

基于交替联合迭代的关节电机滑模控制 参数整定方法^{*}

于海波¹, 李 洁², 肖 丽³

(1. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081;

2. 河北工业大学 人工智能与数据科学学院, 天津 300130;

3. 天津商业大学 信息工程学院, 天津 300134)

摘 要: 机器人关节电机的控制器参数整定是实现系统良好控制性能的前提。提出了一种基于交替联合迭代的关节电机滑模控制器参数整定方法。设计了永磁同步关节电机的电磁参数, 并设计了 PID 电流环控制器和滑模速度环控制器结合的滑模-PID 控制器。利用工程整定方法初步整定滑模速度环控制器的参数; 增设冗余 PID 速度环控制器, 对其参数进行整定, 以冗余 PID 速度环控制器和滑模速度环控制器作用于系统时的输出转速为迭代变量, 交替选择速度环控制器参数进行联合迭代, 完成滑模速度环控制器参数的整定。利用 MATLAB/Simulink 软件对系统进行仿真, 证明方法具有较高的整定效率, 可使关节电机控制系统获得良好的控制性能。

关键词: 机器人关节电机; 滑模控制; PID 控制; 参数整定; 交替联合迭代

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)03-0027-07

Parameter Tuning Method for Joint Motor Sliding Mode Control Based on Alternating Simultaneous Iteration^{*}

YU Haibo¹, LI Jie², XIAO Li³

(1. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Artificial Intelligence, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;

3. School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Parameters tuning of robot joint motor's controller was the key of good control performance realization. A parameter tuning method was presented for joint motor sliding mode control based on alternating simultaneous iteration. Firstly, the permanent magnet synchronous joint motor was designed, and the control object of the system was determined. Secondly, the sliding-mode-PID control system that combined the PID current controller with the sliding mode speed controller was designed. The sliding mode controller's parameters were set initially using engineering design methods. A redundant PID speed controller was added and its parameters were also set by engineering design methods. Using the output speed of the redundant PID speed controller and sliding mode speed controller as iterating variable, the parameters of controller were obtained via alternating simultaneous iteration. Finally, it was proved by the MATLAB/Simulink simulation that the proposed method was effective and feasible.

Key words: robot joint motor; sliding mode control; PID control; parameters tuning; alternating simultaneous iteration

^{*} 基金项目: 河北省高等学校科学技术指导项目(Z2014025); 天津市自然科学基金项目(16JCQNJC04200); 河北省高等教育教学改革研究与实践项目(2017GJJG028)

作者简介: 于海波(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机及其控制。

李 洁(1981—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电机设计和电机系统集成优化。(通信作者)

肖 丽(1987—), 女, 博士, 讲师, 研究方向为电机控制和故障检测。

0 引言

“十三五”期间,国内工业机器人产业迎来高速增长。据工信部统计,2017 年我国工业机器人已销售 10 万余台,预计 2021 年末,工业机器人将销售 23.04 万台,中国机器人产业的发展潜力相当可观^[1]。我国在机器人领域的关键技术方面有所发展,但其核心技术问题仍未突破^[2]。研发优质的关节电机不仅能缩小与国外机器人关键零部件质量的差距,更能加速国产机器人产业的发展,增强国产机器人的核心竞争力和国际影响力。

机器人关节电机的控制研究是目前国内外相关领域研究的热点,其中控制参数的整定是实现机器人关节电机控制系统良好控制性能的前提。

对于关节电机的伺服控制系统参数整定而言,现阶段主要有基于模型和基于规则的参数整定及优化方法^[3]。文献[4]采用在 w' 域内进行参数设计的离散化方法,将采样时间和零阶保持器(ZOH)引起的相角滞后直接体现在设计过程中。文献[5]采用遗传优化算法对改进的 PI 控制器进行了参数整定,得到了较稳定的系统运行特性。文献[6]通过假设步长衰减系数的方法,设计出一种变步长二自由度迭代参数的自整定方法。文献[7]提出一种模糊 PI 参数自整定方法,使系统获得了较好的静态、动态特性。文献[8]提出基于改进差分进化算法的滑模控制参数整定方法,以跟踪误差等为优化指标,对滑模控制器进行参数整定。

上述参数整定方法存在一些可改进之处。其中基于模型的控制参数整定方法依赖于建立的伺服系统数学模型的精确性,在建模过程中,误差难以避免,因此整定后的控制参数往往无法使伺服系统获得令人满意的控制性能;基于规则的控制参数整定法无需系统的精准数学模型,依据其响应性能并通过寻优方法来整定参数,使系统的某一性能指标达到要求,但往往不能满足伺服系统在运行过程中快速性的要求,仍需要在应用中改进。

本文采用永磁同步电机(PMSM)作为机器人关节电机,采用 PID 电流环控制器与滑模速度环控制器结合的控制方法,提出基于交替联合迭代的滑模控制器参数整定方法来确定滑模控制参数。通过增设一个冗余的 PID 速度环控制器,以

冗余 PID 速度环控制器和滑模速度环控制器作用于系统时的输出转速为迭代变量,交替选择控制器参数进行联合迭代确定滑模控制器的控制参数。利用 MATLAB/Simulink 对系统进行仿真,证明本方法的有效性和可行性。

1 关节电机的电磁结构设计

正弦波型 PMSM 用作机器人关节电机,具有体积小、效率高、响应速度快、振动小等特点^[9-10],使机器人可以应用于复杂的场合,同时使其末端实现更加快速、高精度的定位。本文选用直驱型 PMSM 作为机器人关节电机,其技术指标要求如表 1 所示。

表 1 关节电机的技术指标要求

技术指标	额定 功率/W	额定转矩 /(N·m)	额定 电压/V	额定转速 /(r·min ⁻¹)
数值	6.283 38	1	24	60

参照 PMSM 的设计方法^[11-12],利用 Maxwell/Rmxprt 软件进行电磁计算及优化设计,可得机器人关节电机的电磁设计方案,如表 2 所示。

表 2 机器人关节电机电磁设计方案

参数名称	参数值
电机极数	16
定子槽数	18
定子外径/mm	115
定子内径/mm	72
铁心长度/mm	42
气隙长度/mm	0.6
转子外径/mm	70.8
转子内径/mm	26
永磁体宽度/mm	12
磁化方向长度/mm	3.6

2 关节电机的控制器设计

滑模变结构控制具有对外界干扰及系统参数不敏感的特性,同时无需精准观测系统变量,易于数字化实现^[13-14]。本文设计 PID 电流控制器和滑模变结构速度控制器结合的滑模-PID 控制系统来控制机器人关节电机,以获得良好的控制效果。

2.1 关节电机的数学模型

在矢量 $i_d=0$ 控制中,将定子三相电流转换为 i_d 和 i_q ,利用数学模型中坐标矢量变换的方法,完成三相静止轴系与转子两相旋转轴系之间的转换,实现对关节电机 i_d 和 i_q 的控制。在数学模型坐标矢量变换的推导中,需作如下假设^[15]:

- (1) 忽略谐波影响,绕组三相对称,磁动势按正弦波形式沿气隙分布;
- (2) 忽略铁心损耗;
- (3) 忽略磁路饱和现象,三相绕组自感、互感保持不变;
- (4) 绕组电阻对频率、温度的变化不敏感。

关节电机三相静止轴系的 ABC 电压方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} u_A = Ri_A + D\psi_A \\ u_B = Ri_B + D\psi_B \\ u_C = Ri_C + D\psi_C \end{cases} \quad (1)$$

式中: R ——定子绕组电阻;

D ——微分因子;

ψ_A, ψ_B, ψ_C ——三相定子磁链。

各坐标轴系的位置关系如图 1 所示。

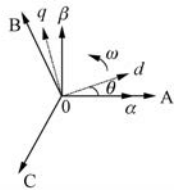


图 1 电机各坐标轴系位置关系

利用 $C_{3s/2r}$ 变换、 $C_{2r/3s}$ 变换以及三相静止坐标系下的数学模型,可得旋转坐标轴系下关节电机的数学模型。

电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + D\psi_d - \omega\psi_q \\ u_q = Ri_q + D\psi_q + \omega\psi_d \end{cases} \quad (2)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_r \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (3)$$

式中: ψ_r ——定、转子间的耦合磁链。

转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2}p[\psi_r i_q + (L_d - L_q) i_q i_d] \quad (4)$$

式中: p ——极对数。

运动方程为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

式中: T_L ——负载转矩;

J ——转动惯量;

ω_r ——关节电机转速。

2.2 控制器设计

本文所设计的关节电机控制系统为 PID 电流控制器和滑模变结构速度控制器结合的滑模-PID 控制系统。

选用 PID 控制器为电流环控制器,其表达式为

$$u = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (6)$$

式中: K_p, K_i, K_d ——比例、积分、微分系数。

PID 电流环控制器的参数整定采用工程整定方法。

选用滑模变结构控制器作为速度环控制器。由于本文设计的关节电机为表贴式 PMSM,且采取矢量 $i_d=0$ 控制,联立式(2)、式(3)和式(4),数学模型可简化为

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(-Ri_q - p\psi_r\omega_m + u_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}\left(-T_L + \frac{3p\psi_r}{2}i_q\right) \end{cases} \quad (7)$$

定义关节电机系统的状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{ref} - \omega_r \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_r \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_1, x_2 ——系统的状态变量;

ω_{ref} ——关节电机的参考转速。

联立式(7)、式(8),推导出状态变量导数如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_r = \frac{1}{J}\left(-T_L + \frac{3p\psi_r}{2}i_q\right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_r = -\frac{3p\psi_r}{2J}i_q \end{cases} \quad (9)$$

定义 $u = i_q, D = \frac{3p\psi_r}{2J}$, 则系统的状态空间表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -D \end{bmatrix} u \quad (10)$$

选取滑模面:

$$s = cx_1 + x_2 \quad (11)$$

式中: s ——滑模面;

c ——滑模系数, $c > 0$ 。

对式(11)求导,得到:

$$\dot{s} = cx_1 + \dot{x}_2 = cx_2 + \dot{x}_2 = cx_2 - Du \quad (12)$$

为了保证机器人关节电机系统具有较好的动态性能,采用指数趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (13)$$

式中: ε, k ——指数趋近律系数, $\varepsilon, k > 0$ 。

可得控制器的表达式为

$$u = \frac{1}{D} [cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks] \quad (14)$$

q 轴的参考电流 i_q^* 表达式为

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks] d\tau \quad (15)$$

系统稳定性证明如下:

证明:取 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} s^2, s \neq 0 \quad (16)$$

对式(16)求导,可得:

$$\dot{V} = ss', s \neq 0 \quad (17)$$

基于趋近律式(13),式(17)重新写为

$$\dot{V} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s)s - ks^2 \quad (18)$$

由式(18)可知,只需满足 $\varepsilon, k > 0$,则可以保证 $\dot{V} \leq 0$,即在有限的时间内,通过控制器式(14)的作用,保证滑模面 s 收敛到零,系统空间状态变量收敛到给定值。

3 基于交替联合迭代的滑模控制器参数整定

为了高效地完成系统的参数整定,本文提出基于交替联合迭代的滑模控制器参数整定方法,流程如图2所示。流程描述具体如下。

步骤1:用工程整定方法初步对滑模速度环控制器参数进行整定,获得初始控制参数使电机能够输出稳定的转速波形,记录此时迭代次数 $\text{num} = 0$ 。

步骤2:为控制系统增设冗余 PID 速度环控制器,基于专家经验法对其参数进行整定,使冗余 PID 速度环控制器作用的系统转速输出曲线的超

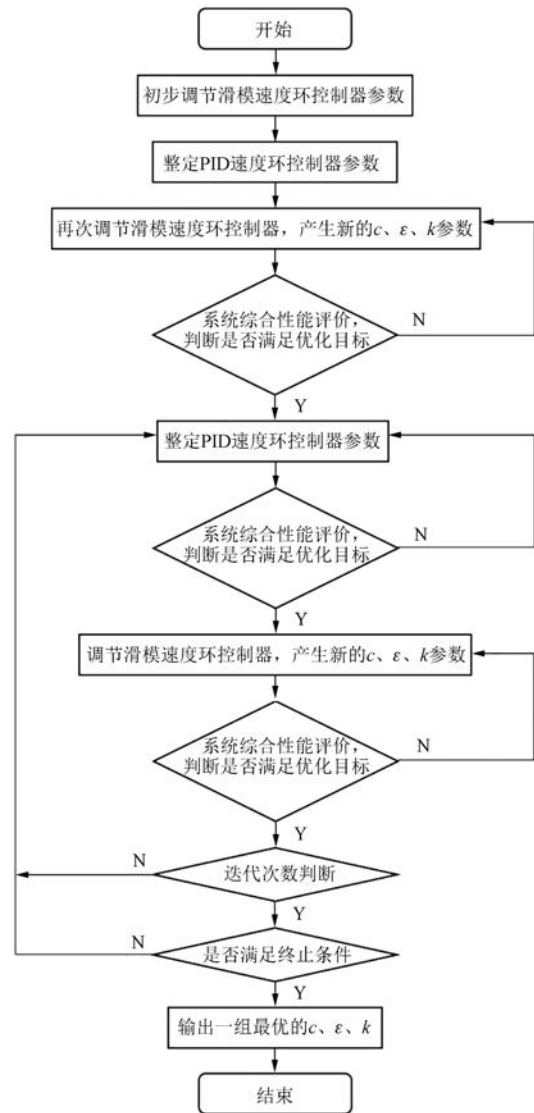


图2 交替联合迭代流程图

调量满足 $\sigma < 10\%$ 的要求,将系统输出的转速特性作为滑模速度环控制器参数整定的搜索方向。

步骤3:以冗余 PID 速度环控制器作用下系统转速输出曲线为参考,基于专家经验法对滑模速度环控制器进行参数整定,调节滑模速度环控制器中的 c, ε, k 等参数,并以冗余 PID 速度环控制器作用的系统转速超调量的 80% 作为迭代优化目标进行调节,直至输出稳定的响应曲线。此时记录迭代次数 $\text{num} = 1$,如未达到优化目标则继续进行步骤3。

步骤4:以滑模速度环控制器作用的系统转速输出曲线为参考,再次调节冗余 PID 速度环控

制器,并以滑模速度环控制器作用的系统转速曲线超调量的 80% 为优化目标进行调节,并使 $\text{num} = \text{num} + 1$,如未达到优化目标则继续进行步骤 4。

步骤 5:以冗余 PID 速度环控制的系统转速输出曲线为参考,调节滑模速度环控制器,并以冗余 PID 速度环作用的系统转速曲线超调量的 80% 为优化目标进行调节,并使 $\text{num} = \text{num} + 1$,如未达到优化目标则继续进行步骤 5。

步骤 6:为保证控制系统的转速输出曲线具有足够小的超调值,根据速度输出曲线的迭代收敛特征,选择结束迭代的次数,否则返回步骤 4。本文设计例的迭代次数为 $\text{num} = 7$ 。

步骤 7:判断是否满足终止条件——在滑模速度环控制器和冗余 PID 速度环控制器交替联合迭代的作用下,设置负载突变瞬间,系统转速输出波形的动态降落比值 $> 99\%$ 。若满足终止条件,输出最优一组 c, ε, k ,否则返回步骤 4。

4 仿真与分析

为验证本文所提出方法的可行性和有效性,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建仿真系统。控制系统框图如图 3 所示,机器人关节电机的驱动电路采取空间矢量电压脉宽调制 (SVPWM),PID 电流环控制器的参数整定采用工程整定方法确定。

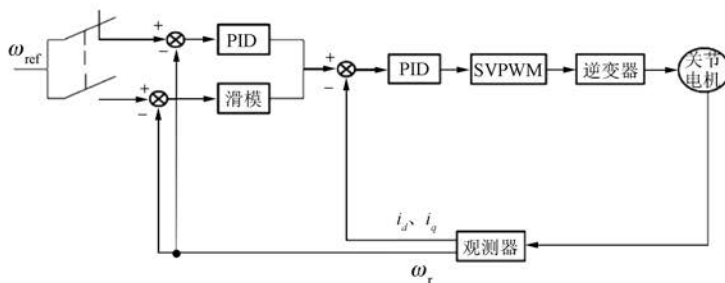


图 3 关节电机控制系统框图

设定参考转速为 40 r/min,依次交替地调节滑模速度环控制器和冗余 PID 速度环控制器的参数。迭代过程中,滑模速度环控制器作用下的系统转速输出局部放大变化曲线如图 4 所示。

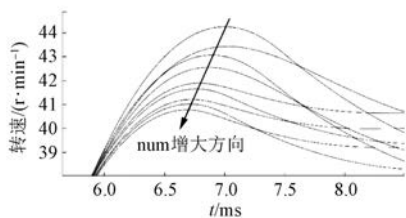


图 4 关节电机带载转速的局部放大变化曲线

由图 4 可知,经过参数整定流程,随着迭代次数 num 从 0 增加到 7,系统转速的超调逐渐减小,从 10.625% 降到了 1.950%,同时峰值时间有明显的提前趋势,从 7.009 ms 提前到 6.676 ms。在第 6 次、第 7 次迭代后,转速输出特性良好并趋于稳定。

为了更精确地分析基于交替联合迭代法进行参数整定的有效性和可行性,通过对迭代次数

$\text{num} = 0$ 时与 $\text{num} = 7$ 时的滑模-PID 控制系统输出响应曲线进行对比分析,研究空载和带载情况下的关节电机的转速突变和负载突变的动态响应,仿真时间均为 0.2 s,在 0.1 s 时施加突变。

4.1 空载时动态特性分析

空载特性分析主要考虑关节电机的起动、降速过程,其过程设定为:关节电机在空载情况下,转速从零升速到 40 r/min,然后降速到 20 r/min。

关节电机起动、降速后,在不同迭代次数 $\text{num} = 0$ 和 $\text{num} = 7$ 时,关节电机的转速、电磁转矩和定子电流变化波形如图 5、图 6 和图 7 所示。

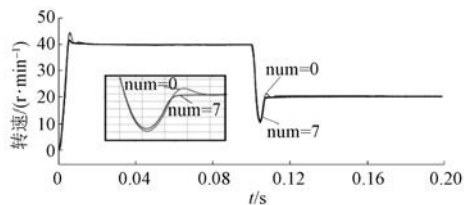


图 5 空载时转速变化曲线

在 0.1 s 转速突变时,相对于迭代次数 $\text{num} =$

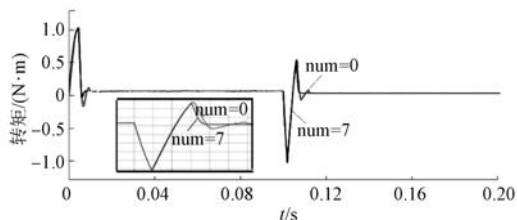


图6 空载时电磁转矩变化曲线

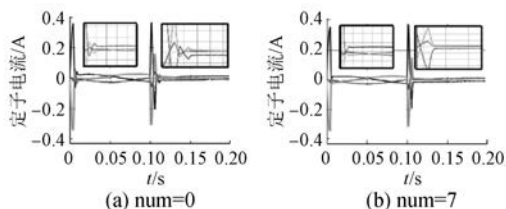


图7 空载时定子电流变化曲线

0 时而言,在 $\text{num}=7$ 时系统能够更快地跟踪目标转速,同时转速降落也更小,通过迭代处理,使系统的自适应性明显提高。同时系统输出的电磁转矩能够很快地恢复到正常水平,其恢复时间约为 0.008 s,相对于迭代次数 $\text{num}=0$ 时, $\text{num}=7$ 时的系统中电磁转矩满足快速调节转矩的要求。对于定子电流而言,通过对比图 7(a)、图 7(b) 两处电流放大图,可以看出,在迭代次数 $\text{num}=7$ 时定子电流畸变程度更小,同时能够快速恢复到正常水平,迭代处理使系统具有快速的响应性。

4.2 带载时动态特性分析

带载特性分析主要考虑负载突变过程,其过程设定为:关节电机带载 $0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$,由静止起动升速到 40 r/min ,然后突加负载从 $0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 突变为 $0.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

负载突变情况下,迭代次数 $\text{num}=0$ 和 $\text{num}=7$ 时关节电机的转速、电磁转矩波形如图 8、图 9 所示。对定子电流波形进行分析,其变化曲线如图 10 所示。

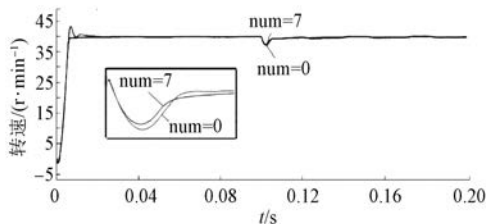


图8 带载时转速变化曲线

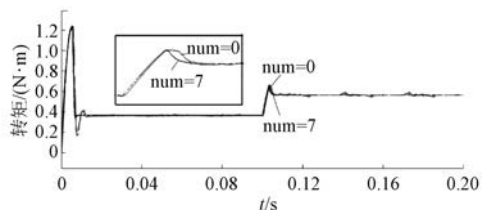


图9 带载时电磁转矩变化曲线

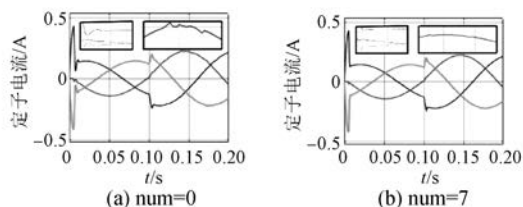


图10 带载时定子电流变化曲线

在关节电机负载突变情况下,从图 8 可知,在 0.1 s 突加负载时,相对于迭代次数 $\text{num}=0$ 而言, $\text{num}=7$ 时的系统具有更强的调节性,负载突变时转速降落更小,恢复到参考速度的时间更短,其恢复时间仅为 0.006 s。同时从图 9 可看出, $\text{num}=7$ 时的系统电磁转矩能够稳定跟踪负载变化,并且相对于 $\text{num}=0$ 时的系统而言,能够更快地到达指定转矩,且变化过程中转矩波动更小。对比图 10(a)、图 10(b) 两处电流放大图可以看出,相对于迭代次数 $\text{num}=0$ 时, $\text{num}=7$ 的定子电流的畸变程度小,过渡平缓,能更快速地跟上负载变化,负载突变过程中电流畸变程度更小。

5 结 语

本文进行了永磁同步关节电机的本体设计和滑模-PID 控制系统的设计,提出了基于交替联合迭代的滑模控制器参数整定方法。该参数整定方法利用增设的冗余 PID 速度环控制器,以其输出作为滑模控制器的参数整定搜索方向,较快地完成参数整定。

冗余 PID 速度环控制器的参数整定采用专家经验法进行,可以较快地使系统处于要求的良好控制性能,同时,借助冗余 PID 速度环控制器作用的输出进行滑模控制器的参数整定,无需依赖系统的精准数学模型。因此对滑模控制器和冗余 PID 速度控制器交替进行联合迭代的参数整定,可以提高滑模控制器参数整定的效率,且实用价值较高。

利用 MATLAB/Simulink 软件验证了所提方法的可行性和有效性。结果表明:随着交替联合迭代次数的增加,系统转速输出特性收敛于冗余 PID 速度环控制器作用下系统的联合迭代值,并且在负载突变和转速突变的情况下,通过交替联合迭代,滑模-PID 控制系统的响应性、自适应性和鲁棒性的良好特点得到了充分的体现。滑模-PID 控制系统完成参数整定后,系统能够输出稳定转矩,快速跟踪给定值,转矩波动降低,关节电机的控制性能提升。

本文主要考虑机器人关节电机对控制精度和响应速度的要求,采用系统输出速度的超调量和动态降落作为优化适应值。在迭代过程加入电磁转矩等优化适应值,是今后的研究方向之一。

[参考文献]

- [1] 中国工控网. ACT Lab: 2018 高精度协作机器人是工业机器人重点投资方向[EB/OL]. (2018-01-03) [2018-03-20]. <http://www.gongkong.com/news/201801/374479.html>.
- [2] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1.
- [3] 肖博. 交流伺服系统参数整定方法及抗负载扰动观测研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [4] 刘景林, 公超, 韩泽秀, 等. 永磁同步电机闭环控制系统数字 PI 参数整定[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(4): 26.
- [5] SORICELLIS M D, RU D D, BOLOGNANI S. A robust current control based on proportional-integral observers for permanent magnet synchronous machines [C] // 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016.
- [6] 付俊永, 王爽, 程天威, 等. 基于变步长迭代方法的伺服系统控制器参数自整定[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(10): 18.
- [7] 罗志伟, 李翰林, 谷爱昱, 等. 永磁同步电机控制器参数自整定研究[J]. 机械与电子, 2017, 35(2): 55.
- [8] 黄健, 周端. 基于改进差分进化算法的滑模控制参数整定[J]. 控制工程, 2018, 25(3): 484.
- [9] HAQUE M E. Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[M]. [s.l.]: VDM Verlag Dr. Müller, 2009.
- [10] RUSU C, ENIK B, BARA A. DSP based controller of PMSM drive for robot axis applications[J]. Journal of Computer Science & Control Systems, 2009, 2(1): 119.
- [11] 陈金炫. 工业机器人用永磁同步交流伺服电动机设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [12] 曹永娟. 基于 ANSYS 的永磁同步电机设计分析软件[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(2): 25.
- [13] 黄雷, 赵春明, 黄鹏. 基于分段滑模控制的位置伺服系统[J]. 电机与控制应用, 2010, 37(9): 53.
- [14] ZHANG X, SUN L, ZHAO K, et al. Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1358.
- [15] SUN T, LIU C, LU N, et al. Design of PMSM vector control system based on TMS320F2812 DSP [C] // Proceedings of the 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, IEEE, 2012: 2602.

收稿日期: 2018-08-20

[主要栏目]

- | | | |
|--------------|-----------|-------------|
| · 控制与应用技术 | · 研究与设计 | · 故障诊断与保护 |
| · 新能源发电与局域电网 | · 新能源汽车技术 | · 发电机组及其控制 |
| · 测试技术与测控系统 | · 材料与工艺 | · 电机生产及质量管理 |
| · 电力电子变流器技术 | · 智能制造 | · 节能应用 |