所示。

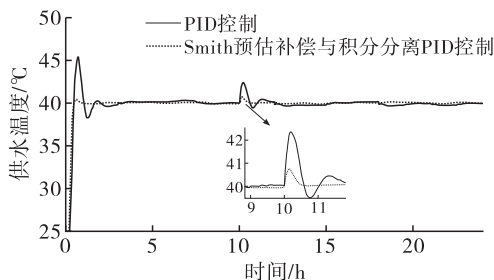


图7 供热系统受干扰时控制效果对比分析图

由图 7 可以出,第 10 h 时,当加入阶跃扰动时,引入 Smith 预估补偿器与积分分离算法后的供热系统受干扰幅度为 0.7 左右,传统 PID 算法的供热系统受干扰幅度为 2.2 左右。其原因是引入 Smith 预估补偿器与积分分离算法后可以使 PID 控制器与系统的适配性提升,可在减小时延影响的同时,提升系统抗扰性能。

6 结论

Smith 预估补偿与积分分离算法在供热系统中的应用与部署,可最大限度地减小热惰性、热时滞对系统的不利影响,在提升系统的控制性能与稳定性同时,可有效提高供热系统的控制精度,实现精细化调控与运行。此外,Smith 预估补偿器与积分分离算法算例简单易实现,较容易在 PLC 控制器中部署与应用,有较强的鲁棒性能与工程应用价值。

参考文献:

- [1] 田庆华,李锐,梁源. 智慧供热 DCS 系统的开发与实践应用研究[J]. 装备维修技术,2023(06):79-82.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 齐世伟,孙畅,付主木,等. 煤炭自动定量装车控制策略设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学),2021,42(05):32-38+44+6.
- [7] 彭继文,叶俊峰,刘士杰,等. 基于积分分离 PID 的起重自动恒速落幅控制研究[J]. 液压气动与密封,2023,43(11):56-61.
- [8] 王森,王成龙,孙婷婷. 积分分离 PID 在集热管热损测试系统中的应用[J]. 计算机与数字工程,2023,51(05):1012-1017.
- [9] 景思伟,陈梦婵,张青山. 基于 PLC 与 HMI 的卷绕控制系统设计及应用[J]. 自动化与仪表,2023,38(03):19-21+26.
- [10] 刘宝芹,夏广越,王童,等. 基于仿真模型计算的供热系统预测性调控方法[J]. 区域供热,2023(03):8-14.
- [11] 田庆华,李锐,梁源. 智慧供热 DCS 系统的开发与实践应用研究[J]. 装备维修技术,2023(06):79-82.
- [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] 齐世伟,孙畅,付主木,等. 煤炭自动定量装车控制策略设计[J]. 河南科技大学学报(自然科学),2021,42(05):32-38+44+6.
- [17] 彭继文,叶俊峰,刘士杰,等. 基于积分分离 PID 的起重自动恒速落幅控制研究[J]. 液压气动与密封,2023,43(11):56-61.
- [18] 王森,王成龙,孙婷婷. 积分分离 PID 在集热管热损测试系统中的应用[J]. 计算机与数字工程,2023,51(05):1012-1017.
- [19] 景思伟,陈梦婵,张青山. 基于 PLC 与 HMI 的卷绕控制系统设计及应用[J]. 自动化与仪表,2023,38(03):19-21+26.
- [20] 刘宝芹,夏广越,王童,等. 基于仿真模型计算的供热系统预测性调控方法[J]. 区域供热,2023(03):8-14.
- [21] 石永强,李雨菲,车录锋. 基于 MEMS 加速度计阵列的测斜仪设计[J]. 传感器与微系统,2020,39(9):66-72.
- [22] 诸颖,郭彦,潘伟强,等. 自动化测斜技术在深基坑工程风险管控中的应用[J]. 上海建设科技,2020(5):55-58.
- [23] ZHANG L, LI R Z, HU L. Analysis of inclinometer in foundation pit[J]. International Journal of Research in Engineering and Science,2017(5):06-09.
- [24] 高开强. 自动化监测系统在深基坑工程中的应用及可靠性分析[J]. 经纬天地,2021(1):75-86.
- [25] 建筑基坑工程监测技术标准:GB 50497-2019[S]. 2019.
- [26] 唐爱武,陈天佑. 复杂工况条件下齿轮传动过程中磨损量预测研究[J]. 机械传动,2024(1):143-150.
- [27] 程胜一,褚伟洪,陈杰,等. 深层水平位移监测技术分析[J]. 城市勘测,2011(6):167-170.
- [28] 气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全 第 6 部分:GB/T 20438.2 和 GB/T 20438.3 的应用指南:GB/T 20438.6-2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [29] 姚竣瀚,郑威,王海清,等. 高要求模式 SIS 异型冗余结构 PFH 计算模型[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(11):105-111.
- [30] 朱杰,张则立,俞文光,等. 安全仪表系统检验检测程序完整性研究[J]. 自动化仪表,2023,44(05):14-19.