

文章编号: 1001-0920(2008)10-1159-04

基于 NEI 调节机制的非线性智能优化控制器

刘 宝^{1,2}, 丁永生², 王君红¹

(1. 中国石油大学 信息与控制工程学院, 山东 东营 257061; 2. 东华大学 a. 信息科学与技术学院, b. 教育部 数字化纺织服装技术工程研究中心, 上海 201620)

摘 要: 基于神经内分泌系统的整体调节机制, 提出一种非线性智能优化控制器. 该控制器由提呈单元、抗体控制单元、主控单元、优化单元和辨识单元组成. 提呈单元根据免疫提呈机制对控制偏差进行动态处理, 抗体控制单元通过调整控制实体的数量来消除控制偏差, 主控单元调整提呈单元和抗体控制单元的控制作用, 优化单元和辨识单元优化提呈单元和抗体控制单元的参数. 仿真结果表明, 相对于传统的 PID 控制, 该智能控制器具有较好的控制性能.

关键词: 神经内分泌免疫; 免疫提呈; 智能控制器

中图分类号: TP18

文献标识码: A

Nonlinear optimized intelligent controller based on modulation of NEI system

LIU Bao^{1,2}, DING Yong-sheng², WANG Jun-hong¹

(1. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China; 2a. College of Information Sciences and Technology, 2b. Engineering Research Center of Digitized Textile and Fashion Technology of Ministry of Education, Donghua University, Shanghai 201620, China. Correspondent: LIU Bao, E-mail: lb314423@163.com)

Abstract: Based on the modulation mechanism of neuroendocrine-immune system, we present a nonlinear optimized intelligent controller (NOIC) in this paper. The NOIC is composed of a presentation unit (PU), an antibody control unit (ACU), a main control unit (MCU), an optimization unit (OU), and an identification unit (IU). PU can pretreat the real-time control error dynamically based on the mechanism of immune presentation. ACU can adjust the number of antibody controller entity (ACE) to eliminate control error. MCU is designed to regulate the control action of PU and ACU. OU and IU can optimize the parameters of PU and ACU based on the genetic algorithm (GA). The simulation results demonstrate that the control performance of the NOIC is better than that of the conventional PID controller

Key words: Neuroendocrine-immune; Immune presentation; Intelligent controller

1 引 言

20 世纪 90 年代以来, 生物智能控制已发展成为智能控制的一个重要分支, 并出现了越来越多的基于神经网络或免疫系统的生物智能控制器或算法. 20 世纪 80 年代末期, ANN 得到了广泛研究^[1], 到了 90 年代末期, 基于免疫调节和相应机制的人工免疫系统(AIS)得到了迅速发展^[2]. 最近几年, 基于内分泌系统复杂调节机制的人工内分泌系统(AES)

开始得到部分学者的重视. 神经内分泌免疫(NEI)系统是一个复杂的生理系统, 在这三大系统之间存在复杂的双向调节机制, 具有较好的自适应和稳定性^[3,4]. NEI 系统生物智能控制理论的研究, 会提供一些解决复杂问题的方法, 具有一定的实际意义. 然而有关这方面的报道较少, 一些研究学者曾提出几种 NEI 仿真模型^[4-6], 如神经-免疫-皮肤内分泌网络、免疫-神经内分泌网络等, 但仅应用于医学领域.

收稿日期: 2007-08-06; 修回日期: 2007-11-12.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60534020); 国家自然科学基金项目(60474037); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-04-415); 教育部博士点新教师基金项目(20070425518); 中国石油大学(华东)博士科研启动基金项目(Y070502).

作者简介: 刘宝(1971—), 男, 山东淄博人, 副教授, 博士, 从事生物智能计算及控制等研究; 丁永生(1967—), 男, 安徽怀宁人, 教授, 博士生导师, 从事智能系统、人工免疫系统研究.

近几年来,出现了多种基于免疫系统调节机制的智能控制器^[7]和基于神经内分泌系统的智能控制器^[8],然而基于整体 NEI 系统复杂调节机制的智能控制器的研究报道还较为少见.

本文基于 NEI 系统的整体调节机制,提出一种具有非线性特性的优化智能控制器(NOIC),并给出优化调整控制参数的方法.仿真结果表明,相对于传统的 PID 控制,NOIC 具有较好的控制性能.

2 NEI 系统调节机制

NEI 系统包括神经、内分泌和免疫三大系统,其间存在着双向复杂的调节机制^[4-6].神经系统能够通过神经递质来影响内分泌系统和免疫系统的活性;内分泌系统能够通过多种激素,来刺激或抑制神经系统和内分泌系统的功能;同样,免疫系统能够通过免疫细胞分泌的细胞因子来调节神经系统和内分泌系统的功能.这样,神经系统、内分泌系统和免疫系统三者之间通过细胞因子、激素和受体进行双向信息传递和相互作用,使人体内部的各种生理指标处于一种稳定状态.

免疫系统作为中枢神经系统的感受器官,感知体内环境的化学性和生物性动态变化,神经内分泌对此作精确调控,保障内环境稳定.当抗原入侵人体后,免疫系统首先通过抗原提呈细胞分解或部分消化后将抗原提呈在抗体表面即抗原提呈.经过抗原提呈以后,抗原更容易被消除.在消除抗原初期,可能会有很多抗体参与消除过程.随着抗原数量的降低,相应的抗体数量会减少.免疫系统的实时状态通过细胞因子反馈给神经系统和内分泌系统,神经系统和内分泌系统分别通过神经递质和多种激素来共同调节免疫系统消除抗原过程,从而使抗原得以快速消除.这种调节机制可以抽象成如图 1 所示的调节结构.

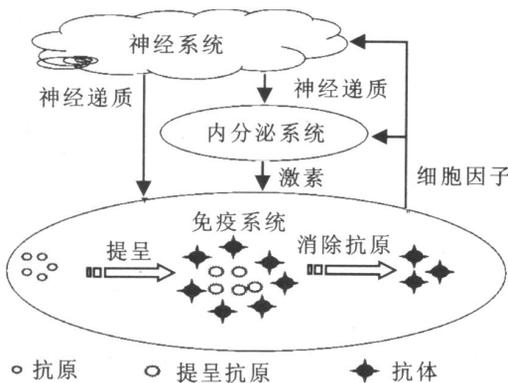


图1 NEI 系统调节机制

3 NOIC 的设计与实现

3.1 NOIC 控制结构

如第 2 节所述,当抗原入侵后首先由免疫系统对抗原进行提呈,初期会有很多抗体参与消除过程,随着抗原数量的降低,相应的抗体会减少.同时,该消除抗原过程反馈给神经内分泌系统,然后神经系统和内分泌系统共同调节免疫系统消除抗原过程,从而使抗原得以快速消除.受该调节机制的启发,根据图 1 设计如图 2 所示的 NOIC.该 NOIC 由控制偏差提呈单元(PU),抗体控制单元(ACU),主控制单元(MCU),优化单元(OU)和辨识单元(IU)等组成.ACU 由多个抗体控制实体 ACE 组成.其中:OU 和 IU 对应于神经系统,MCU 对应于内分泌系统,PU 和 ACU 对应于免疫系统.控制偏差 $e(t)$ 定义为抗原.控制偏差 $e(t)$ 首先由 PU 预处理,处理后的偏差定义为 $E(t)$,并由 ACU 通过调整 ACE 数目来消除偏差.MCU 用来调节或协调 PU 和 ACU 的控制作用,OU 和 IU 根据 GA 来优化 PU,ACU 和 MCU 的控制参数,从而提高 NOIC 的控制性能.

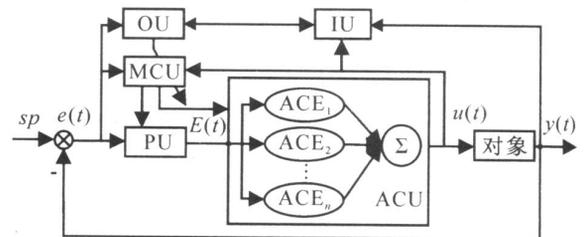


图2 NOIC 的控制结构

3.2 NOIC 控制算法

3.2.1 提呈单元

根据免疫系统提呈机制,设计控制偏差的提呈处理算法.传统的 PID 控制算法,如果缺少积分作用则很难完全消除控制偏差.从比例作用增量输出方程 $u_p(k) = K_p(e(k) - e(k-1))$ 可知,比例作用不能消除控制偏差的原因是,当控制偏差较小时, $e(k) - e(k-1)$ 几乎为 0.据此设计提呈算法:根据抗原的特征,即当控制偏差绝对值 $|e(t)| < 1$ ($0 < 1$),且控制偏差的变化绝对值 $|e(t) - e(t-1)| < 2$ ($0 < 2 < 0.5$) 时,对控制偏差进行放大处理;反之,控制偏差保持原值.即

$$E(t) = F(e(t)) e(t);$$

$$F(e(t)) = \begin{cases} > 1, & |e(t)| < 1, & |e(t) - e(t-1)| < 2; \\ = 1, & |e(t)| \geq 1 & \text{或} & |e(t) - e(t-1)| \geq 2. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $F(e(t))$ 是一个控制偏差 $e(t)$ 的函数,并由 MCU 决定; $E(t)$ 是提呈后的控制偏差,值越大,PU 的灵敏度越高.

3.2.2 控制抗体单元

基于免疫系统消除抗原机制, 抗体控制体 (ACE) 的数目应该随着实时控制偏差的变化而变化. ACU 的输出信号为所有 ACE 的输出信号之和, 控制偏差越大, ACE 数量越大. ACU 的具体算法是

$$u(t) = \sum_{i=1}^n K_{pi} \cdot E(t). \quad (2)$$

其中: $E(t)$ 是提呈控制偏差, k_{pi} 是 ACE_i 的比例增益, n 是 AC 单元中所有 ACE 的数量. 假设设计 ACU 中所有的 ACE 的比例参数相同, 则有

$$u(t) = nK_p E(t). \quad (3)$$

当 n 是正实数时比正整数更实际, 因此选择 n 为实数, 其值由 MCU 决定.

3.2.3 主控制单元

对应内分泌系统, MCU 可以调节 PU 和 ACU 的控制参数. PU 和 ACU 的控制参数可以认为是内分泌系统的不同调节激素. MCU 能够通过提呈函数 $F(e(t))$ 调节 PU 的提呈程度, 并调节 PU 的灵敏度. 提呈函数定义如下:

$$F(e(t)) = \begin{cases} \frac{1}{\exp(|e(t)|)} & , |e(t)| < 1, |e(t)| < 2; \\ 1 & , |e(t)| \geq 1 \text{ 或 } |e(t)| \geq 2. \end{cases} \quad (4)$$

其中 α 和 β 共同决定了控制偏差为 0 时的最大提成倍数 $\alpha/(1 - \beta)$, $1 \leq \alpha \leq 10, 0 \leq \beta < 1$.

MCU 能够通过调节 ACU 中的抗体控制体 ACE 的数量, 增强或减弱 ACU 的控制作用. 根据控制理论, 当控制偏差较大时控制作用应该增强; 反之, 则减弱. 因此, 该调节算法为

$$n = \alpha / |e(t)|, \quad (5)$$

其中 α 是一个大于 1.0 的正实数, 且 α 的选择应使 n 大于 1.0. NOIC 的整体控制算法如下所示:

$$u(t) = nK_p E(t); n = \alpha / |e(t)|; E(t) = \begin{cases} \frac{e(t)}{\exp(|e(t)|)} & , |e(t)| < 1, |e(t)| < 2; \\ e(t) & , |e(t)| \geq 1 \text{ 或 } |e(t)| \geq 2. \end{cases} \quad (6)$$

3.3 控制参数的优化

神经系统能够在整体上调节内分泌系统和免疫系统的功能, 并可以快速稳定地消除体内的入侵抗原. 据此设计 OU 和 IU, IU 用来在线辨识系统的数学模型, OU 根据控制偏差、过程工艺值、ACU 的输出等, 来优化 PU 的提呈参数和 ACU 的控制作用强度. NOIC 的所有控制参数利用 GA 优化方法在有

限空间内进行优化.

(1) 基因个体

定义所有待优化的 NOIC 控制参数为个体.

(2) 适应度函数

首先, 选择控制偏差 $e(t)$ 绝对值的积分作为目标函数的一项. 为了防止系统动态控制输出变化太大, 控制输出信号的平方项也作为目标函数项. 超调量 σ 和调整时间 t_s 也作为其函数项, 从而保证控制系统的稳定性和快速性, 进而得到如下的目标函数:

$$J = \int_0^{\infty} (g_1 |e(t)| + g_2 u^2(t)) dt + g_3 t_s + g_4 \sigma. \quad (7)$$

其中 $g_1 \sim g_4$ 均为权重系数, 其值可根据控制要求来选择. 据此定义适应度函数如下:

$$f = 1 / \left\{ \int_0^{\infty} (g_1 |e(t)| + g_2 u^2(t)) dt + g_3 t_s + g_4 \sigma \right\}. \quad (8)$$

(3) 终止条件

$$1) E(J^k, J^{k-1}) = \frac{\min(J^{k-1}) - \min(J^k)}{\min(J^k)}.$$

其中: $E(J^k, J^{k-1})$ 是相邻两代之间的最小适应度相对误差, $\min(J^{k-1})$ 和 $\min(J^k)$ 分别是第 $(k - 1)$ 代和 k 代的最小适应度, E 是一个正实数.

2) 搜索的最大步数已经达到.

如果上述任意条件成立, 则停止搜索. 具体参数优化步骤包括个体编码、初始化种群、系统模型辨识 (采用最小二乘法在线修正)、计算适应度、产生后代等, 直到满足精度要求输出优化结果.

4 仿真结果

为验证 NOIC 的控制性能, 选择对象 A 和 B 作为仿真对象. 对象 A 是一个一阶惯性大纯滞后工艺对象, 且 $\tau / T \gg 1$, 其传递函数为

$$G(s) = \frac{2}{60s + 1} e^{-100s}. \quad (9)$$

如果利用常规控制算法控制该对象, 很难获得满意的控制效果. 对象 B 是一个非线性对象, 其离散化方程为 ($T_s = 0.5$ s)

$$y(k) = 0.8y(k - 1) - 0.15(y(k - 2))^2 + 0.85u(k), \quad (10)$$

其中 $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别是输入和输出变量. 将 NOIC 的控制性能与传统 PID 控制算法进行了比较, 且传统 PID 控制算法控制参数的优化条件与 NOIC 的优化参数相同. 在仿真过程中, 每一个种群中的个体数目是 50, 交叉和突变因子分别是 0.9 和 0.05, 权重因子是 $g_1 = 0.999, g_2 = 0.001, g_3 = 2.0, g_4 = 100$. 对于对象 A, 其控制参数设置如下: $K_p \in [0, 5], K_i \in [0, 10], K_d \in [0, 5], \tau \in [1, 10], \sigma \in [0,$

10], [0,1.0], [0,1.0]. 其中 K_p, K_i, K_d 分别是比例、积分、微分的增益系数. 对于对象 B, 其控制参数设置如下: K_p [0,15], K_i [0,10], K_d [0,5], [1,20], [0,2], [0,0.5], τ_1 [0,1.0], τ_2 [0,0.5]. 优化控制参数如表 1 和 2 所示, 对象 A 和 B 的比较控制效果如图 3 和 4 所示. 与传统优化 PID 控制算法相比, NOIC 能够更快速稳定地消除控制偏差. 而且对于控制对象 A 而言, 传统 PID 控制算法的控制参数即使得到优化, 仍然难以稳定控制. 从仿真结果可以看出, NOIC 的控制性能均优于传统 PID 控制算法; 且 NOIC 在没有积分作用的情况下仍能够消除控制偏差, 其主要原因是算法的非线性和控制偏差的适度提呈.

表 1 传统 PID 控制方法的优化控制参数

控制参数	K_p	K_i	K_d
对象 A	0.0374	0.1043	4.9271
对象 B	0.1388	0.1099	0.4728

表 2 NOIC 的优化控制参数

控制参数	K_p	τ_1	τ_2
对象 A	3.7406	0.9347	3.0658
对象 B	3.1060	3.9622	1.1061

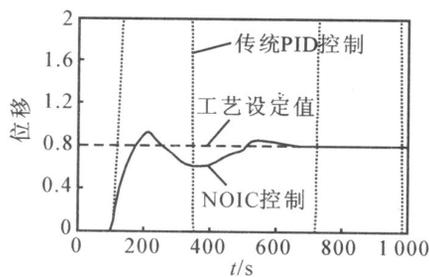


图 3 对象 A 的控制效果比较

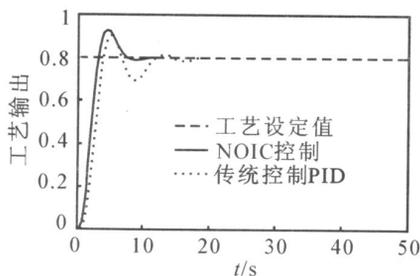


图 4 对象 B 的控制效果比较

5 结 论

本文基于 NEI 的整体调节机制, 提出一种非线性优化智能控制器. PU 首先根据免疫提呈机制对控制偏差进行动态处理; ACU 通过调整控制实体的数量来消除控制偏差; MCU 用来调整 PU 和 ACU 的控制作用; OU 和 IU 基于 GA 算法优化 PU 和 ACU 的参数. 为了检验 NOIC 的控制性能, 最后选择 2 个控制对象进行计算机仿真. 仿真结果表明, 相对于传统的 PID 控制, NOIC 具有较好的控制性能.

参考文献 (References)

- [1] Yao X, Liu Y. Making use of population information in evolutionary artificial neural networks[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1998, 28(3): 417-425.
- [2] 刘宝, 丁永生. 一种基于免疫存储记忆的智能控制器的设计与实现[J]. 控制与决策, 2005, 20(10): 1169-1172.
(Liu B, Ding Y S. Design and implementation of an intelligent controller based on immune store-memory [J]. Control and Decision, 2005, 20(10): 1169-1172.)
- [3] Farhy L S. Modeling of oscillations of endocrine networks with feedback[J]. Methods Enzymol, 2004, 384(1): 54-81.
- [4] Vargas P, Moioil R, Castro L N D, et al. Artificial homeostatic system: A novel approach [J]. Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2005, 3630: 754-764.
- [5] Besedovsky H, Sorkin E. Network of immune-neuroendocrine interactions [J]. Clinical and Experimental Immunology, 1977, 27(1): 1-12.
- [6] Brazzini B, Ghersetich I, Hercogova J, et al. The neuro-immuno-cutaneousendocrine network: Relationship between mind and skin[J]. Dermatologic Therapy, 2003, 16(2): 123-131.
- [7] Kim D H. PID controller tuning of a boiler control system using immune algorithm typed neural network [C]. Proc of Computational Science-ICCS 2004: 4th Int Conf. Krakow, 2004: 695-698.
- [8] Liu B, Ren L H, Ding Y S. A novel intelligent controller based on modulation of neuroendocrine system [C]. Proc of the 2nd Int Symposium on Neural Networks. New York: Springer-Verlag, 2005: 119-124.

(上接第 1158 页)

[12] Nussbaum R D. Some remarks on the conjecture in parameter adaptive control [J]. Systems and Control Letters, 1983, 3(3): 243-246.

[13] Zhang T P, Yi Y. Adaptive fuzzy control for a class of MIMO nonlinear systems with unknown dead-zones [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(1): 96-100.