

基于分数阶 PI^λ 控制器的永磁同步电动机调速系统研究

为了使交流永磁同步电动机调速系统的控制性能提高,将分数阶比例积分控制器应用到控制系统当中。采用粒子群优化参数的方法整定分数阶控制器的各项参数,并将分数阶比例积分控制器与整数比例积分控制器分别应用于同一控制系统中进行仿真比较。结果表明:分数阶 PI^λ 控制器与整数阶 PI 控制器相比,拥有更良好的快速性、稳定性及抗干扰能力。

张 昊 缪仲翠/兰州交通大学自动化与电气工程学院
张永义/辽宁工程技术大学理学院



张 昊/硕士研究生

永磁同步电动机拥有谐波少、转矩的准确度高等优点,在伺服系统和高性能的调速系统等领域应用广泛,例如高性能的数控机床、机器人等场合。尤其近些年来,新能源的电动汽车发展迅速,永磁同步电动机在机械结构和系统性能等方面优于其他类型电动机,在电动汽车领域的驱动电动机的选择中名列前茅。在永磁同步电动机调速系统的控制方法的选择上,传统的PID控制算法由于其易于实现、简单的控制结构以及良好的静态性能是控制领域中应用最早、最为广泛的控制算法。然而随着科技的快速发展,现代工业生产的要求越来越高,传统的控制算法已经无法完全满足。虽然运用智能算法能够在一定程度上提高控制系统性能,但智能算法大多实现起来较为困难。近些年来,由于分数阶微积分理论的逐渐成熟,分数阶控制系统引起了广大学者的重视^[1]。

分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制理论是建立在分数阶微积分理论基础之上的,分数阶微积分理论虽然很早就有学者提出并加以研究,但是早期的计算机水平相对落

后,分数阶微积分主要侧重于理论研究,很难对其实现离散数字化。随着计算机智能的迅速发展,分数阶控制理论逐渐成为了学者的研究热点,在许多自动控制领域得以应用。分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 是整数阶PID的推广,由于其增加了两项可调参数,使得参数设定的不同可以决定控制器的类型,在控制器的设计上更加灵活。当分数阶微积分阶数均为1时,可以说整数阶PID是分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 的一个特例^[2]。1995年Oustaloup提出了一种CRONE分数阶控制器对动态系统进行控制,并应用在一些实例当中;1997年Machado将分数阶微积分应用在机器人的设计中,并在对运动控制系统的动力学特性进行分析时,采用了分数阶微积分理论;1999年I. Podlubny提出了分数阶 $PI^\lambda D^\mu$ 控制器^[3]。东北大学的薛定宇教授等人在分数阶系统的分析与设计上也有深入的研究。

在分数阶控制器的参数整定上,运用带有一定经验性的工业设计法实现起来较为复杂。而利用智能算法不仅可以自整定控制器的参数,同时智能算法通用性能较强,优化性能强,具有更加严密的理论基础,理论上可以通过优化得到全局最优解或近似最优解,还可以并行处理问题。本文采用粒子群算法优化分数阶控制器的各项参数,并应用在相同的控制系统下与整数阶控制器相比较,证明分数阶控制器在快速性、稳定性以及抗干扰能力方面优于整数阶控制器。

关键词/Keywords

粒子群 ·
分数阶控制器 ·
永磁同步电动机调速 ·

永磁同步电动机调速系统

永磁同步电动机特点在于其转子为永久磁铁，所以转子拥有恒定的磁链（磁通），在对控制系统设计时不需要计算磁链的观测模型。

1. 永磁同步电动机变频调速系统

针对永磁同步电动机变频调速系统,为了使其在基频以下能够工作在恒转矩工作区,使其定子电流的励磁分量 $i_{sd}=0$ 是目前最简单、最有效的控制方法之一,图1为按转子磁链定向并使 $i_{sd}=0$ 的永磁同步电动机变频调速原理图^[4]。

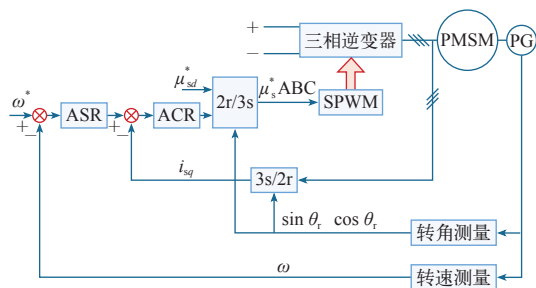


图1 永磁同步电动机变频调速系统原理图

2. 参数设定

永磁同步电动机调速系统为双闭环控制系统，存在电流控制环及速度控制环。本文将分数阶控制器应用在控制系统的速度控制环上，用分数阶PI^λ控制器代替传统的整数阶PI控制器，然后通过仿真比较两种控制器调节下的系统性能。为方便比较，将两种控制器应用下调速系统的电流控制环及系统的其他参数均保持一致。参数的选取则参考文献[3]中给出的电流控制器ACR参数及永磁同步电动机参数，具体如表1所示。

表1 永磁同步电动机调速系统参数

永磁同步电动机	定子电阻 $R_s = 2.875 \, \Omega$	励磁磁通 $0.175 \, \text{Wb}$
	定子 d 轴电感 $L_d = 0.008 \, \text{H}$	定子 q 轴电感 $L_q = 0.008 \, \text{H}$
	转动惯量 $J = 0.008 \, \text{kg} \cdot \text{m}^2$	极对数 $p = 1$
电流调节器 ACR	比例系数 $K_p = 10.7$	积分系数 $K_i = 80$

分数阶控制器的设计

分数阶微积分理论的发展过程中,出现了多种定义,并且在实践中已经检验了其定义的合理性与科学性。常被应用的分数阶微积分定义有

Riemann-Liouville、Grunwald-Letnikov以及Caputo三种公式。在计算给定信号的分数阶微积分时，Grunwald-Letnikov公式有着不错的表现，但采用此方法需要预先计算出输入信号的采样值，而控制系统仿真中回路内有未知函数激励信号，所以其在控制系统研究中的应用有很大的局限性。

1. 分数阶控制器的实现

分数阶PID理论上是无限维的，在实际中实现比较困难，目前采用不同的方法近似实现，其中常用的方法是采用Oustaloup滤波器近似的算法。拟合频率段的选定假设为 (ω_b, ω_h) ，则可以构造出连续滤波器的传递函数模型为^[5]

$$\begin{aligned}
G_f(s) &= K \prod_{k=1}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \\
\omega_k &= \omega_b \omega_u^{(2k-1+\gamma)/N} \\
\omega'_k &= \omega_b \omega_u^{(2k-1-\gamma)/N} \\
K &= \omega_h^\gamma \\
\omega_u &= \sqrt{\omega_h / \omega_b}
\end{aligned} \tag{1}$$

式中, γ 为分数阶的阶次; N 为滤波器的阶次, 一般取 2~5; ω_b 和 ω_h 为用户选定的拟合频率的上限和下限, 在该区域内一般可以较好地拟合分数阶微分算子。这里取 (ω_b, ω_h) 的范围为 $(0.001, 1\ 000)$, $N=5$ 。考虑到该滤波器分子和分母阶次一致, 可能导致在仿真过程中代数环的出现, 所以在其后面再接一个低通滤波器, 将其截止频率设置为 ω_h , 这样可以建立起分数阶微分模块, 通过适当选择阶次可以较好地近似分数阶微积分效果^[6]。

2. 分数阶PI^λ控制器

分数阶PI $^\lambda$ 控制器的传递函数为

$$G(s) = K_p + \frac{K_I}{s^\lambda} \quad (2)$$

式中, $\lambda \geq 0$ 是分数阶控制器积分阶次; K_I 是控制器的积分项。当 $\lambda = 1$ 时就是整数阶控制器, 通过式 (2) 可以构建分数阶 PI $^\lambda$ 控制器的结构框图如图 2 所示, $E(s)$ 为系统反馈误差。

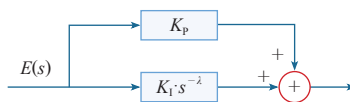


图2 分数阶PI $^\lambda$ 控制器结构框图

在参数整定方面, 整数阶PI控制器的参数可以利用传统的工业设计方法来实现, 但分数阶PI^λ控制器由三个未知参数构成, 运用传统整数阶控制器的经验法来整定其参数要相对困难得多。本文采用智能粒子群算法优化分数阶控制器的参数, 实现各项参数自寻优整定。

3. 粒子群参数优化

粒子群算法的启发来自于生物种群的行为特征, 运用其可以优化问题求解, 是一种群体智能优化算法。其首先在可行解空间中初始化一群粒子, 每个粒子都有可能为极值优化问题的最优解, 粒子特征则用位置、速度和适应度三项指标来表示, 粒子的优劣通过适应度值的好坏来衡量, 得到最优粒子, 从而得到最优解。根据文献[7]中所介绍的粒子群算法的PID控制器优化设计方案, 其中选取了ITAE误差性能指标

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3)$$

式中, $e(t)$ 为系统反馈误差; t 为时间, 即误差性能指标表示为系统误差的绝对值与时间常数的积分。根据式(3)建立分数阶PI^λ控制器粒子群优化的系统仿真模型如图3所示。

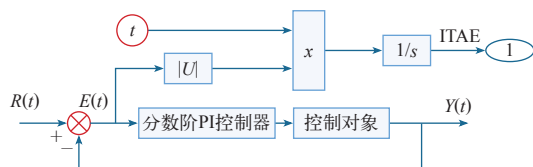


图3 粒子群优化的分数阶控制系统模型

在仿真过程中, 粒子(即PI^λ控制器的三个参数)和该粒子对应的适应度值成为了粒子群算法与Simulink模型之间的桥梁。优化时PSO首先产生粒子种群, 将粒子群中的粒子依次赋值给PI^λ控制器的三个参数, 然后运行控制系统的Simulink模型, 得到该组参数对应的性能指标, 该性能指标传递到PSO中作为该粒子的适应值, 最后判断是否可以退出算法。具体流程如下^[8]。

1) 初始化粒子群, 随机产生所有粒子的位置与速度, 并确定粒子的最优位置和粒子群的最优位置。

2) 将每个粒子适应值与粒子最优位置的适应值进行比较, 如果好则作为当前的粒子最优位置。

3) 将每个粒子适应值与粒子群最优位置的适应值进行比较, 如果好则作为当前的粒子群最优位置。

4) 更新粒子的速度和位置。如果终止条件满足则退出算法, 得到最优解; 没有满足则返回步骤2)。

仿真实验

根据上述方法, 设计出分数阶PI^λ控制器, 将设计好的分数阶PI^λ控制器应用到永磁同步电动机变频调速系统中, 替换整数阶速度控制器。并利用粒子群算法进行参数优化, 粒子群算法各项参数如表2所示, 所得到的最优适应度值曲线如图4所示。

表2 粒子群优化算法参数

参数名称	所选参数
惯性因子 ω	0.6
加速常数 c_1, c_2	2
粒子群规模	50
最大迭代次数	20
最小适应值	0.01
粒子上限值	[300 200 2]
粒子下限值	[0 0 0]

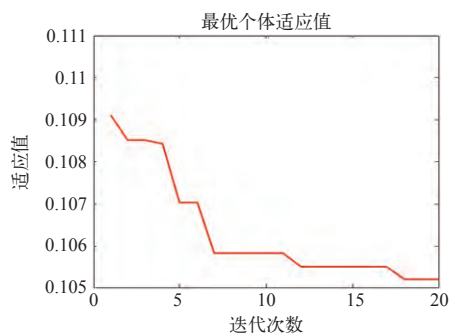


图4 粒子群优化的分数阶控制适应度值曲线

在对比实验中, 整数阶PI控制器的参数采用文献[4]给出的参数设定。整数阶PI控制器的参数与粒子群优化得到的分数阶PI^λ控制器的参数如表3所示。

表3 控制器参数

参数名称	K_p	K_i	λ
PI控制器	140	11.7	0
PI ^λ 控制器	289	2.3	-0.281

选取电动机的额定转速为2 000 r/min, 在电动机空载的状态下, 运用Matlab分别对采用整数阶PI控制器及粒子群算法优化参数的分数阶PI^λ控制器调节下的永磁同步电动机调速系统进行仿真, 得到系统输出转速波形如图5所示。

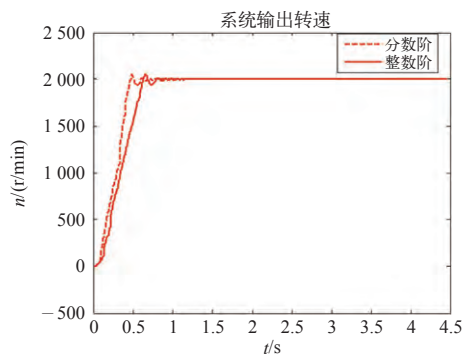


图5 系统输出转速波形对比图

由仿真得到系统跟随性能指标如表4所示。对比其各项性能指标可以看出, PI^λ控制器在峰值时间、调节时间及超调量三个方面均优于PI控制器, 可以证明分数阶PI^λ控制器在快速性及稳定性方面具有一定优势。

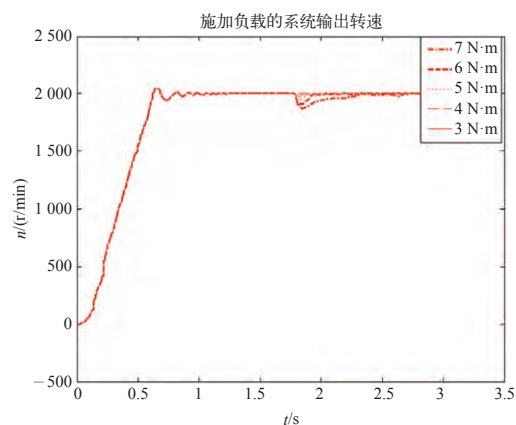
表4 系统跟随性能指标

参数名称	峰值时间/s	调节时间/s	超调量 (%)
PI控制器	0.663	1.041	2.56
PI ^λ 控制器	0.491	0.684	2.40

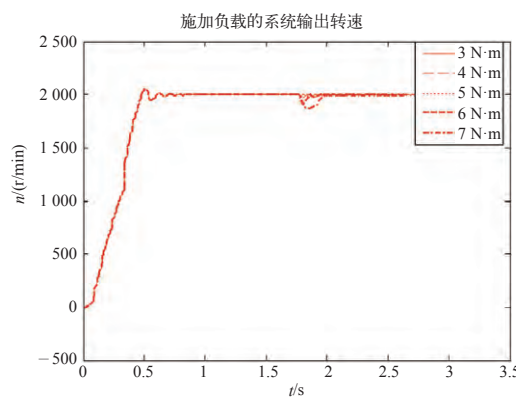
考虑到系统的抗干扰能力, 本文分别对两种控制器控制下的永磁同步电动机调速系统突加3~7 N·m的负载, 得到整数阶PI控制器调节下的永磁同步电动机调速系统输出转速波形如图6a所示; 得到采用粒子群算法优化参数的分数阶PI^λ控制器调节下的永磁同步电动机调速系统输出转速波形如图6b所示。

根据仿真可以得到控制系统的抗扰性能指标如表5所示。

对比表5中各项性能指标可以看出, 在对电动机突加负载并且所加负载逐渐增加的情况下, 分



(a) PI控制器的系统输出转速



(b) PI^λ控制器的系统输出转速

图6 突加3~7 N·m负载时的系统输出转速

表5 系统抗干扰性能指标

突加负载 /N·m	动态降落PI ^λ (%)	动态降落PI (%)	恢复时间PI ^λ /s	恢复时间PI /s
3	0.89	0.93	1.72	1.87
4	1.71	1.79	1.82	1.96
5	2.81	2.87	1.89	2.12
6	4.07	4.24	1.87	1.99
7	5.87	6.23	1.97	2.59

数阶PI^λ控制器在恢复能力上明显优于整数阶PI控制器。所以,分数阶PI^λ控制器较整数阶PI控制器拥有更良好的抗负载干扰能力。

结束语

本文将分数阶PI^λ控制器应用到永磁同步电动机变频调速系统中,采用传统的粒子群算法对分数阶控制器的参数进行优化,运用Matlab仿真对其进行验证。对比分数阶和整数阶控制器控制下的永磁同步电动机变频调速系统的系统跟随性能指标及抗扰性能指标可以得出,分数阶PI^λ控制器由于多了1项可调参数,在控制器的设计上更加灵活,在控制性能上不仅继承了传统整数阶PI控制器的优点,同时较整数阶PI控制器拥有更加良好的快速性、稳定性以及抗干扰能力。将其应用在永磁同步电动机变频调速系统中,可以提高控制系统的性能。

参考文献

- [1] 赵春娜,赵雨,张祥德,等.分数阶控制器与整数阶控制器仿真研究[J].系统仿真学报,2009,21(3):669-772.
- [2] 王瑞萍.基于分数阶控制器的永磁同步电动机速度控制研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [3] Podlubny I. Fractional-order system and PI^λD^μ-controller[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(1): 208-214.
- [4] 洪乃刚.电力电子、电机控制系统的建模和仿真[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [5] 薛定宇,赵春娜,潘峰.基于框图的分数阶非线性系统仿真方法及应用[J].系统仿真学报,2006,18(9):2405-2408.
- [6] 李英顺,赵春娜,陆涛.分数阶先进控制系统研究与应用[M].北京:北京师范大学出版社,2012.
- [7] 史峰,王辉,郁磊,等. Matlab智能算法30个案例分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.
- [8] 薛定宇.控制系统计算机辅助设计——MATLAB语言与应用[M].北京:清华大学出版社,2012.

(收稿日期:2015-01-20) EA



让绝缘变得轻松自如!

干变、油变绝缘件、高低压开关柜绝缘件、充气柜绝缘件,
SMC板、环氧板销售加工

中国知网 <https://www.cnki.net>

baiipo 佰珀新材料

青春 谦学 责任 奉献

上海佰珀新材料有限公司地处上海青浦,以独特的区位优势,深得中国经济发展先机。佰珀新型材料已经成为中国知名的SMC材料、模压制品、绝缘板供应商。

产品广泛应用于电气、汽车、卡车、农业机械、轨道交通、建材、卫浴用品等领域。公司拥有丰富的研发资源,出众的工程技术。

地址:上海市青浦区天淀路168号 Post Code:201713
Add: Shanghai city Qingpu District days Lake Road No.168
Fax: 021-59831666 57766999
M.T: 138 1612 7328
http: www.bai-poo.com
E-mail: 401071998@qq.com

