

模糊免疫自适应控制系统的 Matlab 仿真研究

魏 星, 刘 琨, 王亚军

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在比较免疫 PID 控制算法、模糊自适应 PID 控制算法和常规 PID 控制算法差别的基础上应用生物免疫调节原理和模糊控制理论设计了一种模糊免疫 PID 控制器, 并对一典型电液位置伺服系统进行了 Matlab 仿真, 结果表明, 此控制器具有较好的快速响应特性及较高的鲁棒性。

关键词: PID; 免疫; 模糊; 自适应; 伺服系统

中图分类号: TP 273⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)05-0034-03

在伺服系统的控制中, 很多学者提出了不同的控制算法^[1], 对伺服系统的设计起到了积极的推动作用。PID 控制策略是最早发展起来且目前应用得最广泛的控制策略之一。本文在传统的 PID 控制基础上比较了模糊自适应 PID 控制和免疫 PID 控制的差别^[1~3]。应用生物免疫调节原理和模糊控制理论设计了一种模糊免疫自适应 PID 控制器, 并将其应用于带压力反馈的马达电液位置伺服系统中, 仿真结果表明, 此控制器具有良好的性能。

1 模糊自整定 PID 控制原理

最常规 PID 控制作用可用位置式算式^[4]描述:

$$u(k) = k_p E(k) + k_i \sum_{i=0}^k E(k) + k_d \dot{E}(k) \quad (1)$$

式中 $E(k)$, $\sum_{i=0}^k E(k)$, $\dot{E}(k)$ 分别为系统偏差、偏差

和与偏差变化率; k_p, k_i, k_d 分别为比例、积分、微分作用系数。

模糊自整定控制器是以系统误差 e 和误差变化率 $\dot{e}$ 作为输入语言变量; 以 k_p, k_i, k_d 作为输出语言变量的两输入三输出的模糊控制器。PID 参数模糊自整定是找出 PID 的 3 个参数 k_p, k_i, k_d 和 $e, \dot{e}$ 之间的模糊关系, 在控制过程中不断检测 $e, \dot{e}$, 根据模糊控制原理对 3 个参数进行在线修改, 满足不同的控制要求。在此, 可以通过计算出当前系统误差 e 和误差变化率 $\dot{e}$, 控制系统通过对模糊逻辑规则的处理、查表和运算, 完成对 PID 参数的在线调整。

2 模糊免疫 PID 控制原理

2.1 生物免疫系统调节原理^[5,6]

免疫系统是机体对生物性干扰的防御系统, 对外来侵犯的抗原可产生相应的抗体来抵御。抗体和抗原结合后, 会产生一系列反应以消除抗原影响。免疫响应过程是免疫细胞对抗原的识别、活化、分化和效应过程, 有体液免疫和细胞免疫两种。在免疫响应过程中主要是通过 T 细胞不同亚群间相互作用来完成,

其中 T_H 细胞(helper T cell)和 T_S 细胞(suppressor T cell)是较为重要的两种免疫调节细胞。

以体液免疫响应为例, 抗原由抗原呈递细胞 APC(Antigen Presenting Cell)消化, 首先活化 T_H 细胞, 并释放淋巴因子, 进而活化 B 细胞产生抗体(Antibody), APC 呈递的抗原还能缓慢地活化 T_S 细胞, 活化的 T_S 细胞可以对 T_H 细胞和 B 细胞产生抑制作用, 以保证免疫系统的稳定性。体液免疫响应过程如图 1 所示。

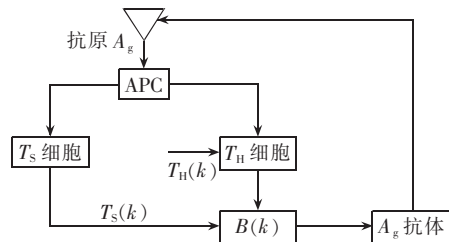


图 1 体液免疫响应过程示意图

Fig.1 The sketch diagram of body liquid immunity response

2.2 免疫 PID 控制算法^[6]

免疫系统固然十分复杂, 但其抵御抗原的自适应能力却是十分明显的。由上述免疫反馈原理可知, 虽然 T_S 细胞对 T_H 细胞和 B 细胞都有抑制作用, 为了简单起见, 在本文中将 T_S 的抑制作用集中表现在对 B 细胞的抑制作用上, 由于抗原的入侵, B 细胞一方面受到 T_H 细胞的活化作用, 另一方面也接受 T_S 细胞的抑制作用。假设第 k 代的抗原数量为 $\varepsilon(k)$, 由抗原刺激的 T_H 细胞的输出为 $T_H(k)$, T_S 细胞对 B 细胞的影响为 $T_S(k)$, 则 B 细胞接收的总刺激为

$$S(k) = T_H(k) - T_S(k)$$

$$T_H(k) = k_1 \varepsilon(k), T_S(k) = k_2 f(\Delta S(k)) \varepsilon(k) \quad (2)$$

若以抗原的数量 $\varepsilon(k)$ 作为偏差, B 细胞接收的总刺激 $S(k)$ 作为控制输入, 则有如下的反馈控制规律:

$$u(k) = K[1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))]e(k) = k_{pl} e(k) \quad (3)$$

式中 $k_{pl} = K[1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))]$; $K = k_1$ 为控制反应速度; $\eta = k_2 / k_1$ 为控制稳定效果; $f(u(k), \Delta u(k))$ 为一选定的非线性函数。

非线性函数 $f(u(k), \Delta u(k))$ 的确定可利用模糊控制理论求得比较逼近的函数。

首先,对输入量 $u(k)$, $\Delta u(k)$ 和输出量 $f(\cdot)$ 进行模糊化处理。为简化计算,输入量只需取 2 个模糊集来模糊化,分别为“正”(P)和“负”(N),输出变量被 3 个模糊集模糊化,分别为“正”(P)“零”(Z)和“负”(N),以上隶属度函数都定义在 $(-\infty, +\infty)$ 区间。这里采用 Z 形、S 形和三角形隶属函数的组合描述输入变量和输出变量的模糊集。

对 $f(\cdot)$ 的确定可采用如下的控制规则:

- a. If u is P and Δu is P then $f(u, \Delta u)$ is N (1)
- b. If u is P and Δu is N then $f(u, \Delta u)$ is Z (1)
- c. If u is N and Δu is P then $f(u, \Delta u)$ is Z (1)
- d. If u is N and Δu is N then $f(u, \Delta u)$ is P (1)

各规则中,使用 Zadeh 的模糊逻辑 AND 操作,采用 Mamdani 模糊推理,并采用 mom 反模糊化方法得到免疫控制器的输出 $f(\cdot)$ 。

实际上,基于免疫反馈原理的免疫控制器就是一个非线性比例控制器,其比例系数 $k_{pi} = K[1 - \eta \times f(u(k), \Delta u(k))]$ 随控制器输出的变化而变化,其中 K 为增益。免疫 PID 控制器的输出为

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j)T + k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (4)$$

$$u(k) = u(k-1) + k_{pi} \{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{k_i}{k_p} e(k) + \frac{k_d}{K_p} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \} = u(k-1) + k_{pi} \{ [e(k) - e(k-1)] + k'_i e(k) + k'_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \} \quad (5)$$

式(4)为位置式,式(5)为常规增量式。

3 模糊免疫自适应 PID 控制原理

由于模糊自整定 PID 控制和免疫 PID 控制都有其各自的优点,在对大惯性和纯滞后系统的控制中都有较好的响应特性。但也有其各自的缺点,本文提出的自适应 PID 系统融合了两者的优点,取得了显著的效果,其控制结构如图 2 所示。

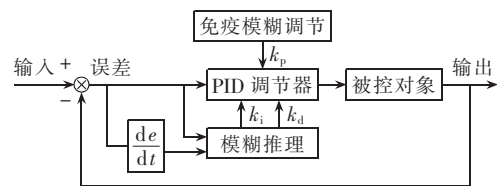


图 2 模糊免疫自适应 PID 系统框图
Fig.2 The block diagram of fuzzy-immune-PID system

在此对比例系数 k_p 采用免疫模糊调节, k_i, k_d 用模糊控制原理对其进行在线修改,以满足不同误差 e 和误差变化 $\dot{e}$ 对控制参数的不同要求,使被控对象有良好的快速响应特性和鲁棒性,从而使控制器有很强的自适应性。

这里,按照文献[3]中的方法,用 7 个语言模糊集描述输入变量 $(e, \dot{e})$ 和输出变量 $(\Delta k_i, \Delta k_d)$,其模糊子集仍为 $e, \dot{e} = \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$,子集中的元素分别代表负大,负中,负小,零,正小,正中,正大。假设 $e, \dot{e}$ 和 k_p, k_i, k_d 都服从正态分布, $\Delta k_i, \Delta k_d$ 的模糊控制规则亦与文献[3]相同。唯一不同的是:此 Mamdani 模糊推理系统为两输入 $(e, \dot{e})$ 两输出 $(\Delta k_i, \Delta k_d)$ 系统。把 k_p 的自适应调整留给免疫模糊调节完成。综合上述可得出模糊免疫自适应控制器的控制式:

$$u(k) = K[1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))]e(k) + (k'_i + \Delta k_i) \sum_{j=0}^k e(j)T + (k'_d + \Delta k_d) \frac{e(k) - e(k-1)}{T}$$
$$k_p = K[1 - \eta f(u(k), \Delta u(k))]$$
$$k_i = k'_i + \{E_i, \dot{E}_i\}_i = k'_i + \Delta k_i$$
$$k_d = k'_d + \{E_i, \dot{E}_i\}_d = k'_d + \Delta k_d \quad (6)$$

式中 k_p 采用免疫模糊调整; k_i, k_d 采用模糊自适应调整; k'_p, k'_i, k'_d 为模糊整定 PID 参数的初值; $\{E_i, \dot{E}_i\}_i$ 和 $\{E_i, \dot{E}_i\}_d$ 为模糊推理的结果。

4 Matlab 仿真研究

选取一种带有压力反馈的阀控马达电液位置伺服系统,其系统原理图如图 3 所示,图中用压差传感器测取液压马达的负载压降 P_L ,反馈到伺服阀的输入端,构成压力反馈。

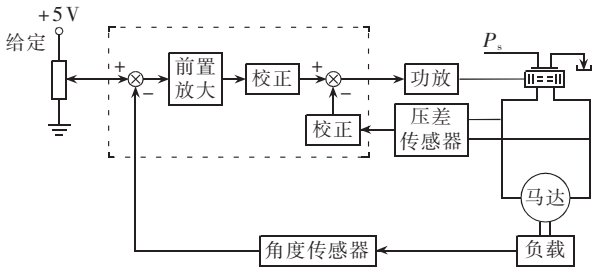


图 3 马达电液位置伺服系统原理图
Fig.3 The principle diagram of motor electro-hydraulic servo system

暂不考虑伺服阀、传感器和放大器的动态特性,并假定无弹性负载,可得到系统的方块图见图 4(图中 K_e 为前置放大器增益, K_q 为伺服阀增益, K_v 为伺服阀滚动力系数, D_m 为马达排量, J 为负载转动增量, K_f 为传感器反馈增益, T_L 为马达轴上的负载力矩,其他符号意义见参考文献[7])。

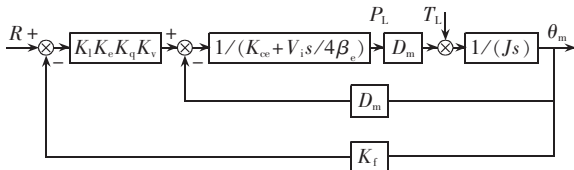


图 4 马达电液位置伺服系统框图
Fig.4 The block diagram of motor electro-hydraulic servo system

由上述方块图可以得到系统的固有传递函数为

$$G(s) = \frac{24\ 090}{s^3 + 51.89s^2 + 1\ 309.2s}$$

设采样时间 2 ms, 分别采用常规 PID、模糊自适应 PID 及免疫 PID 控制, 模糊免疫自适应 PID 控制测试其阶跃输出, 仿真时间 2 s, 即 1 000 个采样时间。并在第 300 个采样时间输出加 1.0 干扰, 测试系统鲁棒性。在常规 PID 控制中, 经过认真选择, 取 $k_p = 0.5$, $k_i = 0.000\ 4$, $k_d = 0.006$ 。在模糊自整定控制中, 取初值 $k'_p = 0.8$, $k'_i = 0.0$, $k'_d = 0.4$ 。在免疫 PID 控制中, 取 $K = 0.3$, $\eta = 0.80$ 。最后, 在模糊免疫自适应 PID 控制中, 同样取 $K = 0.3$, $\eta = 0.80$, $k'_i = 0.0$, $k'_d = 0.4$, 以上 4 种控制方法得出的阶跃响应曲线见图 5, 图中 1 为普通 PID 系统, 2 为免疫 PID 系统, 3 为模糊自整定 PID 系统, 4 为模糊免疫自整定 PID 系统。

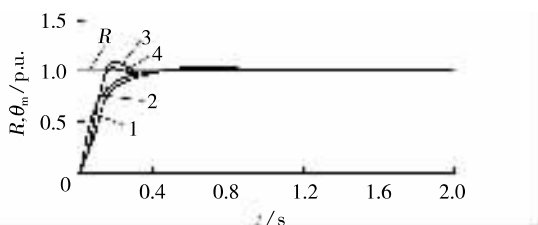


图 5 4 种 PID 控制的仿真曲线

Fig.5 Simulative curves by four kinds of PID control

由上面的阶跃响应曲线可以看出, 跟常规 PID 控制相比, 模糊免疫自适应 PID 响应曲线最具优越性, 它响应快速、超调量很小, 并且鲁棒性颇高, 即它结合了免疫 PID 控制和模糊自整定 PID 控制的优点。因为普通的免疫控制虽能达到快速响应的目的, 但是它的鲁棒性不高, 在输出加了干扰后系统会变得不稳定, 而模糊自整定 PID 控制的超调量又比较大, 但是其鲁棒性很高, 所以将两者的优点都体现出来的模糊免疫自整定 PID 控制就取得了较好的控制效果, 也具有很强的自适应性。

5 结语

从以上实际系统的仿真实例可以看出, 模糊免疫自适应控制体现出了常规 PID 控制所不能比拟的

诸多优越性, 它具有响应速度快、过渡过程时间短、系统鲁棒性高等一系列优点。而且利用了 Matlab 的 m 文件编程方法实现控制系统的建模和仿真, 计算精度高。整个过程采用模块化设计, 为各种智能仪器的控制、建模和仿真提供了极大方便。

参考文献:

- [1] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 李贻斌, 徐国华, 孔 慧. 最佳电液位置伺服系统的设计[J]. 系统工程与电子技术, 1996, 9(10): 40-44.
LI Yi-bin, XU Guo-hua, KONG Hui. The design of best eletro-hydraulic position servo-system[J]. **System Engineering and Electronic Technology**, 1996, 9(10): 40-44.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] 高宏伟, 赵宝勇. 模糊自整定 PID 控制策略的 Matlab 仿真研究[J]. 电气传动自动化, 2002, 24(5): 21-27.
GAO Hong-wei, ZHAO Bao-yong. Matlab simulation research on fuzzy self-adjusting using PID control strategy[J]. **Electric Drive Automation**, 2002, 24(5): 21-27.
- [5] 过润秋, 王小红. 基于免疫反馈机理的温度控制研究[J]. 西安电子科技大学学报, 2003, 30(6): 718-721.
GUO Run-qiu, WANG Xiao-hong. The research on temperature auto-control based on the immune feedback mechanism[J]. **Journal of Xidian University**, 2003, 30(6): 718-721.
- [6] 韦 巍, 张国宏. 人工免疫系统及其在控制系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 158-160.
WEI Wei, ZHANG Guo-hong. Artificial immune system and its applications in the control system[J]. **Control Theory and Applications**, 2002, 19(2): 158-160.
- [7] 蔡廷文. 液压系统现代建模方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

魏 星(1980-), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要从事智能控制在电力系统中应用、电力系统在线监测方面的研究工作(E-mail: weixing520@163.net);

刘 琨(1981-), 女, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事电力系统运行控制方面的研究工作;

王亚军(1981-), 男, 湖北当阳人, 硕士研究生, 主要从事智能控制系统方面的工作。

Simulative research on fuzzy-immune-PID control system with Matlab

WEI Xing, LIU Kun, WANG Ya-jun

(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The differences among immune-PID control algorithm, fuzzy-PID control algorithm and general PID control algorithm are compared, based on which, a kind of fuzzy-immune-PID controller is designed by using biological immune principle and fuzzy control theory. A typical electro-hydraulic servo system is simulated with Matlab, and the results show that the proposed controller has effective response and robust characteristics.

Key words: PID; immunity; fuzzy; self-adapting; servo-system