气冷微堆多变量模型预测协调控制方法

肖龙昊[1]，吴长浩[1,2]，孙培伟[1]，魏新宇[1]
（1. 西安交通大学核科学与技术学院，710049，西安；2. 中国核电工程有限公司，100840，北京）

摘要：针对气冷微堆系统多回路强耦合、非线性显著、运行约束严格等控制难题，提出一种基于模型预测控制(MPC)的多变量解耦与协调控制方法。首先，分析双向能量传递机理与一、二回路开环动态响应，引入相对增益矩阵量化系统耦合特性，并揭示系统非线性动态特征。然后，设计基于增益调度的MPC多变量解耦控制器，显式处理执行器约束，实现二回路内部的动态优化解耦。最后，提出基于MPC的多变量协调控制方案，将氦气温度作为可测扰动，并结合动态匹配补偿机制，实现电功率、空气温度与氦气温度的全局协同控制。仿真结果表明：相较于传统比例积分微分(PID)及前馈解耦PID方法，所提方案在多种负荷变化及扰动工况下，均能有效抑制关键变量超调量、减小动态偏差；在100%功率的阶跃降负荷工况下，完全消除电功率的超调量，并将空气温度和氦气温度最大偏差分别较传统PID控制减少了76.7%和55.2%，显著提升了气冷微堆的整体控制品质与运行稳定性。

关键词：气冷微堆；模型预测控制；相对增益矩阵；解耦控制；协调控制
中图分类号：TL361 **文献标志码**：A
DOI：10.7652/xjtuxb202611017 **文章编号**：0253-987X(2026)11-0190-13

Multivariable Model Predictive Coordinated Control Method for Gas-Cooled Micro-Reactors

XIAO Longhao[1], WU Changhao[1,2], SUN Peiwei[1], WEI Xinyu[1]
(1. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: To address the control challenges of gas-cooled micro-reactor systems, including strong multi-loop coupling, significant nonlinearity, and stringent operational constraints, a multivariable decoupling and coordinated control method based on model predictive control (MPC) is proposed. First, the bidirectional energy transfer mechanism and the open-loop dynamic responses of the primary and secondary loops are analyzed, and the relative gain array (RGA) is introduced to quantify the system coupling characteristics. The nonlinear dynamic features of the system are revealed through open-loop tests at different power levels. Subsequently, a gain-scheduled MPC multivariable decoupling controller is designed to explicitly handle actuator constraints and achieve dynamic optimal decoupling within the secondary loop. Finally, an MPC-based multivariable coordinated control scheme is proposed, in which the helium temperature is treated as a measurable disturbance. By incorporating a dynamic matching compensation mechanism, this

收稿日期：2026-01-23。 作者简介：肖龙昊(1999—)，男，博士生；孙培伟(通信作者)，男，教授，博士生导师。 基金项目：国家自然科学基金资助项目(12075181)；中核集团领创科研基金资助项目(CNNC-LCKY-2024-021)。
网络出版时间：2026-06-05 网络出版地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20260604.1625.004

scheme realizes the global coordinated control of the electric power, air temperature, and helium temperature. Simulation results demonstrate that compared with conventional proportional-integral-derivative (PID) and feedforward decoupling PID methods, the proposed multivariable decoupling and coordinated MPC scheme effectively suppresses the overshoot of key variables and reduces dynamic deviations under various load transients and disturbance conditions. During a step load reduction at the 100% power, the overshoot of electric power is completely eliminated, and the maximum deviations of the air temperature and helium temperature are reduced by 76.7% and 55.2%, respectively, compared with conventional PID control, thereby significantly enhancing the overall control quality and operational stability of the gas-cooled micro-reactor.

Keywords: gas-cooled micro-reactor; model predictive control; relative gain array; decoupling control; coordinated control

气冷微堆发电装置具有固有安全性、高能量转换效率及灵活的模块化部署能力，是第四代核反应堆技术的重要研究方向。气冷微堆通常采用布雷顿循环实现核-热-电的高效转化[1-4]。然而，气冷微堆具有多回路强耦合、非线性动态显著、运行约束严格等特点，这为其控制系统设计带来挑战。

国内外学者在气冷微堆领域已开展广泛研究。李颖等[5]开展了气冷微堆系统建模，并构建了控制框架应对负荷跟踪需求。邱磊磊等[6]分析直接透平氦气布雷顿循环的动态特性，并提出了稳态运行方案。董哲等[7]分析了比例微分输出反馈在高温气冷堆功率控制中的镇定性能。近年来，先进控制与协调控制的应用也逐渐受到关注。Ming 等[8]验证了组合型策略在超临界 CO_2 布雷顿循环中的全工况优越性。Wu 等[9]提出了高温气冷堆负荷跟踪控制策略。Jiang 等[10]将动态矩阵控制应用于多模块高温气冷堆。Geng 等[11]提出基于核功率与氦流量的协调控制方案。晏勇等[12]、周扬[13]、李君仪等[14]分别研究了高温气冷堆的协调控制方案、控制策略及氢电联产协调控制。

根据已有研究，传统比例积分微分(PID)控制采用单回路结构，在应对多变量耦合时存在响应滞后、波动明显等问题。虽有部分研究引入前馈解耦或自适应补偿等机制[5,15-17]，一定程度上改善了动态响应，但仍无法系统性处理多变量约束与全局优化。当前，针对气冷微堆的控制研究存在 3 个方面局限：一是固有强耦合未能得到有效处理，易引发回路间干扰；二是系统动态特性随功率水平变化显著，难以全工况适应；三是研究侧重单一回路控制，缺乏整体系统的协同控制架构，尤其在多运行约束方面的方案尚不完善。

模型预测控制(MPC)具有多变量滚动优化、多步预测和显式处理约束等核心特点，能够有效应对上述局限[18-21]。通过建立覆盖不同功率水平的状态空间预测模型，并结合实时反馈校正，MPC 能够自适应系统动态变化，提升全工况鲁棒性；MPC 利用多步预测与滚动优化，动态协调多个控制变量，主动抑制回路间耦合；同时 MPC 将执行机构物理限制和安全约束直接纳入优化问题，实现安全范围内的最优控制。Chen 等[22]应用非线性 MPC 实现对半封闭式温室环境的精细化智能调节。Cheng 等[23]提出一种改进数据驱动型 MPC 抑制电流谐波。近年来，MPC 也被引入核反应堆控制场景：Eliasi 等[24]针对压水堆设计了基于非线性模型的 MPC 控制器；马骞等[25]提出了一种基于线性变参数模型的 MPC 方法，能有效处理空间堆强非线性问题。

本文针对气冷微堆系统存在的强耦合、非线性及约束严格等控制难题，开展多变量解耦与协调控制方法研究。首先，分析了一、二回路间的双向能量传递机理，通过开环测试验证动态耦合特性，并通过相对增益矩阵量化耦合；同时，在不同功率水平下进行开环动态响应。之后，构建面向二回路的多变量解耦 MPC 控制器，通过滚动优化与约束处理，实现电功率与空气温度间的动态解耦。然后，设计多变量协调 MPC 控制方案，将氦气温度作为可测扰动引入预测模型，结合动态匹配补偿机制，实现关键参数的全局协同控制。最后，通过多种典型工况下的闭环仿真，测试和验证所提方案的有效性。

1　气冷微堆特性分析

1.1　气冷微堆介绍

新型气冷微堆发电装置采用双回路开式空气布

雷顿循环结构，以实现高效核-热-电能量转换，其结构示意图如图 1 所示，设计参数如表 1 所示。

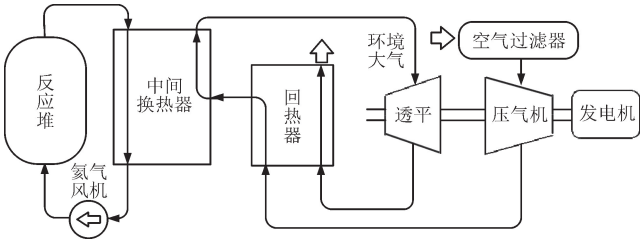


图 1 气冷微堆结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gas-cooled micro-reactor structure

表 1 气冷微堆设计参数

Table 1 Gas-cooled micro-reactor design parameters

参数	数值	参数	数值
核功率/MW	4.0	堆芯出口温度/℃	750.0
电功率/MW	1.0	氦气流量/(kg·s^{-1})	2.524 5
主回路压力/MPa	3.0	空气温度/℃	710.0
二回路压力/MPa	0.515	空气流量/(kg·s^{-1})	11.88

一回路由堆芯、主氦气风机构成，风机驱动高压氦气循环，将堆芯热量带至中间换热器[5]。二回路为开式空气布雷顿循环系统，包括同轴连接的压气机、空气透平与发电机。空气经压气机增压后，在中间换热器中吸热升温，再进入空气透平膨胀做功，继而驱动发电机输出电能。

基于集中参数建模方法，在 MATLAB/Simulink 中构建了气冷微堆非线性动态模型[1-2,5]，包括反应堆、风机、透平、压气机、回热器、中间换热器以及设备间的管道模型。反应堆中子动力学采用 6 组缓发中子点堆模型；堆芯热工水力基于质量、能量与动量守恒方程建立，将燃料、石墨及冷却剂通道进行集总化处理；透平与压气机基于轮机部件特性曲线建模；回热器与中间换热器划分为多个控制体，管道内工质流动忽略与环境的热交换；基于电学基本计算方程，建立了发电机的机理模型。文献[5-6]已对模型进行系统验证。

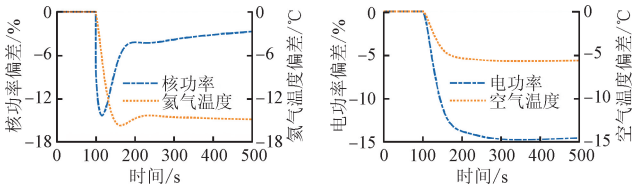
气冷微堆采用双温恒定的稳态运行方案，即维持恒定堆芯出口温度、恒定透平入口温度[6]，在保证堆芯燃料与热力设备安全的前提下，最大化布雷顿循环的整体效率；电功率根据外部负荷需求实时调节。在该方案下，关键控制输入为控制棒的棒位、风机转速与透平转速，关键输出为核功率、堆芯出口氦气温度、换热器二次侧出口空气温度及电功率。

1.2 动态特性分析

气冷微堆是一个典型的多输入多输出(MIMO)、强耦合、强非线性的复杂动态系统，有必要开展动态特性分析。

1.2.1 耦合特性分析

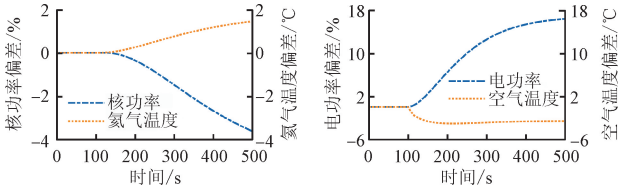
气冷微堆耦合特性主要源于一、二回路之间通过中间换热器形成的双向能量传递及核热反馈。在开环系统 100% 满功率水平(表示为 100%FP)工况下，分别引入 −50 pcm(1 pcm = 10^{-5})的反应性与 −100 r/min 的透平转速阶跃扰动，其动态响应如图 2、图 3 所示。



(a)一回路 (b)二回路

图 2 反应性扰动开环动态响应

Fig. 2 Open-loop response to reactivity transient



(a)一回路 (b)二回路

图 3 透平转速扰动开环动态响应

Fig. 3 Open-loop response to turbine speed disturbance

一回路对二回路的耦合体现在：堆芯出口氦气温度直接影响换热器一次侧换热能力，从而改变二次侧出口空气温度与透平做功。如图 2 所示，反应性扰动下，核功率快速响应，但氦气温度因热惯性响应滞后；二回路受换热器大时滞影响，空气温度与电功率响应均慢于一回路。

二回路对一回路的耦合体现在：透平转速调节空气流量，影响换热器对氦气的冷却能力，并通过燃料温度负反馈引入反应性。如图 3 所示，透平转速扰动下，二回路动态响应较快，电功率迅速变化，空气温度随冷却能力改变而上升；一回路中，氦气温度响应滞后，核功率通过负反馈缓慢下降，整体动态明显慢于二回路。

开环测试验证了系统存在双向耦合，并且揭示了一、二回路响应时间的尺度差异显著，因此在控制系统设计中需协调快、慢动态。

引入相对增益矩阵(RGA)进行定量评估，进一步分析多回路耦合特性。在 100%FP 稳态工作点，以反应性 ρ、风机转速 n_f、透平转速 n_t 为输入，以氦气温度 T_{He}、空气温度 T_{air}、电功率 P_e 为输出，依次对各输入施加小幅开环阶跃扰动，测量并计算其对各输出的稳态增益，形成开环稳态增益矩阵 $\boldsymbol{G}(0)$。

RGA 矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}$ 的计算公式为

$$\boldsymbol{\Lambda}=\boldsymbol{G}(0)\odot(\boldsymbol{G}(0)^{-1})^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\lambda_{\rho\to T_{He}} & \lambda_{n_f\to T_{He}} & \lambda_{n_t\to T_{He}}\\ \lambda_{\rho\to T_{air}} & \lambda_{n_f\to T_{air}} & \lambda_{n_t\to T_{air}}\\ \lambda_{\rho\to P_e} & \lambda_{n_f\to P_e} & \lambda_{n_t\to P_e}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.855 & 0.164 & -0.018\\ 0.006 & 1.354 & -0.360\\ 0.139 & -0.518 & 1.378\end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：⊙表示矩阵的 Hadamard 积；$\boldsymbol{\Lambda}$ 的元素 $\lambda_{a\to b}$ 为相对增益，表示输入变量 a 对输出变量 b 的影响。其值越接近 1，表明该回路受其他回路的影响越小。

RGA 矩阵中 $\lambda_{\rho\to T_{He}}$ 接近 1，表明反应性主导控制氦气温度，$\lambda_{n_f\to T_{air}}$ 和 $\lambda_{n_t\to P_e}$ 也接近 1，说明当前配对合理；而 $\lambda_{n_f\to P_e}$ 和 $\lambda_{n_t\to T_{air}}$ 数值不可忽略，说明空气温度与电功率两回路间耦合较为显著。因此，“反应性-氦气温度、风机转速-空气温度、透平转速-电功率”的配对方案合理，在控制系统设计中需充分考虑二回路解耦。

1.2.2　非线性特性分析

针对气冷微堆系统，开展基于时域的非线性动态特性分析。在开环条件下，分别在高(100%FP)、中(50%FP)、低(30%FP)3 个典型功率水平，引入 −50 pcm 的反应性阶跃扰动，关键变量的动态响应如图 4 所示。

引入反应性扰动后，各关键变量响应呈显著非线性：随着功率降低，核功率和电功率的最大偏差幅值均逐渐减小，氦气温度响应幅值则逐渐增大，空气温度偏差呈现非单调变化。系统时间常数随功率降低明显增大。例如，核功率调节时间在 50%FP 下较 100%FP 延长了约 45%，30%FP 下大约延长至约 2 倍。

非线性分析表明，气冷微堆动态特性随功率水平显著变化，单一线性模型或固定参数的控制策略难以在全功率范围内保持良好性能。因此，需考虑采用具备自适应能力的控制架构。

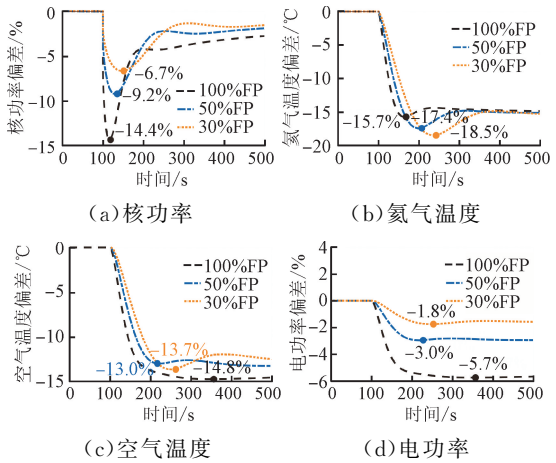


图 4　反应性扰动的非线性开环响应

Fig. 4　Nonlinear open-loop response to reactivity transient

2　基于 MPC 的多变量解耦与协调控制方案

针对气冷微多变量强耦合、非线性强、运行约束严格的特点，提出了多变量协调 MPC 控制方案，实现逻辑分为两部分：基于多变量 MPC 的解耦控制，以及融合前馈补偿与可测扰动观测的协调控制。控制方案如图 5 所示。解耦控制部分以 MPC 为核心，通过动态预测模型准确表征风机与透平转速对电功率和空气温度的直接影响，实时生成最优转速指令，实现二回路内部的动态解耦控制。

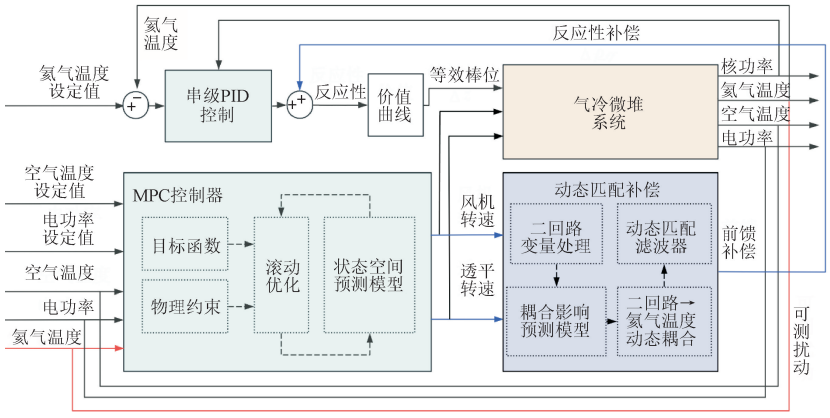


图 5　多变量协调 MPC 控制方案

Fig. 5　Multivariable coordinated MPC scheme

协调控制部分构建双向动态协调架构：一方面，将一回路氦气温度作为可测扰动引入 MPC 预测模型，使其能主动响应一回路波动对二回路的影响；另一方面，设计动态匹配补偿机制，将二回路操作对氦气温度的耦合影响转化为反应性前馈补偿信号，实现对一回路的主动调节。

通过解耦和协调机制的结合，使系统在快速响应负荷变化的同时，主动抑制回路间的动态耦合与互扰，保障关键热工参数的稳定，实现气冷微堆发电装置安全、高效、协调的全局运行。

2.1 MPC 控制原理

MPC 的 3 大核心机制为：预测模型、滚动优化与反馈校正，其结构如图 6 所示[13]。在给定约束条件下，通过预测模型获取系统未来状态，依据系统性能指标构建目标函数及优化问题，最终求解出最优的控制量。相较于经典控制，MPC 在多变量控制器设计及处理输入输出约束方面更为便捷。

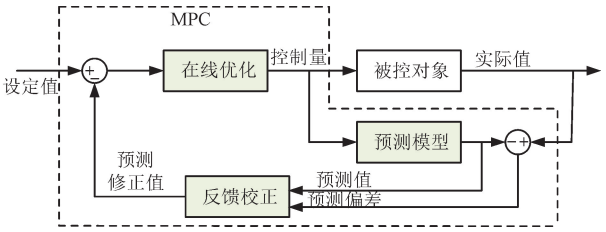


图 6 模型预测控制结构

Fig. 6 Structure of model predictive control

以线性状态空间模型作为 MPC 的预测模型。在 k 时刻，典型稳态工作点附近进行泰勒展开，忽略高阶项后，再将连续模型离散化，得到增量模型

$$\begin{cases}\Delta \boldsymbol{x}(k+1)=\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}\Delta \boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}}\Delta \boldsymbol{u}(k)\\ \boldsymbol{y}(k+1)=\boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}\Delta \boldsymbol{x}(k+1)+\boldsymbol{y}(k)\end{cases} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{u}$、$\boldsymbol{y}$ 分别表示系统状态、系统输入、系统输出；$\Delta \boldsymbol{x}(k)=\boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{x}(k-1)$，$\Delta \boldsymbol{u}(k)=\boldsymbol{u}(k)-\boldsymbol{u}(k-1)$；$\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}$ 分别是离散化状态空间模型的状态矩阵、输入矩阵和输出矩阵。

设预测时域为 p，控制时域为 m，且 $m\leqslant p$。以 $\boldsymbol{x}(k)$ 为起点进行递推，可得预测时域 p 内任意时刻的状态值，整理为矩阵形式

$$\boldsymbol{Y}_p(k+1\mid k)=\boldsymbol{\Phi}_x\Delta \boldsymbol{x}(k)+\boldsymbol{I}_y\boldsymbol{y}(k)+\boldsymbol{\Phi}_u\Delta \boldsymbol{U}(k) \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{Y}_p(k+1\mid k)$、$\Delta \boldsymbol{U}(k)$ 分别为预测输出向量、控制增量向量；$\boldsymbol{\Phi}_x$、$\boldsymbol{\Phi}_u$、$\boldsymbol{E}_y$ 为由 $\boldsymbol{A}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{B}_{\mathrm{d}}$、$\boldsymbol{C}_{\mathrm{d}}$ 递推得到的系数矩阵。

为克服系统非线性和环境干扰的影响，MPC 需利用上一时刻预测值 $\boldsymbol{y}_p(k\mid k-1)$ 与实际值 $\boldsymbol{y}(k)$ 之间的误差 $\boldsymbol{e}(k)$，对当前时刻的预测值进行反馈校正，公式为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{Y}_{\mathrm{cor}}(k+1\mid k)&=\boldsymbol{Y}_p(k+1\mid k)+\\ \boldsymbol{H}[\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{y}_p(k\mid k-1)]&=\boldsymbol{Y}_p(k+1\mid k)+\boldsymbol{H}\boldsymbol{e}(k)\end{aligned} \tag{4}$$

式中：$\boldsymbol{H}=[h(1),h(2),\cdots,h(p)]^{\mathrm{T}}$ 是误差校正矩阵。

使用带有误差信息的修正值 $\boldsymbol{Y}_{\mathrm{cor}}(k+1\mid k)$ 进行新一轮的优化环节，在求解新的控制量时将考虑到误差信息，从而实现闭环优化。

MPC 在每个采样时刻在线求解二次规划问题，最小化未来时域内的跟踪误差与控制量变化。优化仅涉及未来有限时段，下一时刻优化时域向前滚动，并以实际测量值重新求解，以补偿模型失配与扰动等不确定性。选取的目标函数为

$$\begin{aligned}\min J=&\ \|\boldsymbol{\Gamma}_y(\boldsymbol{Y}_{\mathrm{cor}}(k+1\mid k)-\boldsymbol{R}(k+1))\|^2+\\ &\|\boldsymbol{\Gamma}_u\Delta \boldsymbol{U}(k)\|^2\end{aligned} \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{\Gamma}_y=\mathrm{diag}(\gamma_y)_{p\times p}$、$\boldsymbol{\Gamma}_u=\mathrm{diag}(\gamma_u)_{m\times m}$，均是加权矩阵，其中 γ_y 和 γ_u 是加权因子 。

令 $\partial J/\partial \Delta \boldsymbol{U}=0$，可得最优控制序列。MPC 只将控制量增量序列的第一个增量作用于系统

$$\Delta \boldsymbol{u}(k)=[\boldsymbol{I}_{n_u\times n_u}\quad 0\quad\cdots\quad 0]_{1\times m}\Delta \boldsymbol{U}^*(k) \tag{6}$$

则 MPC 在当前时刻的控制量可表示为

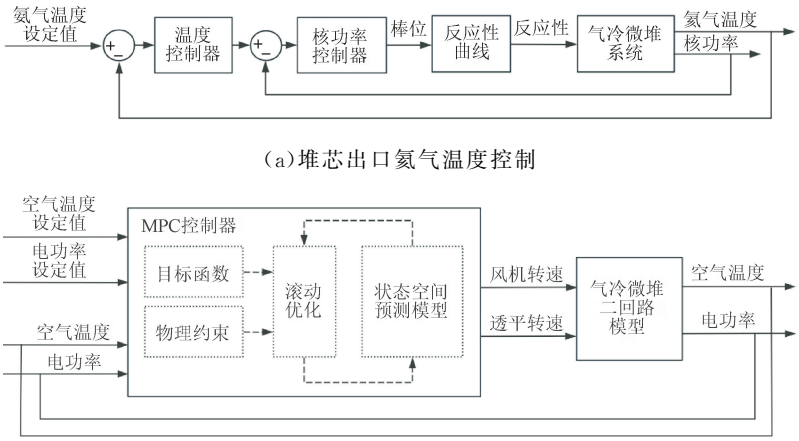
$$\boldsymbol{u}(k)=\boldsymbol{u}(k-1)+\boldsymbol{K}_{\mathrm{MPC}}\boldsymbol{E}_p(k+1\mid k) \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{E}_p(k+1\mid k)=\boldsymbol{R}(k+1)-\boldsymbol{\Phi}_x\Delta \boldsymbol{x}(k)-\boldsymbol{\Phi}_u\Delta \boldsymbol{U}(k)-\boldsymbol{I}_y\boldsymbol{y}(k)-\boldsymbol{H}\boldsymbol{e}(k)$ 为预测误差矩阵；$\boldsymbol{K}_{\mathrm{MPC}}$ 为预测控制增益。

2.2 多变量解耦 MPC 控制系统设计

传统 PID 控制无法处理回路间强耦合；前馈解耦控制虽针对性补偿了主要耦合路径，但无法应对未建模耦合与系统约束。为此，氦气温度采用串级 PID 控制，电功率与空气温度设计多变量解耦 MPC 控制器，控制方案如图 7 所示。

氦气温度与二回路耦合较弱，可独立设计控制器。针对其大惯性、大滞后动态特性，采用串级 PID 控制提升响应速度，并基于核功率实施增益调度策略切换控制器参数。外环采用 PI 控制器，根据氦气温度偏差计算核功率需求；内环为 P 控制器，根据核功率偏差调节控制棒棒速。使用频域解析法设计的控制器具体参数如表 2，其中 K 为增益。



(a)堆芯出口氦气温度控制

(b)空气温度及电功率控制

图 7　多变量解耦 MPC 控制方案

Fig. 7　Multivariable decoupling MPC scheme

表 2　氦气温度串级 PID 控制参数

Table 2　Control parameters for cascade PID controller

功率水平	外环 K_P/（W·℃$^{-1}$）	外环 K_I/（W·℃$^{-1}$·s^{-1}）	内环 K_P/（cm·s^{-1}·W^{-1}）
100%FP	6.49×10^{4}	1888.71	1.19×10^{-6}
50%FP	3.20×10^{4}	271.44	1.19×10^{-6}
30%FP	2.21×10^{4}	152.65	1.59×10^{-6}

在每个采样周期内，多变量解耦 MPC 控制器基于预测模型，在满足执行器约束的前提下，通过滚动优化重新协调两个控制量的动作，最小化跟踪误差并抑制控制量的剧烈变化，从而实现对电功率与空气温度的解耦控制。

解耦 MPC 方案未将氦气温度纳入被控变量，而由串级 PID 独立控制，这是基于一、二回路响应时间尺度差异的考虑。若将快慢动态差异显著的变量强行纳入同一个 MPC，将导致优化问题维数增加、求解困难，且因时间尺度冲突造成权重整定矛盾，使快回路性能被慢回路拖累，削弱整体控制品质。

由于气冷微堆强非线性，单一预测模型无法在全工况下保持良好性能。因此，按负荷划分高(50%～100%FP)、中(30%～50%FP)、低(30%FP 以下) 3 个功率区间，在代表性稳态工作点(100%FP、50%FP、30%FP)对机理模型进行线性化，建立局部线性状态空间模型库。控制器根据当前系统负荷动态调度 MPC 的预测模型。状态矩阵的计算式为

$$\boldsymbol{A}_P=\frac{\boldsymbol{A}_{P1}(P_2-P)+\boldsymbol{A}_{P2}(P-P_1)}{P_2-P_1} \tag{8}$$

式中：P、P_1 和 P_2 均为负荷功率，且 $P_2>P>P_1$；$\boldsymbol{A}_P$、$\boldsymbol{A}_{P1}$、$\boldsymbol{A}_{P2}$ 分别为 P、P_1 和 P_2 功率下对应的状态矩阵。

多变量解耦 MPC 的反馈校正机制通过比较实际输出与模型预测值之间的偏差，对后续预测进行实时修正，增强对模型不确定性及外部扰动的鲁棒性。滚动优化采用式(5)形式的二次型目标函数，轨迹跟踪与执行器变化项的权重矩阵对角元素均设为 1.0，抑制控制量的剧烈波动，兼顾响应快速性与平稳性。

在执行器约束方面，为了避免转速剧烈波动，严格限制转速及其变化率：氦气风机转速范围为 0～35 000 r/min，空气透平转速范围为 0～28 000 r/min，且二者的变化率均限制在 ±500 r/s 以内。

预测时域根据系统动态特性设置，覆盖电功率与空气温度回路的主要调节过程：设定采样时间 $T_s=0.5$ s，$p=100$，$m=20$。

2.3　多变量协调 MPC 控制方案设计

虽然解耦 MPC 方案在二回路解耦中表现出色，但仍存在结构性局限：当系统面临大幅负荷变化或强外部扰动时，MPC 动作会显著影响氦气温度，但一回路的串级 PID 控制器难以及时补偿；反之，当氦气温度或反应性改变时，也会干扰电功率与空气温度，而 MPC 只能被动抗扰。因此，本研究提出了一种多变量协调 MPC 控制方案，实现了对气冷微堆核心被控变量的全局一体化协调控制，其控制结构见图 5。该方案的核心创新在于构建了一种双向动态协调的控制架构。

(1)可测扰动前馈机制。在控制结构上,多变量协调 MPC 的输出量仍为风机与透平转速,而输入量在原有电功率与空气温度的基础上,将堆芯出口氦气温度作为关键的可测扰动引入预测模型,构成了一个具有三输入-两输出的多变量协调控制器。这使得预测模型不仅能准确表征风机与透平转速的直接动态作用通道,还能通过状态空间方程完整描述氦气温度变化对二回路的跨回路耦合影响。

(2)动态匹配补偿模块。为进一步增强多变量协调控制效果,方案中设计了动态匹配补偿模块。该模块基于机理模型推导建立了耦合影响预测模型,预测二回路操作(n_f 和 n_t)对一回路参数(T_{He})的动态耦合影响。将预测耦合影响量转化为前馈反应性补偿信号 $\Delta\rho_{ff}$,其形式为

$$\Delta\rho_{ff}(s) = -\boldsymbol{K}_{ff}F(s)\cdot\begin{bmatrix}\Delta n_f(s)\\ \Delta n_t(s)\end{bmatrix} \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{K}_{ff}$ 为稳态增益矩阵;$F(s)$ 为动态匹配滤波器的传递函数。

为实现对耦合影响的稳态完全补偿,K_{ff} 应满足

$$\boldsymbol{K}_{ff}g_{\rho\to T_{He}} + \left[g_{n_f\to T_{He}}\ g_{n_t\to T_{He}}\right] = 0 \tag{10}$$

式中:$g_{\rho\to T_{He}}$、$g_{n_f\to T_{He}}$、$g_{n_t\to T_{He}}$ 均为系统开环稳态增益矩阵 $\boldsymbol{G}(0)$ 中的元素,可以直接获取。

将 $F(s)$ 设计为一阶低通形式

$$F(s) = \frac{1}{\tau_f s + 1} \tag{11}$$

式中:τ_f 为时间常数,根据一回路热惯性参数选取。

之后,$\Delta\rho_{ff}$ 与串级 PID 控制器生成的反应性控制信号叠加,共同构成总的反应性控制指令 $\Delta\rho$,再通过价值曲线指导控制棒进行调节。这一设计能主动调整反应性,能跨回路、显式地处理动态耦合,从而实现全局的协调优化。

双重机制共同作用,使得系统在快速响应负荷、保障发电出力的同时,又能将堆芯出口氦气温度等关键热工参数的波动抑制在小范围内,有效避免了回路间的负面耦合与互扰,真正实现了堆、机之间动态、高效的全局协调运行。

3 控制系统性能测试

基于气冷微堆非线性动态模型,开展多工况仿真与性能验证。为公平对比,对传统 PID 及前馈解耦 PID 控制器进行了系统化设计[10]:传统 PID 控制器采用增益调度策略,在 100%FP、50%FP 和 30%FP 共 3 个功率点基于频域解析法整定参数;前馈解耦 PID 控制器在此基础上增加前馈补偿器,实现二回路主要耦合通道的动态解耦。

仿真测试涵盖 3 类典型工况:一是不同功率水平下的负荷阶跃测试,评估快速跟踪与稳态调节能力;二是负荷大范围线性变化测试,检验控制系统在全功率范围内的协调性与稳定性;三是关键执行机构的典型扰动,评估系统的抗干扰能力。

3.1 负荷阶跃工况测试

3.1.1 100%FP 负荷阶跃工况测试

在 100%FP 稳定运行后,分别在第 100 s 和第 600 s 引入电功率设定值阶跃−5%FP 和 5%FP 工况,系统动态响应如图 8 所示,瞬态过程控制性能指标见表 3,其中 E_{ITS} 为时间加权误差平方积分。仿真验证中,系统安全运行的边界为:堆芯出口氦气温度不高于 800 ℃,核功率不超过 109%FP。

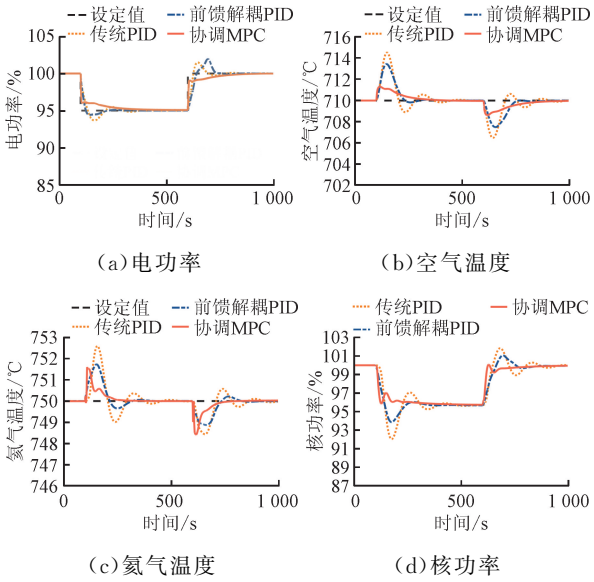


图 8 100%FP 负荷阶跃工况测试的动态响应

Fig. 8 Dynamic responses to load step test at 100%FP

多变量协调 MPC 控制表现优异:电功率下降、升负荷过程中均完全无超调;降、升负荷工况下,空气温度最大偏差较传统 PID 分别降低 76.7%和 66.5%,较前馈解耦 PID 分别降低 63.8%和 44.8%;氦气温度最大偏差较传统 PID 分别降低 55.2%和 32.1%;核功率波动更为平缓。各回路调节时间较传统 PID 均显著缩短。

降、升负荷工况下,空气温度与氦气温度的 E_{ITS} 较传统 PID 分别降低 87.7%、91.6%和 73.7%、80.9%,验证了其在抑制偏差累积方面的优势。协调 MPC 电功率 E_{ITS} 与传统 PID 接近,这是由于 MPC 为实现完全无超调导致微小偏差在时间加权下累积;但从工程角度看,完全消除超调对设备安全更具价值。

表 3　100%FP 负荷阶跃工况控制性能

Table 3　Control performance of load step at 100%FP

关键变量	控制器	负荷情况	最大偏差	调节时间/s	E_{ITS}
电功率	传统 PID	降负荷	26.94%	260.5	1.49×10^4
		升负荷	29.86%	207.5	5 365.54
	前馈解耦 PID	降负荷	11.95%	158.5	8 248.05
		升负荷	39.36%	200.5	1.37×10^4
	协调 MPC	降负荷	0	182.5	1.41×10^4
		升负荷	0	166.5	5 141.92
空气温度	传统 PID	降负荷	5.63 ℃	328.0	5.71×10^4
		升负荷	4.15 ℃	294.0	3.17×10^4
	前馈解耦 PID	降负荷	3.62 ℃	244.5	3.32×10^4
		升负荷	2.52 ℃	148.5	2.58×10^4
	协调 MPC	降负荷	1.31 ℃	182.5	7 028.64
		升负荷	1.39 ℃	179.5	8 328.16
氦气温度	传统 PID	降负荷	3.59 ℃	325.5	2.35×10^4
		升负荷	2.15 ℃	296.0	9 796.90
	前馈解耦 PID	降负荷	2.09 ℃	198.0	8 844.74
		升负荷	1.37 ℃	198.5	5 626.16
	协调 MPC	降负荷	1.61 ℃	132.0	1 976.07
		升负荷	1.46 ℃	120.5	1 866.97
核功率	传统 PID	降负荷	7.96%	268.5	
		升负荷	6.15%	328.0	
	前馈解耦 PID	降负荷	6.13%	179.5	
		升负荷	5.38%	226.0	
	协调 MPC	降负荷	4.27%	149.5	
		升负荷	4.32%	196.5	

3.1.2　50%FP 负荷阶跃工况测试

在 50% FP 稳定运行后，分别在第 100 s 和 1 100 s 引入电功率设定值阶跃－5%FP、5%FP 工况，系统动态响应如图 9 所示，控制性能指标见表 4。

在 50%FP 负荷阶跃工况下，协调 MPC 控制同样优势显著：在降、升负荷过程中，电功率均完全无超调；空气温度最大偏差较传统 PID 分别降低 83.9%、60.3%，较前馈解耦 PID 分别降低 84.7%、60.1%；氦气温度最大偏差较传统 PID 分别降低 19.6%、21.9%，较前馈解耦 PID 分别降低 51.8%、11.8%；核功率波动更平缓。各回路调节时间较传统 PID 均明显缩短。

空气温度的 E_{ITS} 较传统 PID，降、升负荷分别降低 99.4%、92.2%，氦气温度的 E_{ITS} 降低 75.1%、72.1%，验证了协调 MPC 在抑制偏差累积的优势。

综合负荷阶跃测试结果，多变量协调 MPC 在不同的功率水平下均能有效处理多回路强耦合，抑制关键变量超调量或最大偏差。该方案还显式处理透平和风机转速等执行机构约束，确保所有操作始终处于安全可行域内，这是传统控制方法不具备的。

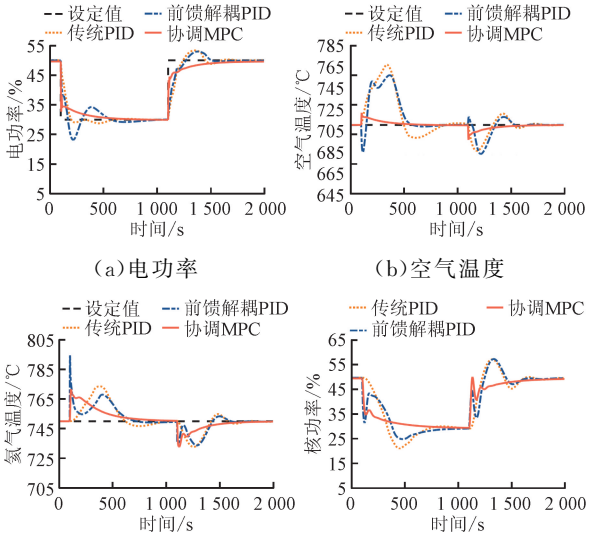


图 9　50%FP 负荷阶跃工况测试的动态响应

Fig. 9　Dynamic responses to load step test at 50%FP

表 4 50%FP 负荷阶跃工况控制性能

Table 4 Control performance of load step at 50%FP

关键变量	控制器	负荷情况	最大偏差	调节时间	E_{ITS}
电功率	传统 PID	降负荷	6.21%	431.0 s	4.62×10^5
		升负荷	16.63%	472.0 s	6.98×10^5
	前馈解耦 PID	降负荷	33.96%	703.5 s	1.31×10^6
		升负荷	14.77%	461.5 s	5.40×10^5
	协调 MPC	降负荷	0	428.5 s	4.82×10^5
		升负荷	0	439.0 s	4.76×10^5
空气温度	传统 PID	降负荷	68.96 ℃	931.0 s	1.38×10^8
		升负荷	35.33 ℃	525.5 s	1.01×10^7
	前馈解耦 PID	降负荷	72.71 ℃	602.5 s	1.00×10^8
		升负荷	35.07 ℃	417.5 s	1.10×10^7
	协调 MPC	降负荷	11.13 ℃	340.0 s	7.63×10^5
		升负荷	14.01 ℃	342.0 s	7.87×10^5
氦气温度	传统 PID	降负荷	26.77 ℃	798.0 s	3.00×10^7
		升负荷	22.09 ℃	563.0 s	7.57×10^6
	前馈解耦 PID	降负荷	44.66 ℃	593.0 s	1.73×10^7
		升负荷	19.57 ℃	460.0 s	6.83×10^6
	协调 MPC	降负荷	21.51 ℃	624.5 s	7.46×10^6
		升负荷	17.26 ℃	439.5 s	2.11×10^6
核功率	传统 PID	降负荷	28.53%	621.0 s	
		升负荷	27.93%	484.5 s	
	前馈解耦 PID	降负荷	24.72%	615.0 s	
		升负荷	28.06%	483.0 s	
	协调 MPC	降负荷	19.92%	557.0 s	
		升负荷	20.43%	450.5 s	

3.2 负荷线性变化工况测试

在 100%FP 稳定运行 100 s 后，将电功率设定值以−5%FP/min 的速率，由 100%FP 线性下降至 30%FP，系统动态响应如图 10 所示，性能指标见表 5。其中，电功率和核功率的最大偏差指负向偏差的最大值。

多变量协调 MPC 控制下，电功率未出现反向波动，实现了直接、平稳的负荷跟随，而传统 PID 与前馈解耦 PID 均出现明显反向调整；空气温度最大偏差二者分别降低 76.5%、73.0%，调节时间大幅缩短；氦气温度和核功率同样平稳过渡。协调 MPC 控制下，空气温度的 E_{ITS} 较传统 PID 和前馈解耦 PID 分别降低 88.6%、91.5%，氦气温度的 E_{ITS} 分别降低 22.8%、24.3%。综上，多变量协调 MPC 在全局协调与动态解耦方面优势较大。

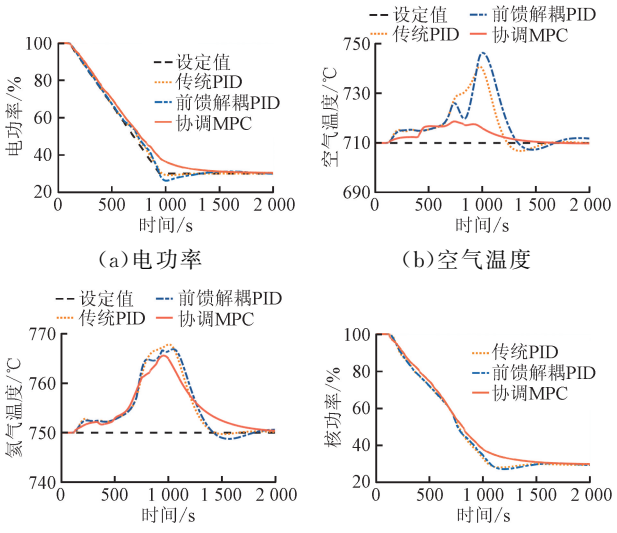


图 10 负荷线性变化工况测试的动态响应

Fig. 10 Dynamic responses to load ramp test

表 5　负荷线性变化工况控制性能

Table 5　Control performance of load ramp test

关键变量	控制器	最大偏差	调节时间	E_{ITS}
电功率	传统 PID	0.85%	266.5 s	170.12
	前馈解耦 PID	3.87%	412.0 s	487.32
	协调 MPC	0	292.5 s	758.14
空气温度	传统 PID	39.06 ℃	526.5 s	2.08×10^{8}
	前馈解耦 PID	34.02 ℃	>1060 s	2.78×10^{8}
	协调 MPC	9.19 ℃	428.5 s	2.37×10^{7}
氦气温度	传统 PID	18.06 ℃	710.5 s	1.02×10^{8}
	前馈解耦 PID	18.09 ℃	725.5 s	1.04×10^{8}
	协调 MPC	15.99 ℃	693.0 s	7.87×10^{7}
核功率	传统 PID	2.08%	407.0 s	
	前馈解耦 PID	3.01%	443.0 s	
	协调 MPC	0	419.0 s	

表 6　风机转速扰动工况控制性能

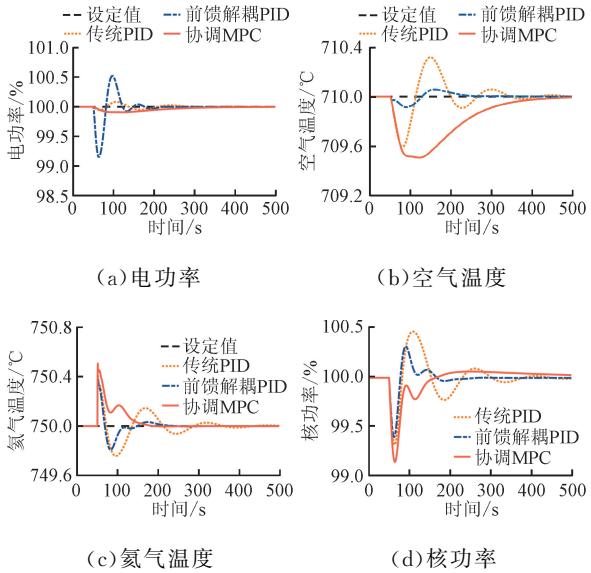
Table 6　Control performance of fan speed disturbance

关键变量	控制器	最大偏差	调节时间	E_{ITS}
电功率	传统 PID	0.14%	190.5 s	43.49
	前馈解耦 PID	1.37%	164.5 s	1 330.32
	协调 MPC	0.09%	171.0 s	74.87
空气温度	传统 PID	0.73 ℃	397.5 s	1 111.83
	前馈解耦 PID	0.14 ℃	179.0 s	52.19
	协调 MPC	0.50 ℃	356.0 s	2 094.60
氦气温度	传统 PID	0.65 ℃	344.0 s	455.11
	前馈解耦 PID	0.60 ℃	158.5 s	276.72
	协调 MPC	0.51 ℃	105.0 s	308.87
核功率	传统 PID	1.14%	285.5 s	
	前馈解耦 PID	0.91%	180.0 s	
	协调 MPC	0.91%	187.5 s	

3.3　扰动工况测试

3.3.1　风机转速扰动工况测试

在 100%FP 稳定运行 50 s 后，将风机转速降低 1 000 r/min，动态响应如图 11 所示，性能指标见表 6。



(a)电功率　(b)空气温度

(c)氦气温度　(d)核功率

图 11　风机转速扰动工况测试的动态响应

Fig. 11　Dynamic responses to fan speed disturbance

在风机转速阶跃扰动工况下，多变量协调 MPC 通过滚动优化与多步预测，协调反应堆功率与透平转速，实现对负荷的精准跟随。该方法显式处理系统耦合与扰动传递，在抑制扰动的同时，避免控制动作对其他回路产生过大冲击。

对于电功率，协调 MPC 较传统 PID 降低 35.7%，较前馈解耦 PID 降低 93.4%。传统 PID 控制因缺乏解耦机制，响应振荡明显；前馈解耦 PID 因其解耦补偿是针对控制回路间的耦合，未包含风机转速这类内源性扰动的补偿通道，因此解耦基本失效，甚至因错误的耦合补偿产生了负面干扰。

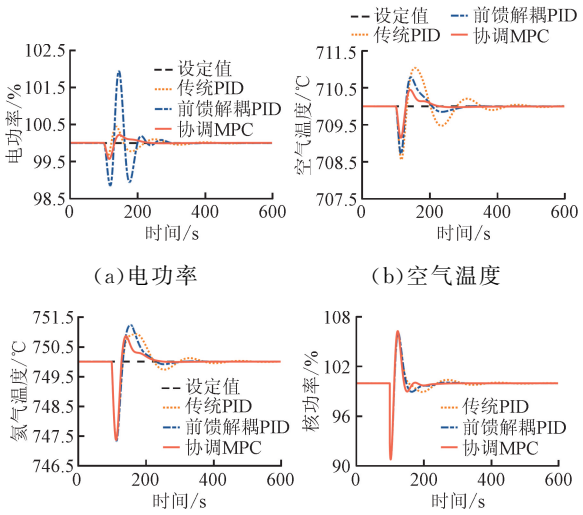
对于空气温度，前馈解耦 PID 直接补偿了风机转速对一回路流量的影响，故而能快速抑制温度波动，温度最大偏差最小；协调 MPC 控制效果略逊于前馈补偿，但较传统 PID 也降低 31.5%；传统 PID 完全依赖反馈且受强耦合影响，控制效果不佳。

对于氦气温度与核功率，协调 MPC 方案极大减小扰动工况下的最大偏差：氦气温度偏差较传统 PID 降低 21.5%，较前馈解耦 PID 降低 15.0%；核功率偏差较传统 PID 降低 20.2%，与前馈解耦 PID 相当。

协调 MPC 下氦气温度的 E_{ITS} 较传统 PID 降低 32.1%；电功率的 E_{ITS} 略高于传统 PID，但都远小于前馈解耦 PID；空气温度的 E_{ITS} 较高，源于其为保证平稳控制、避免设定值附近反复穿越，牺牲了快速性。

3.3.2　反应性扰动工况测试

在 100%FP 稳定运行 100 s 后，引入 −50 pcm 的反应性扰动，动态响应见图 12，性能指标见表 7。在反应性扰动工况下，协调 MPC 通过可测扰动通道，提前调整透平与风机转速，平滑补偿扰动向二回路的传递；通过多变量预测和协调机制，补偿氦气温度控制。方案有效平抑了因一、二回路动态不匹配而引起的波动，保障系统在扰动下的平稳过渡。



(a)电功率 (b)空气温度

(c)氦气温度 (d)核功率

图 12 反应性扰动工况测试的动态响应

Fig. 12 Dynamic responses to reactivity transient test

表 7 反应性扰动工况控制性能

Table 7 Control performance of reactivity transient test

关键变量	控制器	最大偏差	调节时间	E_{ITS}
电功率	传统 PID	0.79%	176.5 s	1 178.27
	前馈解耦 PID	3.09%	184.0 s	2.91×10^4
	协调 MPC	0.64%	106.0 s	508.34
空气温度	传统 PID	2.48 ℃	311.5 s	1.83×10^4
	前馈解耦 PID	2.07 ℃	184.5 s	1.03×10^4
	协调 MPC	1.29 ℃	109.5 s	1 711.00
氦气温度	传统 PID	3.53 ℃	257.5 s	4.03×10^4
	前馈解耦 PID	3.90 ℃	177.0 s	2.86×10^4
	协调 MPC	3.48 ℃	124.5 s	1.29×10^4
核功率	传统 PID	15.3%	247.5 s	
	前馈解耦 PID	15.3%	130.5 s	
	协调 MPC	15.3%	114.5 s	

对于电功率,协调 MPC 控制下的最大偏差,较传统 PID 降低 19.0%,较前馈解耦 PID 显著降低 79.3%,且在扰动后快速恢复至稳态。传统 PID 控制响应存在一定波动;前馈解耦 PID 控制因对反应性扰动的针对性不足,反而引入了额外的相位滞后,导致调节过程中偏差很大,恢复时间更长。

对于空气温度,多变量协调 MPC 同样保持最优,其最大偏差较传统 PID 降低 48.0%,较前馈解耦 PID 降低了 37.7%,调节过程更为平稳。前馈解耦 PID 通过补偿机制抑制了温度波动,但效果有限;传统 PID 因缺乏对耦合的处理,导致出现大幅振荡。

对于氦气温度和核功率,3 种控制在扰动初期均快速下降。之后,在协调 MPC 控制下,这两个关键变量的反向偏差最小,调节时间最短。

协调 MPC 在 E_{ITS} 指标上优势显著:电功率的 E_{ITS} 较传统 PID 降低 56.8%,较前馈解耦 PID 降低 98.3%;空气温度的 E_{ITS} 分别降低 90.6% 和 83.4%;氦气温度的 E_{ITS} 分别降低 68.0% 和 54.9%。这表明协调 MPC 实现了从瞬时响应到稳态恢复的全过程性能优化。

4 结 论

(1)基于增益调度策略,在高、中、低 3 个典型负荷区间建立局部线性状态空间模型库,实现预测模型的动态适配,可有效应对气冷微堆的非线性特性,确保全功率范围内良好的预测精度与控制鲁棒性。

(2)通过引入双向协调架构,系统性解决了多回路强耦合问题。MPC 在每个采样周期内同步优化多个控制输入,显式处理执行器约束,并结合可测扰动与动态匹配补偿机制,主动协调一、二回路动态响应,在根本上抑制回路间干扰,实现高性能动态解耦与全局系统协同。

(3)与传统 PID 及前馈解耦 PID 相比,本文提出的多变量协调 MPC 方案在负荷阶跃、负荷线性变化、风机转速扰动及反应性扰动等多种工况下,均能有效消除电功率超调,显著降低空气温度与氦气温度的最大动态偏差。在 100%FP 阶跃降负荷工况下,空气温度与氦气温度较传统 PID 分别减少 76.7%、55.2%,显著提升了整体控制水平。

参考文献:

[1] Martin N, Charlot L, Strydom G. A MOOSE-based model for fission product transport and source term estimation for high-temperature gas-cooled reactors [J]. Nuclear Technology, 2025, 211(8): 1674-1698.

[2] DeBoisset S, Charlot L, Freyman T, et al. Modeling a gas-cooled microreactor balance of plant for the virtual test bed [J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2023, 129: 864-867.

[3] 俞荣君, 杨睿, 李维汉, 等. 超高温高功率密度的小型气冷堆堆芯方案研究 [J]. 节能技术, 2024, 42(5): 425-429.
Yu Rongjun, Yang Rui, Li Weihan, et al. Research on ultra-high temperature and high power density small gas-cooled reactor core scheme [J]. Energy Conserva-

tion Technology，2024，42(5)：425-429.

[4] 吴杨茂，唐思邈，朱隆祥，等. 氦氙气冷空间堆耦合布雷顿循环核电源系统瞬态特性分析 [J]. 原子能科学技术，2025，59(5)：973-987.
Wu Yangmao，Tang Simiao，Zhu Longxiang，et al. Transient characteristics analysis of He-Xe cooled space reactor coupled with Brayton cycle nuclear power system [J]. Atomic Energy Science and Technology，2025，59(5)：973-987.

[5] 李颖，姜明月，吴长浩，等. 新型气冷微堆系统建模与控制系统设计 [J]. 核动力工程，2025，46(5)：195-204.
Li Ying，Jiang Mingyue，Wu Changhao，et al. Modeling and control system design of a new gas-cooled microreactor system [J]. Nuclear Power Engineering，2025，46(5)：195-204.

[6] 邱磊磊，范遂，魏新宇，等. 气冷微堆动态特性分析与稳态运行方案设计 [J]. 核动力工程，2024，45(1)：139-144.
Qiu Leilei，Fan Sui，Wei Xinyu，et al. Dynamic characteristics analysis and steady-state operation scheme design of gas-cooled microreactor [J]. Nuclear Power Engineering，2024，45(1)：139-144.

[7] 董哲，黄晓津. 高温气冷堆 PD 输出反馈功率控制的镇定性能分析 [J]. 原子能科学技术，2015，49(增刊 1)：402-408.
Dong Zhe，Huang Xiaojin. Stabilization analysis of PD output feedback power-level control for high temperature gas-cooled reactor [J]. Atomic Energy Science and Technology，2015，49(S1)：402-408.

[8] Ming Yang，Tian Ruifeng，Zhao Fulong，et al. Control strategies and transient characteristics of a 5 MW・h small modular supercritical CO_2 Brayton-cycle reactor system [J]. Applied Thermal Engineering，2023，235：121302.

[9] Wu Shifa，Ma Xiaolong，Liu Junfeng，et al. A load following control strategy for Chinese modular high-temperature gas-cooled reactor HTR-PM [J]. Energy，2023，263，Part A：125459.

[10] Jiang Di，Dong Zhe. Dynamic matrix control for thermal power of multi-modular high temperature gas-cooled reactor plants [J]. Energy，2020，198：117386.

[11] Geng Xuyao，Wang Jie. Study on power regulation methods of microreactor coupled with closed helium gas turbine direct cycle [C]//2024 31st International Conference on Nuclear Engineering. New York，USA：ASME，2024：V004T04A022.

[12] 晏勇，杜继宏，冯元琨. 10 MW 高温气冷堆的协调控制方案 [J]. 清华大学学报(自然科学版)，2001，41(10)：118-122.
Yan Yong，Du Jihong，Feng Yuankun. Coordinate control strategy for 10 MW high temperature gas-cooled reactor [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology)，2001，41(10)：118-122.

[13] 周扬. 模块式高温气冷堆核电站的协调控制策略分析 [J]. 热力透平，2018，47(3)：217-220.
Zhou Yang. Coordinated control strategy of nuclear power plant with Pebble-Bed modular high temperature gas-cooled reactor [J]. Thermal Turbine，2018，47(3)：217-220.

[14] 李君仪，董哲，程仲华. 高温气冷堆氢电联产核电厂的协调控制研究 [J]. 自动化仪表，2023，44(增刊 1)：348-352.
Li Junyi，Dong Zhe，Cheng Zhonghua. Coordinated control study of high temperature gas-cooled reactor hydrogen cogeneration nuclear power plant [J]. Process Automation Instrumentation，2023，44(S1)：348-352.

[15] 吴长浩，姜明月，宁可，等. 基于开式空气布雷顿循环的气冷微堆解耦控制方法研究 [J]. 自动化仪表，2025，46(9)：51-58.
Wu Changhao，Jiang Mingyue，Ning Ke，et al. Research on decoupling control methods for gas-cooled micro-reactor based on the open-air Brayton cycle [J]. Process Automation Instrumentation，2025，46(9)：51-58.

[16] 张茹，孙培伟，魏新宇. 热电联产压水堆核电机组解耦控制 [J]. 哈尔滨工程大学学报，2023，44(12)：2201-2207.
Zhang Ru，Sun Peiwei，Wei Xinyu. Decoupling control of cogeneration PWR nuclear power plant [J]. Journal of Harbin Engineering University，2023，44(12)：2201-2207.

[17] Sun Yuanxiang，Kong Dehao，Zhang Zhenbin，et al. Decoupled distributed control of offshore wind farms connected to DR-HVDC based on novel adaptive virtual impedance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2024，39(11)：15242-15256.

[18] Turk A，Wu Qiuwei，Zhang Menglin. Model predictive control based real-time scheduling for balancing multiple uncertainties in integrated energy system with power-to-x [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2021，130：107015.

[19] Adaryani M R，Taher S A，Guerrero J M. Improved direct model predictive control for variable magnitude variable frequency wave energy converter connected to

constant power load [J]. Journal of Energy Storage, 2021, 43: 103175.

[20] Shahzad S, Abbasi M A, Chaudhry M A, et al. Model predictive control strategies in microgrids: a concise revisit [J]. IEEE Access, 2022, 10: 122211-122225.

[21] Zhang Mengfan, Xu Qianwen, Zhang Chuanlin, et al. Decentralized coordination and stabilization of hybrid energy storage systems in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1751-1761.

[22] Chen Weihan, Mattson N S, You Fengqi. Intelligent control and energy optimization in controlled environment agriculture via nonlinear model predictive control of semi-closed greenhouse [J]. Applied Energy, 2022, 320: 119334.

[23] Cheng Lan, Wu Wenjie, Qiu Lin, et al. An improved data-driven based model predictive control for zero-sequence circulating current suppression in paralleled converters [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 143: 108401.

[24] Eliasi H, Menhaj M B, Ghaffari A. Model predictive control of a pressurized water reactor with a nonlinear model [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38(9): 1963-1970.

[25] 马骞, 孙培伟, 魏新宇. 空间堆线性变参数模型预测控制方法 [J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(11): 164-175.
Ma Qian, Sun Peiwei, Wei Xinyu. Predictive control method based on linear varying parameter model for space nuclear reactors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(11): 164-175.

（编辑 亢列梅）