

大纯滞后对象的免疫-Smith 控制器研究

任伟建 乔建国

(大庆石油学院电气信息工程学院, 大庆 163318)

摘要 免疫控制器是借鉴生物系统的免疫机理而设计的一种智能控制器,具有参数调整时间短、抗干扰能力强等特点。免疫算法中的抑制细胞相当于比例积分微分控制器的反馈环节,该细胞只与前面时刻的抗体变化即控制器输出有关,而与系统当前的测量值无关,可以避免由于系统的滞后对控制造成的影响。将免疫控制器和 Smith 预估器结合设计一种新型控制器,使该控制器既能克服纯滞后对系统性能的影响,又能降低单独采用 Smith 预估控制时对系统模型准确性的依赖。仿真结果表明,免疫-Smith 控制器的性能在模型匹配和失配情况下均优于其它控制器。

关键词 大纯滞后 免疫算法 Smith 算法 PID 控制

中图法分类号 TP202; **文献标志码** A

滞后的现象普遍存在于多数工业过程当中,如化工、热工过程等。这种滞后的存在对系统的控制极为不利,严重时甚至会破坏系统的稳定性。滞后时间与系统时间常数的比值越大,其对系统性能的影响也就越大。大纯滞后系统一直是过程中的控制难点。因此人们对它进行了大量的研究,常用的控制方法主要有 PID 控制、Smith 预估控制,但是 PID 算法不能克服纯滞后对系统带来的影响,而 Smith 预估控制又对控制对象的模型精度要求过高,实际生产中控制对象的模型很难精确得到,这样控制效果将受到影响^[1]。近年来神经网络、遗传算法等智能算法发展迅速,很多人都做了这方面的研究,并取得了一定的成果,但是由于这些智能算法计算量过大,很难应用到在线的生产设备中,人工免疫算法能在动态变化的环境中维持其自身系统的稳定,是一个具有极强鲁棒性的自适应系统,能处理各种干扰和不确定性。免疫响应和过程控制存在很大的相似之处,把生物体看成被控对象,把抗原的入侵和内部细胞的突变看成各类干扰,把免疫系统看成控制器,这样免疫响应就类似于一个对干扰的控制过程^[2]。因此本文将人工免疫算法

与传统的控制算法相结合设计一种新型的免疫-Smith 控制器,用于对大纯滞后对象的控制,以期改善系统性能。

1 免疫-Smith 控制器

免疫控制器是借鉴生物系统的免疫机理而设计的一种智能控制器。生物的免疫系统由淋巴细胞和抗体分子组成,淋巴细胞又由胸腺产生的 T 细胞(分为辅助 T 细胞 T_h 和抑制 T 细胞 T_s)和骨髓产生的 B 细胞组成。当抗原侵入机体经周围细胞消化后,将信息传递给 T 细胞,即传递给细胞 T_h 和细胞 T_s ,然后刺激 B 细胞。 B 细胞产生抗体以消除抗原。当抗原较多时,机体内的 T_h 细胞也较多,而 T_s 细胞却较少,从而会产生较多的 B 细胞。随着抗原的减少,体内的 T_s 细胞增多,它抑制了 T_h 细胞的产生,则 B 细胞也随着减少。经过一段时间免疫反馈系统便趋于平衡。

虽然 T_s 细胞对 T_h 细胞和 B 细胞都有抑制作用,为了使控制器的结构简化,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,这样第 k 代 B 细胞的浓度可以这样表示

$$B(k) = T_h(k) - T_s(k) \tag{1}$$

$$T_h(k) = K_1 \varepsilon(k) \tag{2}$$

$$T_s(k) = K_2 \{f[\Delta B(k-d)]\} \varepsilon(k) \tag{3}$$

式中 $\varepsilon(k)$ 为第 k 代抗原浓度; K_1 为 T_h 细胞的促进因子; K_2 为 T_s 细胞的抑制因子; $\Delta B(k)$ 为 B 细胞的浓度变化,计算公式如式(4):

$$\Delta B(k-d) = B(k-d) - B(k-d-1) \tag{4}$$

式(4)中 d 为免疫响应的延迟时间; f 为非线性函数,与 B 细胞的浓度变化有关,表示在第 $(k-d)$ 代时, B 细胞分泌的抗体与抗原相互作用后的免疫效果。

由式(1)~(4),可得到 B 细胞的浓度与抗原浓度的关系式(5):

$$B(k) = K_1 \varepsilon(k) - K_2 \{f(\Delta B(k-d))\} \varepsilon(k) = K \{1 - \eta f[\Delta B(k-d)]\} \varepsilon(k) \tag{5}$$

式(5)中 $K = K_1$; $\eta = \frac{K_2}{K_1}$,表示 T_s 与 T_h 作用的比例系数。

将免疫系统与控制系统对比有:

- (1) 抗体,抗原的繁殖第 k 代看作离散系统的第 k 个采样时间。
- (2) 第 k 代的抗原浓度 $\varepsilon(k)$ 相当于第 k 个采样时刻的给定值与输出值的偏差 $e(k)$ 。
- (3) 第 k 代的 B 细胞浓度 $B(k)$ 相当于第 k 个采样时刻的控制器输出 $u(k)$ 。

由以上对比以及公式(5)可以得到免疫控制器如式(6):

$$u(k) = K \{1 - \lambda \eta f[\Delta u(k-d)]\} e(k) \tag{6}$$

式(6)中 K 可以根据所处理的控制系统特性进行选择,文中为 PID 控制器形式, $\lambda = -1$ 时表示响应过程中的免疫促进, $\lambda = 0$ 时表示免疫稳定, $\lambda = 1$ 时表示免疫抑制。

f 免疫响应过程中起着非常重要的作用,根据生物免疫原理 f 与控制器输出的变化有关。设控制器输出变化如式(7):

$$\nabla u(k-d) = u(k-d) - u(k-d-1) \tag{7}$$

根据文献[3],取非线性函数为如式(8),即 f 为函数:

$$f(\nabla u(k-d)) = K(1.0 - \exp(-u(k)^2/\alpha)) \tag{8}$$

式(8)中 $\alpha > 0$ 是一个改变函数形状的参数, α 越大,曲线越平滑。但对所有的 Δu 总有 $0 < f_s(\nabla u(k-d)) < 1$ 。

3 仿真研究

设系统的传递函数为 $G_p(s) = G_0(s)e^{-\tau s} = \frac{1}{10s+1}e^{-10s}$ 。研究系统的单位阶跃响应,采样时间 $T = 1$ s。

3.1 PID 控制

调整控制器的参数使: $K = 1.21$, $T_i = 14.5$, $T_d = 1.5$,仿真曲线如图 1 所示。

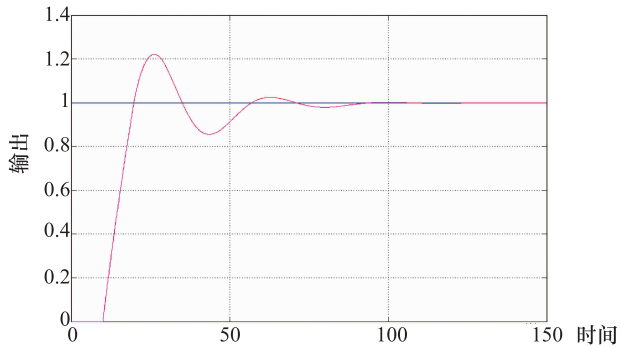


图 1 PID 控制仿真曲线

由图 1 计算控制系统性能指标,允许误差 $\Delta = 5\%$ 时,调整时间为 $t_s = 52.7$ s,允许误差 $\Delta = 2\%$ 的调整时间为 $t_s = 81.5$ s,超调量 $\sigma_p = 22.2\%$,上升时间 $t_r = 7.8$ s。

3.2 Smith 预估控制

3.2.1 预估模型准确时的 Smith

预估控制当取 Smith 预估模型 $G_m(s) = \frac{1}{10s+1}$,即预估模型与控制对象一致时,仿真结果如图 2 所示。

由图 2 计算得,允许误差 $\Delta = 5\%$ 时,调整时间 $t_s = 14.5$ s,允许误差为 2% 时,调整时间为 $t_s = 30.2$ s,上升时间 $t_r = 2.7$ s,此时系统无超调,可以

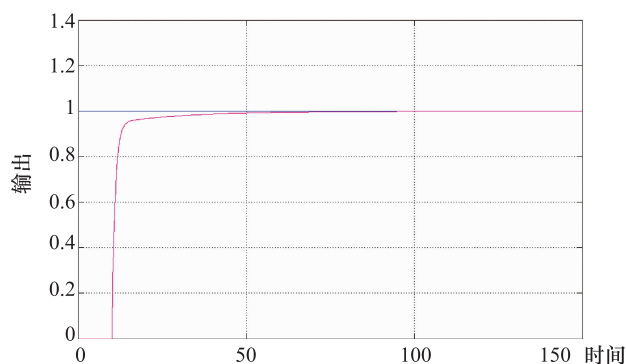


图2 预估模型准确时 Smith 预估控制器仿真曲线

看出当预估模型准确时控制的效果优于常规 PID 控制。

3.2.2 时间常数失配时的 Smith 预估控制

令时间常数 $T = T + \Delta T$, $\Delta T = 20\% T$, 即

$G_m(s) = \frac{1}{12s+1}$, 进行仿真研究, 得到仿真曲线如

图3

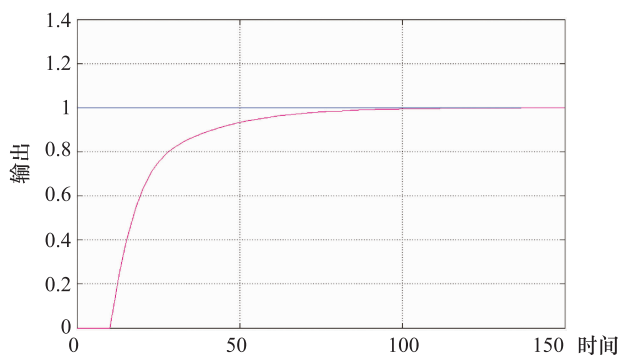


图3 预估模型时间常数失配时 Smith 预估控制器仿真曲线

由图3可以看出, 允许误差 $\Delta = 5\%$ 时, 调整时间为 $t_s = 55.7$ s, 允许误差为 2% 时, 调整时间为 $t_s = 74.1$ s, 系统无超调, 上升时间 $t_r = 30.5$ s。可见当 Smith 预估模型失配时控制效果受到一定影响, 各个性能指标均变差。

3.3 免疫-Smith 控制

免疫-Smith 控制系统 Simulink 框图如图4所示。

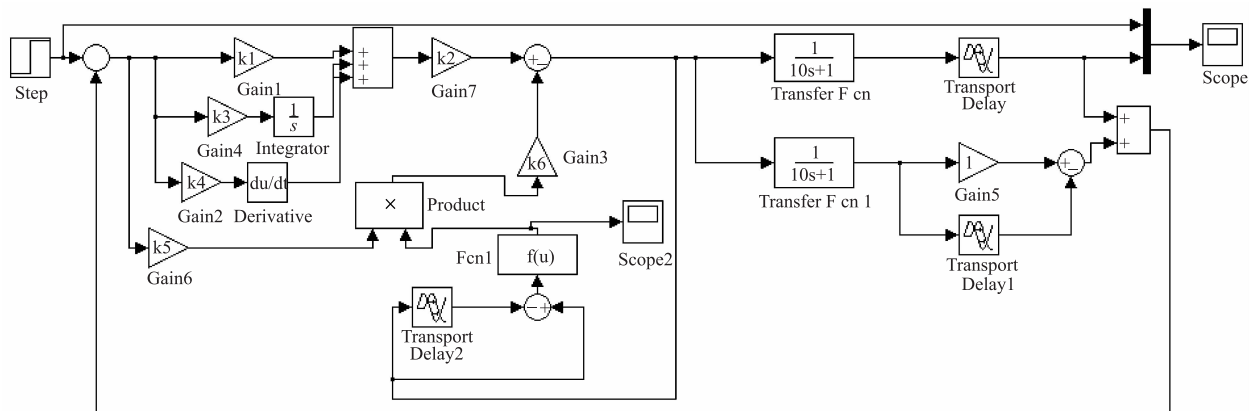


图4 采用免疫-Smith 控制器的控制系统 Simulink 图

3.3.1 预估模型准确时的免疫-Smith 预估控制

当取预估模型 $G_m(s) = \frac{1}{10s+1}$, 即预估模型与控制对象一致时, 仿真结果如图5所示。

允许误差 $\Delta = 5\%$ 时, 调整时间为 $t_s = 12.8$ s, 允许误差为 2% 时, 调整时间为 $t_s = 13.8$ s, 上升时间 $t_r = 1.8$ s, 系统无超调量, 可以看出结合了免疫算法的 Smith 控制器控制效果较纯 Smith 预估控制效果好。

3.3.2 时间常数失配时的免疫-Smith 预估控制

令时间常数 $T = T + \Delta T$, $\Delta T = 20\% T$, 即 $G_m(s) = \frac{1}{12s+1}$, 进行仿真研究, 得到仿真曲线如图6。

允许误差 $\Delta = 5\%$ 时, 调整时间为 $t_s = 25.7$ s, 允许误差为 2% 时, 调整时间为 $t_s = 28.9$ s, 系统无超调, 上升时间 $t_r = 11.6$ s。

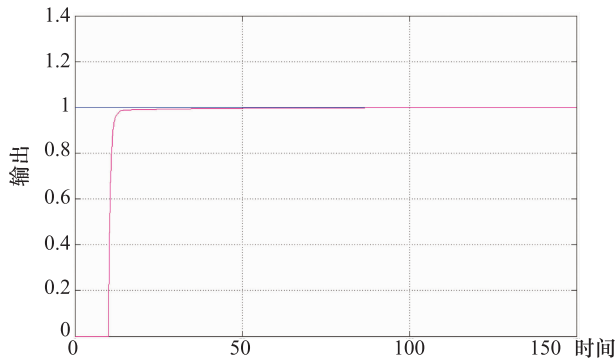


图 5 预估模型准确时免疫-Smith 控制器仿真曲线

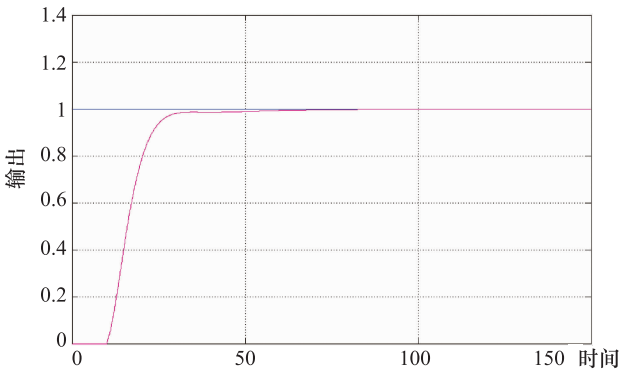


图 6 预估模型时间常数失配时免疫-Smith 控制器仿真曲线

4 结论

本文将生物免疫系统的反馈机理与 Smith 预测控制相结合,设计出一种免疫-Smith 控制器,将其应用于大滞后对象的控制,通过仿真研究,控制效果良好。与常规控制器相比,该控制器的超调量小,响应时间短,上升时间短,且该控制器结构简单,易于实现。该控制器可以应用于实际控制系统中,作者下一步将开展此方面的研究。

参 考 文 献

1 孙育刚,嵇启春. 基于神经网络的 Smith 预估 PID 控制器设计与仿真. 控制理论与应用,2009;28(10):9—12
2 岳有军,王红君. 基于人工免疫思想的电动执行机构智能控制研究. 工业仪表与自动化装置,2009;(02):32—34.
3 张建秋,任伟建,武文斌. 双容对象的人工免疫控制系统. 大庆石油学院学报,2009;33(1):78—80.

Research on Immune-Smith Controller in Large Time Delay System

REN Wei-jian, QIAO Jian-guo*

(Electric Information Engineering, Daqing Petroleum Institute, Daqing163318, P. R. China)

[Abstract] The immune controller is an intelligent controller which drawing on the immune mechanism of biological system. It has characteristics of short adjustment time, strong anti-interference ability. Immune suppression links of the immune algorithm is equivalent to the feedback link of the proportional integral derivative controller. Immune suppression of the immune controller related to output of the controller and unaffected by system measurements. So it can overcome the time delay. Immune controller and the Smith predictor are combined and design a new kind of controller. It enables the controller to overcome the time delay and lower using Smith controller of reliance on the accuracy of the system model. Simulation results show that the Immune-Smith controller, the performance of matches and mismatch in the model under all circumstances, superior to other controllers.

[Key words] large time lag immune algorithm Smith algorithm PID control