

# 蒸汽发生器水位改进分数阶控制器研究

郭丹, 夏虹\*

(哈尔滨工程大学 核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 蒸汽发生器在瞬态扰动时存在严重的虚假水位现象, 增加了低功率水位控制的难度。为研究蒸汽发生器低功率水位控制问题, 利用线性参数变化理论, 建立了时变的多胞线性参数变化模型。在此模型基础上, 提出了分数阶控制器。依据分数阶微积分理论, 设计了串级分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器。根据 Oustaloup 间接离散化方法实现了分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制并对 Oustaloup 方法进行了改进。研究了在负荷变化时, 内环和外环 4 个阶次参数以及改进算法后 2 个参数变化对系统控制性能的影响。在不同功率区间, 相同负荷变化的情况下, 对改进后的串级分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器进行了仿真实验。结果表明, 所设计的改进串级分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器能有效抑制干扰, 分数阶微积分算子的阶次以及改进的 Oustaloup 方法引入的系数对控制效果均有一定影响, 合理调节参数能明显改善系统的控制性能。

**关键词:** 蒸汽发生器; 水位控制; 分数阶微积分; Oustaloup 方法; 分数阶控制器; 参数变化影响

中图分类号: TL365

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2018)07-1268-08

doi: 10. 7538/yzk. 2017. youxian. 0660

## Study on Improved Fractional Order Controller of Steam Generator Water Level

GUO Dan, XIA Hong\*

(Fundamental Science on Nuclear Safety and Simulation Technology Laboratory,  
Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The steam generator exists the serious false water level phenomenon in a transient disturbance. The difficulty of controlling water level in the low power increases. In order to study the low power water level control problem of steam generator, a time-varying linear parameter change model was established by using linear parameter change theory. A fractional order controller for the steam generator model was proposed based on this model. According to fractional calculus theory, fractional order  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  was adopted. Oustaloup indirect discretization method was used to realize the fractional order  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  control and the Oustaloup method was improved. The influence of four order parameters of inner-loop and outer-loop and two parameters of the

收稿日期: 2017-11-02; 修回日期: 2018-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379046)

作者简介: 郭丹(1990—), 女, 黑龙江巴彦人, 博士研究生, 从事蒸汽发生器水位建模与控制研究

\* 通信作者: 夏虹, E-mail: xiahong@hrbeu.edu.cn

网络出版时间: 2018-05-15; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20180515.1024.006.html>

improved method varying on system control performance was studied when the load changed. In different power intervals, the simulation experiments of the improved cascade fractional  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  controller were carried out in the case of the same load change. The analysis result shows that the designed improved cascade fractional  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  controller can resist interference effectively. The four order parameters of inner-loop and outer-loop and two parameters of the improved method varying influence control effect to a certain degree. Adjusting the parameters reasonable can improve the transient characteristics of the system obviously.

**Key words:** steam generator; water level control; fractional calculus; Oustaloup method; fractional order controller; parameter variation effect

蒸汽发生器(SG)是核电站用于连接一回路与二回路的换热桥梁。其中,蒸汽发生器水位更是影响核安全至关重要的变量。只有将蒸汽发生器水位控制在容许范围内,才能确保核电站运行的安全可靠。目前,绝大部分 SG 水位控制系统均采用传统的串级 PID 控制方法<sup>[1]</sup>。但 SG 水位存在由收缩与膨胀现象引起的逆动力学效应,使低功率时传统的 PID 控制的控制效果在瞬态情况下仍存在很大的提升空间。为改善 SG 水位的控制效果,国内外研究人员做了许多研究。如  $H_{\infty}$  控制<sup>[2-3]</sup>、模型预测控制<sup>[4]</sup>、模糊控制<sup>[5]</sup>、神经网络控制<sup>[6]</sup>等。这些方法在 SG 水位的控制上取得了一定的效果。

分数阶控制系统是以分数阶微积分控制理论为基础,继承了传统 PID 控制的思想,而又有所发展的创新型控制技术。随着分数阶微积分理论不断完善,分数阶控制成为当前控制领域较热门的研究方向之一。Podlubny 等<sup>[7]</sup>于 1999 年提出了分数阶 PID 控制器,其一般格式简记为  $PI^{\lambda}D^{\mu}$ ,增加了积分阶次  $\lambda$ 、微分阶次  $\mu$ ,较整数阶 PID 控制器多了两个可调参数,增加了控制器设计的自由度。分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器的概念提出后成为国内外学者的研究热点。然而现有文献大多是将分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器应用于单输入单输出的低阶线性简单被控对象,对于将分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器应用于蒸汽发生器这类多输入单输出高阶复杂模型则鲜有研究<sup>[8]</sup>。

本文针对蒸汽发生器模型提出基于 Oustaloup 间接离散化方法实现的串级分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器,利用分数阶控制器的独特优势

克服该被控对象的时变、参数和结构的不确定性,改善传统串级 PID 控制器的瞬态性能,分析  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制器分数阶阶次及改进 Oustaloup 算法引入的参数在可控范围内变化时对所设计控制系统的影响。

## 1 蒸汽发生器数学模型

本文采用 Irving 等<sup>[9]</sup>给出的 SG 的简化数学模型,给水流量和蒸汽流量作为输入信号,水位作为输出信号,其状态方程形式如下:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1 u(t) + \mathbf{B}_2 q_v(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\quad (1)$$

其中: $\mathbf{x}(t)=[x_1(t) \ x_2(t) \ x_3(t) \ x_4(t) \ x_5(t)]^T$  表示状态变量; $u(t)$ 为给水流量,是系统的控制输入; $\mathbf{y}(t)$ 为 SG 水位; $q_v(t)$ 为 SG 的出口蒸汽流量;系数  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}_1$ 、 $\mathbf{B}_2$ 、 $\mathbf{C}$  表达式分别为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & G_1 \\ 0 & -\tau_2^{-1} & 0 & 0 & -G_2/\tau_2 \\ 0 & 0 & -2\tau_1^{-1} & 1 & G_3 \\ 0 & 0 & -\tau_1^{-2} - 4\pi^2 T_1^{-2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} -G_1 \\ G_2/\tau_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

其中, $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $T$  为与功率  $p$  有关的参数,其在 5 个典型功率点处的值列于表 1。

利用线性参数变化理论,建立 SG 水位的多胞 LPV 模型:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \bar{\mathbf{A}}(p)\mathbf{x}(t) + \bar{\mathbf{B}}_1(p)u(t) + \bar{\mathbf{B}}_2(p)q_v(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \bar{\mathbf{C}}\mathbf{x}(t)\end{aligned}\quad (2)$$

表 1 SG 水位模型参数  
Table 1 Parameter of SG water level model

$p/\%$	$q_v/(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$G_1$	$G_2$	$\tau_2/\text{s}$	$\tau_1/\text{s}$	$T/\text{s}$	$G_3$
5	57.4	0.058	9.63	48.4	41.9	119.6	0.181
15	180.8	0.058	4.46	21.5	26.3	60.5	0.226
30	381.7	0.058	1.83	4.5	43.4	17.7	0.310
50	660	0.058	1.05	3.6	34.8	14.2	0.215
100	1435	0.058	0.47	3.4	28.6	11.7	0.105

其中,  $\bar{\mathbf{A}}(p)$ 、 $\bar{\mathbf{B}}_1(p)$ 、 $\bar{\mathbf{B}}_2(p)$  为依赖实际功率相对于额定功率的百分数参数  $p$  变化的矩阵。

按照表 1 中的典型功率点数据, 将 SG 运行功率  $p$  分为 4 段: 5%~15%、15%~30%、30%~50%、50%~100%。依据 5%、15%、30%、50%、100% 功率点处的模型参数, 假设在每个功率段上, 模型参数呈线性变化, 则在功率点间的模型参数可根据线性插值的方法得出。式(2)中依赖功率参数  $p$  变化的矩阵  $\bar{\mathbf{A}}(p)$ 、 $\bar{\mathbf{B}}_1(p)$ 、 $\bar{\mathbf{B}}_2(p)$  用多胞的形式表示为:

$$\bar{\mathbf{A}}(p) = \sum_{i=1}^L \mu_i(p) \mathbf{A}_i, \bar{\mathbf{B}}_1(p) = \sum_{i=1}^L \mu_i(p) \bar{\mathbf{B}}_{1i},$$

$$\bar{\mathbf{B}}_2(p) = \sum_{i=1}^L \mu_i(p) \bar{\mathbf{B}}_{2i}$$

其中:  $[\mu_1 \quad \mu_2 \quad \dots \quad \mu_L] \in \mathbf{R}^L$ , 并满足  $\sum_{i=1}^L \mu_i = 1$ ,  $\mu_i \geq 0$ ,  $L$  表示多胞顶点的数量;  $\mathbf{A}_i$ 、 $\mathbf{B}_{1i}$ 、 $\mathbf{B}_{2i}$  为多胞顶点处的系数矩阵, 本文中每一功率段胞体顶点的数量为 2。

## 2 分数阶 $\text{PI}^\lambda \text{D}^\mu$ 控制器

### 2.1 分数阶 $\text{PI}^\lambda \text{D}^\mu$ 控制系统的稳定性分析

分数阶  $\text{PI}^\lambda \text{D}^\mu$  控制器的传递函数形式如下:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + K_I s^{-\lambda} + K_D s^\mu \quad (3)$$

其中:  $U(s)$  为控制器的输出;  $E(s)$  为控制器的误差输入。

分数阶  $\text{PI}^\lambda \text{D}^\mu$  控制系统的闭环传递函数为:

$$G_s(s) = \frac{G(s)G_c(s)}{1 + G(s)G_c(s)} = \frac{K_D s^{\lambda+\mu} + K_P s^\lambda + K_I}{\sum_{k=0}^n a_k s^{\beta_k+\lambda} + K_D s^{\lambda+\mu} + K_P s^\lambda + K_I} \quad (4)$$

闭环系统的特征多项式为:

$$P(s) = \sum_{k=0}^n a_k s^{\beta_k+\lambda} + K_D s^{\lambda+\mu} + K_P s^\lambda + K_I \quad (5)$$

依据劳斯判据, 只有闭环系统的特征方程 ( $P(s)=0$ ) 的根都在  $s$  复平面的左半平面, 分数阶闭环系统才能稳定。但  $P(s)$  是分数阶特征多项式, 计算复杂, 不方便判断其稳定性, 需将  $s$  复平面转换到另一复平面, 即将  $s$  复平面中的分数阶闭环系统的分数阶特征多项式  $P(s)$  转换成另一个复平面中的整数阶多项式来判定原分数阶闭环系统的稳定性。

首先寻找  $P(s)$  中的最大公因数  $1/v$  ( $v$  为大于 1 的整数), 将  $P(s)$  中每一项的阶数都用  $(1/v)m$  ( $m$  为整数) 来表示。设  $P(s)$  的最高阶数可表达为  $(1/v)k$ , 则  $P(s)$  可转换为:

$$P(s) = a_k s^{\gamma_k} + a_{k-1} s^{\gamma_{k-1}} + \dots + a_1 s^{\gamma_1} + a_0 s^{\gamma_0} = \sum_{k=0}^n a_k s^{\gamma_k} \quad (6)$$

然后令  $\omega = s^{1/v}$ , 将分数阶多项式  $P(s)$  转化为整数阶的多项式  $P(\omega)$ , 将  $s$  复平面转换为  $\omega$  复平面, 可得到:

$$P(\omega) = a_k \omega^k + a_{k-1} \omega^{k-1} + \dots + a_1 \omega + a_0 \quad (7)$$

在  $s$  复平面内, 分数阶闭环系统的稳定充要条件是  $P(s)=0$  的根  $s_i$  满足:

$$|\arg(s_i)| > \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

在  $\omega$  复平面内, 分数阶闭环系统的稳定充要条件是  $P(\omega)=0$  的根满足:

$$|\arg(\omega_i)| > \frac{\pi}{2v} \quad (9)$$

整数阶系统和分数阶系统的稳定区域分别如图 1 阴影区域所示。从图 1 可知, 分数阶  $\text{PI}^\lambda \text{D}^\mu$  控制系统相比整数阶 PID 控制系统具有更大的全局稳定域。

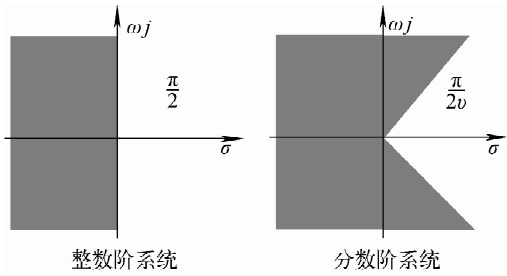


图1 控制系统稳定区域

Fig. 1 Stability region of control system

### 2.2 分数阶控制器的 Oustaloup 方法

整数阶微积分是分数阶微积分的特例,分数阶微积分是整数阶微积分的拓展。分数阶微积分的基本算子 ${}_a D_t^\alpha$ 的表达式如下:

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & R(\alpha) > 0 \\ 1 & R(\alpha) = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\alpha} & R(\alpha) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中: $a, t$ 为操作算子的上下限; $\alpha$ 为微积分阶次,可为任意数; $R(\alpha)$ 为 $\alpha$ 的实部。可看出,当 $R(\alpha) > 0$ 时,算子表示分数阶导数;当 $R(\alpha) < 0$ 时,算子表示分数阶积分。研究分数阶微积分算子的主要方法就是对其进行有理近似化和离散化<sup>[10]</sup>。由 Oustaloup 提出的近似算法<sup>[11]</sup>是目前近似化效果较好的间接近似方法,被广泛用于获得分数阶微分算子的整数阶近似滤波器。假定选定的拟合频率段为 $(\omega_b, \omega_h)$ ,则可用一个频带有限制的传递函数 $G(s)$ 来表示:

$$G(s) = \left[ C_0 \frac{1 + \frac{s}{\omega_b}}{1 + \frac{s}{\omega_h}} \right]^\alpha \quad (11)$$

其中: $C_0 = \omega_b/\omega_u = \omega_u/\omega_h$ ;  $\omega_u = (\omega_b \omega_h)^{1/2}$ 。式(11)是一个无理函数, Oustaloup 方法是通过采用一个有理函数级联的方式来实现对式(11)的逼近。这个级联的有理函数如下:

$$s^\alpha = G_N(s) = K \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (12)$$

$$G(s) = \lim_{N \rightarrow \infty} G_N(s) \quad (13)$$

$$\omega'_k = \omega_b \left( \frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}}$$

$$\omega_k = \omega_b \left( \frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1+\alpha)}{2N+1}}$$

$$K = \left( \frac{\omega_b}{\omega_h} \right)^{-\frac{\alpha}{2}} \prod_{k=-N}^N \frac{\omega_k}{\omega'_k}$$

其中: $2N+1$ 为滤波器的阶次; $(\omega_b, \omega_h)$ 为拟合频率段,一般在该区域内能较好地拟合分数阶微积分算子,而之外的区域将与微积分算子相差很多。分数阶微积分算子实现后,可得到分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器,描述如下:

$$G(s) = K_P + K_I/s^\lambda + K_D s^\mu \quad \lambda, \mu > 0 \quad (14)$$

分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器示意图如图2所示。传统的整数阶PI、PD和PID控制器相当于平面上几个特定的点。若积分阶次 $\lambda$ 和微分阶次 $\mu$ 可为任意值,则分数阶控制器覆盖了图中的整个平面,故分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器有较整数阶控制器更高的自由度。在某些控制问题中,最优的分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器的性能将远好于最优的整数阶PID控制器的性能<sup>[12]</sup>。

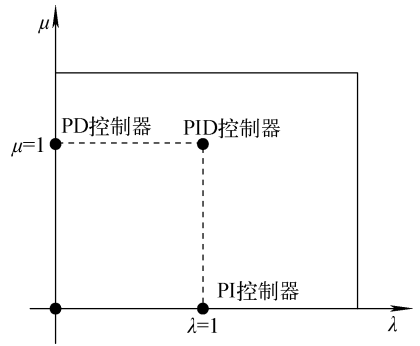


图2 分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器示意图  
Fig. 2 Structure scheme of fractional order  $PI^\lambda D^\mu$  controller

### 2.3 分数阶控制器的改进 Oustaloup 方法

由于 Oustaloup 方法在近似频段两端的近似效果不是很好,为了确保整个近似频段上都有很高的近似准确性和实用性,通过在近似过程中引入适当的系数对 Oustaloup 方法进行改进<sup>[13]</sup>。

对于分数阶微积分算子,在频率段 $(\omega_b, \omega_h)$ 内,用一个分数阶模型 $K(s)$ 来进行扫描,令:

$$K(s) = \left[ \frac{1 + \frac{s}{d\omega_b/b}}{1 + \frac{s}{b\omega_h/d}} \right]^\alpha \quad (15)$$

其中: $0 < \alpha < 1; b > 0; d > 0$ 。

为提高近似频段两端的近似效果,引入系数 $b$ 和 $d$ ,则有:

$$K(s) = \left(\frac{bs}{d\omega_b}\right)^\alpha \left(1 + \frac{ds^2 + d}{ds^2 + bs\omega_h}\right)^\alpha \quad (16)$$

对式(16)进行泰勒级数展开,有:

$$K(s) = \left(\frac{bs}{d\omega_b}\right)^\alpha (1 + \alpha P(s) + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} P^2(s) + \dots) \quad (17)$$

$$P(s) = \frac{-ds^2 + d}{ds^2 + bs\omega_h}$$

因此可得到:

$$s^\alpha = \frac{(d\omega_b)^\alpha b^{-\alpha}}{1 + \alpha P(s) + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} P^2(s) + \dots} \cdot \left[ \frac{1 + \frac{s}{d\omega_b/b}}{1 + \frac{s}{bs\omega_h/d}} \right]^\alpha \quad (18)$$

将泰勒级数保留一阶项,略去高阶项,可得:

$$s^\alpha = \frac{(d\omega_b)^\alpha}{b^\alpha (1 + \alpha P(s))} \left[ \frac{1 + \frac{s}{d\omega_b/b}}{1 + \frac{s}{bs\omega_h/d}} \right]^\alpha \quad (19)$$

将  $P(s)$  代入上式,得:

$$s^\alpha = \left(\frac{d\omega_b}{b}\right)^\alpha \frac{ds^2 + bs\omega_h}{d(1-\alpha)s^2 + bs\omega_h + d\alpha} \cdot \left[ \frac{1 + \frac{s}{d\omega_b/b}}{1 + \frac{s}{bs\omega_h/d}} \right]^\alpha \quad (20)$$

在实际应用中,需将上式转化为有理传递函数的形式,即:

$$K(s) = \lim_{N \rightarrow \infty} K_N(s) = \lim_{N \rightarrow \infty} \prod_{k=-N}^N \frac{1 + s/\omega'_k}{1 + s/\omega_k} \quad (21)$$

$$\omega'_k = \left(\frac{b}{d}\right)^{\frac{2k-\alpha}{2N+1}} \omega_h^{\frac{N+k+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}} \omega_b^{\frac{N-k+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}}$$

$$\omega_k = \left(\frac{b}{d}\right)^{\frac{2k+\alpha}{2N+1}} \omega_h^{\frac{N+k+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}} \omega_b^{\frac{N-k+\frac{1}{2}(1-\alpha)}{2N+1}}$$

构造出的分数阶微积分算子的连续有理传递函数模型为:

$$s^\alpha = G(s) = K \frac{ds^2 + bs\omega_h}{d(1-\alpha)s^2 + bs\omega_h + d\alpha} \cdot \prod_{k=-N}^N \frac{1 + s/\omega'_k}{1 + s/\omega_k} \quad (22)$$

$$K = (\omega_b\omega_h)^\alpha$$

### 3 蒸汽发生器串级分数阶 $PI^1D^\mu$ 控制器的设计

现有核电站蒸汽发生器水位控制大多采用整数阶串级 PID 控制系统,本文将分数阶  $PI^1D^\mu$  控制器应用于蒸汽发生器水位系统,在保持原有经典的串级 PID 控制系统结构的基础上,用分数阶  $PI^1D^\mu$  控制器分别替换主副回路的整数阶 PID 控制器,以期改善控制器的控制性能。串级分数阶  $PI^1D^\mu$  控制系统结构示于图 3。

分数阶  $PI^1D^\mu$  控制器较整数阶 PID 多 2 个可调自由度  $\lambda$  和  $\mu$ ,使得分数阶控制器具有如下优点<sup>[14]</sup>:1) 无稳态误差,有较好的输出扰动抑制能力;2) 分数阶控制器是具有无穷维的滤波器,因而能提高控制精度和系统的稳定性;3) 分数阶  $PI^1D^\mu$  控制器可通过改变分数阶次的系数实现对非线性较强的控制能力<sup>[15]</sup>,而整数阶 PID 往往出现很大的控制偏差,因此用分数阶控制器代替整数阶控制器以探究更好的控制效果。

### 4 仿真结果与分析

在 5%~15% 功率区间内,所设计的系统总仿真时间为 3 000 s,在 10 s 时,加入 +30 kg/s 的

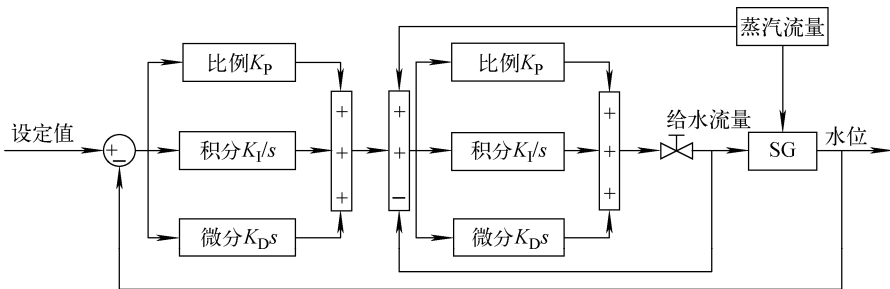


图 3 蒸汽发生器水位串级分数阶  $PI^1D^\mu$  控制系统结构

Fig. 3 SG water level cascade fractional order  $PI^1D^\mu$  control system structure

蒸汽流量扰动,在 1 000 s 时,水位设定值从 0 mm 阶跃到 100 mm,控制器公共部分的控制

参数保持不变,只改变探究的某个参数,仿真得到的水位响应结果如图 4~6 所示。

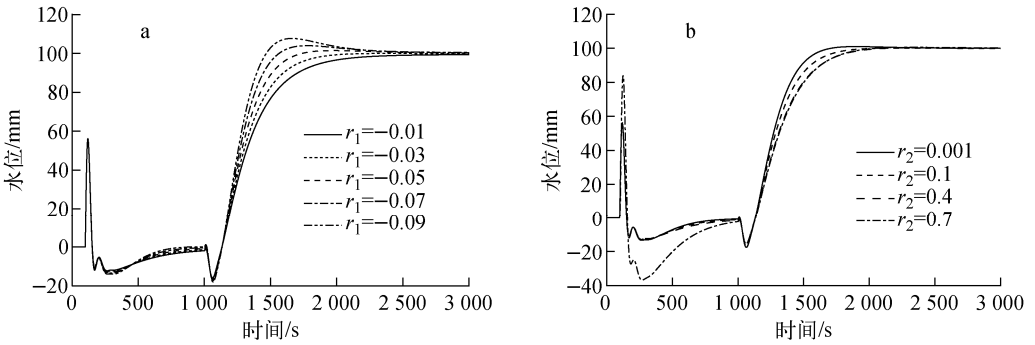


图 4 外环积分(a)和微分(b)阶次变化水位动态响应过程

Fig. 4 Dynamic response process of water level with outer-loop integral order (a) and differential order (b) changes

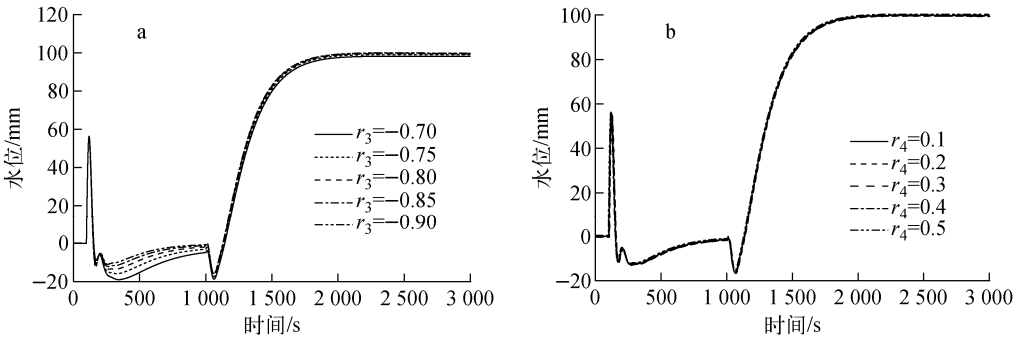


图 5 内环积分(a)和微分(b)阶次变化水位动态响应过程

Fig. 5 Dynamic response process of water level with inner-loop integral order (a) and differential order (b) changes

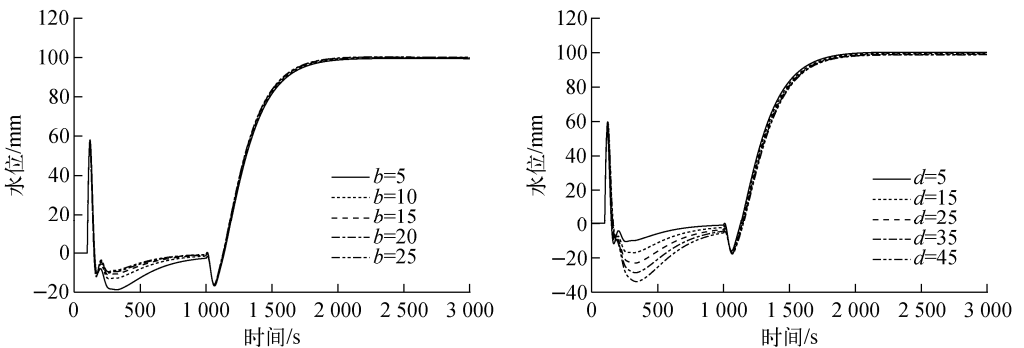


图 6 改进 Oustaloup 方法参数 b 和 d 变化水位动态响应过程

Fig. 6 Dynamic response process of water level with parameter b and d of improved Oustaloup method change

仿真结果显示,控制器设计是有效的。选定参数均在可稳定范围内,控制器公共部分控制器的控制参数保持不变时,对于蒸汽扰动,随

着外环积分阶次的逐渐增加,调节时间逐渐缩短,但在蒸汽扰动时该参数不敏感,变化不明显;随着外环微分阶次的逐渐增加,超调量增

加;随着内环积分阶次的逐渐增加,超调量逐渐减小,调节时间逐渐缩短。水位扰动时,随着外环积分阶次的逐渐增加,超调量逐渐增大,调节时间逐渐增加;随着外环微分阶次的逐渐增加,超调量逐渐减小,调节时间逐渐缩短;内环积分阶次的增加,对水位扰动的影响很小;内环微分阶次的增加,对蒸汽扰动以及水位扰动几乎没有影响。通过在近似过程中引入适当的系数对 Oustaloup 方法进行改进,蒸汽扰动时,随着引入的系数  $b$  的逐渐增加,超调量明显减小,调节时间逐渐缩短;随着引入的系数  $d$  的逐渐增加,超调量逐渐增大,调节时间不断增加。引入的系数  $b$  和  $d$  在水位扰动时对控制系统的响应不敏感。

在 4 个功率区间内,对所设计的系统总仿真时间为 3 000 s,在 10 s 时,加入 +30 kg/s 的蒸汽流量扰动,在 1 000 s 时,水位设定值从 0 mm 阶跃到 100 mm,根据上文,采用改进的 Oustaloup 方法实现串级分数阶  $PI^dD^b$  控制器的设计,选择合适的内外环积分与微分阶次  $r_1, r_2, r_3, r_4$  及算法系数  $b, d$ ,具体数值如下: $r_1 = -0.03; r_2 = 0.2; r_3 = -0.83; r_4 = 0.4; b = 11; d = 8$ 。仿真得到的不同功率区间内水位响应对比如图 7 所示。

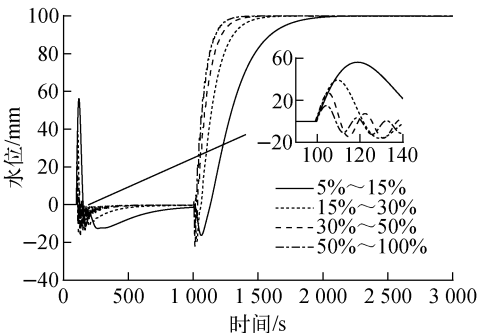


图 7 不同功率区间水位动态响应过程对比

Fig. 7 Comparison of dynamic response process of water level in different power ranges

仿真结果显示,基于改进的 Oustaloup 方法实现的串级分数阶  $PI^dD^b$  控制方法在 4 个功率段控制器都能有效调节蒸汽发生器水位。从低功率段到高功率段,蒸汽扰动时,超调量不断减小,调节时间逐渐缩短,但振荡次数略有增加,没有稳态误差;水位扰动时,所用调节时间

不断减少,均没有稳态误差。综上可知,高功率段较低功率段控制效果更好。

在 5%~15% 功率区间段,总仿真时间为 3 000 s,在 10 s 时,加入 +30 kg/s 的蒸汽流量扰动,在 1 000 s 时,水位设定值从 0 mm 阶跃到 100 mm,在保持共有参数一致的情况下,对所设计的分数阶控制系统与传统整数阶控制系统进行仿真对比,得到的仿真对比结果如图 8 所示。

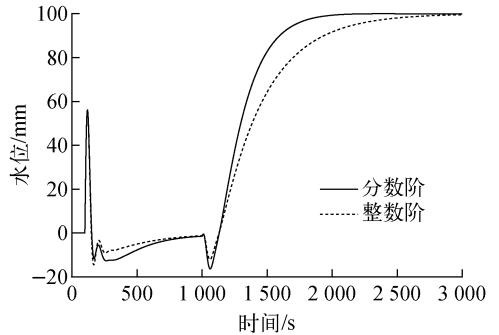


图 8 分数阶与整数阶控制系统水位动态响应过程对比

Fig. 8 Comparison of dynamic response process of water level between fractional and integral order control systems

仿真结果显示,基于改进的 Oustaloup 方法实现的串级分数阶  $PI^dD^b$  控制相比于传统整数阶控制在蒸汽扰动时,振荡次数相同,调节时间相同,但超调量小,均没有稳态误差;水位扰动时,所用调节时间大幅减少,均没有稳态误差。综上,由于分数阶具有较整数阶更大的参数搜索区间,更易获得最优的控制效果,而整数阶的搜索范围包含于分数阶内,容易陷入局部最优解。

## 5 结论

针对蒸汽发生器水位时变系统,提出了分数阶  $PI^dD^b$  控制器设计方法。仿真结果表明,在负荷变化时,分数阶  $PI^dD^b$  控制能取得满意的控制效果,展示了良好的适应性及鲁棒性,与传统整数阶 PID 控制器相比更灵活,具有明显优势。同时,串级分数阶  $PI^dD^b$  控制器,控制结构简单,与其他鲁棒控制设计方法相比不需要复杂的理论推导过程,方法易行,适用于工程应

用,且可明显提高控制效果,避免陷入局部最优解,研究分数阶  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  控制系统是十分有意义的,但分数阶微积分算子的阶次以及改进的 Oustaloup 方法引入的系数对控制效果均有一定影响,控制参数的增多,需要寻求合理的调参方法,可根据一定规律如相位裕度与幅值裕度法进行调节或引入智能优化算法根据合适的目标函数进行调节。

### 参考文献:

[1] 李凤宇,陆古兵,张龙飞,等. 蒸汽发生器水位双 PI 控制的改进研究[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(增刊): 279-282.  
LI Fengyu, LU Gubing, ZHANG Longfei, et al. Improved double PI control for nuclear steam generator water level[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(Suppl.): 279-282(in Chinese).

[2] WU J, NGUANG S K, SHEN J, et al. Robust  $H_{\infty}$  tracking control of boiler-turbine systems [J]. ISA Transactions, 2010, 49(3): 369-375.

[3] WEI L, FANG F.  $H_{\infty}$ -based LQR water level control for nuclear U-tube steam generators[C]// Chinese Control and Decision Conference (CCDC). USA: IEEE, 2013: 4 076-4 080.

[4] KOTHARE M V, METTLER B, MORARI M, et al. Linear parameter varying model predictive control for steam generator level control [J]. Computers & Chemical Engineering, 1997, 21: S861-S866.

[5] 滕树杰,张乃尧,崔震华. 压水堆蒸汽发生器水位的分层自适应模糊控制[J]. 核动力工程, 2003, 24(3): 281-284.  
TENG Shujie, ZHANG Naiyao, CUI Zhenhua. Hierarchical automatism adaptive fuzzy control of SG level of nuclear power plants in PWR[J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(3): 281-284(in Chinese).

[6] 周洪煜,汪正海,黄建平,等. 蒸汽发生器水位 SDRNN 优化自抗扰控制[J]. 动力工程学报, 2013, 33(10): 789-794.  
ZHOU Hongyu, WANG Zhenghai, HUANG Jianping, et al. Steam generator water level control based on SDRNN-ADRC optimization[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,

2013, 33(10): 789-794(in Chinese).

- [7] PODLUBNY I, DORCAK L, KOSTIAL I. On fractional derivatives, fractional-order dynamic systems and  $PI^{\lambda}D^{\mu}$  controllers[C]// Proceedings of the 36th Conference Decision and Control. [S. l.]: [s. n.], 1997: 4 985-4 990.
- [8] POMMIER-BUDINGER V, JANAT Y, NELSON-GRUEL D, et al. CRONE control of a multivariable lightly damped plant[C]//The 14th IEEE Mediterranean Electro-technical Conference. USA: IEEE, 2008: 54-60.
- [9] IRVING E, MIOSSEC C, TASSART J. Towards efficient full automatic operation of the PWR steam generator with water level adaptive control[C]//Proceedings of 2nd International Conference on Boiler Dynamics and Control in Nuclear Power Stations. London: British Nuclear Energy Society, 1980: 309-329.
- [10] CARLSON G, HALIJAK C. Approximation of fractional capacitors  $(1/s)^{1/n}$  by a regular Newton process[J]. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1964, 11(2): 210-213.
- [11] OUSTALOU A, COIFFET P. Systèmes asservis linéaires d'ordre fractionnaire; Théorie et pratique; Par Alain Oustaloup[M]. Paris: [s. n.], 1983.
- [12] XUE D, ZHAO C, CHEN Y Q. Fractional order PID control of a DC-motor with elastic shaft; A case study[C]//Proceedings of American Control Conference. USA: IEEE, 2006: 3 182-3 187.
- [13] 薛定宇,陈阳泉. 控制数学问题的 MATLAB 求解[M]. 北京:清华大学出版社, 2007.
- [14] AHN H S, BHAMBHANI V, CHEN Y Q. Fractional-order integral and derivative controller design for temperature profile control[C]// Chinese Control and Decision Conference. USA: IEEE, 2008: 4 766-4 771.
- [15] 曹军义,曹秉刚. 分数阶控制器的数字实现及其特性[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5): 791-794.  
CAO Junyi, CAO Binggang. Digital realization and characteristics of fractional order controllers [J]. Control Theory and Applications, 2006, 23(5): 791-794(in Chinese).