

空间堆线性变参数模型预测控制方法

马骞, 孙培伟, 魏新宇

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统PID控制方法在面临复杂负荷需求变化时无法满足空间核反应堆的控制性能需求的问题,提出了基于线性变参数模型的空间堆模型预测控制方法。针对强非线性特性,采用线性变参数模型作为预测模型,对全功率范围内的空间堆运行特性进行预测;针对大时滞的特性,采用串级控制理论结合模型预测方法优化执行机构动作,提升被控量的响应速度。分别设计了电功率和冷却剂温度的预测控制系统,在典型工况下进行控制性能仿真验证,结果表明:相对于串级PID控制系统,所设计的预测控制系统的电功率调节时间减少了68.7%,冷却剂温度调节时间减少了81.7%;电功率和冷却剂温度预测控制系统的核功率的超调量分别减少了22.3%和13.0%,保证了反应堆的安全;控制系统的适用性强,在不同功率水平均具有良好的控制性能;执行机构的动作大幅减少,驱动电机峰值电压下降了84.1%,使用寿命得到延长,系统经济性得到提升。该研究提出的结合串级控制理论基于线性变参数模型的预测控制方法能够用于优化空间堆的控制系统。

关键词: 空间核反应堆;模型预测控制;线性变参数模型;串级控制

中图分类号: TL361 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202411016 **文章编号:** 0253-987X(2024)11-0164-12

Predictive Control Method Based on Linear Varying Parameter Model for Space Nuclear Reactors

MA Qian, SUN Peiwei, WEI Xinyu

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Space nuclear reactors exhibit strong nonlinearity and significant time delay characteristics. To address the challenge of traditional PID control methods failing to meet the control performance requirements of space nuclear reactors amidst complex load demand fluctuations, a predictive control approach based on a linear varying parameter model for space reactors is proposed. To tackle the pronounced nonlinearity, a linear varying parameter model is employed as the predictive model to anticipate the operational characteristics of space reactors across the entire power spectrum. To mitigate the notable time delay characteristics, the cascade control theory is combined with the model prediction method to optimize actuator actions, thereby enhancing the response speed of the controlled variable. Predictive control systems for electrical power and coolant temperature are individually designed, and control performance simulations are conducted under typical operational scenarios. The results indicate that compared to the cascade PID control system, the proposed predictive control system reduces power adjustment time by

68.7% and coolant temperature adjustment time by 81.7%. The nuclear power overshoots of predictive control systems for electrical power and coolant temperature are reduced by 22.3% and 13.0%, respectively, ensuring reactor safety. The control system demonstrates robust applicability and commendable control performance across various power levels. Additionally, a significant decrease in actuator actions is achieved, with a peak voltage drop of 84.1% for the drive motor, thereby extending its lifespan and enhancing system efficiency. Therefore, the proposed predictive control method based on the cascade control theory and linear varying parameter model can be used to optimize the control system of space reactors.

Keywords: space nuclear reactor; model predictive control; linear parameter-varying model; cascade control

空间核反应堆作为空间飞行器的供能设备,具有能量密度高、长续航的特点,适合用于深空探测任务或星表基地等具有大功率、长续航能量供应需求的领域。自 20 世纪 60 年代开始,各国陆续开展了对空间堆技术的研究,推出了包含 SNAP-10A^[1]、BUK^[2]和 TOPAZ^[3]系列等多种堆型的空间核反应堆,这些空间堆能够为空间飞行器的设备提供电能,但发电效率较低。随着热电转换技术的成熟和发电效率的提升,近年来,空间核反应堆的研究浪潮再次兴起,相继推出包括 Space-R^[4]、普罗米修斯^[5]、MSR^[6]、Kilopower^[7]等空间核反应堆发展计划。目前,虽然空间核反应堆在设计和研发上积累了一定的经验,但对控制领域的研究尚少。空间核反应堆运行特性与压水堆具有较大的差异,表现出非线性强和时滞大的特点^[8];由于运行要求,空间核电源面临复杂负荷需求变化的挑战,这些特点均使得空间堆控制系统设计难度上升。

针对空间堆的这些特点,国内外学者提出了不同的解决方案。Alvarez-Ramirez 等提出了包含 3 个环路的串级控制系统以加快调节速度^[9],分别是内环控制鼓角度、中环核功率和外环输出电流。Shtessel 设计了滑模控制系统实现空间堆的启动过程^[10],降低了空间堆启动过程中参数不确定性对控制性能的影响。Fu 等设计了空间堆的模型预测控制(MPC)系统,提升了电功率的控制性能,但是仍存在一定的缺陷,例如稳态下电功率振荡,无法完全稳定,且控制系统未在其他功率水平进行验证^[11]等。Ma 等针对空间堆运行特性提出了在高功率水平以电功率为被控量,低功率水平以冷却剂温度作为被控量的控制策略^[12],并设计了以核功率为内环控制器、以电功率或冷却剂温度为外环控制器的串级控制系统,相对于直接反馈控制系统,控制性能和鲁棒性均得到了提升。串级控制方法在传热系统控

制和反应堆控制领域得到了大量的研究和应用^[13-17],虽然能够在一定程度上解决空间堆大时滞的问题,但是内环核功率的控制性能与外环被控量的控制性能具有矛盾性,限制了控制性能优化和提升。并且,这些控制系统没有充分考虑空间堆非线性强的特性。

因此,本文提出耦合了线性变参数(LPV)模型和串级控制理论的预测控制方法,采用串级控制结构解决空间堆大时滞问题,采用线性变参数模型解决非线性问题,并采用预测控制提升控制性能,实现空间堆全功率范围内的高性能控制。

1 热离子空间堆介绍

本文以热离子空间堆作为研究对象,其结构如图 1 所示,其关键参数见表 1。热离子空间核反应堆的核心是反应堆堆芯,内部包含 37 根热离子燃料元件、慢化剂基体和反射层,热离子燃料元件为圆柱体,由内而外分别是二氧化铀燃料、发射极、接收极、冷却剂通道。裂变反应产生的热能经热离子反应,

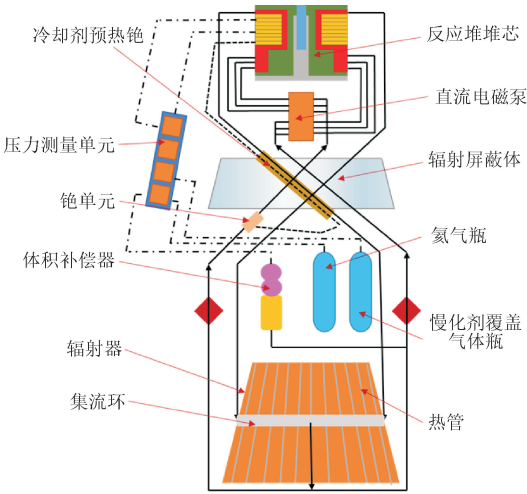


图 1 热离子空间堆结构^[18]

Fig. 1 Structure of space thermionic nuclear reactor

一部分转变为电能供应飞行器设备,另一部分由冷却剂吸收,通过电磁泵驱动,经集流环传递至热管辐射器,最终通过辐射换热的形式向太空散热。

表 1 热离子空间堆主要设计参数

Table 1 Design parameters of space thermionic nuclear reactor

参数	数值及范围
热功率/kW	115
电功率/kW	4.5~5.5
堆芯入口温度/K	743
堆芯出口温度/K	843
冷却剂流量/(kg·s ⁻¹)	1.3

此外,为了维持空间核反应堆的正常运行,反应堆内还包括其他的辅助系统,辐射屏蔽体用于保护空间飞行器内的非核设备不受辐射,氦气瓶和慢化剂覆盖气体瓶用于为热离子燃料元件内的间隙提供填充气体,铯单元用于为热离子燃料元件内的发射极和接收极之间提供维持热离子反应的铯蒸汽,体积补偿器用于调节反应堆一回路冷却剂装量。

由于空间堆热量传递过程复杂,涉及到多种能量传递形式,且经过导热系数小的气体介质,裂变能

量由燃料传递至热管辐射器散热过程的时间长,导致空间堆具有大时滞的特性。不同物质在不同温度下的物性差异大,在不同功率水平,热量传递的能力不同,导致空间堆具有强非线性特点^[8]。

2 空间堆预测控制系统方案

考虑到热离子空间堆具有强非线性和大时滞的运行特性,在文献[12]中,Ma 等设计的空间堆串级控制系统一定程度上解决了电功率和冷却剂温度控制时响应时间长的问题。本文在该研究的基础上,提出了如图 2 所示的空间堆预测控制方案,整体采用串级控制方法,以核功率控制系统作为内环控制器,模型预测控制系统作为外环控制器。MPC 控制系统的控制对象为含控制器的内环控制系统,电功率或冷却剂温度作为被控量,控制量为核功率设定值的变化量,经过每个步长的累加后,作为核功率设定值输出至内环控制系统。核功率设定值与测量值的差值作为内环比例控制器的输入,其中比例控制器的比例参数在全功率范围内均为 7.081×10^{-5} ,经过计算后的输出信号作为控制鼓驱动电机的信号,驱动控制转鼓调节核功率。

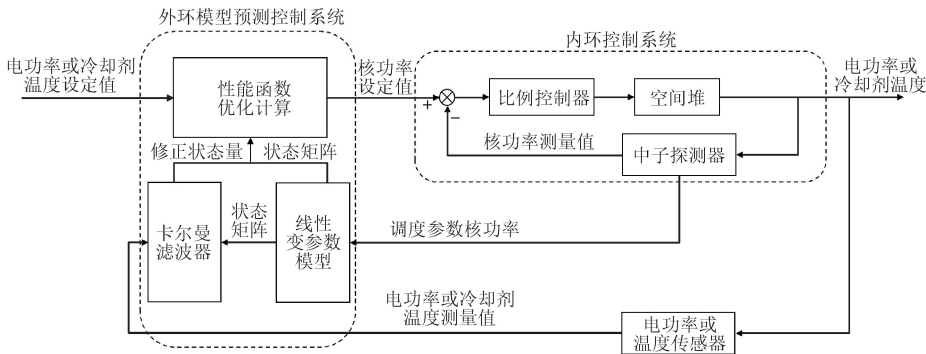


图 2 空间堆预测控制方案

Fig. 2 Predictive control scheme of space nuclear reactor

内环控制系统为传统的核功率控制系统,由于核功率对控制鼓反应性的响应速度快,直接采用结构简单的比例控制器,而比例控制器带来的稳态误差可由外环的预测控制系统消除。采用频域解析法对比例控制器进行整定,以核功率的超调量和设定值与测量值的时间乘平方误差积分指标(ITSE)作为性能指标,选取性能最佳的比例控制器增益。

模型预测控制原理示意图如图 3 所示,在 t 时刻,根据系统的控制量和输出状态量历史数据,基于预测模型以及性能函数,预测未来 N 个步长内输出状态量和控制律,并根据输出状态量与参考轨迹之间

误差对模型预测控制律进行反馈校正。在每个步长内均进行一次基于预测模型的优化计算,实现控制律的滚动优化,使得控制律在全控制周期内均为最优。

MPC 由预测模型、滚动优化和反馈校正 3 部分组成,预测模型用于预测系统未来趋势,以被控量目标跟踪信号和预测值的差值作为性能函数,优化控制量,并作为系统和预测模型的输入,进行控制动作和下一轮的预测,基于新的预测结果再次对控制量进行优化,实现滚动优化^[19]。基于被控量测量值和预测值的误差,采用卡尔曼滤波器对预测值进行修正,消除稳态误差,实现反馈校正^[20]。

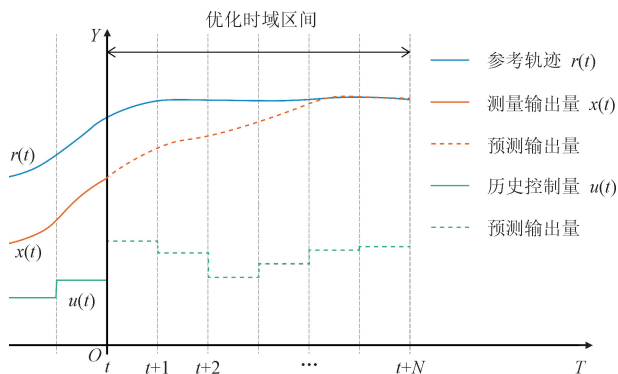


图 3 模型预测控制原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model predictive control

考虑到空间堆具有强非线性特点,不同功率水平下的动态特性有差异,若采用线性时不变系统的状态空间模型作为空间堆的预测模型,在功率发生偏移后,预测模型与实际系统之间的误差增大,导致控制性能下降。因此,采用空间堆的线性变参数模型作为预测模型^[21],以核功率作为可变参数,状态空间模型的状态矩阵系数是与核功率相关的函数。考虑到状态空间矩阵系数与核功率的关系复杂,其函数关系式无法直接表述,因此为简化计算过程,采用基于多模型的线性变参数系统,在不同功率水平建立多组空间堆的线性时不变系统模型,以核功率作为输入,通过线性插值的方式,实现任意功率水平的状态空间模型的表述。以线性变参数系统作为预测模型,准确模拟全功率范围内的运行特性,提升预测模型在不同功率水平的准确性。

空间堆的状态空间模型已在文献[22]中进行了推导,考虑到状态空间模型是由非线性模型经过节点合并或降阶获得的,与实际系统的特性存在差异。在模型预测控制中,这些特性的差异不仅会导致控制系统的性能下降,也会对控制系统引入稳态误差。因此,模型预测控制方法需要反馈校正环节消除稳态误差,通过系统的输入输出数据,对预测模型进行修正,该方法适用于预测模型由数据辨识得到的情况^[23]。在本研究中,预测模型是由机理模型推导得到的状态空间模型,模型修正过程复杂。因此,采用基于卡尔曼滤波的数据融合方法,通过使用被控量的测量信号,对预测模型中状态量进行修正,并以修正后的状态量作为预测模型输出^[24],参与模型预测控制器的控制律计算,经过修正后的状态量与实际系统中的变量更接近,由此可以显著减少系统的稳态误差,提升控制性能。修正后的状态量和线性变

参数系统的状态矩阵作为预测模型信息参与性能函数的计算,经过优化计算后得到最优的控制量。

3 空间堆模型预测控制系统设计

空间堆模型预测控制系统设计分为预测模型设计、滚动优化最优控制律求解和反馈校正。预测模型是模型预测控制系统的基础,采用线性变参数模型模拟空间堆全功率范围内的运行特性。滚动优化最优控制律的求解是模型预测控制的核心,优化的目标函数不仅包括被控量对目标值的跟踪性能,同时还要考虑内环核功率的控制性能,采用增量式 MPC 方法,以控制量增量作为性能评价指标的一部分,优化控制系统性能。预测模型与实际系统的差异是导致 MPC 具有稳态误差的重要原因,采用卡尔曼滤波的方式对预测值进行校正,进一步优化 MPC 的稳态性能。

3.1 空间堆线性变参数模型

空间堆的连续形式的状态空间模型如下

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{C}$ 和 $\mathbf{D}$ 均为状态矩阵; u 为输入量,控制鼓驱动机电电压; $\mathbf{x}$ 为状态量,包括核功率、电功率、冷却剂温度以及其他各节点的温度; $\mathbf{y}$ 为输出量。

经过离散化后,线性变参数模型的状态空间表达式如下

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(m)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(m)u(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(m)\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}(m)u(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: k 为步数; $\mathbf{x}(k)$ 为第 k 步的状态量; $\mathbf{x}(k+1)$ 为第 $k+1$ 步的状态量; $\mathbf{y}(k)$ 为第 k 步的输出量; $u(k)$ 为第 k 步的输入量; m 为可调参数; $\mathbf{A}(m)$ 、 $\mathbf{B}(m)$ 、 $\mathbf{C}(m)$ 和 $\mathbf{D}(m)$ 均为随参数 m 变化的状态矩阵。

考虑到空间堆非线性强,其动态特性在不同功率水平下具有较大差异。状态空间模型的状态矩阵系数与空间堆的结构和物性参数相关,不同功率水平下,空间堆的结构参数保持一致,但是物性参数随温度变化,且空间堆内各节点的温度与核功率相关。因此,空间堆状态空间模型的状态矩阵系数均与核功率相关,受核功率影响,选取核功率作为可变参数,建立空间堆的线性变参数模型。

根据空间堆非线性模型^[8],空间堆模型内各节点的温度无法直接通过核功率的函数关系形式进行表述,材料的物性参数与温度之间的关系式是不连续且非线性的。因此,难以直接获得状态矩阵系数随功率水平变化的关系式,即状态矩阵系数无法由

核功率直接表述。针对该问题,可以根据每一个步长内的核功率计算并更新状态矩阵,但该方法计算花费时间长。

考虑到控制系统的实时性和控制性能需求,采用多模型的方式,在不同功率水平建立空间堆的线性时不变系统模型,以核功率作为输入,通过线性插值的方式,实现任意功率水平的状态空间模型的表述。线性变参数模型多模型线性插值方法如图 4 所示,根据实际系统中的核功率,选择多模型库中与该功率水平相邻的 LTI 模型,并利用线性插值法和两个 LTI 模型计算该功率水平下对应的状态矩阵 $A(m)$, $B(m)$, $C(m)$ 和 $D(m)$, 完成线性变参数系统模型的计算。

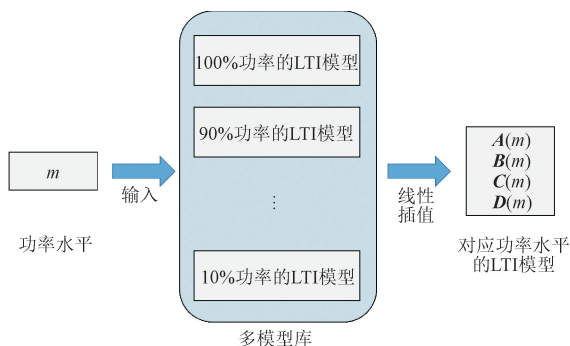


图 4 线性变参数模型多模型线性插值方法

Fig. 4 Multi-model linear interpolation method of LPV

模型预测控制系统以含比例控制器的内环控制系统作为被控量,因此需要推导被控量的状态空间模型。该被控量以核功率设定值作为输入,原状态空间模型的输入可由核功率设定值表述如下

$$u = K_p(r - P) \quad (3)$$

式中: r 为核功率设定值; P 为核功率; K_p 为比例控制器的比例增益。

定义 I_p 矩阵,形式如下

$$I_p = [1 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 0] \quad (4)$$

核功率可以由下式表述

$$P = I_p x \quad (5)$$

将式(3)(5)代入原状态空间模型式(1)中,可得 MPC 被控对象的状态空间模型表达式如下

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + BK_p(r - P) = \\ Ax + BK_p I_p x + BK_p r = \\ (A + BK_p I_p)x + BK_p r \\ y = (C + DK_p I_p)x + DK_p r \end{cases} \quad (6)$$

令 $A_1 = A + BK_p I_p$, $B_1 = BK_p$, $C_1 = C + DK_p I_p$, $D_1 = DK_p$, 则内环控制系统的状态空间模型可以改写为

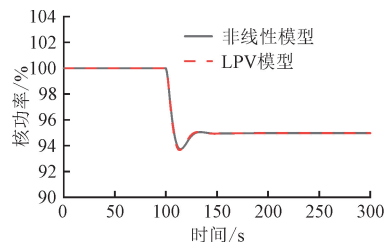
$$\begin{cases} \dot{x} = A_1 x + B_1 u \\ y = C_1 x + D_1 u \end{cases} \quad (7)$$

在不同功率水平分别建立对应的被控对象的状态空间模型,根据空间堆的实际功率水平,采用线性插值的方法计算对应的状态空间矩阵,表达式如下

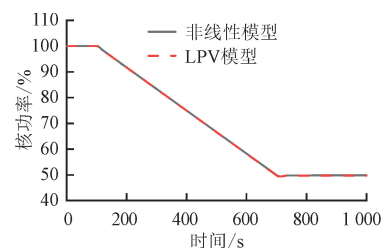
$$A_1(P) = \frac{A_1(P_1)(P_2 - P) + A_1(P_2)(P - P_1)}{P_2 - P_1} \quad (8)$$

式中: $A_1(P)$ 为 P 功率水平下对应的状态矩阵; $A_1(P_1)$ 为 P_1 功率水平下对应的状态矩阵; $A_1(P_2)$ 为 P_2 功率水平下对应的状态矩阵; P , P_1 和 P_2 均为核功率水平,且 $P_2 > P > P_1$ 。其他输入矩阵、输出矩阵也采用相同的方式进行线性插值计算。

将内环控制系统的 LPV 模型与文献[8]的非线性动态模型进行对比,模型的输入为核功率设定值,输出为核功率,分别在核功率设定值由 100% 阶跃至 95% 的工况以及由 100% 以 5% 满功率每分钟的速度线性下降至 50% 的工况进行验证,结果如图 5 所示。由图 5 可知,LPV 模型与非线性模型的仿真结果一致,表明 LPV 模型能够模拟非线性模型的动态特性。



(a) 核功率设定值阶跃变化



(b) 核功率设定值线性变化

图 5 LPV 模型与非线性模型的对比验证

Fig. 5 Verification of LPV model with nonlinear model

3.2 基于轨迹跟踪增量式 MPC 的最优控制律求解

MPC 的控制律是通过优化性能函数得到的,而根据性能函数可知,MPC 的性能评价指标包括两个方面,一方面是被控量与目标信号的跟踪性能,另一方面是控制量的动作幅度。当系统在稳定状态下,由被控量与目标值的差值以及控制量组成的性能评价函数应最小,考虑到外环控制器的输出应作为内

环核功率控制器的设定值,直接使用传统 MPC 进行控制律的优化计算,在系统稳定后势必会存在稳态误差,且无法消除。采用增量式模型预测控制方法,将系统的状态量和控制量均转换为增量的形式,通过将每一步的控制量进行累加,得到真正的控制量即核功率设定值,当系统到达稳定状态时,系统控制量增量和被控量增量均为 0,能够有效消除稳态误差^[25]。

增量式模型预测控制系统需要将离散式的状态空间模型改为增量模型,在空间堆模型中, $\mathbf{D}$ 矩阵为 $\mathbf{0}$ 矩阵,输出量 y 与输入无关,则增量离散形式的状态空间模型如下

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta u(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{y}(k-1) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta \mathbf{x}(k)$ 为第 k 步时状态量的变化量; $\Delta \mathbf{x}(k+1)$ 为第 $k+1$ 步时状态量的变化量; $\Delta u(k)$ 为第 k 步时控制量的变化量; $\mathbf{y}(k-1)$ 为第 $k-1$ 步的输出量。

与传统的模型预测控制相似,首先需要定义 $\Delta \mathbf{x}(i|k)$ 为基于第 k 步状态预测的第 i 步的状态量变化量的预测值,定义 $\Delta u(i|k)$ 为基于第 k 步的状态计算的第 i 步的控制量变化量的预测值。当预测步数为 p 、控制步数为 c 时,根据式(9)可计算未来 p 步的状态量变化量的预测值

$$\begin{cases} \Delta \mathbf{x}(k+1|k) = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(k|k) + \mathbf{B}\Delta u(k|k) = \\ \quad \mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\Delta u(k) \\ \Delta \mathbf{x}(k+2|k) = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(k+1|k) + \mathbf{B}\Delta u(k+1|k) = \\ \quad \mathbf{A}^2\Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{A}\mathbf{B}\Delta u(k) + \mathbf{B}\Delta u(k+1|k) \\ \Delta \mathbf{x}(k+3|k) = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(k+2|k) + \mathbf{B}\Delta u(k+2|k) = \\ \quad \mathbf{A}^3\Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{A}^2\mathbf{B}\Delta u(k) + \\ \quad \mathbf{A}\mathbf{B}\Delta u(k+1|k) + \mathbf{B}\Delta u(k+2|k) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{x}(k+c|k) = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(k+c-1|k) + \\ \quad \mathbf{B}\Delta u(k+c-1|k) = \\ \quad \mathbf{A}^c\Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{A}^{c-1}\mathbf{B}\Delta u(k) + \\ \quad \mathbf{A}^{c-2}\mathbf{B}\Delta u(k+1|k) + \cdots + \\ \quad \mathbf{B}\Delta u(k+c-1|k) \\ \vdots \\ \Delta \mathbf{x}(k+p|k) = \mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(k+p-1|k) + \\ \quad \mathbf{B}\Delta u(k+p-1|k) = \\ \quad \mathbf{A}^p\Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{A}^{p-1}\mathbf{B}\Delta u(k) + \\ \quad \mathbf{A}^{p-2}\mathbf{B}\Delta u(k+1|k) + \cdots + \\ \quad \mathbf{A}^{p-c}\mathbf{B}\Delta u(k+c-1|k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta \mathbf{x}(k+i|k)$ 为第 k 步时预测的未来 i 步状态量变化量; $\Delta u(k+i|k)$ 为第 k 步时预测的未来 i 步控制量变化量。

在增量式的预测模型中,所预测的状态量变化量无法代表控制目标参与性能函数计算,因此还需要进一步计算输出量的预测过程,输出量预测值如下

$$\begin{cases} y(k+1|k) = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x}(k+1|k) + y(k) = \\ \quad \mathbf{C}\mathbf{A}\Delta \mathbf{x}(k) + \mathbf{C}\mathbf{B}\Delta u(k) + y(k) \\ y(k+2|k) = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x}(k+2|k) + y(k+1|k) = \\ \quad (\mathbf{C}\mathbf{A}^2 + \mathbf{C}\mathbf{A})\Delta \mathbf{x}(k) + (\mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B} + \\ \quad \mathbf{C}\mathbf{B})\Delta u(k) + \mathbf{C}\mathbf{B}\Delta u(k+1|k) + y(k) \\ y(k+3|k) = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x}(k+3|k) + y(k+2|k) = \\ \quad (\mathbf{C}\mathbf{A}^3 + \mathbf{C}\mathbf{A}^2 + \mathbf{C}\mathbf{A})\Delta \mathbf{x}(k) + \\ \quad (\mathbf{C}\mathbf{A}^2\mathbf{B} + \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B} + \mathbf{C}\mathbf{B})\Delta u(k) + \\ \quad (\mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B} + \mathbf{C}\mathbf{B})\Delta u(k+1|k) + \\ \quad \mathbf{C}\mathbf{B}\Delta u(k+2|k) + y(k) \\ \vdots \\ y(k+c|k) = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x}(k+c|k) + y(k+c-1|k) = \\ \quad \sum_{i=1}^c \mathbf{C}\mathbf{A}^i \Delta \mathbf{x}(k) + \sum_{i=1}^c \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}\Delta u(k) + \\ \quad \sum_{i=1}^{c-1} \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}\Delta u(k+1|k) + \cdots + \\ \quad \mathbf{C}\mathbf{B}\Delta u(k+c-1|k) + y(k) \\ \vdots \\ y(k+p|k) = \mathbf{C}\Delta \mathbf{x}(k+p|k) + y(k+p-1|k) = \\ \quad \sum_{i=1}^p \mathbf{C}\mathbf{A}^i \Delta \mathbf{x}(k) + \sum_{i=1}^p \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}\Delta u(k) + \\ \quad \sum_{i=1}^{p-1} \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}\Delta u(k+1|k) + \cdots + \\ \quad \sum_{i=1}^{p-c+1} \mathbf{C}\mathbf{A}^{i-1} \mathbf{B}\Delta u(k+c-1|k) + y(k) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $y(k+i|k)$ 为第 k 步时预测的未来 i 步输出量。

为方便表述,定义在第 k 步时,预测步数 p 内的输出量预测值矩阵 $\mathbf{Y}(k)$,以及控制步数 c 内的控制量变化量矩阵 $\Delta \mathbf{U}(k)$,表达式如下

$$\mathbf{Y}(k) = \begin{bmatrix} y(k+1|k) \\ y(k+2|k) \\ \vdots \\ y(k+p|k) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+c-1|k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

为简化公式,定义预测模型的状态矩阵 S_x 、输入矩阵 S_u 和单位矩阵 I ,如下所示

$$S_x = \begin{bmatrix} CA \\ \sum_{i=1}^2 CA^i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^p CA^i \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$S_u =$$

$$\begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \sum_{i=1}^2 CA^{i-1}B & CB & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^{c-1} CA^{i-1}B & \sum_{i=1}^{c-2} CA^{i-1}B & \sum_{i=1}^{c-3} CA^{i-1}B & \cdots & 0 \\ \sum_{i=1}^c CA^{i-1}B & \sum_{i=1}^{c-1} CA^{i-1}B & \sum_{i=1}^{c-2} CA^{i-1}B & \cdots & CB \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^p CA^{i-1}B & \sum_{i=1}^{p-1} CA^{i-1}B & \sum_{i=1}^{p-2} CA^{i-1}B & \cdots & \sum_{i=1}^{p-c+1} CA^{i-1}B \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_{n \times n} \\ I_{n \times n} \\ \vdots \\ I_{n \times n} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: n 为 A 矩阵的维数。

则输出量的预测过程可由式(11)简化为下式

$$Y(k) = S_x \Delta x(k) + I y(k) + S_u \Delta U(k) \quad (17)$$

选取二次型目标函数作为增量式模型预测控制系统的性能函数,为了实现冷却剂温度或电功率的任意调整,增加轨迹跟踪功能,以预测输出量和参考轨迹之间的偏差以及控制量的变化量作为控制目标,性能函数如下所示

$$J = \sum_{i=1}^p [(y(k+i|k) - r(k+i|k))Q(y(k+i|k) - r(k+i|k))] + \sum_{i=1}^c [\Delta u(k+i|k)R\Delta u(k+i|k)] = (Y(k) - r(k))^T \bar{Q}(Y(k) - r(k)) + \Delta U^T(k) \bar{R} \Delta U(k) \quad (18)$$

式中: $r(k+i|k)$ 为第 $k+i$ 个步长的参考轨迹值;

$r(k)$ 为第 k 个步长开始预测范围内的参考轨迹序列; Q 和 R 分别为轨迹跟踪误差和控制量的权重因子; $\bar{Q}$ 和 $\bar{R}$ 分别为轨迹跟踪误差序列和控制量序列的权重因子。其形式如下

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} Q & & & \\ & Q & & \\ & & \ddots & \\ & & & Q \end{bmatrix}_{p \times p}, \bar{R} = \begin{bmatrix} R & & & \\ & R & & \\ & & \ddots & \\ & & & R \end{bmatrix}_{c \times c} \quad (19)$$

$r(k)$ 的形式如下

$$r(k) = \begin{bmatrix} r(k+1|k) \\ r(k+2|k) \\ \vdots \\ r(k+p|k) \end{bmatrix} \quad (20)$$

将输出量的预测过程式(17)代入性能函数式(18),可将性能函数进一步转化为只与控制量序列相关的函数

$$J = \Delta U^T(k) (S_u^T \bar{Q} S_u + \bar{R}) \Delta U(k) + 2(S_x \Delta x(k) + I y(k) - r(k))^T \bar{Q} S_u \Delta U(k) + (S_x \Delta x(k) + I y(k) - r(k))^T \bar{Q} (S_x \Delta x(k) + I y(k) - r(k)) \quad (21)$$

为方便表述,定义矩阵 E 表示常数项

$$E = S_x \Delta x(k) + I y(k) - r(k) \quad (22)$$

则式(21)的性能函数最终简化为

$$J = \Delta U^T(k) (S_u^T \bar{Q} S_u + \bar{R}) \Delta U(k) + 2E^T \bar{Q} S_u \Delta U(k) + E^T \bar{Q} E \quad (23)$$

基于该性能函数进行优化求解,计算合适的控制量变化量序列 $\Delta U(k)$,使得性能函数 J 最小。对性能函数求 $\Delta U(k)$ 的偏导

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U(k)} = 2\Delta U^T(k) (S_u^T \bar{Q} S_u + \bar{R}) + 2E^T \bar{Q} S_u \quad (24)$$

当该偏导为 0 时, J 处于极小值,可直接计算得到最优的控制量序列

$$\Delta U(x)_{\text{opt}} = -(S_u^T \bar{Q} S_u + \bar{R})^{-1} E^T \bar{Q} S_u \quad (25)$$

式中: $\Delta U(k)_{\text{opt}}$ 为使得性能函数最优控制序列。

控制量作为核功率设定值变化量,其幅值与核功率的控制性能相关,幅值越大,核功率的变化速度越快,同时也会引入更大的超调量,不利于反应堆的安全。模型预测控制系统中的电功率或冷却剂温度性能和核功率性能,可以通过调整 $\bar{Q}$ 和 $\bar{R}$ 实现。本研究中,电功率对核功率响应较快,调节电功率时,核功率的变化幅值相对较小,所选取的 Q 、 R 的比值为 0.5;冷却剂温度对核功率的响应较慢,需要大幅

度调节核功率设定值才能加快冷却剂温度的调节速度,因此,所选 Q 、 R 的比值为 1 000。

此外,控制量的计算也与预测步数与控制步数相关,预测步数越长,考虑的模型信息越全面,能够涵盖系统在更长时间跨度的特性,控制量计算精度更高,但是同时也会增加性能函数计算的矩阵维度,导致计算时间增大^[26]。减少预测步数可以在一定程度上提升计算速度,但未充分考虑系统在时间维度的特性,导致控制性能下降。当采样时间为 0.5 s 时,结合被控对象的特征,电功率对核功率变化的响应时间在百秒量级,电功率控制系统的预测步数取 300 步,冷却剂温度对核功率变化的响应时间在千秒量级,冷却剂温度控制系统的预测步数为 1 000 步。

3.3 基于卡尔曼滤波的反馈校正

采用卡尔曼滤波器对 MPC 预测模型的预测值进行修正,当预测模型的预测值与实际系统的测量值不同时,MPC 的被控量与目标值之间将存在稳态误差。利用卡尔曼滤波原理,通过测量值和模型预测值计算最优估计值,将其作为预测值以消除稳态误差。

根据系统采样时间,可以得到状态空间模型的离散形式,并以该状态空间模型作为卡尔曼滤波器的预测模型,用于计算状态量的预测值 $\mathbf{x}_p(k)$,如下所示

$$\mathbf{x}_p(k) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{B}u(k-1) \quad (26)$$

式中: $\mathbf{x}_p(k)$ 为状态量预测值。

利用测量值 $z(k)$ 对预测值进行修正,则状态量最优估计方程如下

$$\mathbf{x}_o(k) = \mathbf{x}_p(k) + \mathbf{K}(k)[z(k) - \mathbf{H}\mathbf{x}_p(k)] \quad (27)$$

式中: $\mathbf{x}_o(k)$ 为状态量最优估计值; $\mathbf{K}(k)$ 为卡尔曼增益; $\mathbf{H}$ 为观测转移矩阵。

状态量的最优估计值由预测值和测量值共同决定,它们之间的比重由卡尔曼增益决定,而卡尔曼增益又取决于预测误差和测量误差的协方差矩阵,如下所示

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}_p(k)\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}_p(k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (28)$$

式中: $\mathbf{P}_p(k)$ 为先验误差协方差矩阵; $\mathbf{R}$ 为测量值的误差权重。

先验误差协方差矩阵的计算式如下

$$\mathbf{P}_p(k) = \mathbf{A}\mathbf{P}(k-1)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (29)$$

式中: $\mathbf{P}(k-1)$ 为上一步的后验误差协方差矩阵; $\mathbf{Q}$ 为预测值的误差权重。

完成每一步的最优估计值计算后,需要对后验误差协方差矩阵进行更新,其更新公式如下

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{H}]\mathbf{P}_p(k) \quad (30)$$

式中: $\mathbf{P}(k)$ 为后验误差协方差矩阵。

卡尔曼滤波中需要调整的参数包括预测值和测量值的误差权重,为了消除由模型差异导致的稳态误差,最优估计值应主要跟随测量值变化,因此选取的测量值的误差权重小于预测值。

4 控制系统性能仿真测试

基于文献[8]建立的空间堆非线性动态模型,搭建所设计的预测控制系统,对控制系统性能进行仿真验证。与文献[12]中的串级 PID 控制系统的仿真结果进行对比,分别在高功率对电功率控制系统的性能进行仿真,在低功率对冷却剂温度控制系统的性能进行仿真。通过引入电功率和冷却剂温度设定值阶跃升降信号和线性升降信号,对比调节过程中重要参数的调节时间、超调量等性能指标,验证预测控制系统的控制性能。

4.1 电功率控制系统性能仿真测试

在 100%核功率水平稳定运行 200 s 后,将电功率设定值由 100%核功率水平对应的 5 843.9 W 阶跃下降至 95%核功率水平对应的 5 715.1 W,系统继续运行 1 000 s,待完成电功率下降后,电功率设定值再由 5 715.1 W 阶跃上升至 5 843.9 W,并维持在 100%功率水平。

电功率设定值阶跃变化的响应曲线如图 6 所示,记录的参数包括电功率、核功率、驱动电机电压和控制鼓角度。电功率设定值作为外环预测控制系统的参考值,在阶跃变化后,预测控制系统的性能函数中目标跟踪值发生变化。此时,性能函数增大,不再处于最优结果,需通过优化计算得到新的控制量变化量 $\Delta U(i|k)$,使得性能函数最优。计算得到的控制量变化量作为核功率设定值的变化量,通过每个步长的累加得到核功率设定值,并作为内环控制器的输入。当核功率设定值发生变化后,内环比例控制器的输入不为 0,经过控制器运算后输出控制鼓驱动电机电压,用于驱动控制转鼓,调节反应性,直至核功率与核功率设定值相同。由于核功率的变化,根据堆芯内的热工水力过程,电功率也随之改变,当电功率与电功率设定值相同时,系统恢复到稳定状态,完成电功率调节。

电功率在预测控制系统下的控制性能优于串级控制系统,记录电功率在下降沿和上升沿的超调量和调节时间指标,如表 2 所示。在下降沿,预测控制系统的电功率调节时间为 140 s,优于串级控制系统

的 447 s,但超调量为 1.2%,略高于串级控制系统。预测控制系统的核功率超调量得到了优化,进一步保障了升功率过程中的安全性。如图 6(c)所示,模型预测控制系统下,执行机构动作,即驱动电机的电压更小,峰值电压仅为 0.051 V。这也使得控制鼓的动作和行程更小,如图 6(d)所示,减少了控制鼓角度的行程能够进一步延长设备的使用寿命。

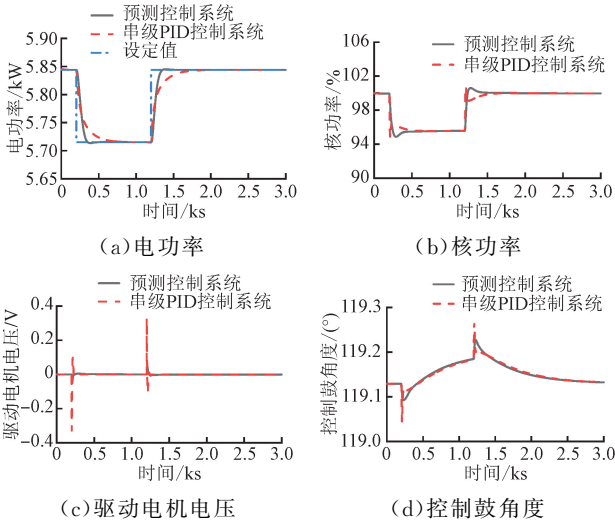


图 6 电功率设定值阶跃变化的响应曲线
Fig. 6 Responses to step disturbance of electric power setpoint

表 2 电功率设定值阶跃扰动控制性能对比
Table 2 Control performance comparison of step disturbance of electric power setpoint

方法	电功率调节时间/s		电功率超调量/%	
	下降沿	上升沿	下降沿	上升沿
预测控制	140	143	1.2	1
串级控制	447	557	0	0

在电功率设定值线性调节的工况下,在 100%功率水平稳定运行 200 s 后,电功率设定值由 100%核功率水平对应的 5 843.9 W,以 375.5 W/min 的速度线性下降至 50%核功率水平对应的 2 088.8 W,电功率下降过程持续 600 s,完成电功率线性调节后,稳定运行 400 s,并以同样的速率线性提升至 5 843.9 W,并维持在该额定工况水平。

电功率设定值线性变化的响应曲线如图 7 所示。在电功率设定值线性调节工况下,预测控制系统相对于串级控制系统性能得到了提升,电功率的控制性能见表 3。在下降沿,电功率在预测控制系统下的调节时间为 31 s,略高于串级控制系统的 26 s,二者超调量均为 0%。在上升沿,预测控制系统

下的电功率以增加少量超调量的代价,将调节时间由 143 s 减少至 46 s。由图 7(c)和图 7(d)可知,预测控制系统的执行机构动作更小,驱动电机电压的波动范围小于串级 PID 控制系统。

根据仿真结果可知,预测控制系统有效提升了电功率的调节性能,在电功率设定值阶跃工况下,调节时间减少了 70%。并且,在优化控制性能的同时,减少了执行机构的动作幅度,优化了控制鼓的行程,有效提升了系统的经济性。

表 3 电功率设定值线性扰动控制性能对比
Table 3 Control performance comparison of ramp disturbance of electric power setpoint

方法	电功率调节时间/s		电功率超调量/%	
	下降沿	上升沿	下降沿	上升沿
预测控制	31	46	0	1.4
串级控制	26	143	0	0

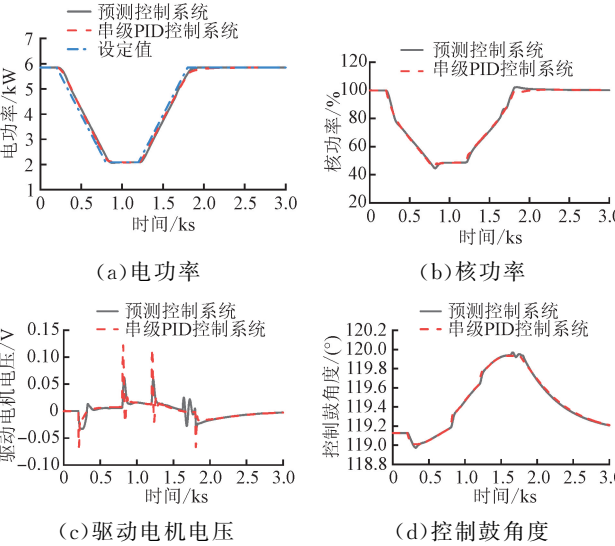


图 7 电功率设定值线性变化的响应曲线
Fig. 7 Responses to ramp disturbance of electric power setpoint

4.2 冷却剂温度控制系统性能仿真测试

在 50%核功率水平的稳态工况下,稳定运行 200 s,将冷却剂温度设定值由 50%核功率水平对应的 678.4 K 阶跃至 45%核功率水平对应的 657.9 K,考虑到冷却剂温度响应时间更长,阶跃后继续运行 2 000 s,在将冷却剂温度设定值阶跃上升回到 678.4 K,并维持在该水平。

冷却剂温度设定值阶跃变化的响应曲线如图 8 所示,记录的参数包括冷却剂温度、核功率、驱动电机电压和控制鼓角度。冷却剂温度在下降沿和上升

沿的控制性能见表 4。对于预测控制系统,冷却剂温度的调节时间和超调量都得到了大幅度的优化,在下降沿,调节时间由串联控制系统下的 1 441 s 减少至 263 s,超调量也由 5.2%降低至 1.1%。并且,在冷却剂温度控制性能得到优化的同时,核功率的超调量也得到了优化,核功率的最大峰值为 69.8%满功率。此外,由图 8(c)和图 8(d)可知,预测控制系统下,执行机构动作也得到了优化,控制鼓驱动电机电压的变化幅值相较于串联控制系统更小,仅为 0.051 V,远小于串联控制系统的 1.67 V。与此同时,控制鼓行程也得到了优化,预测控制系统的控制鼓角度的变化幅值更小。

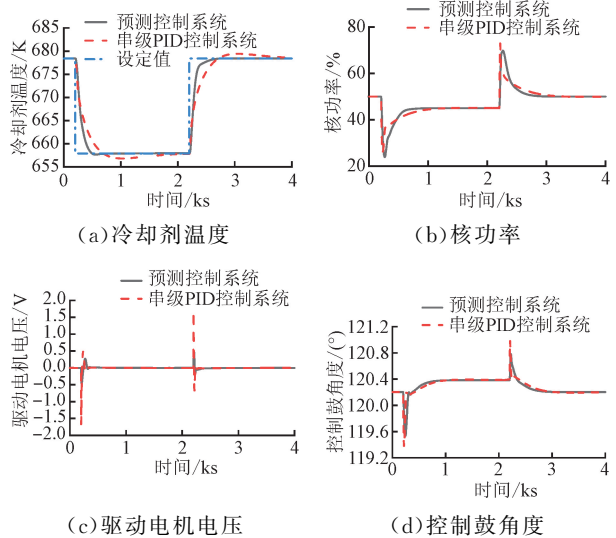


图 8 冷却剂温度设定值阶跃变化的响应曲线

Fig. 8 Responses to step disturbance of coolant temperature setpoint

表 4 冷却剂温度设定值阶跃扰动控制性能对比

Table 4 Control performance comparison of step disturbance of coolant temperature setpoint

方法	冷却剂温度 调节时间/s		冷却剂温度 超调量/%	
	下降沿	上升沿	下降沿	上升沿
预测控制	263	354	1.1	0.1
串联控制	1 441	1 454	5.2	5

在冷却剂温度设定值线性调节的工况下,在 50%核功率水平,系统温度运行 200 s 后,冷却剂温度设定值由 50%核功率水平对应的 678.4 K,以 2 K/min 的速度线性下降至 628.4 K,该过程持续 1 500 s,继续运行 1 500 s,待系统稳定后,以相同速度将冷却剂温度由 628.4 K 线性提升至 678.4 K,并维持在该温度。

冷却剂温度设定值线性变化的响应曲线如图 9 所示,冷却剂温度的控制性能见表 5。可以看出,模型预测控制系统下的冷却剂温度调节时间为 113 s,远低于串联控制系统的 890 s,但超调量为 3.3%,略高于串联控制系统。核功率的调节时间也得到了优化,由串联控制系统的 667 s 减少至 458 s,二者的超调量相同。由图 9(c)和图 9(d)可知,预测控制系统下,执行机构动作更小,驱动电机的电压变化幅值和峰值小于串联控制系统。控制鼓角度变化趋势较接近。

根据仿真结果可知,预测控制系统对调节时间长的冷却剂温度控制的调节性能大幅度提升,冷却剂温度的调节时间得到优化,相对于串联控制系统调节时间减少了 80%,尤其是在冷却剂温度阶跃调节的工况下。同时,执行机构动作幅度减少,控制鼓角度的行程也得到优化。

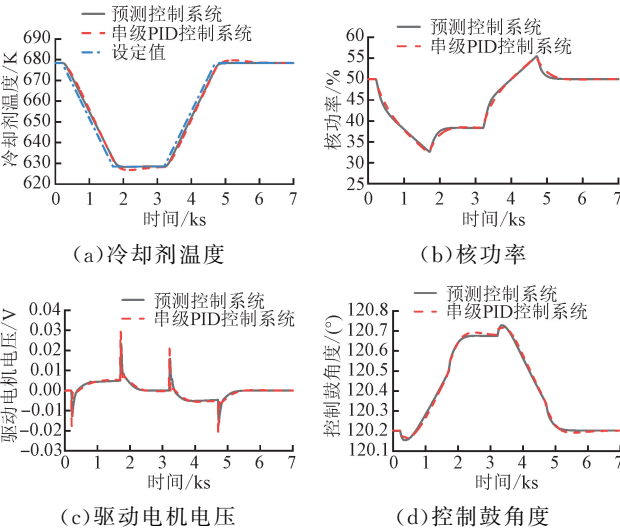


图 9 冷却剂温度设定值线性变化的响应曲线

Fig. 9 Responses to ramp disturbance of coolant temperature setpoint

表 5 冷却剂温度设定值线性扰动控制性能对比

Table 5 Control performance comparison of ramp disturbance of coolant temperature setpoint

方法	冷却剂温度 调节时间/s		冷却剂温度 超调量/%	
	下降沿	上升沿	下降沿	上升沿
预测控制	113	75	0.3	0.04
串联控制	890	817	3.3	2.7

5 结 论

由于热离子空间核反应堆具有强非线性和大时

滞的特性,本研究提出了预测控制方法,创新性地将模型预测控制方法与串级控制理论结合,增强了鲁棒性。将线性变参数模型作为预测模型,提升预测模型的准确性,优化预测控制系统在不同功率水平下的控制性能,以实现在全功率范围的精确控制。为验证控制系统的性能,在100%功率水平引入电功率设定值阶跃和线性变化,在50%功率水平引入冷却剂温度设定值阶跃和线性变化,并与串级PID控制系统的仿真结果进行对比,得到如下结论。

(1)基于线性变参数理论设计的空间堆线性变参数模型,其动态特性与非线性模型符合良好,能够作为预测控制系统的预测模型,保证了控制系统在不同功率水平的适用性。

(2)结合串级控制理论的预测控制系统对具有大时滞特性的电功率和冷却剂温度具有良好的控制性能,相对于串级PID控制系统,超调量和调节时间均得到大幅度改善,其中调节时间减少了70%以上,同时核功率的超调量也得到了优化,保证了反应堆的安全。

(3)预测控制系统在优化控制性能的同时,大幅度减少了执行机构动作,优化了控制鼓行程,延长执行机构使用寿命,保证了系统的经济性。

参考文献:

- [1] JOHNSON R A, MORGAN W T, ROCKLIN S R. Design, ground test and flight test of SNAP 10 A, first reactor in space [J]. Nuclear Engineering and Design, 1967, 5(1): 7-21.
- [2] BENNETT G L. A look at the Soviet space nuclear power program [C]// Proceedings of the 24th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1989: 1187-1194.
- [3] GRYAZNOV G M. 30th anniversary of the startup of to-paz: the first thermionic nuclear reactor in the world [J]. Atomic Energy, 2000, 89(1): 510-515.
- [4] RHEE H S, WETCH J R, GUNTHER N, et al. Space-R thermionic space nuclear power system with single cell incore thermionic fuel elements [J]. AIP Conference Proceedings, 1992, 246(1): 120-129.
- [5] MATLOFF G L, JOHNSON L, MACCONE C. Helios and Prometheus: a solar/nuclear outer-solar system mission [J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2007, 60(12): 439-442.
- [6] BUSHMAN A, CARPENTER D M, ELLIS T S, et al. The Martian surface reactor: an advanced nuclear power station for manned extraterrestrial exploration: MIT-NSA; TR-003 [R]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [7] POSTON D I, GIBSON M A, SANCHEZ R G, et al. Results of the KRUSTY nuclear system test [J]. Nuclear Technology, 2020, 206(S1): S89-S117.
- [8] MA Qian, SUN Peiwei, WEI Xinyu, et al. Dynamic model construction of a space thermionic nuclear reactor [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 212: 118644.
- [9] ALVAREZ-RAMIREZ J, PUEBLA H, ESPINOSA G. A cascade control strategy for a space nuclear reactor system [J]. Annals of Nuclear Energy, 2001, 28(2): 93-112.
- [10] SHTESSEL Y B. Sliding mode control of the space nuclear reactor system [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(2): 579-589.
- [11] FU Jianghan, JIN Zhao, DAI Zhiwen, et al. Model predictive control for automatic operation of space nuclear reactors: design, simulation, and performance evaluation [J]. Annals of Nuclear Energy, 2024, 199: 110321.
- [12] MA Qian, SUN Peiwei, WEI Xinyu, et al. Control strategy study and cascade control system design for space thermionic nuclear reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2023, 414: 112626.
- [13] 刘悦婷, 孟维华, 丁建中. 一种PID-PID串级控制系统的设计及其性能分析 [J]. 延边大学学报(自然科学版), 2023, 49(4): 358-365.
- LIU Yueting, MENG Weihua, DING Jianzhong. Design and performance analysis of a PID-PID cascade control system [J]. Journal of Yanbian University (Natural Science Edition), 2023, 49(4): 358-365.
- [14] 马良玉, 燕梦, 王林, 等. 神经网络智能串级控制在过热器喷水减温系统中的应用 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 106-112.
- MA Liangyu, YAN Meng, WANG Lin, et al. Application of ANN-based intelligent cascade control to superheater water-spray desuperheating system [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(5): 106-112.
- [15] 蒲松茂, 黄嘉俊, 孙培伟, 等. NUSTER-100电功率串级控制方法研究 [J]. 核动力工程, 2023, 44(4): 154-162.
- PU Songmao, HUANG Jiajun, SUN Peiwei, et al. Research on cascade control method of electric power of NUSTER-100 [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(4): 154-162.

- [16] 姜峰, 陈振民. 全厂功率协调控制系统 PID 参数模拟整定 [J]. 电子技术与软件工程, 2019(19): 95-97.
JIANG Feng, CHEN Zhenmin. The PID parameters simulation and adjustment of the plant coordinated power control system [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2019(19): 95-97.
- [17] 李盛伟, 张来, 梁海深. 基于串级 PID 的相变储能电锅炉温度控制技术 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(8): 85-89.
LI Shengwei, ZHANG Lai, LIANG Haishen. Temperature control technology of phase change energy storage electric boiler based on cascade PID [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(8): 85-89.
- [18] ZHANG Wenwen, MA Zaiyong, ZHANG Dalin, et al. Transient thermal-hydraulic analysis of a space thermionic reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2016, 89: 38-49.
- [19] 徐祖华. 模型预测控制理论及应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [20] 负莹, 许鋈, 罗雄麟. 预测控制中存在模型失配时的卡尔曼滤波校正 [J]. 计算机与应用化学, 2017, 34(9): 673-680.
YUN Ying, XU Jun, LUO Xionglin. Kalman filter correction when there is model mismatch in model predictive control [J]. Computers and Applied Chemistry, 2017, 34(9): 673-680.
- [21] 邢丽娟, 杨世忠. 线性变参数系统抗扰动鲁棒模型预测控制 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 282-285.
XING Lijuan, YANG Shizhong. Anti-disturbance robust model predictive control of linear variable parameter system [J]. Computer Simulation, 2023, 40(4): 282-285.
- [22] MA Qian, SUN Peiwei, WEI Xinyu, et al. State-space model construction and dynamic analysis for a space thermionic nuclear reactor [J]. Progress in Nuclear Energy, 2023, 163: 104816.
- [23] 王丽辉, 汤健彬, 余世明. 克服广义预测控制模型参数失配的 PID 反馈校正策略 [J]. 浙江工业大学学报, 2005, 33(3): 265-267.
WANG Lihui, TANG Jianbin, YU Shiming. PID feedback correction strategy overcoming model parametric mismatch of GPC [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2005, 33(3): 265-267.
- [24] 赵攀, 戴义平, 夏俊荣, 等. 卡尔曼滤波修正的风电场短期功率预测模型 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 47-51.
ZHAO Pan, DAI Yiping, XIA Junrong, et al. A Kalman filter based correction model for short-term wind power prediction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 47-51.
- [25] 邹凯, 蔡英凤, 陈龙, 等. 基于增量线性模型预测控制的无人车轨迹跟踪方法 [J]. 汽车技术, 2019(10): 1-7.
ZOU Kai, CAI Yingfeng, CHEN Long, et al. A path tracking method of self-driving vehicle based on incremental linear model predictive control [J]. Automobile Technology, 2019(10): 1-7.
- [26] 王晓茹, 施展. 基于自适应预测步长的车辆主动转向跟踪控制 [J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(7): 74-77.
WANG Xiaoru, SHI Zhan. Autonomous vehicle active steering tracking control based on adaptive prediction step [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(7): 74-77.

(编辑 武红江)