

# 一种二阶内反馈控制器 SO-IFC 的研究与应用

李 军<sup>1</sup> 万文军<sup>2</sup> 刘 哲<sup>1</sup>

**摘 要** 现代控制论与控制实际之间存在一些“鸿沟”, 根据 PID (Proportional-integral-derivative) 控制器具有良好抗扰性的事实, 提出了一种基于 PID 的二阶内反馈控制器 (Second order of internal feedback controller, SO-IFC). 基于在新型“高效”滤波方法上的一些进展, 将一种新型正弦跟踪滤波方法 (New sinusoid tracking filter, NSTF) 运用于 SO-IFC 控制回路的噪声干扰滤波. 针对被控对象的准确数学模型难以获取的问题, 将一种根据过程增益 (Process gain, PG) 和过程总滞后 (Process all lag, PAL) 的工程参数整定方法 (Engineering parameter tuning method, EPTM) 运用于 SO-IFC 参数的整定, 降低了 SO-IFC 参数整定的难度. 将 SO-IFC 运用于大滞后过程的控制, 具有良好的控制性能包括良好的扰动抑制性能. 数学分析、仿真实验和实际应用的结果验证了文中所提出观点和方法的正确性和有效性.

**关键词** 内反馈, 二阶内反馈控制器, 新型正弦跟踪滤波器, 扰动抑制, 工程参数整定方法

**引用格式** 李军, 万文军, 刘哲. 一种二阶内反馈控制器 SO-IFC 的研究与应用. 自动化学报, 2019, 45(5): 993–1003

**DOI** 10.16383/j.aas.c170740

## Research and Application of Second Order of Internal Feedback Controller

LI Jun<sup>1</sup> WAN Wen-Jun<sup>2</sup> LIU Zhe<sup>1</sup>

**Abstract** The modern cybernetics has some difficulty in practical application, as the proportional-integral-derivative (PID) has good anti-jamming performance, a second order of internal feedback controller which is based on PID is proposed (SO-IFC). Based on the advances high efficiency filtering method, a sinusoid tracking filter (STF) is applied to noise filtering of the SO-IFC control loop. Aiming at the question of controlled object which is difficult to obtain the accurate mathematical model, an engineering parameter tuning method (EPTM) which the based on the process gain (PG) and the process total lag (PAL) has been used to parameter setting of the SO-IFC that reduces the difficulty of tuning the SO-IFC parameters. The SO-IFC is applied to the control of higher-order controlled objects, good anti-jamming control performance has been obtained. The results of mathematical analysis, simulation experiments and practical applications verify the validity of the views and methods proposed in this paper.

**Key words** Internal feedback, second order of internal feedback controller (SO-IFC), new sinusoid tracking filter (STF), disturbance rejection, engineering parameter tuning method (EPTM)

**Citation** Li Jun, Wan Wen-Jun, Liu Zhe. Research and application of second order of internal feedback controller. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(5): 993–1003

高志强<sup>[1]</sup> 将控制科学划分为 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<sup>[1]</sup>, 基础在于系统的建模与辨识包括优化, 将系统的数学模型作为研究问题的出发点. 经过数十年的发展, 产生了宏大和严密的现代控制论和众多先进的控制策略<sup>[2–10]</sup>, 其中模型预测控制 (Model predictive control, MPC)<sup>[3–6]</sup>

被认为是目前现代控制论在过程控制中应用最成功的控制方法<sup>[10]</sup>, 例如在石油化工控制工程得到成功应用<sup>[5–6]</sup>; 从 MPC 的适用范围看, 文献 [11] 指出: “从应用对象来看, 主要还限于线性或准线性过程”. 由于石油化工工业的产品可以中间存储, 其过程特性可近似为确定的线性或准线性过程.

现代控制论的发展一直受到源于实际应用困难的质疑. 文献 [12] 指出: “近年来控制理论研究受到来自应用的严峻挑战, 其表现形式为理论研究与应用之间的鸿沟有扩大的趋势”. 文献 [1] 指出了控制科学研究中的娱乐数学现象. 简单说就是理论研究成果一大堆, 真正有用的却寥寥无几, 这就是理论与实际的鸿沟, 鸿沟无非是人们长期寻求全面超越 PID (Proportional-integral-derivative)<sup>[13–15]</sup> 控制的愿望落空. 现代控制论的理论成果虽然完善和严密, 但在客观上它丝毫没有撼动经典 PID<sup>[13–15]</sup> 控制技术在工业过程控制的主导地位, 文献 [1] 指出:

收稿日期 2017-12-30 录用日期 2018-03-24  
Manuscript received December 30, 2017; accepted March 24, 2018

国家重点研发计划 (2017YFB0903604) 资助  
Support by National Key R&D Program of China (2017YFB0903604)

本文责任编辑 张卫东  
Recommended by Associate Editor ZHANG Wei-Dong

1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院 广州 510080 2. 广东电网能源技术有限责任公司 广州 510080

1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080 2. Guangdong Electric Power Science Research Institute Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 510080

“原因也许是真正的控制问题不是建模—优化问题”。

简单地认识现代控制论: 将控制问题转换为数学问题确定化, 并且在确定性问题的研究上取得了良好的进展和突破, 例如丰富的理论论证与仿真验证成果包括成功的工程应用实例; 但是在控制实际中, 还存在大量的不确定性问题, 例如对象模型的不确定性、过程的时变性、过程的非线性、不确定性扰动等问题。对于这些不确定性问题要如何解决? 现代控制论并没有给出实质性的答案, 这可能就是先进控制论存在的固有的缺陷之一。目前看, 抑制不确定性问题的最有效方法仍然是包括 PID 在内的闭环控制或者反馈校正<sup>[16-17]</sup>, 闭环控制对于先进控制依然很重要。在没有找到或者没有应用比 PID 控制性能更好的闭环控制方法之前, 在不确定性问题的抑制上, 先进控制与 PID 控制不会有太大的区别。也许根本没有“鸿沟”, 真正起到负面作用的是“固有的缺陷”包括“看不见的缺陷”。

值得关注的是, 韩京清<sup>[18]</sup> 提出了不依赖模型的自抗扰控制技术 (Active disturbance rejection control, ADRC) 从理论上解决了不确定性抑制的问题。ADRC 是一种以扩张状态观测器 (Extended state observation, ESO)<sup>[19]</sup> 为核心的新型控制技术。在阶次已知包括不存在纯滞后问题的前提下, 如果 ESO 的带宽趋于无穷大, 则 ADRC 能够实现零误差跟踪扰动, 这就是文献 [1, 20] 指出的带宽与误差的反比关系。但是在控制实际中, 准确阶次同样难以获取。另一方面, 即便知道准确阶次, 但是对于高阶对象, 高阶 ADRC 不一定具有工程意义<sup>[21]</sup>。

在控制实际中, 如果实际对象的特性接近二阶系统也包括一阶系统的特性, 包括二阶惯性特性<sup>[22]</sup>、二阶振荡特性<sup>[23]</sup>、双积分特性<sup>[24]</sup>、二阶非线性特性<sup>[25]</sup>、二阶时变特性<sup>[26]</sup> 等, 则采用二阶控制器能够实现比较好的控制性能, 包括比较好的扰动抑制性能等。二阶控制器具体包括 PID 控制器<sup>[13-15]</sup>、二阶线性 ADRC 控制器 (Linear active disturbance rejection controller, LADRC)<sup>[27]</sup> 等。

长期以来, 围绕改进 PID 控制性能的各种研究也一直没有间断。文献 [28-30] 提出将先进控制与 PID 控制相融合, 例如基于改进遗传算法的 PID 参数整定<sup>[28]</sup>、基于神经网络的 PID 参数整定<sup>[29]</sup>、基于改进粒子群算法的 PID 参数整定<sup>[30]</sup> 等。他们采用的是一种“建模—优化”的策略, 为了取得最优的控制效果, 通常需要辨识出控制回路的精确模型。

实践经验表明, 如果是低阶对象, 采用 PID 控制已经足够了。将包括 PID 控制在内的低阶控制器用于大滞后对象的跨阶控制才是真正的控制难度所在。所谓大滞后是阶次较大惯性和较大纯滞后特性的一种简称。作者认为: 跨阶控制难度的根源在

于“低阶控制器并不真正适合于直接用于大滞后过程的跨阶控制”, 例如文献 [28-30] 提出的“建模—优化”策略并不能从根本上改善包括 PID 在内低阶控制器在大滞后过程的跨阶控制性能, 存在“看不见的缺陷”。原因很简单, 无论你对 PID 控制参数进行整定和优化, 但它在大滞后过程的跨阶控制性能始终不如文献 [21] 提出的一种内反馈控制方法 (Internal feedback control, IFC)。

滤波方法的性能也是决定控制系统性能的一个重要因素, 例如滤波相位和时间的滞后造成控制回路稳定裕度下降。韩京清<sup>[18]</sup> 指出: “PID 的主要问题之一是没有合适的微分信号提取装置”, 影响了 PID 性能的发挥。将问题扩大来看, 首先是没有好的滤波方法。在控制实践中, 微分器对噪声干扰的滤波特性往往是微分器运用中首要考虑的因素。韩京清<sup>[18]</sup> 从非线性最速跟踪 (Nonlinear optimal tracking, NOT)<sup>[31]</sup> 的角度提出了非线性跟踪微分器 (Nonlinear tracking differentiator, NTD)<sup>[31-33]</sup>, NTD 显著提高了输出跟踪输入微分的“效率”。但是 NOT 和 NTD 也存在明显的不足, 例如 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; 文献 [34-35] 从新型正弦跟踪 (New sinusoid tracking, NST) 的角度分别提出了一种新型正弦跟踪滤波器 (New sinusoid tracking filter, NSTF)<sup>[34]</sup> 和一种新型正弦跟踪微分器 (New sinusoid tracking differentiator, NSTD)<sup>[35]</sup>。显著特点是: NSTF 跟踪输入和 NSTD 跟踪输入微分的“效率”较高或滞后较小, 噪声滤波特性较好, 输出特性与输入幅值无关等。

文献 [21] 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方法 IFC, 将 HGPI 的实际控制的阶次降低为一阶, 有效提高了低阶控制器用于大滞后过程的跨阶控制性能。IFC 的显著特点还在于运用了新型正弦跟踪滤波器 NSTF<sup>[34]</sup>, 较好保证了 IFC 的控制性能; 实际运用的结果表明, 将 IFC 运用于大滞后过程控制, 具有良好的鲁棒性能力和良好的扰动抑制性能等, 是目前能够找到的一种综合特性相对比较好的而且实用的一种过程控制策略。目前 IFC 已经在大型火力发电机组的一些重要的过程控制系统, 例如机组的协调控制系统、锅炉的再热汽温控制系统、机组的脱硝控制系统等取得了良好的实际运用效果。

文献 [21] 提出的 IFC 也是一种一阶内反馈控制器 (First order of IFC, FO-IFC)。为了进一步提升 IFC 的控制性能, 文中提出了一种基于高增益 PID (High gain of PID, HGPID) 控制器的二阶内反馈控制器 (Second order of IFC, SO-IFC)。SO-IFC 在

闭环响应速度和扰动抑制性能上均优于 FO-IFC.

由于 SO-IFC 参数的整定依赖准确的对象模型, 例如并联降阶 PRO 依赖准确的阶次, 阶次本身也是一种重要的模型参数. 针对在控制实际中准确模型和准确阶次难以获取的问题, 文中提出了一种不依赖准确模型和准确阶次的工程参数整定方法 (Engineering parameter tuning method, EPTM), 显著特点在于避开了模型辨识<sup>[36]</sup> 和模型降阶<sup>[37]</sup> 类似 PID 参数整定<sup>[28-30]</sup> 等繁琐的问题.

文中变量包括符号的表达具有唯一性, 可相互引用.

## 1 二阶内反馈控制系统

在论述二阶内反馈控制器 SO-IFC 之前, 首先需要对内反馈控制器 IFC<sup>[21]</sup> 和新型正弦跟踪滤波器 NSTF<sup>[34]</sup> 有一些了解.

### 1.1 内反馈控制器

文献 [21] 提出的内反馈控制系统 (Internal feedback control system, IFCS), 如图 1 所示.

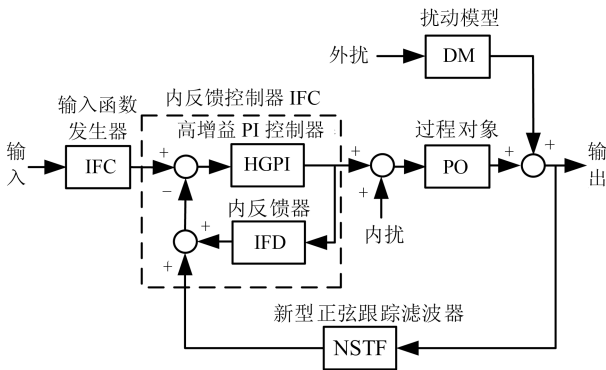


图 1 内反馈控制系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of internal feedback control system

在图 1 中, 输入函数发生器 (Input function generator, IFG) 用于简单的过程轨迹控制, 内反馈器 (Internal feedback device, IFD) 用于过程对象 (Process object, PO) 的并联降阶, 将高增益 PI 控制器 HGPI 的实际控制的阶次降低为一阶. 新型正弦跟踪滤波器 NSTF 用于控制回路噪声干扰的滤波.

在图 1 中的“内扰”和“外扰”主要是指信号上的扰动. 另外, 对象模型的不确定也是一种内扰. 外扰通过扰动模型 (Disturbance model, DM) 直接叠加在过程对象 PO 的过程输出中, 相当于一种耦合作用.

### 1.2 新型正弦跟踪滤波器

对滤波方法的研究始终是控制理论研究中的

一个重要的问题. 在控制实践中, 二阶惯性滤波器 (Second order inertial filter, SOIF)<sup>[34]</sup> 在过程信号的滤波或去噪<sup>[38]</sup> 方面有广泛的应用. 但是 SOIF 输出跟踪输入的“效率”较低或滞后较大.

SOIF 可变形为一种 LC 滤波器<sup>[34]</sup> 和 LCR 正弦跟踪器 (LCR Sinusoid tracking, LCR-ST)<sup>[34]</sup> 的变形结构<sup>[34]</sup>. 在 SOIF 变形结构的基础上, 如果采用新型正弦跟踪器 (New sinusoid tracking, NST)<sup>[34]</sup> 取代 LCR-ST, 则构造出新型正弦跟踪滤波器, 即 NSTF. 相对 SOIF, NSTF 输出跟踪输入的“效率”较高或滞后较小.

LCR 正弦跟踪器 LCR-ST 是一种 LCR 带通滤波器<sup>[39]</sup>, 新型正弦跟踪器 NST 的基础是一种正交混频方法<sup>[40]</sup>.

SOIF 变形结构传递函数, 表达为

$$\begin{aligned} W_{\text{SOIF}}(s) &= \frac{1}{(1 + T_{\text{SOIF}}s)^2} \\ W_{\text{SOIF}}(s) &= W_{\text{LC}}(s)[1 - W_{\text{LCR-ST}}(s)] \\ W_{\text{LC}}(s) &= \frac{1}{1 + (T_{\text{SOIF}}s)^2} \\ W_{\text{LCR-ST}}(s) &= \frac{2T_{\text{SOIF}}s}{(1 + T_{\text{SOIF}}s)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $W_{\text{SOIF}}(s)$  为 SOIF 的传递函数.  $T_{\text{SOIF}}$  为惯性常数, 单位 s.  $W_{\text{LC}}(s)$  为 LC 滤波器传递函数.  $W_{\text{LCR-ST}}(s)$  为 LCR-ST 的传递函数.  $T_{\text{SOIF}}$  也代表 NSTF 的滤波时间常数.

对式 (5) 给出的过程对象 PO 在单位阶跃激励的过程输出分别进行 SOIF 和 NSTF 滤波, 用  $Y_{\text{PO}}(t)$  表达 PO 单位阶跃激励输入的过程输出. 其中在  $n = 4$ ,  $T_{\alpha} = 100$  s,  $K_{\alpha} = 1$ ,  $T_{\text{SOIF}} = 20$  s, 得到的实验结果, 如图 2 所示.

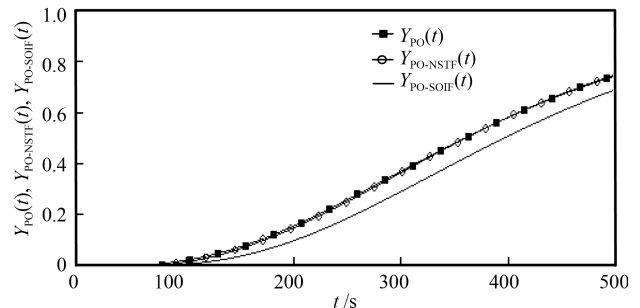


图 2 滤波特性对比示意图

Fig. 2 Comparison of filter characteristics

在图 2 中,  $Y_{\text{PO-SOIF}}(t)$  为 SOIF 跟踪  $Y_{\text{PO}}(t)$  的输出,  $Y_{\text{PO-NSTF}}(t)$  为 NSTF 跟踪  $Y_{\text{PO}}(t)$  的输出. 可见, NSTF 跟踪  $Y_{\text{PO}}(t)$  的特性远优于 SOIF.

NSTF 的传递函数难以具体表达, 这是事物的

矛盾性所决定的,但由于 NSTF 输出跟踪输入的滞后较小,从工程计算的角度考虑,完全可以忽略 NSTF.

更多 NSTF 的内容可参考文献 [34].

### 1.3 二阶内反馈控制器

文中提出的二阶内反馈控制系统 (Second order of internal feedback control system, SO-IFCS), 如图 3 所示.

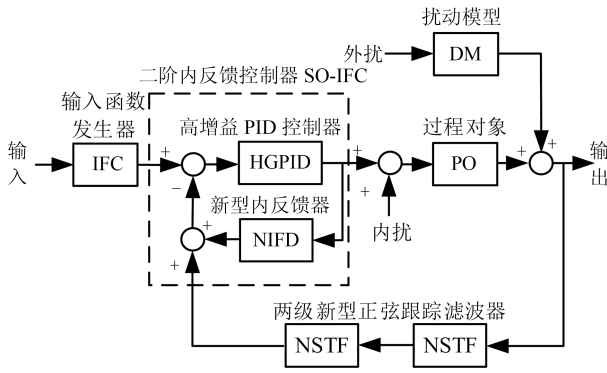


图 3 二阶内反馈控制系统结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of second order of internal feedback control system

由图 3 可知, 二阶内反馈控制器 SO-IFC 由高增益 PID 控制器 HGPID 和新型内反馈器 (New internal feedback device, NIFD) 所构成. 由于 HGPID 的高频增益极高, 因此采用了两级 NSTF 滤波. NIFD 传递函数为

$$W_{NIFD}(s) = \frac{K_{NIFD}}{n \geq 3} \frac{T_{NIFD}s}{(1 + T_{NIFD}s)^3} \sum_{i=0}^{n-3} \left( \frac{1}{1 + T_{NIFD}s} \right)^i \quad (2)$$

式中,  $W_{NIFD}(s)$  为 NIFD 的传递函数.  $K_{NIFD}$  为 NIFD 的增益, 无量纲.  $T_{NIFD}$  为统一的时间常数, 单位 s.  $n$  为整数阶次, 无量纲.

HGPID 传递函数为

$$W_{HGPID}(s) = K_{HGPID} \frac{(1 + T_{NIFD}s)^2}{T_{NIFD}s} = K_{HGPID} \left( 2 + \frac{1}{T_{NIFD}s} + T_{NIFD}s \right) \quad (3)$$

式中,  $W_{HGPID}(s)$  为 HGPID 的传递函数.  $K_{HGPID}$  为 HGPID 的增益, 无量纲. HGPID 内含理想微分器  $T_{NIFD}s$ .

理想微分在物理上不可实现<sup>[35]</sup>, 如果单独对理想微分器  $T_{NIFD}s$  的输出进行 NSTF 滤波, 则得到新型正弦跟踪微分器 NSTD<sup>[35]</sup>.

将 HGPID 看成是 NIFD 的一种逆向变换器, 即 SO-IFC 是 NIFD 的逆模型. 则得到 SO-IFC 传递函数, 为

$$W_{SO-IFC}(s) = \frac{1}{\lim_{K_{HGPID} \rightarrow \infty} W_{NIFD}(s)} = \frac{(1 + T_{NIFD}s)^n}{K_{NIFD} T_{NIFD}s \sum_{i=0}^{n-3} (1 + T_{NIFD}s)^i} \quad (4)$$

式中,  $W_{SO-IFC}(s)$  为 SO-IFC 的传递函数.  $W_{SO-IFC}(s)$  分子的  $s$  项阶次大于分母  $s$  项阶次 2 阶, 因此 SO-IFC 的高频增益极高, 需要在 SO-IFC 外部设置两级 NSTF 滤波.

另外, 可以证明, 在 HGPID 与 NIFD 构成的闭环系统中, SO-IFC 是高度稳定的.

不考虑 NSTF, 则 SO-IFCS 闭环传递函数为

$$W_{SO-IFCS-CL}(s) = \frac{W_{SO-IFC}(s)W_{PO}(s)}{1 + W_{SO-IFC}(s)W_{PO}(s)} = \frac{1}{(1 + T_{\alpha}s)^{n-2}} \quad (5)$$

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

$$K_{NIFD} = K_{\alpha}, \quad T_{NIFD} = T_{\alpha}$$

式中,  $W_{SO-IFCS-CL}(s)$  为 SO-IFCS 的传递函数.  $W_{PO}(s)$  为 PO 的传递函数.  $T_{\alpha}$  为 PO 的惯性常数, s.  $K_{\alpha}$  为 PO 的增益, 无量纲.

由式 (5) 可知, 在 PO 模型已知的情况下, 则  $W_{SO-IFCS-CL}(s)$  相对 PO 传递函数  $W_{PO}(s)$  的阶次  $n$  降低了 2 阶, 表明了 SO-IFCS 具有很高的闭环响应速度.

如果从降低 HGPID 控制阶次的角度看问题, 则 NIFD 是 PO 的并联降阶器. NIFD 与 PO 并联传递函数为

$$W_{NIFD+PO}(s) = W_{NIFD}(s) + W_{PO}(s) = \frac{K_{\alpha}}{(1 + T_{\alpha}s)^2} \quad (6)$$

$$K_{NIFD} = K_{\alpha}, \quad T_{NIFD} = T_{\alpha}$$

式中,  $W_{NIFD+PO}(s)$  为 NIFD 与 PO 并联后的传递函数.

由式 (6) 可知, 如果 PO 模型已知, 则 NIFD 与 PO 并联的结果得到二阶惯性环节, 也就是将 HGPID 控制的阶次降低为二阶.

### 1.4 参数整定

如果 PO 模型已知, 则 SO-IFC 参数整定相对简单, 基本原则如下:

设置 NIFD 与 PO 的阶次  $n$  相同;

设置  $K_{\text{NIFD}} = K_{\alpha}$ ;

设置  $T_{\text{NIFD}} = T_{\alpha}$ ;

式 (4) 要求  $K_{\text{HGPID}}$  趋于无穷大, 如果在数字计算机中实现 HGPID,  $K_{\text{HGPID}}$  不能趋于无穷大, 则 HGPID 参数设置原则为:  $K_{\text{HGPID}} \gg 1/K_{\text{NIFD}}$ . 但同时满足:  $K_{\text{HGPID}} < T_{\text{NIFD}}/(K_{\text{NIFD}} T_n)$ ,  $T_n$  为数值离散计算间隔, 单位 s. 例如在  $T_{\text{NIFD}} = 100 \text{ s}$ ,  $K_{\text{NIFD}} = 1$ ,  $T_n = 1 \text{ s}$ , 可设置  $K_{\text{HGPID}} = 90$ .

两级 NSTF 起到一种噪声干扰的滤波包括理想微分的降阶作用,  $T_{\text{SOIF}}$  越大, 滤波效果也越好. 在工程应用上,  $T_{\text{SOIF}}$  的合适范围在  $0.05 \sim 0.3 T_{\alpha}$  之间.

### 1.5 鲁棒性能分析

不考虑 NSTF, 则 SO-IFCS 开环频域函数, 为

$$\begin{aligned} W_{\text{SO-IFCS-CL}}(j\omega) &= \frac{W_{\text{PO}}(j\omega)}{W_{\text{NIFD}}(j\omega)} = \\ &G_{\text{SO-IFCS-CL}}(\omega)e^{j\theta_{\text{SO-IFCS-CL}}(\omega)} \\ \text{PM}_{\text{SO-IFCS-CL}} &= 180^\circ + \theta_{\text{SO-IFCS-CL}}(\omega) \\ G_{\text{SO-IFCS-CL}}(\omega) &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $W_{\text{SO-IFCS-OL}}(j\omega)$  为 SO-IFCS 的开环系统频域函数.  $W_{\text{PO}}(j\omega)$  为 PO 的频域函数.  $W_{\text{NIFD}}(j\omega)$  为 NIFD 的频域函数.  $G_{\text{SO-IFCS-OL}}(\omega)$  为 SO-IFCS 的开环系统频域增益, 无量纲.  $\theta_{\text{SO-IFCS-OL}}(\omega)$  为 SO-IFCS 的开环系统频域相位, 单位  $^\circ$ .  $\text{PM}_{\text{SO-IFCS-OL}}$  为 SO-IFCS 的开环系统频域相位稳定裕度, 单位  $^\circ$ .

具体在 PO 和 SO-IFC 阶次  $n = 4$ ,  $T_{\alpha}$  变化范围  $1 \sim 300 \text{ s}$ ,  $K_{\alpha}$  变化范围  $0.5 \sim 1.5$ . 设置  $T_{\text{NIFD}} = 100 \text{ s}$ ,  $K_{\text{NIFD}} = 1$ ,  $K_{\text{HGPID}} = 90$ . 得到  $\text{PM}_{\text{SO-IFCS-OL}}$  的计算结果, 如图 4 所示.

由图 4 可见, 在给出 PO 的  $T_{\alpha}$  和  $K_{\alpha}$  的变化范围,  $\text{PM}_{\text{SO-IFCS-OL}}$  的稳定的范围较宽.

### 1.6 工程参数整定方法

在控制实际中, 过程增益 (Process gain, PG) 和过程总滞后 (Process all lag, PAL) 特性相对容易得到, 例如通过在现场的开环阶跃激励响应实验获取 PG 和 PAL, 如图 5 所示.

在图 5 中,  $PR(t)$  为过程比值, 具体为开环阶跃激励响应的过程值与输入阶跃激励幅值的比值, 无量纲.  $PR_{\text{end}}$  为  $PR(t)$  的终值.  $T_{\tau}$  为纯滞后, 单位 s.  $T_{0.63}$  为  $PR(t)$  上升到  $0.63 PR_{\text{end}}$  的时间, 单位 s.  $T_{\text{end}}$  为趋势段的截止时间, 单位 s.  $PR_{\text{end}}$  代表了 PG,  $T_{0.63}$  则代表了 PAL.

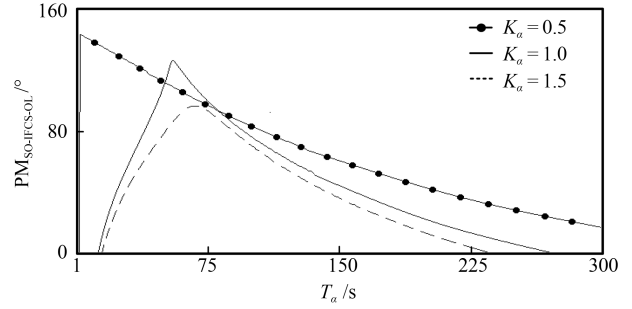


图 4 SO-IFCS 开环系统频域相位稳定裕度

Fig. 4 Schematic diagram of frequency domain phase stability margin of open loop system of second order of internal feedback control system

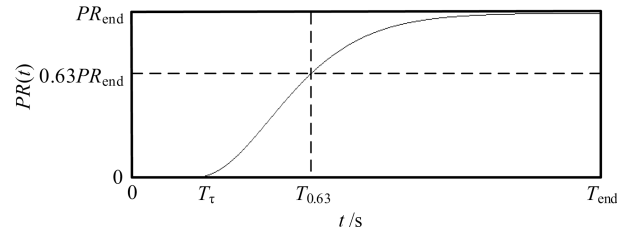


图 5 开环阶跃激励响应实验示意图

Fig. 5 The trend of step response experiments of open loop

对于工程参数整定方法 EPTM 来说, 无需知道准确的对象模型包括准确的阶次和准确的纯滞后等. 在  $T_{\tau}/T_{0.63} < 0.5$  时, 利用  $PR_{\text{end}}$  和  $T_{0.63}$  进行 SO-IFC 工程参数整定已经足够了.

通过在现场的开环阶跃激励响应实验获取  $PR_{\text{end}}$  和  $T_{0.63}$ , 然后凭工程经验给出一个相对高的整数工程阶次  $n_{\text{eng}}$ , 则得到工程参数为

$$\begin{aligned} T_{\text{NIFD}} &= \frac{T_{0.63}}{n_{\text{eng}}}, \quad K_{\text{NIFD}} = PR_{\text{end}} \\ T_{\tau}/T_{0.63} &< 0.5 \end{aligned} \quad (8)$$

根据  $n_{\text{eng}}$ , 得到 NIFD 传递函数为

$$\begin{aligned} W_{\text{NIFD}}(s) &= \\ &PR_{\text{end}} \frac{T_{\text{NIFD}} s}{(1 + T_{\text{NIFD}} s)^3} \sum_{i=0}^{n_{\text{eng}}-3} \left( \frac{1}{1 + T_{\text{NIFD}} s} \right)^i \end{aligned} \quad (9)$$

出于工程参数计算的需要, 定义一个工程对象 (Engineering object, EO), 暂且指定 EO 为三阶惯性加纯滞后对象, 为

$$W_{\text{EO}}(s) = \frac{K_{\alpha}}{(1 + T_{\alpha} s)^3} e^{-3T_{\alpha} s} \quad (10)$$

式中,  $W_{\text{EO}}(s)$  为工程对象 EO 的传递函数, 暂且指定 EO 的纯滞后为  $3T_{\alpha}$ .

其中, 在  $K_\alpha = 1$ ,  $T_\alpha = 100$  s, 在 EO 输入为 1, 测得  $T_{0.63} \approx 619$  s. 出于对比, 分别取  $n_{\text{eng}} = 6, 8, 12$ , 则得到 SO-IFC 工程参数, 如表 1 所示.

表 1 SO-IFC 工程参数

Table 1 Engineering parameter of second order of internal feedback controller

| $n_{\text{eng}}$      | $T_{\text{NIFD}} = T_{0.63}/n_{\text{eng}}$ | $K_{\text{NIFD}} = K_\alpha$ |
|-----------------------|---------------------------------------------|------------------------------|
| $n_{\text{eng}} = 6$  | $T_{\text{NIFD}} = 103$ s                   | $K_{\text{NIFD}} = 1$        |
| $n_{\text{eng}} = 8$  | $T_{\text{NIFD}} = 77$ s                    | $K_{\text{NIFD}} = 1$        |
| $n_{\text{eng}} = 12$ | $T_{\text{NIFD}} = 39$ s                    | $K_{\text{NIFD}} = 1$        |

其中, 在  $K_{\text{HGPID}} = 90$ ,  $K_\alpha = 1$ ,  $T_\alpha$  变化范围  $1 \sim 250$  s, 得到 SO-IFCS 开环频域相位稳定裕度  $\text{PM}_{\text{SO-IFCS-OL}}$  的计算结果, 如图 6 所示.

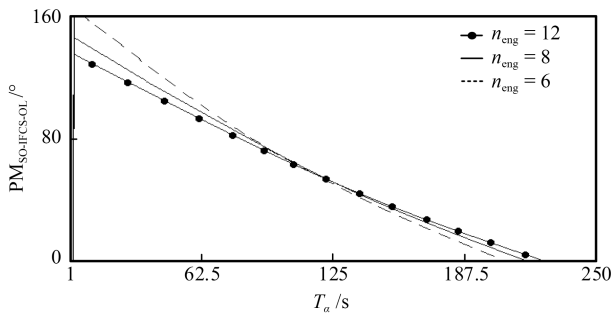


图 6 工程参数整定方法的开环系统频域相位稳定裕度 (图 1)

Fig. 6 Schematic diagram of frequency domain phase stability margin of open loop system of engineering parameter tuning method (Fig. 1)

由图 6 可见,  $n_{\text{eng}}$  越大,  $\text{PM}_{\text{SO-IFCS-OL}}$  随  $T_\alpha$  变化的特性也越平坦, 表明了通过提高  $n_{\text{eng}}$  能够获得更好的鲁棒性能.

在工程应用上, 不一定需要设置过高的  $K_{\text{HGPID}}$ , 其中在  $n_{\text{eng}} = 8$  时, 分别设置  $K_{\text{HGPID}} = 0.5, 2, 100$ , 得到  $\text{PM}_{\text{SO-IFCS-OL}}$  的计算结果, 如图 7 所示.

由图 7 可见, 通过降低  $K_{\text{HGPID}}$ , 能够获得更好的鲁棒性. 计算结果表明, 在  $K_{\text{HGPID}} > 2$  时,  $K_{\text{HGPID}}$  变化对  $\text{PM}_{\text{SO-IFCS-OL}}$  的影响已经不明显了.

## 2 仿真实验

仿真实验的数值计算由数字计算机完成, 文中无特别说明, 数值离散计算间隔为 1 s. SO-IFC 的输入和外扰采用阶跃信号. 仿真实验主要从抑制不确定性的方面考察 SO-IFC 的性能.

其中 IFG 采用二阶惯性环节, 为

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

式中,  $W_{\text{IFG}}(s)$  为 IFG 的传递函数,  $T_{\text{IFG}}$  为 IFG 的惯性常数, 单位 s.

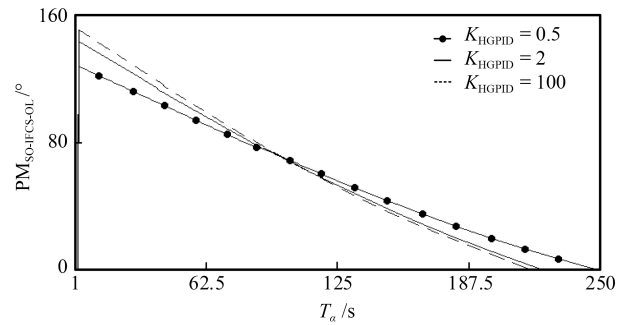


图 7 工程参数整定方法的开环系统频域相位稳定裕度 (图 2)

Fig. 7 Schematic diagram of frequency domain phase stability margin of open loop system of engineering parameter tuning method (Fig. 2)

出于仿真实验的需要, 扰动模型 DM 采用一阶惯性环节, 用  $T_{\text{DM}}$  表达 DM 的惯性时间常数, 单位 s.

文中同时给出了 SO-IFC 与 PID 控制的实验对比结果. PID 中的微分作用采用实际微分环节<sup>[41]</sup>. 用  $PV_{\text{SO-IFC}}(t)$  表达 SO-IFC 控制的过程输出信号, 用  $CO_{\text{SO-IFC}}(t)$  表达 SO-IFC 控制器的输出信号. 用  $PV_{\text{PID}}(t)$  表达 PID 控制的过程输出信号, 用  $CO_{\text{PID}}(t)$  表达 PID 控制器的输出信号.

对 PID 参数整定的原则是: 在输入阶跃给定时, 过程输出超调量不超过 5%.

在 PO 参数为:  $n = 4$ ,  $K_\alpha = 1$ ,  $T_\alpha = 100$  s. 得到 NIFD 参数为:  $n = 4$ ,  $T_{\text{NIFD}} = 100$  s,  $K_{\text{NIFD}} = 1$ . 设置  $K_{\text{HGPID}} = 90$ ,  $T_{\text{IFG}} = 100$  s,  $T_{\text{SOIF}} = 15$  s,  $T_{\text{DM}} = 100$  s. 其中在输入为 1, 外扰为 0.5, 得到的实验结果, 如图 8 所示.

在图 8 实验结果基础上, 在 PO 中增加 80 s 纯滞后, 得到的仿真实验结果, 如图 9 所示.

在图 8 实验结果基础上, 对  $PV_{\text{SO-IFC}}(t)$  和  $PV_{\text{PID}}(t)$  进行平方处理, 即  $[PV_{\text{SO-IFC}}(t)]^2$  和  $[PV_{\text{PID}}(t)]^2$ , 目的是模拟高阶非线性对象. 其中在输入为 1.5, 外扰为 0.25, 得到的实验结果, 如图 10 所示.

由图 8~10 可见, 相对 PID 控制, SO-IFC 在外扰抑制性能上包括在抑制对象的不确定性和非线性性能上具有良好的优势.

在图 8 实验基础上, 在  $PV_{\text{SO-IFC}}(t)$  中加入相对幅值为 0.01 的白噪声干扰. 其中在输入为 0, 外扰为 0, 得到的实验结果, 如图 11 所示.

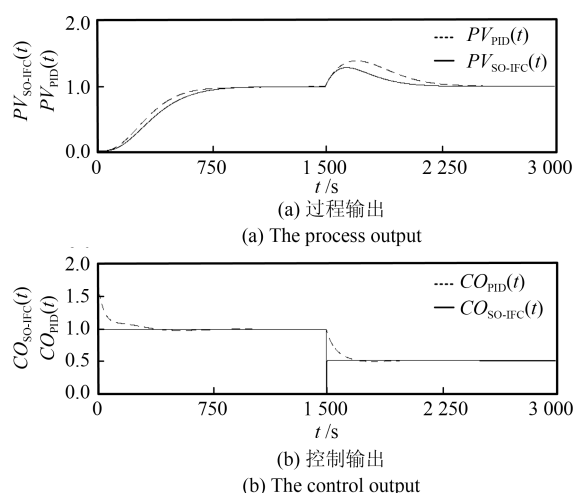


图 8 二阶内反馈器控制特性仿真实验结果 (图 1)

Fig. 8 The diagram of control characteristic simulation results of second order of internal feedback controller (Fig. 1)

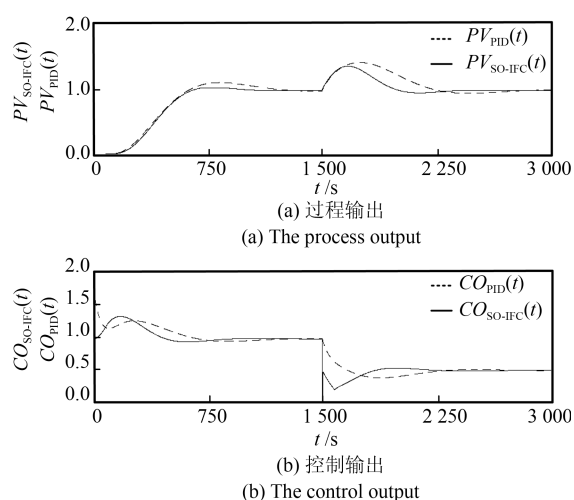


图 9 二阶内反馈器控制特性仿真实验结果 (图 2)

Fig. 9 The diagram of control characteristic simulation results of second order of internal feedback controller (Fig. 2)

由图 11 可见, NSTF 对白噪声干扰具有显著的抑制作用. 在不使用 NSTF 滤波的前提下, 则 SO-IFC 的控制输出被白噪声严重干扰.

根据第 1.6 节给出的工程对象 EO, 其中在  $K_\alpha = 1$ ,  $T_\alpha = 100\text{s}$ , 在 EO 输入为 1, 测得  $T_{0.63} \approx 619\text{s}$ . 按  $n_{\text{eng}} = 8$  整定 SO-IFC 的工程参数. 得到  $T_{\text{NIFD}} \approx 77\text{s}$ ,  $K_{\text{NIFD}} = 1$ ,  $T_{\text{IFG}} = 77\text{s}$ . 设置  $K_{\text{HGPID}} = 90$ ,  $T_{\text{SOIF}} = 15\text{s}$ ,  $T_{\text{DM}} = 100\text{s}$ . 其中在输入为 1, 外扰为 0.5, 得到的实验结果, 如图 12 所示.

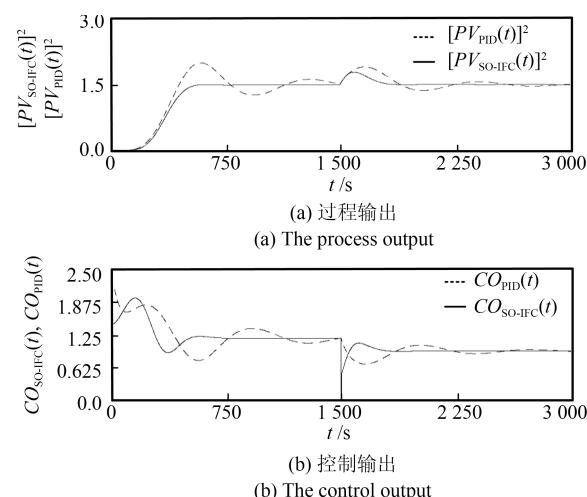


图 10 二阶内反馈器控制特性仿真实验结果 (图 3)

Fig. 10 The diagram of control characteristic simulation results of second order of internal feedback controller (Fig. 3)

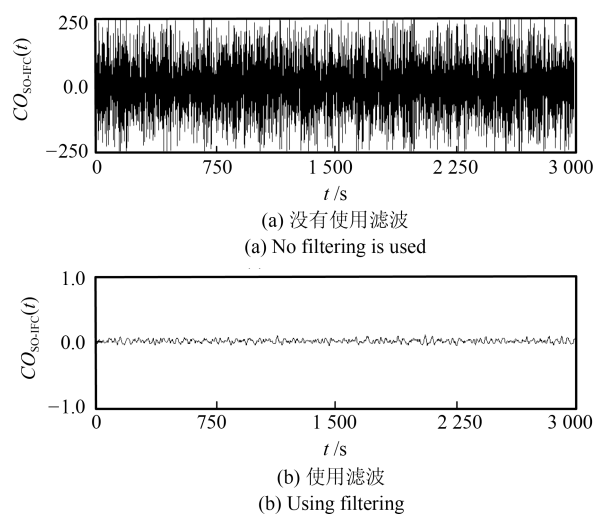


图 11 二阶内反馈器控制特性仿真实验结果 (图 4)

Fig. 11 The diagram of control characteristic simulation results of second order of internal feedback controller (Fig. 4)

由图 12 可见, 相对 PID 控制, 采用工程参数整定的 SO-IFC 对高阶纯滞后工程对象具有较好的控制特性. 实验结果验证了 EPTM 的有效性.

### 3 实际应用

将文中 SO-IFC 运用于某电厂的某 1000 MW 超超临界燃煤机组的锅炉主控系统的优化. 锅炉主控系统包括汽机主控系统是机组协调控制系统的基本组成部分. 协调控制系统有二种控制模式, 分别为“炉跟机”和“机跟炉”控制模式. 其中在“炉跟机”控制模式下, 汽机主控系统控制机组负荷, 锅炉主控系统控制锅炉主汽压力, 主要优点是机组负荷跟踪

给定负荷的动态特性较好, 但锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定的动态偏差较大. 所述锅炉主控系统和汽机主控系统均采用常规的 PID 控制策略.

将 SO-IFC 用于所述锅炉主控系统的优化, 优化的主要目的是改善“炉跟机”控制模式下, 锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定的动态特性.

采用 SO-IFC 优化, 如图 13 所示.

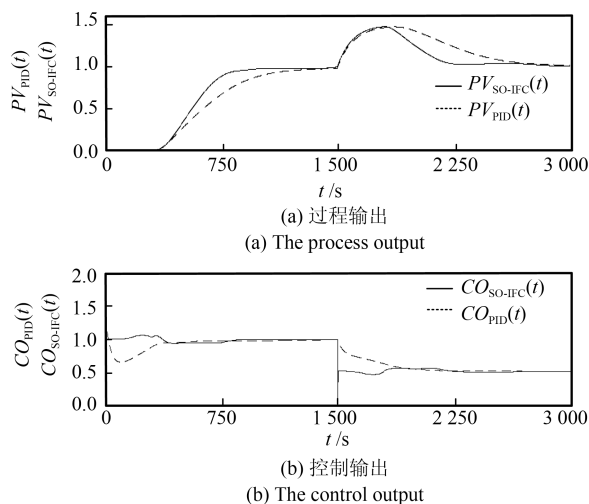


图 12 工程对象控制特性仿真实验结果

Fig. 12 The diagram of control characteristic simulation results of engineering object

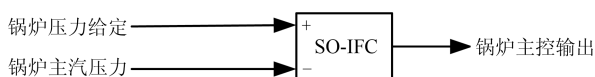


图 13 锅炉主控系统优化示意图

Fig. 13 The optimization diagram of boiler master control system

在采用 SO-IFC 优化过程, 出于对比, 保留了原 PID 控制策略, 并且考虑了 SO-IFC 与 PID 之间的无扰切换问题.

其中在机组负荷 725 MW, 通过现场实验得到该锅炉主控输出—锅炉主汽压力对象的等效二阶模型 (Equivalent second order model, ESOM) 为

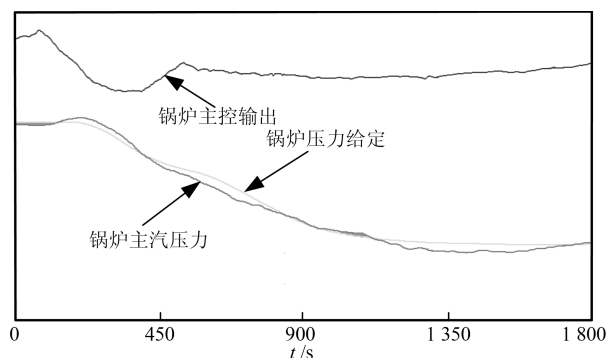
$$W_{\text{ESOM}}(s) = \frac{0.92}{(1 + 253s)(1 + 295s)} \quad (12)$$

式中,  $W_{\text{ESOM}}(s)$  为 ESOM 的传递函数. 但 ESOM 并不代表实际对象的模型一定是二阶的, 其中还包含有纯滞后的因数等.

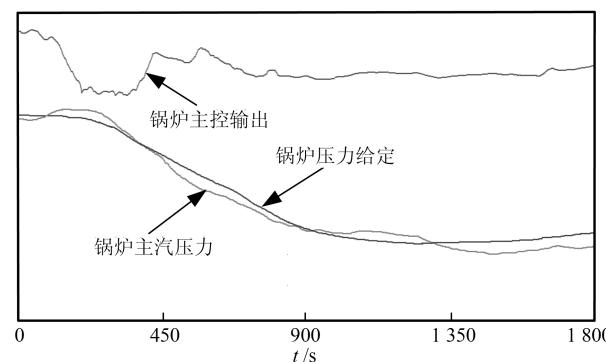
ESOM 对应的  $T_{0.63} \approx 562$  s, 按  $n_{\text{eng}} = 8$  整定 SO-IFC 的工程参数. 得到  $T_{\text{NIFD}} \approx 70$  s,  $K_{\text{NIFD}} = 0.92$ . 实际设置  $K_{\text{HGPID}} = 3$ ,  $T_{\text{IFG}} = 70$  s,  $T_{\text{SOIF}} = 20$  s. 因  $K_{\text{HGPID}}$  较低, 实际采用了一级 NSTF 滤波的结构.

在采用 SO-IFC 优化后, 得到所述锅炉主控系统的控制特性, 如图 14(a) 所示.

将锅炉主控由 SO-IFC 控制切换到常规 PID 控制, 找一段与图 14(a) 接近的变化趋势进行比较, 包括锅炉主控输出、锅炉压力给定、锅炉主汽压力趋势的高低限和趋势的时间长度相同等, 如图 14(b) 所示.



(a) SO-IFC 过程输出  
(a) The control of second order of internal feedback controller



(b) PID 控制  
(b) The control of PID

锅炉主控输出: 500 ~ 100 MW  
锅炉压力给定: 15 ~ 30 MPa 锅炉主汽压力: 15 ~ 30 MPa

图 14 控制特性对比示意图

Fig. 14 Comparison of control characteristics

由图 14(a) 可见, 在采用 SO-IFC 优化后, 锅炉主控输出变化比较平稳, 能有效克服外界扰动. 在稳态负荷条件下, 锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定 (2 小时内) 的最大误差为 0.28 MPa. 在变负荷条件下, 锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定的最大动态误差为 0.68 MPa.

由图 14(b) 可见, 在切换到常规 PID 控制后, 锅炉主控输出的波动较大. 在稳态负荷条件下, 锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定 (2 小时内) 的最大误差为 0.51 MPa. 变负荷条件下, 锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定的最大动态误差为 1.17 MPa.

通过图 14 的对比可知, 相对 PID 控制, 所述锅炉主控系统采用 SO-IFC 优化后, 在稳态负荷条件

下, 锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定 (2 小时内) 的最大误差从 0.51 MPa 降低为 0.28 MPa. 在变负荷条件下, 锅炉主汽压力跟踪锅炉压力给定的最大动态误差为从 1.17 MPa 降低为 0.68 MPa. 可见, 采用 SO-IFC 优化收到了明显的效果.

另外, 长期投运的结果表明, 运用 SO-IFC 控制对煤种的变化具有良好的适应性.

## 4 结论

采用高增益 PID 控制器 HGPID, 将新型内反馈器 NIFD 用于高阶对象的并联降阶, 将 HGPID 控制的阶次降低为二阶, 将新型正弦跟踪滤波器 NSTF 用于 HGPID 的降阶处理或噪声干扰滤波, 构造出具有良好鲁棒性和扰动抑制性能的二阶内反馈控制器 SO-IFC. 工程参数整定方法 EPTM 在较大程度简化了 SO-IFC 参数的整定. 采用降低控制阶次的方法, 是提高低阶控制器在大滞后过程跨阶控制性能的有效途径. SO-IFC 的主要缺点在于高增益 PID 控制器 HGPID 的高频增益极高, 需要采用两级 NSTF 滤波的结构, 增加了 SO-IFC 的复杂程度. 在实际运用中, 完全可根据需要设置 HGPID 的实际增益, 如设置较低的增益也是可能的. 在 HGPID 的增益较低时, 可采用一级 NSTF 滤波的结构; 文中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工程应用的结果, 验证了文中所提出观点和方法的正确性和有效性.

## References

- Gao Zhi-Qiang. On the foundation of active disturbance rejection control. *Control Theory & 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)
- Cao Xu-Feng, Wang Xin, Wang Zhen-Lei. Multiple model adaptive mixing control based on switching. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(1): 94–100  
(曹叙凤, 王昕, 王振雷. 基于切换机制的多模型自适应混合控制. 自动化学报, 2017, **43**(1): 94–100)
- 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络域分析与系统设计. 自动化学报, 2018, **44**(2): 262–269)
- Zhang Yan, Zhang Tao, Wang Rui, Liu Ya-Jie. A model predictive control based distributed coordination of multi-microgrids in energy internet. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(8): 1443–1456  
(张彦, 张涛, 王锐, 刘亚杰. 基于模型预测控制的含多微电网的能源互联网分布式协同优化. 自动化学报, 2017, **43**(8): 1443–1456)
- Cheng Huan-Xin, Yi Fei. Light gasoline etherification predictive control with BP neural network model. *Automation in Petro-Chemical Industry*, 2012, **48**(6): 40–42  
(程焕新, 伊飞. 面向轻汽油醚化的 BP 神经网络的模型预测控制. 石油化工自动化, 2012, **48**(6): 40–42)
- Feng Li. The realization of process control in reactor-regenerator section based on model predictive control. *Petrochemical Industry Application*, 2012, **31**(1): 47–50  
(冯立. 基于模型预测控制的反应再生工艺控制实现. 石油化工应用, 2012, **31**(1): 47–50)
- 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)
- Tong Yi-Fei, Jin Xiao-Ming. Optimal control of multi-objective in circulating fluidized bed boiler combustion process based on generalized predictive control method. *Proceedings of the CSEE*, 2010, **30**(11): 38–43  
(童一飞, 金晓明. 基于广义预测控制的循环流化床锅炉燃烧过程多目标优化控制策略. 中国电机工程学报, 2010, **30**(11): 38–43)
- 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)
- 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)
- 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)
- Qian Ji-Xin. Some challenging problems in research on control theory. *Control Engineering of China*, 2005, **12**(3): 193–195  
(钱积新. 控制理论研究中的几个挑战性的问题. 控制工程, 2005, **12**(3): 193–195)
- Xu Yan-He, Zhou Jian-Zhong, Xue Xiao-Ming, Xia Xin, Pei Xiang-Yu, Li Chao-Shun. Fractional order PID-based regulation and control of pumped storage units under no-load condition. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, **39**(18): 43–48  
(许颜贺, 周建中, 薛小明, 夏鑫, 裴翔羽, 李超顺. 抽水蓄能机组空载工况分数阶 PID 调节控制. 电力系统自动化, 2015, **39**(18): 43–48)
- Liang Xin-Rong, Liu Yan-Yan, Man Guo-Yong, Xu Jian-Min. Density control for freeway traffic flow based on the composite of PID controller and cerebella model articulation controller. *Control Theory & Applications*, 2013, **30**(10): 1281–1286  
(梁新荣, 刘艳艳, 满国永, 徐建闽. 基于小脑模型关节控制器与 PID 复合的高速公路交通流密度控制. 控制理论与应用, 2013, **30**(10): 1281–1286)
- 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)
- 16 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)
  - 17 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 & 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)
  - 18 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.)
  - 19 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)
  - 20 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: IEEE, 2007. 3501–3506
  - 21 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)
  - 22 Xie Yong-Bin, Luo Zhong, Feng Zu-Ren, Hu Bao-Sheng. Research of closed-loop for DMC predictive control of second-order system. *Control Theory & Applications*, 1997, **14**(3): 398–402  
(谢永斌, 罗忠, 冯祖仁, 胡保生. 二阶惯性系统 DMC 预测控制的闭环分析. 控制理论与应用, 1997, **14**(3): 398–402)
  - 23 Zhang Yong. Analysis on positive effect of time-delay on a class of second-order oscillatory systems with unit negative feedback. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(23): 6–12  
(张勇. 时滞对一类单位负反馈二阶振荡系统的正面作用分析. 物理学报, 2012, **61**(23): 6–12)
  - 24 Zhu Bo, Wang Xin-Hua, Cai Kai-Yuan. Fast and nonovershooting control for a double-integral system with step input: nonlinear PD control based on gain-switching. *Control Theory & 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)
  - 25 Zhong Bin, Zhan Ren-Jun. Sliding-mode control for second order nonlinear system based on generalized Gauss function. *Computer Simulation*, 2010, **27**(4): 371–374  
(钟斌, 战仁军. 基于广义高斯函数的二阶非线性系统滑模控制. 计算机仿真, 2010, **27**(4): 371–374)
  - 26 Duan Guang-Ren. Robust stability of uncertain second-order time-varying linear systems. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2014, **34**(10): 1192–1205  
(段广仁. 不确定二阶时变系统的稳定鲁棒性. 系统科学与数学, 2014, **34**(10): 1192–1205)
  - 27 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 & Applications*, 2013, **30**(12): 1630–1640  
(袁东, 马晓军, 曾庆含, 邱晓波. 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)
  - 28 Xu Chuan-Jing, Zhao Min, Li Tian-Ming. Research on PID parameter tuning based on an improved genetic 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)
  - 29 Liu Xiao-Bin. Study on the control strategy of air-fuel ratio of network PID parameter tuning based on BP neural. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2013, **20**(6): 7–11, 29  
(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, 29)
  - 30 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)
  - 31 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. 最速跟踪微分器的一种新型离散形式. 信息与控制, 2013, **42**(6): 729–734)
  - 32 Guo B Z, Zhao Z L. On convergence of tracking differentiator. *International Journal of Control*, 2011, **84**(4): 693–701
  - 33 Li Xiang-Yang. Iterative learning control based on finite time tracking differentiator. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(7): 1366–1375  
(李向阳. 基于有限时间跟踪微分器的迭代学习控制. 自动化学报, 2014, **40**(7): 1366–1375)
  - 34 Li Jun, Wan Wen-Jun, Wang Yue-Chao. Research and application of a new type of linear second-order filter. *Control Theory & 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)
  - 35 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)
  - 36 Hou Jie, Liu Tao. Closed-loop subspace model identification using innovation estimation and orthogonal projection. *Acta Automatica Sinica*, 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)

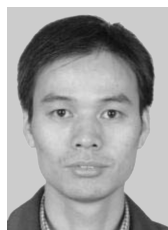
- 37 You Ming, Zong Qun, Zeng Fan-Lin, Tao Yang, Xu Rui. Model order reduction for hypersonic vehicle based on balanced truncate method. *Control Theory & Applications*, 2014, **31**(6): 795–800  
(尤明, 宗群, 曾凡琳, 陶阳, 徐锐. 基于平衡截断方法的高超声速飞行器模型降阶. 控制理论与应用, 2014, **31**(6): 795–800)
- 38 Cen Yi-Gang, Wei Yu, Sun De-Bao. The application of wavelet threshold neural network in the de-noising and prediction. *Control Theory & Applications*, 2008, **25**(3): 485–491  
(岑翼刚, 尉宇, 孙德宝. 小波阈值神经网络在信号去噪及预测中的应用. 控制理论与应用, 2008, **25**(3): 485–491)
- 39 Li Jun, Wan Wen-Jun, Liu Zhi-Gang, Chen Shi-He, Zhang Xi. A method of frequency domain analysis for control systems 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)
- 40 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)
- 41 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)



**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.

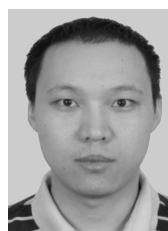
E-mail: lijun\_87389@126.com

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



**万文军** 广东电科院能源技术有限责任公司高级工程师, 博士. 主要研究方向为火电厂热工控制. E-mail: tansthin@163.com

(**WAN Wen-Jun** Ph.D., senior engineer at the Guangdong Electric Power Science Research Institute Energy technology Co., Ltd. His research interest covers automatic control of power plant thermal processes.)



**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 Science Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd. His research interest covers automatic control of power plant thermal processes.)