

DOI: 10.19666/j.rlfed.202409223

基于最大灵敏度约束的预期动态控制及其在火电机组中的应用

史耕金¹, 吴振龙²

(1.中国电力国际发展有限公司, 北京 100080;
2.郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001)

[摘要] 随着可再生能源系统的并网, 越来越多的火电机组需要参与深度调峰并快速响应自动发电控制指令, 这要求火电机组的控制器既需要具有良好的动态性能也需要有较强的鲁棒性。然而, 目前广泛应用于火电机组的比例-积分 (proportional-integral, PI) 控制器整定往往以动态性能为重, 缺乏鲁棒性。为此, 提出了一种基于最大灵敏度约束的预期动态 PI 控制策略, 旨在获得良好动态性能的同时兼顾控制器的鲁棒性。仿真结果以及磨煤机热一次风量控制试验结果表明, 所提出的控制策略具有较好的抗扰性能与较强的鲁棒性, 能够有效应对机组大范围变工况带来的不确定性。

[关键词] 鲁棒性; 最大灵敏度; 预期动态; 比例-积分; 磨煤机

[引用本文格式] 史耕金, 吴振龙. 基于最大灵敏度约束的预期动态控制及其在火电机组中的应用[J]. 热力发电, 2025, 54(5): 112-121. SHI Gengjin, WU Zhenlong. Desired dynamic equation control based on maximum-sensitivity-constraint and its application in thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(5): 112-121.

Desired dynamic equation control based on maximum-sensitivity-constraint and its application in thermal power units

SHI Gengjin¹, WU Zhenlong²

(1.China Power International Development Limited, Beijing 100080, China;
2.School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: With the grid-connection of renewable energy systems, more coal-fired units are required to participate in deep-peak-shaving and quickly respond to the automatic generation control command. Therefore, the controllers of coal-fired units should not only have satisfactory dynamic performance but also have strong robustness. However, the tuning of proportional-integral (PI) controllers which are widely applied to coal-fire units usually takes the dynamic performance into account and robustness in the application of PI controller parameter tuning is lack. Thus, the maximum-sensitivity-constrained desired dynamic equation (DDE) PI is proposed to obtain good dynamic performance and strong robustness. Simulations and field tests on the hot primary air system of the coal pulverizer indicate that, the proposed control method has better disturbance rejection performance and stronger robustness, which can effectively handle with uncertainties caused by the wide load variation of the unit.

Key words: robustness; maximum-sensitivity; expected dynamics; proportional-integral; coal pulverizer

在“双碳”目标下非化石能源发电装机容量及发电量逐年递增, 但风能、太阳能等新能源发电系

收稿日期: 2024-09-14 网络首发日期: 2025-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52106030, U23A20340); 电力系统国家重点实验室开放课题 (SKLD21KM14); 郑州大学教授团队助力企业创新驱动发展专项 (JSZLQY2022016)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (52106030, U23A20340); Open Project of the State Key Lab of Power Systems (SKLD21KM14); Special Project of Zhengzhou University Professor Team for Enterprise Innovation-Driven Development (JSZLQY2022016)

第一作者简介: 史耕金 (1995), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为 PID、自抗扰控制和大型火电机组自动控制, shigj@cpibj.com.cn。

通信作者简介: 吴振龙 (1992), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为 PID、自抗扰控制及其工程应用, wuzhenlong2020@zzu.edu.cn。

统存在间歇性与不确定性。根据《中国电力行业年度发展报告 2024》，即使非化石能源发电装机容量已占总装机容量的 52.38%，2023 年我国火电机组发电量仍占总发电量的 69.95%^[1]。为使清洁能源系统在未来承担更多的发电量，需要对现役火电机组进行改进，使其在提高发电效率且降低供电煤耗的同时，尽可能参与深度调峰。

火电机组的控制系统是实现深度调峰的重要支撑^[2]。然而，火电机组控制系统设计面临着大范围变工况、热力过程难以精确建模、扰动频繁复杂等问题。虽然一些如模型预测控制（model predictive control, MPC）^[3]的先进控制策略在仿真中取得了优良效果，但是它们大多基于被控过程精确数学模型设计，且具有难以应对不确定扰动、算法复杂等特点，使其难以应用于实际火电机组的热力过程。模糊控制^[4]虽然能够有效处理火电机组中的一些非线性和不确定性问题，但其在实际应用中也难以通过简单的模糊规则完全覆盖所有可能的工况。神经网络控制^[5]虽然能在负荷变化和扰动较大的情况下，通过训练神经网络模型，很好地处理非线性和复杂的控制任务，但由于计算量大、依赖大量数据等缺点，使其在现场应用具有一定的难度。滑模控制^[6]在火电机组控制中具有较强的鲁棒性，能有效应对系统参数变化和外部扰动，但可能会导致较大的控制抖振和较高的计算复杂度。自抗扰控制（active disturbance rejection control, ADRC）^[7]以扰动补偿的思想为核心，在不需要对被控对象精确数学模型设计的条件下能够有效应对系统不确定性，这使其在火电机组上具有广阔应用前景。虽然，目前 ADRC 已成功应用于炉膛压力系统^[8]、过热汽温系统^[9]、脱硝系统^[10]等火电机组热力过程中，并获得了良好的控制效果，但目前火电机组控制策略仍以比例-积分-微分（proportional-integral-derivative, PID）/比例-积分（proportional-integral, PI）为主，因此将 PID/PI 控制器整定好仍然具有重大工程价值^[11-12]。在某火电机组近 170 个反馈控制回路中，应用 PI/PID 控制算法的回路占 98.1%^[13]，由此可见 PI/PID 控制器目前仍是火电机组控制系统的首选。

大量国内外学者对 PI/PID 控制器其参数整定展开了研究。针对不同类型的典型过程模型，文献^[14]汇总了大量如 Z-N 法、内模法（internal model control, IMC）等的工程整定法。此外，如遗传算法、粒子群算法、极值搜索算法等优化算法也常用

于 PID 控制器的整定。但基于大部分工程整定法整定的 PID 控制器会产生较大超调，导致执行器的动作幅度较大，进而产生磨损^[15]；基于优化算法整定的 PID 控制器由于算法复杂，难以在分散控制系统（distributed control system, DCS）上实现。

一种基于模型参考的 PID 控制器——预期动态方程（desired dynamic equation, DDE）PID 控制器被认为是热力过程 PI/PID 整定的可行替代方案^[16]，其核心是通过整定 PID 控制器参数使得闭环系统输出与期望响应几乎一致。DDE-PID 在数值仿真与实验台获得了良好的控制品质，并展现了其参数易于整定、超调较小、不依赖被控对象精确数学模型、普适性强等优势^[17-18]。文献^[19]首次将 DDE-PID 应用于实际的火电机组并随后开展了一系列现场试验^[20]，结果表明了 DDE-PID 具备仿真与实验台实验中所展现的优势。

然而，现场调试 DDE-PI/PID 往往为了追求更好的动态性能而忽视了鲁棒性。由于大部分火电机组常用于调峰，机组负荷大范围频繁变化，这使得控制器的鲁棒性至关重要。基于此，本文提出了一种基于最大灵敏度约束的 DDE-PID 控制器整定方法，旨在提升 DDE-PI/PID 控制器在整定过程中的鲁棒性。首先，本文系统地介绍了最大灵敏度的定义及 DDE-PID 控制器的工作原理；接着，分析了控制器参数变化对最大灵敏度的影响，并基于此提出了一种新的 DDE-PI/PID 整定流程，通过最大灵敏度约束优化控制器参数；最后，通过仿真与现场试验结果验证了该方法在机组稳态负荷和变负荷条件下优越的控制性能，证明了该方法在实际应用中的有效性和鲁棒性。

1 预期动态 PID 控制

考虑广义系统的传递函数形式为：

$$G_p(s) = H \frac{a_0 + a_1s + \dots + a_{m-n-1}s_{m-n-1} + s_{m-n}}{b_0 + b_1s + \dots + b_{m-1}s_{m-1} + s_m} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中： $G_p(s)$ 为被控对象的传递函数模型； m 、 n 、 H 与 t 分别为系统传递函数的分母最高阶次、相对阶次、高频增益与延迟时间； $a_i(i=0,1,\dots,m-n-1)$ 与 $b_i(i=0,1,\dots,m-1)$ 分别为系统传递函数分子与分母各项的系数， a_i 、 b_i 与 H 通 a_i 常是未知的。

式(1)所示的传递函数可通过式(2)状态空间表达式描述：

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1}, & i=1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = -\sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i x_{i+1} - \sum_{i=0}^{m-n-1} \zeta_i w_{i+1} + Hu \\ \dot{w}_i = w_{i+1}, & i=1, \dots, m-n-1 \\ \dot{w}_{m-n} = -\sum_{i=0}^{m-n-1} a_i w_{i+1} + z_1 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\lambda_i(i=0,1,\dots,n-1)$ 与 $\zeta_i(i=0,1,\dots,m-n-1)$ 均为未知参数； $x_i(i=0,1,\dots,n-1)$ 、 $w_i(i=0,1,\dots,m-n-1)$ 、 u 与 y 分别为系统的状态变量、不确定性、输入与输出。

对式(2)所示系统提出如下假设^[21]：

- 1) 相对 n 阶已知；
- 2) 系统是最小相位的；
- 3) 高频增益 H 的符号已知；
- 4) 分子分母相对互质，且不可测与不可控模态是渐近稳定的。

定义扩张状态总扰动 f 为：

$$f(x, w, u) = -\sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i x_{i+1} - \sum_{i=0}^{m-n-1} \zeta_i w_{i+1} + (H-l) \quad (3)$$

式中： l 为 H 的估计系数。因此，式(2)中的 \dot{x}_n 的表达式可改写为：

$$\dot{x}_n = f + lu \quad (4)$$

当 $n=2$ 时，被控过程假设为广义二阶对象，则被控对象状态空间表达式为：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f + lu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

相应地，闭环系统的预期动态方程为：

$$\ddot{y} + h_1 \dot{y} + h_0 y = h_0 r \quad (6)$$

式中： h_0 与 h_1 均为预期动态方程的系数。结合式(5)与式(6)，为了实时消除总扰动，控制律设计为：

$$u = \frac{h_0(r - x_1) - h_1 x_2 - \hat{f}}{l} \quad (7)$$

式中： \hat{f} 为 f 的估计，可由如下观测器算法获得：

$$\begin{cases} \dot{\xi} = -k\xi - k^2 x_2 - klu \\ \hat{f} = \xi + kx_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中： k 与 x 分别表示观测器的增益与中间状态变量。因此，式(7)可改写为：

$$u = -\frac{\xi + kx_2}{l} - \frac{h_0(x_1 - r) + h_1 x_2}{l} \quad (9)$$

由式(8)与式(9)可得中间状态变量的导数为：

$$\dot{\xi} = k[h_0(x_1 - r) + h_1 x_2] \quad (10)$$

两边同时积分，可得：

$$\xi = k \left[h_0 \int (x_1 - r) dt + h_1 x_1 \right] \quad (11)$$

结合式(10)，控制律可进一步改写为：

$$u = -\frac{k \left[h_0 \int (x_1 - r) dt + h_1 x_1 \right] + kx_2}{l} - \frac{h_0(x_1 - r) + h_1 x_2}{l} = \frac{h_0 + kh_1}{l} (r - x_1) + \frac{kh_0}{l} \int (r - x_1) dt - \frac{h_1 + k}{l} x_2 - \frac{kh_1}{l} r \quad (12)$$

由于在实际系统中，设定值的测试信号一般为阶跃信号，因此设定值的微分可认为是 0。定义系统跟踪误差 $e=r-x_1$ ，则 $\dot{e} = \dot{r} - \dot{x}_1 = -x_2$ 。因此，式(12)可改写为：

$$u = \frac{h_0 + kh_1}{l} e + \frac{kh_0}{l} \int e dt + \frac{h_1 + k}{l} \dot{e} - \frac{kh_1}{l} r = k_p e + k_i \int e dt + k_d \dot{e} - br \quad (13)$$

式中： k_p 、 k_i 、 k_d 与 b 分别为 DDE-PID 的比例增益、积分增益、微分增益与设定值前馈系数。

由式(13)可知，DDE-PID 是一种典型的设定值前馈型二自由度 PID 控制器，图 1 为其控制结构。

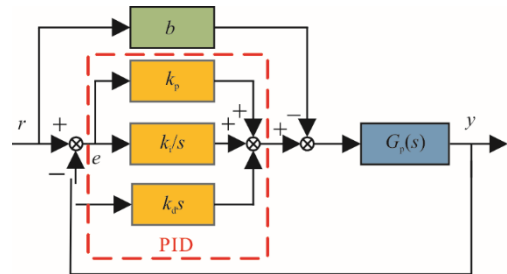


图 1 DDE-PID 控制结构
Fig.1 The control structure of DDE-PID

同理，当 $n=1$ 时，即被控过程假设为广义一阶对象，预期动态方程应为：

$$\dot{y} + h_0 y = r \quad (14)$$

类似于式(5)—式(13)的推导，可获得 DDE-PI 的控制律为：

$$u = \frac{h_0 + k}{l} e + \frac{kh_0}{l} \int e dt - \frac{k}{l} r = k_p e + k_i \int e dt - br \quad (15)$$

类似于图 1，DDE-PI 的控制结构如图 2 所示。鲁棒性决定了控制器应对系统非线性的能力，最大灵敏度 (maximum-sensitivity, M_s) 函数是目前常用于衡量控制器鲁棒性强弱的定量指标^[22]。

$$M_s = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} \left| \frac{1}{1 + L(j\omega)} \right| \quad (16)$$

式中： ω 表示频率； $L(j\omega)$ 表示系统开环频域特性。式(16)的定义可具象化为图 3 所示。

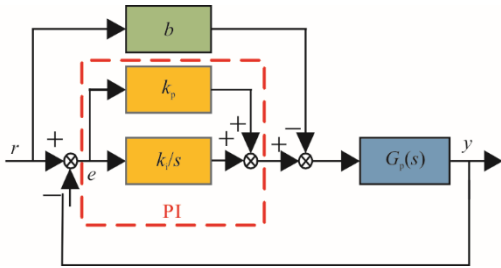


图 2 DDE-PI 控制结构
Fig.2 The control structure of DDE-PI

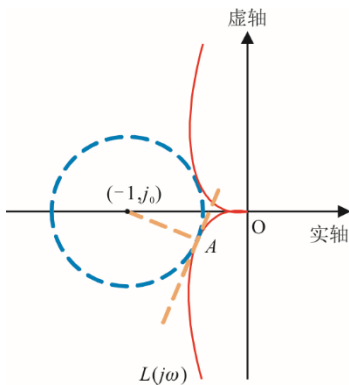


图 3 最大灵敏度函数
Fig.3 The maximum-sensitivity function

结合式(16)与图 3 可知， M_s 可认作是系统开环奈奎斯特曲线与 $(-1, j_0)$ 之间最近距离的倒数。由文献[22]给出 M_s 推荐取值应在 $[1.2, 2.0]$ 区间内，并且 M_s 越大鲁棒性越弱，反之亦然。

2 控制参数变化对 M_s 的影响

由上节可知，DDE-PID 的可调参数为 k 、 l 、 h_0 与 h_1 ，DDE-PI 的可调参数为 k 、 l 与 h_0 。为减少 DDE-PI/PID 的可调参数个数，对其进行带宽参数化。根据文献[19]，定义 ω_d 为闭环预期带宽。对于 DDE-PID， $h_0 = \omega_d^2$ ， $h_1 = 2\omega_d$ ；对于 DDE-PI， $h_0 = \omega_d$ 。因此，无论是 DDE-PI 还是 DDE-PID，可调参数均为 k 、 l 与 ω_d 。

本节分析控制器参数变化对 M_s 指标的影响，为 DDE-PID 的基于最大灵敏度约束参数整定法提供支撑。选取被控对象为辽宁某 600 MW 火电机组磨煤机入口处热一次风量（简称“磨热一次风量”），通过现场运行数据对被控对象模型进行辨识。开环试验过程中，在稳态工况下挡板开度指令向下有

5 百分点的阶跃响应，可获得磨热一次风量的飞升曲线如图 4 所示。

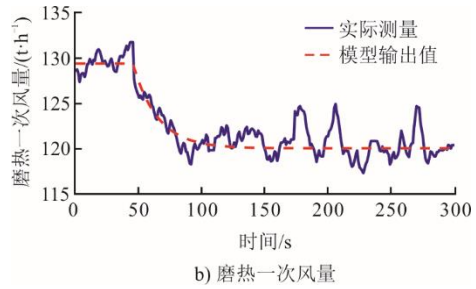
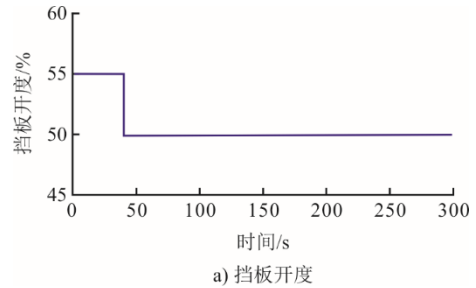


图 4 磨热一次风量辨识结果
Fig.4 Identification results of volume of hot primary air at the mill inlet

根据图 4 所示的结果，可得挡板开度指令与磨热一次风量之间的传递函数模型为：

$$G_p(s) = \frac{1.8}{20s + 1} e^{-4s} \quad (17)$$

结合式(17)分析 k 、 l 与 ω_d 对 M_s 的影响。分析过程中，将 3 个可调参数两两配对作图分析。例如，在分析 k 、 l 对 M_s 的影响时，前提条件是将 ω_d 固定。分析结果如图 5—图 7 所示。由图 5—图 7 可见，随着 k 增大、 ω_d 增大以及 l 减小， M_s 逐渐增大。本节设定 M_s 在 $1.2 \sim 2.0$ 为例，当控制器参数调整不合适时， M_s 会超出约束区间。

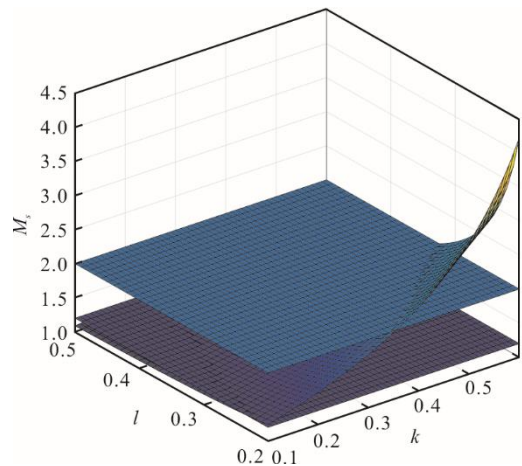


图 5 不同 k 与 l 对 M_s 的影响
Fig.5 The influence of different ks and ls on M_s

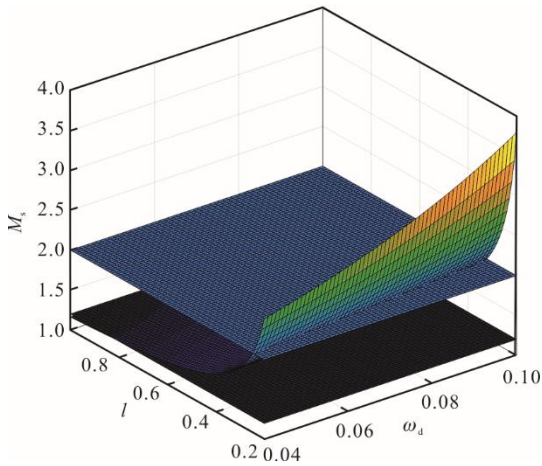


图6 不同 ω_d 与 l 对 M_s 的影响
Fig.6 The influence of different ω_d s and l s on M_s

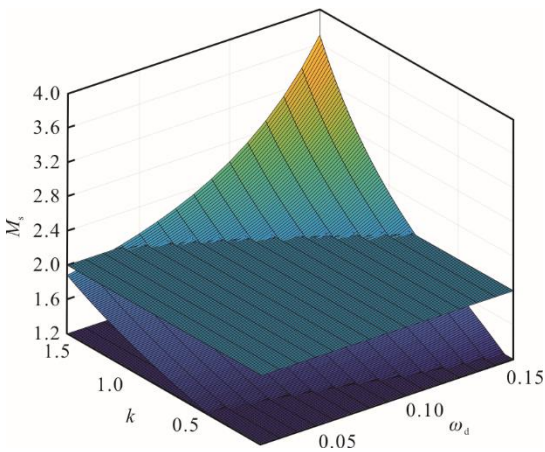


图7 不同 ω_d 与 k 对 M_s 的影响
Fig.7 The influence of different ω_d s and k s on M_s

3 参数整定流程

针对实际工业系统进行观测器设计时,在考虑估计精度的同时必须考虑避免测量噪声的放大。由式(8)可知, k 为观测器的增益,观测器增益的增大会提高观测器估计精度,但会放大噪声对系统的干扰。因此在噪声干扰与估计精度之间进行折中处理是观测器设计的基本问题。实际设计过程中,应保证观测器极点是闭环系统极点的 2~10 倍^[21]。为使得 DDE-PI/PID 克服总扰动的性能尽可能好,且不会放大测量噪声,本文根据文献[19]的建议设定 k 与 ω_d 之间存在倍数关系,即 $k=10\omega_d$ 。

结合第 2 节分析得出的结论,基于最大灵敏度约束的 DDE-PI/PID 整定流程如下:

- 1) 选取一较小 ω_d , 令 $k=10\omega_d$;
- 2) 选取一较大 l ;
- 3) 判断 M_s 是否满足要求,若是则至下一步,否则减小 l ;

4) 判断是否已获得满意的动态性能,若是则结束整定,否则增大 ω_d 并返回至第 2) 步。

图 8 为基于最大灵敏度约束的 DDE-PI/PID 整定流程,其中 M_s^* 表示期望的最大灵敏度,具体 ω_d 与 l 初值选择可参考文献[19],本文不再赘述。

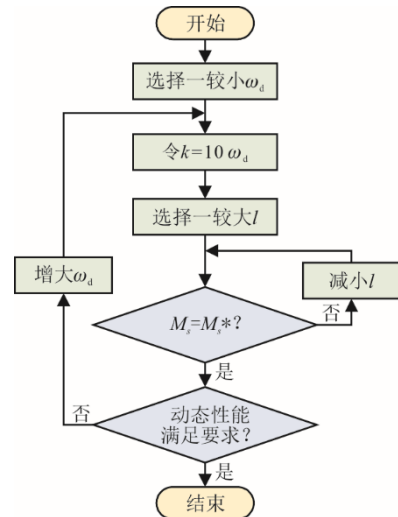


图8 基于最大灵敏度约束的 DDE-PI/PID 整定流程
Fig.8 DDE-PI/PID tuning process based on maximum sensitivity constraint

4 仿真和现场应用

锅炉的燃烧状况对于机组运行的安全性与经济性至关重要,燃料燃烧的充分程度以及热负荷的均匀分布程度是保证机组安全、经济、稳定运行的重要条件。磨热一次风量对于控制锅炉风粉比以及机组负荷起关键性的作用。因此,根据机组负荷指令变化精确调整磨热一次风量,并减小外部干扰引起风量的波动是十分必要的^[24]。

为使机组磨热一次风在机组负荷变化的过程中减小风量与其指令之间的偏差,本节采用式(17),以辽宁某 600 MW 机组的 E 磨煤机入口热一次风量为例,基于第 3 节中提出的整定流程对控制器进行整定,开展相关的应用研究。

4.1 仿真研究

首先通过仿真对控制器进行验证。现场的 PI 控制器参数(记作“PI_f”)由经验丰富的热控工程师调试所得,根据现场 PI 控制器的参数,并结合式(17),可以计算得出 $M_s=1.227$ 。为确保 DDE-PI 与 PI 性能比较的公平性,在进行图 8 所述的整定过程中选取 $M_s^*=1.227$ 来整定 DDE-PI 控制器(记作“DDE”)。此外,在仿真中添加了基于 Skogestad 内模法(Skogestad IMC, SIMC)整定 PI 作为对比

组进行比较 (记作“SIMC”)^[25], 并同样以 $M_s=1.227$ 为约束。SIMC 法被认为是目前对于工业过程 PI/PID 控制器最有效的工程整定法^[26], 表 1 给出了各控制器的参数。

表 1 各控制器参数
Tab.1 Parameters of each controller

控制器	M_s	参数
PI _f		$k_p=2/3, k_i=1/36$
SIMC	1.227	$k_p=0.6407, k_i=0.032$
DDE		$k=0.8, l=1.65, \omega_d=0.08$

基于表 1 中的参数进行仿真研究, 仿真过程中, 仿真步距设为 0.25 s, 设定值在 10 s 向上阶跃 1, 并且在 150 s 时添加幅值为 1 的阶跃扰动, 仿真结果如图 9 所示。由图 9 可以看出, 相较于 PI_f 及 SIMC, DDE 的跟踪性能最弱, 但是抗扰性能最强且控制输出更为平缓。

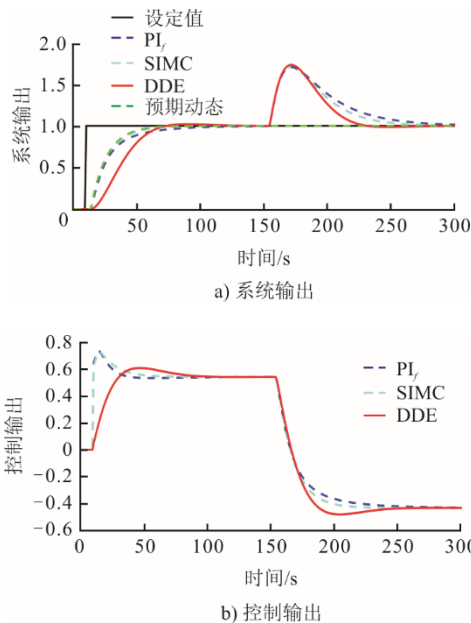


图 9 各控制器控制效果对比

Fig.9 Comparison of control performance of each controller

为定量评价不同控制器的控制效果, 表 2 计算了不同控制器的动态性能指标, 包括超调 s 、调节时间 T_s 、输出跟踪响应与设定值之间的误差绝对值积分 (integral absolute error, IAE) 指标 IAE_{sp} 、输出抗扰响应与设定值之间的 IAE 指标 IAE_{ud} 及控制器输出的总变化量 (total variation, TV)。需要说明的是, 本文中所有的调节时间均是基于 2% 准则进行计算的。由表 2 可知, 相较于 PI_f 及 SIMC, DDE 具有更小的抗扰 IAE_{ud} 与 TV, 但其超调量和跟踪

IAE_{sp} 较大, 说明基于 M_s 约束整定的 DDE 能够保证良好的抗扰性能。

表 2 各种控制器的性能指标

Tab.2 Performance indicators of various controllers

控制器	$\sigma/\%$	T_s/s	IAE_{sp}	IAE_{ud}	TV
PI _f	0	86	19.90	35.53	1.97
SIMC	0	57	17.34	31.16	1.95
DDE	1.98	58	28.23	26.80	1.79

需要说明的是, 图 9 中可知 DDE 与预期动态差距较大, 这是由于本文是在 M_s 的约束下调整 DDE 参数, 是以鲁棒性为目标整定参数, 而不是以预期动态为目标整定参数。若将 DDE 参数调整至 $k=0.8$ 、 $l=0.5$ 、 $\omega_d=0.08$, 可以得到图 10 所示的结果, 此时 DDE 能够保证有与预期动态接近的响应。此时 DDE 的 $M_s=1.963$, 已经接近于推荐的 M_s 区间上限。

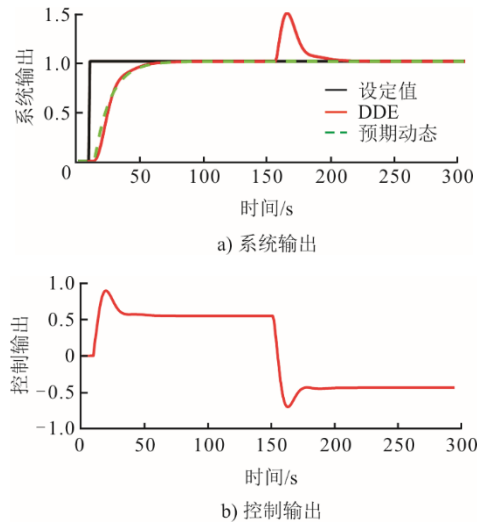


图 10 $M_s=1.963$ 时 DDE 控制效果对比

Fig.10 Control performance of DDE when $M_s=1.963$

蒙特卡洛 (Monte Carlo, MC) 随机实验是检验控制器鲁棒性的有效方法, 它能直观地反映出控制器动态性能的大小与鲁棒性的强弱。为进一步比较各控制器的鲁棒性, 将式(17)的增益、时间常数、迟延时间在各自的标称值 80%~120% 随机摄动 1 000 次。在进行随机实验的过程中, 统计各控制器的 IAE_{sp} 、 IAE_{ud} 、TV 指标。图 11 给出了不同控制器的 MC 随机实验结果。对于 MC 随机实验而言, 若点越密集说明控制器鲁棒性越强。由图 11 可知, 相比于其他控制器而言, DDE 的点集最密集, 说明其具有更强的鲁棒性。

当 $M_s=1.227$ 时, DDE 的跟踪性能稍差, 但 $M_s=1.227$ 的约束较为苛刻, 几乎靠近其推荐区间的

下限。若将此约束稍放宽松，DDE 与 SIMC 之间跟踪性能差距将会缩小。本节以 $M_s=1.4、1.6、1.8$ 与 2.0 为例说明，不同约束下 SIMC 与 DDE 的控制器参数见表 3。

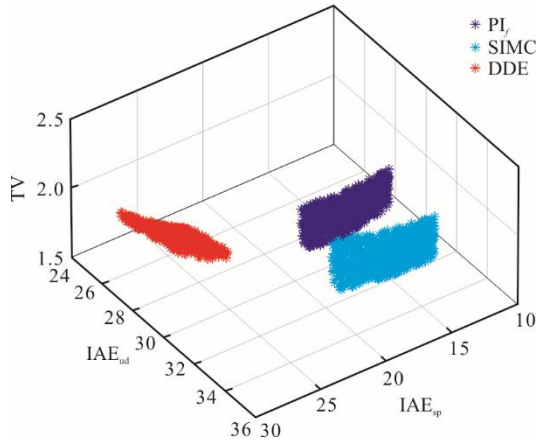


图 11 MC 随机实验结果
Fig.11 MC random experiment results

表 3 不同 M_s 约束下各控制器参数
Tab.3 Controller parameters under different M_s constraints

M_s	控制器	参数
1.4	SIMC	$k_p=1.0346, k_i=0.0517$
	DDE	$k=0.8, l=0.96, \omega_d=0.08$
1.6	SIMC	$k_p=1.4047, k_i=0.0702$
	DDE	$k=0.9, l=0.82, \omega_d=0.09$
1.8	SIMC	$k_p=1.7015, k_i=0.0851$
	DDE	$k=1, l=0.77, \omega_d=0.1$
2.0	SIMC	$k_p=1.9459, k_i=0.0973$
	DDE	$k=1, l=0.664, \omega_d=0.1$

基于表 3 的控制器参数，图 12—图 15 分别给出了 $M_s=1.4、1.6、1.8$ 与 2.0 时的控制效果。由图 11—图 14 可知，随着 M_s 约束的逐步增大，DDE 与 SIMC 的跟踪响应差距逐渐缩小，且 SIMC 的超调与控制输出动作幅度逐渐增大。为定量说明此问题，表 4 计算了不同 M_s 约束下 SIMC 与 DDE 的性能指标。

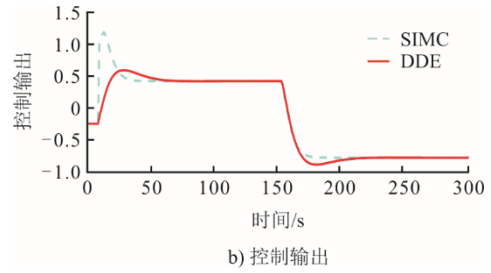
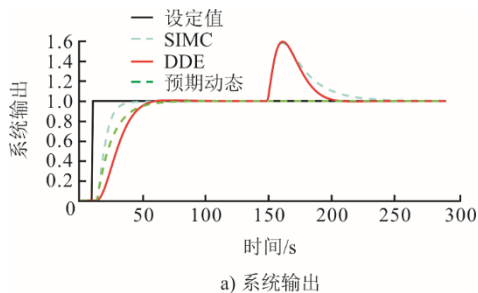


图 12 $M_s=1.4$ 下不同控制器控制效果对比
Fig.12 Control performance of different controllers when $M_s=1.4$

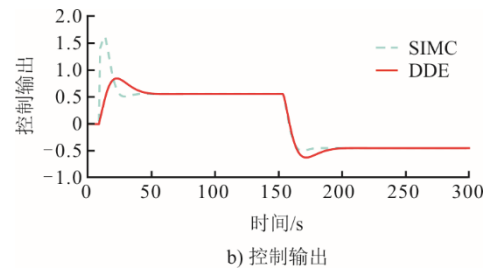
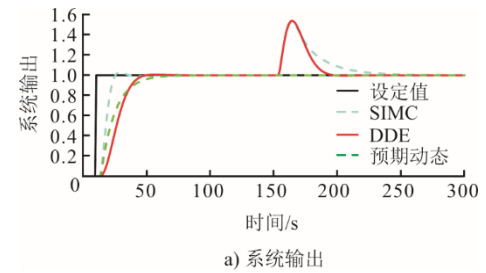


图 13 $M_s=1.6$ 下不同控制器控制效果对比
Fig.13 Control performance of different controllers with $M_s=1.6$

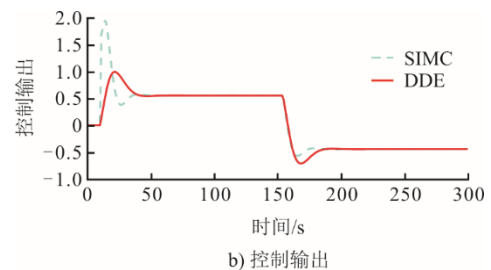
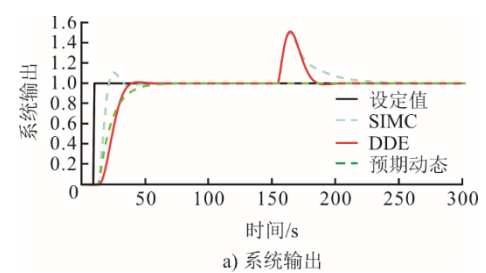


图 14 $M_s=1.8$ 下不同控制器控制效果对比
Fig.14 Comparison of control performance of different controllers when $M_s=1.8$

由表 4 可知，当 M_s 约束放宽至 1.8 与 2.0 时，除跟踪 IAE_{sp} 外，DDE 的其他性能指标均优于

SIMC。因此，当在动态性能与鲁棒性之间进行折中考虑时，基于 M_s 约束整定的 DDE 能够更好地平衡二者。

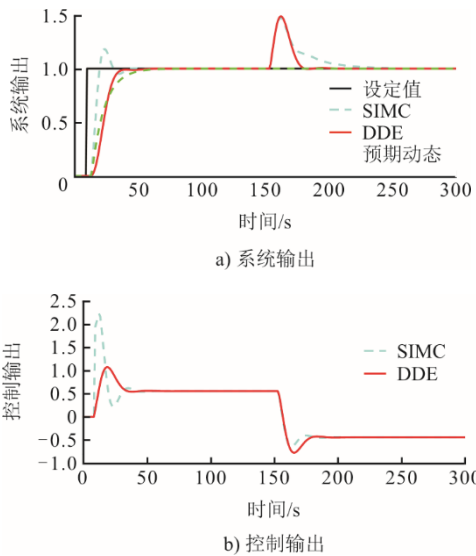


图 15 $M_s=2.0$ 下不同控制器控制效果对比
Fig.15 Control performance of different controllers when $M_s=2.0$

表 4 不同 M_s 约束下各控制器性能指标
Tab.4 Performance indicators of each controller under different M_s constraints

M_s	控制器	$\sigma/\%$	T_y/s	IAE_{sp}	IAE_{ud}	TV
1.4	SIMC	0	29	10.74	19.31	2.83
	DDE	0.74	46	20.52	15.22	2.02
1.6	SIMC	2.84	22	8.29	14.23	3.86
	DDE	0.64	35	16.92	10.22	2.48
1.8	SIMC	10.72	31	8.00	11.75	5.04
	DDE	1.23	27	14.54	7.94	3.00
2.0	SIMC	18.22	31	8.13	10.27	6.25
	DDE	0	26	13.68	6.67	3.35

4.2 现场试验研究

基于表 1 控制器参数，本节将 DDE 应用于实际的火电机组磨热一次风量控制系统中，在机组变负荷运行条件下试验了其控制性能并与 PI_f 的控制效果进行对比。当机组负荷变化约 50 MW 时， PI_f 的控制效果如图 16 所示，DDE-PI 的控制效果如图 17 所示。

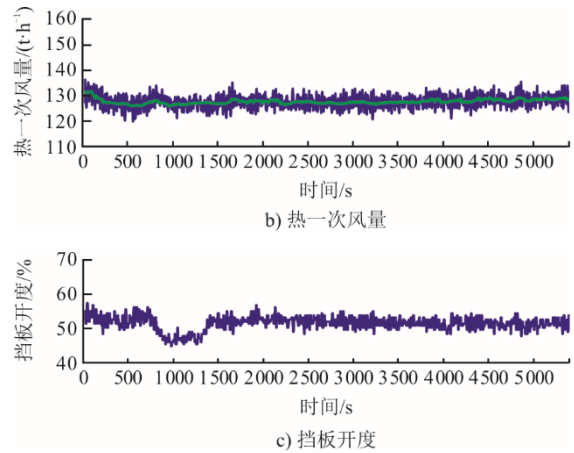
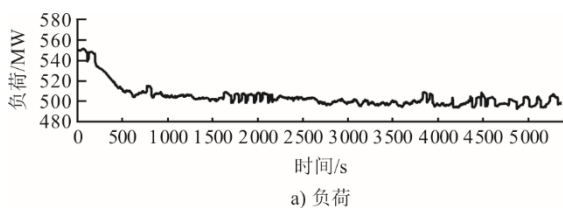


图 16 PI_f 的磨热一次风量控制效果
Fig.16 Control performance of hot primary air volume at the mill inlet using PI_f

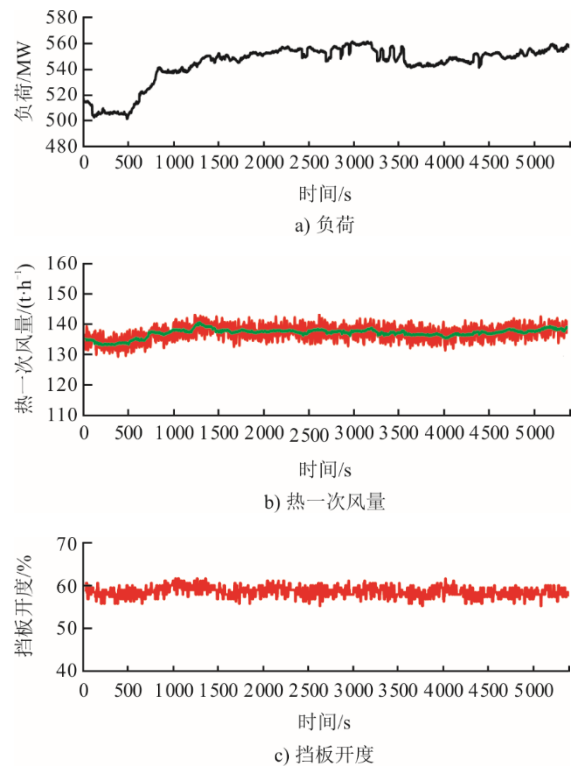


图 17 DDE 的磨热一次风量控制效果
Fig.17 Control performance of hot primary air volume at the mill inlet using DDE

图 16、图 17 中绿色线为设定值，蓝色线为 PI_f 控制的磨热一次风量，红色线为 DDE-PI 控制的磨热一次风量。对比图 16 和图 17 可知，当机组负荷变化时，风量在其设定值附近的波动较大，且挡板动作幅度较为明显。基于 M_s 约束整定 DDE 控制器，能够在改善系统抗扰性能的情况下，减小挡板的动作幅度。

为定量评价各控制器的热一次风量控制效果，表 5 计算了各控制器的动态性能指标，包括最大正

负偏差、平均绝对偏差、偏差标准差与挡板的总动作量 TV。表 5 中, e 为偏差, \bar{e}_{abs} 与 σ_e 分别为平均绝对偏差与偏差标准差。由表 5 可知, DDE 控制器能够保证磨热一次风量的最大正负偏差约为原 PI_f 控制器的 66%, 平均绝对偏差、偏差标准差约为原 PI_f 控制器的 90%, 挡板动作约为原 PI_f 控制器的 92%, 说明 DDE-PI 能够大幅减小风量的波动与挡板动作, 也表明 DDE-PI 控制效果的优越性。

表 5 不同控制器的磨热一次风量控制动态性能指标
Tab.5 Dynamic performance indexes of hot primary air volume control at the mill inlet using different controllers

控制器	负荷范围/MW	e^+ (th ⁻¹)	e^- (th ⁻¹)	\bar{e}_{abs} (th ⁻¹)	σ_e (th ⁻¹)	TV
PI _f	[499.6, 552.0]	6.03	6.15	1.54	1.91	1 839.25
DDE	[501.2, 551.2]	4.53	4.22	1.41	1.69	1 690.91

5 结 语

本文针对火电机组大范围变工况带来的控制难点, 在综合考虑控制器鲁棒性与动态性能的情况下提出了基于最大灵敏度约束整定的预期动态控制器。通过分析控制器参数变化对最大灵敏度的影响, 给出了基于最大灵敏度约束的 DDE-PI/PID 整定流程。最后在数值仿真与实际工程应用中验证了所提出的控制方法能够在机组变负荷运行的条件下能够获得良好的控制性能, 展现了其在工业上的应用前景。

【参 考 文 献】

[1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2024[R/OL]. (2024-07-11) [2024-01-02]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-341659>.
China Electricity Council. China power industry annual development report 2024[R/OL]. (2024-07-11) [2024-01-02]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-341659>.

[2] WU Z L, HE T, LIU Y H, et al. Physics-informed energy-balanced modeling and active disturbance rejection control for circulating fluidized bed units[J]. Control Engineering Practice, 2021, 116: 104934.

[3] MENNEMANN J F, MARKO L, SCHMIDT J, et al. Nonlinear model predictive control of a variable-speed pumped-storage power plant[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 29(2): 645-660.

[4] 王印松, 田靖雨, 李士哲, 等. 基于时域指标的火电机组负荷控制系统性能模糊综合评价[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 99-103.
WANG Yinsong, TIAN Jingyu, LI Shizhe, et al. Fuzzy comprehensive assessment of thermal power unit load control system based on time domain index[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 99-103.

[5] 牛玉广, 潘岩, 陈曦. 选择性催化还原烟气脱硝深度结构和深度控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(1): 65-72.
NIU Yuguang, PAN Yan, CHEN Xi. Depth structure control and depth control of selective catalytic reduction flue gas denitration system[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(1): 65-72.

[6] ZHU H X, SHEN J, SUN L, et al. Multi-model based predictive sliding mode control for bed temperature regulation in circulating fluidized bed boiler[J]. Control Engineering Practice, 2020, 101: 104484.

[7] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 56(3): 900-906.

[8] SUN L, ZHANG Y Q, LI D H, et al. Tuning of active disturbance rejection control with application to power plant furnace regulation[J]. Control Engineering Practice, 2019, 92: 104122.

[9] WU Z L, HE T, LI D H, et al. Superheated steam temperature control based on modified active disturbance rejection control[J]. Control Engineering Practice, 2019, 83: 83-97.

[10] 李炳楠, 朱峰, 梁正玉, 等. 基于改进自抗扰控制和数据驱动的脱硝系统设计及应用[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(6): 1034-1042.
LI Bingnan, ZHU Feng, LIANG Zhengyu, et al. Modified ADRC and data-driven for the denitration system design with its application[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(6): 1034-1042.

[11] 张亚军, 牛宏, 柴天佑. 数据与未建模动态驱动的非线性 PID 切换控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(3): 481-491.
ZHANG Yajun, NIU Hong, CHAI Tianyou. Data-based un-modeled dynamics driven nonlinear PID[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(3): 481-491.

[12] 于国强, 刘克天, 胡尊民, 等. 基于 Ziegler-Nichols 优化算法的火电机组负荷频率 PID 控制研究[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 137-144.
YU Guoqiang, LIU Ketian, HU Zunmin, et al. PID control of load frequency of thermal power unit based on Ziegler-Nichols optimization algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 137-144.

[13] SUN L, LI D H, LEE K Y. Optimal disturbance rejection for PI controller with constraints on relative delay margin[J]. ISA Transactions, 2020, 44(2): 11-16.

[14] O'DWYER A. Handbook of PI and PID controller tuning rules[M]. London: Imperial College Press, 2009: 1.

[15] SOMEFUN O A, AKINGBADE K, DAHUNSI F. The dilemma of PID tuning[J]. Annual Review of Control, 2021, 52: 65-74.

[16] 王维杰, 李东海, 高琪瑞, 等. 一种二自由度 PID 控制器参数整定方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(11): 1962-1966.
WANG Weijie, LI Donghai, GAO Qirui, et al. Two-degrees-of-freedom PID controller tuning method[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2008, 48(11): 1962-1966.

[17] MAKEXIM U, LI D H, ZHU M, et al. Desired dynamic equation based PID control for combustion vibration[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2015, 34: 107-117.

[18] WANG X, YAN X, LI D H, et al. An approach for setting parameters for two-degree-of-freedom PID controllers[J].

- Algorithm, 2018, 11: 48.
- [19] SHI G, WU Z L, LIU S J, et al. Research on the desired dynamic selection of a reference model-based PID controller: a case study on a high-pressure heater in a 600 MW power plant[J]. Processes, 2022, 10: 1059.
- [20] SHI G, MA M, LI D H, et al. A process-model-free method for model predictive control via a reference model-based proportional-integral-derivative controller with application to a thermal power plant[J]. Frontiers in Control Engineering, 2023, 4: 1185502.
- [21] TORNAMBÈ A, VALIGI P. A decentralized controller for the robust stabilization of a class of MIMO dynamical systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1994, 116: 293-304.
- [22] ASTROM K J, PANAGOPOULOS H, HAGGLUND T. Design of PI controllers based on non-convex optimization[J]. Automatica, 1998, 34: 585-601.
- [23] DORF R C, BISHOP R H. Modern control systems[M]. New York, NY: Pearson Education Inc., 2017: 1.
- [24] 杨国田, 何雨晨, 李鑫, 等. 基于梯度提升决策树改进双向门限循环单元的锅炉变负荷燃烧系统建模[J]. 热力发电, 2021, 50(12): 6-12.
- YANG Guotian, HE Yuchen, LI Xin, et al. Modeling of boiler combustion system at variable load using GBDT-BiGRU[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12): 6-12.
- [25] SKOGESTAD S. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning[J]. Journal of Process Control, 2003, 13(4): 291-309.
- [26] GRIMHOLT C, SKOGESTAD S. Optimal PI and PID control of first-order plus delay processes and evaluation of the original and improved SIMC rules[J]. Journal of Process Control, 2018, 70: 36-46.

(责任编辑 杜亚勤)