

液态熔盐堆堆芯功率内模控制器设计与仿真

曾文杰, 朱伟聪, 谢金森, 姜庆丰, 于涛*

(南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳 421001)

摘要:内模控制是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新型控制策略,具有结构简单、设计直观、无需精确的数学模型、在线调整参数少等优点。为探索内模控制在反应堆控制领域中的应用,以熔盐实验堆堆芯功率控制为例,通过建立熔盐实验堆一回路系统线性化模型,采用内模控制技术,结合粒子群优化算法设计堆芯功率内模控制器。并基于 MATLAB/Simulink 建立熔盐实验堆一回路仿真系统,开展熔盐实验堆堆芯阶跃反应性扰动下的功率控制研究。结果表明,所设计的堆芯功率内模控制器可很好地控制堆芯功率,实现系统的快速稳定。

关键词:熔盐实验堆;堆芯功率;内模控制器;反应性扰动

中图分类号:TL36

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2020)05-0937-07

doi:10.7538/yzk.2019.youxian.0412

Design and Simulation of Internal Model Controller for Liquid Molten Salt Reactor Core Power

ZENG Wenjie, ZHU Weicong, XIE Jinsen, JIANG Qingfeng, YU Tao*

(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: Internal model control is a new control strategy based on process mathematical model for controller design. It has the advantages of simple structure, intuitive design, no need for accurate mathematical model, and less on-line adjustment parameters. In order to explore the application of internal model control in the field of reactor control, taking the core power control of molten salt experimental reactor as an example, a linearized model of the primary loop system of molten salt experimental reactor was established. The internal model control technology was adopted and the core power internal model controller was designed by combining particle swarm optimization. Based on MATLAB/Simulink, the primary circuit simulation system of molten salt experimental reactor was established, and the power control of liquid molten salt experimental reactor under step reactivity disturbance was studied. The results show that the internal model controller can control the core power well and realize the fast and stable system.

收稿日期:2019-06-03;修回日期:2019-07-04

基金项目:湖南省教育厅优秀青年项目资助(18B259)

作者简介:曾文杰(1988—),男,湖南衡阳人,讲师,硕士,从事核反应堆运行与控制方向研究

*通信作者:于涛, E-mail: yutao29@sina.com

网络出版时间:2019-12-19;网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20191218.1414.010.html>

Key words: molten salt experimental reactor; core power; internal model controller; reactivity disturbance

内模控制具有响应速度快、抗干扰能力强、结构简单和成本低等优点,目前内模控制已广泛用于电气工程、火电厂、电子通信等领域^[1-3]。液态熔盐堆一回路系统是一个非线性的复杂系统,设计一个性能良好的堆芯功率控制器对实现一回路系统的稳定运行至关重要^[4]。

为研究液态熔盐堆堆芯功率控制,本文采用集总参数法建立熔盐实验堆一回路非线性模型^[5],并采用微扰理论对非线性模型进行线性化处理,建立系统线性化模型。在此基础上,根据内模控制理论^[6-9],设计液态熔盐堆堆芯功率内模控制器^[9-15],以熔盐实验堆 MSRE 为对象进行控制器仿真分析。

1 液态熔盐堆一回路模型

由于液态熔盐堆堆芯燃料具有流动性,堆芯出口处燃料温度经过时间延迟后作为热交换器一次侧入口温度,热交换器一次侧出口温度经过时间延迟后作为堆芯进口处燃料温度,从而可更准确地模拟系统温度在瞬态过程中的变化。采用集总参数法建立系统非线性模型。

1.1 堆芯动态模型

1) 堆芯物理模型

基于点堆动力学模型,根据中子密度与缓发中子先驱核密度守恒原理,建立堆芯物理模型^[5]:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i \quad (1)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} P - \lambda_i c_i - \frac{1}{\tau_c} c_i + \frac{\exp(-\lambda_i \tau_1)}{\tau_c} c_i(t - \tau_1) \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

$$c_i(t - \tau_1) \approx c_i(t) - \tau_1 \frac{dc_i(t)}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda b_i} P - \frac{\lambda_i}{a_i b_i} c_i \quad i = 1, \dots, 6 \quad (4)$$

$$a_i = \frac{\lambda_i \tau_c}{\lambda_i \tau_c + 1 - \exp(-\lambda_i \tau_1)} \quad (5)$$

$$b_i = 1 + \frac{\tau_1}{\tau_c} \exp(-\lambda_i \tau_1) \quad (6)$$

式中: P 为反应堆功率; c_i 为第*i*组缓发中子先驱核密度; t 为时间; ρ 为引入堆芯的总反应性;

β 为缓发中子总份额; β_i 为第*i*组缓发中子份额; λ_i 为第*i*组缓发中子先驱核衰变常量; Λ 为堆内中子代时间; τ_c 、 τ_1 分别为熔盐燃料在堆内的流动时间和堆外的流动时间。

对式(1)、(2)进行归一化处理得:

$$\frac{dP_r}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P_r + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_{ir} \quad (7)$$

$$\frac{dc_{ir}}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda b_i} P_r - \frac{\lambda_i}{a_i b_i} c_{ir} \quad i = 1, \dots, 6 \quad (8)$$

式中: P_r 为相对功率, $P_r = P/P_0$, P_0 为堆芯初始稳态功率; c_{ir} 为第*i*组缓发中子先驱核相对密度, $c_{ir} = c_i/c_{i0}$, c_{i0} 为堆芯初始稳态先驱核浓度。

2) 堆芯热工模型

基于堆芯燃料和石墨的能量守恒,假设堆芯燃料和石墨的物性参数为常数,系统的流动为不可压缩流动,建立堆芯热工模型^[5]:

$$M_g c_{pg} \frac{dT_g}{dt} = \gamma_g P_0 P_r - U(T_g - T_s) \quad (9)$$

$$\frac{M_s c_{ps}}{2} \frac{dT_{so}}{dt} = \frac{\gamma_s P_0 P_r}{2} + \frac{U}{2}(T_g - T_s) - \Gamma_s c_{ps}(T_{so} - T_s) \quad (10)$$

$$\frac{M_s c_{ps}}{2} \frac{dT_s}{dt} = \frac{\gamma_s P_0 P_r}{2} + \frac{U}{2}(T_g - T_s) - \Gamma_s c_{ps}(T_g - T_{si}) \quad (11)$$

式中: T_s 为堆芯燃料平均温度; T_g 为石墨平均温度; T_{si} 为堆芯进口处燃料温度; T_{so} 为堆芯出口处燃料温度; γ_s 、 γ_g 分别为燃料产热总份额和石墨产热总份额; M_s 为燃料质量; c_{ps} 为燃料比定压热容; M_g 为石墨质量; c_{pg} 为石墨比定压热容; U 为燃料和冷却剂间的换热系数; Γ_s 为燃料质量流量。

3) 堆芯反应性模型

液态熔盐堆的反应性平衡方程^[5]为:

$$\rho = \rho_0 + \alpha_{rod} \Delta z + \alpha_s (T_s - T_s(0)) + \alpha_g (T_g - T_g(0)) \quad (12)$$

$$\rho_0 = \sum_{i=1}^6 \beta_i \left(1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_i + 1/\tau_c \times (1 - \exp(-\lambda_i \tau_1))} \right) \quad (13)$$

式中: ρ_0 为初始反应性; α_{rod} 为控制棒反馈系数;

Δz 为控制棒棒位变化; α_s 、 α_g 分别为燃料熔盐温度反馈系数和石墨温度反馈系数; $T_s(0)$ 、 $T_g(0)$ 分别为稳态时刻堆芯燃料熔盐平均温度和堆芯石墨平均温度。

1.2 热交换器动态模型

为方便建立热交换器动态模型^[5], 假设热交换器两侧流体均为单相流动, 且热流介质的物性参数为常数。经简化处理后, 将热交换器的换热通道简化为一次侧、管壁和二次侧组成的流体沿壁面两侧逆流换热的模型^[5]:

$$\frac{M_{He,s}c_s}{2} \frac{dT_{He,so}}{dt} = -\Gamma_s c_s (T_{He,so} - T_{He,s}) - \frac{U_{sc}}{2} (T_{He,s} - T_{He,c}) \quad (14)$$

$$\frac{M_{He,s}c_s}{2} \frac{dT_{He,s}}{dt} = -\Gamma_s c_s (T_{He,s} - T_{He,si}) - \frac{U_{sc}}{2} (T_{He,s} - T_{He,c}) \quad (15)$$

$$\frac{M_{He,c}c_c}{2} \frac{dT_{He,co}}{dt} = -\Gamma_c c_c (T_{He,co} - T_{He,c}) + \frac{U_{sc}}{2} (T_{He,s} - T_{He,c}) \quad (16)$$

$$\frac{M_{He,c}c_c}{2} \frac{dT_{He,c}}{dt} = -\Gamma_c c_c (T_{He,c} - T_{He,ci}) + \frac{U_{sc}}{2} (T_{He,s} - T_{He,c}) \quad (17)$$

式中: $M_{He,s}$ 、 $M_{He,c}$ 分别为热交换器一次侧和二次侧熔盐质量; c_s 、 c_c 分别为热交换器的一次侧和二次侧熔盐热容; U_{sc} 为热交换器一次侧与二次侧间的热传导系数; Γ_s 、 Γ_c 分别为流经热交换器一次侧和二次侧质量流量; $T_{He,s}$ 、 $T_{He,c}$ 分别为热交换器一次侧和二次侧熔盐平均温度; $T_{He,so}$ 、 $T_{He,co}$ 分别为一次侧和二次侧出口温度; $T_{He,si}$ 、 $T_{He,ci}$ 分别为一次侧和二次侧进口温度。

1.3 延时环节

在液态熔盐堆中, 堆芯与热交换器之间均存在着管道延时。将管道延时表示成如下形式^[5]:

$$T_{He,si}(t) = T_{so}(t - \tau_1) \quad (18)$$

$$T_{He,ci}(t) = T_{He,so}(t - \tau_2) \quad (19)$$

1.4 线性化模型

依据微扰理论, 在式(1)~(19)的基础上分别建立堆芯和换热器的线性状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{B}_c \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}_c \mathbf{x} + \mathbf{D}_c \mathbf{u} \end{cases} \quad (20)$$

$$\mathbf{u} = [\delta\rho_{rod} \quad \delta T_{si}]^T, \mathbf{y} = [\delta P_r \quad \delta T_{so}]^T \quad (21)$$

$$\mathbf{x} = [x_1 \cdots x_{10}]^T = [\delta P_r \quad \delta c_{1r} \quad \cdots \quad \delta c_{6r} \quad \delta T_{so} \quad \delta T_s \quad \delta T_g]^T \quad (22)$$

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} \frac{\rho(0) - \beta}{\Lambda} & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 & \lambda_5 & \lambda_6 & 0 & \frac{P_r(0)a_s}{\Lambda} & \frac{P_r(0)a_g}{\Lambda} \\ \frac{\beta_1}{\Lambda b_1} & -\frac{\lambda_1}{a_1 b_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_2}{\Lambda b_2} & 0 & -\frac{\lambda_2}{a_2 b_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_3}{\Lambda b_3} & 0 & 0 & -\frac{\lambda_3}{a_3 b_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_4}{\Lambda b_4} & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_4}{a_4 b_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_5}{\Lambda b_5} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_5}{a_5 b_5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_6}{\Lambda b_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda_6}{a_6 b_6} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\gamma_s P(0)}{M_s c_{ps}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{2\Gamma_s}{M_s} & \frac{2\Gamma_s}{M_s} - \frac{U}{M_s c_{ps}} & \frac{U}{M_s c_{ps}} \\ \frac{\gamma_s P(0)}{M_s c_{ps}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{2\Gamma_s}{M_s} + \frac{U}{M_s c_{ps}}\right) & \frac{U}{M_s c_{ps}} \\ \frac{\gamma_g P(0)}{M_g c_{pg}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{U}{M_g c_{pg}} & -\frac{U}{M_g c_{pg}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$B_c = \begin{bmatrix} \frac{P_r(0)}{\Delta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2\Gamma_s}{M_s} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

$$C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$D_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$A_{He} = \begin{bmatrix} -\frac{2\Gamma_s c_s}{M_{He,s} c_s} & \frac{2\Gamma_s c_s}{M_{He,s} c_s} - \frac{U_{sc}}{M_{He,s} c_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{2\Gamma_s c_s}{M_{He,s} c_s} + \frac{U_{sc}}{M_{He,s} c_s}\right) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{U_{sc}}{M_{He,s} c_c} & -\frac{2\Gamma_c c_c}{M_{He,c} c_c} & \frac{2\Gamma_c c_c}{M_{He,c} c_c} - \frac{U_{sc}}{M_{He,c} c_c} \\ 0 & \frac{U_{sc}}{M_{He,c} c_c} & 0 & -\left(\frac{2\Gamma_c c_c}{M_{He,c} c_c} + \frac{U_{sc}}{M_{He,c} c_c}\right) \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$B_{He} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{2\Gamma_s c_s}{M_{He,s} c_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2\Gamma_c c_c}{M_{He,c} c_c} \end{bmatrix}^T \quad (32)$$

$$C_{He} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$D_{He} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

式中, δ 为微小扰动。

2 仿真系统开发与应用

2.1 堆芯功率内模控制器设计

1) 内模控制原理

内模控制^[6]的一般结构如图1所示。内模控制设计思路是将对象模型与实际对象相关联,控制器逼近模型的动态的逆,故其是一种基于模型逆的控制方法。对单变量系统而言,内模控制器取模型最小相位部分的逆,并通过附加低通滤波器以增强系统的鲁棒性。理想内模控制器存在以下问题^[7]:若模型存在非最小相位相,则内模控制器取 $Q(s) = M^{-1}(s)$ 时存在超前项,在物理上无法实现;当 $M(s)$ 严格正则时,理想控制器则非正则,从而导致此控制器微分环节对干扰异常敏感。为解决此问题,一般

由式(14)~(17),建立换热器状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{x} = A_{He}x + B_{He}u \\ y = C_{He}x + D_{He}u \end{cases} \quad (27)$$

$$u = [\delta T_{He,si} \quad \delta T_{He,ci}]^T \quad (28)$$

$$y = [\delta T_{He,so} \quad \delta T_{He,co}]^T \quad (29)$$

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [\delta T_{He,so} \quad \delta T_{He,s} \quad \delta T_{He,co} \quad \delta T_{He,c}]^T \quad (30)$$

采用两步法^[7]。

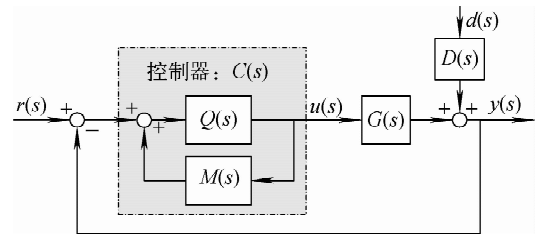


图1 内模控制原理框图

Fig.1 Block diagram of internal model control

两步法设计内模控制器基本思路如下。

(1) 将过程模型拆分成两部分,即 $M(s) = M_-(s) * M_+(s)$ 。其中: $M_-(s)$ 为最小相位特征的传递函数,即 $M_-(s)$ 是只包含左半平面零点的最小相位模型; $M_+(s)$ 为全通滤波器传递函数,对所有频率满足 $|M(s)| = 0$,在 $M_+(s)$ 中包含了所有时滞和右半平面零点。从而设计出稳定的理想内模控制器为 $Q(s) = M^{-1}(s)$ 。

(2) 引入低通滤波器。由于一般情况下控制对象 $G(s)$ 稳定,为保证内模控制器 $Q(s)$ 的可实现性及稳定性,引入一个低通滤波器 $F(s)$ 与内部模型 $M(s)$ 的逆相乘得到控制器模型^[7] 如式(35)所示。

$$Q(s) = M^{-1}(s)F(s) \quad (35)$$

$$F(s) = \frac{1}{\lambda s + 1} \quad (36)$$

式(36)中,λ为控制器设计的唯一可调参数,决定着系统的响应速度和鲁棒性。随着λ的增加,系统的鲁棒性能提升,但跟踪性能将变差,因此,λ的选取需对系统的跟踪性能和鲁棒性进行折中考虑,此处根据实际仿真结果筛选最佳λ=3。

2) 内模控制器数学模型的获取

在控制系统的辨识过程中,通常情况下采用开环系统辨识法^[7]辨识得到内部模型M(s)。利用工业上常用的一阶惯性加滞后模型FOPDT (first order plus dead time model)^[7]系统表示,系统的传递函数M(s)如式(37)所示。

$$M(s) = \frac{K_p}{(T_p s + 1)^m} e^{-\theta} \quad (37)$$

式中:K_p、T_p、θ为待辨识参数;m为内部模型的阶数。对式(37)左右两侧取自然对数后,进行两次求导得到下式:

$$\frac{M^{(1)}(s)}{M(s)} = -\frac{mT_p}{T_p s + 1} - \theta \quad (38)$$

$$\frac{M^{(2)}(s)M(s) - [M^{(1)}(s)]^2}{M^2(s)} = \frac{mT_p^2}{(T_p s + 1)^2} \quad (39)$$

将拉普拉斯算子s定义为s=a+jω,其中a为衰减因子。由于M(s)未知,将模型的精确条件G(s)=M(s)代入上式,再令:Q₁= $\frac{G^{(1)}(a)}{G(a)}$,

Q₂= $\frac{G^{(2)}(a)G(a) - [G^{(1)}(a)]^2}{G^2(a)}$,则解得:

$$T_p = \begin{cases} \frac{-aQ_2 + \sqrt{mQ_2}}{a^2Q_2 - m} & a^2Q_2 - m > 0 \\ \frac{aQ_2 + \sqrt{mQ_2}}{m - a^2Q_2} & a^2Q_2 - m < 0 \end{cases} \quad (40)$$

$$\theta = -Q_1 - \frac{T_p}{T_p a + 1} \quad (41)$$

$$K_p = (T_p a + 1)G(a)e^{a\theta} \quad (42)$$

求出K_p、T_p、θ即可得到内部模型M(s),根据式(35)~(42)结合被控对象传递函数G(s)编写粒子群优化算法PSO(particle swarm optimization)^[8]程序,迭代选取适合的衰减因子a。PSO算法流程图如图2所示。图2中优化目

标函数采用传统的绝对误差积分准则IAE指标,IAE= $\sum_{k=1}^N [y(k) - \hat{y}(k)]$ 。其中,y(k)为实际的被控对象模型;ŷ(k)为建立的内部对象模型。

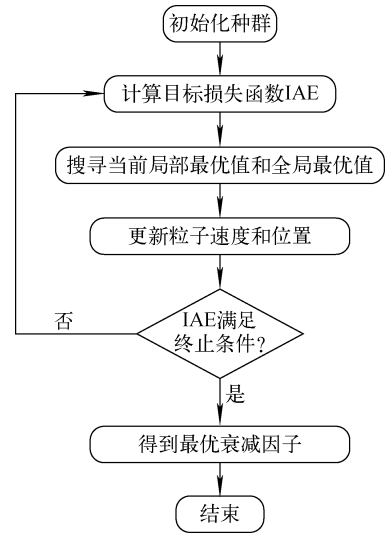


图2 粒子群优化算法流程图
Fig. 2 Flow chart of particle swarm optimization algorithm

PSO粒子群算法基本思路如下。

(1) 在可行解的空间范围内将一群粒子进行初始化处理,其中每个粒子均代表1个可能的最优解,用位置、速度及适应度这3个指标描述单个粒子的特征。各粒子的适应度是通过定义的适应度函数计算所得,其值大小直接决定粒子的优劣,在此,适应度函数定义为被控对象的传递函数G(s)与内部对象模型M(s)的绝对误差积分即IAE。

(2) 当粒子在三维空间中运动时,通过个体极值和群体极值的大小求得新的一群粒子。

(3) 每当产生新粒子群时,再次计算该群粒子的适应度。通过将新的粒子的适应度与原来的上一代粒子群的个体最优和群体最优值进行比较,从而得到更适合的个体最优值和群体最优值。最后进行不断迭代更新,直到符合输出条件。

3) 基于模型失配的内模控制器设计

由于在工程上很难使辨识所得对象与过程模型完全相等,故只需模型足够精确,使得:

$$M(s) \approx G(s) \quad (43)$$

即可满足条件^[9-15]。

当 θ 较小时,对于 $m=1$,时滞项 $e^{-\theta s}$ 用 1 阶 Pade 公式进行近似,如下式所示:

$$e^{-\theta s} \approx \frac{1 - 0.5\theta s}{1 + 0.5\theta s} \quad (44)$$

若当 $M(s) = \frac{K_p}{(T_p s + 1)^m} e^{-\theta s}$ 中 $m=1$ 时,

$$M(s) = \frac{K_p(1 - 0.5\theta s)}{(T_p s + 1)(1 + 0.5\theta s)}$$

即可分析得 $M_-(s) = \frac{K_p}{(T_p s + 1)(1 + 0.5\theta s)}$, $M_+(s) = 1 - 0.5\theta s$ 。

当 $m \geq 2$ 时,时滞项 $e^{-\theta s}$ 用 2 阶泰勒公式近似为下式:

$$e^{-\theta s} \approx 1 - \theta s + 0.5\theta^2 s^2 \quad (45)$$

若 $m > 2$ 或 $m = 2$, $e^{-\theta s} \approx 1 - \theta s + 0.5\theta^2 s^2$, 则将包含所有左半平面零点的传递函数作为 $M_-(s)$, 包含所有右半平面零点的传递函数作为 $M_+(s)$ 。

根据图 1, 可得到控制器总体系统过程数学模型, 表示为如下形式:

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)M(s)} \quad (46)$$

再将式(36)和(37)代入式(35)中可得到控制器传递函数 $Q(s)$ 为:

$$Q(s) = \frac{(T_p s + 1)^m}{K_p(\lambda s + 1)^m} \quad (47)$$

最后将式(37)和式(47)代入式(46)中可得到控制器模型为:

$$C(s) = \frac{(T_p s + 1)^m}{K_p((\lambda s + 1) - e^{-\theta s})} \quad (48)$$

本文在辨识过程中选取 2 阶模型即 $m=2$, 从而算得内模控制器具体模型表达式为:

$$C(s) = \frac{0.005258s^2 + 0.187s + 1}{0.05957s^2 + 0.1205s} \quad (49)$$

2.2 堆芯功率内模控制器仿真分析

考虑液态熔盐堆一回路系统中燃料熔盐的

流动特性, 基于 MATLAB/Simulink 建立熔盐实验堆一回路仿真系统, 如图 3 所示。

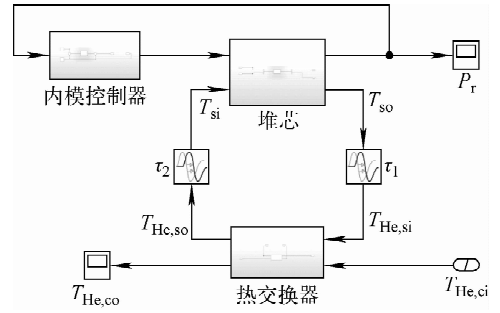
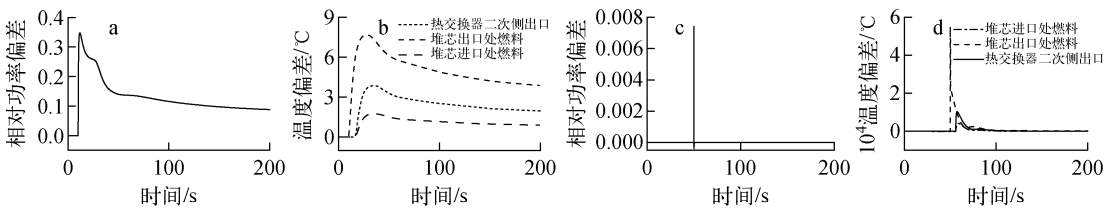


图 3 基于内模控制的 MSRE 一回路系统仿真图
Fig. 3 Simulation diagram of MSRE loop system based on internal model control

在 100%FP 堆芯功率水平下, 无内模控制器时引入 50 pcm 的阶跃反应性响应如图 4a、b 所示。图 4a 中, 当引入阶跃反应性时, 无控制器下, 系统相对功率偏差超调量大, 由于系统内自身的温度负反馈效应, 相对功率偏差输出在经历瞬时上升后缓慢下降并稳定在新的输出值上。图 4b 中, 无控制器作用时, 系统的热交换器二次侧出口温度、堆芯出口处燃料温度以及堆芯进口处燃料温度与其稳态初始值的偏差在短时间内达到了一个较大的超调量, 待达到峰值后逐渐下降, 缓慢地达到新的稳定输出值。

在 100%FP 堆芯稳态功率水平下, 有内模控制器时引入 50 pcm 的阶跃反应性, 系统的相对功率偏差响应和温度偏差响应如图 4c、d 所示。由图 4c 可知, 在内模控制器作用下, 系统相对功率偏差在瞬时上升后, 又瞬时下降至一个较小的负值, 然后快速达到 0, 系统达到稳定, 且相对功率偏差上冲幅度和超调量都显著减小, 过渡时间短。系统的温度响应曲线如图 4d



a、b——无内模控制器; c、d——有内模控制器

图 4 100% FP 功率水平下引入 50 pcm 反应性时 MSRE 系统响应图

Fig. 4 MSRE system response diagram with 50 pcm reactivity at 100% FP power level

所示,在引入反应性后,各温度偏差的超调量显著减小,最后偏差值稳定到0。由此可见,内模控制器能快速、有效地控制液态熔盐堆堆芯功率,控制效果良好。

3 结语

考虑液态熔盐堆一回路系统中燃料熔盐的流动性对堆芯功率控制的影响,采用集总参数法建立熔盐实验堆一回路系统非线性模型。基于该非线性模型,建立熔盐实验堆一回路线性化模型,结合内模控制理论和粒子群优化算法,设计了熔盐实验堆堆芯功率内模控制器。针对熔盐实验堆运行中出现的反应性阶跃扰动,开展仿真计算。结果表明,所设计的内模控制器能准确、快速地控制堆芯功率,使系统迅速达到稳定。

参考文献:

- [1] 雷亚军,张世峰,张祝威,等. 基于 OS-LSSVM 焦炉气管压力系统的内模控制[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(2): 72-73.
LEI Yajun, ZHANG Shifeng, ZHANG Zhuwei, et al. Internal model control based on OS-LSSVM coke oven collector pressure system[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(2): 72-73 (in Chinese).
- [2] 孟磊,李俊鹏,姜炜,等. 多模型内模控制在 SCR 脱硝系统中的应用[J]. 山东电力技术, 2019, 46(1): 47-51.
MENG Lei, LI Junpeng, JIANG Wei, et al. Application of multi model internal model control in SCR denitration system[J]. ShangDong Electric Power, 2019, 46(1): 47-51(in Chinese).
- [3] 王业兴,骆长鑫,张涛. 基于双口内模控制的导引头稳定回路设计[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(12): 126-130.
WANG Yexing, LUO Changxin, ZHANG Tao. Design of seeker stable loop based on 2-port internal model control[J]. Fire and Command Control, 2018, 43(12): 126-130(in Chinese).
- [4] SIDES W H. MSBR control studies, ORNL-TM-2489[R]. USA: ORNL, 1969.
- [5] STEFFY R C, WOOD P J. Theoretical dynamic analysis of the MSRE with ^{233}U fuel, ORNL-TM-2571[R]. USA: ORNL, 1969.
- [6] 郝俸. 多变量大滞后系统的内模控制及 PID 转换方法的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2013.
- [7] 蒋北艳. 复杂系统新型内模控制方法的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2015.
- [8] 包子阳. 智能优化算法及 MATLAB 实例[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社, 2018.
- [9] 郑恩让,阮士涛,王黎. 基于失配模型的内模控制器的设计[J]. 控制工程, 2016, 23(4): 532-537.
ZHENG Enrang, RUAN Shitao, WANG Li. Design of internal model controller based on mismatched model[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(4): 532-537(in Chinese).
- [10] 赵志诚,文新宇. 内模控制及其应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [11] 王宇辉. 内模控制方法的研究与设计[D]. 北京:北京化工大学, 2009.
- [12] 曹丽婷. 时滞及非方多变量系统的辨识及内模控制研究[D]. 北京:北京化工大学, 2015.
- [13] GARCIA C E, MORARI M. Internal model control, II: Design procedure for multivariable systems[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1985, 24(2): 472-484.
- [14] WANG Q G, BI Q, ZHANG Y. Re-design of Smith predictor systems for performance enhancement[J]. ISA Transactions, 2000, 39(1): 79-92.
- [15] 刘红军,韩璞,孙海蓉,等. 基于内模控制的 PID 控制器的设计[J]. 计算机仿真, 2004, 22(3): 207-210.
LIU Hongjun, HAN Pu, SUN Hairong, et al. PID controller design based on internal model control theory[J]. Computer Simulation, 2004, 22(3): 207-210(in Chinese).