

# 蒸汽发生器水位自适应滑模控制策略研究

刘轶<sup>1</sup>, 郭晓杰<sup>2,3</sup>, 柯志武<sup>2,3</sup>, 周宏宽<sup>2,3</sup>

(1. 海军驻北京地区航空军事代表室, 北京 100041; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205;  
3. 船舶热能动力全国重点实验室, 湖北 武汉 430205)

**摘要:** 针对蒸汽发生器负荷扰动恶劣、运行工况多变及虚假水位效应导致的控制性能恶化问题, 提出了一种蒸汽发生器水位自适应滑模控制策略。基于可移动边界理论建立了蒸汽发生器非线性动态模型, 分离出蒸汽发生器水位、蒸汽流量和给水流量的对应关系, 设计了一阶积分滑模面和滑模控制律, 在此基础上考虑水位测量误差影响设计了水位自适应估计律, 并根据李雅普诺夫理论验证系统稳定性。仿真测试表明: 所设计的蒸汽发生器水位自适应滑模控制策略具有更优的性能, 相较于传统PID和滑模控制策略其水位最大超调量和稳态控制偏差均最小, 分别为1.3%和0.1%, 能够适应工况变化和负荷扰动过程, 提升了自适应滑模控制系统的变工况响应能力和抗扰动鲁棒性。

**关键词:** 蒸汽发生器; 水位控制; 滑模控制; 自适应估计

中图分类号: TP273 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2024.10.021

[引用本文格式] 刘轶, 郭晓杰, 柯志武, 等. 蒸汽发生器水位自适应滑模控制策略研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(10): 186-192. LIU Yi, GUO Xiaojie, KE Zhiwu, et al. Research on adaptive sliding mode control strategy for steam generator water level[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(10): 186-192.

## Research on Adaptive Sliding Mode Control Strategy for Steam Generator Water Level

LIU Yi<sup>1</sup>, GUO Xiaojie<sup>2,3</sup>, KE Zhiwu<sup>2,3</sup>, ZHOU Hongkuan<sup>2,3</sup>

(1. Naval Aviation Military Representative Office in Beijing, Beijing, China, Post Code: 100041;  
2. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan, China, Post Code: 430205;  
3. State Key Laboratory of Marine Thermal Energy and Power, Wuhan, China, Post Code: 430205)

**Abstract:** In response to the problems of poor control performance caused by severe load disturbances, variable operating conditions, and false water level effects in steam generators, a self-adaptive sliding mode control strategy for steam generator water level was proposed. Based on the theory of movable boundaries, a nonlinear dynamic model of the steam generator was established, and the corresponding relationship between the steam generator water level, steam flow rate, and feedwater flow rate was separated. A first-order integral sliding mode surface and sliding mode control law were designed. On this basis, considering the impact of water level measurement errors, a self-adaptive estimation law for water level was designed. The stability of the system was verified according to Lyapunov theory. Simulation tests show that the self-adaptive sliding mode control strategy designed for steam generator water level has better performance. Compared with the traditional PID and sliding mode control strategies, the maximum overshoot of water level and steady-state control deviation are the smallest, which are 1.3% and 0.1% respectively. It has the ability of adapting to changes in operating conditions and load disturbance

process, improving the response ability of the self-adaptive sliding mode control system under variable operating conditions and anti-disturbance robustness.

**Key words:** steam generator, water level control, sliding mode control, self-adaptive estimation

## 引 言

蒸汽发生器是压水堆核动力装置中的主要设备之一,也是把一回路冷却剂从反应堆堆芯带出的热量传给二回路给水的设备。在运行过程中,若蒸汽发生器水位过低将导致蒸汽进入给水循环,使管束传热性能恶化或对蒸汽发生器造成管板热冲击;水位过高则影响汽水分离效果,造成蒸汽品质恶化,危害汽轮机叶片。美国针对在役压水堆核电站的调查表明,核电站 25% 的紧急停堆和汽轮机跳闸,由蒸汽发生器主给水系统事故即水位控制不良导致<sup>[1]</sup>。因此,针对蒸汽发生器水位控制策略的研究具有理论价值和工程意义。

压水堆核电站蒸汽发生器水位控制系统的控制要求越来越高<sup>[2]</sup>,需要通过实时调节二次侧给水流量,以保证全工况运行模式下蒸汽发生器的水位维持在设定值范围内。由于受非最小相位的影响,蒸汽发生器水位控制系统存在“虚假水位”现象<sup>[3]</sup>,使得蒸汽发生器的动态特性更为复杂,主要体现在:外部扰动环境恶劣,水位控制系统需要在扰动环境中快速调节二次侧给水流量;运行工况复杂多变,启停工况、低工况、升降负荷工况下的水位动态控制特性差别较大;蒸汽发生器水位控制需要克服“虚假水位”的不利影响才能提高水位控制精度。

目前,以线性 PID 控制为基础的蒸汽发生器水位控制方法存在很多弊端,如变工况响应能力差、参数鲁棒稳定性差、系统内部动态耦合特性被忽略等<sup>[4]</sup>。研究学者们对蒸汽发生器水位控制策略开展了大量理论以及试验研究。Ansarifar 等人<sup>[5]</sup>设计了基于动态滑模控制的增益规划控制器,该控制器对蒸汽发生器水位模型的内部不确定性及外部扰动具有较好的鲁棒性,且容易与工程应用相结合。在此基础上,Ansarifar 等人<sup>[6]</sup>进一步设计了基于自适应观测器的动态滑模控制策略,其设计过程及控制器结构更为简单,且鲁棒性能更好。Hu 等人<sup>[7]</sup>设计了基于多模型的鲁棒预测控制算法,运用了线性变参数模型对水位控制系统进行拟合和多模型建

模,利用线性矩阵不等式方法进行在线优化,获得了较好的鲁棒性能。侯百乐等人<sup>[8]</sup>针对蒸汽发生器系统未知通信故障、多变工况等复杂因素,设计了对未知故障具有较好稳定性和安全性的水位模型预测/数据驱动切换控制方法。孔夏明等人<sup>[9]</sup>以采用直流蒸汽发生器的商船为对象,利用启停蒸汽冷却器参与主蒸汽压力的运行控制,建立了运行仿真模型并进行仿真试验研究。前述研究针对蒸汽发生器进行集中参数建模控制,没有考虑一次侧、金属管壁和二次侧的分布参数特点,模型精度和控制策略的适用性较差。

本研究基于可移动边界理论,建立蒸汽发生器非线性动态模型,分离出蒸汽发生器水位、蒸汽流量和给水流量的对应关系;设计了一阶积分滑模面和滑模控制律,并在此基础上考虑水位测量误差影响,设计了水位自适应估计律;根据李雅普诺夫理论验证系统稳定性,通过仿真测试变工况和负荷扰动下的水位控制效果。

## 1 数学模型建立

蒸汽发生器的作用是将一次侧冷却剂的热量传递给二次侧的给水,其能量转换具有明显的分布参数特点。本研究基于可移动边界理论和质量能量守恒方程<sup>[10-14]</sup>,对蒸汽发生器非线性动态模型进行推导。在蒸汽发生器建模过程中,对其本体进行多个控制体划分,如图 1 所示。

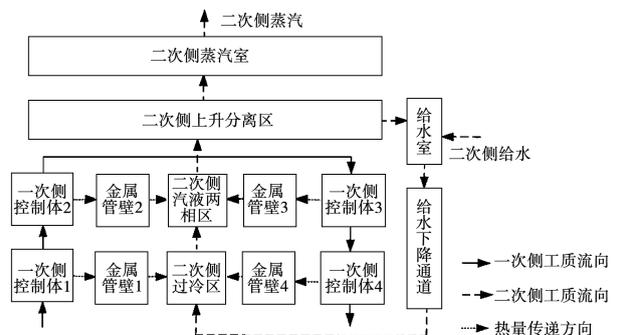


图 1 蒸汽发生器控制体划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steam generator control body division

由图1可知,控制体包括一次侧4个控制体,金属管壁4个控制体以及二次侧上升分离区、给水室、蒸汽室、给水下降通道、过冷区和汽液两相区。

由于蒸汽发生器内部的状态变量很多,其非线性模型可写为如下的矩阵方程:

$$\mathbf{M}(t, u, x) \begin{bmatrix} \dot{x} \\ W_{r1} \\ W_{r2} \end{bmatrix} = F(t, u, x) \quad (1)$$

式中:  $x = [h_{o1}, h_{o2}, h_{o3}, h_{o4}, T_{m1}, T_{m2}, T_{m3}, T_{m4}, L_{dw}, L_{s1}, p_s, x_e, h_{dw}, h_d, p_{o1}, p_{o2}, p_{o3}, p_{o4}, W_{o1}, W_{o2}, W_{o3}, W_{o4}, W_s]^T$ —蒸汽发生器内部的23个状态变量;  $h_{oi}$ —蒸汽发生器一次侧4个控制体的出口比焓,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $T_{mj}$ —金属管壁的温度,  $j = 1, 2, 3, 4$ ;  $L_{dw}$ —蒸汽发生器的实际水位;  $L_{s1}$ —二次侧两相区的长度;  $p_s$ —蒸汽发生器二次侧的压力;  $x_e$ —含气率;  $h_{dw}$ —给水室的比焓;  $h_d$ —下降段的比焓;  $p_{oi}$ —一次侧4个控制体的出口压力;  $W_{oi}$ —一次侧4个控制体的出口流量;  $W_s$ —二次侧循环流量;  $u = [h_p, p_p, W_F, h_F, W_p, W_{sp}]^T$ —列向量,分别为一次侧进口比焓、一次侧进口压力、二次侧给水流量、二次侧给水比焓、一次侧出口流量以及蒸汽流量;  $\mathbf{M}$ —系数矩阵;  $F$ —动态函数,  $W_{r1}$ —进汽水分离器前的流量;  $W_{r2}$ —出汽水分离器后的流量。

蒸汽发生器水位控制系统的目标为控制给水流量与蒸汽流量的动态均衡,并将蒸汽发生器的水位维持在预定的静态水位设定值。蒸汽发生器水位变化的本质在于蒸汽流量与给水流量的不匹配,因此总结蒸汽发生器水位与给水流量、蒸汽流量之间的关系,将蒸汽发生器水位从矩阵方程中分离出来,得到蒸汽发生器的水位变化量  $\dot{L}_{dw}$  与各输入参数间的关系:

$$\begin{aligned} \dot{L}_{dw} = & [A_9 + A_{13} h_F] W_F - A_{16} W_{sp} - A_{13} W_s h_{dw} - \\ & A_9 W_s + A_{20} (W_{o3} - W_{o4}) + A_1 [W_{o1} (h_p - h_{o1}) - Q_{pm1}] + \\ & A_2 [W_{o2} (h_{o1} - h_{o2}) - Q_{pm2}] + A_3 [W_{o3} (h_{o2} - h_{o3}) - Q_{pm3}] \\ & + A_4 [W_{o4} (h_{o3} - h_{o4}) - Q_{pm4}] + A_5 (Q_{pm1} - Q_{ms1}) + A_6 \\ & (Q_{pm2} - Q_{ms2}) + A_7 (Q_{pm3} - Q_{ms3}) + A_8 (Q_{pm4} - Q_{ms4}) + A_{10} \\ & [W_s (h_d - h_F) + Q_{ms1} + Q_{ms4}] + A_{11} [W_s h_F + (Q_{ms2} + \\ & Q_{ms3}) \times 0.001] + A_{14} [W_s h_{dw} - W_s h_d] + A_{15} W_s + A_{17} \cdot \\ & (W_p - W_{o1}) + A_{18} (W_{o1} - W_{o2}) + A_{19} (W_{o2} - W_{o3}) \quad (2) \end{aligned}$$

式中:  $A_k$ —系数矩阵  $\mathbf{M}$  中第9行第  $k$  列的元素,  $k = 1, 2, \dots, 20$ ;  $Q_{pm1}$ —一次侧4个控制体向金属管壁4个控制体传递的热量,  $l = 1, 2, 3, 4$ ;  $Q_{ms1}$ —金属管壁4个控制体向二次侧工质传递的热量,  $\lambda = 1, 2, 3, 4$ 。

上述方程式等号右边前两项为给水流量相关项和蒸汽流量相关项,令:

$$\begin{aligned} d = & -A_{13} W_s h_{dw} - A_9 W_s + A_{20} (W_{o3} - W_{o4}) + A_1 [W_{o1} \cdot \\ & (h_p - h_{o1}) - Q_{pm1}] + A_2 [W_{o2} (h_{o1} - h_{o2}) - Q_{pm2}] + \\ & A_3 [W_{o3} (h_{o2} - h_{o3}) - Q_{pm3}] + A_4 [W_{o4} (h_{o3} - h_{o4}) - Q_{pm4}] + \\ & A_5 (Q_{pm1} - Q_{ms1}) + A_6 (Q_{pm2} - Q_{ms2}) + A_7 (Q_{pm3} - Q_{ms3}) + \\ & A_8 (Q_{pm4} - Q_{ms4}) + A_{10} [W_s (h_d - h_F) + Q_{ms1} + Q_{ms4}] + \\ & A_{11} [W_s h_F + (Q_{ms2} + Q_{ms3}) \times 0.001] + A_{14} [W_s h_{dw} - \\ & W_s h_d] + A_{15} W_s + A_{17} (W_p - W_{o1}) + A_{18} (W_{o1} - W_{o2}) + \\ & A_{19} (W_{o2} - W_{o3}) \quad (3) \end{aligned}$$

$$a = A_9 + A_{13} h_F \quad (4)$$

$$b = A_{16} \quad (5)$$

可得到蒸汽发生器水位与给水流量及蒸汽流量间的关系式:

$$\dot{L}_{dw} = a W_F - b W_{sp} + d \quad (6)$$

## 2 水位自适应滑模控制策略设计

### 2.1 控制原理

通过施加控制作用迫使水位控制系统的运行状态轨迹移动到设计的滑模面上,然后沿此滑模面渐近稳定于预设的平衡点,此时控制系统对满足扰动匹配条件的不确定性不敏感,因此,具备较强的抗扰鲁棒性能。

一般的非线性控制系统的状态空间中存在滑模面函数,即  $S(x) = 0$ 。控制输出指令  $u = u(x)$  按下述逻辑规则在滑模面函数  $S(x) = 0$  上进行切换:

$$u = \begin{cases} u^+, & S(x) \geq 0 \\ u^-, & S(x) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

假定控制系统为单输入非线性系统,如式(6),滑模面函数  $S(x) = 0$  将状态空间分为  $S(x) > 0$  和  $S(x) < 0$  两部分,在滑模面上的运动点有3种情况,如图2所示。

在滑模控制中,点  $A$  属于穿越点,点  $B$  属于发散点,点  $C$  属于吸引点。若在滑模面上某一区域内所有状态点都是  $C$  点,则一旦其他状态点靠近该区域,就会被吸引到“滑动模式”区域内渐近稳定。

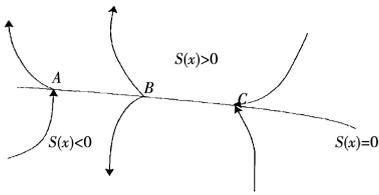


图 2 滑模面上 3 类状态点特性

Fig.2 Characteristic of three types of state points on sliding mode surface

## 2.2 滑模控制策略设计

为降低滑动模态运行过程中泵阀执行机构的动作频率,选取一阶积分滑模面函数,确保蒸汽发生器水位实际值沿滑模面逐渐趋近于零:

$$s = e + c \int edt \quad (8)$$

式中: $s$ —一阶积分滑模面函数; $c$ —设计参数; $e$ —蒸汽发生器水位实际值与设定值间的控制误差,即:

$$e = L_{dw} - L_{dwd} \quad (9)$$

式中: $L_{dwd}$ —蒸汽发生器的预设期望水位值。

选取滑模控制律为:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ns \quad (10)$$

式中: $\varepsilon$ 和 $n$ —控制参数。

控制计算过程中滑模面函数 $s$ 会在滑模面附近频繁振荡,且执行机构控制指令的频繁振荡导致给水调节阀开度频繁变化,损害阀门寿命。因此,采用饱和函数 $\operatorname{sat}$ 替换符号函数 $\operatorname{sgn}$ :

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} 0.5, & s \geq 0.001 \\ 500s, & -0.001 < s < 0.001 \\ -0.5, & s \leq -0.001 \end{cases} \quad (11)$$

由式(5)~式(7)可得,给水流量输出的表达式为:

$$W_F = [\dot{L}_{dwd} - cL_{dw} + cL_{dwd} - \varepsilon \operatorname{sat}(s) - ns + bW_{sp} - d]/a \quad (12)$$

式中: $c=0.01$ , $\varepsilon=0.5$ , $n=0.7$ 。

## 2.3 自适应估计

在实际运行过程中,很难准确测量蒸汽发生器水位信号,尤其是在低功率水平下误差更大,直接采用蒸汽发生器的水位测量值进行控制可能会影响控制效果。因此,对蒸汽发生器的水位进行自适应估计,采用蒸汽流量、给水流量等信号重构出蒸汽发生器的水位信号,本质上属于软测量。

蒸汽发生器的水位测量值和估计值存在估计误差,即:

$$L_{dw} = \hat{L}_{dw} + \tilde{L}_{dw} \quad (13)$$

式中: $\hat{L}_{dw}$ —蒸汽发生器水位的估计值; $\tilde{L}_{dw}$ —蒸汽发生器水位估计值与水位实际值间的偏差。

滑模控制律的输出为给水流量,构造如下滑模控制律:

$$W_F = [\dot{\hat{L}}_{dwd} - c\hat{L}_{dw} - c\tilde{L}_{dw} + c \cdot L_{dwd} - \varepsilon \operatorname{sat}(s) - ns + bW_{sp} - d - k\tilde{L}_{dw}]/a \quad (14)$$

给水流量计算公式中 $\tilde{L}_{dw}$ 未知,为自适应估计误差项,可得:

$$\dot{\tilde{L}}_{dw} = \dot{L}_{dwd} - c\hat{L}_{dw} + cL_{dwd} - (c+k)\tilde{L}_{dw} - \varepsilon \operatorname{sat}(s) - ns \quad (15)$$

要保证蒸汽发生器的水位估计值无限接近于实际值,需保证 $\tilde{L}_{dw}$ 随时间逐渐趋近于零,因此需构造李雅普诺夫稳定函数,其表达式为:

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}\tilde{L}_{dw}^2 \quad (16)$$

李雅普诺夫稳定函数的微分项为:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s[-k\tilde{L}_{dw} - \varepsilon \operatorname{sat}(s) - ns] + \tilde{L}_{dw} \dot{\tilde{L}}_{dw} \\ &= -\varepsilon \operatorname{sat}(s) - ns^2 + (\dot{\tilde{L}}_{dw} - ks)\tilde{L}_{dw} \end{aligned} \quad (17)$$

根据滑模控制理论,存在自适应估计律:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{L}}_{dw} - ks = -m\tilde{L}_{dw} \\ \tilde{L}_{dw} = \int (ks - m\tilde{L}_{dw}) dt \end{cases} \quad (18)$$

其中, $m=0.03$ , $k=0.03$ 。根据李雅普诺夫稳定性理论,最终 $\tilde{L}_{dw}$ 会逐渐趋于零,实现对蒸汽发生器水位的自适应估计。

## 3 仿真测试及分析

蒸汽发生器初始运行于高负荷工况 1,此时相对功率水平为 65%,在 50 s 时降低功率切换为低负荷工况 2,此时相对功率水平为 41%。同时,考虑负荷扰动场景,在 600 s 时负荷扰动功率为 3.75%,在 700 s 时负荷扰动结束。蒸汽发生器水位控制系统动态变工况和抗负荷扰动过程的仿真测试结果如图 3 所示。

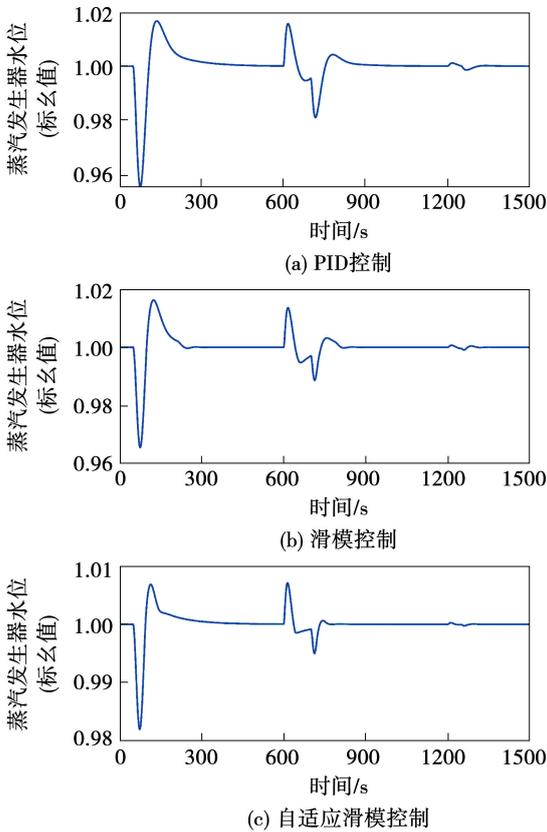


图 3 不同控制策略下的蒸汽发生器水位响应

Fig. 3 Water level responses of steam generator under different control strategies

从工况 1 的 65% 功率水平切换为工况 2 的 41% 功率水平运行时,二次侧蒸汽流量快速下降,蒸汽压力在短时间内上升,部分饱和蒸汽液化,气泡尺寸和数量均下降,导致出现水位下降现象。随后,在水位控制器的作用下回到设定值。可以看出,滑模控制器和自适应滑模控制器的水位最大超调量分别为 3% 和 1.3%,均小于传统三冲量 PID 控制超调量 4.5%。由于自适应滑模控制器需要估计蒸汽发生器的实际水位,因此,调节时间要长于滑模控制器,分别为 243 s 和 200 s,而 PID 控制器的调节时间为 286 s,证明了滑模控制和自适应滑模控制性能均优于传统三冲量 PID 控制。

在工况 1 降功率切换至工况 2 运行后,无论是水位滑模控制策略还是水位自适应滑模控制策略,蒸汽发生器水位的稳态偏差分别为 0.2% 和 0.1%,均小于传统三冲量 PID 控制稳态偏差 0.4%。由于自适应滑模控制策略在线估计蒸汽发生器的真实水位,能够削弱“虚假水位”效应的不利影响,两者均优于三冲量 PID 控制。

在实际过程中,由于流体流动的不稳定性,蒸汽

发生器的水位测量值与水位实际值存在一定偏差,如图 4 所示。通过自适应估计水位信号并将其用于滑模控制,代替蒸汽发生器水位测量信号。可以看到,随运行时间增加,蒸汽发生器的水位估计值与实际值偏差逐渐变小,最终实现无差估计,表明所设计的自适应滑模控制器具备一定的蒸汽发生器水位自适应校正能力,鲁棒性更好。

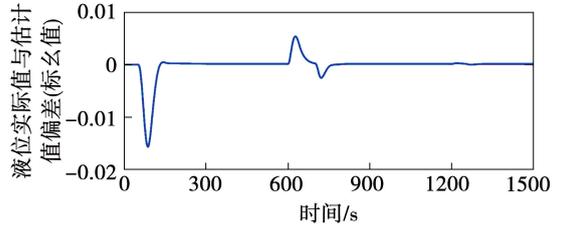


图 4 自适应滑模控制器估计水位与实际水位偏差

Fig. 4 Deviation between estimated and actual water levels of self-adaptive sliding mode controller

蒸汽发生器降功率运行初期,由于逆动力学的“虚假水位”现象,水位控制器误认为蒸汽发生器的给水流量不足,导致给水调节阀的开度指令增大,不同控制策略下给水调节阀开度响应如图 5 所示。

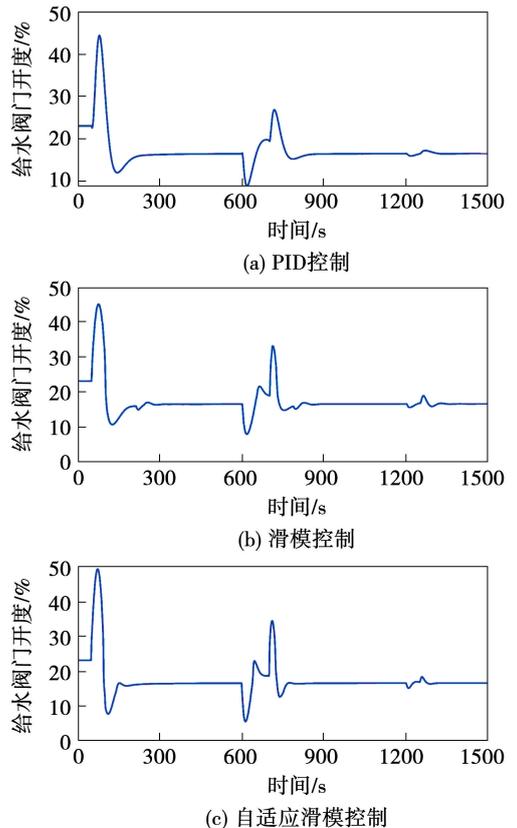


图 5 不同控制策略下给水调节阀开度响应

Fig. 5 Responses of water supply valve opening under different control strategies

由于引进蒸汽流量补偿计算环节,滑模控制器和自适应滑模控制器能够削弱“虚假水位”效应的不利影响,进而快速合理改变给水调节阀开度,最终在滑模控制和自适应滑模控制作用下,给水流量与蒸汽流量维持动态匹配,给水系统达到新的平衡。

给水泵转速的调控目标是维持给水调节阀两端的压差在一定范围内,而给水调节阀两端的压差受阀门开度和给水流量影响,给水阀门和给水流量变化越快,阀门两端压差波动越大,需要给水泵转速更快。不同控制策略下给水泵转速响应如图 6 所示。

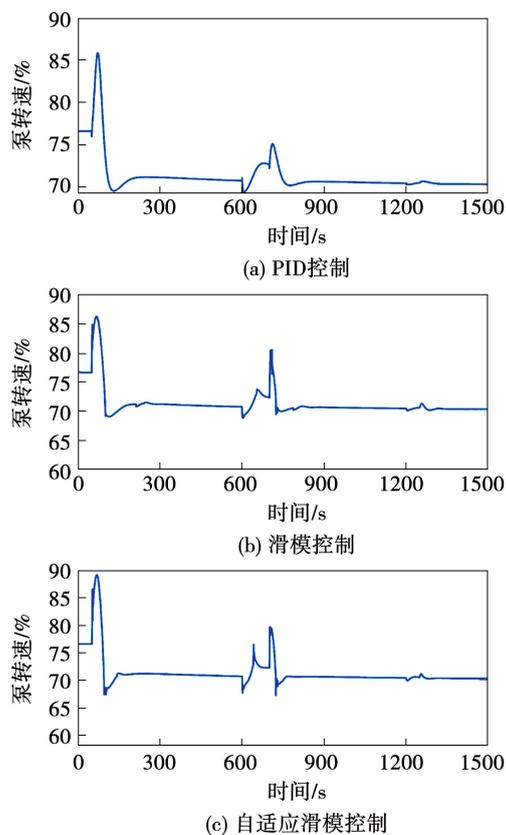


图 6 不同控制策略下给水泵转速响应

Fig. 6 Responses of feed water pump speed under different control strategies

## 4 结 论

(1) 滑模控制和自适应滑模控制的水位最大超调量分别为 3% 和 1.3%, 均小于传统 PID 控制的最大超调量为 4.5%, 同时滑模控制和自适应滑模控制的调节时间分别为 243 s 和 200 s, 均小于传统 PID 控制的调节时间 286 s, 说明所设计的控制策略

具备对运行工况变化的适应能力。

(2) 由于自适应滑模控制能够在线估计蒸汽发生器的真实水位, 因此水位稳态偏差最小, 为 0.1%, 而滑模控制和 PID 控制的水位稳态偏差分别为 0.2% 和 0.4%。

## 参考文献:

- [1] SALEHI A, SAFARZADEH O, KAZEMI M H. Fractional order PID control of steam generator water level for nuclear steam supply systems [J]. Nuclear Engineering and Design, 2019, 342 (2): 45–59.
- [2] 刘洪刚, 朱德宝. AIP 技术发展及其对常规潜艇作战使用的影响 [J]. 四川兵工学报, 2011, 32(9): 27–28.  
LIU Honggang, ZHU Debao. Development of AIP technology and its effects for submarine operation [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2011, 32(9): 27–28.
- [3] 郭丹, 夏虹. 蒸汽发生器水位改进分数阶控制器研究 [J]. 原子能科学技术, 2018, 52(7): 1268–1275.  
GUO Dan, XIA Hong. Study on improved fractional order controller of steam generator water level [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(7): 1268–1275.
- [4] 张汲宇, 夏虹, 彭彬森. 基于深度强化学习的蒸汽发生器水位控制 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(12): 1754–1761.  
ZHANG Jiyu, XIA Hong, PENG Binsen. Water level control of a steam generator based on deep reinforcement learning [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(12): 1754–1761.
- [5] ANSARIFAR G R, DAVILU H, TALEBI H A. Gain scheduled dynamic sliding mode control for nuclear steam generators [J]. Progress in Nuclear Energy, 2011, 53: 651–663.
- [6] ANSARIFAR G R, TALEBI H A, DAVILU H. Adaptive estimator-based dynamic sliding mode control for the water level of nuclear steam generators [J]. Progress in Nuclear Energy, 2012, 56: 61–70.
- [7] HU K, YUAN J. Multi-model predictive control method for nuclear steam generator water level [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49: 1167–1174.
- [8] 侯百乐, 齐义文, 李献领. 通信故障下蒸汽发生器水位 MPC/DDPG 切换控制 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2023, 40(5): 66–74.  
HOU Baile, QI Yiwen, LI Xianling. MPC/DDPG switching control for steam generator water level under communication failures [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2023, 40(5): 66–74.
- [9] 孔夏明, 王苇, 孟海波. 负荷扰动下直流蒸汽发生器蒸汽压力控制仿真 [J]. 舰船科学技术, 2013, 35(2): 68–71.

KONG Xiaming, WANG Wei, MENG Haibo. Simulation research on pressure control of main steam in once through steam generator load disturbance[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(2): 68 - 71.

[10] WAN J S, WU S F, NU E A, et al. Dynamic modeling of AP1000 steam generator for control system design and simulation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, 109: 648 - 657.

[11] 陆念慈. 船用蒸汽发生器动态性能及水位控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.

LU Nianci. Study on dynamic performance and water level control of marine steam generator[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[12] ABLAY G. Robust estimator-based optimal control designs for U-tube steam generators[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2014, 37(5): 636 - 644.

[13] 刘 鹏. 直流蒸汽发生器压力控制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.

LIU Peng. Research on pressure control of the once through steam generator[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.

[14] BEYHAN S, KAVAKLIOGLU K. Comprehensive modeling of U-tube steam generators using extreme learning machines[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015, 62(5): 2245 - 2254.

( 刘 颖 编 辑 )



## 罗尔斯·罗伊斯公司成功完成 F130 发动机测试

2024 年秋季, 罗尔斯·罗伊斯公司开始在印第安纳波利斯对 F130 发动机进行测试, 并在美国国家航空航天局(NASA) 斯坦尼斯航天中心成功完成测试。在 NASA 斯坦尼斯的测试标志着 F130 发动机首次在 B-52 飞机的双吊舱发动机配置上进行测试。测试得到了关键的性能数据, 验证了罗尔斯·罗伊斯公司的分析预测, 包括在侧风条件下的性能, 并进一步降低了将 F130 发动机集成到 B-52J 上的风险。

F130 发动机将使 B-52 飞机的寿命延长 30 年。这种发动机非常耐用, 预计将在飞机的剩余使用寿命中一直留在机翼上。F130 来自罗尔斯·罗伊斯公司 BR 系列商用发动机, 具有超过 3 000 万小时的运行时间和高可靠性。这是一种经过验证的、可靠的发动机, 已经生产了 12 年, 目前有 1 000 多台发动机安装在飞机上。

( 孙嘉忆摘译自 <https://www.rolls-royce.com> )