

基于 Kalman 滤波模糊 PID 控制的直流调速系统

方 勇, 杨海鹏

(中国船舶重工集团公司 第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 为了提高直流调速系统的控制性能, 针对系统中存在的非线性及结构参数变化范围大的特点, 提出了一种基于 Kalman 滤波的参数自整定模糊 PID 控制器。该控制器将传统的 PID 控制算法与模糊控制算法相结合, 通过对误差及误差变化的在线识别, 实现对 PID 参数的自整定, 并采用 Kalman 滤波对信号进行滤波处理。Matlab 仿真结果表明, 与传统的线性 PID 控制器相比, 该控制系统具有良好的动态和稳态性能, 鲁棒性强, 控制性能显著提高。

关键词: 直流调速; Kalman 滤波; 参数自整定; 模糊 PID 控制器; 仿真

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)04-0041-04

DC speed regulation system based on fuzzy-PID control with Kalman filter

FANG Yong, YANG Hai-peng

(No. 710 Research Inst., China Ship Building Industry Corporation, Yichang 443003, China)

Abstract: Aiming at improving the control performance of DC speed regulation system, based on the characters of nonlinear and the large varied region of the system, a parameter self-tuning fuzzy-PID controller with Kalman filter was introduced. Combining traditional PID control algorithm and fuzzy control algorithm, the PID parameters used in the DC speed regulation system were self-tuned by measuring on-line control error and error varying, and the speed signals were filtered with Kalman filter. The simulation results in the Matlab indicate that the method can enhance the performance of PID controller, the DC speed regulation system has good dynamic and static characteristics, and strengthens the robustness of the system.

Key words: DC speed regulation; Kalman filter; parameter self-tuning; fuzzy-PID controller; simulation

0 引 言

直流调速系统具有调速范围广,易于平滑调速,启动、制动和过载转矩大,可靠性较高等突出优点,广泛应用于机械制造、冶金、国防等各个领域,尤其适用于对调速要求较高的生产机械^[1]。对直流调速系统的控制,目前大多数采用的是常规 PID 控制器,这类控制器具有结构简单、快速性好、精确度高的特点,对于可建立精确数学模型的定常系统而言具有较好的控制效果。当系统状态变化时,常规 PID 控制器的参数不能自动进行相应的调整,从而使控制器性能下降。由于实际直流调速系统中存在诸如摩擦、电机齿槽效应、参数变化范围大等非线性因素,常规的 PID 控制器很难对直流调速系统的整个过程实现精确控制。

本研究提出一种基于 Kalman 滤波的参数自整定模糊 PID 控制器,将模糊控制鲁棒性强与 PID 控制稳

态误差小的优点结合起来,应用模糊推理的方法实现对 PID 参数的在线自整定,同时采用 Kalman 滤波对速度信号进行滤波处理,降低工作现场的干扰,使直流调速系统具有较好的自适应性、动态和稳态性能。

1 直流调速系统结构设计及模型建立

1.1 直流调速系统结构设计

设计的直流调速系统结构如图 1 所示,系统为 PWM 调速系统。与晶闸管-电动机调速系统相比, PWM 系统具有开关频率高、电流容易连续、稳速精度高、调速范围宽等优点^[2]。整个系统采用双闭环控制,分为速度环和电流环。电流调节器采用 PID 控制算法,保证了电流环调节的快速性;速度调节器采用参数自整定模糊 PID 控制算法,并采用 Kalman 滤波器对信号进行滤波处理,从而保证了速度调节的快速性和控制精度。

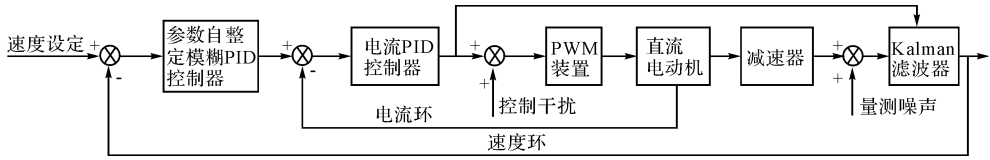


图 1 直流调速系统结构图

1.2 数学模型

假定直流电机电枢回路电流连续,且忽略粘性摩擦及弹性转矩,直流电机传递函数可以表示为:

$$G_d(s) = \frac{1/C_e}{T_m T_l s^2 + T_m s + 1} \quad (1)$$

式中 T_m —试验台转速系统机电时间常数,s; T_l —电枢回路电磁时间常数,s; C_e —反电动势系数,V·min/r。

减速器是一个比例环节,其传递函数为:

$$G_j(s) = 1/i \quad (2)$$

式中 i —齿轮减速器传动比。

根据 PWM 装置工作原理和波形分析,PWM 装置可以看成是一个滞后环节。但本研究中 IGBT 的开关频率为 20 kHz,故可将时间常数这么小的滞后环节近似看成是一个一阶惯性环节,因此 PWM 装置的传递函数为:

$$G_{pwm}(s) = \frac{K_s}{T_s s + 1} \quad (3)$$

式中 K_s —PWM 装置的放大系数; T_s —PWM 装置的延迟时间,s。

2 参数自整定模糊 PID 控制器设计

2.1 参数自整定模糊 PID 控制器的结构设计

常规 PID 控制器将偏差 e 的比例(P)、积分(I)和微分(D)通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制,其增量式的离散 PID 控制规律为^[3]:

$$u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_i T_{sam} e(k) + \frac{K_d}{T_{sam}}[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4)$$

式中 K_p —PID 控制器的比例系数; K_i —PID 控制器的积分系数; K_d —PID 控制器的微分系数; T_{sam} —采样周期。

参数自整定模糊 PID 控制器结构如图 2 所示,在常规 PID 控制器的基础上,以偏差 e 和偏差变化率 e_c 作为输入,采用模糊推理方法在线对 PID 参数 K_p 、 K_i 和 K_d 进行整定,以满足不同 e 和 e_c 对控制器参数的要求,从而使被控对象具有良好的动、静态性能^[4-5]。

2.2 模糊语言变量及其隶属度函数的确定

选择输入量为偏差 e 和偏差变化率 e_c ,输出量为

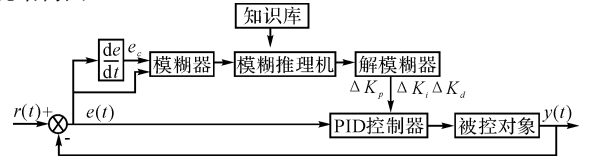


图 2 参数自整定模糊 PID 控制器结构图

PID 控制参数的变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 。

输入量偏差 e 、偏差变化率 e_c 和输出量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的变化范围定义为模糊集上的论域: $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$,其模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$,子集中的元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。隶属度函数曲线形状有多种,如梯形、钟形、三角形等,考虑到对论域的覆盖程度和灵敏度以及稳定性和鲁棒性原则,各模糊子集采用的三角形隶属度函数如图 3 所示。

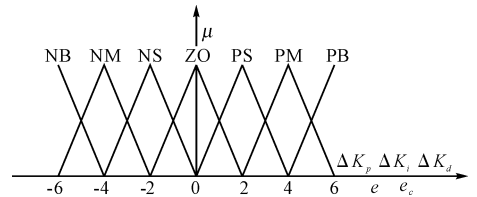


图 3 输入/输出语言变量的隶属度函数

2.3 模糊规则的确定

模糊规则是模糊控制器的核心,笔者根据常规 PID 控制器参数的整定规律,建立了 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊规则,如图 4 所示。

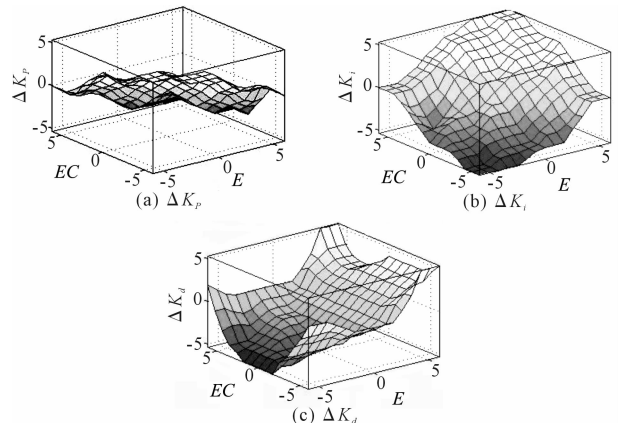


图 4 模糊规则图

2.4 模糊控制表及算法实现

根据模糊规则,对所有输入语言变量量化后的各

种组合通过模糊逻辑推理方法离线计算出每一个状态的模糊控制器输出,最终生成模糊控制表。本研究模糊推理机采用 Mamdani 型推理系统,解模糊器采用重心法^[6-7]。

在求得控制表后,将控制表存储在计算机中,并编制一个查找控制表的子程序。实际控制过程中通过查表,代入下式计算即可得到整定后的 K_p 、 K_i 和 K_d 值:

$$K_p = K'_p + \{e_i, e_{ci}\} + q_p \quad (5)$$

$$K_i = K'_i + \{e_i, e_{ci}\} + q_i \quad (6)$$

$$K_d = K'_d + \{e_i, e_{ci}\} + q_d \quad (7)$$

式中 K'_p 、 K'_i 、 K'_d —前一次的 PID 控制参数; $\{e_i, e_{ci}\}$ —偏差 e 与偏差变化率 e_c 对应于控制表中的值; q_p 、 q_i 、 q_d —修正系数。

3 Kalman 滤波

直流调速系统工作于干扰较大的工业现场环境中,为了提高控制和检测精度,本研究采用了 Kalman 滤波抑制模型噪声和量测噪声对系统的影响^[8]。

将控制系统的连续模型转换为离散模型,其离散的状态方程和量测方程分别为:

$$\begin{cases} x(k+1) = A(k+1, k)x(k) + B(k+1, k)u(k) + \Gamma(k+1, k)w(k) \\ y(k) = C(k)x(k) + v(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $x(k)$ —状态向量; $y(k)$ —量测变量; $u(k)$ —输入向量(控制信号); $w(k)$ —模型噪声向量; $v(k)$ —量测噪声向量; $A(k+1, k)$ —系统矩阵; $B(k+1, k)$ —输入矩阵; $C(k)$ —输出矩阵; $\Gamma(k+1, k)$ —常数矩阵。

对于系统状态方程式(8),根据 Kalman 滤波定

理,可得到以下 Kalman 滤波方程^[9]:

(1) 一步预测估计方程:

$$\hat{x}_{k|k-1} = A(k, k-1)\hat{x}_{k-1|k-1} + B(k, k-1)u(k-1) \quad (9)$$

(2) 一步预测估计误差的方差阵:

$$P_{k|k-1} = A(k, k-1)P_{k-1|k-1}A^T(k, k-1) + \Gamma(k, k-1)Q(k-1)\Gamma^T(k, k-1) \quad (10)$$

(3) 滤波增益方程:

$$K_k = P_{k|k-1}C^T(k)[C(k)P_{k|k-1}C^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (11)$$

(4) 滤波估计方程:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k[y_k - C(k)\hat{x}_{k|k-1}] \quad (12)$$

(5) 滤波估计误差的方差阵:

$$P_{k|k} = [I - K_kC(k)]P_{k|k-1} \quad (13)$$

式中 $Q(k)$ 、 $R(k)$ —随机噪声 w, v 的协方差矩阵; I —单位矩阵。

确定协方差矩阵 Q, R 和滤波初值 $\hat{x}_{0|0}, P_{0|0}$ 后,根据 k 时刻的量测值 $y(k)$ 就可以通过递推计算得到 k 时刻的状态估计值 $\hat{x}_{k|k}$ 。滤波初值 $\hat{x}_{0|0}, P_{0|0}$ 选取的原则是保证稳态跟踪和滤波不发散, Q, R 的值根据噪声的统计特性得出。

4 仿真与分析

基于 Matlab/Simulink 图形化建模环境,建立的基于 Kalman 滤波的参数自整定模糊 PID 控制仿真模型如图 5 所示, Kalman 滤波和参数自整定模糊 PID 控制算法采用 Matlab 自定义函数进行描述。直流电动机的参数为: $U_N = 440 \text{ V}$, $I_N = 614 \text{ A}$, $N_e = 1\ 500 \text{ r/min}$, $L = 0.69 \text{ mH}$, $R = 0.021\ 34 \ \Omega$, $GD^2 = 160.884 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。

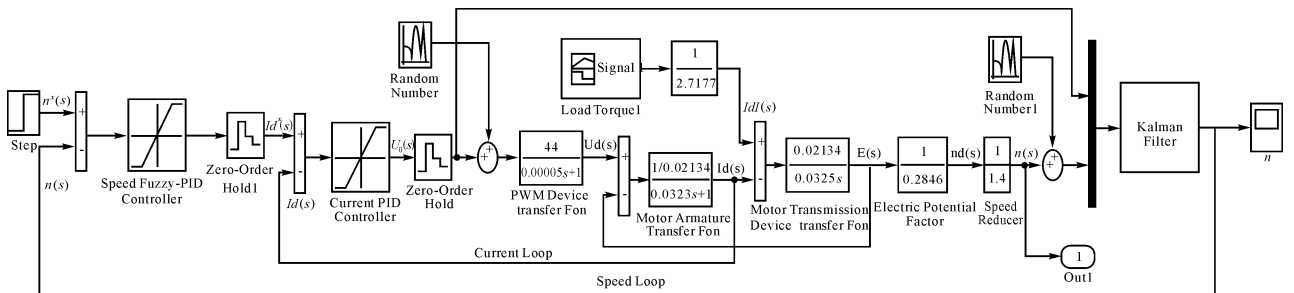


图5 基于 Kalman 滤波的参数自整定模糊 PID 控制仿真模型图

采用 PID 控制和参数自整定模糊 PID 控制的阶跃响应曲线如图 6 所示,其中给定速度为 730 r/min。从仿真结果可以看出,本研究所设计的参数自整定模糊 PID 控制器对设定速度基本无超调,而且能较快达到稳态值,其动态性能优于常规 PID 控制器。

在系统中加入控制干扰噪声和量测噪声,控制干

扰噪声和量测噪声都采用均方差为 0.1 的零均值随机白噪声进行近似描述,无 Kalman 滤波器与带 Kalman 滤波器的参数自整定模糊 PID 控制阶跃响应曲线如图 7 所示。从仿真结果可以看出,当控制系统存在随机干扰噪声时,控制器的性能下降,控制系统的品质变差。

(下转第 51 页)

进行简单的说明:

打开设备:CH3750-

penDevice;

关闭设备:CH375C-

loseDevice;

读取数据块(数据

上传):CH375ReadData;

写出数据块(数据

下载):CH375WriteData。

应用程序流程框图

如图7所示。

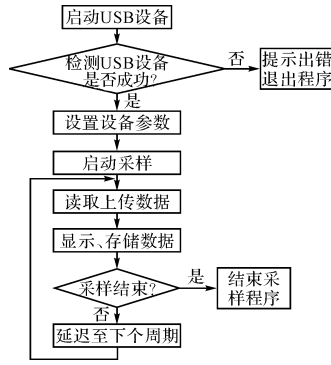


图7 应用程序流程图

4 结束语

系统建立了基于LPC2114和CH372嵌入式硬件平台,并由此来实现对直流电机空载脉动电流的检测。由于系统是直接对电流来测量,因此不需要对被测电机做任何附加条件,测试简单、快速、方便。

在测速时,需要对采集到的大量数据进行上传,CH372在内置固件模式下实现了300 KBytes/s ~ 400 KBytes/s的传输速率,基本满足了速度测试的需

要。当需要提高系统的性能以实现更高的精度和实时性时,可以采用CH372的外置固件模式或采用性能更好的USB芯片。同时可以对上位机程序进行进一步的程序优化或采用更好的波形分析方法来提高系统性能。

参考文献(References):

- [1] 瞿彩萍. 微电机无接触测速方法研究与电路设计[D]. 武汉:华中科技大学信息学院,2006:3-10.
- [2] 袁宝国,曹镇荣,王胜国. 直流电动机反电动势对其电流脉动频率的影响[J]. 中国电机工程学报,2007,27(30):92-96.
- [3] 张文海. 一种测试微型直流电动机转速的方法[J]. 无线电,1978(3):7.
- [4] 张文海. 直流电机转速的特殊测试方法[J]. 电工技术杂志,1997(3):40-42.
- [5] 陈雅文. 直流微电机测速新方法[J]. 微电机,1999,32(1):36-37.
- [6] 周立功. ARM嵌入式系统基础教程[M]. 2版. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [7] 南京沁恒电子有限公司. USB总线接口芯片CH372[EB/OL]. [2007-11-20]. <http://www.wch.cn/download/list.asp?id=11>.
- [8] 郭淳. 基于USB的SRD计算机检测系统的研制[D]. 北京:北京交通大学信息学院,2007:67-72.

[编辑:张翔]

(上接第43页)

引入Kalman滤波器可较好地抑制干扰噪声的不良影响,控制器的性能得到较大的改善,控制系统的品质也随之得到提高。

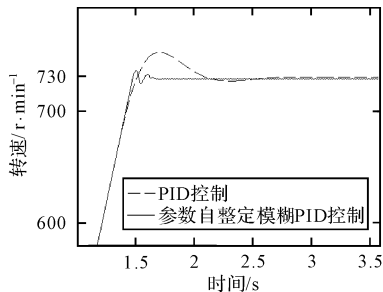


图6 PID控制、参数自整定模糊PID控制阶跃响应曲线

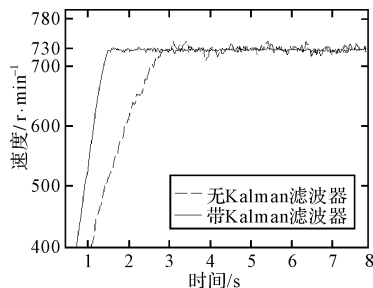


图7 带/无Kalman滤波器阶跃响应曲线

5 结束语

本研究通过分析直流调速系统,建立了数学模型,

设计了基于Kalman滤波的参数自整定模糊PID控制器,并进行了仿真分析。仿真结果表明,这种控制器克服了系统中存在的非线性、结构参数变化和干扰噪声等不利因素的影响,具有超调量小、调节时间短、稳态精度高、鲁棒性强等优点,因而有较好的应用价值。

参考文献(References):

- [1] 李发海,王岩. 电机与拖动基础[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2005.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统:运动控制系统[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2003.
- [3] GOREZ R. New design relations for 2-DOF PID-like control systems[J]. *Automatica*,2003,39(5):901-908.
- [4] BANDYOPADHYAY R, CHAKRABORTY U K, PATRANABIS D. Autotuning a PID controller: a fuzzy-genetic approach[J]. *Journal of Systems Architecture*,2001,47(7):663-673.
- [5] 张超. 中央空调冷冻水系统的模糊PID控制[J]. 机电工程技术,2009,38(8):67-69.
- [6] 左彬,祝长生. 主动电磁轴承智能积分型自适应模糊控制器[J]. 机电工程,2008,25(12):1-4,14.
- [7] QU Wen-zhong, SUN Jin-cai, QIU Yang. Active control vibration using a fuzzy control method[J]. *Journal of Sound and Vibration*,2004,275(3-5):917-930.
- [8] 郭晓芳,汪雄海. 基于Kalman预测的远程步进电机控制系统[J]. 机电工程,2008,25(7):26-28.
- [9] YANG S K, LIU T S. State estimation for predictive maintenance using Kalman filter[J]. *Reliability Engineering & System Safety*,1999,66(1):29-39. [编辑:张翔]