

直流电机速度控制比较

甘家梁,李志敏,徐翠琴,谈怀江

(湖北工程学院计算机与信息科学学院,湖北 孝感 432100)

摘 要:用比例积分微分(PID)控制器和模糊逻辑控制器(FLC)对他励直流电机的速度控制进行了对比研究,并对他励直流电机的串级启动进行了数字化实验.结果表明,PID 控制器的原理和结构简单,其控制系统的设计是建立在控制对象精确的数学模型基础上,是线性控制,对于那些电机控制要求超调量小的,电压调节范围不宽的,应当优先考虑 PID 控制;FLC 控制器是基于软件的规则和硬件的组合,是建立在专家知识库和人工操作经验的基础上,不需要对控制对象建立精确的数学模型,在鲁棒性要求高、响应时间快、稳定时间要求短的场合,FLC 具有明显的优势,具有更好的设计参数,组成的控制系统更容易满足非线性控制系统要求.

关键词:模糊逻辑控制;比例积分微分控制;数学模型;仿真

中图分类号:TM3

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2013.05.016

0 引 言

直流电动机是将直流电能转换成机械能的旋转设备,它具有很好的硬机械特性、优良的调速性能、较大的起动转矩和优异的动态特性等特点,所需控制设备简单高效,是目前大多数调速控制电动机的最优选择.他励电动机是直流电动机的一种,其励磁绕组和电枢绕组可以分别由两个独立的电源供电,具有调速范围很宽和环保、高效的特点,在工业生产中得到广泛应用,如:机械加工、起重机械、卷扬机等机械设备.根据其特点,可以通过控制电枢回路和励磁回路的参数,十分方便地控制他励直流电动机的启动转矩和运行转速,同时使励磁电流较小,实现电能效率最大化^[1-2].

比例积分微分(Proportion Integration Differentiation,以下简称:PID)控制器,根据系统的误差,通过调整比例、积分、微分计算出控制参数来获得良好控制效果,但参数整定值只限于局部性的优化值,全局控制效果不是很理想.目前,模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Control,以下简称:FLC)系统已经成功地应用在交直流调速控制系统中,而且在电力拖动领域中的应用也非常广泛.FLC 作为一种智能控制方法,其最大优点是不依赖于被控对象的精确数学模型,能够克服非线性因素的影响,对调节对象的参数变化具有较强的鲁棒性,而且控制性能优越^[1-4].

笔者利用 Matlab 仿真软件,分别将 PID 控制与 FLC 系统应用于他励直流电动机系统的控制中,并作了仿真比较研究.

1 他励直流电动机的数学模型和控制器

他励直流电动机由电枢和励磁线圈组成,它的主磁极由单独设置的励磁线圈产生,其励磁电流由另设的直流电源供电.采用电枢/励磁控制的他励直流电动机的动态等效电路如图 1 所示.

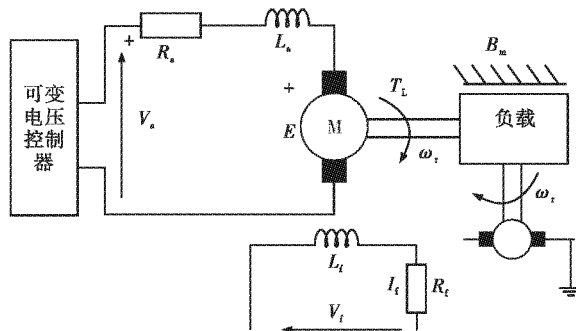


图 1 他励直流电动机等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit representation for a separately-excited direct current motor

由图 1 可知:电动机的励磁磁通 Φ 由励磁线圈电流决定,如果电机互感磁通工作在磁化线性特性上,那么定子磁通与定子电流呈线性关系,即 $\Phi = F(i_f)$. 在饱和区, Φ 为常数,电机工作在恒定的励磁状态;如果磁场不饱和(正常运转时要限制

最大励磁电压,使磁场处于不饱和状态,使励磁电流的最大值对应于电磁转矩常数 $C_m \Phi$ 的最大值), 则 $\Phi = L_f i_f$ [3,5-6]。他励电动机在稳态运行时,互感的值很小,可以忽略不计,两极间补偿绕组电枢反应的影响最小化。

感应电动势 E_{back} 和电压 V_a 之间的差异通常只有百分之几,电磁转矩除了克服负载转矩 T_L 、摩擦转矩 T_f ,还使系统产生角加速度 $\frac{d\omega}{dt}$ 。那么,描述电动机动态特性的数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a}(u_a + R_a I_a - E_{\text{back}}) \\ \frac{d\Phi}{dt} = u_f - R_f I_f \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_L - B_m \omega - T_f) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: ω 为直流电动机旋转的瞬时角速度; $E_{\text{back}} = K_E \cdot \Phi \cdot \omega$,为电动机的反抗电动势; $T_e(t) = C_m \cdot \Phi \cdot i_a$ 为电磁转矩方程; T_L 为负载转矩; J 为电动机转动惯量; B_m 为粘性摩擦系数; C_m 为电动机转矩常数; T_f 为摩擦转矩。

他励直流电动机常用的控制方法是根据所需负载变化来设定轴上速度保持相对恒定,这种方法被称为电枢电压控制。使用这种方法时,他励直流电动机的速度在额定值的情况下可以通过保持励磁电压 V_f 恒定而改变其电枢端电压 V_a 来控制。当电枢电压升高时,电枢电流随之增大,电机转矩增加,从而增加电机的速度。电枢电阻的下降往往要小,因此,在额定电压范围之内,电机的转速上升与电枢电压的变化成正比,电机的速度是额定转速时对应的是电机额定电枢电压和额定励磁电压。电机转矩的大小取决于电枢电流和励磁电流。如果电机连续运行,最大电枢电流不应该高于其额定的值。当电枢电流和励磁电压在其额定的值时,电机产生的是额定转矩。当电机的速度在额定转速之内运行时,可以提供超过额定转矩的最大转矩的情况下持续长时间的运行。

他励直流电动机的速度控制可以使用内外双环控制回路。控制原理图如图2所示,图中 DCCT 为直流电流互感器。

双环直流调速系统包含两个控制环。一个是电流控制内环,其作用是使电流随给定参考值的变化而变化,保证他励直流电动机的最大起动转矩,并抑制电压扰动造成的转矩波动。另外一个速度外环,其作用是保证输出转速跟随输入命令变化,并抑制负载的扰动[7]。

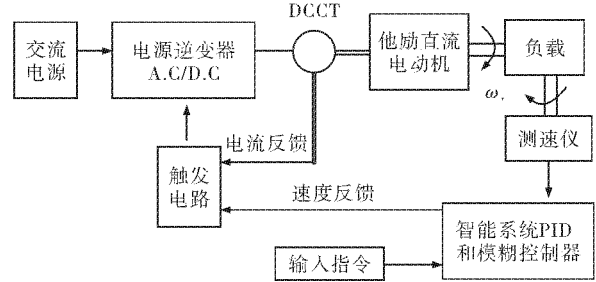


图2 双环控制他励直流电动机变频调速控制图

Fig. 2 Variable speed control for separately excited direct current motor using servo system

他励直流电动机主要适用于两种类型的负载:那些需要速度变化的恒转矩负载和其电源要求额定转速以上的速度不断变化的负载。图3和图4分别表示的是他励直流电动机的功率对应速度及转矩对应速度的特性曲线,也表示的是变频器可控硅触发角与转矩变化的关系图。如果是全波整流器,其触发角调节范围可以超过 90° ,电源供电可以由正向电源供电变换为反向电源供电,电机旋转方向也变了。这两个特性曲线图可以确定电机的速度控制的方法。电枢电压控制用于需要速度变化到满负荷的恒转矩负载,而励磁电流控制(也称弱磁控制)常用于速度变化要求超过满负荷转速以上的恒功率的负载。两种速度控制方法是在不超过额定负荷的条件下,满足提供机械负荷的要求。

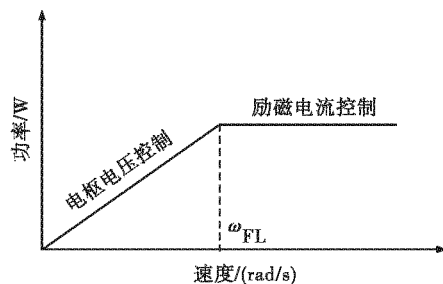


图3 他励直流电动机功率与速度特性曲线

Fig. 3 Power-speed characteristics of the direct current motor

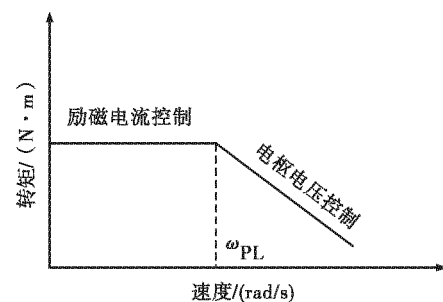


图4 他励直流电动机转矩与速度特性曲线

Fig. 4 Torque-speed characteristics of the direct current motor

可以用 PID 控制器和 FLC 控制器通过控制电枢电压来控制直流电动机速度。

1.1 PID 控制器

PID 控制器在工业控制器中得到广泛的应用,它可以针对特定的控制系统进行优化设计。PID 控制器可用于大多数控制回路的电气驱动,可以在模拟和数字两种形式下工作。PID 控制的系统原理框图如图 5 所示。

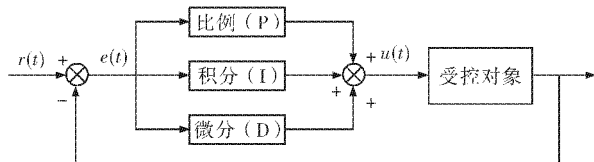


图 5 PID 控制系统原理框图

Fig. 5 Proportional, integral plus differential arrangement

PID 控制器的输入输出方程为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,PID 控制器的输出由三项构成:比例控制、积分控制和微分控制。比例控制调节作用及时,能迅速反映偏差,从而减少偏差。但是比例控制不能完全消除无积分器的对象的稳态误差,当 K_p 调得太大时,可能引起系统不稳定。积分控制的作用是,只要系统存在误差,积分控制作用就不断地积累,积分项对应的控制量会不断增大,以消除偏差。因而,只要有足够的时间,积分控制将能完全消除偏差。积分控制是靠对偏差的积累进行控制的,其控制作用缓慢,如果积分作用太强会使系统超调加大,甚至使系统出现振荡。微分控制具有预测误差变化趋势的作用,可以减少超调量,克服振荡,使系统的稳定性得到提高,同时可以加快系统的动态响应速度,减少调整时间,从而改善系统的动态性能。

1.2 模糊逻辑控制器

作为一种人工智能手段,模糊逻辑控制是基于模仿专家经验或专家知识库,按一定的模糊逻辑控制规则将语言控制策略自动进行推理运算,转换成自动逻辑控制策略,从而获得问题的求解,在处理不确定性和不精确性问题时具有良好的鲁棒性。模糊逻辑控制系统控制他励直流电机的结构图如图 6 所示。

一个基本模糊逻辑控制器结构包括以下三个方面:

a. 模糊化:把精确量(如偏差 e 和偏差变化 ec)向相应的模糊量(E 、 EC)转化;

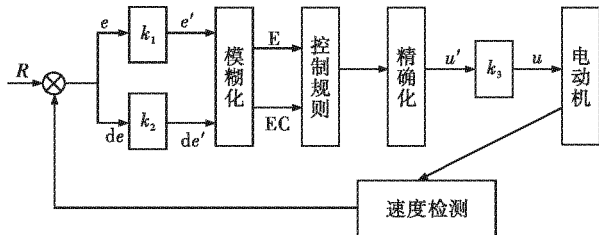


图 6 模糊逻辑控制系统控制直流电机速度结构图

Fig. 6 Speed control of direct current by fuzzy logic algorithm

b. 模糊控制算法的设计:通过一组模糊条件语句构成模糊控制规则,并推导出模糊控制规则决定的模糊关系;

c. 模糊判决:把推理结果(U)从模糊量转化为用于可以实际控制的精确量(u)。

根据上面所述的基本功能,就可以构建一个基本的直流电机模糊控制器。

首先,设置模糊逻辑控制器的电机角速度的输入变量的偏差 $e(t)$ 和偏差变化的 $de(t)$ 。控制电压 $u(t)$ 是模糊逻辑控制器的输出变量^[4,6]。

在模糊控制电机调速系统中,采用负大(NB)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正大(PB) 5 个模糊状态描述转速偏差 $e(t)$ 和转速偏差率 $de(t)$,则语言的变量被定义为 $\{NB, NS, Z, PS, PB\}$ 。模糊逻辑控制器的隶属函数如公式(3)所示。模糊规则总结如表 1 所示。模糊推理机的类型是 Mamdani 型。在这项研究中的模糊推理机制如下:

$$\mu_B(u(t)) = \max[\mu_{A_j}(e(t)), \mu_{A_j}(de(t)), \mu_{B_j}(u(t))] \quad (3)$$

式(3)中, $\mu_{A_j}(e(t))$ 为 $e(t)$ 的隶属度函数, $\mu_{A_j}(de(t))$ 是 $de(t)$ 的隶属度函数, $\mu_{B_j}(u(t))$ 是 $u(t)$ 的隶属度函数, j 是模糊控制集的每一个隶属函数的索引, m 是许多规则和推断结果^[8]。模糊输出 $u(t)$ 可以通过以下公式来计算

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{B_i}(u(t)) g u_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{B_i}(u(t))} \quad (4)$$

通过该公式推断后输出逻辑控制规则。

表 1 基于模糊逻辑控制的 IF-THEN 规则

Table 1 IF-THEN rule based of FLC

$u(t)$	$e(t)$				
	NB	NS	ZO	PS	PB
$de(t)$	NB	NB	NS	NS	ZO
	NS	NB	NS	NS	ZO
	ZO	NS	NS	ZO	PS
	PS	NS	ZO	PS	PS
	PB	ZO	PS	PS	PB

2 案例分析及仿真结果

2.1 他励直流电机的启动研究

在研究直流电机调速的实际应用中,从启动到稳定速度运转是一个重要的环节.直流电动机在直接启动时,启动电流很大,可以达到额定电流的 10~20 倍.巨大的启动电流对电动机及其辅助设备极易造成破坏,且会对电网造成很大的冲击.为降低启动电流,可以采取降低电枢电压、电枢绕组串电阻分级启动等启动方式,其中后者因所用设备简单,投资小而被广泛应用.

本研究中用的转换器晶闸管和他励直流电机的规格及参数分别列于表 2 和表 3.

表 2 转换器晶闸管的规格

Table 2 Specifications of thyristor converter

设备属性名	设备属性值
桥臂数/个	3
缓冲电阻/ Ω	500
缓冲电容/ μF	0.1
功率管类型	Thyristor
开头电阻/ Ω	1×10^{-3}
晶闸管电流/A	55
晶闸管反向峰值电压/V	320

为了研究的顺利开展,专门设计了直流电机启动器,为了限制启动时大浪涌电流和电枢上产生大的感应电感,采用七级分级启动电阻进行启动,然后通过电路变换逐级把串接的七个启动电阻断开,电路图如图 7 所示.只要分段电阻设置合理,便能把启动电流限制在允许的范围内,并具有足够的启动转矩,能在较短时间内完成启动到平稳运行的过程.串接在电路中的电阻是临时的,因

表 3 他励直流电动机的规格和参数

Table 3 Specifications and parameters of direct current motor

设备属性名	设备属性值
电动机规格	30 h · p, 240 V, 2 600 r/min, 300 V field, 82 N · m
电枢电阻/ Ω	0.985
电枢电感/H	0.012 44
励磁电阻/ Ω	102.3
励磁电感/H	20.82
磁场互感/H	0.835 5
总惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.123 9
粘性摩擦系数/ $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	0.025 219
库仑摩擦转矩/ $(\text{N} \cdot \text{m})$	3.164
初始旋转速度/ (rad/s)	0

为电阻的串入会导致过多的能量损失,会影响电机转矩转速特性,导致带负载能力的下降.随着电机容量的增加启动的步骤也要增加.实验中用 20, 40 和 60 N · m 来模拟负载转矩,用一个单结晶体管、一个 741 集成电路芯片和其它元件组成一个定时器开关电路,其输出信号作为 D 触发器的时钟触发信号,输出电平为(高与低)同步脉冲正沿触发信号,周期为 5.72 ms.通过多端口开关设置循环采样时间为 50 s,那么每一级的启动延迟时间如表 4 所示.电路中的大功率晶闸管必须承受 243.038 A 启动电流和 240 V 峰值反向电压,把多个晶闸管进行并联来满足超大功率电机的需要.分级启动电阻可以从以下几何级数计算.

$$\frac{R_{\text{Starting}}}{R_{\text{Amature}}} = (\frac{I_{\text{Starting}}}{I_{\text{Operating}}})^{n-1} = K^{n-1} \tag{5}$$

表 4 电枢串电阻启动及延迟时间

Table 4 Starting resistance and time for each step

步骤	步骤 1	步骤 2	步骤 3	步骤 4	步骤 5	步骤 6	步骤 7
启动电阻/ Ω	1.98	0.929	0.436	0.205	0.096	0.045	0.021
运行时间/s	2.859	8.579	14.295	20.013	25.731	31.449	37.167

2.2 PID 控制器和 FLC 控制器的仿真系统框图

为了达到高精度的速度控制,得到较好的动静态性能,在控制系统中需要引入电流调节器和速度调节器,组成电流和速度两个负反馈控制环,其中电流反馈环为内环,速度反馈环为外环,电流内环的反应要比速度外环的反应快得多.

逆变器广泛用于电机的速度调节,调节电枢

电压输出的大小和降低励磁电压均可实现电机速度调节.这两种调节方式均采用对逆变器电源的晶闸管的导通角来实现无极调整,电压调速范围大,对电机的机械特性硬度影响不大,稳定性好.晶闸管的导通角信号给定由双环控制系统输出.因此,只要控制电流环和速度环均可实现.速度环根据给定速度与检测到的实际速度差值,经过速

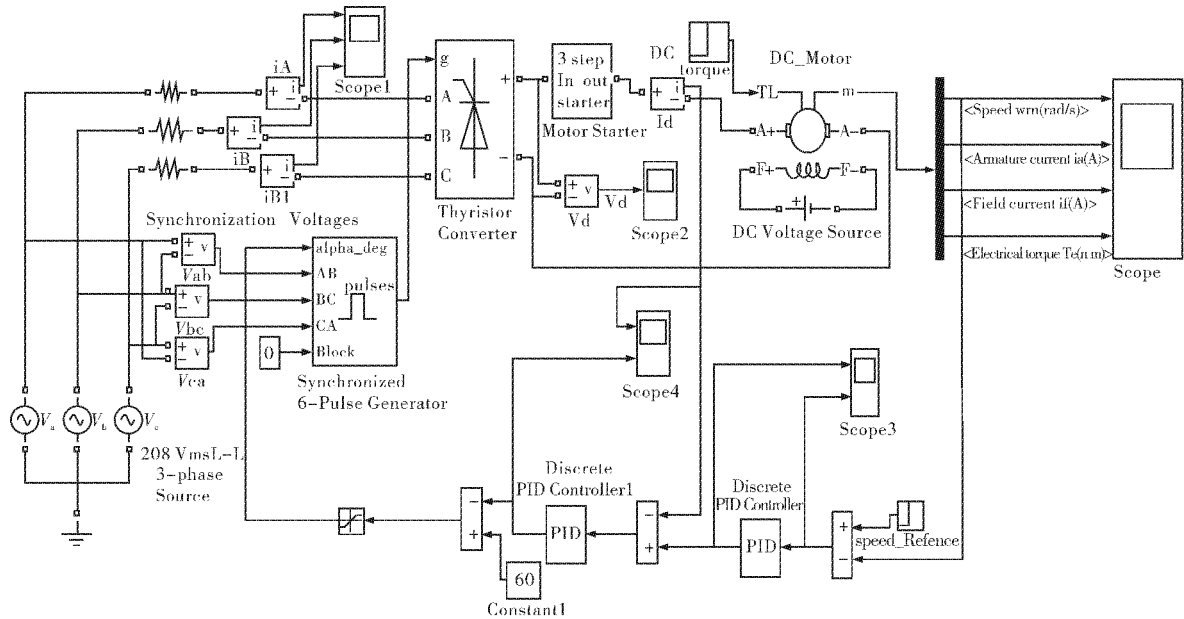


图8 用PID控制器的直流电机调速控制 MATLAB 仿真

Fig. 8 MATLAB simulation for speed control of direct current motor using PID controller

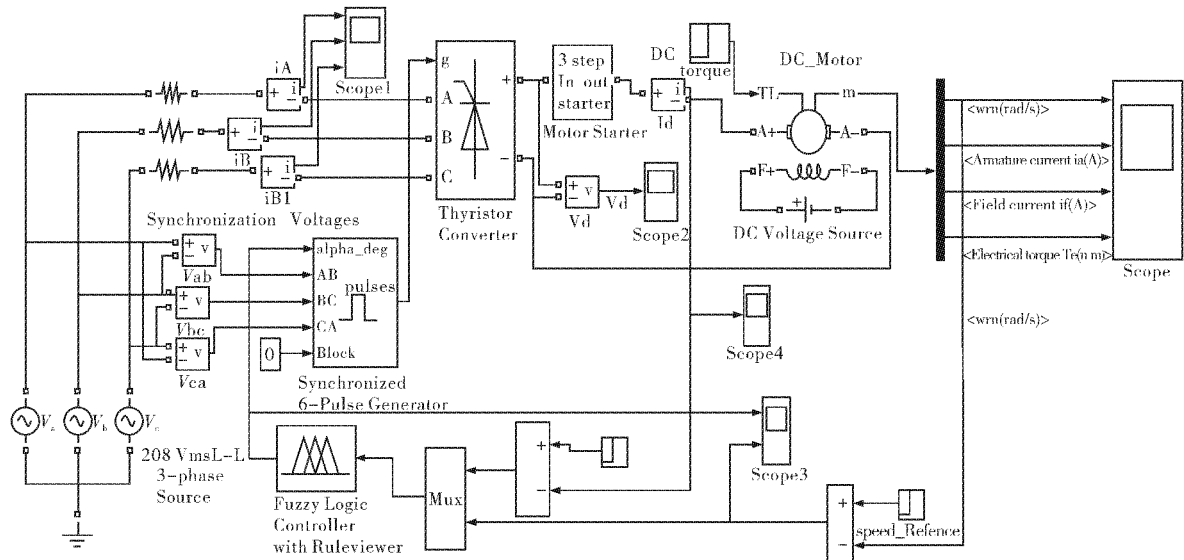


图9 用FLC控制器的直流电机调速控制 MATLAB 仿真

Fig. 9 MATLAB simulation for speed control of direct current motor using FLC controller

误差是 12.5%，最佳触发角是 29.9°。图 12 和图 13 分别所示是使用模糊逻辑控制和 PID 控制的电枢电压变化仿真图，图 14 和图 15 分别所示是用 PID 控制器和用 FLC 控制器控制触发角在 85°~150°变化时的电机速度 Matlab 仿真，从仿真图可以看出：用 FLC 控制器控制电机达到同样的速度，控制系统可控硅的触发角要小些，说明用 FLC 控制电机调速的范围要宽些。表 5 是 PID 控制器和 FLC 控制器输出响应比较分析。从比较分

析看，在超调量方面 PID 性能优于 FLC，PID 的超调量为 0，而 FLC 有 16% 的超调量。但比较两种控制器达到稳定的上升时间和稳定时间，FLC 控制器更好；在调速范围方面，同样激励条件下，用 PID 控制器控制他励直流电机的电枢电压范围在 230~265 V 之间，用 FLC 控制器控制他励直流电机的电枢电压范围在 145~265 V 之间，这意味着 FLC 同 PID 控制器相比调速范围增加了 37%。

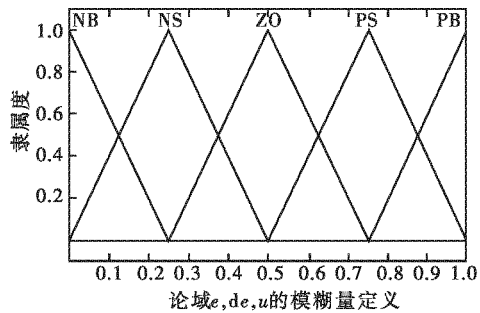


图 10 偏差 $e(t)$, 偏差变化 de , 控制量 u 的标准化的隶属函数

Fig. 10 Membership for fuzzy variable

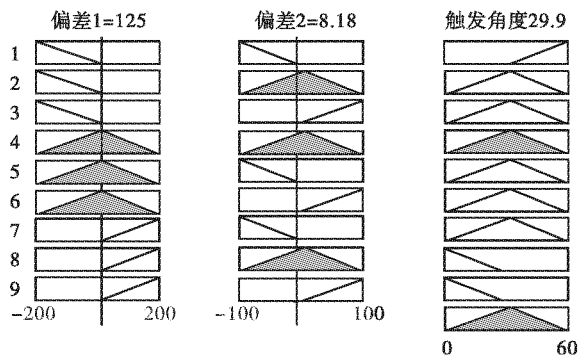


图 11 模糊规则观测器

Fig. 11 Illustrates rule viewer

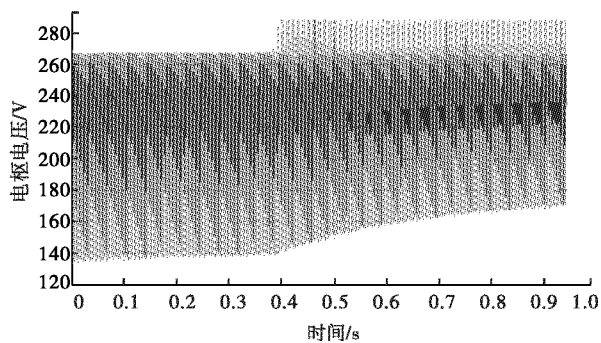


图 12 用 FLC 控制的电枢电压变化的仿真

Fig. 12 Illustrates armature voltage variation using FLC

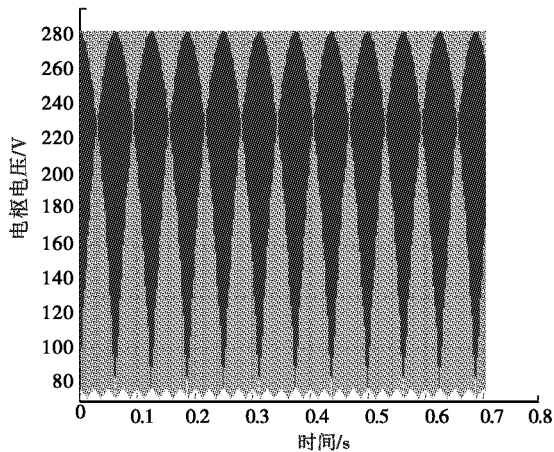


图 13 用 PID 控制的电枢电压变化的仿真

Fig. 13 Armature voltage variation using PID

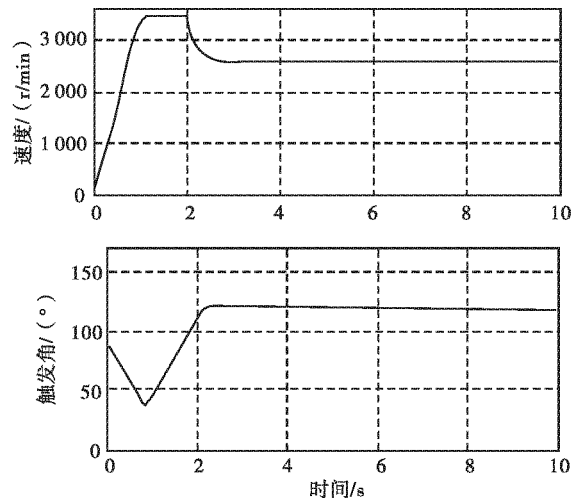


图 14 用 FLC 控制的电机速度和触发角度仿真图

Fig. 14 Matlab Simulation for speed and firing angle using FLC controller

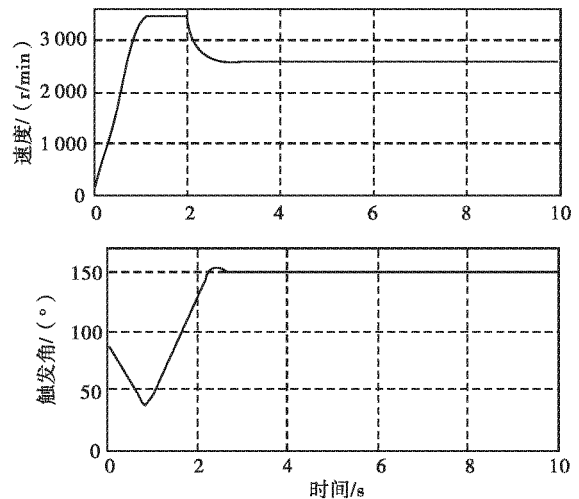


图 15 用 PID 控制的电机速度和触发角度仿真图

Fig. 15 Matlab simulation for speed and firing angle using PID

表 5 PID 控制器和 FLC 信号响应输出比较

Table 5 Coparative study of various controller

参数	PID	FLC
上升时间 T_r/s	830.76	800
稳定时间 T_s/s	1 076.92	200
超调量/%	0	16
电枢电压调整范围/V	230~265	145~265

3 结 语

笔者用 PID 控制器和 FLC 控制器控制他励直流电机并进行了对比研究. PID 控制器与 FLC 控制器相比,原理和结构简单,其控制系统的设计是建立在控制对象精确的数学模型基础上,是线

性控制,因此设计和实现都相对容易,对于那些电机控制要求超调量小的,电压调节范围不宽的,应当优先考虑PID控制。FLC控制器是基于软件的规则和硬件的组合,是建立在专家知识库和人工操作经验的基础上,不需要对控制对象建立精确的数学模型,尤其对那些不易获得精确的数学模型或者数学模型多变一类控制对象,而鲁棒性要求高,响应时间快的,稳定时间要求短的场合,FLC具有明显的优势,具有更好的设计参数,组成的控制系统更容易满足非线性控制系统(也满足线性标准)要求。从控制系统应用的角度考虑,两者各有优势,孰优孰劣就根据控制对象的特性而定。

致谢

感谢华中科技大学控制科学与工程系实验中心主任、博士生导师赵金教授和刘洋博士在研究过程中给予的启发和帮助。

参考文献:

- [1] 孟凡友,王启兴,让余奇,等.采用模糊控制的直流电机软启动及调速系统[J].海军工程大学学报,2007,19(5):73-76.
MENG Fan-you, WANG Qi-xing, RANG Yu-qi, et al. DC motor soft startup and variable speed system with fuzzy controller[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2007, 19(5): 73-76. (in Chinese)
- [2] 熊大为,廖冬初,欧文军,等. BP 网络在感应电机逆系统中的模拟与仿真[J]. 武汉工程大学学报,2010,32(5):91-93,98.
XIONG Da-wei, LIAO Dong-chu, OU Wen-jun, et al. The simulation and emulation of BP network in induction motor inverse system[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2010, 32(5): 91-93, 98. (in Chinese)
- [3] 张恩勤,施颂椒,翁正新.模糊控制与PID控制方法的比较[J].上海交通大学学报,1999,33(4):501-503.
ZHANG En qin, SHI Song jiao, WENG Zheng xin. Comparative Study of Fuzzy Control and PID Control [J]. JOURNAL OF SHANGHAI JIAOTONG UNIVERSITY, 1999, 33(4): 501-503. (in Chinese)
- [4] 贾东耀,曾智刚.基于模糊控制的直流电机调速系统 MATLAB 仿真[J].电机电器技术,2002(5):2-5.
JIA Dong-yao, ZENG Zhi-gang. Computer Simulation in DC Motor Speed-Controlling System Based on Fuzzy Control[J]. 电机电器技术,2002(5):2-5. (in Chinese)
- [5] 李勇,罗隆福,许加柱,等.基于模糊控制的直流电机 PWM 调速系统[J].大电机技术,2006(1):66-68.
LI Yong, LUO Long-fu, XU Jia-zhu, et al. PWM Speed Regulating System of DC Motor Based on Fuzzy Control [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2006(1): 66-68. (in Chinese)
- [6] 戴丽萍.模糊自镇定参数PID的设计与仿真[J].武汉化工学院学报,2002,24(2):63-65.
DAI Liping. Design and emulation of parameters self-tuning PID controller[J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, 2002, 24(2): 63-65. (in Chinese)
- [7] 陆华颖,程光伟,陈凯.模糊PID双闭环直流电机调速系统仿真[J].电子科技,2011,24(10):56-58.
LU Huaying, CHENG Guangwei, CHEN Kai. Simulation of Fuzzy PID Brushless DC Motor Double-loop Speed Control System [J]. Electronic Science and Technology, 2011, 24(10): 56-58. (in Chinese)
- [8] 赵金,万淑芸.隶属函数分布对模糊控制交流调速性能的影响[J].电气传动,2004,34(3):9-12.
Zhao Jin, Wan Shuyun. Membership Function Distribution Effect on Fuzzy Logic Controlled AC Motor Drive [J]. Electric Drive, 2004, 34(3): 9-12. (in Chinese)
- [9] 杨世勇,徐国林.模糊控制与PID控制的对比及其复合控制[J].自动化技术与应用,2011,30(11):21-25.
YANG Shi-yong, XU Guo-lin. Comparison and Composite of Fuzzy Control and PID Control [J]. Techniques of Automation and Applications, 2011, 30(11): 21-25. (in Chinese)
- [10] 文小玲,陈兵.直流调速系统单神经元自适应速度控制方法[J].武汉化工学院学报,2004,26(3):57-60.
WEN Xiaoling, CHEN Bing. Study on the adaptive PID control scheme based on single neuron for DC drive system [J]. Journal of Wuhan Institute of Chemical Technology, 2004, 26(3): 57-60. (in Chinese)

Comparative study on speed control of direct current motor

GAN Jia-liang, LI Zhi-min, XU Cui-qin, TAN Huai-jiang

(School of Computer and Information Science, Hubei Engineering University, Xiaogan 432100, China)

Abstract: The speed control of a direct current (DC) separately excited motor was respectively controlled by the proportional integration differential (PID) controller and the fuzzy logic controller (FLC). The cascade starting of the motor was studied by a digital experiment circuit. The results of the simulation experiment show that the PID controller is a linear system which is designed based on a precise mathematical model of control object, it has an outstanding advantage to the system with small overshoot and narrow range of voltage adjustment; with software rules and hardware combination, the FLC controller is built based on expert knowledge base and manual operation experience, it doesn't need a precise mathematical model of control object. FLC has obvious advantages with better design parameters, and easily meets the requirements of a nonlinear system with high robustness, fast response and short settling time.

Key words: fuzzy logic controller; proportional integration differential controller; mathematical model; simulation

本文编辑: 苗 变