

生物质燃烧系统温度控制策略研究

付琳¹ 付琨杰²

1. 邵阳学院信息科学与工程学院, 湖南 邵阳, 422000

2. 邵阳市第十一中学, 湖南 邵阳, 422000

摘要: 在生物质燃烧系统中, 变量之间的强耦合关系是实现精确温度控制的关键难点, 当燃烧工况发生改变时, 需要克服干扰带来的影响, 以维持系统的稳定性和性能。本研究依据自动控制原理, 构建生物质燃烧双级串联回路控制模型, 该模型采用主副两级控制, 通过在 simulink 仿真环境中进行建模与实验, 实现了对系统出水温度的智能调节。为优化控制效果, 研究对比了模糊自适应 PID 算法与传统 PID 算法在温度调控中的性能差异。实验结果表明, 相较于传统控制策略, 采用模糊自适应 PID 控制策略的串级生物质燃烧温度控制模型能够取得较高的准确性, 系统稳定性好, 响应速度快, 超调量小。

关键词: 生物质; 燃烧控制; 模糊自适应 PID

1 研究背景

随着我国能源战略的持续推进, 具有“零碳”能源属性、原料资源丰富且能量密度较高的生物质能源得到高度重视和快速发展, 生物质燃烧过程与生物质燃料本身的生长环境关系密切, 传统燃煤锅炉的设计技术不能直接照搬应用于生物质燃烧, 加之不同领域对生物质能应用的功能要求也有所不同, 开展生物质燃烧控制技术的研究具有十分重要的现实意义。

2 控制系统组成及工作过程

生物质燃烧控制系统主要由进料装置、水箱、燃烧室、鼓风机、引风机等部件组成。在生物质热转化过程中, 颗粒状燃料经由进料装置输送至燃烧室。随着热量的持续作用, 燃料中的水分首先发生汽化。当温度达到特定阈值时, 热解反应随即启动, 释放出大量挥发性物质。与此同时, 氧气和热能通过燃料颗粒表面的微孔结构向内部扩散, 发生氧化反应。最终使燃料达到稳定燃烧, 成为系统热能输出的主要贡献者^[1]。

生物质颗粒燃料的热化学转化过程涉及多相复杂反应机制, 其燃烧效率主要取决于氧化剂与可燃物之间的当量比。该过程受多个操作参数的共同影响, 其中燃料供给速率、通风强度以及引风量是主要的过程变量。从系统输出响应来看, 出水温度、烟气氧含量和燃烧室压力构成了表征燃烧状态的关键指标。优化这些输入变量的协同控制对于实现充分燃烧、提高能量转化效率具有重要意义。当空气过剩系数维持在 1.2-1.5 之间时, 系统可获得最佳的热工性能^[2]。由于输出变量存在较大的时滞效应, 加之输入变量和输出变量之间相互制约和耦合, 燃烧工况的扰动变化也将对生物质燃烧过程产生不确定性的影响, 常规的控制方法难以准确地展示被控变量的动态特性。

出水温度包含温度上升和温度保持两个阶段, 需要经过一定的时间才能达到目标温度, 为避免因助燃空气不足、进料量配比不够导致的不完全燃烧, 维持稳定的出水温度是生物质燃烧控制的重点之一。

生物质燃烧的温度控制过程可视为一阶

惯性加纯滞后过程^[3]，其传递函数如式 1 所示，其中 K 为最大功率加热时所能达到的环境温度的最大值；T 用于衡量环境的大小，T 越大，代表加热的环境越大，加热速度越慢； τ 为时滞参数，代表加热效果显现的延时时间。

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

将前期实验数据导入 MATLAB 系统辨识工

3 温度控制回路设计

生物质燃烧控制系统的出水温度主要受到进料量和风量的影响。当燃烧工况发生改变，如出水温度波动时，为了维持空气与燃料的质量比例保持稳定，系统通过调节燃料供给速率和通风强度来维持一定的空燃比^[4]。这种调整会导致燃烧室的气流强度发生变化，进而引起燃烧室内部压力波动。为保持燃烧室压力恒定，必须同时对引风量进行补偿性调节，从而确保整个燃烧过程的稳定性。

常规生物质燃烧系统通常采用单级反馈调节机制进行温度调控，由于系统固有的时滞特性，燃烧条件的变化无法即时反映在控制输出上，导致单一反馈回路难以达到精确的温度控制要求。为此，本研究采用双级串联控制回路方案，该方案由主副两个回路串联而成。系统在单级反馈控制的基础上，新增一个次级控制通道。主调节通道由出水温度传感器、温度控制器、燃烧室温度控制回路及风道组成，次级控制通道包含燃烧室温度传感器、燃烧室温度控制器、进料电机和燃烧室。

主调节通道将出水温度控制器作为控制核心，水箱出水温度作为被控对象，通过实时比较温度测量值与目标设定值之间的差异，动态调整控制输出，确保出水温度维持在预定范围内。次级控制通道将燃烧室温度控制器作为控制核心，其设定值由主调节通道的输出确定。燃烧室温度作为被控对象，将燃料供给速率变化作为系统干扰项加到次级控

具箱，生物质燃烧系统环境温度最大值为 5 摄氏度，时滞时间为 32 秒，一阶惯性纯时滞温度系统的传递函数如式 2 所示，当室温为 20 摄氏度时，在不加任何控制，也没有任何干扰的理想情况下，温度系统将维持在 25 摄氏度左右，无法达到目标要求的 60 摄氏度出水温度。

$$G(s) = \frac{5}{65s+1} e^{-32s} \quad (2)$$

制通道中，由次级控制通道对其进行控制，通过监测燃烧室温度的实际检测值与目标值之间的差值，实时修正控制输出，保证燃烧室温度稳定，减弱因进料量变化对出水温度的影响，提高整个系统的响应速度。

3.1 主控制器设计

温度串级控制回路中涉及两个控制器，其中出水温度控制器作为主控制器，燃烧室温度控制器作为副控制器，为便于实时调节控制参数，主控制器采用模糊自适应 PID 控制算法，副控制器采用增量 PID 控制算法。

由于实际系统在不同的工况下会表现出不同的特性，固定参数的 PID 控制器难以在任何工况下都获得较好的控制效果，主控制器采用模糊自适应 PID 进行控制，该算法将模糊算法与 PID 控制相结合，将输出与输入的差值以及差值的微分输入到模糊控制器中，经模糊化、模糊推理和解模糊化，运算得到 PID 控制中的比例、积分时间、微分时间三个参数的调整值，实现对被控对象的实时 PID 调整，满足不同误差和误差变化率情况下对三个 PID 参数的要求，保证被控对象具有良好的动态性能，实现基于实际状态的 PID 控制。

3.1.1 建立模糊 PID 控制器的输入、输出变量

模糊 PID 控制器共有 5 个模糊变量，其中 E 和 Ec 是输入变量，分别反映当前温度与目标值的差异以及这种差异的变化趋势，输出量则由三个修正项 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 组成，

分别对应经模糊运算后的比例、积分和微分的变化量。

3.1.2 确定隶属度函数

在模糊控制算法中，输入变量的语言值被划分为七个等级^[5]，对于温度偏差 E 及其温度误差变化率 E_c 这两个关键参数，其模糊

3.1.3 建立模糊规则表

所设计的模糊 PID 控制器有 2 个输入变量 (E 、 E_c)，3 个输出变量 (ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d)，按照“if e is A_i and ec is B_i then K_p' is C_i and T_d' is D_i and α is E_i ”的形式，建立 49 条输入输出模糊规

化处理的范围设定在 $[-6, 6]$ 之间。比例变化量 ΔK_p 、积分变化量 ΔK_i 和微分变化量 ΔK_d 的模糊论域分别为 $\{-6, 6\}$ 、 $\{-6, 6\}$ 、 $\{-6, 6\}$ ，采用三角形隶属度函数，基于 Mamdani 模糊推理机制，取小运算规则进行隶属度计算。

3.1.4 求解模糊结果

按照模糊规则，将输入输出结合起来，对其去模糊化，得到确定的数值化结果，主控制器结构仿真图如图 1 所示。

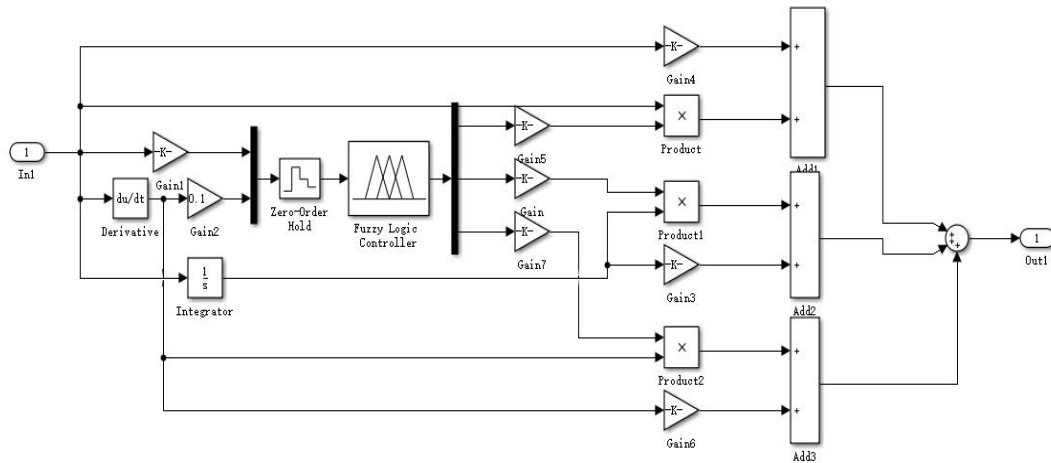


图 1 模糊 PID 控制结构图

3.2 副控制器设计

副控制器采用增量式 PID 控制，采用经典法对副控制回路 PID 参数进行整定。临界增益 K_{cmax} 为 27，临界震荡周期为 T_{cmax} 为 0.2327s，因此， $K_p=0.6K_{cmax}=16.2$ ， $K_i=0.6K_{cmax}/(0.5T_{cmax})/10=139.2351$ ， $K_d=(0.6K_{cmax})*(0.12T_{cmax})/60=0.007539$ 。

4 仿真结果分析

所设计的温度控制回路如图 2 所示，将传统 PID 与串级模糊自适应 PID 模型进行对比，作为所提控制策略的优化评价依据。设

置目标出水温度为 60 摄氏度，在没有干扰的情况下，两种控制策略的仿真对比图如图 3 (a) 所示，采用串级控制策略的仿真模型在 353.175s 达到稳定，最大超调量 63.849 摄氏度，传统 PID 经过 3337.302s 达到稳定，最大超调量 77.777 摄氏度，相较于传统 PID 控制，串级模糊自适应 PID 策略上升时间缩短，超调量减少，达到稳定的时间也更短。为了测试温度控制系统的抗干扰能力，在系统运行 2000s 时加入幅值为 30 的干扰。引入干扰的串级控制仿真曲线如图 3 (b) 所示。

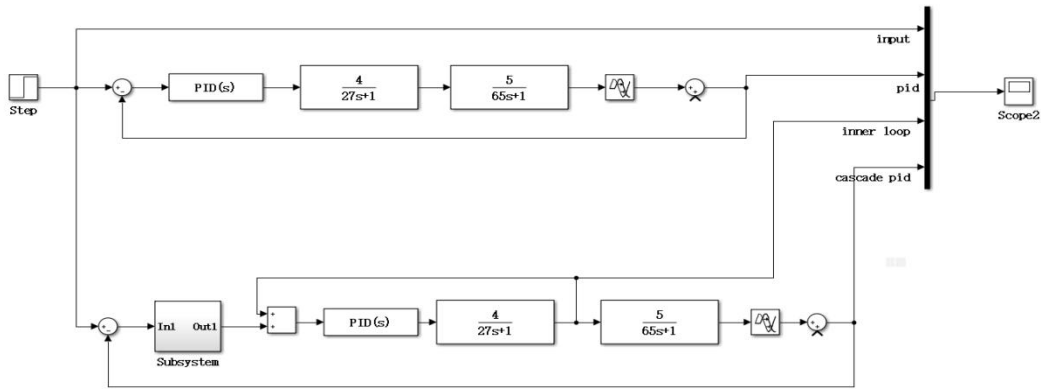


图 2 串级温度控制仿真模型

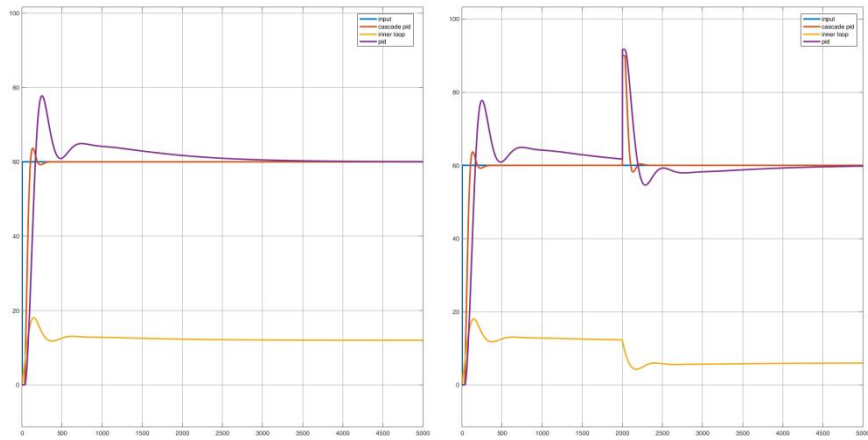


图 3(a) 没有干扰的情况下温度控制策略仿真效果对比

图 3(b) 引入干扰的温度控制策略仿真效果对比

当 2000s 扰动出现时，两种控制策略在调节过程中均产生了将近 30 摄氏度的最大偏差，串级控制策略恢复稳定所用调节时间为 309.863s，传统 PID 策略恢复稳定所用调节时间为 1043.651s。在有干扰的情况下，使用串级温度控制系统，超调量较小，达到稳定的时间更短，抗干扰能力更强。

通过对串级模糊自适应 PID 策略与传统 PID 策略进行对比，可以看出串级模糊自适应 PID 策略能够缩短温度上升时间，减少超调量，达到稳定的时间也更短，能够更好地适应干扰。

结语

生物质燃烧控制系统的出水温度受到进料量和风量的变化影响，控制变量与被控变

量之间存在复杂的相互作用，为维持稳定的出水温度，设计生物质燃烧串级温度控制回路，分别对水箱温度和燃烧室温度主副两个被控量进行控制，弱化由于进料量和风量等因素对燃烧室内温度造成的影响，从而保证水箱出水温度的稳定性。主控制回路采用模糊 PID 自适应算法，根据系统输出误差和参考值，实时更新模糊规则库，并据此调整 PID 参数，使控制器能更好地适应系统动态变化；副控制回路采用传统 PID 算法，实现对燃烧室内温度变化的实时跟踪和调整，经仿真测试表明，相较于传统的 PID 控制策略，所设计的生物质燃烧串级控制策略能够有效维持出水温度的稳定性，响应快，抗干扰性强。

参考文献

- [1]刘宇菲,孟亚男,陈智晗,等.模糊PID控制在生物质锅炉燃烧控制系统的设计及仿真[J].电子制作,2024,32(01):83-86.
- [2]郑元坤.生物质成型燃料锅炉燃烧控制系统研究[D].山东理工大学,2020.
- [3]谷洋洋.基于智能PID控制的燃气锅炉燃烧控制系统研究[D].中国舰船研究院,2014.
- [4]王永清.基于模糊自适应内模PID的生物质暖风炉燃烧控制系统研究与实现[D].华北水利水电大学,2023.
- [5]周铮.生物质锅炉自动控制系统的研究与设计[D].武汉理工大学,2020.

课题项目:

- [1]2022 年度邵阳市科技计划项目 (邵市科字[2022]31 号 22): 生物质高效燃烧智能控制技术研究。
- [2]2024 年湖南省教育厅科研项目 (24C0388): 生物质燃烧控制关键技术研究。