

一种新型高性能控制器的研究与应用

李军¹ 刘哲¹ 周永言¹

摘要 鉴于在控制实际中存在的 uncertainty 问题, 提出了一种针对大滞后过程的 uncertainty 抑制的新型高性能控制器 (New higher performance controller, NHPC). 基于在新型观测方法和新型控制方法包括新型滤波方法上的良好进展, 将一种新型超前观测器 (New advanced observer, NAO)、一种内反馈控制器 (Internal feedback controller, IFC) 包括一种正弦跟踪滤波器 (Sinusoid tracking filter, STF) 等用于构造 NHPC. 将 NHPC 运用于大滞后过程控制, 能够对较宽的范围内的时变性和非线性等 uncertainty 问题进行较好的抑制. 数学分析、仿真实验和实际电力控制工程应用的结果验证了本文所提观点和方法的正确性和有效性.

关键词 过程控制, 比例-积分-微分控制器, 正弦跟踪滤波器, 内反馈控制器, 新型超前观测器, 新型高性能控制器

引用格式 李军, 刘哲, 周永言. 一种新型高性能控制器的研究与应用. 自动化学报, 2020, 46(12): 2558–2571

DOI 10.16383/j.aas.c180241

Research and Application of a New Higher Performance Controller

LI Jun¹ LIU Zhe¹ ZHOU Yong-Yan¹

Abstract As the uncertainty in automatic control, a new higher performance controller (NHPC) of uncertainty suppression for large-lag process is proposed. Based on good progress in new observation methods and new control methods as well as new filtering methods, a new advanced observer (NAO) and a internal feedback controller (IFC) as well as a sinusoidal tracking filter (STF), etc. are used to construct NHPC. NHPC which can effectively suppress the time variability and nonlinear uncertainty in a wider range is used to large-lag process control. The mathematical analysis, simulation experiments and actual power engineering application results verify the correctness and effectiveness of the proposed ideas and methods in this paper.

Key words Process control, proportional-integral-derivative (PID) controller, sinusoid tracking filter (STF), internal feedback controller (IFC), new advanced observer (NAO), new high performance controller (NHPC)

Citation Li Jun, Liu Zhe, Zhou Yong-Yan. Research and application of a new higher performance controller. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(12): 2558–2571

反馈控制^[1] 是工业过程自动控制的基本原理, 起源于 18 世纪的瓦特原理^[2], 一种比例作用的反馈控制, 如果在比例项的基础上加入积分项和微分项^[3], 这就是比例积分微分 (Proportional-integral-derivative, PID) 控制器^[4–8]. 在 20 世纪 40 年代形成了以奈奎斯特 (Nyquist) 提出的奈氏稳定判据^[9]、伊文斯 (Evans) 提出的根轨迹法^[9] 等为核心的经典控制论^[9–10], 推动了 PID 控制技术在工业过程控制的广泛应用.

随后在 20 世纪 50 年代末现代控制论^[10] 出现, 主要有原苏联科学家庞特里亚金 (Pontryagin)

提出的极大值原理、美国学者贝尔曼 (Bellman) 创立的动态规划和卡尔曼 (Kalman) 建立的卡尔曼滤波理论^[11–12] 等. 经过半个多世纪的发展, 产生出宏大和严密的现代控制论和众多的先进控制策略^[13–21], 例如模型预测控制 (Model predictive control, MPC)^[17–20] 等. 从 20 世纪 70 年代开始, 系统辨识技术^[22–25] 以及计算机技术的高速发展^[26], 强有力地推动了现代控制论在工业过程中的应用.

文献 [19] 论述了 MPC 对电力工业复杂系统的重要性的意义, MPC 的主要特点是能够容易地处理控制约束问题. 在火电厂的过程控制系统, 约束优化有可能使过程控制量尽量紧贴系统安全允许的下限值, 能够显著地提高火电厂运行的经济性; 客观上, 由于存在过程的 uncertainty 问题, 约束优化的优势也伴随着风险的共存, 例如容易造成过程控制量的超限, 不利于火电厂运行的安全; 文献 [20] 指出: “目前预测控制理论和算法的主要成果是针对线性系统的, 由于实际应用领域中存在大量非线性控制问题, 这方面的研究特别是应用还很不成熟”.

收稿日期 2018-04-23 录用日期 2018-11-28
Manuscript received April 23, 2018; accepted November 28, 2018

国家重点研发计划 (2017YFB0903604) 资助
Support by National Key Research and Development Program of China (2017YFB0903604)

本文责任编辑 乔俊飞
Recommended by Associate Editor QIAO Jun-Fei
1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院 广州 510080
1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080

在控制科学的发展过程中, 还产生出种类丰富的、介于经典控制与先进控制之间的一类高性能控制策略: 例如基于神经网络的 PID^[27]、基于改进粒子群算法的 PID^[28]、基于改进遗传算法的 PID^[29]、Smith 预估控制器^[30-31]、内模控制器 (Internal model controller, IMC)^[32-33]、内模 PID^[34]、自适应鲁棒控制器^[35-36]、 H_∞ 鲁棒控制器^[37]、滑模控制器^[38] 等。

现代控制论的理论成果虽然完善和严密, 但是客观上并没有撼动 PID 控制在工业过程控制的基础地位. 1989 年, 韩京清^[39] 发表在《系统科学与数学》上的论文“控制理论: 模型论还是控制论”, 反映了他对现代控制论的观点. 韩京清认为控制理论有两个截然不同的思考方式: 模型论和控制论, 前者“靠系统的数学模型去找控制律的方法”, 后者依靠的则是系统的“某些响应特征或过程的某些实时信息”。

高志强^[2] 指出了长期并存于控制科学的 3 个范式: “工业范式、模型范式和抗扰范式”. 模型范式代表了现代控制论的思维方式和世界观^[2], “建模-优化”是先进控制的共性所在. 高志强^[2] 同时还指出: “工程控制中的被控对象大都是非线性、时变而且未知的”. 这一观点表明: 在控制实际中还存在大量的不确定性问题, 准确的数学模型难以获取, “建模-优化”对于不确定性基本没有意义. 目前来看, 抑制不确定性问题的最有效方法仍然是包括 PID 在内的反馈控制或者反馈校正^[40-41]. 这说明在提高反馈控制性能的方面还有很大的发展空间。

值得关注的是: 韩京清^[42] 提出了不依赖模型的自抗扰控制技术 (Active disturbance rejection control, ADRC), 指出了控制的核心是抗扰, 为人们重新认识控制问题的本质和指导解决实际的控制问题提供了一种全新的思路. ADRC 是一种以扩张状态观测器 (Extended state observation, ESO)^[43] 为核心的新型控制技术, 带宽与误差的反比关系^[2, 44] 是 ADRC 的显著特点, 通过调整 ESO 的频率带宽^[45] 能够实现任意精度跟踪扰动. 通过近 20 年的发展, ADRC 的研究和应用成果已经较为丰富^[45-51].

滤波的优劣也是决定控制性能的一个重要性因素, 例如滤波相位包括时间的滞后造成控制回路稳定裕度下降. 韩京清^[42] 从非线性最速跟踪 (Nonlinear optimal tracking, NOT)^[52] 的角度提出了非线性跟踪微分器 (Nonlinear tracking differentiator, NTD)^[52-54]. 相对线性跟踪微分器 (Linear tracking differentiator, LTD)^[55], NTD 显著提高了跟踪输入微分的“效率”. 但是 NOT 跟踪输入和 NTD 跟踪输入微分的特性还与输入的幅值有关。

在火电厂的过程控制实践中, 新型控制策略包

括新型滤波方法和新型观测方法等取得了良好的进展; 文献 [56-58] 从正弦跟踪 (Sinusoid tracking, ST) 的角度分别提出了一种正弦跟踪滤波器 (Sinusoid tracking filter, STF)^[56] 和一种正弦跟踪微分器 (Sinusoid tracking differentiator, STD)^[57-58]. STF 跟踪输入和 STD 跟踪输入微分的滞后较小, 并且跟踪特性与输入幅值无关; 文献 [59] 提出了一种基于并联降阶 (Parallel reduction order, PRO) 和高增益 PI (High gain of PI, HGPI) 控制器的内反馈控制 (Internal feedback control, IFC) 方法, 核心是一种内反馈器 (Internal feedback device, IFD). IFD 的实质是一种控制过程的并联降阶器, 通过 PRO 作用, 将 HGPI 实际控制的阶次降低为一阶, 有效提高了 IFC 在大滞后过程的控制性能. 所谓大滞后是高阶较大惯性和较大纯滞后特性的一种简称. 通常认为: 在大滞后过程, 纯滞后比例在 30% 以上时, 则属于一种难控过程. 文献 [60] 提出了一种新型抗扰控制方法 (New disturbance rejection control, NDRC), 主要适用于低阶过程的抗扰控制。

针对在控制实际中存在的纯滞后问题, 本文提出了一种新型超前观测 (New advanced observer, NAO) 方法, 提供了一种在频率特性上针对纯滞后过程的超前观测, 这是 NAO 与一些超前观测的显著区别所在; 针对在控制实际中存在的 uncertainty 问题, 本文提出了一种基于 NAO、IFC、STF 的新型高性能控制器 (New higher performance controller, NHPC)。

长期以来, 在过程控制领域, 包括在火电厂过程控制实际, 形成了以 PID 控制为主, 先进控制、高性能控制、自抗扰控制、新型控制等共存的基本现状。

注. 本文中变量 (包括符号) 的表达具有唯一性, 可相互引用; 出于表述简洁性的需要, 文中对使用到的变量单位进行统一. 如文中无特别说明, 时间包括时间常数的单位为 s, 频率包括频率带宽的单位为 rad/s, 增益包括幅频增益的单位无量纲, 相位包括相频相位和相位稳定裕度的单位为 $^\circ$, 阶次的单位无量纲。

1 正弦跟踪滤波器

STF^[56] 是用于构造新型高性能控制器, 即 NHPC 的重要基础之一. STF 来源于一种二阶惯性滤波器 (Second order inertial filter, SOIF) 的内部结构^[56], 一种由 LC 滤波器 (LC filter, LCF)^[56] 和 LCR^[26] 正弦跟踪器 (LCR sinusoid tracking, LCR-ST)^[56] 构造的结构, 如图 1 所示。

LCR-ST 是一种 LCR 带通滤波器^[26]. 在图 1 中, 如果用文献 [56] 提出的一种新型正弦跟踪器 (New sinusoid tracking, NST)^[56] 取代 LCR-ST,

则得到 STF. 构造 NST 的基础是一种正交混频方法^[61-62].



图1 二阶惯性滤波器内部结构示意图

Fig. 1 The inside structure diagram of second order inertial filter

SOIF 和 STF 的传递函数分别表达为

$$W_{\text{SOIF}}(s) = \frac{1}{(1 + T_{\text{SOIF}}s)^2}$$

$$W_{\text{SOIF}}(s) = W_{\text{LC}}(s)[1 - W_{\text{LCR-ST}}(s)]$$

$$W_{\text{STF}}(s) = W_{\text{LC}}(s)[1 - W_{\text{NST}}(s)]$$

$$W_{\text{LC}}(s) = \frac{1}{1 + (T_{\text{SOIF}}s)^2}$$

$$W_{\text{LCR-ST}}(s) = \frac{2T_{\text{SOIF}}s}{(1 + T_{\text{SOIF}}s)^2} \quad (1)$$

式中, $W_{\text{SOIF}}(s)$ 为 SOIF 的传递函数, $W_{\text{STF}}(s)$ 为 STF 的传递函数, T_{SOIF} 为惯性时间常数, $W_{\text{LC}}(s)$ 为 LCF 的传递函数, $W_{\text{LCR-ST}}(s)$ 为 LCR-ST 的传递函数, $W_{\text{NST}}(s)$ 为 NST 的传递函数. T_{SOIF} 也代表 LCF 和 STF 的滤波时间常数.

为了说明 STF 的滤波特性, 对式 (6) 给出的过程对象 (Process object, PO) 在单位阶跃激励的过程输出分别进行 SOIF 和 STF 滤波. 用 $Y_{\text{PO}}(t)$ 表达 PO 的过程输出, 用 $Y_{\text{PO-STF}}(t)$ 和 $Y_{\text{PO-SOIF}}(t)$ 分别表达 STF 和 SOIF 跟踪 $Y_{\text{PO}}(t)$ 的输出. 其中在 PO 参数为: $n = 4$, $T_{\alpha} = 100 \text{ s}$, $K_{\alpha} = 1$, $T_{\text{SOIF}} = 20 \text{ s}$, 得到的实验结果如图 2 所示.

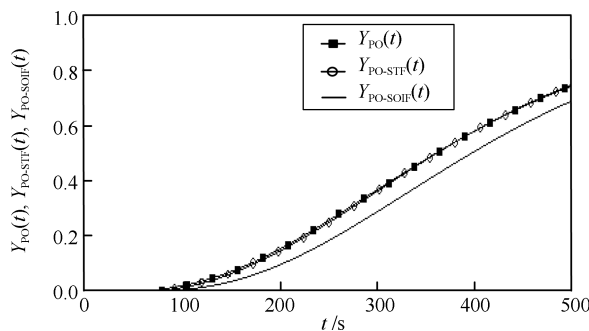


图2 滤波特性对比示意图

Fig. 2 Comparison diagram of filter characteristics

由图 2 可见, STF 跟踪 $Y_{\text{PO}}(t)$ 的特性远优于 SOIF.

由于 STF 跟踪输入的滞后较小, 通常在工程计算上不考虑 STF.

2 新型超前观测方法

超前观测是利用一些超前策略获取过程响应的超前信息, 对于提高过程控制性能具有重要意义. 超前策略有多种形式, 例如 ESO^[43]、微分器^[52-58]、2 阶惯性逆模型 (Second order inertial inverse model, SOIIM)^[56]、比例微分 (Proportion differentiation, PD) 控制器^[63]、相位超前校正^[64] 等.

在控制实际中, 惯性滞后过程 (Inertial lag process, ILP) 是普遍存在的. 其中惯性逆模型 (Inertial inverse model, IIM) 可以实现针对 ILP 的超前观测. 在理想情况下, IIM 能够观测到 ILP 的输入; 由于理论与实际之间存在偏差, 2 阶以上高阶 IIM (Higher order IIM, HOIIM) 在工程上的意义不大.

在控制实际中, 纯滞后过程也是普遍存在的, 相对于惯性滞后, 纯滞后的阶次无穷大; Smith 预估控制器^[30-31] 是一种基于对象数学模型和针对过程纯滞后补偿的一种高性能控制策略. 在控制实际中准确模型包括准确纯滞后难以获取, Smith 预估控制运用并不普遍.

目前的超前观测对于纯滞后过程没有针对性, 为了解决这个问题, 本文提出了一种新型超前观测方法, 即 NAO.

理论上, 纯滞后逆 (Pure lag inverse, PLI) 是一种针对纯滞后过程的理想超前观测器 (Ideal advanced observation, IAO), 表达为

$$W_{\text{IAO}}(s) = e^{T_{\text{AO}}s}$$

$$W_{\text{IAO}}(j\omega) = G_{\text{IAO}}(\omega)e^{jPH_{\text{IAO}}(\omega)} \quad (2)$$

式中, $W_{\text{IAO}}(s)$ 为 IAO 的传递函数, T_{AO} 为超前观测时间常数, $W_{\text{IAO}}(j\omega)$ 为 IAO 的频域函数, ω 为正弦频率. $G_{\text{IAO}}(\omega)$ 为 IAO 的幅频增益, $PH_{\text{IAO}}(\omega)$ 为 IAO 的相频相位.

但是 IAO 是一种非实时的超前观测, 在实时系统中无法实现.

控制科学也是一种实验科学^[2], 通过大量的实验计算, 本文找到了一种在频域特性上近似 IAO 的方法, 即 NAO, 表达为

$$W_{\text{NAO}}(s) = \frac{1.2 \sum_{i=1}^{i=5} (1 + 0.8 T_{\text{AO}}s)^i}{\sum_{i=1}^{i=6} (1 + 0.4 T_{\text{AO}}s)^i}$$

$$W_{\text{NAO}}(j\omega) = G_{\text{NAO}}(\omega)e^{jPH_{\text{NAO}}(\omega)}$$

$$\omega_{AO} = \frac{1}{T_{AO}} \quad (3)$$

式中, $W_{NAO}(s)$ 为 NAO 的传递函数, $W_{NAO}(j\omega)$ 为 NAO 的频域函数, $G_{NAO}(\omega)$ 为 NAO 的幅频增益, $PH_{NAO}(\omega)$ 为 NAO 的相频相位, ω_{AO} 为超前观测频率带宽.

根据式 (2) 和式 (3), 得到 IAO 和 NAO 的频率特性的计算结果, 如图 3 所示.

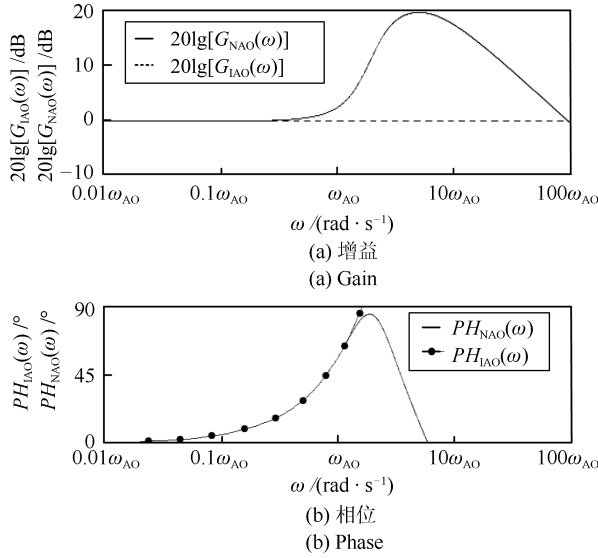


图 3 新型超前观测器的频率特性示意图
Fig. 3 Frequency characteristic diagram of new advanced observer

在图 3 中, $G_{IAO}(\omega)$ 和 $G_{NAO}(\omega)$ 采用对数 dB 增益. 在 ω_{AO} 以内, NAO 与 IAO 相比的相位误差 (Phase error) 小于 0.5° . NAO 的高频增益趋于 0, 具有较好的噪声干扰滤波特性.

ω_{AO} 与 T_{AO} 的反比关系是 NAO 的基本特性. 在系统频率带宽 (System frequency bandwidth, SFB) $\omega_{SFB} < \omega_{AO}$ 时, NAO 能够提供在时间超前上相对准确的观测.

直观地了解 NAO 的特性, 对 PO 在单位阶跃激励的过程输出进行 NAO 观测. 其中在 PO 参数为: $n = 4$, $T_\alpha = 80$ s, $K_\alpha = 1$, 得到 $\omega_{SFB} \approx 0.00543$ rad/s, 设置 $\omega_{AO} = 0.01$ rad/s 或 $T_{AO} = 100$ s. 得到的实验结果如图 4 所示.

在图 4 中, $Y_{PO-NAO}(t)$ 为 $Y_{PO}(t)$ 的 NAO 输出, 可见 NAO 对 $Y_{PO}(t)$ 具有较好的超前观测性能.

过程响应的本身已经携带了各种信息, 例如过程模型的信息、耦合作用的信息、不确定性扰动信息等. 采用 NAO 能够提前获取这些信息, 对于提高大滞后过程的控制性能具有积极意义.

NAO 是用于构造新型高性能控制器, 即 NHPC

的重要基础之一.

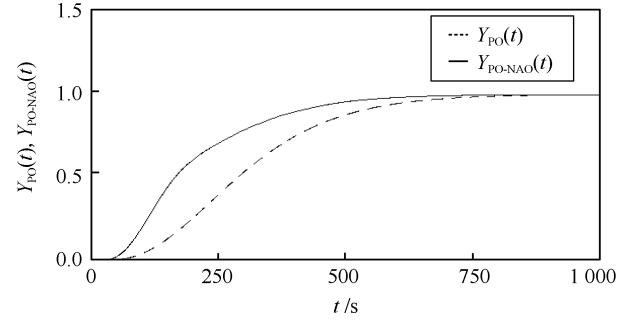


图 4 新型超前观测过程示意图

Fig. 4 The diagram of new advanced observer process

3 新型高性能控制器

为了能够较好地解决大滞后过程控制中的不确定性的抑制问题, 本文提出了一种基于 NAO、IFC^[59] 包括 STF^[56] 的新型高性能控制器, 即 NHPC, 如图 5 所示.

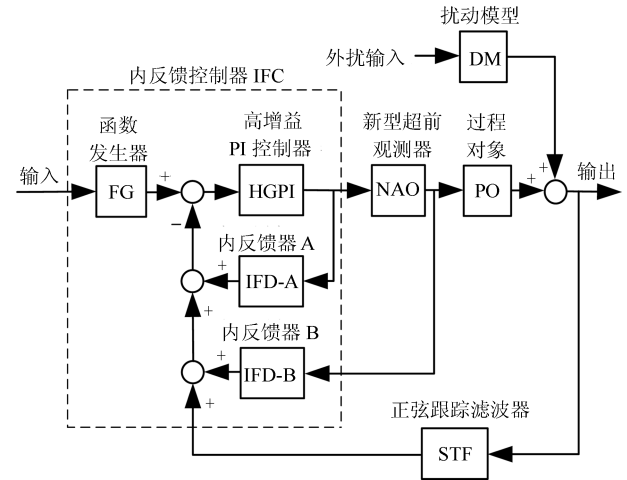


图 5 新型高性能控制器示意图

Fig. 5 The diagram of new higher performance controller

在图 5 中, 函数发生器 (Function generator, FG) 用于简单的过程轨迹控制, IFD 由内反馈器 A (IFD of A, IFD-A) 和内反馈器 B (IFD of B, IFD-B) 所组成. 外扰通过扰动模型 (Disturbance model, DM) 直接叠加在 PO 的过程输出中, 相当于施加了一种外部耦合作用.

NHPC 与 IFC 的主要区别是, 如果取消 NHPC 中的 NAO, 则得到 IFC.

NHPC 是一种将 IFC 中的 IFD 拆分为 IFD-A 和 IFD-B 的结构, 表达为

$$W_{IFD}(s) = W_{IFD-A}(s) + W_{IFD-B}(s) =$$

$$K_{\text{IFD}} \frac{T_{\text{IFD}} s}{(1 + T_{\text{IFD}} s)^2} \sum_{i=0}^{i=n-2} \left(\frac{1}{1 + T_{\text{IFD}} s} \right)^i$$

$$W_{\text{IFD-A}}(s) = K_{\text{IFD}} \frac{T_{\text{IFD}} s}{(1 + T_{\text{IFD}} s)^2}$$

$$W_{\text{IFD-B}}(s) = \frac{K_{\text{IFD}} T_{\text{IFD}} s}{(1 + T_{\text{IFD}} s)^3} \sum_{i=0}^{i=n-3} \left(\frac{1}{1 + T_{\text{IFD}} s} \right)^i \quad (4)$$

其中, $W_{\text{IFD}}(s)$ 为 IFD 的传递函数, $W_{\text{IFD-A}}(s)$ 为 IFD-A 的传递函数, $W_{\text{IFD-B}}(s)$ 为 IFD-B 的传递函数. K_{IFD} 为 IFD 的增益, T_{IFD} 为统一的时间常数, n 为整数阶次.

在 NHPC 中, HGPI 与 IFD-A 构成了一种内部 PID 控制器 (Inside PID, IPID), 表达式为

$$W_{\text{IPID}}(s) \approx \frac{1}{W_{\text{IFD-A}}(s)} = \frac{1}{K_{\text{IFD}}} \left[2 + \frac{1}{T_{\text{IFD}} s} + T_{\text{IFD}} s \right] \quad (5)$$

其中, $W_{\text{IPID}}(s)$ 为 IPID 的传递函数.

研究表明, 将 NAO 放在反馈通道或者放在 IPID 后面, 在外扰抑制上没有区别. 如果将 NAO 放在反馈通道, 主要问题是对输出跟踪输入的速度有较大的影响. 因此, 实际将 NAO 放在 IPID 的后面.

不考虑 STF, 则 IFD-B 是 PO 的一种 PRO, 表达式为

$$W_{\text{PO}}(s) = \frac{K_{\alpha}}{(1 + T_{\alpha} s)^n} \quad n \geq 3$$

$$W_{\text{PRO}}(s) = W_{\text{IFD-B}}(s) + W_{\text{PO}}(s) = \frac{K_{\alpha}}{(1 + T_{\alpha} s)^2}$$

$$K_{\text{IFD}} = K_{\alpha}, \quad T_{\text{IFD}} = T_{\alpha} \quad (6)$$

其中, $W_{\text{PO}}(s)$ 为 PO 的传递函数, K_{α} 为 PO 的增益, T_{α} 为 PO 的惯性时间常数, $W_{\text{PRO}}(s)$ 为 IFD-B 与 PO 并联的传递函数.

由式 (6) 可知, 如果 PO 模型已知, 则 IFD-B 与 PO 模型并联的结果得到二阶惯性环节, IPID 实际控制的是二阶惯性环节, 这就是 PRO 的作用.

不考虑 STF, 得到 NHPC 开环频域函数为

$$W_{\text{NHPC-OL}}(j\omega) = \frac{W_{\text{IPID}}(j\omega) W_{\text{NAO}}(j\omega) W_{\text{PO}}(j\omega)}{1 + W_{\text{IPID}}(j\omega) W_{\text{NAO}}(j\omega) W_{\text{IFD-B}}(j\omega)} = G_{\text{NHPC-OL}}(\omega) e^{jP_{\text{NHPC-OL}}(\omega)}$$

$$PM_{\text{NHPC-OL}} = 180 + PH_{\text{NHPC-OL}}(\omega) \quad (7)$$

其中, $W_{\text{NHPC-OL}}(j\omega)$ 为 NHPC 的开环系统频域函数. $W_{\text{IPID}}(j\omega)$ 、 $W_{\text{NAO}}(j\omega)$ 、 $W_{\text{PO}}(j\omega)$ 、 $W_{\text{IFD-B}}(j\omega)$ 分别为 IPID、NAO、PO、IFD-B 的频域函数. $G_{\text{NHPC-OL}}(\omega)$ 为 NHPC 的开环系统幅频增益. $PH_{\text{NHPC-OL}}(\omega)$ 为 NHPC 的开环系统相频相位. $PM_{\text{NHPC-OL}}$ 为 NHPC 的开环系统相位稳定裕度.

具体在 PO 参数为: $n = 4$, T_{α} 变化范围为 $1 \sim 300$ s, K_{α} 变化范围为 $0.5 \sim 2.0$. IFD 参数为: $T_{\text{IFD}} = 100$ s, $K_{\text{IFD}} = 1$. NAO 参数为: $T_{\text{AO}} = 100$ s. 得到 $PM_{\text{NHPC-OL}}$ 的计算结果, 如图 6 所示.

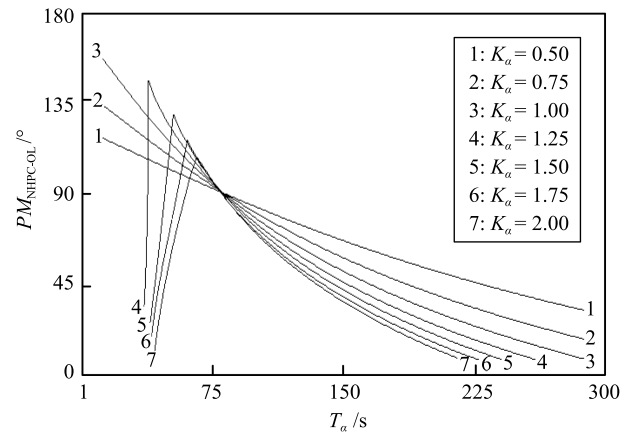


图 6 NHPC 开环系统相位稳定裕度

Fig. 6 The diagram of open loop system phase stability margin of NHPC

通过对图 6 的分析可知, 给出的 7 条 $PM_{\text{NHPC-OL}}$ 随 T_{α} 变化的曲线基本在 $PM_{\text{NHPC-OL}} = 90^\circ$ 和 $T_{\alpha} \approx 80$ s 处交会, 说明 NAO 起到了一种在频率特性上的“聚合作用”. 可以认为: 在 $T_{\alpha} = 80$ s 时, $PM_{\text{NHPC-OL}}$ 基本不随 K_{α} 变化, 这是一个有价值的重要特性, 表明了在这 7 条曲线的交会区, 对过程的非线性具有较好的抑制性能.

出于对比需要, 根据第 5 节给出的 PID 参数, 用 $PM_{\text{PID-OL}}$ 表达 PID 开环系统相位稳定裕度. 在相同的过程变化条件下, 得到 $PM_{\text{PID-OL}}$ 的计算结果, 如图 7 所示.

由图 7 可见, 给出的 7 条 $PM_{\text{PID-OL}}$ 随 T_{α} 变化的曲线没有共同的交会区, 而且 $PM_{\text{PID-OL}}$ 随 K_{α} 变化的发散度较大, 表明了 PID 抑制过程非线性的性能较差. 客观地看问题, 在 $K_{\alpha} > 1$ 时, 稳定范围在 T_{α} 的下限优于 NHPC, 这是事物的矛盾性所决定的.

4 新型高性能控制器与内模控制器的对比

内模控制器 (IMC)^[32-33] 是一种基于过程数学

模型进行控制器设计的高性能控制策略. 基本的 IMC 系统如图 8 所示.

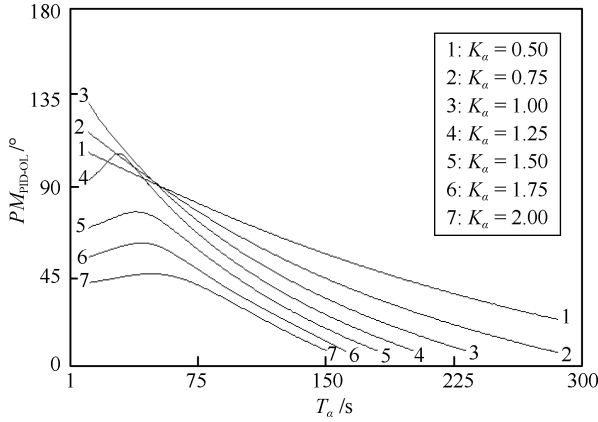


图 7 PID 开环系统相位稳定裕度

Fig. 7 The diagram of open loop system phase stability margin of PID

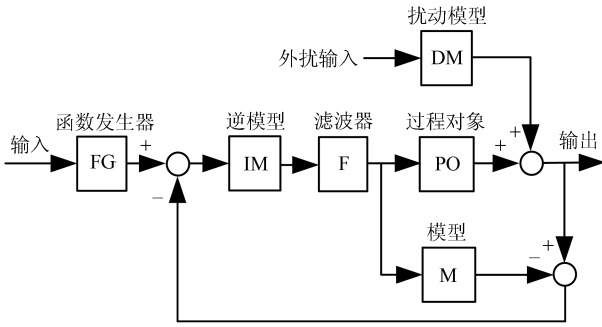


图 8 内模控制系统示意图

Fig. 8 The diagram of internal model control system

在图 8 中, IMC 系统由 FG、逆模型 (Inverse model, IM)、滤波器 (Filter, F)、模型 (Model, M)、PO、DM 等构成.

不考虑 FG, IMC 闭环传递函数为

$$W_{\text{IMC-CL}}(s) = \frac{W_{\text{IM}}(s)W_{\text{F}}(s)W_{\text{PO}}(s)}{1 - W_{\text{IM}}(s)W_{\text{F}}(s)[W_{\text{M}}(s) - W_{\text{PO}}(s)]} = W_{\text{F}}(s)$$

$$W_{\text{M}}(s) = W_{\text{PO}}(s)$$

$$W_{\text{IM}}(s)W_{\text{M}}(s) = 1 \quad (8)$$

其中, $W_{\text{IMC-CL}}(s)$ 为 IMC 的闭环传递函数. $W_{\text{IM}}(s)$ 为 IM 的传递函数. $W_{\text{F}}(s)$ 为 F 的传递函数. $W_{\text{M}}(s)$ 为 M 的传递函数.

由式 (8) 可知, 在 M 与 PO 传递函数匹配、IM 与 M 传递函数相乘等于 1 的情况下, IMC 的闭环传递函数等于 F 的传递函数.

由于理论与实际之间存在较大的偏差, 在控制实际中准确的模型难以获取, 高于 2 阶的 IM 在工程的意义不大. 工程上, IM 的阶次不宜超过 2 阶.

出于研究的需要, 定义 IM 为 SOIIM^[56], F 为 SOIF^[56], M 为高阶惯性模型 (High order inertial model, HOIM), 表达式为

$$W_{\text{IM}}(s) = K_{\text{IM}}(1 + T_{\text{IM}}s)^2$$

$$W_{\text{F}}(s) = \frac{1}{(1 + T_{\text{F}}s)^2}$$

$$W_{\text{M}}(s) = \frac{K_{\text{M}}}{(1 + T_{\text{M}}s)^n}$$

$$K_{\text{IM}}K_{\text{M}} = 1 \quad (9)$$

其中, K_{IM} 为 IM 的增益, T_{IM} 为 IM 的惯性时间常数; T_{F} 为 F 的惯性滤波时间常数; K_{M} 为 M 增益, T_{M} 为 M 的惯性时间常数.

IMC 开环系统频域函数为

$$W_{\text{IMC-OL}}(j\omega) = \frac{W_{\text{IM}}(j\omega)W_{\text{F}}(j\omega)W_{\text{PO}}(j\omega)}{1 - W_{\text{IM}}(j\omega)W_{\text{F}}(j\omega)W_{\text{M}}(j\omega)} = G_{\text{IMC-OL}}(\omega)e^{jPH_{\text{IMC-OL}}(\omega)}$$

$$PM_{\text{IMC-OL}} = 180 + PH_{\text{IMC-OL}}(\omega) \quad (10)$$

其中, $W_{\text{IMC-OL}}(j\omega)$ 为 IMC 的开环系统频域函数. $W_{\text{IM}}(j\omega)$, $W_{\text{F}}(j\omega)$, $W_{\text{M}}(j\omega)$ 分别为 IM, F, M 的频域函数; $G_{\text{IMC-OL}}(\omega)$ 为 IMC 的开环系统幅频增益, $PH_{\text{IMC-OL}}(\omega)$ 为 IMC 的开环系统相频相位, $PM_{\text{IMC-OL}}$ 为 IMC 的开环系统频域相位稳定裕度.

具体在 IM 参数为: $T_{\text{IM}} = 80 \text{ s}$, $K_{\text{IM}} = 1$. F 参数为: $T_{\text{F}} = 10 \text{ s}$. M 参数为: $n = 4$, $T_{\text{M}} = 80 \text{ s}$, $K_{\text{M}} = 1$. 在与图 6 相同的过程变化条件下, 得到 $PM_{\text{IMC-OL}}$ 的计算结果, 如图 9 所示.

通过将图 9 与图 6 进行对比可以发现, 在相同的过程变化条件下, IMC 抑制过程不确定性的性能明显不如 NHPC, 具体表现在: $PM_{\text{IMC-OL}}$ 随 T_{α} 和 K_{α} 变化的稳定范围相对较窄, 表明了 IMC 的鲁棒性能不如 NHPC. 在图 9 中, 给出的 7 条 $PM_{\text{IMC-OL}}$ 随 T_{α} 变化的曲线没有共同的交会区, 表明了 IMC 抑制过程非线性的性能不如 NHPC.

5 仿真实验

为了考察 NHPC 的控制性能, 在数字计算机上进行了仿真实验, 其中数值离散计算间隔为 1 s. 本文主要从抑制不确定性的方面考察 NHPC 的控制性能.

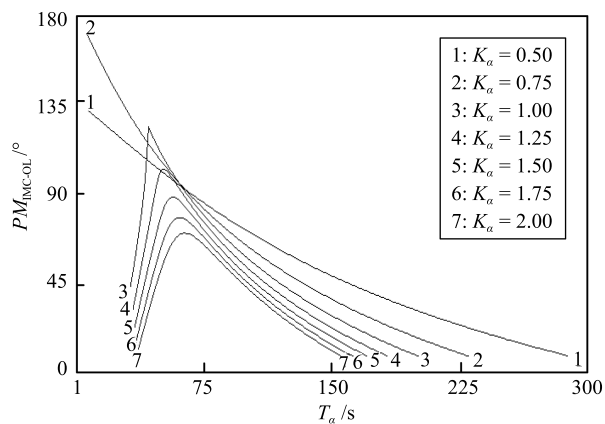


图9 IMC 开环系统相位稳定裕度

Fig. 9 The diagram of open loop system phase stability margin of IMC

由于在控制实际中 PID 运用比较普遍,因此在仿真实验上,主要将 NHPC 控制与 PID 控制进行对比。

出于仿真实验需要,简单考虑,FG 和 DM 均采用二阶惯性环节,表达式为

$$W_{FG}(s) = \frac{1}{(1 + T_{FG1}s)(1 + T_{FG2}s)}$$

$$W_{DM}(s) = \frac{1}{(1 + T_{DM}s)^2} \quad (11)$$

其中, $W_{FG}(s)$ 为 FG 的传递函数, T_{FG1} 和 T_{FG2} 为 FG 的 2 个惯性时间常数. $W_{DM}(s)$ 为 DM 的传递函数, T_{DM} 为 DM 的惯性时间常数。

用 $PV_{NHPC}(t)$ 和 $PV_{PID}(t)$ 分别表达 NHPC 和 PID 控制的过程输出,用 $CO_{NHPC}(t)$ 和 $CO_{PID}(t)$ 分别表达 NHPC 和 PID 控制器的输出.其中控制输入和外扰采用阶跃信号。

PID 中的微分作用采用实际微分环节^[65],一种理想微分 (Ideal differentiation, ID)^[57-58] 和一阶惯性滤波 (First order inertial filter, FOIF) 的串联结构.对 PID 参数整定的原则是:在输入阶跃变化时,过程输出不出现超调,目的是保证 PID 对确定性对象具有较好的控制特性,能够更真实地进行对比。

PID 表达式为

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{1}{T_i s} + K_d \frac{T_d s}{1 + T_d s} \quad (12)$$

其中, $W_{PID}(s)$ 为 PID 的传递函数, K_p 为比率增益, T_i 为积分时间常数, K_d 为实际微分增益, T_d 为实际微分时间常数。

在 PO 参数为: $n = 4$, $K_\alpha = 1$, $T_\alpha = 80$ s. IFD 参数为: $K_{IFD} = 1$, $T_{IFD} = 100$ s. STF 参数为:

$T_{SOIF} = 10$ s. NAO 参数为: $T_{AO} = 100$ s. FG 参数为: $T_{FG1} = 100$ s, $T_{FG2} = 50$ s. DM 参数为: $T_{DM} = 80$ s; 另外,经多次调整,得到 PID 参数为: $K_p = 0.75$, $T_i = 295$ s, $T_d = 100$ s, $K_d = 0.35$. 之后文中如无特别说明,保持上述参数不变。

其中,输入为 1,外扰为 0.5,得到的实验结果如图 10 所示。

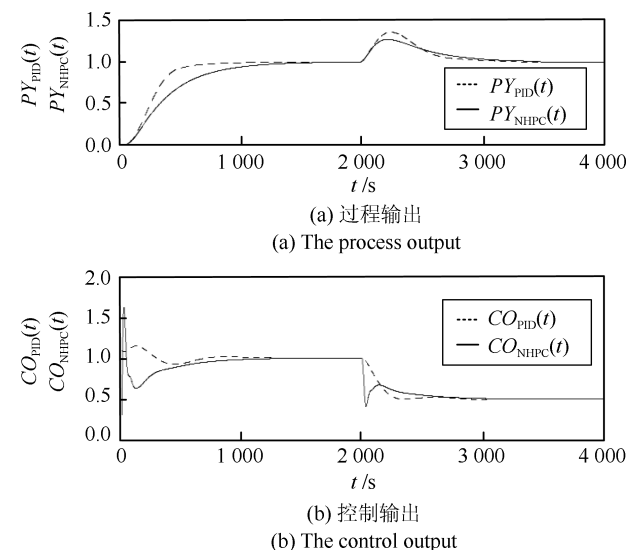


图10 控制特性仿真实验结果(意图1)

Fig. 10 The results of control characteristic simulation (NO. 1)

之后文中如无特别说明,均默认输入为 1 和外扰为 0.5。

将 $T_\alpha = 80$ s 改为 $T_\alpha = 50$ s,得到的实验结果如图 11 所示。

将 $K_\alpha = 1$ 改为 $K_\alpha = 2$.得到的实验结果如图 12 所示。

图 12 给出的实验结果说明: NHPC 在抑制过程增益变化的性能上明显优于 PID。

在 PO 中增加 125 s 的纯滞后,得到的实验结果如图 13 所示。

图 13 给出的实验结果说明: NHPC 在抑制过程时间变化的性能上明显优于 PID。

在 PO 中增加 125 s 的纯滞后,并且对过程输出 $PV_{PID}(t)$ 和 $PV_{NHPC}(t)$ 进行指数处理,具体为 $[PV_{PID}(t)]^{1.25}$ 和 $[PV_{NHPC}(t)]^{1.25}$,目的是模拟较弱非线性的大滞后过程.得到的实验结果如图 14 所示。

图 14 给出的实验结果说明: NHPC 在抑制大滞后过程的较弱非线性的性能上明显优于 PID。

在 PO 中增加 200 s 的纯滞后,得到的实验结果如图 15 所示。

在图 15 中,纯滞后所占比例为 38%,属于一种

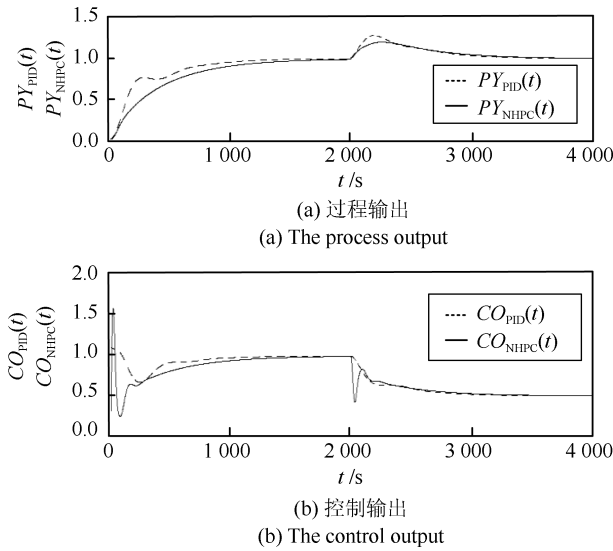


图 11 控制特性仿真实验结果 (意图 2)
Fig. 11 The results of control characteristic simulation (NO. 2)

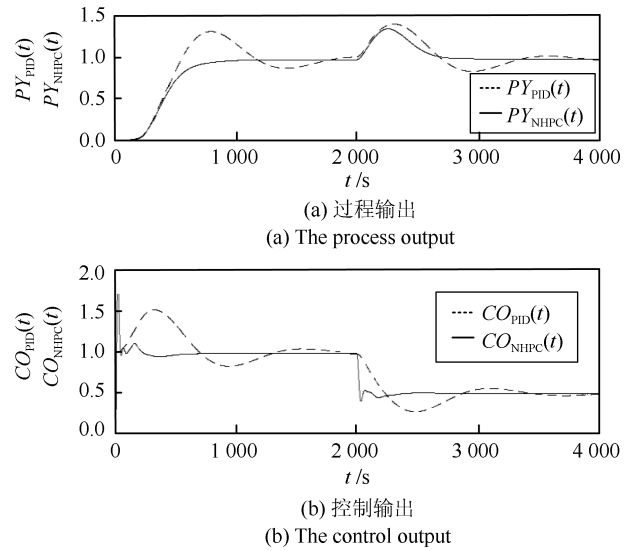


图 13 控制特性仿真实验结果 (意图 4)
Fig. 13 The results of control characteristic simulation (NO. 4)

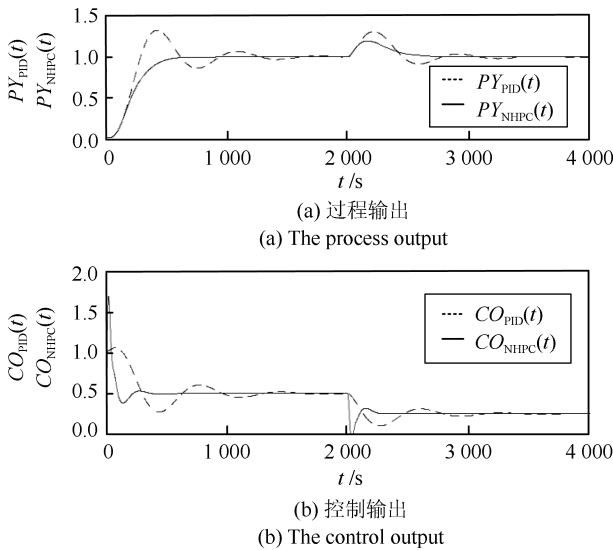


图 12 控制特性仿真实验结果 (意图 3)
Fig. 12 The results of control characteristic simulation (NO. 3)

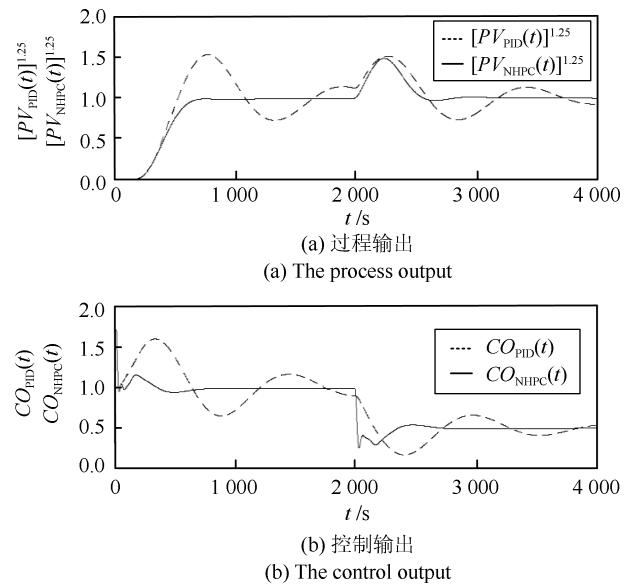


图 14 控制特性仿真实验结果 (意图 5)
Fig. 14 The results of control characteristic simulation (NO. 5)

难控过程. 实验结果说明, 在不改变 NHPC 参数的前提下, NHPC 对于难控过程仍然具有良好的控制性能. 如果改变 NHPC 的参数则对于纯滞后比例 60% 以内的大滞后难控过程也具有较好的控制性能.

在 PO 中增加 50s 的纯滞后, 并且对过程输出 $PV_{PID}(t)$ 和 $PV_{NHPC}(t)$ 进行平方处理, 即 $[PV_{PID}(t)]^2$ 和 $[PV_{NHPC}(t)]^2$, 目的是模拟较强非线性的大滞后过程. 得到的实验结果如图 16 所示.

图 16 给出的实验结果说明: NHPC 在抑制大滞后过程的较强非线性的性能上明显优于 PID.

对过程输出 $PV_{PID}(t)$ 和 $PV_{NHPC}(t)$ 进行立方处理, 即 $[PV_{PID}(t)]^3$ 和 $[PV_{NHPC}(t)]^3$, 目的是模拟超强非线性的大滞后过程. 得到的实验结果如图 17 所示.

图 17 给出的实验结果说明: NHPC 在抑制大滞后过程的超强非线性的性能上显著优于 PID.

在图 17 实验结果的基础上, 取消 NHPC 中的 NAO, 则得到 IFC 控制. 用 $CO_{IFC}(t)$ 和 $PV_{IFC}(t)$ 分别表达 IFC 的控制器输出和过程输出. 得到的实验结果如图 18 所示.

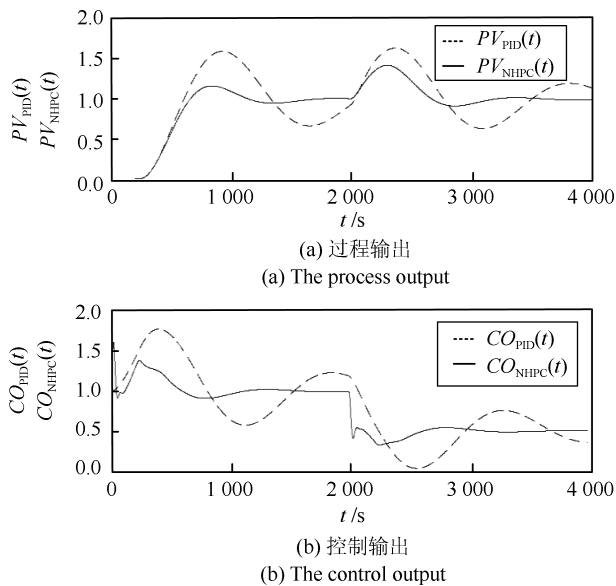


图 15 控制特性仿真实验结果 (意图 6)
Fig. 15 The results of control characteristic simulation (NO. 6)

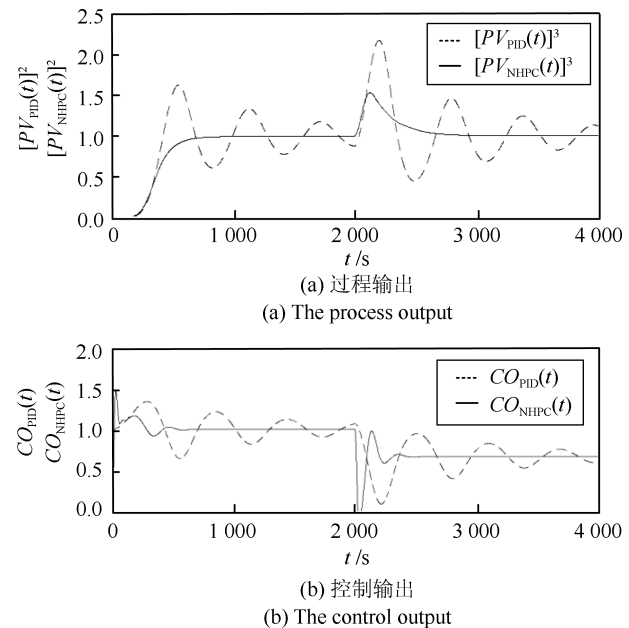


图 17 控制特性仿真实验结果 (意图 8)
Fig. 17 The results of control characteristic simulation (NO. 8)

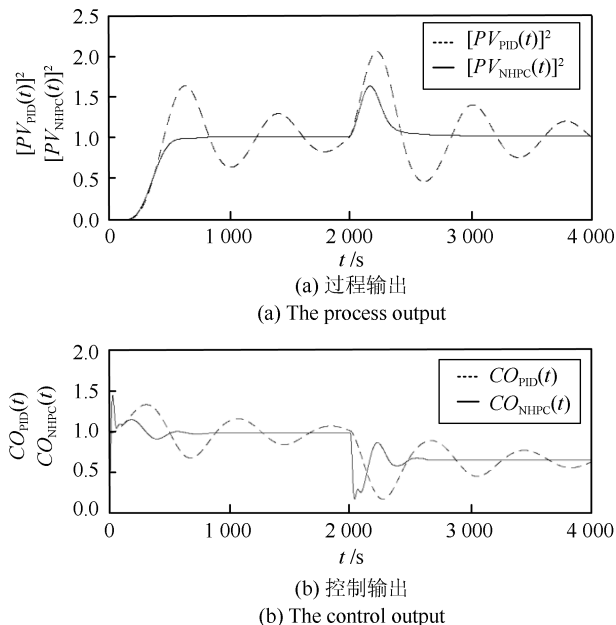


图 16 控制特性仿真实验结果 (意图 7)
Fig. 16 The results of control characteristic simulation (NO. 7)

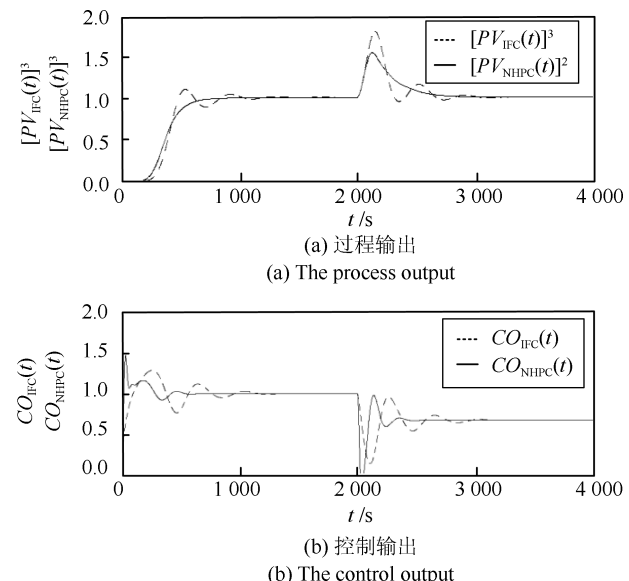


图 18 控制特性仿真实验结果 (意图 9)
Fig. 18 The results of control characteristic simulation (NO. 9)

图 18 给出的实验结果说明: NHPC 在控制性能上优于 IFC.

由图 10~17 实验结果可见, 相对 PID 控制, NHPC 在抑制大滞后过程的不确定性问题具有显著的优势.

从输入控制输出的角度看, NAO 有效减小了控制输出的波动范围, 具有良好的稳定性.

6 实际应用

将本文 NHPC 运用于某火电厂的 1000 MW 燃煤机组的锅炉主控系统的优化. 锅炉主控系统用于控制锅炉主汽压力, 控制手段是通过控制锅炉燃煤量的变化达到控制锅炉主汽压力的目的.

所述锅炉主控系统采用常规 PID 控制, 主要存在问题是在机组变负荷过程, 锅炉主汽压力的波动

较大. 其中的一段控制趋势, 如图 19 所示.

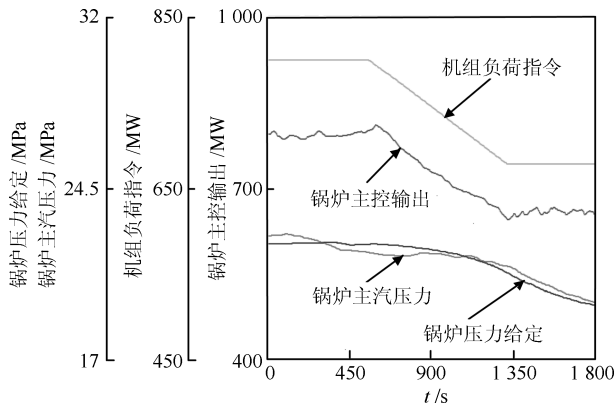


图 19 优化前锅炉主控系统控制特性示意图

Fig. 19 The control properties of boiler master control system before optimization

由图 19 可见, 锅炉主控输出的波动较大, 主要是前馈控制量不准确引起的. 在变负荷过程, 锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定的最大动态偏差为 1.17 MPa.

需要指出: 由于 PID 控制性能不高, 前馈控制相对重要, 前馈控制起到了一种解耦^[66-67]作用.

采用 NHPC 对所述主汽压力控制系统进行优化, 主要目的是改善锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定的动态特性, 如图 20 所示.

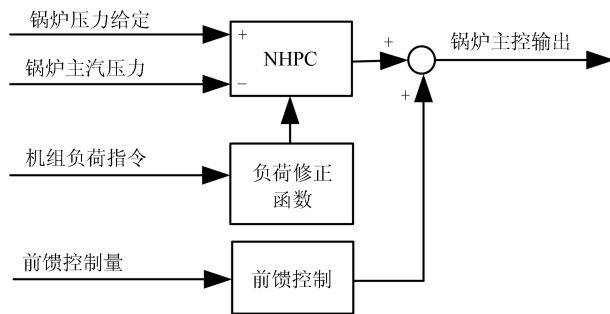


图 20 锅炉主控系统优化示意图

Fig. 20 The optimization diagram of boiler master control system

在图 20 中, 负荷修正函数^[59]用于在不同的负荷指令下, 修正 NHPC 的参数, 主要作用是对过程的慢时变问题有较好的跟踪特性.

其中在机组 750 MW 负荷, 通过现场试验测得锅炉主控输出-主汽压力对象的二阶模型 (Second order model, SOM) 为

$$G_{\text{SOM}}(s) = \frac{0.87}{(1 + 246s)(1 + 355s)} \quad (13)$$

其中, $G_{\text{SOM}}(s)$ 为 SOM 的传递函数, 但并不代表实

际对象一定是二阶的, 其中还包含有纯滞后的因数等.

为了简化 NHPC 参数整定, 采用了工程参数整定方法 (Engineering parameter tuning method, EPTM). 主要根据 SOM 的滞后时间 $T_{0.63}$, 为过程值上升到过程终值 0.63 的时间. 然后给出一个整数工程阶次 n_{eng} , 最后将 $T_{0.63}$ 平均分配给 IFD, 得到 IFD 的参数.

根据式 (13) 给出的 SOM 传递函数, 对应的 $T_{0.63} \approx 631 \text{ s}$, 实际设置 $n_{\text{eng}} = 8$, 得到 IFD 参数为

$$n_{\text{eng}} = 8$$

$$K_{\text{IFD}} = 0.87$$

$$T_{\text{IFD}} = \frac{T_{0.63}}{n_{\text{eng}}} = \frac{631}{8} \approx 79 \quad (14)$$

实际设置 NAO 参数为: $T_{\text{AO}} = 200 \text{ s}$.

采用 NHPC 优化后, 其中在机组 800 MW \rightarrow 600 MW 的降负荷过程, 得到主汽压力的控制特性, 如图 21 所示.

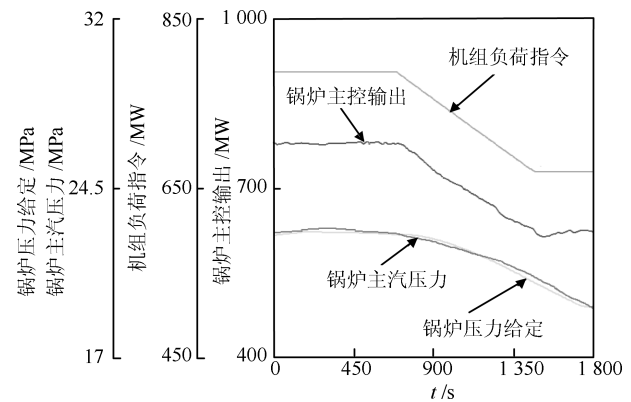


图 21 优化后锅炉主控系统控制特性示意图

Fig. 21 The control properties of boiler master control system after optimization

由图 21 可见, 在采用 NHPC 优化后, 锅炉主控输出变化相对平稳. 在变负荷过程, 锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定的动态偏差一般不超过 0.51 MPa, 如果采用 IFC 优化, 一般不超过 0.68 MPa. 可见, 采用 NHPC 优化收到了明显的效果.

需要指出: NHPC 中的 NAO 具有一定的解耦作用, 前馈控制相对不重要.

7 结论

本文指出在过程控制领域, 包括在火电厂过程控制实际, 形成了以 PID 控制为主, 先进控制、高性能控制、自抗扰控制、新型控制等共存的基本现状. 对在火电厂过程控制实践中出现的新型控制策略进

行了总结.

采用并联降阶方法、即 PRO, 是提高包括 PID 在内低阶控制器在大滞后过程控制性能的有效途径. STF 较好解决了滤波滞后的问题, NAO 提供了一种在频率特性上针对纯滞后过程的超前观测. PRO、STF、NAO 等具有一般性意义; 针对在大滞后过程控制中存在的 uncertainty 问题, 将 NAO 和 IFC 包括 STF 等有机结合, 构造出一种新型高性能控制器、即 NHPC, 在较宽的范围内, 对大滞后过程的时变性包括非线性等 uncertainty 问题具有较好的抑制性能; 本文提出的方法是对控制理论的有益发展, 具有重要的理论研究和工程应用价值. 数学分析、仿真实验和实际电力控制工程应用的结果, 验证了本文所提出观点和方法的正确性和有效性.

致谢

广东电网有限责任公司副总工程师肖祥对促进新型控制技术的形成做出了历史性和关键性贡献, 广东电科院能源技术有限责任公司副总经理廖宏楷、南方电网高级技术专家刘石对推动新型控制技术进入到广东省发电系统的商业应用起到了重要作用, 谨致以诚挚的谢意.

References

- Chai Tian-You. Operational optimization and feedback control for complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1744–1757
(柴天佑. 复杂工业过程运行优化与反馈控制. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1744–1757)
- Gao Zhi-Qiang. On the foundation of active disturbance rejection control. *Control Theory and Applications*, 2013, **30**(12): 1498–1510
(高志强. 自抗扰控制思想探究. 控制理论与应用, 2013, **30**(12): 1498–1510)
- Minorsky N. Directional stability and automatically steered bodies. *Journal of the American Society of Naval Engineers*, 1922, **42**(2): 280–309
- Wang Wei-Zhou, Wu Zhi-Wei, Chai Tian-You. PID control with output compensation for the fused magnesia smelting process. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(7): 1282–1292
(王维洲, 吴志伟, 柴天佑. 电熔镁砂熔炼过程带输出补偿的 PID 控制. 自动化学报, 2018, **44**(7): 1282–1292)
- Zhang Dong-Li, Tang Ying-Gan, Guan Xin-Ping. Optimum design of fractional order PID controller for an AVR system using an improved artificial bee colony algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(5): 973–979
(张冬丽, 唐英干, 关新平. 用改进的人工蜂群算法设计 AVR 系统最优分数阶 PID 控制器. 自动化学报, 2014, **40**(5): 973–979)
- Zhao Jian-Hua, Shen Yong-Liang. An adaptive PID control algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(03): 417–420
(赵建华, 沈永良. 一种自适应 PID 控制算法. 自动化学报, 2001, **27**(03): 417–420)
- Hu Bao-Gang, Ying Hao. Review of fuzzy PID control techniques and some important issues. *Acta Automatica Sinica*, 2001, **27**(04): 567–584
(胡包钢, 应浩. 模糊 PID 控制技术研究发展回顾及其面临的若干重要问题. 自动化学报, 2001, **27**(04): 567–584)
- Han Jing-Qing. Nonlinear PID controller. *Acta Automatica Sinica*, 1994, **20**(04): 487–490
(韩京清. 非线性 PID 控制器. 自动化学报, 1994, **20**(04): 487–490)
- Luo Chuan-Yi, Cheng Gui-Fen, Fu Jia-Cai. Control engineering and signal processing. *Beijing: Chemistry Industry Press*, 2004.
(罗传翼, 程桂芬, 付家才. 控制工程与信号处理. 北京: 化学工业出版社, 2004.)
- Huang De-Xian, Jiang Yong-Heng, Jin Yi-Hui. Present research situation, major bottlenecks, and prospect of refinery industry process control. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(6): 902–916
(黄德先, 江永亨, 金以慧. 炼油工业过程控制的研究现状、问题与展望. 自动化学报, 2017, **43**(6): 902–916)
- Kalman R E. On the general theory of control systems. *Ire Transactions on Automatic Control*, 1959, **4**(3): 110–110
- Kalman R E. Canonical structure of linear dynamical systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1962, **48**(4): 596–600
- Hu Pin-Hui, Yuan Pu. Robustness of state feedback predictive control systems. *Control and Decision*, 2001, **16**(1): 126–128
(胡品慧, 袁璞. 状态反馈预测控制系统的鲁棒稳定性. 控制与决策, 2001, **16**(1): 126–128)
- Xu Feng, Wei Xiao-Li, Ren Li-Hong, Luo Xiong-Lin. A control structure selection method based on multivariable generalized predictive control for unstable processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(9): 1547–1551
(许锋, 魏小丽, 任丽红, 罗雄麟. 基于多变量广义预测控制的不稳定系统控制结构选择方法. 自动化学报, 2013, **39**(9): 1547–1551)
- Yin Liang-Zhen, Li Qi, Hong Zhi-Hu, Han Ying, Chen Wei-Rong. FFRLS online identification and real-time optimal temperature generalized predictive control method of PEMFC power generation system. *Proceedings of the CSEE*, 2017, **37**(11): 3223–3235
(尹良震, 李奇, 洪志湖, 韩莹, 陈维荣. PEMFC 发电系统 FFRLS 在线辨识和实时最优温度广义预测控制方法. 中国电机工程学报, 2017, **37**(11): 3223–3235)
- Si Wen-Jie, Dong Xun-De, Wang Cong. Adaptive neural tracking control design for a class of uncertain switched nonlinear systems with input saturation. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(8): 1383–1392
(司文杰, 董训德, 王聪. 输入饱和的一类切换系统神经网络跟踪控制. 自动化学报, 2017, **43**(8): 1383–1392)
- Zhu Yu-Xuan, Li Shao-Yuan. Analysis and system design of multi-convex hull stabilization domain for double-layered model predictive control system. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(2): 262–269
(朱宇轩, 李少远. 双层模型预测控制系统的多包镇定域分析与系统设计. 自动化学报, 2018, **44**(2): 262–269)
- Xie Lan-Tao, Xie Lei, Su Hong-Ye. A comparative study on algorithms of robust and stochastic MPC for uncertain systems. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(6): 969–992
(谢澜涛, 谢磊, 苏宏业. 不确定系统的鲁棒与随机模型预测控制算法比较研究. 自动化学报, 2017, **43**(6): 969–992)

- 19 Liu Xiang-Jie, Kong Xiao-Bing. Present situation and prospect of model predictive control application in complex power industrial process. *Proceedings of the CSEE*, 2013, **33**(5): 79–85
(刘向杰, 孔小兵. 电力工业复杂系统模型预测控制——现状与发展. 中国电机工程学报, 2013, **33**(5): 79–85)
- 20 Xi Yu-Geng, Li De-Wei, Lin Shu. Model predictive control—status and challenges. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(3): 222–236
(席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制—现状与挑战. 自动化学报, 2013, **39**(3): 222–236)
- 21 Li Shi-Qing, Ding Bao-Cang. An overall solution to double-layered model predictive control based on dynamic matrix control. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(11): 1857–1866
(李世卿, 丁宝苍. 基于动态矩阵控制的双层结构预测控制的整体解决方案. 自动化学报, 2015, **41**(11): 1857–1866)
- 22 Eykhoff P. *System Identification: Parameter and State Estimation*. Chichester, England: Wiley, 1974.
- 23 Lu Xing-Ju, Zheng Zhi-Qiang. Identification of continuous state-space model parameters for a class of mimo systems: a frequency domain approach. *Control Theory and Applications*, 2016, **42**(1): 145–153
(鲁兴举, 郑志强. 一类 MIMO 系统连续状态空间模型的参数辨识频域方法. 自动化学报, 2016, **42**(1): 145–153)
- 24 Hou Jie, Liu Tao. Closed-loop subspace model identification using innovation estimation and orthogonal projection. *Control Theory and Applications*, 2016, **42**(11): 1657–1663
(侯杰, 刘涛. 基于新息估计和正交投影的闭环子空间模型辨识. 自动化学报, 2016, **42**(11): 1657–1663)
- 25 Pan Tian-Hong, Li Shao-Yuan. Model identification of piecewise affine (PWA) systems based on fuzzy cluster. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(3): 327–330
(潘天红, 李少远. 基于模糊聚类的 PWA 系统的模型辨识. 自动化学报, 2007, **33**(3): 327–330)
- 26 Li Jun, Wan Wen-Jun, Liu Zhi-Gang, Chen Shi-He, Zhang Xi. A method of frequency domain analysis for control system based on process response in time domain. *Proceedings of the CSEE*, 2012, **32**(29): 116–122
(李军, 万文军, 刘志刚, 陈世和, 张曦. 一种基于时域响应的控制系统频率特性分析方法. 中国电机工程学报, 2012, **32**(29): 116–122)
- 27 Liu Xiao-Bin. Study on the control strategy of air-fuel ratio of network PID parameter tuning based on BP neural. *Journal of Lanzhou Higher Polytechnical College*, 2013, **20**(6): 7–11
(刘小斌. 基于 BP 神经网络 PID 参数整定的空燃比控制策略研究. 兰州工业学院学报, 2013, **20**(6): 7–11)
- 28 Yang Zhi, Chen Ying. Improved particle swarm optimization and its application in PID tuning. *Control Engineering of China*, 2016, **23**(2): 161–166
(杨智, 陈颖. 改进粒子群算法及其在 PID 整定中的应用. 控制工程, 2016, **23**(2): 161–166)
- 29 Xu Chuan-Jing, Zhao Min, Li Tian-Ming. Research on PID parameter genetic tuning based on an improved algorithm. *Computer Technology and Development*, 2016, **26**(9): 12–15
(徐传敬, 赵敏, 李天明. 一种改进遗传算法的 PID 参数整定研究. 计算机技术与发展, 2016, **26**(9): 12–15)
- 30 Qi Zhao-Yang, Zheng En-Rang, Hou Zai-En. Iterative model smith predictive control: algorithm and stability. *Control Engineering of China*, 2015, **22**(1): 133–138
(齐朝阳, 郑恩让, 侯再恩. 迭代模型 Smith 预估控制: 算法和稳定性. 控制工程, 2015, **22**(1): 133–138)
- 31 Zhang Ning. Self-adaptive Smith prediction algorithm based control strategy for reheat steam temperature. *Thermal Power Generation*, 2013, **42**(4): 98–101
(张宁. 基于自适应 Smith 预估算法的再热蒸汽温度控制策略. 热力发电, 2013, **42**(4): 98–101)
- 32 Wang Zheng-Qi, Liu Xian-Xing. Nonlinear internal model control for bearingless induction motor based on neural network inversion. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 433–439
(王正齐, 刘贤兴. 基于神经网络逆系统的无轴承异步电机非线性内模控制. 自动化学报, 2013, **39**(4): 433–439)
- 33 Huang Yu, Han Pu, Li Yong-Ling. Fuzzy adaptive internal model control in main steam temperature system. *Proceedings of the CSEE*, 2008, **28**(23): 93–98
(黄宇, 韩璞, 李永玲. 主汽温系统模糊自适应内模控制. 中国电机工程学报, 2008, **28**(23): 93–98)
- 34 Cai Gai-Pin, Xu Qin, Zeng Yan-Xiang, Yang Li-Rong. IMC-PID series decoupling control of the pre-mill grinding system. *Journal of Beijing Polytechnic University*, 2016, **42**(1): 35–41
(蔡改贫, 许琴, 曾艳祥, 杨丽荣. 预磨机磨矿系统的 IMC-PID 串联解耦控制. 北京工业大学学报, 2016, **42**(1): 35–41)
- 35 Huang Pan-Feng, Hu Yong-Xin, Wang Dong-Ke, Meng Zhong-Jie, Liu Zheng-Xiong. Capturing the target for a tethered space robot using robust adaptive controller. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(4): 538–547
(黄攀峰, 胡永新, 王东科, 孟中杰, 刘正雄. 空间绳系机器人目标抓捕鲁棒自适应控制器设计. 自动化学报, 2017, **43**(4): 538–547)
- 36 Chen Guang-Rong, Wang Jun-Zheng, Wang Shou-Kun, Zhao Jiang-Bo, Shen Wei, Li Jing. Application of a new adaptive robust controller design method to electrohydraulic servo system. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(3): 375–384
(陈光荣, 王军政, 汪首坤, 赵江波, 沈伟, 李静. 自适应鲁棒控制器设计新方法在电液伺服系统中的应用. 自动化学报, 2016, **42**(3): 375–384)
- 37 Liu Bin, Sun Jiu-Qiang, Zhai Zhi-Qiang, Li Zhuo, Wang Chang-Hong. A modified homotopy method and H_∞ robust controller design. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1374–1380
(刘斌, 孙久强, 翟志强, 李卓, 王常虹. 一种改进的同伦算法与 H_∞ 鲁棒控制器设计. 自动化学报, 2013, **39**(8): 1374–1380)
- 38 Liu Xi, Sun Xiu-Xia, Dong Wen-Han, Yang Peng-Song. A new discrete-time sliding mode control method based on restricted variable trending law. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(9): 1552–1557
(刘希, 孙秀霞, 董文瀚, 杨朋松. 一种新的约束变速趋近律离散滑模控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(9): 1552–1557)
- 39 Han Jing-Qing. Control theory, is it a model analysis approach or a direct control approach? *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1989, **9**(4): 328–335
(韩京清. 控制理论——模型论还是控制论. 系统科学与数学, 1989, **9**(4): 328–335)

- 40 Wang Jian-Hong. Virtual reference feedback tuning design in internal model control. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2017, **37**(2): 355–369
(王建宏. 内模控制中的虚拟参考反馈校正设计. 系统科学与数学, 2017, **37**(2): 355–369)
- 41 Zou Tao, Wang Ding-Ding, Ding Bao-Cang, Yu Hai-Bin. Steady-state analysis and feedback correction of model predictive control for integrating process. *Control Theory and Applications*, 2014, **31**(2): 165–174
(邹涛, 王丁丁, 丁宝苍, 于海斌. 积分过程预测控制的稳态分析及反馈校正. 控制理论与应用, 2014, **31**(2): 165–174)
- 42 Han Jing-Qing. *Active Disturbance Rejection Control: the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties*. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.
(韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术. 北京: 国防工业出版社, 2008.)
- 43 Sun Li, Dong Jun-Yi, Li Dong-Hai, Xue Ya-Li. Cascaded load-frequency digital electric-hydraulic regulation of turbine via extended state observer. *Proceedings of the CSEE*, 2015, **35**(7): 1697–1703
(孙立, 董君伊, 李东海, 薛亚丽. 基于扩张状态观测器的汽轮机功频电液串级控制. 中国电机工程学报, 2015, **35**(7): 1697–1703)
- 44 Zheng Q, Gao L Q, Gao Z Q. On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics. In: Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2007. 3501–3506
- 45 Yuan Dong, Ma Xiao-Jun, Zeng Qing-Han, Qiu Xiao-Bo. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control for second-order systems. *Control Theory and Applications*, 2013, **30**(12): 1630–1640
(袁东, 马晓军, 曾庆含, 邱晓波. 基二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究. 控制理论与应用, 2013, **30**(12): 1630–1640)
- 46 Liu Shan-Hui, Mei Xue-Song, He Kui, Li Jian. Active disturbance rejection decoupling control for multi-color register system in gravure printing machine. *Control Theory and Applications*, 2014, **31**(11): 1574–1579
(刘善慧, 梅雪松, 何奎, 李健. 凹印机多色套准系统自抗扰解耦控制. 控制理论与应用, 2014, **31**(11): 1574–1579)
- 47 Chen Zeng-Qiang, Sun Ming-Wei, Yang Rui-Guang. On the stability of linear active disturbance rejection control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(5): 574–580
(陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究. 自动化学报, 2013, **39**(5): 574–580)
- 48 Li Xiang-Yang, Ai Wei, Tian Sen-Ping. Active disturbance rejection control of cascade inertia systems. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(3): 562–568
(李向阳, 袁薇, 田森平. 惯性串联系统的自抗扰控制. 自动化学报, 2018, **44**(3): 562–568)
- 49 Li Jie, Qi Xiao-Hui, Xia Yuan-Qing, Gao Zhi-Qiang. On linear/nonlinear active disturbance rejection switching control. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(2): 202–212
(李杰, 齐晓慧, 夏元清, 高志强. 线性/非线性自抗扰切换控制方法研究. 自动化学报, 2016, **42**(2): 202–212)
- 50 Zhu Rui-Bo, Dong Ze, Ran Ning. Application of active disturbance rejection control in main steam temperature control of thermal power plant. *Power Science and Engineering*, 2012, **28**(5): 46–49
(竹瑞博, 董泽, 冉宁. 自抗扰控制在火电厂主蒸汽温度控制中的应用. 电力科学与工程, 2012, **28**(5): 46–49)
- 51 Lou Guan-Nan, Tan Wen, Zheng Qin-Ling. Linear active disturbance rejection control for the coordinated system of drum boiler-turbine units. *Proceedings of the CSEE*, 2011, **31**(23): 94–100
(楼冠男, 谭文, 郑勤玲. 汽包锅炉单元机组协调系统的线性自抗扰控制. 中国电机工程学报, 2011, **31**(23): 94–100)
- 52 Liu Xi, Sun Xiu-Xia, Hao Zhen, Liu Yu-Kun. A new discrete-time form of optimal tracking differentiator. *Information and Control*, 2013, **42**(6): 729–734
(刘希, 孙秀霞, 郝震, 刘宇坤. 最优跟踪微分器的一种新型离散形式. 信息与控制, 2013, **42**(6): 729–734)
- 53 Guo B Z, Zhao Z L. On convergence of tracking differentiator. *International Journal of Control*, 2011, **84**(4): 693–701
- 54 Wang Yan, Liu Bin. Nonlinear tracking differentiator based on the hyperbolic function. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2017, **37**(2): 321–327
(王艳, 刘斌. 基于双曲函数的非线性跟踪微分器. 系统科学与数学, 2017, **37**(2): 321–327)
- 55 Guo B Z, Han J Q, Xi F B. Linear tracking differentiator and application to online estimation of the frequency of a sinusoidal signal with random noise perturbation. *International Journal of System Science*, 2002, **33**(5): 351–358
- 56 Li Jun, Wan Wen-Jun, Wang Yue-Chao. Research and application of a new type of linear second-order filter. *Control Theory and Applications*, 2017, **34**(3): 312–320
(李军, 万文军, 王越超. 一种新型线性二阶滤波器的研究与应用. 控制理论与应用, 2017, **34**(3): 312–320)
- 57 Li Jun, Zhu Ya-Qing, Chen Wen, Wan Wen-Jun, Chen Shi-He, Hu Kang-Tao, et al. Research and application of a new type of sinusoid tracking differentiator. *Control Theory and Applications*, 2016, **33**(9): 1182–1192
(李军, 朱亚清, 陈文, 万文军, 陈世和, 胡康涛, 等. 一种新型正弦跟踪微分器的研究与应用. 控制理论与应用, 2016, **33**(9): 1182–1192)
- 58 Li Jun, Wan Wen-Jun, Hu Kang-Tao. A new method for extraction of process differential signal based on single-frequency-pass filter. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(3): 478–486
(李军, 万文军, 胡康涛. 一种基于点频滤波器的微分信号提取方法. 自动化学报, 2017, **43**(3): 478–486)
- 59 Li Jun, Chen Shi-He, Wan Wen-Jun, Wang Yue-Chao, Huang Wei-Jian. An internal feedback controller. *Acta Automatica Sinica*, 2018, **44**(9): 1706–1716
(李军, 陈世和, 万文军, 王越超, 黄卫剑. 一种内反馈控制器 IFC 的研究与应用. 自动化学报, 2018, **44**(9): 1706–1716)
- 60 Li Jun, Huang Wei-Jian, Wang Wen-Jun, Zhu Ya-Qing, Pan Feng-Ping. Research and application of one new-type disturbance rejection control method. *Guangdong Electric Power*, 2018, **31**(3): 1–8
(李军, 黄卫剑, 万文军, 朱亚清, 潘凤萍. 一种新型抗扰控制方法的研究与应用. 广东电力, 2018, **31**(3): 1–8)
- 61 Li Jun, Wan Wen-Jun. A novel sinusoidal frequency measurement method based on modulation of sequence with zero initial phase. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(10): 1585–1594
(李军, 万文军. 一种基于序列零初相位调制的新型正弦信号频率测量方法. 自动化学报, 2016, **42**(10): 1585–1594)

- 62 Li Jun, Wang Yue-Chao, Li Feng. A novel sinusoidal frequency measurement method based on precise calculation of Initial phase of sequence and deconvolution sequence. *Acta Electronica Sinica*, 2016, **44**(10): 2370–2376
(李军, 王越超, 李锋. 一种基于序列和反褶序列精密初相位计算的新型正弦频率测量方法. 电子学报, 2016, **44**(10): 2370–2376)
- 63 Zhu Bo, Wang Xin-Hua, Cai Kai-Yuan. Fast and nonover-shooting control for a double-integral system with step input: nonlinear PD control based on gain-switching. *Control Theory and Applications*, 2009, **26**(10): 1111–1117
(朱波, 王新华, 蔡开元. 双积分系统阶跃响应快速无超调控制: 一种增益切换非线性 PD 控制. 控制理论与应用, 2009, **26**(10): 1111–1117)
- 64 Huang Wei-Huang, Hu Shu-Ju, Lin Zi-Xu, Fu Xun-Bo, Xu Hong-Hua. A single-loop control strategy based on phase lead correction for voltage source inverters. *Proceedings of the CSEE*, 2013, **33**(30): 18–25
(黄伟煌, 胡书举, 林资旭, 付勋波, 许洪华. 一种采用相位超前校正技术的电压源逆变器单环控制策略. 中国电机工程学报, 2013, **33**(30): 18–25)
- 65 Ye Zhi, Li Xiao-Bo, Kang Yi, Ma Le, Yang Xin-Min, Gao Hai-Dong. Design of actual differential PID controller used in FCS 165 field bus control system. *Thermal Power Generation*, 2011, **40**(8): 38–40
(叶智, 李晓博, 康毅, 马乐, 杨新民, 高海东. FCS165 现场总线控制系统实际微分 PID 控制器的设计. 热力发电, 2011, **40**(8): 38–40)
- 66 Cheng Yun, Chen Zeng-Qiang, Sun Ming-Wei, Sun Qing-Lin. Multivariable inverted decoupling active disturbance rejection control and its application to a distillation column process. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(6): 1080–1088
(程贇, 陈增强, 孙明玮, 孙青林. 多变量逆解耦自抗扰控制及其在精馏塔过程中的应用. 自动化学报, 2017, **43**(6): 1080–1088)
- 67 Chen Ye, Li Yin-Ya, Qi Guo-Qing, Sheng An-Dong. A multi-channel decoupled event triggered transmission mechanism and its application to optic-electric sensor network. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(2): 227–237
(陈烨, 李银佺, 戚国庆, 盛安冬. 多通道解耦事件触发机制及其在光电传感网络中的应用. 自动化学报, 2017, **43**(2): 227–237)



李军 广东电网有限责任公司电力科学研究院工程师. 主要研究方向为计算机控制与通讯. 本文通信作者.
E-mail: lijun_87389@126.com

(LI Jun Engineer at the Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd. His research interest covers computer control and communication engineering. Corresponding author of this paper.)



刘哲 广东电网有限责任公司电力科学研究院高级工程师. 主要研究方向为火电厂热工控制.

E-mail: liuzheyongman@163.com

(LIU Zhe Senior engineer at the Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd. His research interest covers engineering experiment and scientific research in automatic control of power plant thermal processes.)



周永言 广东电网有限责任公司电力科学研究院副总工程师. 主要研究方向为电力系统新技术应用研究和科技成果应用转化方面的管理工作.

E-mail: zyy23443@126.com

(ZHOU Yong-Yan Deputy chief engineer at electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd. His research interest covers research and application of new technologies in power systems and management of the transformation of scientific and technological achievements.)