

DOI: 10.19666/j.rlfed.202501008

自适应容错跟踪控制在单元机组 协调控制中的应用

华山¹, 陈刚¹, 范常浩^{1,2}, 王枢充¹, 刘星辰¹, 康璐¹, 王云峰³

(1. 国能南京电力试验研究有限公司, 江苏 南京 210000;

2. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

3. 东北电力大学自动化工程学院, 吉林 吉林 132012)

[摘要] 现代电力系统中单元机组协调控制面临复杂的动态特性, 同时受到故障及外部扰动的影响。对此, 提出了一种针对故障条件下的单元机组协调容错控制方案。首先, 基于机理分析法推导出单元机组传递函数, 并建立了包含执行器故障的系统数学模型, 以便分析系统的稳定性和动态性能(含瞬态响应)。其次, 结合自适应技术与 H_∞ 控制等理论, 设计了一种基于自适应容错的保性能跟踪控制方法。该方法能够在系统发生故障时自动补偿受损信号, 同时通过性能指标优化进一步提升系统的鲁棒性与容错能力, 满足跟踪精度与动态响应的综合要求。最后, 以300 MW单元机组协调控制系统为例进行仿真验证, 结果表明, 与传统容错控制方法相比, 所提方法在动态跟踪性能、抗干扰能力以及故障恢复能力方面更具优势。该方法为电力系统单元机组的安全稳定运行提供了一种可靠的控制解决方案。

[关键词] 单元机组协调控制; 自适应控制; 容错控制; 执行器故障; 线性矩阵不等式

[引用本文格式] 华山, 陈刚, 范常浩, 等. 自适应容错跟踪控制在单元机组协调控制中的应用[J]. 热力发电, 2025, 54(11): 98-106. HUA Shan, CHEN Gang, FAN Changhao, et al. Application of adaptive fault-tolerant tracking control in unit coordinated control[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(11): 98-106.

Application of adaptive fault-tolerant tracking control in unit coordinated control

HUA Shan¹, CHEN Gang¹, FAN Changhao^{1,2}, WANG Shuchong¹, LIU Xingchen¹,
KANG Lu¹, WANG Yunfeng³

(1. Guoneng Nanjing Electric Power Test & Research Limited Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. School of Automation Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In modern power systems, unit coordinated control faces complex dynamic characteristics and is influenced by faults and external disturbances. To address this challenge, a fault-tolerant control scheme designed for unit coordinated control systems under fault conditions is proposed. Firstly, the transfer function of the unit system is derived using mechanism analysis, and a mathematical model incorporating actuator faults is developed. This model enables the analysis of transient response, stability, and dynamic performance of the system. Secondly, by integrating adaptive techniques with H_∞ control theory, an adaptive fault-tolerant guaranteed-cost tracking control method is designed. This method can automatically compensate for degraded signals when faults occur in the system while further enhancing the robustness and fault tolerance of the system through performance indicator optimization. It satisfies the combined requirements for tracking accuracy and dynamic response. Finally, a simulation is conducted using a 300 MW unit coordinated control system as an example. The results demonstrate that, compared with the conventional fault-tolerant control methods, the proposed approach exhibits superior dynamic tracking performance, disturbance rejection capability, and fault recovery ability. This study provides a reliable control solution for ensuring the safe and stable operation of unit systems in power systems.

收稿日期: 2025-01-21 网络首发日期: 2025-08-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52306004)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52306004)

第一作者简介: 华山(1986), 男, 高级工程师, 主要研究方向为发电厂站热工控制系统, 57692157@qq.com.

通信作者简介: 王云峰(1999), 男, 博士研究生, 主要研究方向为火电厂智能控制、故障检测技术, wyf104718@163.com.

Key words: unit coordinated control; self-adaptive control; fault-tolerant control; actuator failure; linear matrix inequality

随着全球气候变化和环保压力的加剧,中国提出“双碳”战略目标,力争在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和^[1]。这一目标推动了能源电力行业的深刻变革,以风电和光伏为代表的新能源逐渐成为未来发展的主要方向^[2]。

然而,由于新能源本身具有间歇性、波动性和不可控性,在大规模接入电网时会对电力系统的安全性和稳定性造成冲击^[3-4]。为应对新能源波动,火电机组需频繁调整功率输出以维持电网稳定,这对控制系统提出更高要求,尤其是执行器容易因频繁动作发生故障^[5]。因此,设计一种在执行器故障情况下仍能保持系统稳定性和控制精度的自适应容错控制策略,具有重要的实际价值。

单元机组作为火电厂的基本发电单元,由锅炉、汽轮机和发电机组成,其运行状态直接影响电力系统的稳定性和安全性^[6]。单元机组协调控制系统(coordinated control system, CCS)旨在将锅炉与汽轮机视为一个整体进行动态协调控制^[7]。然而,新能源的大规模并网增加了电网的负荷波动与不确定性,导致设备故障及外部扰动的频率和影响范围扩大,给传统的协调控制策略带来了严峻挑战^[8]。尤其是在执行器故障的情况下,传统的控制策略往往无法有效应对,导致系统性能下降甚至失控。因此,单元机组协调控制已成为电力系统领域的重要研究方向。

PID 控制因其易于实现且适应性强,广泛应用于单元机组协调控制^[9]。然而,传统 PID 控制的参数调整依赖经验试凑,难以应对具有大惯性、大延迟等复杂特性的系统。为克服这一局限,出现了多种自整定和优化设计方法,如粒子群算法、遗传算法等^[10-11]。文献[12-13]分别通过对角递归神经网络和模糊自适应方法自动优化并调整 PID 参数,但这些方法在实时应对故障和环境变化方面仍存在不足。

随着科技的不断进步,单元机组协调控制系统得到了更为广泛和深入的发展,先进控制理论与智能控制技术的引入,极大地扩展了 CCS 的应用范围,丰富了性能优化手段^[14-15]。通过将现代控制理论、高级神经网络以及自适应控制等方法与传统控制策略相结合,提升系统的鲁棒性与稳定性^[16-18]。文献[19]构建了基于神经网络的锅炉机组扩展结构逆系统模型,并设计了神经网络拟协调控制方案,

验证其在多方面优于传统 PID 控制。文献[20]提出了一种基于深度神经网络的经济模型预测控制方法,该方法在满足负荷需求的同时,实现了比传统分层模型预测控制更经济的运行效果。然而,神经网络性能高度依赖训练数据的质量和多样性,可能限制其在未知工况下的泛化能力。与数据驱动方法相比,模型驱动方法不依赖大量的历史数据,更适用于复杂的控制场景和未知工况下的应用^[21-22]。

近年来,基于模型的控制方法如模型预测控制、鲁棒控制和自适应控制等,在提升系统稳定性、优化控制性能等方面表现出了显著优势^[23]。文献[24]提出了一种基于线性-二次调节器(H_∞ -LQR)的协调控制方案,改善了大型燃煤锅炉-涡轮单元的负荷适应性。文献[25]探讨了锅炉涡轮系统的动态事件触发跟踪控制问题,提出了一种新的动态事件触发机制,旨在减少控制器更新次数,从而节省资源。

尽管这些方法在提升系统性能和资源优化方面取得了一定进展,但针对单元机组故障的容错控制研究仍较为匮乏。容错控制能够在执行器故障或其他异常情况下,自动调整控制策略,保证系统稳定运行,避免由于故障导致的停机或电力供应中断。随着新能源比例的增加和电力系统运行环境的复杂性提升,火电机组的容错控制技术在实际工程中的应用愈发重要,且具有极大的工程实施意义。

实现单元机组的协调容错控制具体步骤为:首先通过合理建立包含执行器故障条件的单元机组数学模型,以准确描述故障对系统动态的影响;其次,结合 H_∞ 优化与自适应技术,根据 Lyapunov 稳定性理论,推导出相应线性矩阵不等式,并通过 LMI 工具箱求解控制器参数;最后,利用 MATLAB/Simulink 进行仿真实验,证明所提方法的合理性和有效性。

1 单元机组建模与执行器故障描述

图 1 为单元机组结构示意图。单元机组主要可分为炉(燃烧过程)、锅(热传递过程)、机(汽轮机做功过程)三部分。图 1 直观地说明了本文研究的对象——单元机组协调控制系统的基本结构,尤其是执行器(如阀门、燃料调节器等)在系统中的位置。通过对每一过程建立相应的平衡方程,最终联立求解得到整个单元机组的数学模型,系统模型参数见表 1^[26]。

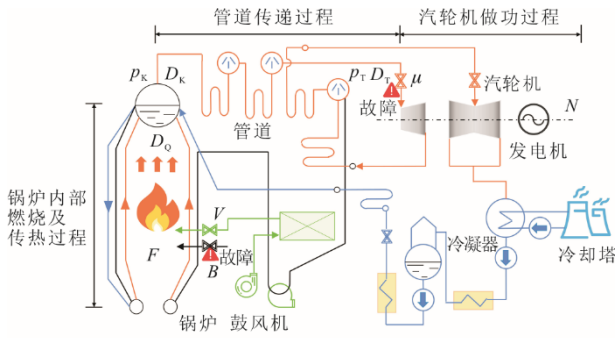


图 1 单元机组结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the unit

表 1 单元机组系统模型参数

Tab.1 Parameters of the unit-unit system model

参数变量	意义
B	进入炉膛燃料量, %
F	炉膛燃烧强度, %
V	进风总量, %
D_Q	锅炉有效总吸热量, %
D_T	进入汽轮机蒸汽总量, %
D_K	进入蒸汽管道蒸汽总量, %
p_T	蒸汽管道出口压力, MPa
p_K	蒸汽管道入口压力, MPa
μ	主蒸汽阀调节开度, %
N	汽轮机输出功率, MW

1) 炉内燃烧与传热过程

该过程是锅炉-汽轮机组中能量转换的核心环节, 主要涉及燃料的燃烧以及由此产生的传热过程, 用具有时延的一阶惯性环节表示为:

$$\Delta F = \frac{k_1 e^{-\tau_1 s}}{T_1 s + 1} \Delta B, \tag{1}$$

$$\Delta D_Q = \frac{1}{T_2 s + 1} \Delta F$$

式中: Δ 为各变量的增量; T_1 和 T_2 分别为炉内燃烧与传热过程的惯性常数; τ_1 为迟延时间。

2) 管道传输过程

根据锅炉的吸热量、进入汽轮机的蒸汽总量及管道出入口的压力, 建立锅炉、调节器和汽轮机之间的能量传递与动态响应模型, 具体计算方程为:

$$\begin{cases} \Delta D_Q - \Delta D_K = c_1 \frac{dp_K}{dt} \\ \Delta D_K - \Delta D_T = c_2 \frac{dp_T}{dt} \\ \Delta D_T = \mu \Delta p_T + p_T \Delta \mu \\ p_K - p_T = K D_K^2 \end{cases} \tag{2}$$

式中: c_1 和 c_2 分别为2个阶段的蓄热系数; K 为蒸汽管及节流阀阻力常数。

3) 汽轮机做功过程

由于系统中存在中间再热器, 根据低压缸与高压缸输出功率, 求得汽轮机做功的传递函数为:

$$N = \frac{(\zeta T_3 s + 1) k_2}{T_3 s + 1} D_T \tag{3}$$

式中: ζ 为高压缸功率在总功率的占比; k_2 为汽轮机增益; T_3 为再热器时间常数。

根据上述方程, 采用机理建模法, 得到系统非线性模型。在固定工作点上进行线性化处理, 得到该工作点附近的小扰动线性模型^[23]。具体数学模型可表示为:

$$\begin{bmatrix} \Delta N \\ \Delta p_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{N\mu} & G_{NB} \\ G_{p\mu} & G_{pB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mu \\ \Delta B \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: $\Delta \mu$ 和 ΔB 分别为主蒸汽阀调节开度和进入炉膛燃料量增量, %; ΔN 为汽轮机输出功率增量, MW; Δp_T 为蒸汽管道出口压力增量, MPa; $G_{N\mu}$ 、 G_{NB} 、 $G_{p\mu}$ 、 G_{pB} 分别为汽轮机输出功率、蒸汽管道出口压力与主蒸汽阀调节开度、炉膛燃料量。

由于这些变量之间的相互作用非常复杂, 传统的传递函数形式较难直接进行系统性能分析与优化。因此, 本文将该系统转化为状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \tag{5}$$

式中: $u(t)=[\Delta \mu \Delta B]^T$ 且 $u(t) \in R_m$, 表示系统控制输入; $y(t)=[\Delta N \Delta p_T]^T$ 且 $y(t) \in R_p$, 表示系统测量输出; $x(t) \in R_n$ 表示系统状态; A 、 B 、 C 、 D 为已知系统矩阵。

在实际运行中, 火电机组的执行器(如主蒸汽阀门、燃料调节器等)可能因长期运行、频繁动作或外部扰动而出现故障。常见的执行器故障包括部分失效、卡死和漂移等。其中, 部分失效是最常见的故障类型, 表现为执行器的输出信号与输入信号之间存在一定的比例关系, 具体表达形式为:

$$\begin{aligned} u_{i,a}(t) &= \eta_i u_i(t), \eta_i \in [\eta_{i,\min}, \eta_{i,\max}] \\ \eta_{i,\max} &\geq 1, 0 < \eta_{i,\min} \leq 1 \end{aligned} \tag{6}$$

式中: $u_{i,a}(t)$ 为执行器故障后的第 i 个控制输入信号; η_i 为未知故障常数; $\eta_{i,\max}$ 、 $\eta_{i,\min}$ 分别为已知上、下限, $i=1, \dots, m$ 。当 $\eta_i=1$ 时系统无执行器故障; 否则, 执行器出现部分失效故障。

包含执行器故障的控制输入 $u_{i,a}(t)$ 与具有执行器故障的系统模型可表示为:

$$u_a(t) = [u_{1,a}(t), \dots, u_{m,a}(t)]^T = \eta u(t) \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B\eta u(t) \\ y(t) = Cx(t) + D\eta u(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\eta = \text{diag}\{\eta_1, \dots, \eta_m\}$ 表示故障矩阵。

2 具有自适应容错的保性能跟踪控制器设计

本文提出的自适应容错控制机制旨在应对火电机组执行器的部分失效故障。当系统出现故障时,控制输入信号会受到影 响,导致控制性能下降。通过自适应容错控制,系统能够在故障初期或部分失效情况下,维持系统的稳定性和控制精度,从而避免系统进入 RB (runback) 状态,减少停机时间和经济损失。自适应容错控制策略通过实时估计执行器的故障参数,并调整控制输入信号,补偿故障影响,从而维持系统的稳定性和控制精度。

自适应容错控制机制的工作原理如下:

故障检测与估计 通过在线估计执行器的故障参数 η_i , 实时检测执行器的故障状态。

控制输入补偿 根据估计的故障参数,调整控制输入信号 $u(t)$, 补偿故障影响。

系统稳定性保证 基于 Lyapunov 稳定性理论,设计自适应控制律,确保系统在故障情况下仍能保持稳定。当故障发生时自动调整控制策略,维持系统的稳定性。

所设计的控制器须满足无论故障条件是否存在闭环系统都能保持稳定,并且系统输出信号 $y(t)$ 能准确跟踪参考信号 $y_r(t)$ 且无稳态误差,定义系统跟踪误差 $\delta(t)$, 为了有效消除稳态误差引入跟踪误差积分项 $\zeta(t)$:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \delta(t) = 0, \delta(t) = y_r(t) - y(t) \quad (9)$$

$$\zeta(t) = \int_0^t \delta(\tau) d\tau \quad (10)$$

结合式(8)一式(10),得到如下增广系统:

$$\dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{B}\eta u(t) + H y_r(t) \quad (11)$$

增广系统的状态向量与系统矩阵可表示为:

$$\bar{x}(t) = \begin{bmatrix} \zeta(t) \\ x(t) \end{bmatrix}, \bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & -C \\ 0 & A \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} -D \\ B \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}.$$

在理论推导过程中,做如下条件假设:

假设 1 系统中各部件具有线性动态特性,系统参数在分析过程中保持恒定,系统的动力学是基于线性化的传递函数模型。

假设 2 执行器故障模型假设故障仅发生在执

行器的输出端,不考虑系统内部其他非线性故障。

2.1 容错-保性能跟踪控制器设计

根据正常情况下的增广系统(11),即在 $\eta=I$ 情况下,定义二次型性能指标 $J(t)$:

$$J(t) = \int_0^t [\bar{x}^T(t) Q \bar{x}(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (12)$$

式中: $Q = \text{diag}\{Q_\zeta, Q_x\}$, $Q_\zeta \in R_{p \times p}$, $Q_x \in R_{n \times n}$, $R \in R_{m \times m}$ 均为对称正定矩阵。

式(12)表示跟踪误差积分项、系统状态、系统输入的加权,通过最小化性能指标 $J(t)$,使得存在一个控制输入 $u(t)$ 可以确保控制系统能实现精准跟踪,又能有效控制输入的大小,减少能量消耗,从而达到优化系统的目的。

设计状态反馈跟踪控制器:

$$u_n(t) = K_n \bar{x}(t) = [K_\zeta, K_x] \begin{bmatrix} \zeta(t) \\ x(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

则正常系统(11)的闭环系统为:

$$\dot{\bar{x}}(t) = (\bar{A} + \bar{B} K_n) \bar{x}(t) + H y_r(t) \quad (14)$$

定理 1 对于给定的正常数 γ 、正定矩阵 Q_ζ 、 Q_x 、 R , 如果存在对称矩阵 M 、 $W \in R_{(n+l) \times (n+l)}$ 和矩阵 $Z \in R_{m \times (n+l)}$, 使得如下线性矩阵不等式成立。

$$\begin{bmatrix} \Xi_{11} & \Xi_{12} & \Xi_{13} & \Xi_{14} \\ * & \Xi_{22} & \Xi_{23} & \Xi_{24} \\ * & * & \Xi_{33} & \Xi_{34} \\ * & * & * & \Xi_{44} \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} W & I \\ I & M \end{bmatrix} > 0 \quad (16)$$

式中: $\Xi_{11} = \bar{A}M + \bar{B}Z + (\bar{A}M + \bar{B}Z)^T$, $\Xi_{12} = H$,

$\Xi_{13} = Z^T R^{\frac{1}{2}}$, $\Xi_{14} = M^T Q^{\frac{1}{2}}$, $\Xi_{22} = -\gamma^2 I$, $\Xi_{33} = \Xi_{44} = I$, 其余皆为 0 矩阵; * 表示对称位置的转置矩阵。

则存在控制器

$$u_n(t) = K_n \bar{x}(t), K_n = ZM^{-1} \quad (17)$$

使得系统(式(11))渐进稳定,且性能指标(式(12))的上界为:

$$J(t) \leq \gamma^2 \int_0^t y_r^T(t) y_r(t) dt + \bar{x}^T(0) W \bar{x}(0) \quad (18)$$

因此性能指标 $J(t)$ 的上界可以通过如下方法获得 $\min \text{trace}(W)$, s.t. 式(15)。

证明: 由性能指标(式(12))定义系统被调输出

$$z(t) = [Q^{1/2}, 0]^T \bar{x}(t) + [0, R^{1/2}]^T u(t) \quad (19)$$

根据闭环增广系统(式(14)),将跟踪参考信号 $y_r(t)$ 视为系统外部输入,从 $y_r(t)$ 到 $z(t)$ 的传递函数矩

阵 $T_{\infty}(s)$ 的 H_{∞} 范数不超过给定 γ , 即:

$$\int_0^{\infty} z^T(t)z(t)dt \leq \gamma^2 \int_0^{\infty} y_r^T(t)y_r(t)dt \quad (20)$$

进而可以得到:

$$\int_0^{\infty} \bar{x}^T(t)Q\bar{x}(t) + u^T(t)Ru(t) - \gamma^2 y_r^T(t)y_r(t)dt \leq 0$$

选取闭环系统(14)的 Lyapunov 函数为:

$$\bar{V}(t) = \bar{x}^T(t)\bar{P}\bar{x}(t) \quad (21)$$

式中: $\bar{P} = M^{-1}$ 为对称正定矩阵。

则 \bar{V} 关于时间 t 的导数为:

$$\dot{\bar{V}} = \bar{x}^T(t) \left[(\bar{A} + \bar{B}K_n)^T P + P(\bar{A} + \bar{B}K_n) \right] \bar{x}(t) + 2\bar{x}^T(t)PHy_r(t) \quad (22)$$

根据 Lyapunov 稳定性定理, 当控制器 $u_n(t) = K_n \bar{x}(t)$ 可以使得 $\bar{V}(t) > 0$, $\dot{\bar{V}}(t) < 0$, 则闭环增广系统(式(14))渐近稳定, 因此综合式(20)与式(22)可得:

$$\int_0^{\infty} \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ y_r(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{21} \\ * & \Psi_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(t) \\ y_r(t) \end{bmatrix} dt < 0 \quad (23)$$

式中: $\Psi_{11} = (\bar{A} + \bar{B}K_n)^T P + P(\bar{A} + \bar{B}K_n) + Q + K_n^T R K_n$, $\Psi_{12} = PH$, $\Psi_{22} = -\gamma^2 I$ 。

根据矩阵初等变换, 方程两边同时乘 \bar{P}^{-1} , 运用 Schur 补定理^[27], 式(15)得证。

根据式(23)可以得到:

$$\begin{aligned} & (\bar{A} + \bar{B}K_n)^T P + P(\bar{A} + \bar{B}K_n) + Q + \\ & K_n^T R K_n + \frac{1}{\gamma^2} P H H^T P < 0 \end{aligned} \quad (24)$$

因此可得性能指标 $J(t)$ 满足:

$$\begin{aligned} J(t) & \leq -\int_0^t \bar{x}^T \left\{ (\bar{A} + \bar{B}K_n)^T P + P(\bar{A} + \bar{B}K_n) + \right. \\ & \left. \frac{1}{\gamma^2} P H H^T P \right\} \bar{x}(t) dt = -\int_0^t \left[\dot{\bar{x}}(t) - H y_r(t) \right]^T \cdot \\ & P \bar{x}(t) + \bar{x}^T(t) P \left[\dot{\bar{x}}(t) - H y_r(t) \right] + \\ & \frac{1}{\gamma^2} \bar{x}^T P H H^T P \bar{x} \Big\} dt \leq -\int_0^t d \left[\bar{x}^T(t) P \bar{x}(t) \right] + \\ & \gamma^2 \int_0^t y_r^T(t) y_r(t) dt \leq \gamma^2 \int_0^t y_r^T(t) y_r(t) dt + \\ & \bar{x}^T(0) P \bar{x}(0) \leq \gamma^2 \int_0^t y_r^T(t) y_r(t) dt + \bar{x}^T(0) W \bar{x}(0) \end{aligned} \quad (25)$$

证毕。

2.2 自适应容错-保性能跟踪控制器设计

设计自适应容错控制器的目的是在系统发生故障时, 能够调整控制输入, 确保系统的稳定性并维持其性能。主要思想是基于正常系统控制器 $u_n(t)$

引入自适应控制律 $u_A(t)$ 补偿故障对系统的影响。

$$u(t) = u_n(t) + u_A(t) \quad (26)$$

当系统无故障情况下, 自适应控制率 $u_A(t)$ 为 0。当存在执行器故障时, 自适应控制率 $u_A(t)$ 自动修正控制输入, 补偿故障影响。自适应容错跟踪控制的结构如图 2 所示。

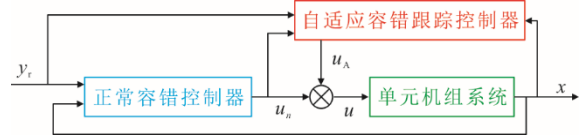


图 2 自适应容错跟踪控制的结构示意图
Fig.2 Schematic structure of the adaptive fault-tolerant tracking control

为了估计执行器的故障, 引入如下模型:

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) & = A\hat{x}(t) + B\hat{\eta}(t)r(t) \\ \hat{y}(t) & = C\hat{x}(t) + D\hat{\eta}(t)r(t) \end{aligned} \quad (27)$$

式中: $\hat{\eta}(t)$ 为未知执行器故障矩阵的在线估计; $r(t)$ 为参考输入, 由所要达到的控制目标决定。

为了方便分析和设计控制器, 将系统(式(27))进行增广:

$$\tilde{x}(t) = \bar{A}\tilde{x}(t) + \bar{B}\hat{\eta}(t)r(t) + H y_r(t) \quad (28)$$

式中: $\tilde{x}(t) = [\hat{\eta}^T(t), \hat{x}^T(t)]^T$, $\hat{\delta}(\tau) = y_r(t) - \hat{y}(t)$, $\hat{\eta} = \int_0^t \hat{\delta}(\tau) d\tau$, \bar{A} 、 \bar{B} 、 \bar{C} 、 H 与系统(式(11))中相同。

定义增广系统的状态误差向量为:

$$e(t) = \tilde{x}(t) - \bar{x}(t) \quad (29)$$

与此同时, 令控制输入 $u(t) = r(t) - F e(t)$, 则误差系统的状态方程为:

$$\dot{e}(t) = (\bar{A} + \bar{B}\eta F) e(t) + \bar{B}\tilde{\eta}(t)r(t) \quad (30)$$

式中: F 为待设计的误差增益矩阵, 目的是使误差系统(式(30))稳定; $\tilde{\eta}(t) = \text{diag}\{\tilde{\eta}_1(t) \cdots \tilde{\eta}_m(t)\}$, $\tilde{\eta}(t) = \tilde{\eta}(t) - \eta$ 。

令 $\bar{B} = \text{row}(\bar{b}_1 \cdots \bar{b}_m)$, $r(t) = \text{col}(r_1(t) \cdots r_m(t))$, 则式(30)可以表示为:

$$\dot{e}(t) = (\bar{A} + \bar{B}\eta F) e(t) + \sum_{i=1}^m \bar{b}_i \tilde{\eta}_i r_i(t) \quad (31)$$

定理 2 对于误差系统(式(31)), 若存在对称矩阵 C 和矩阵 $Z_1 > 0 \in R_{m \times (n+l)}$, 使得所有故障矩阵 η 满足以下线性矩阵不等式:

$$\bar{A}M_1 + M_1\bar{A}^T + \bar{B}\eta Z_1 + Z_1^T \eta \bar{B}^T < 0 \quad (32)$$

并且自适应律 $\hat{\eta}_i$ 在线调节为:

$$\dot{\hat{\eta}}_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{若 } \hat{\eta}_i = \hat{\eta}_{i\min}, -\rho_i e^T(t) P \bar{b}_i r_i \leq 0 \\ 0, & \text{若 } \hat{\eta}_i = \hat{\eta}_{i\max}, -\rho_i e^T(t) P \bar{b}_i r_i \geq 0 \\ -\rho_i e^T(t) P \bar{b}_i r_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (33)$$

其中 $\rho_i > 0$ 为自适应律增益。

则误差系统 (式(31)) 稳定, 误差反馈增益 $F = Z_1 M_1^{-1}$ 。

证明: 选取 Lyapunov 函数

$$V = e^T(t) P e(t) + \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\eta}_i^2(t)}{\rho_i} \quad (34)$$

式中: $P = M_1^{-1}$ 。

V 关于时间 t 导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V} = e^T(t) & \left[(\bar{A} + \bar{B}\eta F)^T P + P(\bar{A} + \bar{B}\eta F) \right] \cdot \\ & e(t) + 2 \sum_{i=1}^m \tilde{\eta}_i e^T(t) P \bar{b}_{i r_i} + 2 \sum_{i=1}^m \frac{\tilde{\eta}_i \dot{\tilde{\eta}}_i}{\rho_i} \end{aligned} \quad (35)$$

式中: $\tilde{\eta}_i$ 为未知常数, 即 $\dot{\tilde{\eta}}_i(t) = \dot{\hat{\eta}}_i(t)$, 因此当自适应律符合式(33), 则:

$$\frac{\tilde{\eta}_i \dot{\tilde{\eta}}_i}{\rho_i} = \frac{\tilde{\eta}_i \dot{\hat{\eta}}_i}{\rho_i} \leq -\tilde{\eta}_i e^T(t) P \bar{b}_{i r_i} \quad (36)$$

即:

$$\dot{V} \leq e^T(t) \left[(\bar{A} + \bar{B}\eta F)^T P + P(\bar{A} + \bar{B}\eta F) \right] e(t) \quad (37)$$

根据 Lyapunov 稳定性定理可得如下不等式:

$$(\bar{A} + \bar{B}\eta F)^T P + P(\bar{A} + \bar{B}\eta F) < 0 \quad (38)$$

选取 $F = Z_1 M_1^{-1}, Z_1 = P^{-1}$, 经过矩阵变换式(31)得证。误差 $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$, 即 $\tilde{x}(\infty) = \bar{x}(\infty) = \bar{x}_n(\infty)$, $\bar{x}_n(\infty)$ 为常状态下的增广系统状态, 故含有故障系统的状态向量, 能稳定地跟踪正常系统的状态向量。

证毕。

通过设计参考输入 $r(t)$ 使得增广系统 (式(28)) 与正常闭环增广系统 (式(14)) 相匹配。令 $r(t) = \hat{\eta}^{-1}(t) K_n \tilde{x}(t)$, 则式(28)表示为:

$$\dot{\tilde{x}}(t) = (\bar{A} + \bar{B}K_n) \tilde{x}(t) + H y_r(t) \quad (39)$$

此时自适应容错控制律表示为:

$$\begin{aligned} u(t) = u_n(t) + u_A(t) & = r(t) - F e(t) \\ & = \hat{\eta}^{-1}(t) K_n \tilde{x}(t) - F e(t) \end{aligned} \quad (40)$$

因为正常容错控制律 $u_n(t) = K_n \bar{x}(t)$, 故自适应

控制律 $u_A(t)$ 可表示为:

$$u_A(t) = \hat{\eta}^{-1}(t) (I - \hat{\eta}(t)) K_n \tilde{x}(t) + (K_n - F) e(t) \quad (41)$$

初始状态定义为 $e(0)=0, \hat{\eta}_i(0)=1$, 则无故障情况下 $\hat{\eta}_i(t)=1$ 。此时, $u_A(t)=0$, 故 $u(t)=u_n(t)$, 即在系统正常时可以达到最优跟踪性能。当出现执行器故障时 \tilde{x} 与 \bar{x} 出现偏差, 此时新的自适应控制律 $u_A(t)$ 将自动补偿故障所造成的控制影响, 从而跟踪上正常系统运行状态。

3 仿真算例

3.1 系统参数设置

为了验证所提出控制方法的有效性与实用性, 本文选取火电厂 300 MW 单元机组协调控制系统作为仿真对象。基于文献[26]在 100% 负荷的工作点上对系统进行线性化处理。定义主蒸汽阀调节开度 $\Delta\mu$ 、进入炉膛燃料量 ΔB 为系统输入, 汽轮机输出功率 ΔN 、蒸汽管道出口压力 Δp_T 为系统输出, 各传递函数为:

$$\begin{aligned} G_{N\mu} &= \frac{4.665s(1+99s)}{(582s^2+50s+1)(4.1s+1)} \\ G_{NB} &= \frac{2.069(1+311s)}{(1+149s)^2(1+22.4s)} \\ G_{P\mu} &= -0.139 \left(0.04 + \frac{0.96}{1+70s} \right) \\ G_{PB} &= \frac{0.124(1+205s)}{(1+128s)^2(1+11.7s)} \end{aligned} \quad (42)$$

将式(42)转化为状态空间表达式展开研究, 仿真所需相关参数如下:

定义优化权重矩阵 $Q_\xi = 1.0 \times 10^{-5} \text{diag}\{0.1, 1.0\}$, $Q_x = 1.0 \times 10^{-4} \times \text{diag}\{0.10, 0.20, 0.10, 0.03, 0.80, 0.70, 0.10, 0.10, 0.20, 0.10\}$, $R = 1.0 \times 10^{-4} \times \text{diag}\{1, 1\}$, H_∞ 性能指标 $\gamma = 2$ 。

由定理 1 的线性矩阵不等式求解正常情况下控制器矩阵增益为:

$$K_n = \begin{bmatrix} 0.739 6 & -0.970 6 & -0.849 2 & -1.172 0 & -0.636 4 & -2.873 7 \\ 0.973 6 & 0.707 7 & -0.109 4 & 2.720 7 & 0.806 1 & 2.172 2 \\ -0.304 9 & -0.581 5 & -0.221 0 & 1.173 0 & 4.147 9 & 1.099 3 \\ -2.033 9 & -5.589 0 & -2.330 8 & -1.074 7 & -3.254 9 & -0.886 4 \end{bmatrix} \quad (43)$$

由定理 2 的线性矩阵不等式求解误差反馈增益为:

$$F = \begin{bmatrix} 12.179\ 6 & -5.660\ 5 & -8.314\ 9 & -7.314\ 9 & -4.128\ 9 & -14.861\ 2 \\ 4.476\ 6 & 4.163\ 2 & -0.145\ 5 & 13.635\ 9 & 4.902\ 3 & 11.832\ 8 \\ -2.138\ 2 & -4.975\ 0 & -1.948\ 9 & 5.382\ 8 & 20.589\ 7 & 5.925\ 1 \\ -9.223\ 8 & -20.909\ 5 & -8.554\ 3 & -5.774\ 7 & -17.470\ 2 & -4.854\ 2 \end{bmatrix} \quad (44)$$

3.2 仿真实验结果

为了更好地评估所设计控制策略的有效性,对 300 MW 单元机组协调控制系统在 0 输入条件下的输出响应进行分析,仿真结果如图 3 所示。由图 3 可见,系统在无外部干扰情况下,在 1 000 s 左右系统输出将全部趋于 0,达到稳定状态。

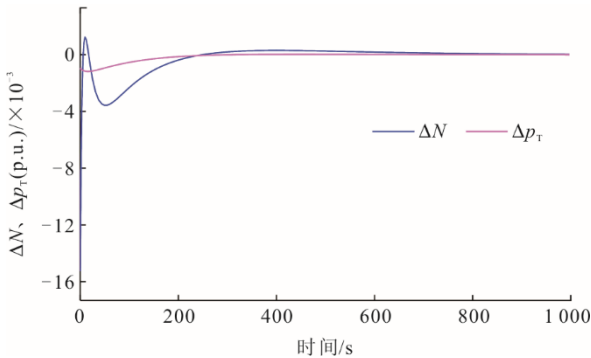


图 3 0 输入条件下系统输出响应曲线

Fig.3 The output response curves of the system under zero-input condition

图 4 与图 5 分别展示了 $\Delta p_T=1$ 、 $\Delta N=0$ 和 $\Delta p_T=0$ 、 $\Delta N=1$ 自适应容错控制与传统容错控制方法的跟踪效果对比,图 6 和图 7 分别展示了 $\Delta p_T=1$ 、 $\Delta N=0$ 和 $\Delta p_T=0$ 、 $\Delta N=1$ 自适应容错控制器输出与传统容错控制器输出曲线。2 种情况在 400 s 时向系统添加执行器故障。由图 4—图 7 可见,相较于 0 输入情况,系统在控制器作用下可以快速且稳定跟踪上设定的目标参考值,且 Δp_T 响应速度低于 ΔN 的响应速度。

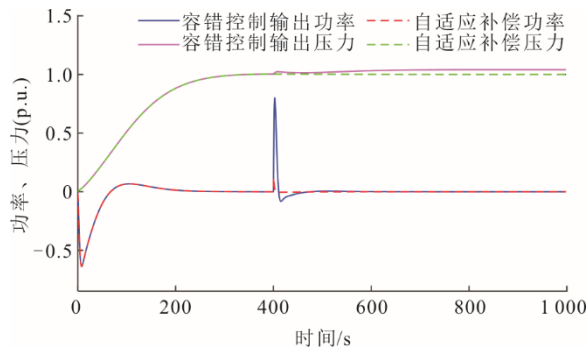


图 4 参考信号 $\Delta p_T=1$ 、 $\Delta N=0$ 时自适应容错控制与传统容错控制方法的跟踪效果对比

Fig.4 Comparison of tracking performance between the adaptive fault-tolerant control and the conventional fault-tolerant control methods with reference signals $\Delta p_T=1$ and $\Delta N=0$

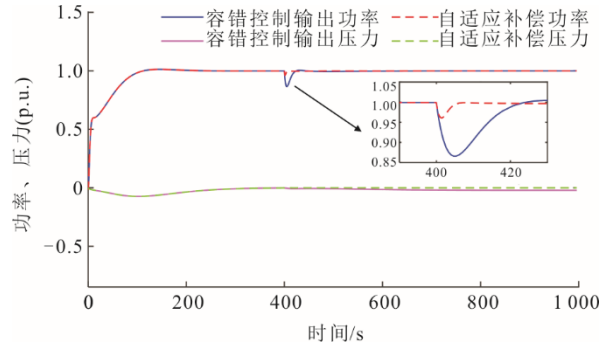


图 5 参考信号 $\Delta p_T=0$ 、 $\Delta N=1$ 时自适应容错控制与传统容错控制方法的跟踪效果对比

Fig.5 Comparison of tracking performance between the adaptive fault-tolerant control and the conventional fault-tolerant control methods with reference signals $\Delta p_T=0$ and $\Delta N=1$

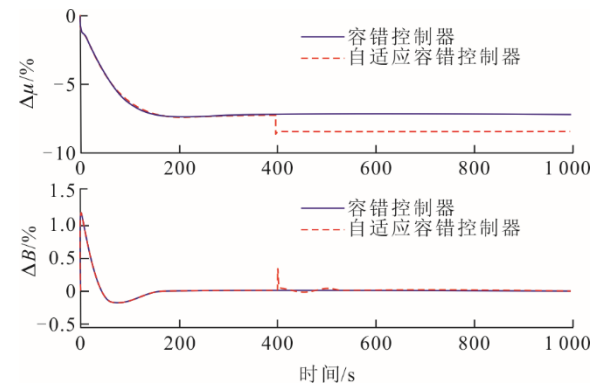


图 6 参考信号 $\Delta p_T=1$ 、 $\Delta N=0$ 时自适应容错控制器输出与传统容错控制器输出曲线

Fig.6 Output curves of the adaptive fault-tolerant controller and the conventional fault-tolerant controller with reference signal $\Delta p_T=1$ and $\Delta N=0$

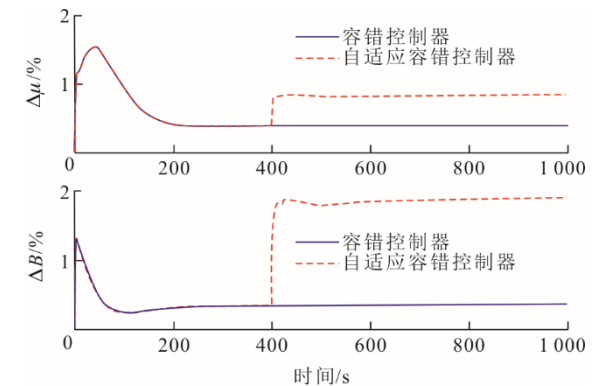


图 7 参考信号 $\Delta p_T=0$ 、 $\Delta N=1$ 时自适应容错控制器输出与传统容错控制器输出曲线

Fig.7 Output curves of the adaptive fault-tolerant controller and the conventional fault-tolerant controller with reference signal $\Delta p_T=0$ and $\Delta N=1$

通过对比传统容错控制与自适应容错控制的响应输出可以得到,图 4 中添加自适应律的容错控制在输出功率 ΔN 恢复稳定时间和超调量方面表现出更优的性能。具体而言,恢复稳定时间缩短了 68.304 s,超调量降低了 68.2%,自适应容错控制出口压力 Δp_T 跟踪误差比传统容错控制的低 0.04。同样地,图 5 中添加自适应律的容错控制比常规容错控制输出功率 ΔN 恢复稳定时间缩短 27.832 s,超调量降低 10.8%,出口压力 Δp_T 跟踪误差比传统容错的低 0.02。

4 结 语

本文主要研究了包含执行器故障的火电机组协调控制问题,由于单元机组故障的容错控制研究较为匮乏,本文采用一种基于自适应容错的保性能跟踪控制方法。通过仿真对比实验,结果表明,所提方法在面对执行器故障或具有变换负荷及压力需求时,相较于传统容错控制具有更优越的跟踪性能和较强鲁棒性。本文所提出的控制策略和设计方案,可为火电厂单元机组协调控制系统的理论应用,为实际工业应用提供了坚实的理论基础。

【参 考 文 献】

- [1] 魏泓屹,卓振宇,张宁. 中国电力系统碳达峰·碳中和转型路径优化与影响因素分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 1-12.
WEI Hongyi, ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning. Transition path optimization and influencing factor analysis of carbon emission peak and carbon neutrality for power system of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 1-12.
- [2] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.
- [3] 李玲,刘鑫屏. 新能源大规模并网条件下火电机组深度调峰控制策略优化[J]. 中国电力, 2020, 53(1): 155-161.
LI Ling, LIU Xinping. Control strategy optimization for thermal power unit adapted to deep peak shaving for large-scale new energy source integration[J]. Electric Power, 2020, 53(1): 155-161.
- [4] YIN S, ZHANG S, ANDREWS-SPEED P, et al. Economic and environmental effects of peak regulation using coal-fired power for the priority dispatch of wind power in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 361-370.
- [5] 洪烽,梁璐,逢亚蕾,等. 基于自适应协同下垂的飞轮储能联合火电机组一次调频控制策略[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 36-44.
HONG Feng, LIANG Lu, PANG Yalei, et al. Primary frequency regulation of flywheel energy storage combined thermal power unit based on adaptive coordinated droop control[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 36-44.
- [6] 袁桂丽,陆斯悦,房方. 单元机组协调控制系统综合性能评价[J]. 动力工程学报, 2017, 37(11): 895-902.
YUAN Guili, LU Siyue, FANG Fang. Comprehensive performance assessment on coordinated control system of thermal power units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(11): 895-902.
- [7] 王东风,韩璞,曾德良. 单元机组协调控制系统发展和现状[J]. 中国电力, 2002, 35(11): 69-73.
WANG Dongfeng, HAN Pu, ZENG Deliang. Development and present status of unit coordinated control system[J]. Electric Power, 2002, 35(11): 69-73.
- [8] 张建华,史运涛,侯国莲,等. 燃煤电厂协调控制系统故障诊断与容错控制应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 178-182.
ZHANG Jianhua, SHI Yuntao, HOU Guolian, et al. Research on fault diagnosis and fault tolerant control of the coordinate control system in coal-fired power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 178-182.
- [9] 宣丽萍. 单元机组协调控制系统控制策略研究[J]. 控制工程, 2010, 17(3): 283-285.
XUAN Liping. On control strategy for coordinated control system of generating unit[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(3): 283-285.
- [10] 孙超,郭乃宇,严明蝶,等. 改进自适应粒子群算法的 PID 参数优化[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(5): 377-382.
SUN Chao, GUO Naiyu, YAN Mingdie, et al. PID parameter optimization based on improved adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(5): 377-382.
- [11] LI J, LI W. On-line PID parameters optimization control for wind power generation system based on genetic algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 137094-137100.
- [12] 孙灵芳,任栋,张玉恒,等. 改进 DRNN 在单元机组协调控制系统参数整定中应用[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 106-109.
SUN Lingfang, REN Dong, ZHANG Yuheng, et al. Application of modified DRNN algorithm in parameter adjusting of coordinated control system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 106-109.
- [13] 王爱军,张磊洋,邢宝钦,等. 单元机组协调控制系统模糊自适应控制研究[J]. 汽轮机技术, 2013, 55(1): 21-24.
WANG Aijun, ZHANG Leiyang, XING Baoqin, et al. Research on coordinated control system of power unit based on self-adaptive fuzzy control[J]. Turbine Technology, 2013, 55(1): 21-24.
- [14] 张晓宇,王天伟,李燕,等. 火电机组燃烧系统智能综合优化控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2544-2553.
ZHANG Xiaoyu, WANG Tianwei, LI Yan, et al. Study of intelligent integrated optimization control of thermal power unit combustion system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2544-2553.
- [15] WEI Q, LU J, ZHOU T, et al. Event-triggered near-optimal control of discrete-time constrained nonlinear systems with application to a boiler-turbine system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18(6): 3926-3935.

- [16] SCHMIDHUBER J. Deep learning in neural networks: an overview[J]. *Neural Networks*, 2015, 61: 85-117.
- [17] 刘吉臻, 王庆华, 张效宁, 等. 支撑我国能源转型的灵活燃煤发电新技术: 燃煤耦合储能系统及智能控制系统[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(17): 6855-6883.
LIU Jizhen, WANG Qinghua, ZHANG Xiaoning, et al. Novel technologies of flexible coal-fired power generation to support China energy transition: coal-fired coupled energy storage system and smart control system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(17): 6855-6883.
- [18] 于红霞. 单元机组协调系统非线性控制策略研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019: 1.
YU Hongxia. Nonlinear control strategy research for unit coordinate systems[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019: 1.
- [19] MA L, LEE K Y, WANG Z. Intelligent coordinated controller design for a 600 MW supercritical boiler unit based on expanded-structure neural network inverse models[J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 53: 194-201.
- [20] CUI J, CHAI T, LIU X. Deep-neural-network-based economic model predictive control for ultrasupercritical power plant[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(9): 5905-5913.
- [21] 韩忠旭, 黄焕袍, 张智, 等. 基于状态观测器的状态反馈控制在 300 MW 单元机组协调控制系统中的应用[J]. *中国电力*, 2004, 37(4): 60-65.
HAN Zhongxu, HUANG Huanpao, ZHANG Zhi, et al. Application of state feedback based on state observer in the coordinated control system of 300 MW unit[J]. *Electric Power*, 2004, 37(4): 60-65.
- [22] 席嫣娜, 王印松. 一种基于自适应反演算法的火电单元机组协调控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(7): 2070-2081.
XI Yanna, WANG Yinsong. A coordinated control strategy for thermal power generation units based on the adaptive backstepping method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(7): 2070-2081.
- [23] 刘桂莲, 张新昌, 张长庚, 等. 单元机组协调系统的模型预测控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(10): 41-45.
LIU Guilian, ZHANG Xinchang, ZHANG Changeng, et al. Model predictive coordination control system for power unit[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(10): 41-45.
- [24] WEI L, FANG F. H_{∞} -LQR-based coordinated control for large coal-fired boiler-turbine generation units[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 64(6): 5212-5221.
- [25] ZHANG J, YANG D, ZHANG H, et al. Dynamic event-based tracking control of boiler turbine systems with guaranteed performance[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, 21(3): 4272-4282.
- [26] 刘吉臻. 协调控制与给水全程控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 1.
LIU Jizhen. Coordinated control and full-process feedwater control[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995: 1.
- [27] 俞立. 鲁棒控制: 线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 1.
YU Li. Robust control: linear matrix inequality method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 1.

(责任编辑 杜亚勤)