

基于Matlab的模糊自整定PID控制器仿真研究

袁静雨, 虞启凯*, 张凡雨

南京科技职业学院智能制造学院, 江苏 南京
Email: *yuqikai@163.com

收稿日期: 2020年11月9日; 录用日期: 2020年11月30日; 发布日期: 2020年12月7日

摘要

为了克服传统PID控制缺点, 发挥其优点, 为了提高系统的动态性能, 本文利用模糊控制方法, 在线实现对PID参数自整定, 并举例使用MATLAB对系统进行仿真, 验证了该方法的可行性, 对其应用具有较高的参考价值。

关键词

模糊PID控制, Matlab, 参数自整定

Simulation Study of Fuzzy Self-Tuning PID Controller Based on Matlab

Jingyu Yuan, Qikai Yu*, Fanyu Zhang

School of Intelligent Manufacturing, Nanjing Polytechnic Institute, Nanjing Jiangsu
Email: *yuqikai@163.com

Received: Nov. 9th, 2020; accepted: Nov. 30th, 2020; published: Dec. 7th, 2020

Abstract

In order to overcome the shortcomings of traditional PID control, to give full play to its advantages, to improve the dynamic performance of the system, this paper uses fuzzy control method to realize on-line self-tuning of PID parameters, and uses MATLAB to simulate the system to verify the feasibility of the method, which has a high reference value for its application.

Keywords

Fuzzy PID Controller, Matlab, Parameter Self-Tuning

*通讯作者。



1. 引言

传统的 PID 控制因其算法可靠简单, 鲁棒优良, 可靠度高, 在工业过程中得到了广泛的应用, 特别适用于建立一个精确的数学模型确定控制系统的确定性控制。李文宇等对 PID 控制进行了研究, 并取得了一定的应用[1]-[7], 但在非线性、时变、耦合和参数及结构不确定系统中, 传统的 PID 控制器参数整定比较困难, 结果会使得系统性能变差, 导致工况适应性不好。另外针对复杂的控制过程, 传统 PID 控制器制效果更差, 特别是参数调节无法达到理想效果。基于这一点, 为了拓展 PID 控制器适应范围, 特别是复杂工况和控制高要求情况, 参数自动整定对 PID 控制器尤为关键。随着时代的进步, 数字智能控制器已经出现, 开始应用实际生产中, 参数自动整定可以智能实现, 文献[8]-[13]将 PID 控制和模糊控制相结合进行研究, 并在某些领域取得了不错的效果。本文结合了模糊控制与 PID 控制, 运用模糊推理方法, 在线实现对 PID 参数自整定, 调整最佳 PID 参数, 设计了参数模糊的自整定 PID 控制器, 并举例使用 MATLAB 对系统进行仿真。

在 PID 控制器参数模糊自整定系统中, 把偏差 e_f 和偏差变化率 \dot{e}_f 作为输入, 通过模糊推理的方法, 可以实现 PID 参数 e_f 和 \dot{e}_f 不同时刻自整定需求。便构 PID 控制器参数自整定, 参数模糊自整定如图 1 所示。

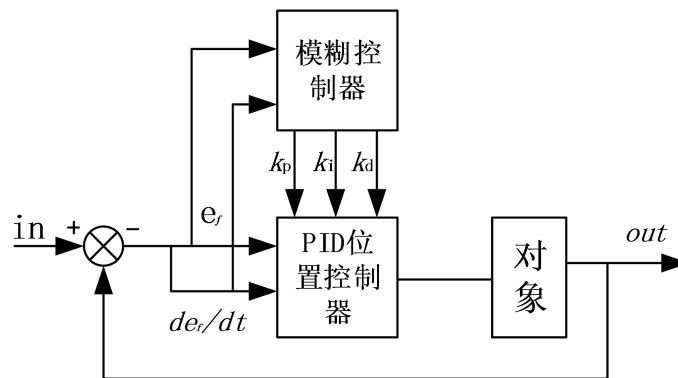


Figure 1. Fuzzy self-tuning PID controller structure

图 1. 模糊自整定 PID 控制器结构

模拟 PID 控制器是线性控制器, 是连续的, 表达式如式(1)及式(2)所示。

$$e_f(t) = rin(t) - out(t) \quad (1)$$

$$u(t) = k_p e_f(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e_f(t) dt + T_d \frac{de_f(t)}{dt} \quad (2)$$

式中, k_p ——比例系数; T_i ——微积常数; T_d ——微分常数; $rin(t)$ 为输入信号; $out(t)$ 为输出信号; $u(t)$ 为控制器输出。

数字 PID 控制器有位置式及增量式, 表达式如式(3)及式(4)所示。

$$u(k) = k_p e_f(k) + k_i \sum_{j=0}^k e_f(j)T + k_d \frac{e_f(k) - e_f(k-1)}{T} \quad (3)$$

$$\Delta u(k) = k_p (e(k) - e_f(k-1)) + k_i e_f(k) + k_d (e_f(k) - 2e_f(k-1) + e_f(k-2)) \quad (4)$$

式中, $k_i = k_p/T_i$, $k_d = k_p/T_d$, T 为采样周期, k 为采样序号; $u(k)$ 为第 k 次采用时刻的计算机输出值。

PID 控制器的参数 k_p , k_i , k_d 调整, 是利用模糊规则找到其与输入误差 e_f 和误差变化率 \dot{e}_f 之间关系, 在系统运行时通过一个持续的模糊检测 e_f 和 \dot{e}_f , 根据模糊控制处理原则对 3 个控制参数分别进行在线的模糊修改, 以便达到系统动态、静态性能要求。

2. 模糊控制器的设计

2.1. 语言变量隶属度函数的确定

模糊 PID 控制是通过计算机采样被控对象的精确值, 并与给定值比较, 得到误差 e_f , 并误差变化率 \dot{e}_f 一起作为模糊控制器的输入量。再经过根据模糊推理得到 PID 参数 k_p , k_i , k_d , 这样可以使不同时刻的 e_f 和 \dot{e}_f 对 PID 参数自整定要求得到满足。其中 k'_p , k'_i , k'_d 为预整定值。 $k_p = k'_p + \Delta k_p$, $k_i = k'_i + \Delta k_i$, $k_d = k'_d + \Delta k_d$ 。

对于两输入 (e_f 和 \dot{e}_f) 和控制器三输出 (k_p , k_i , k_d) 都采用如下模糊集:

{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大}, 用英文字头缩写为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 其中 e_f 和 \dot{e}_f 的论域为 $[-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3]$, k_p , k_i , k_d 的论域为 $[-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6]$, 隶属函数曲线见图 2。

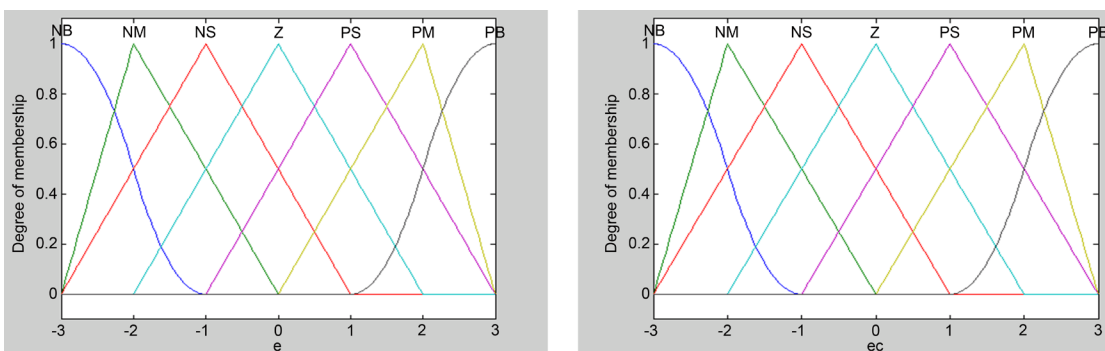


Figure 2. e_f and \dot{e}_f membership function curve

图 2. e_f 和 \dot{e}_f 隶属函数曲线

k_p , k_i , k_d 的模糊规则表建立好后, 可对 k_p , k_i , k_d 进行自适应校正。应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表, 查出修正参数代入式(5)计算:

$$k_p = k'_p + \{e_f, \dot{e}_f\} p, \quad k_i = k'_i + \{e_f, \dot{e}_f\} i, \quad k_d = k'_d + \{e_f, \dot{e}_f\} d \quad (5)$$

具体实现如工作流程图 3 所示, 完成对 PID 参数在线自动校正。其隶属函数为:

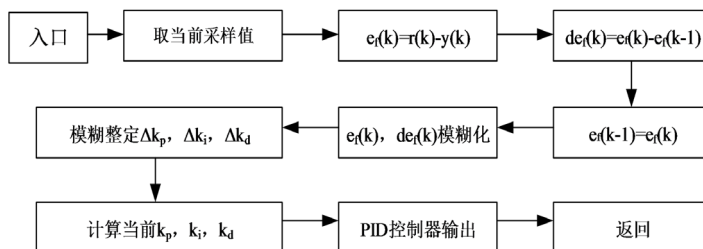


Figure 3. The flow chart of fuzzy PID control online self-correction

图 3. 模糊 PID 控制在线自校正流程图

2.2. 建立模糊控制器的控制规则表

系统输出特性关键是对参数 k_p 、 k_i 和 k_d 的整定, 参数 k_p 、 k_i 和 k_d 又与输入参数 e_f 和 \dot{e}_f 有关, 参数 k_p 、 k_i 和 k_d 自整定原则如下:

1) 当 $|e_f|$ 数值大时, 无论误差是变大还是变小, 都选择 $|e_f|$ 最大(或最小)值输出, 这样就能够对误差迅速调整。另外为了避免积分饱和现象, 此时参数 k_p 取值应较大, 参数 k_i 取较小值, 参数 k_d 取零。

2) 当 $e_f * \dot{e}_f > 0$ 时, 即误差绝对值在增大。当误差绝对值较大时, 加大控制器控制作用, 使得误差绝对值朝变小, 此时参数 k_p 取值应较大, 参数 k_d 也不能太大, 参数 k_i 取较小的值。另外当误差绝对值较小时, 控制器只需要作较小调节就可以, 只要阻止误差绝对值变大即可。

3) 当 $e_f * \dot{e}_f < 0$ 或 $e_f = 0$ 时, 说明系统误差小, 实际值与理论值接近, 或者系统处在一个平稳状态。此时, 控制器输出可保持不变。

4) 当 $e_f * \dot{e}_f > 0$, $e_f \neq 0$ 时, 表明实际值与理论值差值恒定或一致, 系统处于稳态性能状态, 参数 k_p 和 k_i 采取较大值, 另外选取 k_d 值适当可以避免误差在给定值附近振荡。设

$$\begin{cases} k_p = k'_p + \Delta k_p \\ k_i = k'_i + \Delta k_i \\ k_d = k'_d + \Delta k_d \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中 k'_p , k'_i 和 k'_d 为传统 PID 参数, 其值通常采用 Z-N 法确定。根据专家经验和 PID 参数的整定规则, 用 IF-THEN 方式, 得到 Δk_p 、 Δk_i 和 Δk_d 整定规则, 如表 1 所示。

Table 1. The fuzzy rules of $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$

表 1. $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的模糊规则

		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB
NB			NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO

Continued

NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	PS	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

		\dot{e}_f							
		Δk_p							
		e_f	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS		
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO		
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO		
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO		
PS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	ZO	ZO		
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB		
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB		

根据误差 e_f 和误差变化率 \dot{e}_f 的论域值，为模糊控制量的论域值：

$$e_f, \dot{e}_f = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$$

模糊控制子集可表示为：

$e_f, \dot{e}_f = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。由两输入(e_f, \dot{e}_f)，再根据三个参数模糊规则表构造一个三输出($\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$)的模糊控制器。

3. Matlab 仿真

3.1. 模糊控制器的编辑

打开 Matlab 软件，运行 Fuzzy 函数，并新建一个的 FIS 文件，分别定义参数隶属函数和量化区间，定义输入模糊控制规则。设与(and)为 min，或(or)为 max，推理(implication)为 min，合成(agggregation)为 max，去模糊化(defuzzification)为重心平均(centroid)，FIS 系统文件就建立了。

3.2. 仿真实例

设被控对象传递函数为

$$G(s) = \frac{523500}{s^3 + 87.35s^2 + 10470s}$$

根据模糊规则和隶属函数，对 PID 控制进行仿真，设参数 $k_p = 0.4$ 、 $k_i = 0$ 和 $k_d = 0$ ，相应响应曲线见图 4~7。

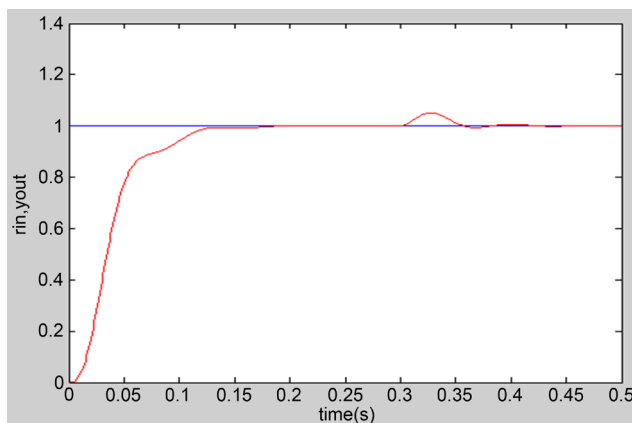


Figure 4. Fuzzy PID control step response
图 4. 模糊 PID 控制阶跃响应

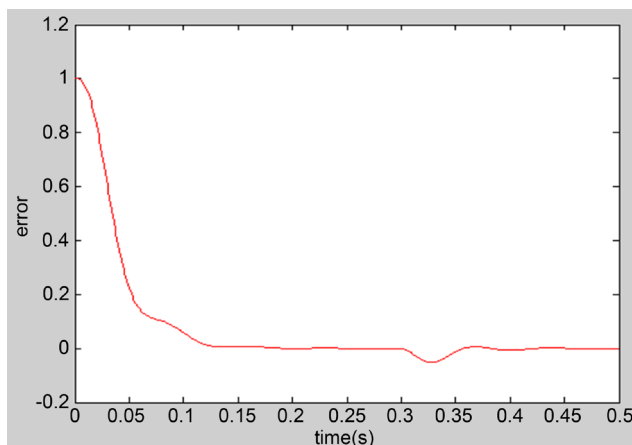


Figure 5. Fuzzy PID control error response
图 5. 模糊 PID 控制误差响应

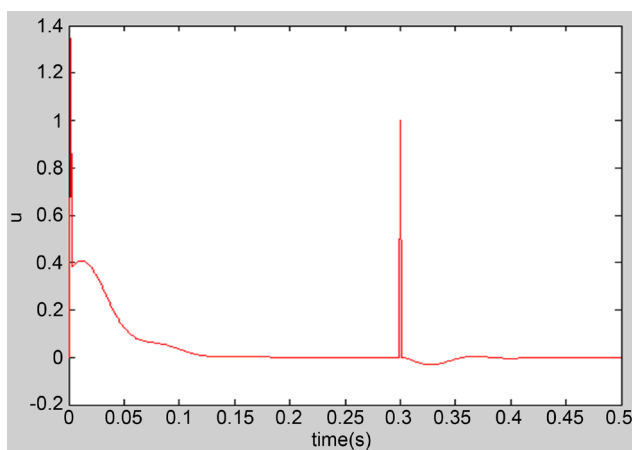


Figure 6. Controller output u
图 6. 控制器输出 u

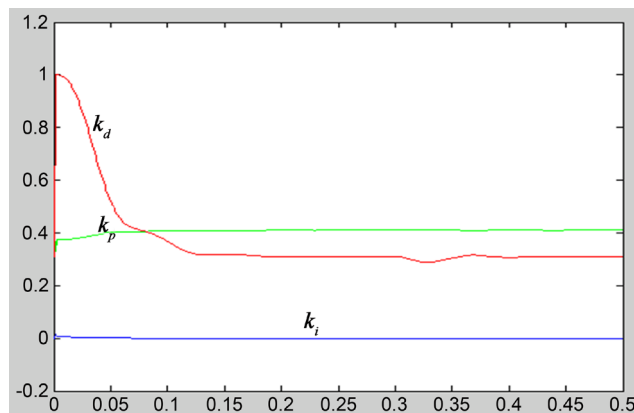


Figure 7. The self-tuning process of k_p , k_i and k_d

图 7. k_p 、 k_i 和 k_d 的自整定过程

由于传递函数是一个 3 阶对象，传统的 PID 控制参数不容易得到理想结果，主要是整定 k_p 、 k_i 和 k_d 3 个参数，用模糊规则对 PID 参数进行自整定后，明显得到了不错的控制效果。从图可以看出系统的性能有着良好的稳定性和快速性收敛性，该控制方案具有很好的应用价值。

4. 结束语

模糊 PID 自整定控制继承了模糊控制和 PID 控制的优点，摒弃了两者的缺点，用模糊推理规则，实时整定 PID 的参数，获得理想参数，另外又通过对一个 3 阶对象进行仿真，得出该方法对系统的稳定性和快速反应有明显提高。该方法简单易用且实现方便，对现实控制有一定的参考意义。

基金项目

江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(201912920001Y)；南京科技职业学院资助项目(NHKY-2017-06, NHKY-2017-14)。

参考文献

- [1] 李文宇, 王延军, 高飞, 等. 滞后系统的一种改进 PID 控制方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(1): 19-21.
- [2] 王明迪, 刘国栋, 王正, 等. 基于 PID 控制的舱压调节系统设计[J]. 液压与气动, 2019(10): 104-108.
- [3] 黄文杰, 向凤红, 毛剑琳. 引入加速度改进板球系统 RBF-PID 轨迹跟踪控制[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2019(6): 55-62.
- [4] 李强. 基于 IBC-PID 控制的四旋翼轨迹跟踪控制[J]. 动力学与控制学报, 2019, 17(1): 91-96.
- [5] 严刚峰. PID 控制器参数整定复杂性的分析[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 64-68.
- [6] 何小映. 基于 MCGS 的 PID 控制参数自整定研究[J]. 电子设计工程, 2019, 27(20): 55-58, 63.
- [7] 史燕亮. 基于 PID 控制的综采面降尘喷雾恒压供水系统研究[J]. 中国化工贸易, 2019, 11(16): 179-180.
- [8] 刘浩蓬, 龙长江, 万鹏, 等. 植保四轴飞行器的模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 71-77.
- [9] 李浩. 模糊 PID 控制方法在四旋翼飞行器系统中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2015.
- [10] 朱瑛, 邹春喜, 赵建村. 基于模糊自适应 PID 控制的六旋翼飞行器稳定性控制(英文) [J]. 机床与液压, 2016(24): 39-46.
- [11] 李宗帅, 张思博. 基于自适应模糊 PID 的飞机客舱温度控制(英文) [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(11): 372-379.
- [12] 李永伟, 王红飞. 六旋翼植保无人机模糊自适应 PID 控制[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(1): 59-65.
- [13] 荆学东, 潘翔, 汪泽涛. 农药喷洒四轴飞行器的模糊 PID 姿态控制[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(5): 454-460.