

卡尔曼滤波器结合模糊 PID 的控制系统^①

贾 岩¹, 熊伟丽¹, 许文强¹, 徐保国²

¹(江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 无锡 214122)

²(江南大学 物联网工程学院自动化系, 无锡 214122)

摘要: 根据控制对象的特性, 把卡尔曼滤波器和采用参数自适应的模糊 PID 算法相结合, 在具有控制干扰和测量噪声的恶劣环境下, 实现对 PID 参数在线调整的同时, 基本消除干扰和噪声影响。应用 MATLAB 软件编程进行仿真, 结果表明相对于传统 PID 和模糊 PID 控制, 本控制系统对被控对象的时变性和非线性具有良好的适应能力, 对控制干扰和测量噪声具有很好的抑制作用。

关键词: 卡尔曼滤波; 模糊 PID; 干扰; MATLAB; 仿真

Fuzzy-PID and Kalman Filter Control System

JIA Yan¹, XIONG Wei-Li¹, XU Wen-Qiang¹, XU Bao-Guo²

¹(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

²(School of IoT Engineering, Dept. of Automation, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: According to the characteristics of controlled object, kalman filter and parameter self-adaptive fuzzy PID algorithm are combined together. In controlling interference and measurement noise in harsh environments, the implementation of the PID parameters on-line adjustments, and basic elimination of interference and noise. Compared with traditional PID and Fuzzy-PID control with MATLAB programming simulation, this method has adaptability to the system which has the characteristic of time variation, uncertainty and non-linearity. The system to control interference and measurement noise has a good inhibitory effect.

Keywords: kalman; Fuzzy PID; interference; MATLAB; programming simulation

传统 PID 控制具有稳定性好、结构简单、可靠性高等优点, 对于可建立精确数学模型的确定性系统尤为适用^[1]。但由于其适应性较差, 对于非线性和时变系统易出现整定不良, 超调量大等现象, 很难取得理想的控制效果。模糊 PID 控制器可以根据输入误差 e 和误差变化率 ec 对 PID 控制器参数进行实时自动调整, 超调量小, 响应速度快, 具有良好的动态和静态特性^[2]。由于控制对象所处环境往往存在大量干扰和噪声, 导致系统误差较大和不稳定。本文采用卡尔曼滤波和模糊 PID 相结合的控制策略, 可有效抑制控制过程中出现的控制干扰和测量噪声, 达到理想效果。

1 模糊PID控制系统

1.1 传统 PID 控制器

传统的 PID 控制器是对输入输出误差 $e(t)$ 进行比例、微分和积分运算, 对三个运算结果进行加权和运算, 输出控制指令至执行机构, 使被控对象达到预期值^[3,4]。其比例系数 K_p 、积分系数 K_i 及微分系数 K_d 是影响系统响应速度、超调量、稳定性和稳态误差的关键因素。

PID 控制规律如下:

$$u(n) = K_p \{e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=0}^{n-1} e(i) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)]\}$$

① 基金项目:国家自然科学基金(30971689);中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP10927)

收稿时间:2011-04-14;收到修改稿时间:2011-05-22

$u(n)$ ， $e(n)$ 为第 n 个采样时刻控制器输出、输入值， K_p 为比例增益， T 为采样周期， T_i 和 T_d 是积分时间常数和微分时间常数。由此可以得到第 $n-1$ 个采样时刻和第 n 个采样时刻控制量的增量：

$$\begin{aligned} \Delta u(n) &= u(n) - u(n-1) \\ &= K_p \{ e(n) - e(n-1) + \frac{T}{T_i} e(n-1) + \frac{T_d}{T} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \} \\ &= K_p [e(n) - e(n-1)] K_i e(n) + K_d [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \end{aligned}$$

其中， K_p 、 $K_i = \frac{K_p T}{T_i}$ 、 $K_d = \frac{K_p T_d}{T}$ 分别为比例、积分作用和微分作用系数。

1.2 模糊 PID 控制器

选取温差 E 、温差变化率 Ec 和输出 Kp 、 Ki 、 Kd 的模糊集合均为： $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ ，模糊子集的隶属函数 NB 、 PB 为 $gauss$ 函数，其他的选择均匀分布，等距离且灵敏度高的三角函数。

设定 E 、 Ec 、 Kp 、 Ki 和 Kd 的论域为： $[-6, 6]$ ，量化等级 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。

隶属度如图 1：

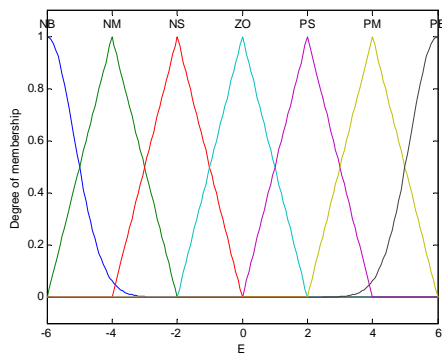


图 1 隶属度函数

根据工程设计人员的技术知识和操作人员的实际操作经验，制定模糊控制规则表。

控制规则共 49 条：

1. If (e is NB) and (ec is NB) then (kpf is PB) (kif is NB) (kdf is PS)
2. If (e is NB) and (ec is NM) then (kpf is PB) (kif is NB) (kdf is NS)
-
49. If (e is PB) and (ec is PB) then (kpf is NB) (kif is PB) (kdf is PB)

Kp 的模糊规则如表 1 所示，其他略。

表 1 Kp 控制规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

经过模糊逻辑推理，输出的是一个模糊集合，采用重心法解模糊化：

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n u_i A(u_i)}{\sum_{i=1}^n A(u_i)}$$

其中 $A(ui)$ 是论域 u 上集合 A 的 ui 个隶属度函数， ui 是论域 u 的第 i 个元素。

PID 控制器和模糊控制器结合起来，在运行中不断检测系统误差 e 和误差变化率 ec ，通过确定的模糊算法，得到合适的 Kp 、 Ki 、 Kd ，然后输出至 PID 控制器，从而控制系统运行。

2 各模块的算法设计与实现

卡尔曼滤波是一种根据时变随机信号的统计特性，对信号的未来值尽可能做出接近真值的估计方^[5]。其优点在于，不要求保存过去的观测数据，当新数据被测得后，借助系统本身的状态转移方程，即可递推出目标数据^[6,7]。

对于离散域线性系统：

$$\begin{aligned} y_v(k) &= Cx(k) + v(k) \\ x(k) &= Ax(k-1) + B(u(k) + w(k)) \end{aligned}$$

式中， $w(k)$ 为过程噪声信号， $v(k)$ 为测量噪声信号。

离散卡尔曼滤波器递推算算法为

$$\begin{aligned} M_n(k) &= \frac{P(k)C^T}{CP(k)C^T + R} \\ P(k) &= AP(k-1)A^T + BQB^T \\ P(k) &= (I_n - M_n(k)C)P(k) \\ x(k) &= Ax(k-1) + M_n(k)(y_v(k) - CAx(k-1)) \\ y_e(k) &= Cx(k) \end{aligned}$$

误差的协方差为

$$errcov(k) = CP(k)C^T$$

在环境中存在干扰的情况下,使用模糊 PID 控制,系统在一定范围内始终处于波动状态,无法克服控制干扰和有效消除测量噪声,很难达到预期的控制效果。

由于卡尔曼滤波器在抑制和消除噪声方面具有明显的优势,因此,本文设计用卡尔曼滤波器结合模糊 PID 对系统进行联合控制。

卡尔曼-模糊 PID 控制系统结构如图 2 所示:

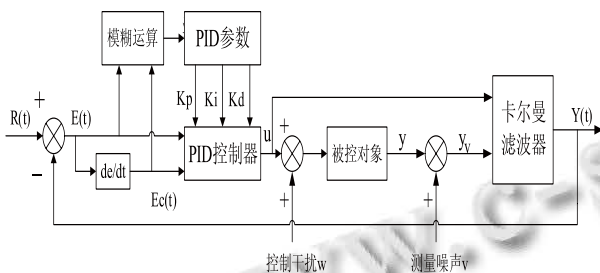


图 2 卡尔曼-模糊 PID 控制系统结构图

本次系统设计采用 MATLAB 中的 M 文件实现,设系统模型为:

$$sys = tf(b,[1,a,c])$$

其中 tf 表示传递函数,然后离散化:

$$dsys = c2d(sys,ts,'z')$$

其中 c2d 连续系统离散化 (continuous system to discret system), 'z' 表示离散化的过程中采用零阶保持操作。

取离散方程的零极点因式:

$$[num,den,ts]=tfdata(dsys,'v')$$

结合模糊 PID:

$$ki = ki_0 + k_pid(2)$$

$$kd = kd_0 + k_pid(3)$$

$$k_pid = evalfis([e,ec],A)$$

$$kp = kp_0 + k_pid(1)$$

其中 A 为模糊运算法则, e, ec 为系统误差和误差变化率, evalfis 为模糊运算。由模糊运算得出 PID 控制量:

$$u(k) = kp * error(k) + ki * ei + kd * (error(k) / ts)$$

其中,

$$error(k) = rin(k) - yout(k)$$

$$ei = ei + error(k) * ts$$

结合卡尔曼滤波:

$$M_2(k) = \frac{P(k)C^T}{CP(k)C^T + R}$$

$$P(k) = AP(k-1)A^T + BQB^T$$

$$P(k) = (I_2 - M_2(k)C)P(k)$$

$$x(k) = Ax(k-1) + M_2(k)(y_v(k) - CAx(k-1))$$

$$y_e(k) = Cx(k) + D$$

$$yout = y_e(k)$$

$$x(k) = Ax(k-1) + M_2(k)(y_v(k) - CAx(k-1))$$

$$y_e(k) = Cx(k) + D$$

$$yout = y_e(k)$$

由模糊控制器根据输入输出误差和误差变化率,经过设定的模糊运算法则,实时调整 PID 参数, PID 控制器发送控制量通过执行器作用于被控对象。同时卡尔曼滤波器根据控制量和被控对象的特性,对控制干扰和测量噪声产生滤波作用。

当然,卡尔曼滤波本身有一定的局限性^[6],对于干扰和噪声特别大,信号很发散的系,其滤波效果不明显,滤波之前需要采取其它控制措施。

3 MTALAB程序仿真与分析

系统是以 PLC 为核心的智能控制系统,首先由热电偶测量温度,其毫伏信号经多路开关送入信号调理电路,进行放大,再由 PLC 的 A/D 转换模块转换为数字量,然后由 CPU 进行数据处理,经过上述算法运算后输出数字控制信号,经 D/A 模块转换成模拟量,经驱动电路和调压器输出电压控制加热体的工作电流,从而对温度进行控制。

加热炉传递函数数学模型为:

$$G(s) = \frac{0.8}{s^2 + 25s + 2}$$

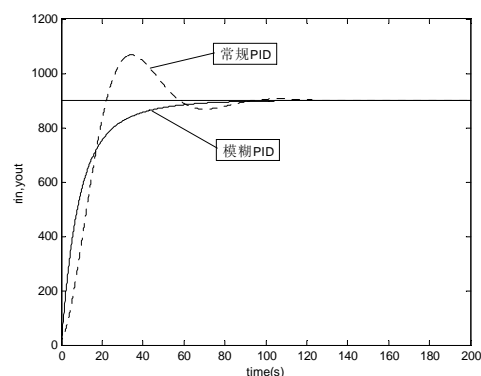


图 3 无干扰和噪声情况模糊 PID 和 PID 比较

本文采用 MATLAB 的 m 文件进行编程仿真,可以快速方便地实现多种规则和参数的准确仿真效果,极大的提高系统设计效率和准确性。

在系统没有控制干扰和测量噪声的情况下, Fuzzy PID 和 PID 温度控制效果如图 3 所示。

可以看出,与常规 PID 控制相比,模糊 PID 能够随着被控对象输出的变化改变控制参数,实现在线调整,调节时间较短,无超调现象,稳态误差较小,控制精度较高。

在环境中存在干扰及噪声的情况下,模糊 PID 响应曲线如图 4 所示。

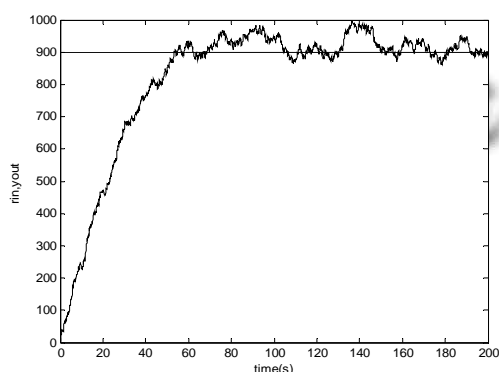


图 4 干扰和噪声下模糊 PID 响应曲线

由上图可以看出,单独使用模糊 PID 控制,对于干扰较大的系统,一直存在波动,很难达到稳态,无法克服控制干扰和有效消除测量噪声,难以达到理想的控制效果。

在环境中存在干扰的情况下,用卡尔曼滤波器结合模糊 PID 对系统进行联合控制,结果如图 5 所示。

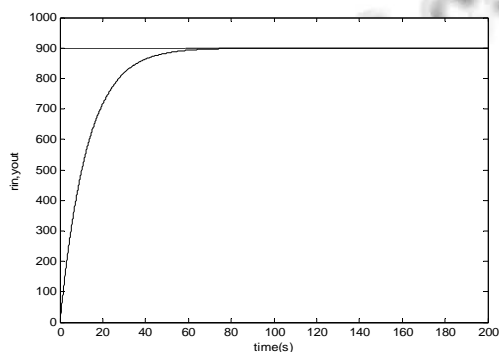


图 5 卡尔曼滤波模糊 PID 联合控制曲线图

比较图 4 和图 5 可看出,结合卡尔曼滤波的模糊 PID 控制系统可以有效抑制控制干扰和消除测量噪声,大大提高系统的稳定性,有效减小系统误差。

3 结论

本控制系统结合了模糊控制和卡尔曼滤波的优点,用模糊控制器实时调整 PID 控制参数,在环境中存在电磁干扰或者其他扰动和噪声的情况下,结合卡尔曼滤波器,提高了系统的鲁棒性,超调量和稳态误差小,可以实现对系统的有效控制,而且本算法在用物理器件实现上可行性高,控制简便。

参考文献

- 1 刘静纨,魏东,刘熙.变风量空调系统温度模糊 PID 控制.土木建筑与环境工程,2009,31(4):98-100.
- 2 刘金坤.先进 PID 控制及 MATLAB 仿真.北京:电子工业出版社,2004.
- 3 王舒彦,师宇,冯忠绪.基于模糊 PID 控制器的控制方法研究.机械科学与技术,2011,30(1):166-172.
- 4 虞旦,韦巍,张远辉.一种基于卡尔曼预测的动态目标跟踪算法研究.光电工程,2009,36(1):52-55.
- 5 尹晓红,赵韩,吴焱明,熊丹.基于卡尔曼滤波的自动引导车串级轨迹跟踪控制.农业机械学报,2010,41(2):180-184.
- 6 刘国海,李沁雪,施维,李康吉.动态卡尔曼滤波在导航试验状态估计中的应用.仪器仪表学报,2009,30(2):396-340.
- 7 王华强,王玉娟.箱式电热炉温场分析与模拟.合肥工业大学学报,2010,33(3):384-386.