

直流调速系统中常规 PI 与模糊 PI 控制器的比较^①

陈忠华, 康立乾, 王洋

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

摘要: 转速电流双闭环直流调速系统中的 PI 控制器直接影响其调速性能, 利用 MATLAB 分别建立了由常规 PI 与模糊 PI 控制器组成的转速电流双闭环控制直流调速系统的仿真模型, 并进行了仿真。仿真结果表明, 模糊 PI 控制器与常规 PI 控制器相比具有更好的动态稳定性和跟踪性能, 对外界干扰具有较强的鲁棒性。

关键词: 常规 PI 控制器; 模糊 PI 控制器; 双闭环; 直流调速; 仿真

Comparison Between Conventional PI Controller and Fuzzy PI Controller in the DC Drive System

CHEN Zhong-Hua, KANG Li-Qian, WANG Yang

(Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: The PI controller directly affects the speed regulating performance of the speed DC drive current double closed-loop system, the paper makes use of MATLAB to built two speed DC drive current double closed-loop control system simulation models respectively, one of them consists of conventional PI controller and the other one consists of fuzzy PI controller, and the line of the simulation. Simulation results show that the fuzzy PI controller is superior to the conventional PI controller in dynamic stability performance and speed tracking power, and the fuzzy PI controller has strong robustness to external disturbance.

Key words: conventional PI controller; fuzzy PI controller; double closed-loop; DC speed regulating; simulation

1 引言

在现代工业中, 电动机作为机电能量转换装置, 在机械、冶金、石油化工、国防等工业部门中都得到了广泛应用。随着对生产工艺、产品质量的要求不断提高及产量的增长, 越来越多的生产机械要求能实现自动调速。在可调速传动系统中, 按照电动机的类型来分, 可分为两大类: 直流调速系统和交流调速系统。交流电动机具有结构简单、价格低廉、维修简便、转动惯量小等优点, 但其主要缺点是调速较为困难。直流电动机与交流电动机相比, 虽然存在结构复杂、价格较高、维修麻烦等缺点, 但具有调速范围广、静差率小、稳定性好、过载能力大、能承受频繁的冲击负载、可实现频繁的无级快速起制动和反转等良好的动态性能, 所以直流调速系统在调速性能要求较高的场

合得到了广泛应用^[1-2]。

模糊控制相对传统控制思想而言是一种全新的控制思路, 具有不依靠精确数学模型、善于处理模糊性和不确定性问题的特点。模糊控制以模糊集合理论、模糊语言变量及模糊推理为基础, 使用机器语言模拟人的思维方式对系统进行控制。但模糊子集的划分、模糊推理规则的确定往往需要依靠人类专家的经验, 而且需要使用试凑的办法不断调整才能达到较为良好的效果。另一方面, 由于系统的结构较复杂, 调节器可调参数较多, 所以整个系统的设计和校正比较困难, 需要有一个功能全面、分析方便的仿真设计平台^[3-4]。Matlab 是一种高性能的技术计算语言, 具有强大的科学数据可视化能力, 其中 Simulink 具有模块组态简单、性能分析直观的优点, 方便了系统的动态模型分析, 为

^① 收稿时间:2011-11-28;收到修改稿时间:2012-01-13

分析系统的动态模型带来很大的方便^[5]。因此,本文主要对由常规 PI 控制器和模糊 PI 控制器构成的转速电流双闭环直流调速系统应用 MATLAB 的可视化仿真工具 Simulink 进行建模,并对仿真结果进行了讨论和对比分析。

2 基本原理

对直流电机进行调速,可采取多种途径。当电枢回路中串入外加调节电阻 R_j 时,可得转速公式为:

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_j)}{C_e \Phi} \quad (1)$$

式中 U —电枢电压; Φ —每极磁通; C_e —电势常数; R_a —电枢绕组电阻; I_a —电枢电流。

从上式可见,为了达到调速的目的,可采取下列三种方法:1) 改变励磁电流来改变磁通 Φ 调速;2) 改变电枢电压 U 调速;3) 改变串入电枢回路中的电阻 R_j 调速。

综合比较上述三种调速方法的优缺点,其中改变电枢电压 U 调速的方法具有无论满载、轻载或者空载,都有明显的调速效果;降压调速机械特性曲线硬度不变,与固有机特性曲线硬度相同;电机在低速运行时,负载扰动所引起的转速波动不是很大,稳定性也比较好,调速范围也比较广,可以通过平滑地改变电枢两端电压来实现无级调速;在调速过程中能量损耗比较小,调速效率高等优点,使其在对启、制动和调速性能要求较高的场合得到了广泛应用^[6,7]。

三相桥式全控整流电路带电阻负载时,触发角 α 移相范围是 $0^\circ \sim 120^\circ$,带阻感负载时,触发角 α 移相范围是 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。当整流输出电压连续时(即带阻感负载时,或电阻负载且 $\alpha \leq 60^\circ$ 时)的整流电压平均值为^[8]

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{2} \times \sqrt{3} U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\ &= 2.34 U_2 \cos \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

带电阻负载且 $\alpha > 60^\circ$ 时,整流电压平均值为

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \sqrt{6} U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\ &= 2.34 U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)] \end{aligned} \quad (3)$$

因此,本次仿真中直流电动机电枢采取由晶闸管

整流电路经平波电抗器供电的方式,通过改变触发器移相控制信号 U_c 来调节晶闸管的触发角 α ,从而获得可调的直流电压,以实现直流电动机的调速。

转速电流双闭环控制直流调速系统是最典型的直流调速系统,其原理结构如图 1 所示。双闭环控制直流调速系统的特点是,电动机的转速和电流分别由两个独立的调节器分别控制,且转速调节器的输出就是电流调节器的给定,因此电流环能够随转速的偏差变化来调节电动机电枢电流。当转速低于给定转速时,转速调节器的积分作用使输出增加,即电流给定上升,并通过电流环调节使电动机电流增加,从而使电动机获得加速转矩,电动机转速上升。当实际转速高于给定转速时,转速调节器的输出减小,即电流给定减小,并通过电流环调节使电动机电流下降,电动机将因为电磁转矩减小而减速。当在转速调节器饱和和输出达到限幅值时,电流环即以最大电流限制实现电动机的加速,使电动机的起动时间最短,在可逆调速系统中实现电动机的快速制动。由于晶闸管整流器不能通过反向电流,因此不能产生反向制动转矩而使电动机快速制动^[9]。

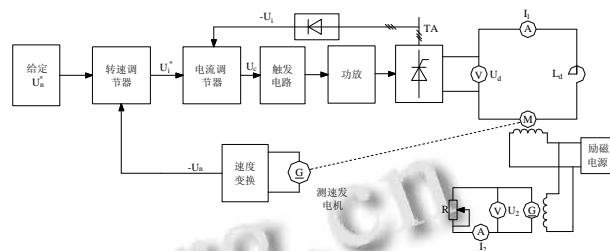


图 1 转速电流双闭环直流调速系统原理图

3 仿真电机参数及转速电流双闭环控制的调速系统指标

3.1 仿真电机参数

仿真电机的各项参数如下:额定电压 $U=225V$,额定电流 $I=135A$ 。额定转速 $n=1500r/min$,额定转矩 $T=171N \cdot m$,反电动势系数为 $K_e=0.42V/(rad \cdot s^{-1})$,相电阻 $R=146.91 \Omega$,相电感 $L_s-M=0.84021H$,转动惯量 $J=0.57Kg \cdot m^2$ 。

3.2 调速系统指标

电流超调量 $\sigma_i \leq 5\%$,空载起动到额定转速时的转速超调量 $\sigma_n \leq 10\%$ 。过载倍数 $\lambda=1.5$,取电流反馈滤波时间常数 $T_{oi}=0.002s$,转速反馈滤波时间常数 $T_{on}=0.01s$ 。取转速调节器和电流调节器的饱和值为 $12V$,输出限幅值为 $10V$,额定转速时转速给定

$$U_n^* = 10V。$$

4 常规PI控制器参数计算

4.1 转速调节器参数计算

转速反馈系数:

$$\alpha = \frac{U_{nom}^*}{n_{nom}} = 0.00667V \cdot \text{min}/r \quad (4)$$

为加快转速的调节速度，转速环按典型环系统设计，并选中频段宽度 $h=5$ ，转速调节器的传递函数为:

$$\begin{aligned} W_{ASR}(S) &= K_{pn} + \frac{1}{K_{in}S} \\ &= K_n \frac{1 + \tau_n S}{\tau_n S} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

$$\tau_n = hT_{\Sigma n} = h(2T_{\Sigma i} + T_{on}) = 0.087s$$

$$K_n = \frac{(h+1)\beta C_e T_m}{2h\alpha R T_{\Sigma n}} = 10.49$$

$$K_{in} = \frac{\tau_n}{K_n} = \frac{0.087}{10.48} = 0.0083$$

4.2 电流调节器参数计算

电流反馈系数:

$$\beta = \frac{U_{im}^*}{\lambda I_{nom}} = 0.05 \quad (6)$$

电机转矩时间常数:

$$T_m = \frac{GD^2 R_{\Sigma}}{375 C_e C_m} = 0.161s \quad (7)$$

电机电磁时间常数:

$$T_1 = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}} = 0.076s \quad (8)$$

三相晶闸管整流电路平均失控时间:

$$T_s = 0.0017s$$

电流环的小时间常数为:

$$T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi} = 0.0037s \quad (9)$$

根据电流超调量 $\sigma_i \leq 5\%$ 的要求，电流环按典型环系统设计，电流调节器选用 PI 调节器，其传递函数为

$$\begin{aligned} W_{ACR}(S) &= K_{pi} + \frac{1}{K_{ii}S} \\ &= K_i \frac{1 + \tau_i S}{\tau_i S} \end{aligned} \quad (10)$$

其中:

$$\tau_i = T_1 = 0.076s$$

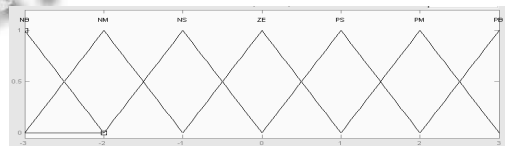
$$K_i = \frac{\tau_i R_{\Sigma}}{2T_{\Sigma i} \beta K_s} = 2.84$$

$$K_{ii} = \frac{\tau_i}{K_i} = 0.0268$$

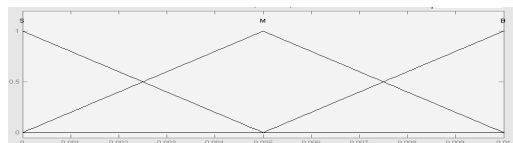
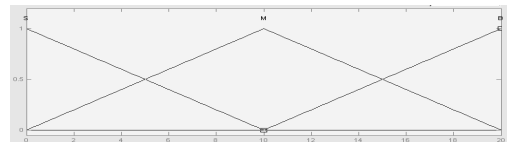
调节器的积分环节的限幅值为 ± 12 ，调节器输出限幅为 ± 10 。

5 模糊PI控制器参数

在模糊 PI 控制系统中，选取转速偏差 e 和偏差变化率 ec 为输入语言变量， K_p 、 K_i 为输出语言变量，具体隶属度函数如图 2 所示。根据参数 K_p 、 K_i 对系统输出特性的影响情况，制定 K_p 、 K_i 的调整原则如下：当偏差 e 较大时，为了提高系统的响应速度，防止过大超调，应取较大的 K_p ，适中的 K_i ；当偏差 e 为中等大小时，为了使超调量减少，应取较小的 K_p ， K_i 的大小应适中，以保持较快的响应速度；当偏差 e 较小时，为了保证良好的稳定性，应增大 K_p 、 K_i [10]。制定如表 1 所示的参数模糊控制规则表，并利用 Min-Max 方法进行模糊推理和解模糊。



(a) 输入 e 和 ec 隶属度函数



(b) 输出 K_p 和 K_i 隶属度函数

图 2 输入 e 和 ec ，输出 K_p 和 K_i 隶属度函数

表 1 模糊控制规则表

K_p, k_i		E							
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
ec	NB	S,S	S,S	S,S	S,S	S,S	S,S	S,S	
	NM	S,S	S,S	S,S	S,S	S,M	M,S	B,S	
	NS	S,S	S,S	S,S	S,M	S,M	M,M	B,S	
	ZE	S,S	S,S	S,S	S,B	M,B	S,M	B,S	
	PS	S,S	S,S	S,S	S,S	B,M	S,M	B,S	
	PM	S,S	S,S	S,S	S,S	B,S	M,M	B,S	
	PB	S,S	S,S	S,M	S,S	B,S	M,S	B,S	

6 PI控制器仿真模型及仿真结果

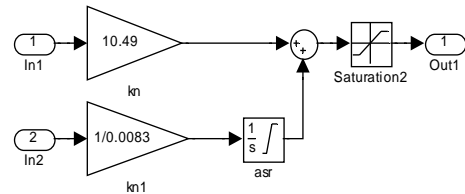


图 3 常规 PI 控制器转速环

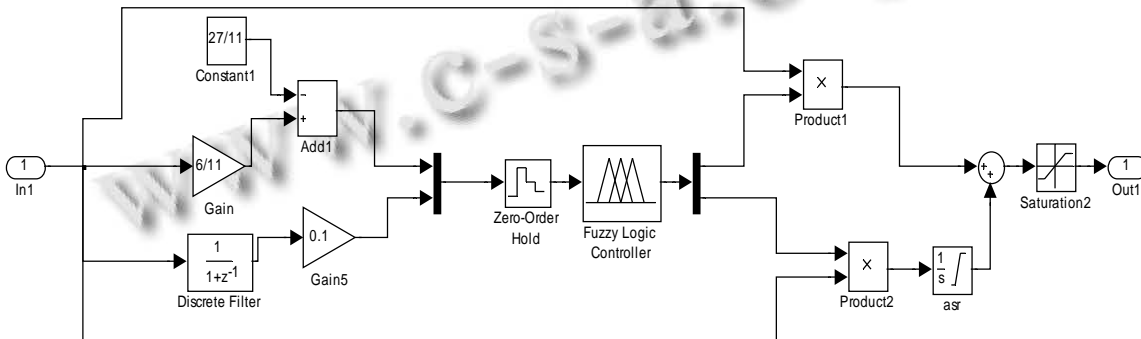


图 4 模糊 PI 控制器转速环

由图 5、6、7 可知，常规 PI 控制器双闭环直流调速系统在起动阶段，电动机以恒流起动，在 0.4s 时起动过程结束，电枢电流下降到零，转速上升到最高且大于 1500r/min，尽管转速已经超调，电流给定变“-”，但是本系统为不可逆调速系统，晶闸管整流装置不能产生反向电流，这时电枢电流为零，电动机电磁转矩也为零，没有反向制动转矩，又因为是在理想空载起动状态，所以电动机保持在最高转速状态。为了检测系统的抗干扰能力，在 $t=0.6s$ 时加入 $171N\cdot m$ 的负载扰动，电动机转速下降，转速调节器开始退饱和，电流环发挥调节作用，使电动机稳定在给定转速上。而由图 8 可知，模糊 PI 控制器双闭环直流调速系统在 0.4s 时起动过程结束，并达到给定转速。对比图 7、8 可知，当 $171N\cdot m$ 的阶跃扰动力加入到系统后，常规 PI 控制器转速响应出现 20% 的转速波动，并需要 0.7s 才恢复到稳定状态，而模糊 PI 控制的转速响应波动及恢复到稳定状态所需的时间分别为 3.3% 及 0.16s。因此，与常规 PI 控制相比，模糊 PI 控制具有无超调量，抗扰

动力强，响应快的优点，有效的解决了直流电动机在理想空载起动状态下，转速已经超调时，由于晶闸管整流装置不能产生反向电流而不能使转速下降到给定转速的问题。

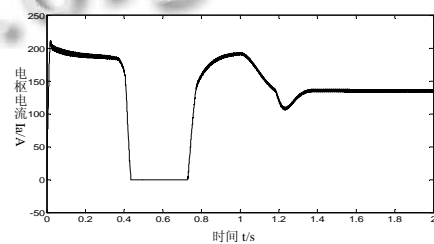


图 5 常规 PI 控制器双闭环直流调速系统电枢电流波形

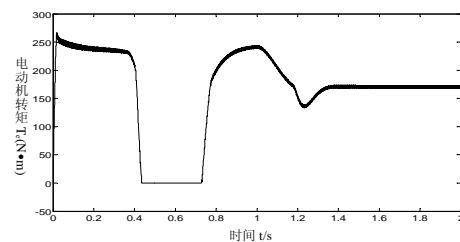


图 6 常规 PI 控制器双闭环直流调速系统电动机转矩波形

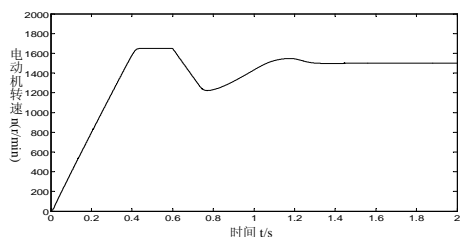


图7 常规PI控制器双闭环直流调速系统电动机转速波形

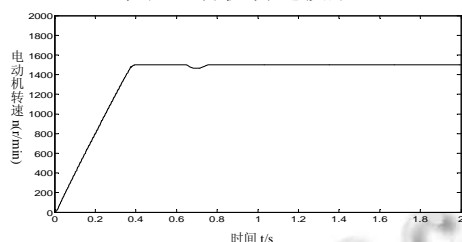


图8 模糊PI控制器双闭环直流调速系统电动机转速波形

7 结论

鲁棒性是一个系统极为重要的性能指标，是系统得以正常工作的前提。直流电机调速系统是一个多变量、强耦合、非线性、时变的复杂系统，用常规的PI控制难以满足动态响应和高性能、高精度的要求。而模糊PI控制策略与常规PI控制策略相比明显具有鲁棒性强、跟踪性能好、响应灵敏、波动小的优点，因此

模糊PI控制策略在双闭环直流调速方面应具有更好的应用前景。

参考文献

- 1 杨祖元,杨华芬.双闭环直流调速系统模糊PID控制研究.计算机应用研究,2011,28(3):921-923.
- 2 赵梅花,吴锐,付军.晶闸管直流调速系统的应用.机电产品开发与创新,2007,20(5):158-164.
- 3 刘洋,范立南.基于MATLAB的直流调速系统仿真研究.沈阳大学学报,2010,22(5):11-14.
- 4 李欣.基于免疫遗传算法的永磁无刷直流电机模糊控制.天津:天津大学,2007:53-53.
- 5 王祖亮,侯北平.基于Simulink的双闭环调速系统仿真研究.浙江科技学院学报,2009,21(1):6-9.
- 6 许晓峰.电机及拖动.第2版.北京:高等教育出版社,2004.64-65.
- 7 邹月海.基于模糊控制的永磁无刷直流电机调速系统研究.哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009.14-15.
- 8 王兆安,黄俊.电力电子技术.第4版.北京:机械工业出版社,2002.54-59.
- 9 洪乃刚.电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真.北京:机械工业出版社,2006.162-169.
- 10 陆华才,徐月同,杨伟民,陈子辰.永磁直线同步电机进给系统模糊PID控制.电工技术学报,2007,22(4):59-63.

(上接第79页)

运行机理的基础上，提出了一种基于Bloch坐标编码的量子粒子群优化算法。实验结果揭示出基于Bloch球面建立搜索机制，可有效扩展解空间的搜索范围，增强解空间的遍历性。

参考文献

- 1 Kennedy J, Eberhart RC. Particle swarms optimization. Proc. of IEEE international conference on Neural Networks. USA: IEEE Press,1995:1942-1948.
- 2 郭文忠,陈国龙.求解VLSI电路划分问题的混合粒子群优化算法.软件学报,2011,22(5):833-842.
- 3 Lin SW, Ying KC, Chen SC, et al. Particle swarm optimization for parameter determination and feature selection of support vector machines. Expert Systems with Applications, 2008,35(4):1817-1824.

- 4 Cai XJ, Cui ZH, Zeng JC, et al. Dispersed particle swarm optimization. Information Processing Letters,2008,105(6):231-235.
- 5 Liu Y, Qin Z, Shi ZW, et al. Center particle swarm optimization. Neurocomputing,2007,70(4-6):672-679.
- 6 张英杰,邵岁锋.一种基于云模型的云变异粒子群算法.模式识别与人工智能,2011,24(1):90-96.
- 7 朱海梅,吴永萍.一种高速收敛粒子群优化算法.控制与决策,2010,25(1):20-24.
- 8 方伟,孙俊,谢振平,须文波.量子粒子群优化算法的收敛性分析及控制参数研究.物理学报,2010,59(6):3686-3694.
- 9 李士勇,李盼池.求解连续空间优化问题的量子粒子群算法.量子电子学报,2007,24(5):569-574.