

基于模糊控制在线整定新趋近律的速度 调节器研究

周兆钟¹, 尹明德^{1*}, 王南越¹, 肖杰², 王立成², 杨明²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016;

2. 南京胜捷电机制造有限公司, 江苏南京 211221)

Research on Speed Regulator Based on Fuzzy Control Online Tuning New Reaching Law

ZHOU Zhaozhong¹, YIN Mingde^{1*}, WANG Nanyue¹, XIAO Jie²,

WANG Licheng², YANG Ming²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and
Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Nanjing Shengjie International Manufacturing Co., Ltd., Nanjing, 211221, China)

Abstract: For the problem of large chattering and difficult parameter tuning of traditional exponential reaching law sliding mode variable structure control, a new sliding mode reaching law is designed and fuzzy control is used to realize parameter tuning. In the double closed-loop DC speed regulation system, a speed regulator is designed based on the new reaching law. At the same time, in order to improve the efficiency of reaching law parameter tuning, an online tuning method of reaching law parameters is designed by using fuzzy control. The sliding mode parameters of the new reaching law are adjusted online by fuzzy control to improve the speed regulation performance of the system. The simulation model of DC speed regulation system is built in Matlab/Simulink, the results show that the new reaching law is superior to the traditional exponential reaching law in suppressing chattering and fast convergence, and the fuzzy control online tuning reaching law parameters is more efficient and performs better than the trial and error method.

Key words: fuzzy control; reaching law; sliding mode control; parameter tuning

摘要: 针对传统指数趋近律滑模变结构控制抖振大和参数整定难的问题,设计了一种新的滑模趋近律并采用模糊控制以实现参数整定。在双闭环直流调速系统中,基于新趋近律设计了速度调节器;同时为了提高趋近律参数整定效率,利用模糊控制设计了趋近律参数在线整定方法,通过模糊控制在线整定新趋近律的滑模参数来

提高系统的调速性能。在 Matlab/Simulink 中搭建直流调速系统的仿真模型,结果表明所设计的新趋近律在抑制抖振和快速收敛方面优于传统指数趋近律,相较于试凑法模糊控制在线整定趋近律参数的效率更高、性能更好。

关键词: 模糊控制; 趋近律; 滑模控制; 参数整定

0 引言

有刷直流电机具有调速范围大、抗冲击性强、控制参数少和无级调速平滑等优点,因此被广泛应用于家用电器、厨房设备以及离心机等领域^[1]。随着现代控制理论和电子技术的飞速发展,直流电机调速系统的性能要求也不断提高,国内外研究人员结合智能控制算法提出了神经网络控制^[2]、模糊控制^[3]和滑模变结构控制^[4]等控制方法。其中,滑模变结构控制方法因具有响应快、抗干扰性能强以及对参数变化不敏感等优点成为研究的热点。但滑模变结构控制存在抖振大和滑模参数整定难的问题,为了进一步提高滑模变结构控制的性能,本文将从减小抖振和设计滑模参数整定方法两个方面展开研究。

针对滑模变结构控制的抖振问题,国内外学者从工程角度出发,对抖振进行了精确的分析和评估,提出了多种解决办法。如趋近律法^[5-6]、模

糊滑模法^[7]、非奇异终端滑模法^[8]和神经网络滑模法^[9]等。其中,趋近律法可以改善趋近运动和滑模运动的动态品质,在工程领域得到了广泛应用。传统的指数趋近律虽然缩短了趋近时间并在一定程度上降低了抖振,但由于等速趋近项的存在,系统以带状的形式趋向于零点,在切换面附近形成抖振,抖振的幅值与等速趋近项的系数相关。文献[10]设计了一种非线性的幂次组合函数和双曲正切函数结合的新的趋近律,虽然利用双曲正切函数代替符号函数能够降低抖振,但其滑模参数复杂难以整定。文献[11]在传统指数趋近律中增加了系统的状态变量,设计了新的趋近律,不考虑符号函数,利用终端引子和系统的状态抑制抖振。为了进一步提高趋近速度同时降低抖振,本文将系统的状态变量引入到指数趋近律的等速趋近项中,在指数项中增加了关于滑模函数的幂阶项,设计了一种新的趋近律并应用于直流电机调速系统。与传统的比例积分(Proportional Integral, PI)速度控制器相比,新趋近律滑模速度控制器可以提高调速系统的响应速度和稳定性。

滑模变结构控制器的参数整定一般通过经验法和试凑法来实现,但这两种方法效率低且控制效果不理想。因此,国内外学者提出了一些优化算法来实现滑模参数整定。文献[12]采用粒子种群优化算法,以系统的跟随误差为参数优化的目标函数,经过寻优处理后得到滑模参数,相比于传统的经验法和试凑法,粒子种群算法加快了趋近速度,减小了抖振的幅值,但其需要多次迭代并且初始化设置较为复杂。文献[13]提出了一种利用差分进化优化算法的整定方法,该方法将跟踪误差和收敛时间作为适应值,实现滑模变结构控制器参数整定,使系统具有更快的收敛速度、更小的抖振,但该方法在参数整定之前需要用其他优化算法确定参数的取值范围,算法设计较复杂。文献[14]利用极点配置的方法完成滑模变结构控制器的设计,对滑模变结构控制器参数的设定形成了系统化的方法,提高了参数整定的效率,但该方法需要事先给定滑模面内子系统所期望的极点。

综上所述,设计一种滑模变结构控制器参数整定的优化算法十分必要。本文结合模糊控制的优点,设计了一种模糊整定滑模参数的算法,该算法利用专家系统的经验知识根据跟踪误差和误差

变化率,在线实时整定滑模变结构控制参数,使直流电机调速系统响应更快、抖振更小且抗干扰性更强。

1 直流电机的数学模型

永磁有刷直流电机动态模型中的电气方程和转矩方程为

$$u = R_a i + e_a + L_a \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$$e_a = K_e \omega \quad (2)$$

$$T_e - T_L - B\omega = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

$$T_e = K_t i \quad (4)$$

式中: u 为电枢两端外加电压; L_a 为电枢电感; e_a 为反电动势; R_a 为电枢回路的总电阻; i 为电枢电流; ω 为机械角速度; K_e 为反电动势常数; T_L 为负载转矩; T_e 为电磁转矩; J 为总转动惯量; K_t 为转矩常数; B 为阻尼系数。

2 趋近律的改进设计

系统采用滑模控制时,系统的状态变量到达滑模面的过程包括了趋近到滑模面的运动和沿滑模面收敛到原点的运动^[15]。当滑模变结构控制通过采用趋近律的方式实现时,系统趋近运动的动态品质得到改善。选择合适的趋近律能够使系统响应更快、抖振更小^[16]。目前,最经典的趋近律是指数趋近律,传统指数趋近律的表达式为

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (5)$$

式中: s 为系统的滑模面; sgn 为符号函数; ε 和 k 为系数。

$-ks$ 为指数趋近项,其主要作用是使系统以较大的速度到达滑模面,故系统的收敛速度与 k 值有关; $-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 为等速趋近项,在 s 接近0时,主要趋近速度为 ε 而不是0,故等速趋近项可以保证系统在有限时间内到达滑模面。

当 $s > 0$ 时,由式(5)可得:

$$\frac{ds}{dt} = -\varepsilon - ks \quad (6)$$

在区间 $[0, t]$ 上, $s(t) = 0$,对式(6)积分可得系统的收敛时间为

$$t = \frac{1}{k} \left\{ \ln \left[s(0) + \frac{\varepsilon}{k} \right] - \ln \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \right\} \quad (7)$$

由式(7)可知, k 越大系统收敛越快, 抖振也越大。为了解决系统收敛速度与抑制抖振之间的矛盾, 本文在传统指数趋近律的基础上设计了一种新的趋近律, 其表达式为

$$\frac{ds}{dt} = -\varepsilon |x_1|^b \operatorname{sgn}(s) - ks |s|^{\alpha \operatorname{sgn}(|s|-1)} \quad (8)$$

式中: x_1 为系统的状态变量, $\lim_{t \rightarrow \infty} |x_1| = 0$; a 和 b 为系数, $0 < a < 1, 0 < b < 1; \varepsilon > 0; k > 0$ 。

所设计的新趋近律在指数项中引入了系统的滑动模态, 使系统状态趋近滑模面时, 仍然有较大的趋近速度; 在等速趋近项中引入了系统的状态变量, 使系统状态趋近滑模面时, 系统抖振的幅值由 ε 降低到 $\varepsilon |x_1|^b$ 。当 $|s| > 1$ 时, 系统以趋近项 $-\varepsilon |x_1|^b \operatorname{sgn}(s)$ 和变指数趋近项 $k\varepsilon |s|^a$ 两种速度趋近于滑模面, 趋近速度较大; 当 $|s| < 1$ 时, 系统的状态接近于滑模面, 变指数项的趋近速度为 $k\varepsilon |s|^a$, 由于 $ks |s|^a > ks |s|^a$, 相较于传统的指数趋近律, 变指数项的趋近速度增大。故新趋近律在保证系统趋近速度增大的同时又降低了抖振的幅值。

因此, 在整个滑模控制的运动过程中, 新趋近律的到达速度始终大于传统的指数趋近律的到达速度, 且抖振更小。

定义 Lyapunov 函数表达式为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (9)$$

对式(9)求导:

$$\dot{V} = s\dot{s} \quad (10)$$

由式(8)和式(10)可得 $s\dot{s} < 0$, 故所设计的趋近律满足稳定性条件。

以式(11)所示的经典控制系统为例, 对传统的指数趋近律和新趋近律进行比较分析。

$$\ddot{\theta}(t) = -25\dot{\theta}(t) + 133u(t) \quad (11)$$

式中: θ 为被控对象的实际信号; u 为控制输入信号。

系统的状态变量 $x_1 = \theta_d - \theta$, θ_d 为被控对象的期望信号。 $x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\theta}_d - \dot{\theta}$ 。滑模面 $s = cx_1 + x_2, c > 0$, 取 $c = 15$ 。根据式(8)和式(11)得到新趋近律的控制函数为

$$u = \frac{1}{133} [\varepsilon |x_1|^b \operatorname{sgn}(s) + ks |s|^{\alpha \operatorname{sgn}(|s|-1)} + cx_2 + \ddot{\theta} + 25\dot{\theta}] \quad (12)$$

文献[17]在幂次趋近律的基础上提出了一种改进型幂次趋近律, 以降低抖振幅值并提高系统的收敛速度。该趋近律的表达式为

$$\frac{ds}{dt} = -\varepsilon |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s) - ks |x_1|^\beta \quad (13)$$

式中: α 和 β 为系数。

在 Matlab/Simulink 中, 搭建如图 1 所示的控制系统仿真模型, 分别采用传统指数趋近律、改进型幂次趋近律和所设计的新趋近律进行控制。新趋近律的仿真参数为: $a = 0.3, b = 0.9, \varepsilon = 200, k = 100$ 。被控对象的初始状态点为 $(-1.5, -1.5)$, 被控对象的期望信号为 $\theta_d = \sin(\pi t)$ 。

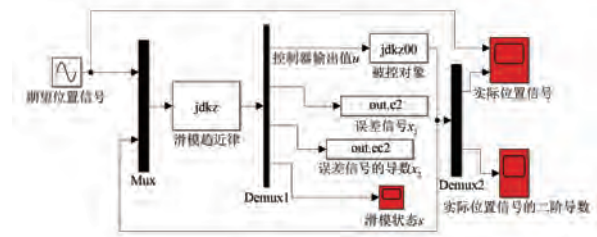


图 1 控制系统仿真模型

Fig. 1 Control system simulation model

通过仿真, 得到三种趋近律的相轨迹曲线图, 分别如图 2、图 3 和图 4 所示。

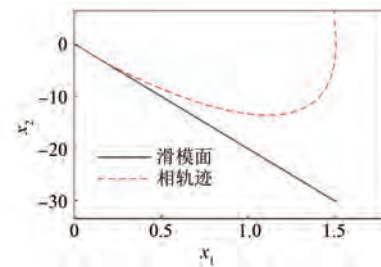


图 2 传统指数趋近律的相轨迹

Fig. 2 Phase trajectory of traditional exponential reaching law

由图 2、图 3 和图 4 对比可知, 新趋近律控制的系统趋近运动的动态品质最优, 能够快速趋近滑模面。

通过仿真, 得到控制器的输出曲线、系统状态收敛曲线、系统状态局部放大曲线和趋近过程所需时间曲线分别如图 5、图 6、图 7 和图 8 所示。

通过各仿真结果对比可知, 新趋近律在跟踪给定参考信号、抑制抖振、减小跟踪误差和缩短趋近时间等方面明显优于传统的指数趋近律和改进型幂次趋近律。因此, 所提的新趋近律抑制抖振

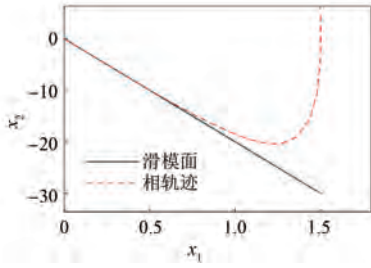


图3 改进型幂次趋近律的相轨迹

Fig. 3 Phase trajectory of the improved power reaching law

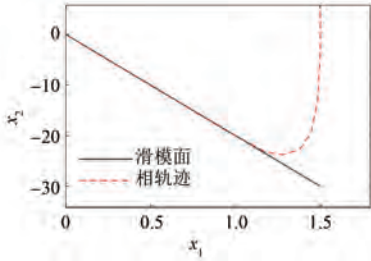


图4 新趋近律的相轨迹

Fig. 4 Phase trajectory of the new reaching law

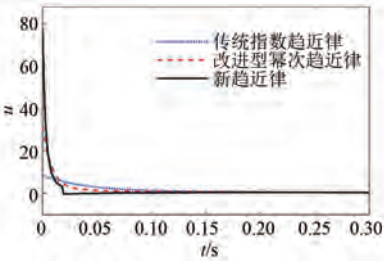


图5 控制器的输出曲线

Fig. 5 Controller output curves

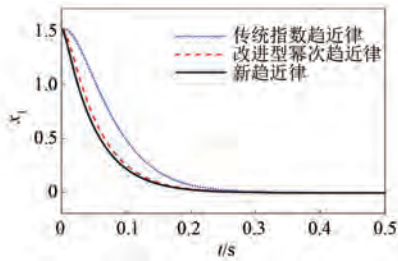


图6 系统状态收敛曲线

Fig. 6 System state convergence curves

效果更好且收敛速度更快。

3 新趋近律速度控制器的设计与参数整定

在双闭环直流电机调速系统中,令 x_1 为直流

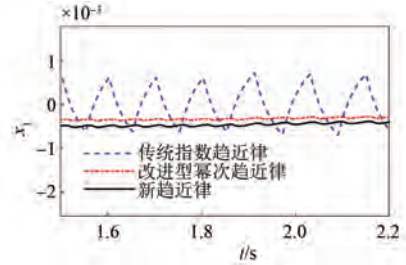


图7 系统状态局部放大曲线

Fig. 7 System state local amplification curves

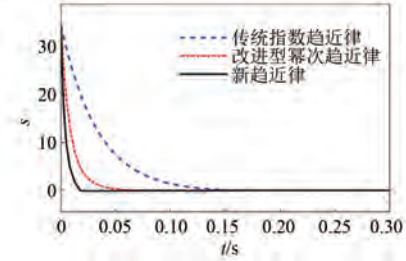


图8 趋近过程所需时间曲线

Fig. 8 Curves of time required for the reaching process

电机的给定角速度与实际角速度的差, x_2 为 x_1 的导数,则根据式(1)和式(3)可得:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_0 - \omega \\ \dot{x}_1 = x_2 = -\dot{\omega} \\ \dot{x}_2 = -\frac{B}{J}x_2 - \frac{K_t}{J}\frac{di}{dt} \end{cases} \quad (14)$$

滑模面函数为

$$s = cx_1 + x_2, c > 0 \quad (15)$$

结合式(14)和式(15),可得滑模面函数的导数为

$$\dot{s} = -\frac{K_t}{J}\frac{di}{dt} + \left(c - \frac{B}{J}\right)x_2 \quad (16)$$

由式(8)和式(16)可得,在直流调速系统中,基于新趋近律的滑模速度控制器的函数表达式为

$$i = \frac{J}{K_t} \int_0^\infty \left(c - \frac{B}{J}\right)x_2 + \varepsilon |x_1|^b \text{sgn}(s) + ks |s|^{a \text{sgn}(|s|^{-1})} dt \quad (17)$$

将式(16)代入式(10)可得:

$$\dot{s}s = -\varepsilon |x_1|^b s \text{sgn}(s) - ks^2 |s|^{a \text{sgn}(|s|^{-1})} < 0 \quad (18)$$

在直流调速系统中由于 $\dot{s}s < 0$,故新趋近律满足 Lyapunov 稳定性条件,确保系统进入滑模面。在滑模面上 $s=0$,解式(15)的微分方程可得:

$$x_1 = c_0 e^{-ct} \quad (19)$$

式中: c_0 为常数, 其值为系统状态变量初值 $x_1(0) = \omega_0$ 。

系统的状态变量 x_1 以指数的形式收敛到 0。当系统受到扰动时, 系统的品质与扰动无关只与趋近律的参数相关^[18]。因此, 双闭环直流调速系统采用滑模速度控制器时, 具有很好的抗干扰性和快速性。

双闭环直流调速系统的速度控制器采用滑模变结构控制时, 其参数 c 、 ε 和 k 通常需要通过经验法和试凑法完成整定^[19]。为了提高滑模速度控制器参数整定的效率, 本文利用模糊控制实现了滑模参数的在线整定。并在 Matlab/Simulink 中搭建了双闭环直流调速系统的仿真模型, 验证了模糊控制整定滑模变结构参数的有效性。

3.1 滑模速度控制器参数整定分析

由式 (17) 可知, 双闭环直流调速系统中速度控制器输出的参考电流值与参数 a 、 b 、 c 、 k 和 ε 的值相关。参数 a 和 b 在其取值范围内按照由小到大的原则进行调整, 当系统输出恰好出现明显抖振时, 则确定参数 a 和 b 的取值, 本文设计的滑模速度控制器 $a=0.3$ 、 $b=0.9$ 。参数 c 、 k 和 ε 的整定分析如下。

(1) 参数 c 的整定

滑模面 $s=0$, 由式 (14) 和式 (15) 可得:

$$\begin{cases} cx_1 + x_2 = 0 \\ \dot{x}_1 = x_2 \end{cases} \quad (20)$$

解常微分方程可得:

$$\begin{cases} x_1 = x_1(0)e^{-ct} \\ x_2 = cx_2(0)e^{-ct} \end{cases} \quad (21)$$

由式 (20) 可知, 当参数 c 增大时, 收敛速度加快。直流电机调速系统中, 为了使系统具有快速的响应和较小的超调, 在实际转速小于额定转速时, 参数 c 应有较大的值; 当实际转速接近额定转速时, 应减小参数 c 的值。

(2) 参数 k 、 ε 的整定

由式 (8) 可知, 新趋近律中 $ks|s|^{asgn(|s|^{-1})}$ 为变指数趋近项, $\varepsilon|x_1|^b sgn(s)$ 为带有状态变量幂函数的等速趋近项。当 s 较大时, 参数 k 应有较大的值, 使系统较快趋近于滑动模态; 当 s 较小时, 参数 k 应有较小的值, 使运动点低速到达切换面; 当 s 接近 0 时, 趋近速度为 ε , 保证系统到达切

换面^[20]。

因此在指数趋近律中, 为保证抖振较小且趋近速度较快, 参数 k 、 ε 的整定原则为: 随着 s 减小, 参数 k 和 ε 也减小。

3.2 滑模控制在线整定新趋近律参数

利用 Matlab 的 Fuzzy 设计模糊控制器。设计的模糊控制器的输入为 x_1 和 x_2 。由于参数 ε 保证了系统的可达性, 对系统动态性能的影响较小, 故模糊控制器只对参数 c 和 k 完成整定。

x_1 和 x_2 的实际取值范围分别为 $[-314, 314]$ 和 $[-1.2 \times 10^4, 1.2 \times 10^4]$; 参数 c 和 k 的实际取值范围分别为 $[150, 300]$ 和 $[20, 40]$ 。利用量化因子 k_{x_1} 和 k_{x_2} 将 x_1 和 x_2 的实际值分别量化到模糊论域 $[-2, 2]$ 和 $[-3, 3]$ 中, 通过计算可得 $k_{x_1} = 0.00667$, $k_{x_2} = 0.0001$ 。模糊论域对应的模糊子集为 $x_1 = \{NB, NS, ZE, PS, PB\}$ 、 $x_2 = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。其中 NB、NM、NS、ZE、PS、PM 和 PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。输入变量 x_1 和 x_2 , 输出变量 c 和 k 的隶属度函数如图 9 所示。采用面积中心法解模糊, 输出值 c 和 k 的模糊变量语言集合为 $c, k = \{PS, PM, PB\}$ 。对应的模糊论域为 $c = [2, 4]$, $k = [2, 4]$ 。通过比例因子 $k_c = 71$, $k_k = 10$ 将输出值从模糊论域变换为实际论域。

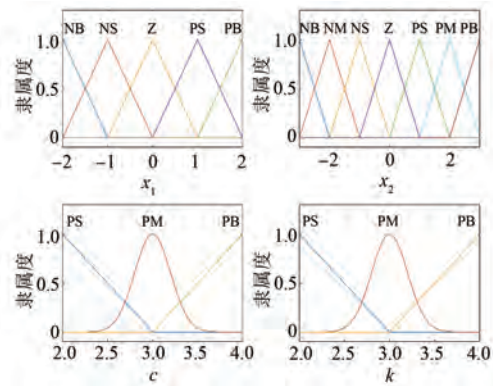


图 9 模糊控制器的隶属度函数

Fig. 9 Membership functions of fuzzy controller

利用上述对于参数 c 、 k 的整定分析和专家系统知识, 建立如表 1 和表 2 所示的模糊整定规则。建立的规则表总共 35 条语句, 例如, 其中一条语句描述为: if $x_1 = NB$ and $x_2 = NB$, then $c = PB$, $k = PS$ 。

在 Simulink 中搭建基于模糊控制在线整定新趋近律参数的速度控制器仿真模型。仿真运行的条件

表 1 参数 c 的整定规则Tab.1 The tuning rule of parameter c

x_1	x_2						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
NS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
ZE	PB	PB	PM	PM	PM	PB	PB
PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

表 2 参数 k 的整定规则Tab.2 The tuning rule of parameter k

x_1	x_2						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
NS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
ZE	PB	PB	PM	PS	PM	PB	PB
PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
PB	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS

为:在 $t=0$ s 时,电机空载启动到 $n=2500$ r/min;在 $t=0.4$ s 时,在电机系统中突加 0.1 N·m 的负载;在 $t=0.6$ s 时,电机的转速降低至 $n=2000$ r/min,仿真时间为 1 s。采用试凑法整定新趋近律参数的值为: $c=200$ 、 $k=20$ 及 $\varepsilon=20$ 。直流调速系统分别采用试凑法和模糊控制方法整定参数,得到的速度响应曲线如图 10 所示。

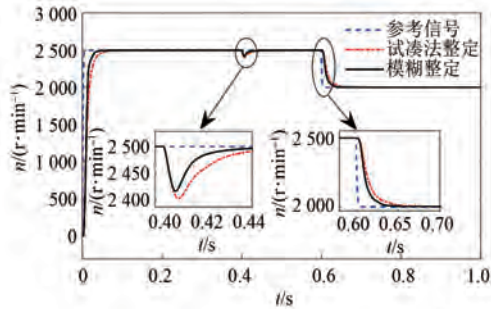


图 10 双闭环直流调速系统的速度响应曲线

Fig.10 Speed response curves of double closed-loop DC speed regulation system

由图 10 可知,在给定转速变化时,相比于试凑法,模糊控制在线整定方法的收敛时间更短;突加负载时,抗干扰性也更强;模糊控制的参数整定效率也更高。

4 仿真分析

4.1 直流调速系统的仿真参数

采用的直流电机参数为:电枢电阻 $R=1.1 \Omega$ 、

额定电流 $I=2.95$ A、额定电压 $U=24$ V、额定转速 $n=2670$ r/min、转动惯量 $J=1 \times 10^{-4}$ kg/m³、阻尼系数 $B=1 \times 10^{-3}$ kg/m³、电枢电感 $L=0.002$ H、额定转矩 $T_L=0.2189$ N·m 以及转矩系数 $K_t=0.0742$ 。根据电机的实际参数在 Simulink 中搭建直流电机控制系统的仿真模型。模型中脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 模块的载波信号周期 $T=1 \times 10^{-4}$ s, H 桥采用四个 4 个绝缘栅双极晶体管 (Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT) 搭建,利用工程方法计算电流调节器的参数 $k_p=1$ 、 $k_i=550$, 电流环和速度环的滤波时间常数为 $T_{fi}=5 \times 10^{-4}$ s、 $T_{fn}=1 \times 10^{-3}$ s。

4.2 仿真结果分析

双闭环直流调速系统的运行条件为:在 $t=0$ s 时,电机空载启动到 $n=2500$ r/min;在 $t=0.4$ s 时,在电机系统中加入 0.1 N·m 的负载;在 $t=0.6$ s 时,电机的转速降低至 $n=2000$ r/min,仿真时间为 1 s。用于比较的 PI 速度控制器参数为 $k_p=0.0088$ 、 $k_i=0.586$ 。

PI 速度控制器与模糊控制在线整定新趋近律参数速度控制器的速度响应对比曲线如图 11 所示,电流响应对比曲线如图 12 所示。

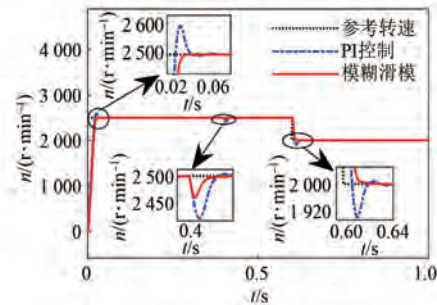


图 11 直流调速系统的速度响应曲线

Fig.11 Speed response curves of DC speed regulation system

由图 11 可知,双闭环直流调速系统采用模糊控制在线整定新趋近律参数的速度控制器时,可以实现零超调。在 0.4 s 突加负载,其转速波动比 PI 控制小,收敛速度也更快。故基于模糊控制在线整定新趋近律参数的速度控制器具有零超调、响应时间短以及抗干扰能力强等优点,而且在转速降低后,仍然可以实现零超调和短时间的响应。

由图 12 可知,相比于 PI 速度控制器,模糊控

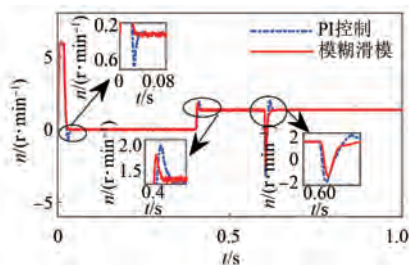


图 12 直流调速系统的电流响应曲线

Fig. 12 Current response curves of DC speed regulation system

制在线整定新趋近律参数的速度控制器能更快恢复稳定, 电流的波动更小, 响应速度也更快。

仿真结果表明, 在双闭环直流调速系统中, 相较于 PI 速度控制器, 模糊控制在线整定新趋近律参数的速度控制器在响应速度、系统稳定性和抗干扰能力方面更具优势。

5 结语

为了更好地抑制传统指数趋近律的抖振并提高趋近速度, 在新趋近律的指数项中引入了滑动模态的幂函数, 保证了系统在趋近滑模面时仍有较大的收敛速度; 等速趋近项中引入了系统的状态变量, 使系统在趋近滑模面时抖振幅值较小。仿真结果表明, 相比于传统指数趋近律, 新趋近律具有更小的抖振和更快的收敛速度。利用新趋近律设计了双闭环直流调速系统的速度控制器, 为了提高趋近律参数整定的效率, 提出了利用模糊控制在线整定滑模参数的方法。仿真结果表明, 相比于试凑法, 模糊控制法在线整定滑模参数的效率更高, 系统的控制性能也更优; 同时, 和 PI 速度控制器的对比分析表明, 基于模糊控制在线整定新趋近律参数的速度控制器可以有效的改善系统的调速性能, 为电机调速提供了一种可靠的优化算法。

参考文献

[1] 郭佳. 直流有刷电机驱动控制器设计[J]. 机电信息, 2023, 16: 58-61.
GUO J. Design of DC brush motor drive controller [J]. Mechanical and Electrical Information, 2023, 16: 58-61.

[2] 顾文斌, 杨生胜, 王贤良, 等. 基于模糊 RBF 神经网络的无刷直流电机 PID 控制[J]. 计算机技

术与发展, 2022, 32(8): 15-19.

GU W B, YANG S S, WANG X L, et al. PID control of brushless DC motor based on fuzzy RBF neural network [J]. Computer Technology and Development, 2022, 32(8): 15-19.

[3] 刘甫, 曾国辉, 黄渤, 等. 基于改进模糊控制的无刷直流电机控制系统[J]. 制造业自动化, 2021, 43(10): 64-67.

LIU F, ZENG G H, HUANG B, et al. Control system of BLDCM based on improved fuzzy controller [J]. Manufacturing Automation, 2021, 43(10): 64-67.

[4] 朱承平. 无刷直流电机滑模控制研究与应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.

ZHU C P. Research and application of sliding mode control on brushless DC motor [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020.

[5] MOZAYAN S M, SAAD M, VAHEDI H, et al. Sliding mode control of PMSG wind turbine based on enhanced exponential reaching law [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6148-6159.

[6] 张瑞祥, 包广清, 汪波, 等. 基于变趋近律滑模反电动势观测器的 BLDCM 无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(8): 1-6.

ZHANG R X, BAO G Q, WANG B, et al. BLDCM position sensorless control based on variable reaching law sliding mode back EMF observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(8): 1-6.

[7] 李瑞棋, 杨波, 贺建湘, 等. 基于变论域模糊 PI 的永磁同步电机无传感控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 29-34.

LI R Q, YANG B, HE J X, et al. Sensorless control of PMSM based on variable universe fuzzy PI [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(10): 29-34.

[8] 郑诗程, 刘志鹏, 赵卫, 等. 积分型非奇异终端滑模 PMSM 无传感器控制系统[J/OL]. 电机与控制学报, 2023-05-25. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.TM.20230523.2329.036.html>.

ZHENG S C, LIU Z P, ZHAO W, et al. Integral non-singular terminal sliding mode PMSM sensorless control system [J/OL]. Electric Machines and Control, 2023-05-25. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.TM.20230523.2329.036.html>.

- [9] 王浩, 白国振, 刘世交. 无刷直流电机 RBF 神经网络滑模控制器设计[J]. 软件导刊, 2021, 20(3): 176-181.
WANG H, BAI G Z, LIU S J. The design of RBF neural network sliding mode controller for brushless DC motor [J]. Software Guide, 2021, 20(3): 176-181.
- [10] 崔保春, 文迪, 马思远, 等. 基于新型趋近律的无刷直流电机滑模控制[J]. 电气传动, 2019, 49(4): 3-5.
CUI B C, WEN D, MA S Y, et al. Sliding mode control of brushless DC motor based on new reaching law [J]. Electric Driver, 2019, 49(4): 3-5.
- [11] ZHANG X G, ZHAO K, LI S. A PMSM sliding mode control system based on a novel reaching law [C] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing, 2011.
- [12] 孙明. 基于粒子群优化的滑模控制参数整定[J]. 机械工程与自动化, 2019, 1: 173-175.
SUN M. Sliding mode control parameters tuning based on particle swarm optimization [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019, 1: 173-175.
- [13] 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): 484-487.
HUANG J, ZHOU D. Sliding mode control parameter setting based on improved differential evolution algorithm [J]. Control Engineering of China, 2018, 25(3): 484-487.
- [14] 周兆敏. 用极点配置方法设计滑模控制器[J]. 信息与控制, 1988, 4: 47-49.
ZHOU Z M. Sliding mode controller is designed by pole assignment method [J]. Information and Control, 1988, 4: 47-49.
- [15] QI W H, ZONG G D, KARIMI H R. Sliding mode control for nonlinear stochastic singular semi-Markov jump systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(1): 361-368.
- [16] GUO Y K, WEI X, TAN L. Speed control of six-phase permanent magnet synchronous motor based on a brand new approach law integral sliding mode structure [C] // 2022 6th International Conference on Power and Energy Engineering, Shanghai, 2022.
- [17] 戴鹏, 徐楠, 谢后晴, 等. 永磁同步电机调速系统的快速幂次趋近律控制[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(11): 32-38.
DAI P, XU N, XIE H Q, et al. PMSM sliding mode control based on fast power reaching law [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(11): 32-38.
- [18] ZHANG H Q, MA J K, ZHAO M, et al. Improved sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor speed based on variable exponential reaching law [C] // 2021 13th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Wuhan, 2021.
- [19] 黄依婷, 沈建新, 王云冲, 等. 基于递推最小二乘法观测器的永磁同步伺服电机变参数滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6835-6846.
HUANG Y T, SHEN J X, WANG Y C, et al. Variable parameter sliding mode control of permanent magnet synchronous servo machine based on recursive least squares observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6835-6846.
- [20] DING S H, HOU Q K, WANG H. Disturbance-observer-based second-order sliding mode controller for speed control of PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(1): 100-110.

收稿日期:2023-11-12

收到修改稿日期:2024-02-27

作者简介:

周兆钟(1996-),男,硕士研究生,研究方向为机电控制,1050515729@qq.com;

* 通信作者:尹明德(1964-),男,博士,副教授,研究方向为机械理论及设计、机电控制,Zhouzz@nuaa.com。

Research on Speed Regulator Based on Fuzzy Control Online Tuning New Reaching Law

ZHOU Zhaozhong¹, YIN Mingde^{1*}, WANG Nanyue¹, XIAO Jie²,
WANG Licheng², YANG Ming²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Nanjing Shengjie International Manufacturing Co., Ltd., Nanjing, 211221, China)

Key words: fuzzy control; reaching law; sliding mode control; parameter tuning

With the continuous development of modern control theory, more and more intelligent control algorithms are applied to motor control. Advanced intelligent control methods are based on expert experience and related control theories to complete the corresponding control research, and have good adaptability in dealing with nonlinear, complex, multivariable and other problems. The application of advanced intelligent control methods in motor control system can make the motor speed regulation system obtain higher control accuracy, faster reaching speed and wider speed range.

In order to improve the working performance of DC speed regulation system and overcome the problem of chattering, a new reaching law is designed based on the traditional exponential reaching law. The new reaching law introduces the sliding mode of the system into the exponential term; the power function of the state variable of the system is introduced in the constant velocity reaching term, which makes the system state have faster convergence speed and lower chattering amplitude when the system state is close to the sliding mode surface. The simulation model is established in Simulink, the traditional exponential reaching law, the improved power reaching law, and the new reaching law are simulated and compared. The simulation results show that the new reaching law has smaller chattering and faster convergence speed.

Aiming at the difficulty of parameter tuning of traditional exponential reaching law, in the double

closed-loop DC speed regulation system, the speed controller of fuzzy control online tuning new reaching law parameters is designed. The sliding surface of the fuzzy controller is shown in Fig.1 and Fig.2.

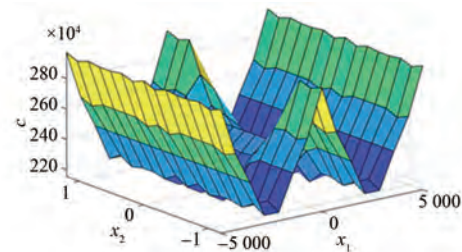


Fig. 1 Fuzzy tuning surface of parameter c

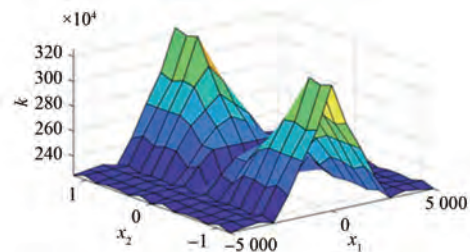


Fig. 2 Fuzzy tuning surface of parameter k

Finally, the simulation model of the double closed-loop DC speed regulation system is established in Simulink, and the operating conditions of sudden load and speed regulation are set. The simulation compares the fuzzy control online tuning speed controller with the PI speed controller, and the results show that the designed new speed controller has zero overshoot and faster convergence speed, and has stronger anti-interference.