

小型直流电机建模及其模糊PID控制研究

张一夫¹, 孙丽君², 田乐乐¹, 王通¹, 冯明兴¹, 张建松³

(1. 河南工业大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南工业大学 粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 河南 郑州 450001; 3. 河南省教育技术装备管理中心, 河南 郑州 450004)

摘要:为解决未知传递函数小型直流电机分析控制较为困难的问题,针对参数不易获得的情况提出了一种建模方法,设计了一种基于模糊PID自整定的控制系统。推导出直流电机的通用传递函数与零状态阶跃响应表达式,使用Matlab根据实测其零状态阶跃响应数据拟合出参数,并得到基本PID控制参数。为了优化控制效果,根据专家经验设计模糊控制器对参数进行整定,仿真结果对比发现调节时间、超调量均优于PID,并且具有一定的抗干扰性。最后搭建硬件平台根据实际控制效果验证了建模和控制的有效性。

关键词:小型直流电机; 建模; 控制; 模糊PID; 仿真; Matlab

中图分类号: TP272

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2020)22-0113-05

DOI: 10.14022/j.issn1674-6236.2020.22.025

Research on modeling and fuzzy PID control of small DC motor

ZHANG Yifu¹, SUN Lijun², TIAN Lele¹, WANG Tong¹, FENG Mingxing¹, ZHANG Jiansong³

(1. School of Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China;
2. Key Laboratory of Food Information Processing and Control, Ministry of Education, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 3. Education Technology Equipment Management Center of Henan Province, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: In order to solve the problem that the small DC motor analysis and control of the unknown transfer function is difficult, a modeling method is proposed for the case that the parameter is not easy to obtain, and a control system based on fuzzy PID self-tuning is designed. The general transfer function of the DC motor and the zero-state step response expression are derived. Using Matlab, the parameters are fitted according to the measured zero-state step response data, and the basic PID control parameters are obtained. In order to optimize the control effect, the fuzzy controller is designed according to the expert experience to adjust the parameters. The simulation results show that the timing and overshoot are better than PID and have certain anti-interference. Finally, the hardware platform is built to verify the effectiveness of modeling and control based on its actual control effect.

Keywords: small DC motor; modeling; control; fuzzy PID; simulation; Matlab

小型直流电机具有可靠性高、成本低、控制简单的特点,在工业生产中应用广泛。但在传递函数未知的情况下无法使用Matlab等工具建立模型^[1]以及确定PID控制参数,造成产品开发周期长和控制效果不够理想等问题,其建模和控制已成为目前的研究热点之一。

学者们进行了广泛研究,王文庆、陈龙、马安飞、商建平等分别提出了改进遗传算法^[2]、改进的粒子群(Particle Swarm Optimization, PSO)算法^[3]、大爆炸大收敛算法^[4]、鲸鱼优化算法^[5],以上迭代算法虽取得了较好的控制效果,但运算量巨大,对硬件要求高,不利于降低成本和推广应用,需要一种低成本的控制方法。

收稿日期: 2019-12-31 稿件编号: 201912253

作者简介: 张一夫(1997—),男,河南郑州人。研究方向: 自动控制。

为解决以上问题,推导出小型直流电机传递函数,以传递函数为模型根据实测数据拟合出各参数,设计了一种模糊PID自整定^[6]控制器,使用Matlab进行仿真实验,并搭建硬件平台验证其有效性。

1 控制系统硬件结构

小型直流电机控制系统需12 V电源供电,文中采用基于三串锂电池的不间断电源(Uninterruptible Power System, UPS)^[7]和12 V直流电源,主要为主控制器、驱动器、直流电机供电。能源上优先使用12 V直流电源,当由于断电等原因无法使用时,再切换为UPS电源供电。电机控制系统工作时形成闭环,由霍尔编码器^[8]检测转速,根据与设定转速的差值进行调整,其结构如图1所示。

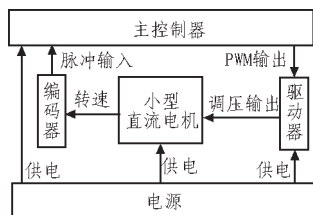


图1 硬件结构

2 传递函数确定

根据控制系统的硬件组成,整个系统结构如图2所示。其中, $G(s)$ 为被控对象直流电机, $H(s)$ 为测量设备霍尔编码器, $D(s)$ 为待设计的控制器。

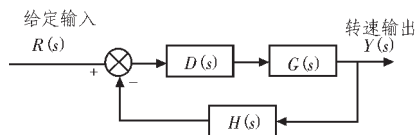


图2 系统结构图

2.1 直流电机传递函数

直流电机系统示意图如图3所示。

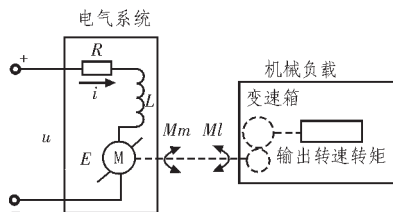


图3 直流电机原理图

对图3电气系统部分,设其输入电压为 $u(t)$,回

路中电流为 $i(t)$,电枢线圈电感为 L ,其感应电动势为 $E(t)$,回路等效电阻为 R ,根据回路列其电压方程如下:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + E(t) = u(t) \quad (1)$$

其中,感应电动势 $E(t)$ 为电机角速度 $\omega(t)$ 与电动势常数 K_e 的乘积:

$$E(t) = K_e \omega(t) \quad (2)$$

由式(1)、式(2)知,电气方程为:

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + K_e \omega(t) = u(t) \quad (3)$$

对电动机及负载部分进行分析,当其转速平衡时,忽略电动机内部阻力,输出转矩 $M_l(t)$ 与电磁转矩 $M_m(t)$ 之间有:

$$M_l(t) = M_m(t) - J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (4)$$

其中, J 为转子的转动惯量。电磁转矩 $M_m(t)$ 为电枢电流 $i(t)$ 与电磁力矩常数的乘积,具体关系如下:

$$M_m(t) = K_c i(t) \quad (5)$$

由式(4)、式(5)知,机械方程为:

$$M_l(t) = K_c i(t) - J \frac{d\omega(t)}{dt} \quad (6)$$

将电气方程(3)与机械方程(6)联立,并消除中间变量得:

$$\frac{JL}{K_c} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2} + \frac{JR}{K_c} \frac{d\omega(t)}{dt} + K_e \omega(t) + \frac{R}{K_c} M_l(t) = u(t) \quad (7)$$

式(7)可看做一个与 $\omega(t)$ 有关的一个二阶微分方程,项 $\frac{RM_l(t)}{K_c}$ 与电动机负载大小有关,当负载为0时, $M_l(t)$ 为0,该项可以忽略不计。小型电机电枢绕组电感很小,也可以忽略项 $\frac{JL}{K_c} \frac{d^2\omega(t)}{dt^2}$,式(7)近似为一阶微分方程:

$$\frac{JR}{K_c} \frac{d\omega(t)}{dt} + K_e \omega(t) = u(t) \quad (8)$$

电机转速 $n_m(t)$ 与角速度 $\omega(t)$ 的关系为:

$$n_m(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} \quad (9)$$

将式(8)、式(9)联立,得电枢电压 $u(t)$ 与转速 $n_m(t)$ 的关系为:

$$\frac{2\pi JR}{K_c} \frac{dn_m(t)}{dt} + 2\pi K_e n_m(t) = u(t) \quad (10)$$

令式(10)初始条件为零,变换到S域,得其传递函数为:

$$G(s) = \frac{N_m(s)}{U(s)} = \frac{0.5\pi K_e}{\frac{JR}{K_e K_e} s + 1} \quad (11)$$

一般情况下,常数 J 、 R 、 K_e 、 K_e 不易直接获得,令:

$$0.5\pi K_e = K \quad (12)$$

$$\frac{JR}{K_e K_e} = T \quad (13)$$

其传递函数可简写为:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (14)$$

根据传递函数形式,其阶跃响应为:

$$h(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (15)$$

在参数 K 和 T 的确定方面,首先测量电动机的时域响应曲线,然后以式(15)作为模型拟合。实测时域响应曲线时,文中选用了BTS7960电机驱动器^[9],其结果如图4所示。

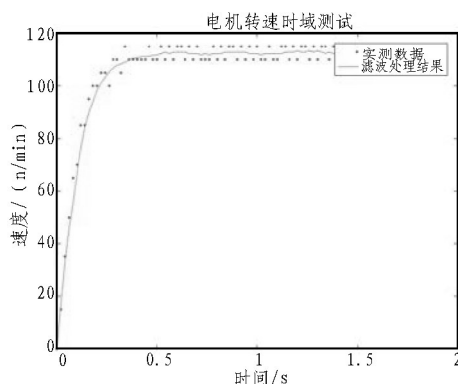


图4 时域响应曲线

在Matlab中,使用工具包“cftool”^[10]对小型直流电机的参数进行数据拟合,得:

$$K = 0.45 \quad (16)$$

$$T = 0.08 \quad (17)$$

因此,小型直流电机的传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.45}{0.08s + 1} \quad (18)$$

使用Matlab进行仿真,验证传递函数的正确性,其结果如图5所示,与实测响应曲线接近。

2.2 传感器模型

传感器选用了霍尔编码器,其脉冲频率与转速呈线性关系。根据手册,输出脉冲分辨率^[11]为375.22。由于霍尔编码器的响应时间很短,对电动机控制带来的影响可以忽略不计。用其测量的脉冲频率来表示实时转速,设脉冲总频率为 $f(t)$,传感器测得的转速为 $N_s(t)$,其对应关系如下:

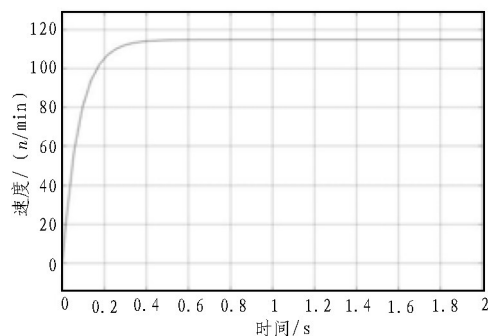


图5 MATLAB仿真结果

$$N_s(t) = \frac{1}{PPR} \times f(t) \quad (19)$$

将 $PPR=375.22$ 代入式(19):

$$N_s(t) = \frac{1}{375.22} \times f(t) = 0.00267f(t) \quad (20)$$

由于传感器的作用是实时获取转速,在仿真分析时可不考虑。但实际应用过程中,获取转速需将测得的传感器输出脉冲频率乘以0.00267。

3 控制器设计

整个系统的关键在于控制器。综合考虑后采用目前比较成熟的PID控制技术,其表达式为:

$$D(s) = K_p + \frac{1}{K_i \times s} + K_d \times s \quad (21)$$

根据文献[12],其参数整定的好坏决定了这个系统的控制质量。首先使用固定参数的PID算法,取 $K_{p0}=5$ 、 $K_{i0}=3$ 、 $K_{d0}=0.1$ 。对于模糊PID,文中具体做法如图6所示,根据其输入与输出的变化率,使用一个二输入三输出的模糊控制器整定PID参数。

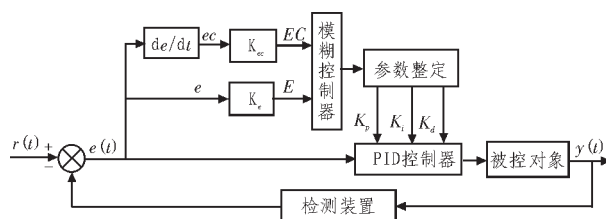


图6 使用模糊PID控制GM25-370

设模糊控制器输出为 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,PID参数整定方法为:

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p \quad (22)$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i \quad (23)$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d \quad (24)$$

根据文献[13]提出的专家经验,制成如图7所示的控制策略表,由误差 e 及其变化率 ec 决定模糊控制器输出策略,输入/输出变量的模糊子集采用7个变

量值:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)表示。隶属度函数以 E 为例,如图8所示,采用三角分布^[14]的方式,根据实际控制效果,选择的 e 和 ec 的论域分别为 $[-10, 10]$ 、 $[-5, 5]$; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的论域分别为 $[-1, 1]$ 、 $[-0.3, 0.3]$ 、 $[-0.05, 0.05]$ 。

$ec \backslash e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PM/NM/NM	PM/NM/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	ZO/ZO/ZO
NM	PB/NB/NB	PB/NB/NB	PM/NM/NM	PS/NS/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/NB	PM/NM/NM	PM/NS/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/PS/PS	NS/PS/PS
ZO	PM/NM/NM	PM/NM/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/PS/PS	NM/PM/PM	NM/PM/PM
PS	PS/NM/NM	PS/NS/NS	ZO/ZO/ZO	NS/PS/PS	NS/PS/PS	NM/PM/PM	NM/PB/PB
PM	PS/ZO/ZO	ZO/ZO/ZO	PS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/PM	NM/PB/PB	NB/PB/PB
PB	ZO/ZO/ZO	ZO/ZO/ZO	NM/PS/PS	NM/PM/PM	NM/PM/PM	NB/PB/PB	NB/PB/PB

图7 参数 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 控制规则调整表

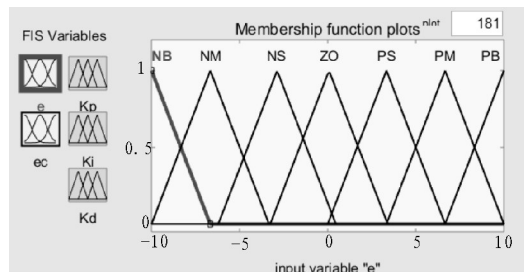


图8 隶属度函数

4 仿真与验证

使用MATLAB的Simulink^[15]搭建系统,示波器分别接入阶跃信号,使用PID控制的输出和使用模糊PID控制的输出。因实际应用时干扰主要来自电机负载^[16],故将两路阶跃信号模拟的干扰加在其输出端后、反馈端前,如图9所示。

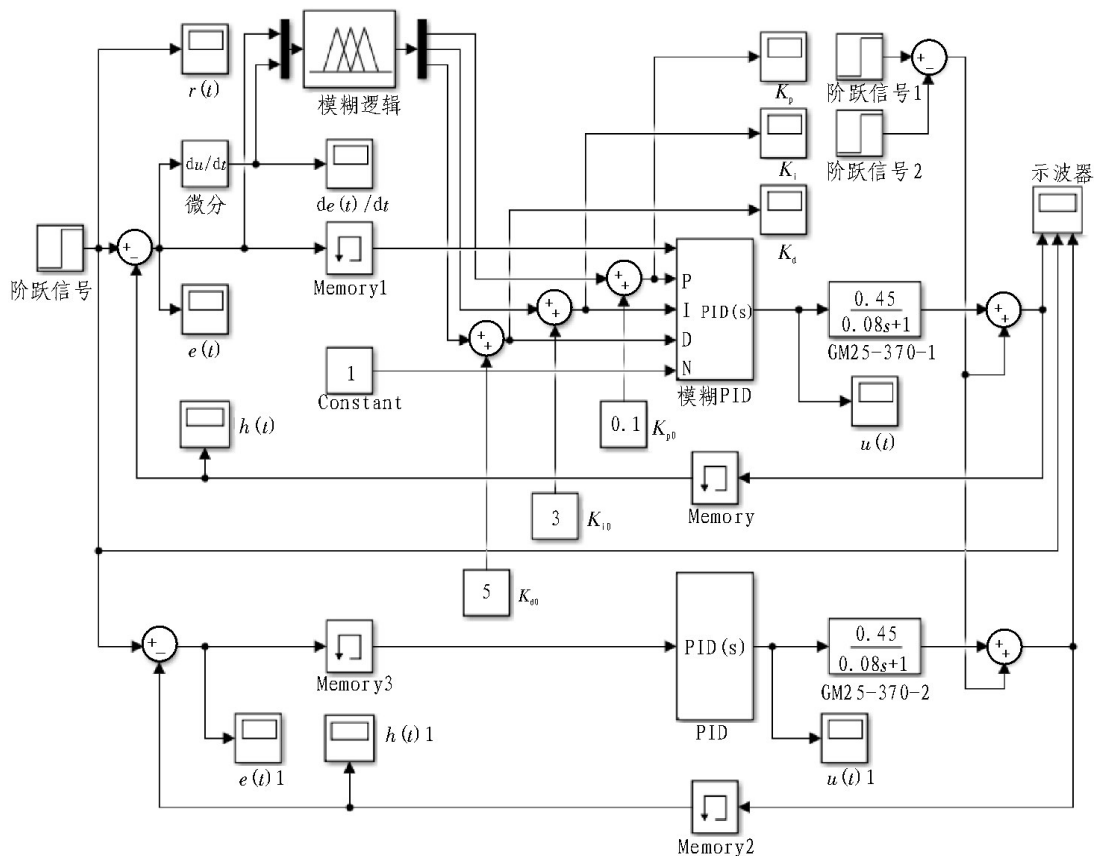


图9 系统仿真结构图

阶跃信号 $r(t)$ 与输出信号 $y(t)$ 相减后得到误差信号 $e(t)$, $e(t)$ 首先接入PID控制器,同时 $e(t)$ 与其导数一起被接入模糊控制器,通过模糊化、去模糊化的过程后,输出结果按照式(22)、(23)、(24)整定后作为PID控制器的参数,与误差一起作为被控对象的

输入,进而完成控制。

运行以上系统,输入幅值为100的阶跃信号,其结果如图10所示,测得PID调节时间为168.06 ms,超调量17.5%,整个响应曲线呈减幅震荡,稳态误差几乎为0。模糊PID调节时间为94.60 ms,超调量

2.5%,经过一次超调后,稳态误差几乎为0。可以看出,经过模糊控制器整定后的PID算法较原来控制效果有较大提高。

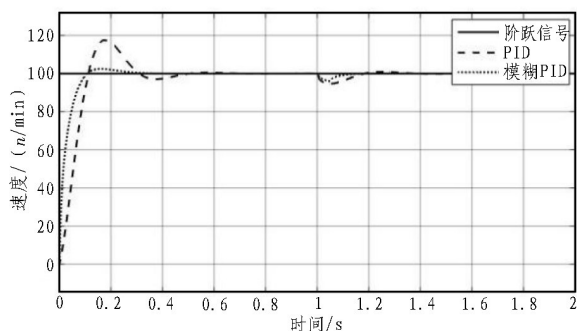


图10 运行结果

在 $t=1\text{ s}$ 时引入干扰,可以看出二者的扰动稳态误差均为0。模糊PID调节时间明显短于PID,因此模糊PID具有一定的抗干扰能力。

使用单片机、BTS7960驱动器、小型直流电机搭建硬件系统,对电机进行实际控制,测量其转速并绘制出其控制曲线,如图11所示,发现其与仿真结果接近。

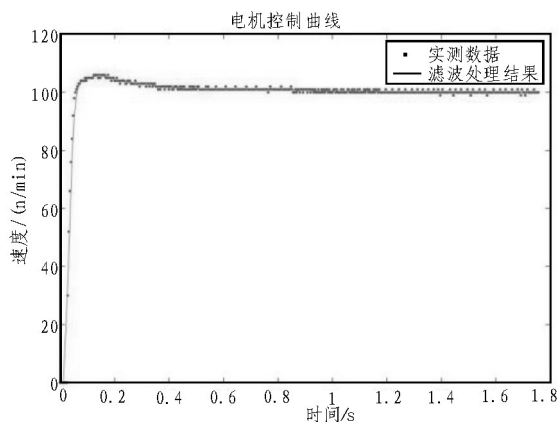


图11 电机实际控制曲线

5 结束语

文中首先推导出小型直流电机的传递函数,并根据其时域零状态阶跃响应曲线拟合出传递函数中各参数,然后设计模糊控制器对PID参数进行整定。根据Matlab仿真结果,模糊PID控制系统的调节时间、超调量、抗干扰性与PID相比均具有优势,且相比较于智能算法,其控制器原理简单,更容易实现。经硬件验证,发现控制效果接近仿真结果,证明了建模和控制的有效性。

参考文献:

[1] 姚素刚,赵家峤,闫立秋.永磁直流电动机变负载

下速度控制策略研究[J].组合机床与自动化加工技术,2019(7):76-80.

- [2] 王文庆,杨楠.基于改进遗传算法的PID参数整定研究[J].计算机与数字工程,2018,46(12):2603-2606,2610.
- [3] 陈龙,张春雷,陈璨,等.改进的PSO算法对PID控制器的参数优化[J].精密制造与自动化,2018(3):41-45.
- [4] 马安飞,王家军.基于大爆炸大收敛算法的PID参数整定[J].杭州电子科技大学学报(自然科学版),2018,38(6):56-61.
- [5] 商建平,赵忠宪,丁炜,等.基于鲸鱼优化算法的PID参数整定研究[J].兰州石化职业技术学院学报,2018,18(4):22-24.
- [6] 陈诗慧,杨雁南.基于模糊PID控制的伺服电机系统仿真[J].电子设计工程,2019,27(19):174-179.
- [7] 王宽,贺显曜,郑普,等.UPS蓄电池在线监测系统的设计[J].电子设计工程,2015,23(9):69-72.
- [8] 黄俊.基于霍尔传感器的电动小车测速监测系统的设计[J].电子设计工程,2018,26(4):99-103.
- [9] Syukriyadin S, Syahrizal S, Mansur G, et al. Permanent magnet DC motor control by using arduino and motor drive module BTS7960[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 352(1): 12023.
- [10] 杨炼,陈芳,谭理.Matlab多项式数据拟合的案例式教学设计[J].教育现代化,2019,6(9):93-95.
- [11] 贾兴丹,万秋华,赵长海,等.光电编码器测速方法现状与展望[J].仪表技术与传感器,2018(3):102-107.
- [12] 李辉,史荣珍.PID控制器参数整定与分析[J].电脑知识与技术,2019,15(8):243-244,249.
- [13] 刘锁清,刘少虹,李军红,等.基于模糊自整定PID串级控制的废水处理pH值控制[J].自动化技术与应用,2019,38(2):22-27.
- [14] 宁丽娟.几种常见的连续型分布[J].价值工程,2018,37(25):237-238.
- [15] 孙艳,王姝敏.Matlab/Simulink在戴维宁定理实验中的应用[J].蚌埠学院学报,2019,8(2):78-80.
- [16] 李富国,马鑫彤.基于多阶滑模的永磁无刷直流电动机干扰抑制研究[J].内燃机与配件,2019(13):73-76.