

# 实验堆熔盐管道温度控制仿真与优化

李劲涛<sup>1,2</sup>,贾祥<sup>1</sup>,后接<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海应用物理研究所,上海 201800; 2. 中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**针对 2 MW 液态燃料钍基实验堆熔盐管道伴热控制系统要求,通过在 Simulink 仿真熔盐管道预热阶段自适应 PID 控制温控场景,并在工程模拟机上进行不同加热功率的开环对比试验。结果表明:随着加热温度升高,模型时间常数与散热功率会增加,维持升温速率需要更高的加热功率、温度控制系统的鲁棒性;在使用自适应 PID 控制的加热初期,升温速率存在较大波动。因此,对设计的自适应 PID 温度控制系统进行优化设计,并从实际运行工况考虑,设计调功周期测试、升温速率测试和运行工况测试并对结果进行分析验证。优化后的自适应 PID 温度控制系统能更好地满足实际工况下实验堆熔盐管道伴热控制需求。

**关键词:**管道加热控制;自适应 PID;工程模拟机;仿真优化

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)05-0115-04

## Simulation and Optimization of Temperature Control of Molten Salt Pipeline in Experimental Reactor

LI Jintao<sup>1,2</sup>, JIA Xiang<sup>1</sup>, HOU Jie<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** According to the requirements of the molten salt pipeline heat tracing control system of the 2 MW liquid fuel thorium experimental reactor, the temperature control scene is adaptively controlled by PID control in the preheating stage of the molten salt pipeline simulated in Simulink, and the open-loop comparison test of different heating power is carried out on the engineering simulator. The results show that as the heating temperature increases, the model time constant and heat dissipation power increases, higher heating power is required to maintain the heating rate and the robustness of the temperature control system changes. In the early heating stage of adaptive PID temperature control, the heating rate fluctuates drastically. Therefore, the designed adaptive PID temperature control system is optimized, and in consideration of the actual operating conditions, the test on power adjustment cycle, the heating rate and the operating condition are designed for analysis and verification, which indicates that the PID temperature control system can better meet the requirements of heat tracing control of the molten salt pipeline of the experimental reactor under the actual working conditions.

**Keywords:** pipe heating control; adaptive PID; engineering simulator; simulation optimization

## 0 引言

工业上常用 PID 控制方法进行加热控制, PID 控制方法具有结构简易、参数调节方便、实用价值高等优点<sup>[1]</sup>。针对不同研究对象的不同控制需求,很多专家学者提出了多种优化改进的 PID 控制方法<sup>[2-4]</sup>。2 MW 液态燃料钍基实验堆(以下简称实验堆)的反应介质是高温熔融氟化盐<sup>[5]</sup>。在熔盐管道中伴热控制下,通过对被控模块进行数学建模分析,提出了以误差信号与加热速率为自适应调整模块输入的自适应 PID 控制方法<sup>[6]</sup>。理想化模型具有一定局限性,缺乏对实验堆实际运行工况下管道加热控制测试分析。

一体化仿真平台 NuSIM 可以提供高精度、完全机理

化的全工况实时仿真条件,本文在该平台上对所设计的自适应 PID 控制方法进行开环动态测试,通过对控制算法进行优化与测试,提升了实验堆熔盐管道加热控制系统的鲁棒性,满足实际工况下的控制需求,并且针对控制系统平台以及控制需求,进行了调功周期测试、升温速率测试、工况切换测试。

## 1 NuSIM 平台仿真测试

### 1.1 熔盐管道控制要求

实验堆熔盐管道由 38 个熔盐管道模块组成,模块长度有 0.8 m 与 1.0 m 两种规格,管道直径为 0.125 m,保温层厚度为 0.24 m,熔盐管道设计主要采用对半式模块化结构,包括直管段模块、弯头段模块、保温棉套、加热丝、支架

**基金项目:**中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA02001005)

**第一作者简介:**李劲涛(1996—),男,安徽宿州人,硕士研究生,研究方向为熔盐堆仪控系统智能运维工作,1147209171@qq.com。

等部分,本文主要以 0.8 m 直管段模块为研究对象,熔盐管道设计如图 1 所示。

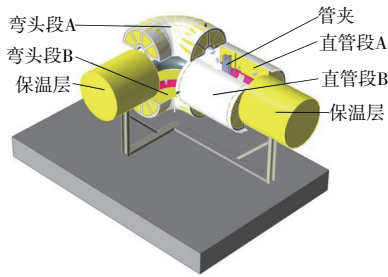


图 1 熔盐管道设计示意图

加热丝与绝缘材料是对于管道中心对称分布的,因此可以考虑每个模块内的温度为均匀分布的,管道内介质在预热阶段为氩气,运行阶段为氟化盐,体积热容为  $4\ 549\ \text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ,热容不随温度变化而变化。控制要求加热温度至  $550\ ^\circ\text{C}$ ,超过  $575\ ^\circ\text{C}$  则停止加热,加热上升时间  $\leq 55\ \text{h}$ ,加热过程中升温速率为  $10\ ^\circ\text{C}/\text{h} \sim 30\ ^\circ\text{C}/\text{h}$ ,升温速率标准差  $\leq 1$ 。在添加熔盐之前需要先预热,假设模块两端为封闭状态,外界环境温度为恒定的  $25\ ^\circ\text{C}$ 。以能量守恒为基础,加热的能量一部分被管壁及氮气吸收,另一部分通过保温材料散热到环境中,整理可得式(1)。

$$P\Delta t = (c_1 m_1 + c_2 m_2) \Delta T + \frac{SK}{L} (T - 25) \Delta t \quad (1)$$

式中: $P$ 为预热阶段加热功率; $\Delta t$ 为采样时间; $c_1 m_1$ 为模块内材料的比热容与质量乘积; $c_2 m_2$ 为管壁内氮气的比热容与质量乘积; $\Delta T$ 为采样时间内的温度变化量; $S$ 为保温材料表面积; $K$ 为保温材料散热系数; $L$ 为保温材料厚度; $T$ 为控制温度反馈。

令  $a_1 = (c_1 m_1 + c_2 m_2)$ ,  $a_2 = SK/L$ ,处理可得熔盐管道在预热阶段的开环传递函数:

$$G(S)_1 = \frac{T(S)}{P(S)} = \frac{s}{a_1 s^2 + a_2 s} = \frac{1}{a_1 s + a_2} \quad (2)$$

## 1.2 自适应 PID 控制

通过对被控模块进行数学建模与 Simulink 仿真分析,发现工业常用的温控方法无法对升温速率有很好的掌控,不满足实验堆熔盐管道控制要求,因此提出了以误差信号与加热速率为自适应调整模块输入的自适应 PID 控制方法。

自适应 PID 控制结构如图 2 所示。其中: $r(t)$ 代表加热目标温度; $c(t)$ 代表输出温度,自适应调节器通过对误差信号及其变化率的观测,实时计算控制参数给 PID 控制器,然后计算热功率  $P(t)$ ,经执行结构电力调整器输出加热功率给加热器。

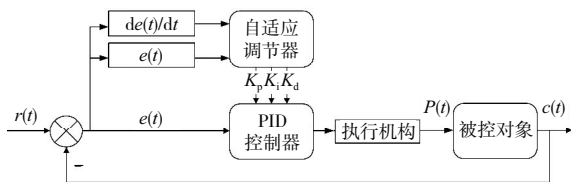


图 2 自适应 PID 控制原理图

自适应 PID 控制主要包含 3 个步骤:初始参数的确定、自适应调整参数策略、稳态调节过程控制参数。

1) 初始参数的确定:上升过程控制参数选取  $K_p$ 、 $K_i$ 。初始状态积分环节为 0,主要受比例系数  $K_p$  控制,根据被控模型计算升温速率可得  $K_p$  初始值  $K_{p0}$ ,达到控制目标附近时,主要受积分环节影响,积分环节大小是阴影部分面积  $S$ ,  $S \cdot K_i$  即为稳态输出,根据系统稳态平衡方程可得  $K_i$ 。

2) 自适应调整参数策略:自适应观测器能够适时调整  $K_p$  以满足控制过程中时间常数  $\tau$  与增益  $k'$  的变化,  $\Delta K_p$  调整过大会导致控制的稳定性下降,  $\Delta K_p$  调整过小会导致控制速率的鲁棒性变差,满足不了控制速率的要求。

3) 稳态调节过程控制参数:当达到稳速上升阈值上限时,当前温度与输出功率距离稳态值还有一定的差距,可以通过常规 PID 控制快速调节。

## 1.3 NuSIM 平台开环仿真测试

NuSIM 一体化仿真平台在满足能量守恒、质量守恒等原则下,提供了高精度、完全机理化的全工况实时仿真,能够很好地反映实际对象的动态特性。

自适应 PID 控制在 NuSIM 的仿真结果如图 3 所示,可以看出自适应 PID 控制通过对  $K_p$  的实时调整,升温速率的稳定性较好,并且可以获得可控的误差曲线,获得与预期偏差不大的积分环节。因此可以做到无超调,升温速率基本保持在设定的速率范围。

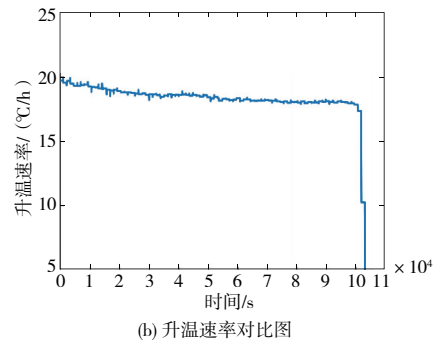
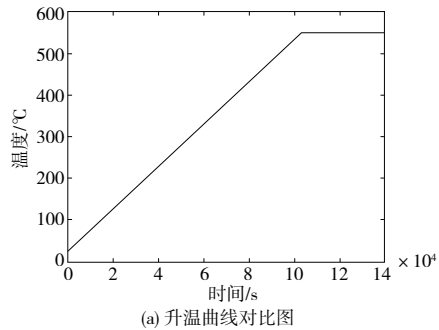


图 3 NuSIM 仿真结果

在 NuSIM 平台仿真发现:随着加热控制的进行,升温速率存在以下两个问题:1)升温速率鲁棒性降低;2)加热初期升温速率波动较大。为了获得较好的控制效果,需要对控制算法进行调整。

针对 Simulink 与 NuSIM 平台分别进行 200 W、400 W、600 W 的开环控制加热动态仿真,开环控制响应对比如图 4 所示。

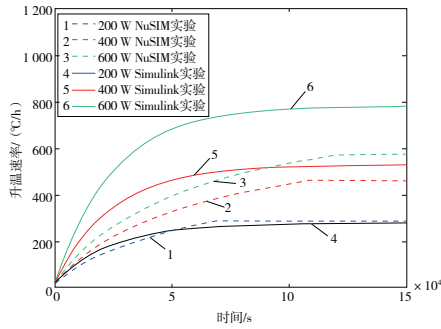


图4 开环控制响应对比图

可以看出,Simulink 仿真平台中模型  $G(S)$  的增益  $k'$ , 时间常数  $\tau$  保持不变。但是 NuSIM 平台的模型在初始条件  $T=25^\circ\text{C}$  时,200 W、400 W、600 W 的开环控制过程中增益  $k'$  分别为 1.310、1.088、0.917, 时间常数  $\tau$  分别为 32 360、41 980、45 390。增益  $k'$  随着温度升高逐渐变低, 主要是导热系数增大导致的, 因此散热功率会呈非线性增大。时间常数  $\tau$  是被控模型中比热与增益  $k'$  的乘积, 模型时间常数  $\tau$  与控制温度呈现正相关, 维持升温速率稳定需要更大的加热功率。

## 2 自适应 PID 控制的优化

自适应 PID 控制在 NuSIM 平台的升温速率问题主要由两个方面引起。

1) 被控模型方面: 根据 NuSIM 模型对比测试实验可以看出, 随着温度的升高, 被控模型的时间常数  $\tau$  会增加, 增益  $k'$  会减小, 因此随着温度升高, 散热功率呈指数增长趋势, 当功率增加量不足时, 升温速率鲁棒性会变差。

2) 控制算法层面: 随着温度升高, 式(3)中  $e(k)$  在逐渐减小, 因此在  $\Delta K_p$  大小不变的情况下, 加热初期  $\Delta K_p \cdot e(k)$  较大, 加热中后期  $\Delta K_p \cdot e(k)$  较小, 并且被控模型的参数变化, 共同导致升温速率鲁棒性变差。因此为了获得综合性能更好的实验堆熔盐管道伴热保温控制方法, 需要针对被控模型参数变化、控制器结构等特点, 对参数调整策略进行优化。根据自适应 PID 控制器输出的加热功率  $P$  (式(3)) 与能量守恒公式(式(4)) 联立, 可得  $K_p$  变化量式(5)。

$$P = (K_{p0} + \sum_{i=0}^k \Delta K_p(i)) \cdot e(k) + K_i N \cdot \sum_{i=0}^k e(i) \quad (3)$$

$$P = a_1 \cdot T' + a_2 \cdot (T - 25) \quad (4)$$

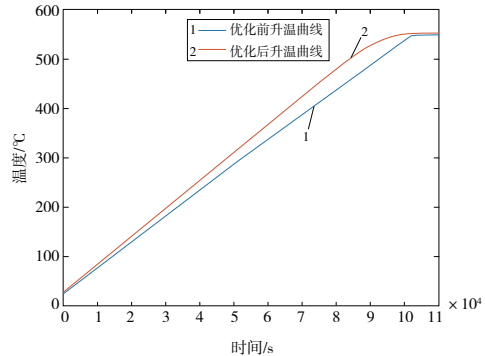
$$\sum_{i=0}^k \Delta K_p(i) = \frac{f(T) \cdot T' + g(T) \cdot (T - 25) - K_i \cdot h(T)}{e(T)} - K_{p0} \quad (5)$$

式中:  $f(T)$  为时间常数的拟合函数;  $g(T)$  为增益  $k$  的倒数  $1/k$  的拟合函数;  $h(T)$  为积分面积;  $e(T)$  为误差信号;  $K_{p0}$  为初始比例系数。

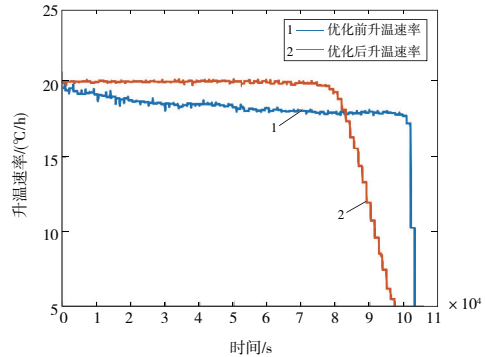
为了让自适应 PID 控制算法对实验堆熔盐管道伴热控制系统具有较好的适应性, 应当对  $f(T)$ 、 $g(T)$ 、 $h(T)$  赋予相应的权值, 权值的赋予主要根据系统模型特性、控制需求、控制工况切换而定, 如果  $\sum_{i=0}^k \Delta K_p(i)$  过小, 则会出现

升温速率鲁棒性降低的现象, 因此权值的赋予要遵循  $K_p$  总体取大的原则。

优化前后的自适应 PID 控制在 NuSIM 平台仿真运行对比如图 5 所示。



(a) 升温曲线对比图



(b) 升温速率对比图

图5 优化前后对比图

据响应曲线可以看出优化后的自适应 PID 控制升温速率鲁棒性得到很好的提升。

## 3 仿真试验分析

经过优化后的自适应 PID 控制算法升温速率具有较好的稳定性, 满足控制系统的控制性能指标。但是从实际运行工况考虑, 兼顾不同采样间隔的升温速率的稳定性、验证控制系统对不同升温速率设定值的兼容性与不同工况之间切换的控制效果, 还需要做以下功能测试: 调功周期测试、升温速率测试、运行工况测试。

### 3.1 调功周期测试

为了减小随机误差对计算升温速率的干扰, 应当适当增加功率调整周期。根据 NuCON 页面刷新周期的设定, 选取调功周期  $T=1\text{s}$ 、 $5\text{s}$ 、 $10\text{s}$ 、 $60\text{s}$  进行速率为  $20^\circ\text{C}/\text{h}$  的加热测试。不同调功周期的升温速率如图 6 所示, 调功周期测试的仿真结果性能指标如表 1 所示。根据对比图可以看出调整功率周期的增加对上升时间影响不大, 主要是因为升温速率波动是在设定的升温速率值附近波动, 速率的上下波动恰好可以抵消。但对升温速率稳定性影响较大。

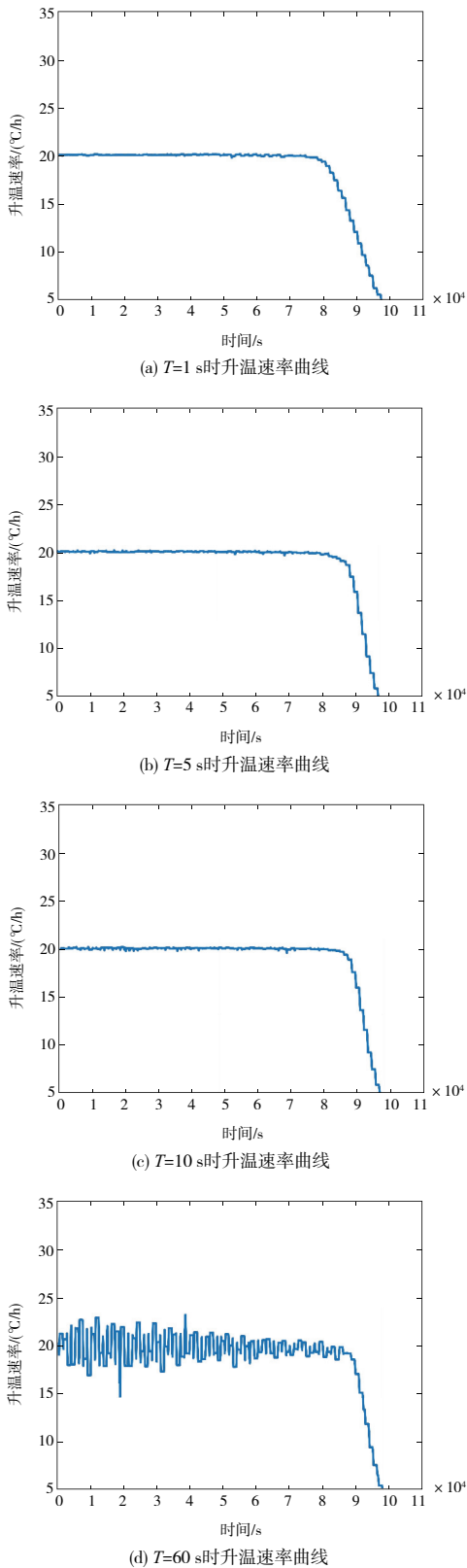


图6 不同调功间隔的升温速率对比图

在功率调整周期  $T=5\text{ s}$  和功率调整周期  $T=10\text{ s}$  时,升温速率标准差分别为 0.296 与 0.304,但是在功率调整周期  $T=60\text{ s}$  时升温速率标准差为 1.307,不满足控制要求。为了增加计算过程中的温度差,功率调整周期  $T$  应当在满足性能指标前提下遵循取大原则,所以取功率调整周

期  $T=10\text{ s}$ 。

表1 不同调功周期的温控性能指标

调功周期/s	上升时间/h	升温速率标准差
1	25.1	0.178
5	25.0	0.296
10	25.1	0.304
60	25.2	1.307

### 3.2 升温速率测试

控制系统允许在自动升温模式下设定升温速率,范围为  $10\text{ }^\circ\text{C/h}\sim 30\text{ }^\circ\text{C/h}$ ,因此需要控制系统对不同的升温速率进行兼容性测试。升温速率测试选取  $10\text{ }^\circ\text{C/h}$ 、 $15\text{ }^\circ\text{C/h}$ 、 $20\text{ }^\circ\text{C/h}$ 、 $25\text{ }^\circ\text{C/h}$ 、 $30\text{ }^\circ\text{C/h}$  等差覆盖速率设定的范围,在  $T=10\text{ s}$  时,不同升温速率的仿真结果如图7所示,性能指标如表2所示。

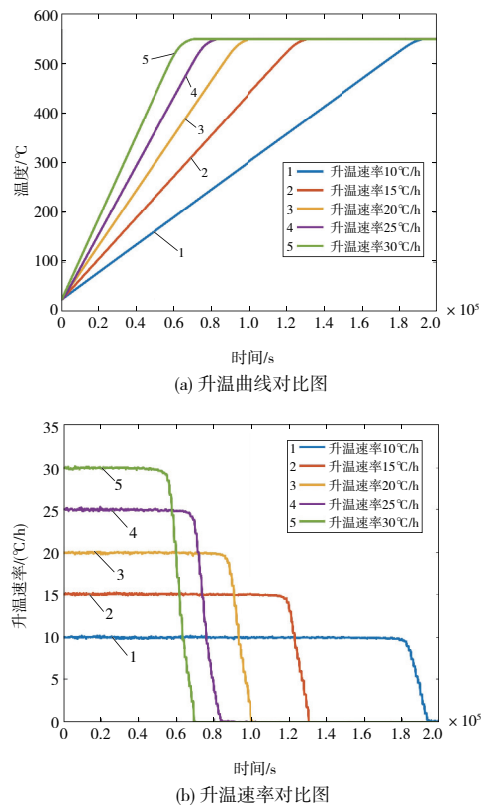


图7 不同升温速率的仿真结果

表2 不同升温速率的温控性能指标

升温速率/ $(^\circ\text{C/h})$	上升时间/h	升温速率标准差
10	49.9	0.091
15	33.4	0.128
20	25.1	0.304
25	20.3	0.413
30	16.8	0.430

(下转第133页)



- 字符检测[J]. 控制与决策, 2021, 36(10): 2483-2489.
- [17] 孙晓娜, 刘继超, 高国华. 基于视觉的乳品包装日期喷码缺陷检测技术[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 100-103, 108.
- [18] 周阳, 沈婷婷, 席志远, 等. 基于 Halcon 的日化瓶瓶底喷码质量检测算法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020(11): 101-104, 110.
- [19] 尚玉廷. 包装箱型号标记缺陷检测系统设计与实现[J]. 包装工程, 2021, 42(1): 214-223.
- [20] LIU G C, LIN Z C, YAN S C, et al. Robust recovery of subspace structures by low-rank representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(1): 171-184.
- [21] RECHT B, FAZEL M, PARRILO P. Guaranteed minimum-rank solutions of linear matrix equations via nuclear norm minimization[J]. SIAM Rev., 2007(52): 471-501.
- [22] KAEREN S, ANDREW Z. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. [C]. The 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR), San Diego, USA: [s.n.], 2015.
- [23] JESSE D, MARK G. The relationship between precision-recall and ROC curves [C]. The 23rd International Conference on Machine Learning (ICML), Pittsburgh, USA: [s.n.], 2006: 233-240.
- [24] PERERA P, PATEL V M. Learning deep features for one-class classification [J]. IEEE Transactions on Image Processing: a Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2019, 28(11): 5450-5463.
- [25] MAATEN L, HINTON G. Visualizing data using t-SNE [J]. Journal of Machine Learning Research, 2008, 9: 2579-2605.

收稿日期: 2022-04-01

(上接第 118 页)

根据仿真结果可以看出,在  $T=10\text{ s}$  时,优化后的自适应 PID 控制均具有稳定的升温速率控制,升温速率标准差分别为 0.091、0.128、0.304、0.413、0.430,满足控制要求。

### 3.3 运行工况测试

在 Simulink 仿真与模拟机 NuSIM 仿真过程中,主要模拟的是预热阶段,熔盐-熔盐换热器与熔盐-空气换热器处于关闭状态,熔盐管道模块没有外部热源,可将所有

模块的温度视为相同。但是在热态运行阶段存在堆芯衰变热,假设堆芯供热不足,自适应 PID 控制一直处于稳态升温状态,积分环节不断增大,容易产生超调。因此在运行工况切换为运行阶段时,低于  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  的加热通过无积分的自适应 PID 控制实现。所以需要验证在预热阶段达到稳态后,切换到运行阶段,然后改变温度至  $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测试控制系统在不同工况之间切换的运行状态是否符合控制需求。仿真结果如图 8 所示。

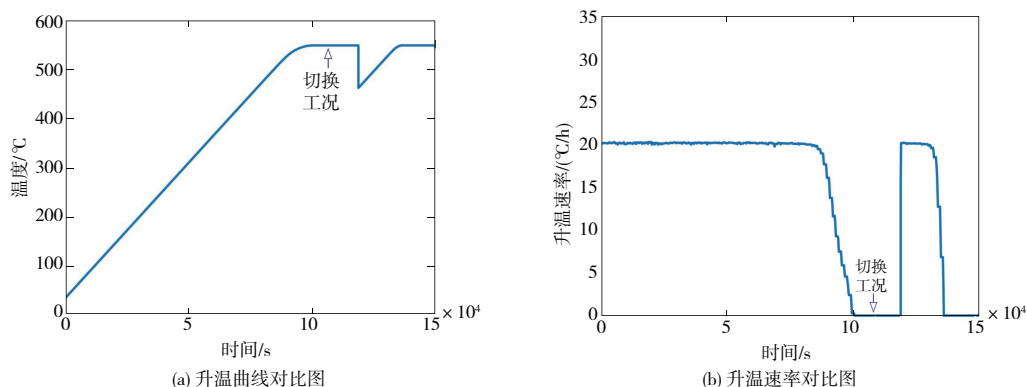


图 8 切换工况的仿真结果

根据仿真结果可以看出,达到稳态之后,切换工况的升温速率稳定,且达到控制目标时不会产生超调,因此该温控系统满足控制需求。

## 4 结语

在分析了实验堆熔盐管道温度控制系统原理的基础上,设计了一种自适应 PID 控制器。首先在 Simulink 仿真分析,并在工程模拟机上进行验证与优化,最后在控制需求的范围内进行功能测试。结果表明:相比工业常用的控制方法,自适应 PID 控制在实验堆熔盐管道温度控制的升温速率稳定性好,超调量最小,并且在控制系统要求的升温速率、工况之间均有满足控制系统需求的控制效果。

### 参考文献:

- [1] 王丽丽, 辛玲. 改进的模型参考自适应 PID 新风温度控制研究[J]. 自动化仪表, 2021, 42(12): 51-55.
- [2] JIANG W, YIN P, CAO L T. On fuzzy self-tuning PID MATLAB simulation for central heating [C]//2007 Chinese Control Conference. Zhangjiajie, China: IEEE, 2007: 425-429.
- [3] 闫秀英, 任庆昌, 孟庆龙. 一种自校正 PID 控制器设计与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(增刊 2): 753-756.
- [4] 申玉鹏, 张耿毓. 基于改进 PID 算法的加热炉炉温控制系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2019, 42(15): 24-28.
- [5] 金愿, 程进辉, 王坤, 等. 几种典型熔盐冷却剂的热物性研究[J]. 核技术, 2016, 39(5): 83-91.
- [6] 李劲涛, 贾祥, 后接. 熔盐堆回路伴热保温模块自适应 PID 控制系统设计[J]. 仪器仪表用户, 2021, 28(12): 25-29.

收稿日期: 2022-03-14