

不同目标函数参数优化的 FOPI 直流调速控制 *

张海明¹, 缪仲翠², 韩天亮²

(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了提高直流调速系统性能, 将直流调速系统速度控制器设计为分数阶 PI (FOPI), 并与整数阶 PI 控制特性进行比较。在确定 FOPI/PI 控制器参数时, 根据不同目标函数用粒子群算法对控制器参数进行了优化, 并分析了不同目标函数所确定的控制器参数对调速系统性能的影响。仿真表明: FOPI 有较好的控制性能。在设计控制器参数时, 可根据性能要求选用不同的目标函数优化设计控制器参数。

关键词: 直流调速系统; 目标函数; 分数阶控制器; 参数优化

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)09-0041-07

FOPI DC Speed Control with Different Objective Function Parameter Optimization *

ZHANG Haiming¹, MIAO Zhongcui², HAN Tianliang²

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiao Tong University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou Jiao Tong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to improve the performance of DC speed control system, the DC speed controller was designed as a fractional order PI (FOPI) and was compared with integer order PI for the control characteristics. When determining the FOPI/PI controller parameters, optimization was performed according to different objective functions using the particle swarm optimization algorithm. The influence of the controller parameters determined by different objective functions on the performance of the speed control system was analyzed. Simulation experiments showed that FOPI controller had better control performance. In the design of controller parameters, according to the performance requirements, different objective functions could be selected to optimize the design.

Key words: DC speed control system; objective function; fractional order controller; parameter optimization

0 引言

分数阶微积分算法的提出已有 300 多年的历史。I.Podlubny 教授^[1]提出了分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器 (Fractional Order Proportional Integral Derivative, FOPID)。近年来已应用到各领域, 取得比 PID 控制器更好的效果^[2-3]。FOPID 实质是将微积分变为分数阶的微积分, 比 PID 多 2 个自由度: 积分和微分的阶次 λ 和 μ , 使控制器具有更

大的调节自由度。因此 FOPID 不仅继承了整数阶 PID 的特性, 还具有更灵活的控制特性, 使控制系统具有更好的动态性能和鲁棒性^[4]。但 FOPID 控制器需整定 5 个参数 (K_p 、 K_i 、 K_d 、 λ 、 μ), 为控制器的设计增加了难度, 因此, FOPID 参数整定成为当前的研究热点。2001 年, Vinagre^[4]首次提出了采用相角裕度和幅值裕度的方法整定 FOPID 控制器参数, 随后, 学者们在此基础上做了大量的改进^[5-6]。Vinagre 等人提出了极点阶数搜索法, 并

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (61461023); 甘肃省教育厅项目 (2016B-036)

作者简介: 张海明 (1963—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机先进控制。

缪仲翠 (1971—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电机先进控制。

大量的学者在此基础上进行了改进。Barbosa 等人^[7]将整定整数阶 PID 的 Ziegler-Nichols 方法应用于 FOPID 参数整定。随着智能优化算法的发展,智能优化算法在对 FOPID 控制器参数寻优中得到了广泛的应用。文献[8]用人工蜂群智能优化方法对基于直流电动机的 FOPID 控制器参数进行了寻优。文献[9-10]用粒子群优化方法对电机分数阶控制器参数进行了优化。文献[11]用遗传算法对分数阶控制器进行了寻优。这些智能寻优方法都以目标函数(适应度函数)为参数优化性能指标,因此目标函数的选取至关重要,直接影响参数优化的效果。

本文以直流调速系统为控制对象,主要研究速度控制器分别为 FOPI 和 PI 时的控制特性。在 FOPI/PI 控制器设计时,用粒子群智能寻优算法(Particle Swarm Optimization, PSO)确定控制器参数。在 PSO 寻优时,研究了选取不同目标函数(ITAE, ITSE 等)进行参数优化对 FOPI 和 PI 控制性能的影响,并通过仿真验证了其有效性。

1 直流调速系统

在双闭环控制系统中采用他励直流电动机作为控制对象。该系统的结构框图如图 1 所示^[12]。

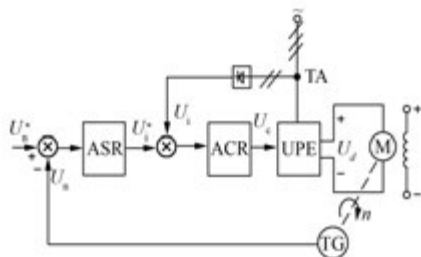


图 1 双闭环直流调速系统的结构框图

在双闭环直流调速系统中电流环(ACR)作为内环,系统正常运行时起跟随作用。本文 ACR 用整数阶 PI。转速环(ASR)在调速系统中起主导作用,其不仅使转速能快速跟随上给定电压的变化,并在稳态时能减小速度误差。为了提高调速系统的动态性能和稳态性能,ASR 采用 FOPI,并与 PI 进行比较。

2 分数阶控制器

2.1 分数阶控制器介绍

FOPID 控制器的数学模型为

$$U(s) = K_p + K_i s^{-\lambda} + K_d s^{\mu}, (\lambda, \mu > 0) \quad (1)$$

FOPID 控制器要对 5 个参数进行调整,即 $\{K_p, K_i, K_d, \lambda, \mu\}$ 。参数的整定和优化是决定控制器性能的关键。

2.2 FOPID 控制器的数字实现

用有限带宽的高阶滤波器来近似逼近分数阶控制器可达到满意效果^[3]。Oustaloup's 在频域范围内的近似滤波器可以在一定的频段内近似表示分数阶控制器。假设需要逼近的频段为 (ω_b, ω_h) ,则可以构造出连续滤波器的传递函数^[13]:

$$G_f(s) = K \prod_{k=1}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k}, \omega'_k = \omega_b \omega_u^{(2k-1-\alpha)}$$

$$\omega_k = \omega_b \omega_u^{(2k-1+\alpha)/N}, K = \omega_h^\alpha, \omega_u = \sqrt{\omega_h/\omega_b} \quad (2)$$

式中: α ——分数阶的阶次;

N ——滤波器的阶次;

ω_b, ω_h ——用户选定的拟合频率的上限和下限,一般在该区域内能较好地拟合分数阶微分算子。

本系统在低频范围内工作,因此取 $\omega_b = 0.01$, $\omega_h = 10\,000$ 。 N 确定了滤波器的零极点数量,当 N 取不同值时,滤波器幅频特性仿真如图 2 所示。

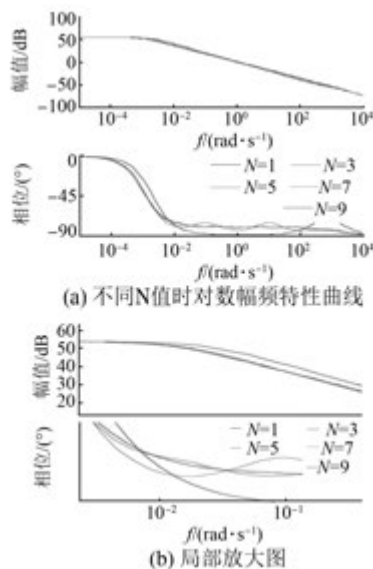


图 2 不同 N 值时对数幅频特性曲线

由图 2 可知,当 $N=1, 3$ 时,相频特性曲线波动较大,而当 $N=5$ 时波动显著减少。对 $N=7, 9$ 而言,相频特性曲线变化不大。 N 值越大可使近似误差越小,但计算量也随之增加。兼顾近似

误差和计算量两方面,选取 $N=7$ 。

用递推滤波器近似 FOPID 时会缺少 1 个在原点的极点,将导致控制系统出现稳态误差。可根据文献[14]里提到的误差滤波器来改进这一不足,误差滤波器的表达式如式(3)所示。 n 取足够小的实数时,不会改变原系统的结构和性质,但提高了控制系统的类型。

$$\frac{s+n}{s} \quad (3)$$

2.3 FOPI/PI 控制器设计

双闭环调速系统的速度控制器主要采用 FOPI 算法。具体形式^[15]如式(4)所示:

$$u(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} \quad (4)$$

式中: K_p 、 K_i ——比例和积分增益;

λ ——积分的阶次, $\lambda \in (0, 1)$, 可见当 $\lambda = 1$ 时,即为整数阶 PI 控制器。

FOPI 控制器的设计主要是 K_p 、 K_i 、 λ 3 个参数的确定。为了比较 FOPI 和 PI 的控制性能,对 FOPI 和 PI 控制器采用相同的参数整定方法。

2.3.1 目标函数的选取

本文采用 PSO 算法对 FOPI/PI 控制器参数加以整定,并同时确定误差滤波器中的 n 值,即需要整定参数 K_p 、 K_i 、 λ 、 n 。在使用 PSO 进行参数寻优时,各寻优参数是适应度(目标函数)的变量。当所选的参数使适应度最小时就认为此时控制系统达到了最优性能。因此目标函数的选取是至关重要的,直接影响粒子群算法的收敛速度以及能否找到最优解,并直接影响所确定的控制器性能。衡量控制系统性能的指标包括 3 个方面:稳定性、准确性和快速性。首先要保证稳定性,只有稳定的系统才具有实际应用意义。不同的控制对象,对调节品质的要求是各有侧重的,就形成了各类不同的目标函数。对于双闭环调速系统而言既要考虑系统的精确性和快速性,又要考虑系统的鲁棒性。为了比较不同目标函数所确定的控制器参数对控制系统的影响,选用常用的目标函数有以下几种。

(1) 时间乘绝对值误差积分准则(ITAE)。

$$J_1 = \int_0^\infty t |e(t)| dt \quad (5)$$

式中: $|e(t)|$ ——控制偏差。

ITAE 着重权衡后期的误差,较少考虑起始误差,能反映控制系统的快速性和精确性,且对振荡有足够的阻尼,对参数具有较好的选择性。

(2) 时间乘平方误差积分准则(ITSE)。

$$J_2 = \int_0^\infty t e(t)^2 dt \quad (6)$$

ITSE 考虑了动态偏差和响应时间,有较小的超调量和较快的响应速度。

(3) 在采用目标函数优化参数时,有的参数虽然有较好的阶跃响应特性,但是在实际调节过程中,当输入有突变等情况时会使控制器输出有剧烈振荡或由于输出过大而使执行机构饱和。为防止控制能量变化过大,参数整定时需要修正目标函数,在目标函数中考虑控制器的输出,即在积分项中加上 $u(t)$ 或 $u(t)^2$ 。

本文以 ITSE 为例,按控制器输出的平方的积分(ISCO)对 ITSE 进行修正:

$$J_3 = \int_0^\infty [c_1 t e(t)^2 + c_2 u(t)^2] dt \quad (7)$$

式中: c_1 、 c_2 ——权重;

$u(t)$ ——控制作用。

权重的选择平衡了控制误差和控制作用。

如果对控制系统的其他动态性能有特殊的要求,也可以在目标函数加入上升时间、超调量等惩罚因子,通过惩罚因子权值的选择平衡控制系统的静、动态性能的要求。

2.3.2 PSO 算法对 FOPI/PI 参数的整定

PSO 算法是基于群体智能理论的一种新兴进化计算技术。该算法通过群体微粒间的合作与竞争而产生群体智能来指导优化搜索,具有较强的收敛性、全局优化的特性,计算效率也较高^[16]。

PSO 优化算法的具体运行流程如图 3 所示。

(1) 初始化粒子群,包括每个粒子的位置和速度向量,如式(8)所示:

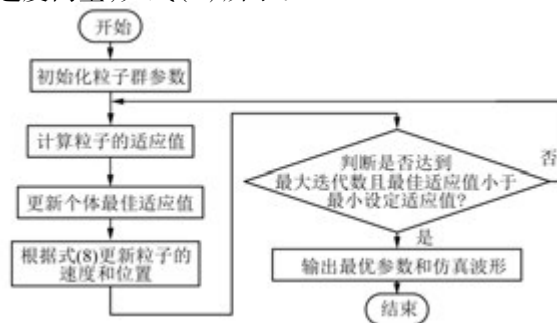


图 3 PSO 参数寻优流程图

$$\begin{aligned} \nu_{i+1} &= \omega \nu_i + c_1 r_1 (p_i - x_i) + c_2 r_2 (g_i - x_i) \\ x_{i+1} &= x_i + \nu_{i+1} \end{aligned} \tag{8}$$

式中： ν ——粒子速度；
下标 t ——第 t 次迭代；
 ω ——惯性因子, $\omega=0.6$ ；
 $c_1、c_2$ ——加速常数；
 $r_1、r_2$ —— $[0,1]$ 之间的随机数；
 p_i ——搜索到的最优位置；
 x ——粒子位置；
 g_i ——整个粒子群搜索到的最优位置。

- (2) 根据目标函数计算每个粒子的适应值,并保存当前迭代过程的个体极值全局最优解。
- (3) 根据式(8)计算每个粒子新的速度和位置信息,更新当前迭代的计算结果。
- (4) 经过对比,筛选每个粒子的个体最优解。
- (5) 经过比较,对全局最优解进行更新操作。
- (6) 当满足终止条件时,算法停止运行并输出最终结果,否则返回步骤(3)再次进行迭代优化操作。

3 仿 真

本文在 MATLAB/Simulink 平台进行仿真。主要研究基于 FOPI/PI 速度控制器的双闭环直流调速系统,直流电机及控制系统的参数如表 1 所示^[12]。

表 1 直流电机控制系统相关参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	220	额定电流/A	136
电枢电阻/ Ω	0.21	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 500
电枢电感/H	0.002 1	电磁时间常数/s	0.03
励磁电阻/ Ω	146.7	机电时间常数/s	0.18
过载倍数	1.5	电枢回路总电阻/ Ω	0.5
电动势系数	0.132	电流反馈系数	0.05
飞轮矩/($GD^2 \cdot N^{-1} \cdot m^{-2}$)	22.5	转速反馈系数	0.007

PSO 参数优化相关参数如表 2 所示。

3.1 以 ITAE 为目标设计 FOPI/PI 控制器

以 ITAE 为目标函数对 FOPI/PI 进行 PSO 参数寻优确定的速度控制器参数如表 3 所示。

为进一步提高 FOPI 控制器性能,通过误差滤波器对 FOPI 控制器进行了改进。图 4 所示为改进前后的控制系统开环波特图, $n=0$ 时为补偿

表 2 PSO 算法的相关参数

参数名称	参数值
惯性因子 ω	0.6
加速常数 c_1, c_2	2, 2
粒子群规模	30
最大迭代次数	30
最小适应值	0.1
粒子上限值	[200 200 1]
粒子下线值	[0 0 -1]

表 3 ITAE FOPI/PI 控制器参数

控制器	K_p	K_i	λ	n
PI	15.68	1.03	-	-
PI ^A	6.44	0.37	0.35	0.000 2

前状态, $n=0.000\ 2$ 时为补偿后状态。校正后的控制系统保留了其中频和低频特性,即原来的 FOPI 控制器的动态性能和鲁棒性并没有改变,但是较好地改善了其低频特性,即提高了控制系统的稳态精度。因此设计出的 FOPI/PI 速度控制器分别为(后面所提 FOPI 控制器均为校正后的控制器)

$$u(s)_{PI} = 15.68 + \frac{1.03}{s} \tag{9}$$

$$u(s)_{FOPI} = \left(6.44 + \frac{0.37}{s^{0.35}} \right) \left(\frac{s + 0.000\ 2}{s} \right) \tag{10}$$

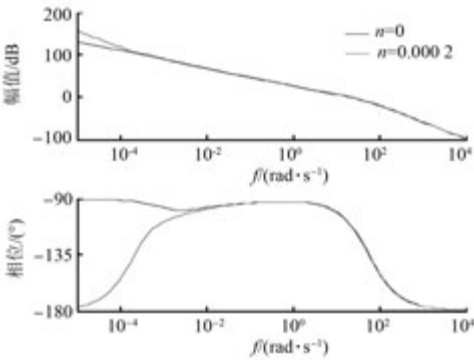


图 4 FOPI 补偿前后的开环波特图

图 5 所示为在 ITAE-FOPI/PI 控制器的转速阶跃响应曲线,可以看出 FOPI 控制系统的超调量、调节时间明显比 PI 控制系统好,但是 PI 控制系统的峰值时间稍小于 FOPI 系统。图 6 所示为 2 种控制器在进行 PSO 优化时的适应度值,FOPI 的收敛速度快且适应度值更小。

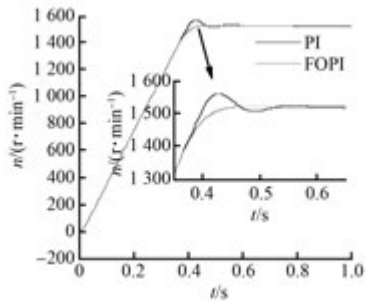


图5 ITAE-FOPI/PI 控制器速度响应

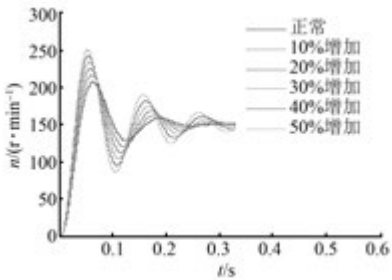


图8 增益增加到 50% 时 ITAE-PI 阶跃响应曲线

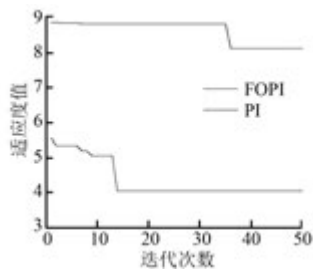


图6 以 ITAE 为目标优化时的适应度值

电机控制系统在运行时,环境或电动机本身参数变化(如环境温度变化、电机老化等)都会使控制系统的参数发生变化,影响其控制性能。为进一步分析比较 2 种控制器对参数变化的鲁棒性能^[17],通过增大控制系统前向通道上的增益来模拟控制系统参数的变化。图 7、图 8 所示为 FOPI 与 PI 控制系统增益从 10% 增加到 50% 的单位阶跃速度响应曲线(此时相当于给定转速为 150 r/min)。由图 7、图 8 可以看出,当增益增大时 2 种控制器的性能都发生了变化,而 FOPI 控制器的超调量、上升时间、调节时间比 PI 控制系统好,说明 FOPI 控制系统有较好的鲁棒性。

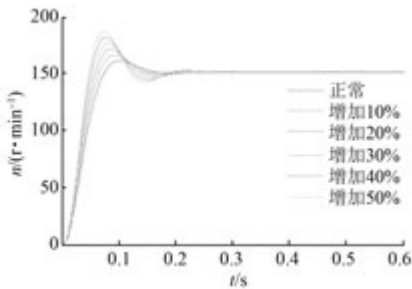


图7 增益增加到 50% 时 ITAE-FOPI 阶跃响应

3.2 以 ITSE 为目标设计 FOPI/PI 控制器

以 ITSE 为目标函数确定的 FOPI/PI 控制器参数如表 4 所示。

表4 ITSE FOPI/PI 控制器参数

控制器	K_p	K_i	λ	n
PI	20.6	0.95	-	-
PI ^A	8.43	0.43	0.33	0.000 1

设计出的 FOPI/PI 速度控制器分别为:

$$u(s)_{PI} = 20.6 + \frac{0.95}{s} \quad (11)$$

$$u(s)_{FOPI} = \left(8.43 + \frac{0.43}{s^{0.33}} \right) \left(\frac{s + 0.000 1}{s} \right) \quad (12)$$

图 9 所示为在 ITSE-FOPI/PI 控制系统的转速响应曲线,可以看出 FOPI 控制系统的超调量明显小于 PI 控制系统,而且更快地达到了系统稳定。图 10 所示为 PSO 优化在参数寻优时的适应度值,可以看出在用相同方式寻优时,FOPI 的收敛速度更快且其适应度值更小。

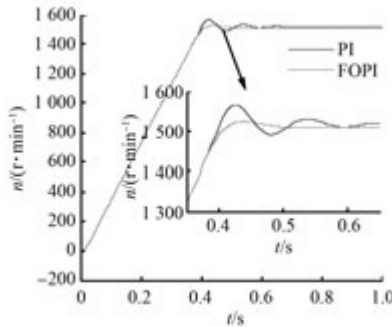


图9 ITSE-FOPI/PI 控制器速度响应

同样,对 ITSE-FOPI/PI 控制系统的增益增大时进行了仿真,如图 11、图 12 所示。即使增益增大时 FOPI 的动态性能仍保持良好,其超调量一直为零;而 PI 控制器的超调量增加较大,增益增大到 50% 时超调量为 70.8%,其调节时间明显加大。

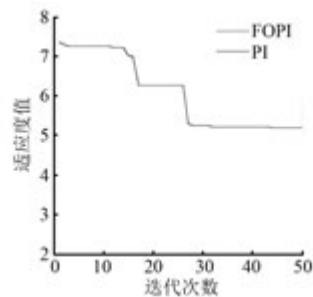


图 10 以 ITSE 为目标优化时的适应度值

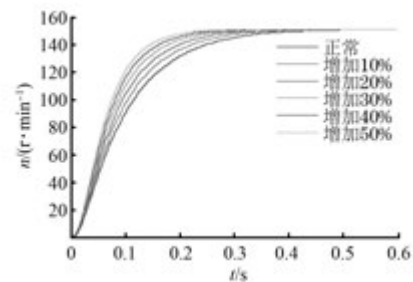


图 11 增益增加到 50% 时 ITSE-FOPI 阶跃响应

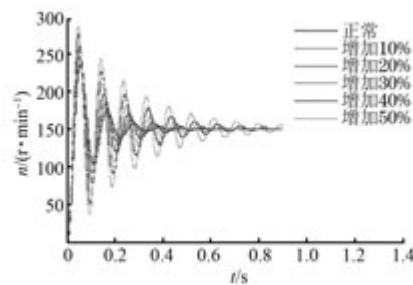


图 12 增益增加到 50% 时 ITSE-PI 阶跃响应

3.3 以 ITSE+ISCO 为目标设计 FOPI/PI 控制器

为防止控制系统输入突变时引起控制器输出过大而进入饱和状态,以 ITSE+ISCO 为目标函数,选择的 FOPI/PI 控制器参数如表 5 所示。

表 5 ITSE+ISCO FOPI/PI 控制器参数				
控制器	K_p	K_i	λ	n
PI	11.2	0.67	-	-
PI ^A	7.12	0.23	0.44	0.000 1

设计出的 FOPI/PI 速度控制器分别为

$$u(s)_{PI} = 11.2 + \frac{0.67}{s} \quad (13)$$

$$u(s)_{FOPI} = \left(7.12 + \frac{0.67}{s^{0.23}} \right) \left(\frac{s + 0.000\ 1}{s} \right) \quad (14)$$

图 13 所示为 ITSE+ISCO-FOPI/PI 控制系统的速度响应,可以看出 2 种控制系统的速度响应特性相似,但是 FOPI 控制系统的动态性能以及速度跟随性能更好。图 14 所示为 2 种控制器在进行 PSO 优化时的适应度值。由图 14 可以看出,2 种控制器的适应度值比较接近,但是 FOPI 的更小。

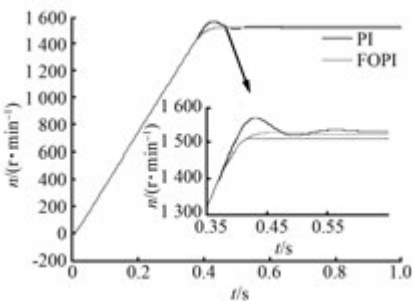


图 13 ITSE+ISCO-FOPI/PI 控制器速度响应

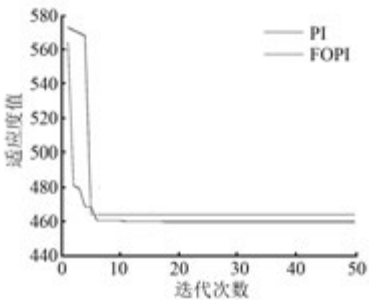


图 14 以 ITSE+ISCO 为目标优化时的适应度值

图 15 和图 16 所示为控制系统前向通道增益增大时的 FOPI/PI 控制系统的单位阶跃速度响应,可以看出,由于在目标函数中考虑了控制器的输出,当前向通道增益增加时,2 种控制器都保持了较好的动态性能。FOPI 控制系统的动态性能更好,表现了更好的鲁棒性。

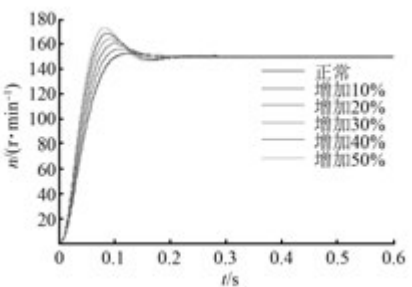


图 15 增益增加时 ITSE+ISCO-FOPI 阶跃响应

4 结 语

本文把 FOPI 算法应用到双闭环直流调速系

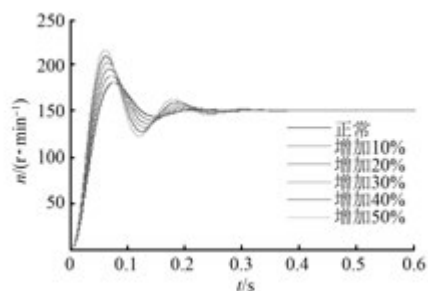


图 16 增益增加时 ITSE+ISCO-PI 阶跃响应

统的速度调节器中,并与 PI 控制器进行了比较。在确定 FOPI/PI 控制器的参数时,分别选用了 ITAE、ITSE 和 ITSE+ISCO 为目标函数用 PSO 优化算法进行了参数寻优。所设计的控制系统在 MATLAB/Simulink 仿真平台进行了如下的仿真研究:(1) 数字实现 FOPI 时,为了进一步提高 FOPI 的控制性能,通过用误差滤波器对 FOPI 控制器进行补偿,改善了其低频性能,保持了中、高频特性。(2) 通过对 3 种目标函数设计的 FOPI/PI 速度控制器仿真研究,证实了 FOPI 控制系统在稳定性、快速性和鲁棒性方面都明显优于 PI 速度控制系统,FOPI 控制器适用于性能要求更高的速度控制系统。(3) 以不同目标函数设计的速度控制器的控制性能各有特点。当在目标函数中考虑了控制器的输出时,提高了控制系统的动、静态性能和系统的鲁棒性。

总之,对一个控制系统而言,控制器的结构和参数至关重要,但在参数确定时,目标函数的选取也会直接影响控制系统的性能。

【参考文献】

- [1] PODLUBNY I. Fractional-order systems and controllers [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(1): 208-214.
- [2] PAN I, DAS S. Intelligent fractional order systems and control: an introduction [M]. Berlin: Springer, 2012.
- [3] MONJE C A, CHEN Y Q, VINAGRE B M, et al. Fractional-order systems and controls: fundamentals and applications [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2010.
- [4] ZHAO C, XUE D, CHEN Y Q. A fractional order PID tuning algorithm for a class of fractional order

- plants [C] // Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference, IEEE, 2005: 216-221.
- [5] MAIONE G, LINO P. New tuning rules for fractional PI α controllers [J]. Nonlinear Dynamics, 2007, 49(1): 251-257.
- [6] CHEN Y Q, DOU H, VINAGRE B M, et al. A robust tuning method for fractional order PI controllers [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2006, 39(11): 22-27.
- [7] BARBOSA R S, MACHADO J A T, JESUS I S. On the fractional PID control of a laboratory servo system [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41(2): 15273-15278.
- [8] RAJASEKHAR A, DAS S, ABRAHAM A. Fractional order PID controller design for speed control of chopper fed DC motor drive using artificial bee colony algorithm [C] // Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2013 World Congress on, IEEE, 2013: 259-266.
- [9] 姚舜才, 潘宏侠. 粒子群优化同步电机分数阶鲁棒励磁控制器 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 91-97.
- [10] 张海明, 缪仲翠, 赵静琼. 双闭环直流调速系统的分数阶 PI^A 控制 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(8): 85-89.
- [11] 张力支, 周激流, 郎方年, 等. 用遗传算法优化设计分数阶微分器 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(1): 158-162.
- [12] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 1-2.
- [13] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计 [M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [14] FELIU B V, PEREZ R R, RODRIGUEZ L S. Fractional robust control of main irrigation canals with variable dynamic parameters [J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(6): 673-686.
- [15] 张海明, 缪仲翠. 双闭环直流调速系统“抗饱和”速度控制器设计 [J]. 微特电机, 2016, 44(10): 70-73.
- [16] 王凌, 刘波. 微粒群优化与调度算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [17] 缪仲翠, 党建武, 张鑫, 等. PSO 优化分数阶 PI^A 控制的双闭环直流调速控制 [J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(7): 252-257.

收稿日期: 2018-04-25