DOI: 10.19666/j.rlfd.202512053

适用于高速率变负荷的事件驱动协调控制系统

邓拓宇[1,2]，赵保森[1]
（1. 华北电力大学自动化系，河北 保定 071003；
2. 新能源电力系统全国重点实验室（华北电力大学），北京 102206）

［摘 要］【目的】“新一代煤电升级改造专项行动”对火电机组变负荷速率提出更高要求，使得机组响应的快速性与自身的安全稳定性间的矛盾愈发突出。从传统控制理论来看，锅炉侧对象具有大惯性、大迟延特性，要求全程稳定，则必然牺牲响应速度；若要缩短调节时间，将带来燃料量的大幅度振荡。即基于传统稳定性设计的系统难以调和稳定性与快速性之间的根本矛盾。为此，引入一种有限时间稳定性，允许动态过程存在短暂失稳，以提升快速性，同时确保系统在指定时间内收敛至稳定状态。有限时间稳定性大大降低了传统稳定性分析方法的保守性，留有更多宽裕度用于提升系统响应速度。【方法】在此理论基础上，提出一种适应高速率变负荷的事件驱动协调控制方法。首先，推导出含有自动发电控制（automatic generation control，AGC）指令扰动和压力定值扰动的协调控制系统状态空间模型；其次，在原等效模型为下层的基础上设计一种事件驱动的双层协调控制系统结构，上层负责事件驱动系统的决策；最后，在有限稳定性裕度内采用鲁棒设计方法得到基于切换系统的事件驱动条件。【结果结论】仿真结果表明，该方法在 3%Pe/min 变负荷速率下，机前压力偏差小于 0.3 MPa，燃料量的波动小于 15%，在高速率变负荷的工况下具有较好的调节效果。

［关 键 词］火电机组；协调控制系统；事件驱动控制；稳定性

［引用本文格式］邓拓宇，赵保森. 适用于高速率变负荷的事件驱动协调控制系统[J]. 热力发电, 2026, 55(7): 140. Deng T Y, Zhao B S. Event-driven coordinated control system for high-rate load variation[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(7): 140.

Event-driven coordinated control system for high-rate load variation

Deng Tuoyu[1,2], Zhao Baosen[1]
(1. Department of Automation, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: [Objective] The “New Generation Coal Power Upgrade Special Action Plan” imposes increasingly stringent requirements on the load change rate of thermal power generating units, thereby intensifying the inherent contradiction between rapid load response and the safety and stability constraints of the unit itself. In power systems with high penetration of renewable energy, coal-fired units are required to perform frequent and high-rate load adjustments to maintain grid balance and frequency stability. However, from the perspective of traditional control theory, the furnace side of a thermal power unit exhibits pronounced characteristics of large inertia, significant time delay, strong nonlinearity, and multivariable coupling. These intrinsic dynamic properties fundamentally limit achievable control performance and bandwidth. If strict asymptotic stability is enforced throughout the entire transient process, controller design must prioritize monotonic convergence, inevitably sacrificing response speed;

收 稿 日 期：2025-12-17 修 回 日 期：2026-02-09 接 受 日 期：2026-03-04
基 金 项 目：煤炭重大专项（2025ZD1701002）中央高校基本科研业务费专项资金资助（2026MS175）
Supported by: Coal-Major Project (2025ZD1701002); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2026MS175)
第一作者简介：邓拓宇（1987），女，博士，讲师，主要研究方向为供热机组灵活性提升、大型火电机组智能优化控制，ooodty@163.com。
通信作者简介：赵保森（2001），男，硕士研究生，主要研究方向为大型火电机组智能控制与算法模块开发，220232216033@ncepu.edu.cn。

conversely, aggressively shortening the regulation time tends to induce substantial oscillations in fuel flow and main steam pressure, which may undermine operational safety and accelerate mechanical wear. Consequently, control strategies developed under conventional Lyapunov stability theory struggle to reconcile the essential trade-off between stability and rapidity. To address this challenge, the concept of finite-time stability is introduced into the coordinated control framework of thermal power units. Unlike classical stability notions that require trajectories to converge asymptotically and monotonically, finite-time stability allows for controlled transient deviations and brief instability during the dynamic evolution, provided that the system states converge to a desired equilibrium within a prescribed finite time interval. This relaxation significantly reduces the conservatism inherent in traditional stability analysis and enlarges the feasible design region for performance optimization, thereby providing greater flexibility for enhancing dynamic response while preserving overall convergence guarantees. [Methods] Building upon this theoretical foundation, an event-driven coordinated control method suitable for high-rate load variations is proposed. First, the multivariable nonlinear control object is simplified into an equivalent model incorporating aggregated disturbances to facilitate controller synthesis and robustness evaluation. Second, a dual-layer event-driven coordinated control architecture is constructed, comprising a supervisory coordination layer and a lower-level regulation layer responsible for actuator implementation. Finally, within a constrained stability margin, a robust design methodology is employed to derive explicit event-triggering conditions that balance performance improvement and stability assurance. [Results and Conclusion] Simulation results demonstrate that under load disturbances at a rate of 3% of rated load per minute, the proposed approach limits throttle pressure deviation to less than 0.3 MPa and fuel flow fluctuations less than 15%, thereby verifying its effectiveness, robustness, and practical applicability in flexible operation scenarios.

Key words: thermal power units; coordinated control system; event-driven control; stability

随着“新一代煤电升级改造专项行动[1]”对机组变负荷速率提出更高要求，火电机组大惯性、强耦合的动态特性与快速、精准跟踪自动发电控制（automatic generation control，AGC）指令之间的矛盾日益凸显。本文旨在打破传统控制在响应速度与稳定性间的瓶颈，通过新型智能协调控制策略，在保障系统稳定同时显著提升快速变负荷跟踪性能。

现在火电机组高速率变负荷面临三大核心挑战。首先，安全性要求与快速性之间存在固有矛盾。锅炉侧大惯性、大迟延特性迫使传统控制采用保守策略，限制了变负荷速率；而追求快速响应则易引发振荡失稳。现有机组经灵活性改造后扰动增多、耦合复杂，使得基于可测信号的前馈补偿设计困难，亟需发展以新型反馈控制为基础的解决方案。其次，存在响应速度不同的多变量协同难题。协调系统是多输入多输出强耦合系统，存在“机快炉慢”等动态差异。传统解耦控制在响应速度悬殊的变量间难以奏效，必须从控制结构上进行优化，以实现真正的协同。最后，传统稳定性理论框架构成根本限制。经典控制中，为保证稳定性和阻尼比，控制器增益被限制在较低水平，导致响应迟缓；在 Lyapunov 框架下，为满足能量函数单调收敛，稳定域设计过窄。这使动态性能与稳定边界形成结构性矛盾，要大幅提升快速性，必须突破现有稳定性理论的设计范式。

针对火电机组快速变负荷和机组稳定运行之间的矛盾，早期的研究主要集中于智能前馈，如韩忠旭等[2]提出超临界机组“正踢、反踢”的智能型前馈补偿策略，可实现机组的快速变负荷；罗德海等[3]提出一种基于前馈控制的锅炉蓄热补偿与煤质校正策略，实现了在负荷快速变化工况下主蒸汽压力的稳定控制。前馈控制不影响系统的稳定性，当工况变复杂时要建立精准有效的前馈补偿规律会变得尤为复杂，通过加改硬件设备也能达到同样效果。如通过引入熔盐电加热器储能[4]、改造发电机组[5]、高加旁路改造与解耦控制[6]等均能显著提升机组的快速变负荷能力与运行效率，但硬件设备的改造困难且价格不菲。目前对于火电机组快速性和稳定性之间的矛盾，学者集中于多扰动的研究，如王松鹤[7]提出在在协调系统锅炉侧加入广义预测控制、汽轮机侧加入改进模糊 PID 控制器，该方法能提升控制系统鲁棒性；范赫等[8]提出一种滑模观测器的耦合控制策略，显著提升系统的负荷跟踪能力与多扰动抑制性能；李卓勇[9]通过多目标优化在线学习方法，有效解决了火电机组在宽负荷运行下的扰动抑制问题。现有研究尝试通过多控制器来提升抗扰性，主要集中于对象参数变化[10-11]或扰动大小[12-13]。针对机炉协调系统多扰动的问题，现有控制常陷于跟踪与抗扰之间的折中。针对协调系统快速变负荷兼顾快速性和稳定性的多目标问题，张国斌等[14]提出以柔性控制为基础的工况自适应协调控制策略，实现了大范围变工况下机组稳定性与调

峰快速性的协同；邓拓宇等[15]针对超临界直流锅炉干湿态转换的控制问题，提出两层的柔性协调控制系统，能够实现干湿态自动转换、机组超低负荷灵活运行。受此启发，本文设计了一个双层的事件驱动控制系统，来应对机组快速变负荷过程中的快速性与稳定性的问题。

针对引言提出的三大挑战，本文的解决思路如下：第一，提出双层的事件驱动控制策略，下层沿用现有的控制方法，上层设计事件驱动算法，在稳定的同时实现机组快速变负荷。第二，针对多变量协同难题，保留锅炉侧的大惯性大迟延特性，将机炉间的耦合及汽轮机侧回路等效为一个含积分特性的环节，得到协调控制系统的等效模型。第三，放宽李雅普诺夫函数需全程递减的严格约束，允许其短暂、受控的增长，在保证有限时间稳定的前提提升动态性能。

1 火电机组协调控制系统

协调控制系统是火电机组实现锅炉与汽轮机协同运行的核心环节，其主要任务是在满足电网负荷指令的同时，保持主蒸汽压力稳定。被控对象涵盖燃料调节、给水系统和汽轮机调节阀等多个子系统，具有动态特性差异大、耦合强等特点。根据锅炉与汽轮机之间的主从关系不同，协调控制系统一般分为“炉跟机”和“机跟炉”2 种运行方式。近年来，随着深度调峰需求加剧，“炉跟机”方式因其更强调负荷调节能力成为实际工程中的主流策略，其结构如图 1 所示。图 1 中：u_B 为燃料量指令；u_T 为汽轮机调节阀开度；p_t 为机前压力；N_E 为机组负荷；$G_B(s)$为锅炉侧控制器；$G_T(s)$为汽轮机侧控制器；p_{t_sp} 为压力定值扰动；AGC 扰动限速后为 N_{ESP}。

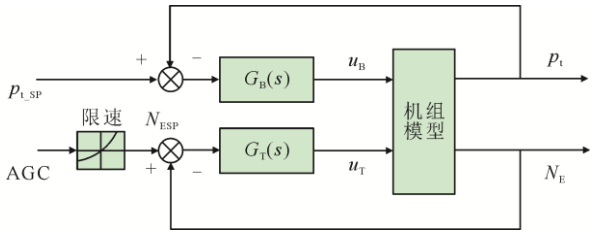


图 1 火电机组炉跟机协调控制系统
Fig.1 Schematic diagram of the boiler-follow-turbine coordinated control system in thermal power units

传统协调控制策略因难以兼顾电网 AGC 与锅炉工况的双重扰动，常引发主蒸汽压力大幅波动与动态响应恶化。针对跟踪和抗扰的复杂控制问题，应摒弃单一控制器的全局策略，转向按过程阶段精准定制最优控制。本文在“炉跟机”协调控制策略的基础上，根据文献[16]的主要思路，设计智能化的控制器策略。

2 协调控制系统的等效模型

2.1 被控对象模型与线性化

选取某 600 MW 亚临界火电机组的简化非线性动态模型[17]为研究对象。该被控对象为二入二出模型，输入为燃料量指令 u_B(%)、汽轮机调节阀开度 u_T(%)，输出为机前压力 p_t(MPa)、机组负荷 N_E(MW)。机组的微分方程模型为：

$$r'_B = u_B(t-\tau) \tag{1}$$

$$K_f \frac{dr_B}{dt} = -r_B + r'_B \tag{2}$$

$$C_b \frac{dp_d}{dt} = -K_3 p_t u_T + K_1 r_B \tag{3}$$

$$p_T = p_d - K_2(K_1 r_B)^{1.5} \tag{4}$$

$$K_t \frac{dN_E}{dt} = -N_E + K_3 p_t u_T \tag{5}$$

式中符号意义以及火电机组协调控制系统具体参数见文献[18]。

将该协调控制系统的微分方程组采用小偏差线性化得到线性化后的模型。线性化后的系统传递函数如文献[19]所示。

本文采用的 PID 控制器表达式为：

$$G_c(s) = P + I\frac{1}{s} + D\frac{N}{1+N\frac{1}{s}} \tag{6}$$

式中：P 为比例系数；I 为积分系数；D 为微分系数；N 为实际微分的惯性滤波系数。

2.2 汽轮机侧闭环锅炉侧开环的等效对象

由于汽轮机侧具有较快的动态特性，可优先完成汽轮机侧控制器的参数整定。汽轮机侧闭环后，锅炉侧的燃料量−蒸汽压力通道可以看作单入单出对象。即在汽轮机侧闭环、锅炉侧开环的条件下，将被控对象与汽轮机侧控制器构成的整体视为一个等效被控对象，用于后续锅炉侧控制器的设计。汽轮机侧开环锅炉侧闭环的结构如图 2 红色部分所示。

2.3 等效后的闭环控制系统

将上述汽轮机侧闭环锅炉侧开环的系统视为整体，对该被控对象设计控制器以及单闭环控制系统，等效后的闭环控制系统如图 2 所示。由于本文

采用的“炉跟机”的协调控制系统，相较于蒸汽压力而言负荷控制得较好，因此研究对象是基于燃料量−蒸汽压力通道的传递函数模型。

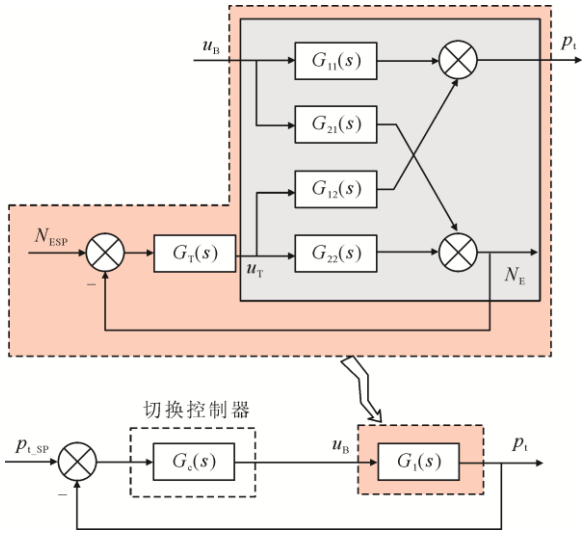


图 2 等效后的闭环控制系统

Fig.2 Equivalent closed-loop control system

2.4 负荷定值扰动传递函数

AGC 定值扰动是被控对象的内部扰动，本节将 AGC 指令扰动进行等效，等效至单闭环控制系统并给出了等效后的数学推导以及仿真验证，回路内部扰动的等效流程如图 3 所示。

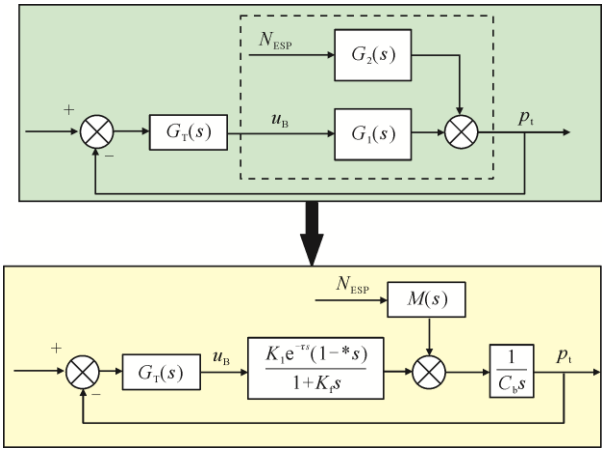


图 3 回路内部扰动的等效流程

Fig.3 Equivalent process of internal disturbances in the loop

首先推导燃料量−蒸汽压力通道的传递函数，接着推导负荷−蒸汽压力的传递函数，然后通过回路信号的等效，最后证明被控对象的 AGC 负荷扰动可等效为回路内部扰动。

锅炉侧燃料量控制机前压力的传递函数为：

$$G_1(s)=\frac{K_1}{C_b s}\frac{(1-1.5C_bK_2\sqrt{K_1u_B}s)}{K_f s+1}e^{-\tau s} \tag{7}$$

根据文献[18]中给出线性化后的参数，记 $G_1(s)=\frac{p_t(s)}{u_B(s)}, G_2(s)=\frac{p_t(s)}{N_{ESP}(s)}$，根据等效关系可得：

$$P_t=\left[u_B\frac{K_1e^{-\tau s}(1-1.5C_bK_2\sqrt{K_1u_B}s)}{1+K_f s}+N_{ESP}M(s)\right]\frac{1}{C_b s}=N_{ESP}G_2(s)+u_BG_1(s) \tag{8}$$

代入文献[19]中的数值，反解出 $M(s)$的值：

$$M(s)\approx -1 \tag{9}$$

由式(9)可知，本文等效控制系统中的 AGC 指令扰动的实际作用约为一个反向的阶跃扰动。

为验证推导结果，在此做出 AGC 阶跃扰动实验。AGC 指令从 600 MW 阶跃到 580 MW，结果如图 4 所示，可观察到非线性模型和等效对象的蒸汽压力曲线重叠，说明等效可行。

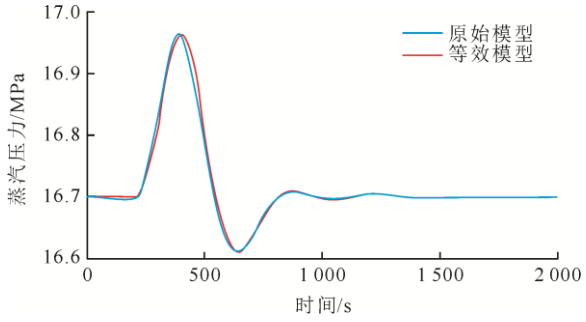


图 4 等效控制对象的验证

Fig.4 Verification of the equivalent control object

3 事件驱动的协调控制系统

3.1 协调控制系统结构

基于上述等效控制系统，可设计如图 5 所示的事件驱动控制系统。该控制系统可分为双层，下层是等效后的单闭环控制系统，上层是事件驱动的控制机制。下层是实现事件驱动控制的单闭环控制系统基本控制层，是一个完整的单闭环控制器，存在 2 个控制器以及被控对象。上层通过事件驱动机制，持续读取并比对各子系统状态，动态生成最优的控制决策序列，以响应系统实时需求。

3.2 状态空间表达式

为分析系统的稳定性和性能，需设计状态空间模型。2 个子系统的状态空间表达式为：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_{\sigma(t)}=\boldsymbol{A}_{\sigma(t)}x+\boldsymbol{B}_{\sigma(t)}r+\boldsymbol{E}_{\sigma(t)}d\\ \boldsymbol{y}_{\sigma(t)}=\boldsymbol{C}_{\sigma(t)}\boldsymbol{x}\end{cases}\tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{\sigma(t)}\in\mathbb{R}^n$为系统的状态向量；$\boldsymbol{A}_{\sigma(t)}$为系统矩阵；$\sigma(t)$为切换信号；$\boldsymbol{B}_{\sigma(t)}$、$\boldsymbol{E}_{\sigma(t)}$分别为 2 个扰动的输入矩阵；$r$ 为等效后的设定值扰动；d 为等效后的回路内部扰动。

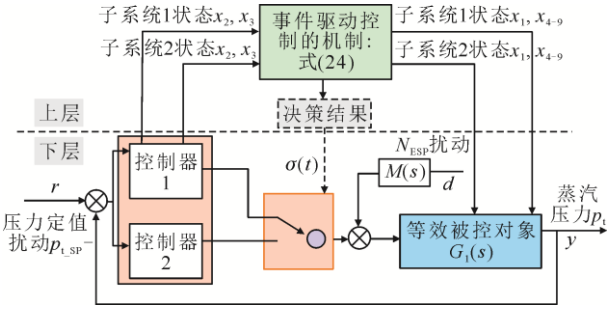


图 5 事件驱动等效控制系统

Fig.5 Event-driven equivalent control system

3.3 系统稳定性分析

根据火电机组协调控制系统在快速变负荷的过程中存在快速性和稳定性的矛盾，为了追求快速性允许系统在有限时间内出现较大的暂态波动，但系统需在有限时间内回到稳定的状态。这一想法可以用有限时间稳定性进行理论分析。从切换系统理论的角度看，事件驱动控制的“保持-触发”状态与控制器 1 控制器 2 切换均可统一表征为由特定切换条件触发的在不同子系统间的动态切换过程。2 个稳定的子系统互相切换，系统不一定稳定[20]。由于本文涉及 2 个稳定子系统之间的频繁切换，因此需要对切换系统进行稳定性分析，其中保证有限时间稳定的一个关键条件为驻留时间。

本节研究的系统可以用式(10)来描述。在本节稳定性研究中，暂不考虑扰动对系统性能的影响，因此 2 个扰动输入矩阵的取值均为 0。系统（式(10)）需满足平衡点处全局一致指数稳定，即系统在任意切换信号下带有γ^*边界的全局一致指数稳定条件[20]。本文基于平均驻留时间方法分析切换系统的稳定性，通过计算并比对子系统的平均驻留时间的范围判断切换系统的稳定性。

定理 1[21]：考虑系统，取$\mu_i>1$，$\alpha_i<0$，不要求系统全程递减，如果存在正定矩阵 $\boldsymbol{P}_i>0$，满足：

$$\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i+\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{A}_i\leqslant\alpha_i\boldsymbol{P}_i\tag{11}$$

$$\boldsymbol{P}_i\leqslant\mu_i\boldsymbol{P}_j\tag{12}$$

则系统在有限时间内稳定。

根据定理 1 的内容，参数分别为α_i=[−0.5 −1]、μ_i=[2.4 3.8]，采用工具箱求解式(11)—式(12)的线性矩阵不等式，LMI 有解即 $\boldsymbol{P}_i>0$ 满足约束条件。计算后得到：

$$\begin{cases}\tau_{a1}\geqslant\dfrac{\ln\mu_1}{\alpha_1}=1.750\ 9\\ \tau_{a2}\geqslant\dfrac{\ln\mu_2}{\alpha_2}=1.335\ 0\end{cases}\tag{13}$$

上述为控制系统稳定性的充分条件，满足该条件的系统必然稳定。其他的 MDADT 方法[22]与本方法数据对比结果见表 1，由表 1 可见，本文采用的方法驻留时间较短，具有更低保守型，更大的稳定裕度。验证本文切换系统稳定性的实验在第 5 节的实验 1。

表 1 驻留时间数据的对比

Tab.1 Comparison of residence time data

算法	子系统 1 的驻留时间/s	子系统 2 的驻留时间/s	相对改进度/%
文献[20]	1.750 9	1.335 0	
文献[21]	181.578 9	53.076 9	99.04 97.48
文献[22]	14.778 0	8.708 3	88.13 84.67

4 协调控制系统的鲁棒性能分析

通过在可用的子系统控制器之间进行适当的切换，可以提高闭环系统的性能[19]。工程上比较关注的是系统的鲁棒性能，本节采用$\mathcal{L}_2$增益理论研究系统的鲁棒性能。

对于系统而言，为了能够快速跟踪 AGC 指令扰动和抵抗压力定值扰动，把系统的跟踪值设定为一个新的输出：

$$\boldsymbol{z}_{\sigma(t)}=\boldsymbol{C}_{\sigma(t)}x-\boldsymbol{r}_{\sigma(t)}\tag{14}$$

则含有设定值扰动的系统为：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_{\sigma(t)}=\boldsymbol{A}x+[\boldsymbol{B}\quad\boldsymbol{E}]\begin{bmatrix}r_{\sigma(t)}\\ d_{\sigma(t)}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{z}_{\sigma(t)}=\boldsymbol{C}x+[-1\quad 0]\begin{bmatrix}r_{\sigma(t)}\\ d_{\sigma(t)}\end{bmatrix}\end{cases}\tag{15}$$

令 $\boldsymbol{\omega}_{\sigma(t)}=\begin{bmatrix}r_{\sigma(t)}\\ d_{\sigma(t)}\end{bmatrix}$，$\bar{\boldsymbol{B}}=[\boldsymbol{B}\quad\boldsymbol{E}]$，$\bar{\boldsymbol{D}}=[-1\quad 0]$，上述系统可表示为：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_{\sigma(t)}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_{\sigma(t)}+\bar{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{\omega}_{\sigma(t)}\\ \boldsymbol{z}_{\sigma(t)}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_{\sigma(t)}+\bar{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{\omega}_{\sigma(t)}\end{cases}\tag{16}$$

在传递函数中，用来描述系统的扰动到输出的传递函数为：

$$y(s)=G(s)\omega(s) \tag{17}$$

输出传递函数的 H_∞范数为：

$$\|y(s)\|_2\leqslant\|G(s)\|_\infty\|d(s)\|_2 \tag{18}$$

系统的抗扰性能可表示为：

$$\frac{\|\boldsymbol{z}\|}{\|\boldsymbol{w}\|}=\frac{\boldsymbol{z}'\boldsymbol{z}}{\boldsymbol{w}'\boldsymbol{w}}\leqslant\gamma^2 \tag{19}$$

变换形式可得到 $\mathcal{L}_2$ 性能指标：

$$J=\int_0^\infty(\boldsymbol{z}'\boldsymbol{z}-\gamma^2\boldsymbol{w}'\boldsymbol{w})\mathrm{d}t\leqslant 0,\ \forall\boldsymbol{w}\in\mathcal{L}_2 \tag{20}$$

将李雅普诺夫函数的导数和积分联系起来，根据牛顿−莱布尼兹公式可得：

$$V(\infty)-V(0)=\int_0^\infty\dot{V}(t)\mathrm{d}t<0 \tag{21}$$

即：

$$\begin{aligned}&J=\int_0^\infty(\boldsymbol{z}'\boldsymbol{z}-\gamma^2\boldsymbol{w}'\boldsymbol{w})\mathrm{d}t\leqslant 0\\&\Rightarrow\int_0^\infty(\boldsymbol{z}'\boldsymbol{z}-\gamma^2\boldsymbol{w}'\boldsymbol{w})\mathrm{d}t+\int_0^\infty\dot{V}(t)\mathrm{d}t<0 \qquad (22)\\&\Rightarrow\int_0^\infty(\boldsymbol{z}'\boldsymbol{z}-\gamma^2\boldsymbol{w}'\boldsymbol{w}+\dot{V}(t))\mathrm{d}t<0\\&\boldsymbol{z}'\boldsymbol{z}-\gamma^2\boldsymbol{w}'\boldsymbol{w}+\dot{V}<0 \qquad (23)\end{aligned}$$

下一个时刻 $t=\tau_{h+1}$ 的切换律为：

$$\begin{cases}\sigma(t)=i,\ \forall t\in[\tau_h,\tau_{h+1}+T)\\\sigma(t)=i,\ \forall t>\tau_{h+1}+T\\\sigma(\tau_{h+1})=\arg\min_l\boldsymbol{x}(\tau_{h+1})'\boldsymbol{P}_{l,0}(\tau_{h+1})\\\boldsymbol{x}(t)'\boldsymbol{P}_{i,K}\boldsymbol{x}(t)\leqslant\boldsymbol{x}(t)'\boldsymbol{P}_{l,0}x(t),\ \forall t\in L_i\end{cases} \tag{24}$$

定理 2（$\mathcal{L}_2$ 增益[23]）：假设对于一个规定的标量 $\gamma>0$ 存在一系列的正定矩阵 $\boldsymbol{P}_{i,k}\in\mathbb{R}^{n\times n}$，如果满足：

$$\begin{bmatrix}\Delta_{i,k}+\boldsymbol{P}_{i,k}\boldsymbol{A}_i+A_i'\boldsymbol{P}_{i,k} & \boldsymbol{P}_{i,k}\boldsymbol{B}_i & \boldsymbol{C}_i'\\ \boldsymbol{P}_{i,k}\boldsymbol{B}_i & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{D}_i'\\ \boldsymbol{C}_i' & \boldsymbol{D}_i' & -\boldsymbol{I}\end{bmatrix}<0$$

$$\begin{bmatrix}\Delta_{i,k}+\boldsymbol{P}_{i,k+1}\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{A}_i'\boldsymbol{P}_{i,k+1} & \boldsymbol{P}_{i,k+1}\boldsymbol{B}_i & \boldsymbol{C}_i'\\ \boldsymbol{P}_{i,k}\boldsymbol{B}_i & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{D}_i'\\ \boldsymbol{C}_i' & \boldsymbol{D}' & -\boldsymbol{I}\end{bmatrix}<0 \tag{25}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_{i,K}\boldsymbol{A}_i+\boldsymbol{A}_i'\boldsymbol{P}_{i,K}+\bar{\Gamma}_i & \boldsymbol{P}_{i,K}\boldsymbol{B}_i & \boldsymbol{C}_i'\\ \boldsymbol{P}_{i,k}\boldsymbol{B}_i & -\gamma^2\boldsymbol{I} & \boldsymbol{D}_i'\\ \boldsymbol{C}_i' & \boldsymbol{D}' & -\boldsymbol{I}\end{bmatrix}<0$$

其中，$k=0,\ldots,K-1$，$\bar{\Gamma}_i=\sum_{l\in L_i}\lambda_{i,l}(\boldsymbol{P}_{l,0}-\boldsymbol{P}_{i,K})$，$\Delta_{i,k}=\dfrac{(\boldsymbol{P}_{i,k+1}+\boldsymbol{P}_{i,k})}{TK}$；$i$ 是切换系统在当前模式的子系统；k 是从 0~K 迭代的计算复杂度中当前值。

切换系统在驻留时间 $T>0$ 的情况下满足切换律式(24)后，能保证切换系统具有边界 γ 的 $\mathcal{L}_2$ 增益的鲁棒性能。由于本文中设计的切换系统存在 2 个子系统，根据式(24)设计基于事件驱动的切换逻辑，如图 6 所示。

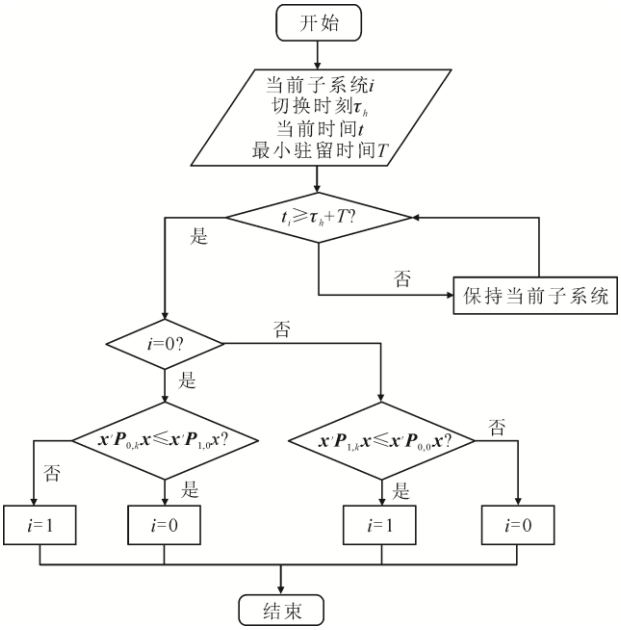


图 6 基于事件驱动的切换逻辑流程

Fig.6 Flow chart of the event-driven switching logic

5 仿真实验

实验 1：在零输入的条件下，基于图 5 的下层控制逻辑，上层设计随机的切换时间，相邻切换时间的范围为[5, 15] s，设计稳定性仿真实验。仿真结果如图 7 所示。

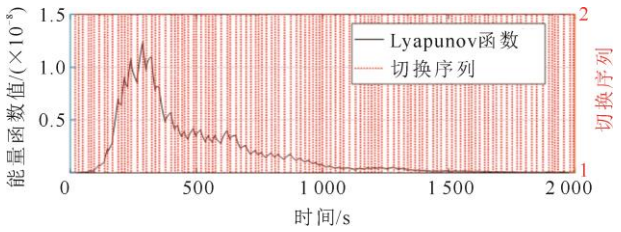


图 7 能量函数（黑）的变化曲线和切换序列（红）

Fig.7 Change curve of the energy function (black) and switching sequence (red)

图 7 表示事件驱动控制系统能量函数变化曲线，能量函数在变化的过程中会产生突变，但能量函数总体的趋势是下降并趋于 0 的，故事件驱动控制系统的是稳定的。

本文以 600 MW 机组为例，AGC 指令从 600 MW 到 580 MW、以 3%Pe/min 做性能分析实验。若出现

压力定值扰动，蒸汽压力从 16.70 MPa 阶跃到 16.26 MPa。每次实验结果从上到下依次为燃料量、蒸汽压力、机组负荷、调节阀开度、决策结果的变化曲线。为比较现有算法与当前主流的先进控制方法，本章节中采用模型预测控制算法进行对比[24]。

实验 2：设定 200 s 时出现 AGC 指令扰动和压力定值扰动，AGC 指令扰动从 600 MW 阶跃到 580 MW，压力定值扰动从 16.70 MPa 阶跃到 16.26 MPa。同时出现 AGC 指令扰动和压力定值扰动的仿真曲线如图 8 所示。由图 8 可见，在复合扰动工况下，原方法的压力超调量达到 0.40 MPa，本文方法压力超调量仅达到 0.22 MPa，实现了超调量降低 45%的显著优化。在负荷指令的跟踪性能上，本文方法（蓝线）相较于原方法（橙线）对负荷指令的跟踪更为紧密，其绝对误差积分（IAE）指标降低了 16%，显著提升了负荷跟踪精度。同样，燃料量和调节阀开度曲线改善，波动的幅值变化较小。采用模型预测控制时，其压力响应不仅出现明显的反向超调，其后续的调节过程也比较缓慢。

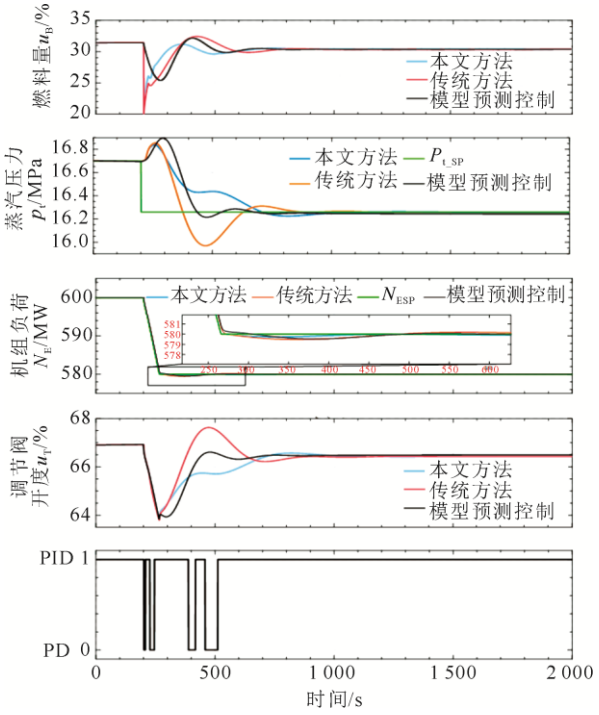


图 8 同时出现 AGC 指令扰动和压力定值扰动的仿真曲线
Fig.8 Simulation curves with simultaneous occurrence of AGC command disturbance and pressure constant disturbance

实验 3：在 200 s 时开始压力定值扰动，压力从 16.70 MPa 阶跃到 16.26 MPa，仿真结果如图 9 所示。蒸汽压力超调量由原方法的 0.45 MPa 降低至 0.28 MPa，降幅达 38%；同时，在负荷指令跟踪性能上，其绝对误差积分（IAE）指标也降低了 22%，表明对设定值微小波动的抑制能力更强。这 2 项指标的协同优化，共同验证了本文方法在提升动态稳定性与保障跟踪精度方面的综合优势。模型预测控制虽可平滑蒸汽压力变化，但动态响应慢于 PID；若通过调节参数加速响应以追近 PID 性能，易引发振荡或失稳。

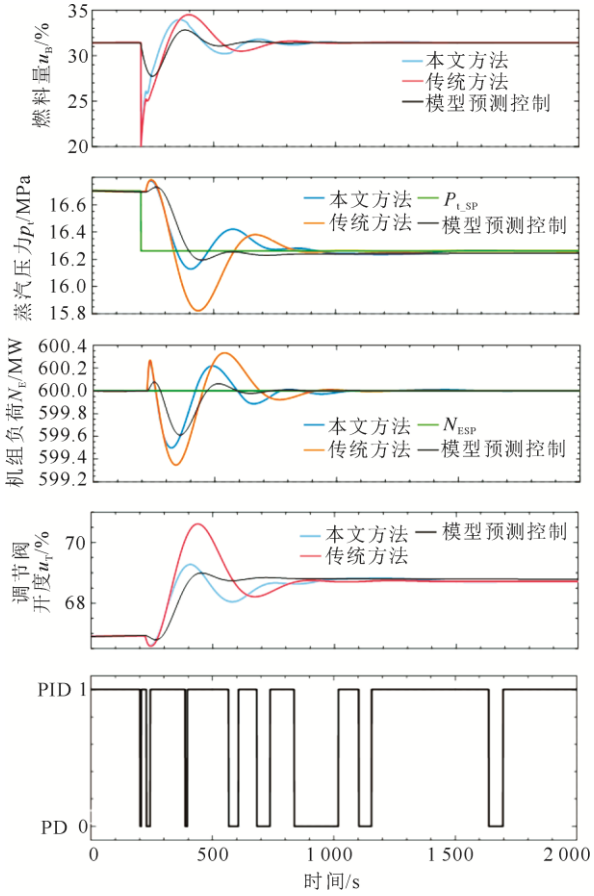


图 9 仅出现压力定值扰动的仿真曲线
Fig.9 Simulation curves with only pressure constant disturbance

实验 4：在 200 s 时出现 AGC 指令扰动，AGC 指令从 600 MW 阶跃到 580 MW，仿真结果如图 10 所示。由于整体压力变化幅度有限，超调量的改善并不显著，但蒸汽压力响应的第二次波动明显减小；同时，负荷跟踪的绝对误差积分（IAE）指标也降低了 13%。这组数据表明，即使在相对理想的运行条件下，本文方法在抑制波动与提升跟踪精度方面依然能带来系统性的性能改善。模型预测控制使压力超调仅降低 0.05 MPa，却导致燃料流量大幅波动，这表明其是以牺牲执行机构平稳性为代价，整体控制品质未必更优。

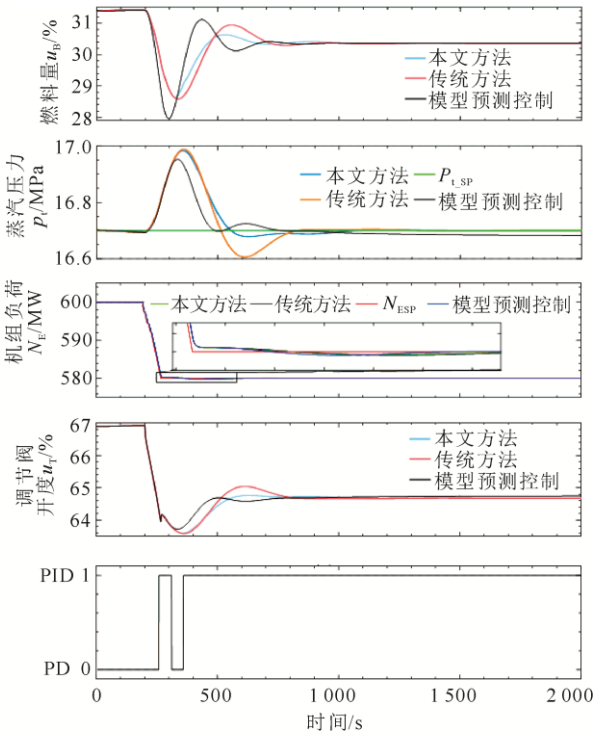


图 10 仅出现 AGC 指令扰动的仿真曲线

Fig.10 Simulation curves with only AGC command disturbance

实验 5：图 11 为实际机组 AGC 指令扰动的仿真曲线。

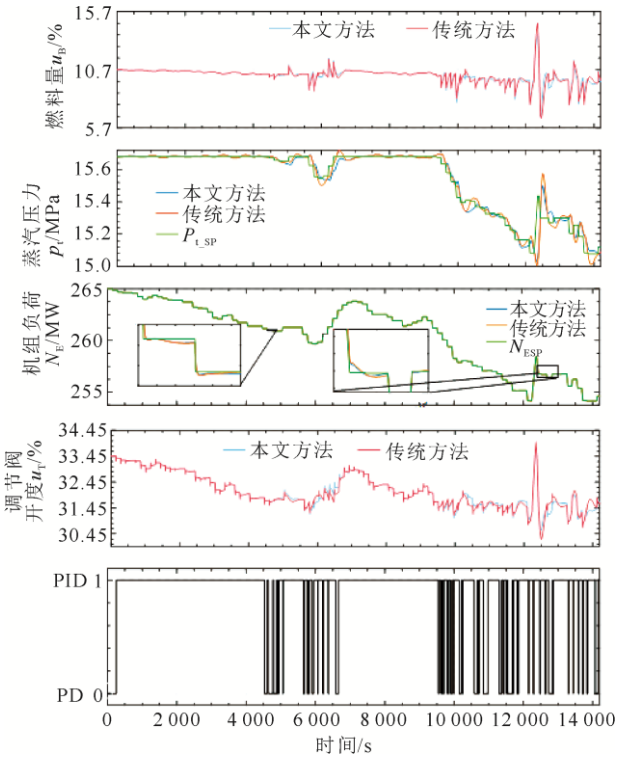


图 11 实际 AGC 指令扰动的仿真曲线

Fig.11 Simulation curves with actual AGC command disturbance

由图 11 可见，相较于传统 PID 控制，事件驱动控制器能使蒸汽压力更紧密地跟随设定值曲线，动态过程中波动更小，表现出更好的抗扰特性。进一步对比细节可观察到，事件驱动器的响应曲线波动更小、更为平稳，体现出更优的跟踪效果。本文所提方法在 3%Pe/min 变负荷速率下，机前压力偏差控制在 0.3 MPa 以内。燃料波动小于 15%，优于传统控制器。

总体来讲，基于事件驱动的控制器具备工况自适应的智能决策能力：系统根据实时状态智能切换两种核心控制模式：一种专为稳态精度优化，在平衡工况下启用；另一种为动态性能强化设计，在系统受到大扰动或跟踪快速指令时激活。采用事件驱动控制策略均体现出比传统控制更优的动态性能，具有响应快、超调小、稳态时间短、系统波动小等明显优势。

6 结　语

本文针对传统协调控制中稳定性与快速性的矛盾，引入有限时间稳定性以突破传统 Lyapunov 稳定的保守性约束，允许系统在有限时间内实现暂态稳定，为提升动态性能开辟了空间。基于此，构建了一种事件驱动的协调控制新方法。该方法通过建立等效扰动模型和鲁棒标准模型，将复杂的多变量协同控制问题转化为事件驱动框架下的性能与稳定性综合设计。仿真与裕度分析表明，所提方法在 3%Pe/min 变负荷速率下，能将机前压力偏差控制在 0.3 MPa 以内，燃料波动小于 15%，显著优于传统控制器。这证明了事件驱动控制策略在保障安全稳定性的同时，有效提升了机组对 AGC 指令的快速跟踪能力和对多重扰动的鲁棒性，为解决“新一代煤电升级改造专项行动”中的关键控制难题提供了新思路。

[参 考 文 献]

[1] 2024 年度中国电力市场发展报告-新华网[EB/OL]. (2025-07-11)[2025-10-20]. https://www.nea.gov.cn/20250717/54ae0fdb11f04b39a5b670999c04ef81/c.html.
2024 China electricity market development report-Xinhua News Agency[EB/OL]. (2025-07-11) [2025-10-20]. https://www.nea.gov.cn/20250717/54ae0fdb11f04b39a5b670999c04ef81/c.html.

[2] 韩忠旭, 周传心, 张伟, 等. 超临界机组协调控制系统设计新方法及其工程应用[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(8): 75.
Han Z X, Zhou C X, Zhang W, et al. New design method and engineering application of coordinated control system

for supercritical units[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8): 75.

[3] 罗德海, 张长青, 蒋琳, 等. 锅炉蓄热补偿和煤质校正的研究与应用[J]. 热力发电, 2013, 42(1): 87.
Luo D H, Zhang C Q, Jiang L, et al. Research and application of boiler heat storage compensation and coal quality correction[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(1): 87.

[4] 马汀山, 张国龙, 居文平, 等. 辅助燃煤机组 AGC 调节的熔盐电加热器动态性能研究[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 84.
Ma T S, Zhang G L, Ju W P, et al. Research on the dynamic performance of molten salt electric heaters for AGC regulation of auxiliary coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 84.

[5] 黎静华, 吴彤, 兰飞. 自备电厂中平抑大阶跃负载扰动的协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 94.
Li J H, Wu T, Lan F. Coordinated control method for suppressing large step load disturbance in captive power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 94.

[6] 侯国莲, 黄婷, 郭志强, 等. 适应大型燃煤机组全工况灵活性运行的快速变负荷控制策略[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 93.
Hou G L, Huang T, Guo Z Q, et al. Fast variable load control strategy for flexible operation of large coal-fired units under all operating conditions[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 93.

[7] 王松鹤. 超超临界单元机组协调系统的建模与控制优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2017: 1.
Wang S H. Research on modeling and control optimization of coordination system for ultra-supercritical unit[D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 1.

[8] 范赫, 苏志刚, 彭献永, 等. 耦合过热汽温调节的直流炉燃煤机组抗干扰机炉协调控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(3): 1010.
Fan H, Su Z G, Peng X Y, et al. An anti-interference boiler-turbine coordinated control system for coal-fired once-through units coupled with superheated steam temperature regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(3): 1010.

[9] 李卓勇. 数据驱动的超超临界机组协调控制系统智能建模与多目标优化方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024: 1.
Li Z Y. Research on data-driven intelligent modeling and multi-objective optimization method for coordinated control system of ultra-supercritical unit[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024: 1.

[10] Zhu G D, Yang D, Lam J, et al. Fault-tolerant control of switched LPV systems: a bumpless transfer approach[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(3): 1436.

[11] Rasmussen B P, Chang Y J. Stable controller interpolation and controller switching for LPV systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2010, 132(1): 011007.

[12] 王永建, 杨宣访, 陈永嘉. 舰船动力定位系统切换控制器的设计与分析[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(10): 117.
Wang Y J, Yang X F, Chen Y J. Design and analysis of switching controller for ship dynamic positioning system[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(10): 117.

[13] Nguyen T D, Sørensen A J, Tong Quek S. Design of hybrid controller for dynamic positioning from calm to extreme sea conditions[J]. Automatica, 2007, 43(5): 768.

[14] 张国斌, 刘永江, 杜鸣, 等. 火电机组的工况自适应协调控制策略[J]. 控制工程, 2021, 28(10): 1939.
Zhang G B, Liu Y J, Du M, et al. Adaptive coordinated control strategy for thermal power units[J]. Control Engineering, 2021, 28(10): 1939.

[15] 邓拓宇, 田亮, 贾梦颖, 等. 超临界直流锅炉机组干湿转态柔性协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 3056.
Deng T Y, Tian L, Jia M Y, et al. Flexible coordinated control of supercritical once-through boiler units during dry-wet transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 3056.

[16] Nentwig M, Mercorelli P. PD/PID-switching control as a human-machine interface for a semi-autonomous driver in automobiles[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2009, 42(15): 497.

[17] 刘吉臻, 田亮, 曾德良, 等. 660 MW 机组负荷-压力非线性特性的分析[J]. 动力工程, 2005, 25(4): 533.
Liu J Z, Tian L, Zeng D L, et al. Analysis on nonlinear characteristics of load-pressure for a 660 MW unit[J]. Power Engineering, 2005, 25(4): 533.

[18] 刘暑辉. 基于信息融合技术的控制系统变参数优化控制策略[D]. 保定: 华北电力大学, 2021: 1.
Liu S H. Variable parameter optimal control strategy for control system based on information fusion technology[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021: 1.

[19] Berg R V D. Performance analysis of switching systems[D]. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2008: 1.

[20] Protasov V Y, Kamalov R. How do the lengths of switching intervals influence the stability of a dynamical system?[J]. Automatica, 2025, 171: 111929.

[21] Xie D, Zhang H, Zhang H, et al. Exponential stability of switched systems with unstable subsystems: a mode-dependent average dwell time approach[J]. Circuits, Systems and Signal Processing, 2013, 32(6): 3093.

[22] Zhao X, Yin S, Li H, et al. Switching stabilization for a class of slowly switched systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(1): 221.

[23] Allerhand L I, Shaked U. Robust state-dependent switching of linear systems with dwell time[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(4): 994.

[24] 曾德良, 高耀岿, 胡勇, 等. 基于阶梯式广义预测控制的汽包炉机组协调系统优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4819.
Zeng D L, Gao Y K, Hu Y, et al. Optimal control of coordinated system of drum boiler unit based on stepped generalized predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4819.

（责任编辑 杜亚勤）