

9-2-2020

Fractional Order Internal Model Control of PMSM Speed Servo System

Zhicheng Zhao

School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

Sang Hai

School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

Jinggang Zhang

School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Fractional Order Internal Model Control of PMSM Speed Servo System

Abstract

Abstract: A design method of fractional order (FO) internal model controller for permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed servo system was proposed. The simplified mathematical model of speed servo system was built. Based on internal model control (IMC) principle, *the FO internal model controller was deduced by using the FO filter to replace the integer order one. The proposed controller contained only two adjustable parameters, and the defects of the fractional $PI^\lambda D^\mu$ controller tuning method were effectively overcome. Moreover, the dominant pole was selected according to the time domain performance indicators of the system, and an analytical tuning approach of the controller was given. So the blindness of selecting the controller parameter was avoided.* The simulation results show that the proposed method not only could provide a better dynamic performance of both the command tracking and disturbance rejection for PMSM speed servo system, but also provide a better robustness against parameters perturbation.

Keywords

permanent magnet synchronous motor, speed servo system, internal model control, fractional order, dominant pole

Recommended Citation

Zhao Zhicheng, Sang Hai, Zhang Jinggang. Fractional Order Internal Model Control of PMSM Speed Servo System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2): 384-388.

永磁同步电机速度伺服系统的分数阶内模控制

赵志诚, 桑海, 张井岗

(太原科技大学电子信息工程学院, 太原 030024)

摘要: 针对永磁同步电机(Permanent magnet synchronous motor, PMSM)速度伺服系统, 提出了一种分数阶(Fractional order, FO)内模控制器设计方法。建立了 PMSM 速度伺服系统的简化数学模型, 根据内模控制(Internal model control, IMC)原理, 引入分数阶滤波器替代整数阶滤波器, 推出了一种分数阶内模控制器, 该控制器仅包含两个可调参数, 有效克服了分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 控制器待整定参数较多的缺陷, 并基于系统时域性能指标选择主导极点, 给出了控制器参数的解析整定方法, 避免了参数选择的盲目性。仿真结果表明, 所提方法不仅可以使 PMSM 速度伺服系统具有较好的设定值跟踪和扰动抑制特性, 而且对于系统参数摄动具有更好的鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机; 速度伺服系统; 内模控制; 分数阶; 主导极点

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 02-0384-05

Fractional Order Internal Model Control of PMSM Speed Servo System

Zhao Zhicheng, Sang Hai, Zhang Jinggang

(School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: A design method of fractional order (FO) internal model controller for permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed servo system was proposed. The simplified mathematical model of speed servo system was built. Based on internal model control (IMC) principle, the FO internal model controller was deduced by using the FO filter to replace the integer order one. The proposed controller contained only two adjustable parameters, and the defects of the fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller tuning method were effectively overcome. Moreover, the dominant pole was selected according to the time domain performance indicators of the system, and an analytical tuning approach of the controller was given. So the blindness of selecting the controller parameter was avoided. The simulation results show that the proposed method not only could provide a better dynamic performance of both the command tracking and disturbance rejection for PMSM speed servo system, but also provide a better robustness against parameters perturbation.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; speed servo system; internal model control; fractional order; dominant pole

引言

以永磁同步电动机为执行机构的速度伺服系



作者简介: 赵志诚(1970-), 男, 山西临猗人, 博士生, 教授, 研究方向为先进控制技术; 桑海(1989-), 男, 山西长治人, 硕士生, 研究方向为智能控制理论与应用。

收稿日期: 2014-01-11 修回日期: 2014-04-28
基金项目: 山西省自然科学基金(2012011027-4); 太原科技大学研究生创新计划(20125013)

统是一种强耦合、时变的非线性系统, 且运行时会受到不同的外界干扰, 如何保证系统具有较高的动态精度和较快的响应速度以及对参数变化以及外界扰动具有不敏感性, 一直以来是控制界研究的热点。除了常规 PID 控制之外, 滑模变结构控制^[1-3]、自适应控制^[4-5]、智能控制^[6-7]、内模控制^[8-9]等多种先进控制策略已被广泛地应用于交流伺服系统中,

很好地改善了系统的性能,但各种方法在实际应用中仍然存在一些不足,如变结构控制的切换抖振、自适应控制的复杂运算、智能控制的规则确定以及内模控制器参数的鲁棒整定等问题还有待进一步研究与解决。

分数阶(Fractional order, FO)控制作为近年来控制界研究的热点得到了广泛关注,分数阶控制器可以有效提升系统的控制品质,已有学者将分数阶控制理论应用于运动控制中^[10]。与整数阶 PID 控制器相比,由于分数阶控制器增加了微积分阶次参数,因此增大了其整定的难度。文献[11-12]利用 Iso-damping 特性分别设计了伺服系统分数阶 PD^μ和 [PD]^μ 控制器,并通过作图的方法简化了非线性方程组的求解,但不难发现此方法对初始条件的依赖性较强。

考虑内模控制(Internal model control, IMC)具有结构简单、设计简便、控制性能好,且控制器仅有一个可调参数等优点,本文将内模控制引入交流伺服系统分数阶控制器设计中,利用分数阶滤波器设计了一种分数阶内模控制器,在克服分数阶 PI^λD^μ 控制器整定困难的同时,改善了系统性能,仿真结果表明了设计方法的有效性。

1 交流伺服系统的数学模型

永磁同步电机采用矢量控制时,在 d-q 坐标系中的简化模型如图 1 所示。其中, U_q 为输入电压; Ω 为转子角速度; R 为绕组等效电阻; L 为等效 d, q 轴电感; I_q 为 q 轴电流; K_c 为转矩系数($1.5p_n\phi_f$); T_e 为电机电磁转矩; p_n 为极对数; ϕ_f 为转子磁场的等效磁链; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量。

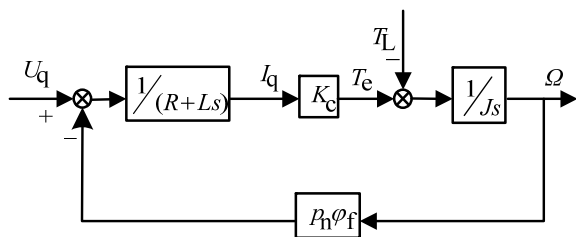


图 1 永磁同步电机简化模型

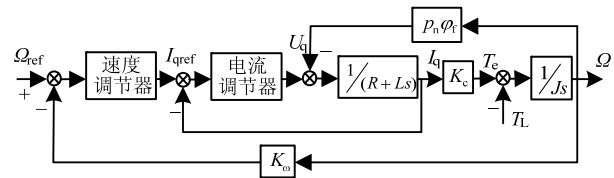


图 2 永磁同步电机速度伺服系统结构图

永磁同步电机速度伺服系统一般由电流环和速度环 2 部分组成,其结构图如图 2 所示,图中, Ω_{ref} 和 I_{qref} 分别为转速和电流设定值, K_{ω} 为速度反馈系数。由于速度环的截止频率较低,电流环可降阶为一个惯性环节,进而得到整个速度伺服系统系统的数学模型如式(1)所示。

$$M(s) = \frac{K}{s(Ts+1)} \quad (1)$$

式中: T 为系统时间常数; K 为系统开环增益。

2 分数阶内模控制器

基于分数阶理论,将传统整数阶 PID 控制器的微积分阶次推广到分数域,得分数阶 PI^λD^μ 控制器为

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} + K_d s^\mu \quad (2)$$

式中: λ , μ 分别为积分和微分阶次,且 $\lambda, \mu \geq 0$, K_p , K_i , K_d 分别为分数阶 PI^λD^μ 控制器的比例、积分、微分增益。

由式(2)可知,当 $\lambda=1, \mu=1$ 时,分数阶 PI^λD^μ 控制器为传统的 PID 控制器,当 $\lambda=0, \mu=0$ 时,为 P 控制器;当 $\lambda=1, \mu=0$ 时,为 PI 控制器;当 $\lambda=0, \mu=1$ 时,为 PD 控制器。与 PID 控制器相比,PI^λD^μ 控制器增加了分数阶微积分阶次 λ 和 μ 两个参数,使得控制器的设计更加灵活,为控制系统性能的改善提供了可能。但同时也增加了整定的难度。

内模控制结构如图 3 所示,其中 $Q(s)$ 为内模控制器, $P(s)$ 为被控对象, $M(s)$ 为对象模型, $R(s)$ 、 $Y(s)$ 和 $D(s)$ 分别为系统的输入、输出和干扰。图 3 可以等效变换为图 4 所示的反馈控制系统结构。其中 $C(s)$ 为反馈控制器, $C(s)$ 与 $Q(s)$ 有如下关系:

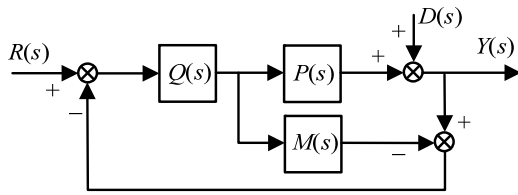


图 3 内模控制结构

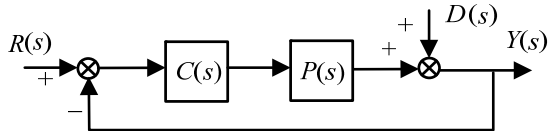


图 4 内模控制等效反馈控制结构

$$C(s) = \frac{Q(s)}{1 - M(s)Q(s)} \quad (3)$$

类似于整数阶内模控制, 分数阶内模控制器的设计步骤如下:

(1) 模型分解

$$M(s) = M_+(s)M_-(s) \quad (4)$$

式中: $M_+(s)$ 和 $M_-(s)$ 分别为对象模型中的不可逆和可逆部分。

(2) 内模控制器设计

$$Q(s) = M_-^{-1}(s)f(s) \quad (5)$$

式中: $f(s)$ 为低通滤波器, 这里选择滤波器的形式如下

$$f(s) = \frac{1}{\beta s^\alpha + 1} \quad (6)$$

式中: α 为滤波器的分数阶次; β 为滤波器时间常数。

针对式(1)所示 PMSM 速度伺服系统模型设计分数阶内模控制器为

$$Q(s) = \frac{s(Ts + 1)}{K} \cdot \frac{1}{\beta s^\alpha + 1} \quad (7)$$

由式(3)进一步得等效反馈控制器为

$$C(s) = \frac{T}{\beta K} s^{2-\alpha} + \frac{1}{\beta K} s^{1-\alpha} \quad (8)$$

当滤波器阶次 $\alpha=1$ 时, 式(8)相当于整数阶 PD 控制器, 当 $0 < \alpha < 1$ 时, 式(8)相当于分数阶 DD 控制器, 当 $1 < \alpha < 2$ 时, 式(8)相当于分数阶 ID 控制器。

3 控制器参数的整定

式(8)所示的分数阶内模 ID 控制器仅有 2 个可

调参数, 本文采用主导极点的方法对其进行整定。

根据图 4 和式(1)、(8)可得反馈控制系统的闭环特征方程为

$$\beta s^\alpha + 1 = 0 \quad (9)$$

假设系统主导极点为 $s_{1,2} = a \pm jb$, 主导极点的实部 a 和虚部 b 可以通过给定的时域性能指标(超调量 $\delta\%$ 和峰值时间 t_p)确定^[13], 将主导极点 $s_1 = a + jb$ 代入式(8)得

$$\beta(a + jb)^\alpha + 1 = 0 \quad (10)$$

式(10)中 $(a + jb)^\alpha$ 可按式展开

$$(a + jb)^\alpha = (a^2 + b^2)^{0.5\alpha} \cdot [\cos(\alpha \arctan(\frac{b}{a})) + j \sin(\alpha \arctan(\frac{b}{a}))] \quad (11)$$

将式(11)代入式(9), 然后分别令实部和虚部为 0 得

$$\begin{cases} 1 + \beta(a^2 + b^2)^{0.5\alpha} \cos(\alpha \arctan(\frac{b}{a})) = 0 \\ \beta(a^2 + b^2)^{0.5\alpha} \sin(\alpha \arctan(\frac{b}{a})) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

通过求解方程组(12), 可得滤波器时间常数 β 和阶次 α , 完成控制器参数的整定。

文献[11]根据 Iso-damping 特性设计了一种分数阶 PD $^\mu$ 控制器, 其传递函数为

$$C_1(s) = K_p + K_d s^\mu \quad (13)$$

具有 Iso-damping 特性的系统相频特性 Bode 图在截止频率附近是平直的, 当系统截止频率(ω_c)和相位裕度(φ_m)已知时, 可得

$$\left(\frac{d(\text{Arg}(C_1(j\omega)M(j\omega)))}{d\omega} \right)_{\omega=\omega_c} = 0 \quad (14)$$

$$\text{Arg}(C_1(j\omega_c)M(j\omega_c)) = -\pi + \varphi_m \quad (15)$$

$$|C_1(j\omega_c)M(j\omega_c)| = 1 \quad (16)$$

求解上述非线性方程, 便可完成分数阶 PD $^\mu$ 控制器的整定。

与文献[11]中的分数阶 PD $^\mu$ 控制器相比, 本文设计的分数阶内模控制器待整定的参数更少, 而且整定方法更为简便, 避免了非线性方程求解的困难。

4 仿真研究与分析

为了验证本文方法的有效性, 利用 Matlab 对 PMSM 速度伺服系统进行仿真研究, 并与文献中

的方法进行比较。

假定 PMSM 速度伺服系统的模型为

$$M(s) = \frac{1.52}{s(0.4s+1)} \quad (17)$$

根据上述方法设计分数阶控制器

$$C(s) = \frac{0.4}{1.52\beta} s^{2-\alpha} + \frac{1}{1.52\beta} s^{1-\alpha} \quad (18)$$

为了整定控制器参数, 选取系统时域性能指标: 超调量 $\delta\% \leq 5\%$, 峰值时间 $t_p \leq 0.3$ s, 根据系统性能指标与特征参数之间的关系可得相应的系统阻尼比 $\zeta \geq 0.7$, 固有频率 $\omega_n \geq 15$, 在复平面内绘制等 ζ 直线和等 ω_n 曲线如图 5 所示。选择 $\zeta=0.9$, $\omega_n=20$ 得系统主导极点 $-18 \pm j8.7178$, 将该点代入方程组(12), 得滤波器时间常数 $\beta=0.03$, 滤波器阶次 $\alpha=1.17$, 并将 β 和 α 代入式(18), 得分数阶内模控制器为:

$$C(s) = \frac{0.4}{1.52 \times 0.03} s^{0.83} + \frac{1}{1.52 \times 0.03 s^{0.17}} \quad (19)$$

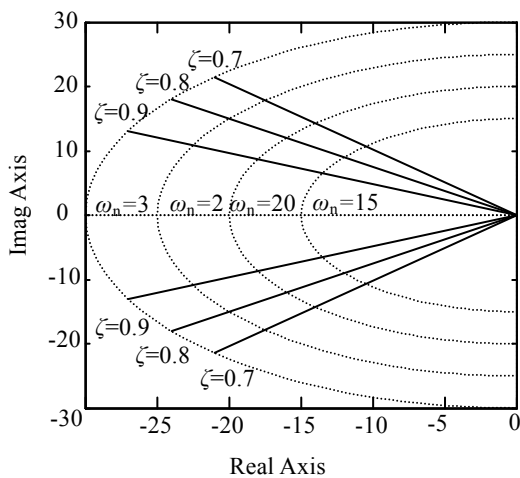


图 5 等 ζ 线和等 ω_n 线

文献[11]针对该系统模型, 根据 Iso-damping 特性, 设计分数阶 PD^α 控制器为

$$C_1(s) = \frac{13.86}{1.52} (1 + 0.368s^{0.844}) \quad (20)$$

分别将 $C(s)$, $C_1(s)$ 应用于 PMSM 速度伺服系统中, 转速的设定值为 1000 rpm, 控制系统的转速响应如图 6 所示, 在仿真时间 $t=2.0$ s 时加入幅值为 200 N·m 的负载干扰, 从图中可以看出, 本文

方法的跟随性能和抗扰性能均优于文献[11]的分数阶 PD^α 控制器, 从表 1 所示的控制系统性能指标中也可看出, 本文方法的系统超调量和时间乘以误差绝对值积分(ITAE)指标均小于文献[11]的方法。

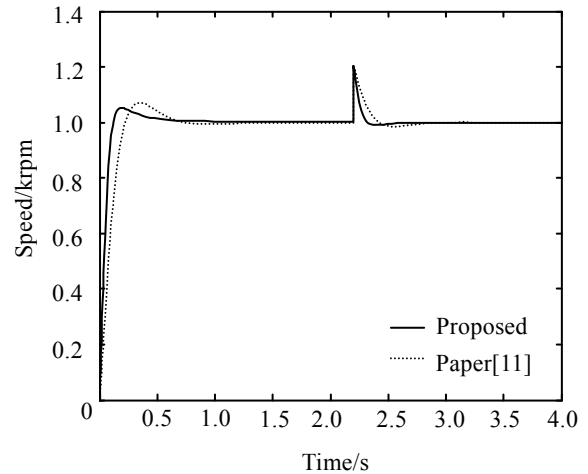


图 6 模型精确时系统阶跃响应

表 1 控制系统性能指标

Method	Nominal model		Mismatch model	
	$\delta\%$	ITAE	$\delta\%$	ITAE
Proposed	5.3%	37.758	8.11%	42.217
Paper [11]	6.86%	66.758	11.7%	74.957

为验证系统的鲁棒性, 令系统参数发生 50% 的变化, 即时间常数 $T=0.6$, 增益 $K=2.28$, 系统的转速响应如图 7 所示, 控制系统性能指标如表 1 所示, 由响应曲线和性能指标可以看出本文方法具有更好的鲁棒性。

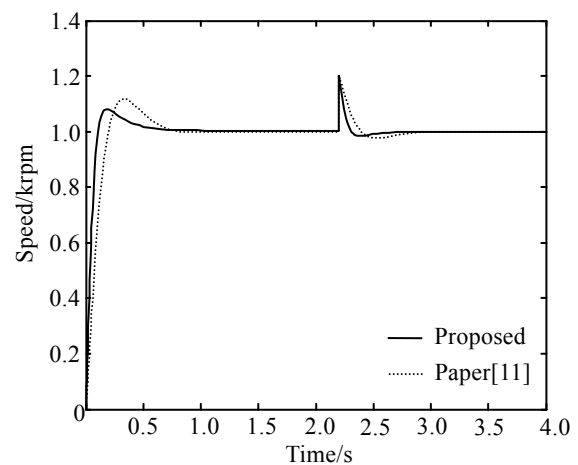


图 7 模型失配时系统阶跃响应

5 结论

本文以永磁同步电机速度伺服系统为研究对象, 针对分数阶控制器待整定参数较多的问题, 将内模控制推广应用于分数阶控制器的设计, 通过引入分数阶的滤波器推导出了分数阶内模 ID 控制器, 并基于系统的主导极点, 实现了控制器参数的解析整定。仿真结果表明, 相对于分数阶 PD^α 控制器, 本文方法不仅参数整定方便, 而且可使系统获得更好的动态性能和鲁棒性。另外, 本文方法目前仍处于仿真研究阶段, 如何将其推广应用于实际的控制系统且能满足系统的实时性要求则是今后的研究的重点。

参考文献:

- [1] 朱玉川, 李志刚, 马大为, 等. 永磁交流位置伺服系统串级复合滑模控制 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(12): 2779-2882. (Zhu Yuchuan, Li Zhigang, Ma Dawei, *et al.* Cascaded Compound Sliding-mode Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Position Servo System [J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19(12): 2779-2882.)
- [2] 黄佳佳, 周波, 李丹. 滑模控制永磁同步电动机位置伺服系统抖振 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 41-47.
- [3] 郭亚军, 王晓锋, 马大为. 自适应反演滑模控制在火箭炮交流伺服系统中的应用 [J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 493-497
- [4] Oscar Barambones, Patxi Alkorta. A Robust Vector Control for Induction Motor Drives with an Adaptive Sliding-mode Control Law [J]. Journal of the Franklin Institute (S0016-0032), 2011, 348(2): 300-314
- [5] Lu Shaowu, Zheng Shiqi, Tang Xiaoqi. Adaptive Speed Control Based on Just-in-time Learning Technique for Permanent Magnet Synchronous Linear Motor [J]. Journal of Process Control (S0959-1524), 2013, 23(10): 1455-1464
- [6] Wang Xingjian, Wang Shaoping, Zhao Pana. Adaptive Fuzzy Torque Control of Passive Torque Servo Systems Based on Small Gain Theorem and Input-to-state Stability [J]. Chinese Journal of Aeronautics (S1000-9361), 2012, 25(6): 906-916.
- [7] 王科, 刘新正. 免疫单神经元 PID 控制在永磁交流伺服系统中的应用 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 76-81.
- [8] Zhao Zhicheng, Liu Zhiyuan, Zhang Jinggang. Robust IMC-PID Controller Design for an Opto-electronic Tracking System with Time-delay [J]. 光电工程, 2010, 37(1): 30-36.
- [9] 赵志诚, 贾彦斌, 张井岗. 交流伺服系统模糊内模 PID 控制器设计 [J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(11): 144-147.
- [10] Rinku Singhal, Subhransu Padhee, Gagandeep Kaur. Design of Fractional Order PID Controller for Speed Control of DC Motor [J]. International Journal of Scientific and Research Publications (S2250-3153), 2012, 2(6): 1-8.
- [11] Li Hongsheng, Luo Ying, Chen Yangquan. A Fractional Order Proportional and Derivative (FOPD) Motion Controller: Tuning Rule and Experiments [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2010, 18(2): 516-520.
- [12] Luo Ying, Chen Yangquan. Fractional-order [Proportional Derivative] Controller for Robust Motion Control: Tuning Procedure and Validation [C]// Proceeding of the 2009 American Control Conference. St. Louis, USA: IEEE, 2009: 1412-1417.
- [13] Astrom K J, Hagglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning [M]. Research Triangle Park, NC, USA: Instrument Society of America, 1995.