

文章编号: 1001-0920(2005)10-1169-04

# 一种基于免疫存储记忆的智能控制器的设计与实现

刘 宝, 丁永生

(东华大学 a 信息科学与技术学院, b 数字化纺织服装技术教育部工程研究中心, 上海 200051)

**摘 要:** 基于免疫系统的存储记忆原理, 提出一种免疫智能控制器 (IC). 该 IC 具有自学习、存储记忆和进化能力, 能够在消除控制偏差的过程中自动生成控制抗体. 当控制偏差再次出现时, 智能控制系统能够利用控制抗体存储的控制策略, 并结合传统 PD 控制规律, 迅速稳定地消除控制偏差. 仿真结果表明, 与传统 PD 控制器相比, IC 在快速调节能力和稳定性等方面具有优越性.

**关键词:** 免疫系统; 自学习; 存储; 记忆; 进化; 智能控制器

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A

## Design and Implementation of an Intelligent Controller Based on Immune Store-memory

L I U B ao, D I N G Y ong-sheng

(a College of Information Sciences and Technology, b Digitized Textile and Fashion Technology Engineering Research Center of National Education Ministry, Donghua University, Shanghai 200051, China Correspondent: D N G Y ong-sheng, E-mail: ysdng@dhu.edu.cn)

**Abstract:** Based on the store-memory principle of immune system, an immune intelligent controller (IC) is presented. The IC has the abilities of self-learning, store-memory, and evolution. It can produce control antibody automatically during the process of eliminating control error. When control error appears again, the IC can eliminate it rapidly and stably by using the stored control antibody strategy and combining the conventional PD control algorithm. Simulation results show that the quick adjusting ability and stability of the IC are better than those of the conventional PD controller.

**Key words:** Immune system; Self-learning; Store; Memory; Evolution; Intelligent controller

### 1 引 言

生物免疫系统是一个高度复杂的系统, 在检测和消除感染问题上显示出精确的调节能力. 它能够识别和消除病原体, 具有学习、记忆和模式识别等能力<sup>[1]</sup>. 自 20 世纪 90 年代末以来, 基于生物免疫系统引发的人工免疫系统得到了迅速发展, 出现了许多基于免疫机理的智能控制器或智能算法. 例如基于免疫细胞特有的反馈机制的生物智能控制器<sup>[2-4]</sup>; 利用免疫算法对 PD 控制器的控制参数进行动态优化调整的方案<sup>[5,6]</sup>. 但现有的免疫智能控制器对免疫系统抗体的存储记忆原理的研究却很少, 而免疫

系统的存储记忆原理具有高效、稳定和自适应等特点<sup>[1]</sup>.

本文基于免疫系统的存储记忆原理, 提出一种新颖的免疫智能控制器 (IC). 该 IC 具有学习记忆、存储和自适应的能力, 能够在消除控制偏差的过程中自动形成控制抗体. 通过利用控制抗体存储的控制策略与传统控制规律结合, 快速、稳定地消除控制偏差. 计算机仿真结果表明, 相对于传统 PD 控制器, 该 IC 表现出较好的迅速调节能力和稳定性.

### 2 免疫系统的存储记忆原理

在免疫系统中, 当外界抗原 A<sub>g</sub>, 即病原体第 1

收稿日期: 2004-10-27; 修回日期: 2005-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60474037, 60004006); 新世纪优秀人才支持计划项目.

作者简介: 刘宝 (1971—), 男, 山东淄博人, 博士生, 从事智能系统与网络智能计算等研究; 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、生物网络结构等研究.

次入侵体内时,体内免疫系统没有相应的抗体Ab来消灭抗原,这时原抗体在抗原的刺激下,就会遗传、进化,最终产生出可以消灭抗原的抗体,这就是免疫初次应答,也就是免疫系统学习的过程。当抗原被消灭后,与之匹配的抗体的数量随着自身的老化死亡而降低,但在体内总保持着一定数量的抗体细胞,这就是免疫存储<sup>[1]</sup>。

当外界抗原再次入侵时,体内的抗体会根据抗原的特征点进行匹配。如果某一抗体的特征点与这种抗原的特征点相吻合,则这种抗体就是与之匹配的抗体。随后这种抗体便会大量繁殖,并迅速将抗原消灭,这就是免疫系统二次应答过程和自适应性的表现,也就是免疫记忆<sup>[1]</sup>。免疫系统的存储记忆原理如图1所示。

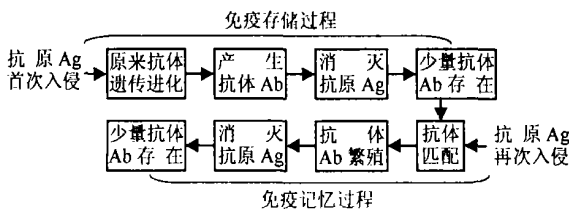


图1 免疫系统的存储记忆原理

### 3 免疫智能控制器

将控制系统的控制偏差作为免疫系统的抗原,将消除某一控制偏差的控制策略或过程作为免疫系统的抗体,控制系统中形成的所有抗体组成抗体库,记为  $C_{Ab}(i)$ 。其中  $i = 1, 2, \dots, n, n$  为抗体库中的抗体总数目。

根据图1,可以设计一种基于免疫系统的智能控制器,其学习和进化的框架如图2所示。

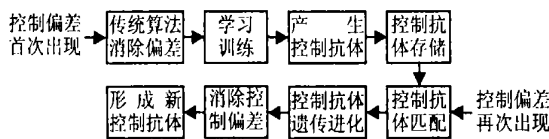


图2 免疫智能控制系统的学习和进化框架

针对抗体  $C_{Ab}(i)$ ,给出如下定义:

1) 特征点: 抗体  $C_{Ab}(i)$  产生时的设定值  $sp_i(t_0)$  和控制偏差  $e_i(t_0)$ ;

2) 控制策略: 在抗体  $C_{Ab}(i)$  的生成过程中(控制器消除偏差的过程),控制器的最终输出值  $u_i(t)$  与抗体开始产生时的控制器输出值  $u_i(t_0)$  的差值

$$\Delta u_i = u_i(t) - u_i(t_0). \quad (1)$$

#### 3.1 控制抗体的产生及存储

当抗原第1次出现时,对应于免疫初次应答的过程,IC没有相应的抗体,它必须进行学习和训练,从而产生相应的控制抗体,并以数据文件或数组形

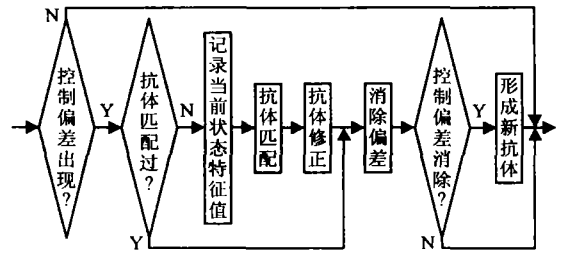


图3 控制抗体的初次生成及存储流程

式存储,其过程如图3所示。

当抗原再次出现时,IC首先利用已有的抗体对抗原进行消除,抗原消除后,形成新的控制抗体并存储。

#### 3.2 控制抗体的工作过程

当抗原再次出现时,IC首先根据抗原的特征,与控制抗体库中所有的抗体进行匹配,找出与之最匹配的抗体;然后对匹配的抗体进行修正。接着IC利用修正后的抗体消除抗原,当抗原消除后,形成新的控制抗体。这个过程就是控制抗体的记忆、遗传进化和繁殖过程。具体描述如下(设此时抗体库中的抗体总数量为  $n$ ):

##### 1) 记录特征值

当抗原出现时(控制偏差  $e(t)$  大于设定阈值  $\epsilon_i$ ),记录当前控制偏差的特征值: 设定值  $sp_i(t)$ , 偏差  $e(t)$  和 IC 输出状态值  $u_i(t)$ 。这些也是将要产生的第  $n+1$  个控制抗体的部分初始特征值  $sp_i(t_0)$ ,  $e_i(t_0)$  和  $u_i(t_0)$ 。

##### 2) 抗体匹配

将当前控制偏差的特征值与待匹配抗体的特征值  $sp_i(t_0)$  和  $e_i(t_0)$  进行比较,根据式(2)计算出所有抗体相应的匹配度

$$\omega = \frac{1}{\alpha |sp_i(t) - sp_i(t_0)| + (1 - \alpha) |e_i(t) - e_i(t_0)|}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad 0 < \alpha < 1.0, \quad (2)$$

这里  $\alpha$  设为 0.5。匹配度  $\omega$  最大的抗体就是与当前抗原最匹配的抗体,最终匹配的抗体记为  $C_{Ab}(k)$ ,  $k \leq n$ 。这个过程就是控制抗体的记忆过程。

##### 3) 抗体修正

由于  $e(t)$  与匹配抗体  $C_{Ab}(k)$  的特征值  $e_k(t_0)$  不一定完全匹配,如大小或方向不一致等,此时可根据线性化理论,利用式(3)对抗体  $C_{Ab}(k)$  的输出变化值进行修正,形成新的中间抗体  $C_{Ab}(n+1)$  输出变化值  $\Delta u_i(t)$ 。这个过程就是控制抗体的遗传进化过程。

$$\Delta u_i(t) = \Delta u_k(t) \frac{e_i(t)}{e_k(t_0)}. \quad (3)$$

4) 抗原消除

IC 利用中间抗体  $C_{Ab}(n+1)$  消除抗原, 其输出值为

$$u(t) = u(t_0) + \Delta u(t). \quad (4)$$

其中:  $u(t_0)$  为抗原出现时的 IC 输出值,  $\Delta u(t)$  为修正后抗体  $C_{Ab}(n+1)$  存储的动态变化值

5) 新抗体形成

当抗原完全消除时, 由最终的 IC 输出值  $u_{n+1}(t)$ , 根据式(1) 计算出中间抗体  $C_{Ab}(n+1)$  的实际  $\Delta u_{n+1}(t)$ , 形成一个新的抗体  $C_{Ab}(n+1)$ . 这个过程就是控制抗体的繁殖过程 具体流程如图 4 所示

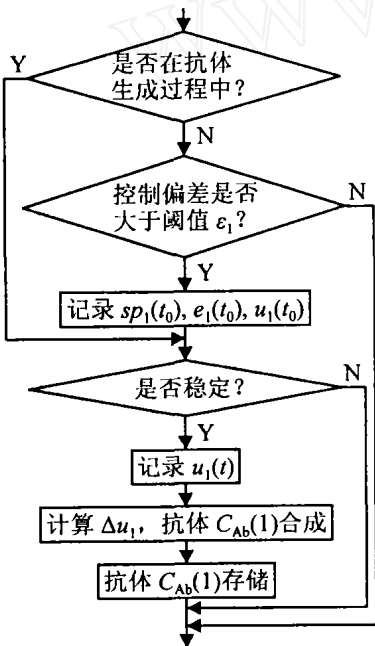


图 4 控制抗体的繁殖过程

3.3 免疫 + PD 的控制策略

如果仅使用式(4) 的抗体记忆控制策略, 则有:

第 1 种情况: 输出信号的相对反应速度比较慢, 会使得控制系统的稳定时间变长;

第 2 种情况: 匹配修正后的中间抗体存储的控制策略与控制系统最终消除偏差时的实际输出信号可能存在一定的误差, 因而会影响控制精度

针对第 1 种情况, 采取抗体控制策略与传统比例 P 作用结合的方式, 即

$$u(t) = u(t_0) + \Delta u(t) + K_{p0}e(t), \quad (5)$$

其中  $K_{p0}$  为比例增益系数 两者共同作用使输出迅速上升, 并消除控制偏差 偏差消除时的稳态输出值就是抗体的控制策略输出变化值与控制器在消除控制偏差开始时的输出值之和(式(4)).

针对第 2 种情况, 采取与传统 PD 控制规律相结合的方式 当偏差  $e(t)$  大于等于设定阈值  $\epsilon$ (如

2%) 时, 利用抗体控制策略和 P 作用方式; 当偏差小于设定阈值  $\epsilon$  时, 转换为传统 PD 控制方式, 进一步消除控制偏差 其整体控制流程如图 5 所示

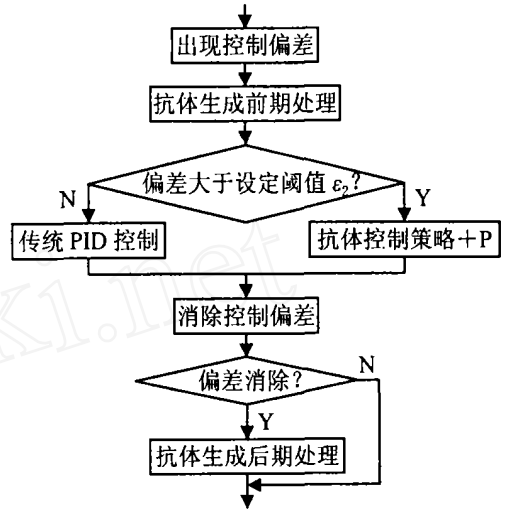


图 5 免疫 + PD 的整体控制流程

3.4 控制抗体的管理

随着越来越多的控制偏差被消除, IC 消除控制偏差的速度和精度会得到提高 但是, 如果不采取措施会使得控制抗体的数目越来越多, 最终影响运算速度 因此需采取如下措施: 对绝对控制偏差范围和给定值范围进行区间划分, 并定义每个区间的抗体最多数目 当某一区间内抗体数量超过最大值时, 则删除最早生成的抗体, 这也是抗体生命周期的体现 另外, 抗体匹配过程仅限于与偏差对应的区间内进行, 如果该区间没有抗体, 则匹配过程在有抗体存在的最接近区间内进行, 从而避免影响运算速度

4 仿真结果

为了检验 IC 的控制性能, 对其进行仿真实验, 并与传统 PD 的控制效果进行比较 通过不断改变给定值, 使 IC 产生更多的抗体 实验中为使对比效果比较明显, IC 的辅助 PD 控制参数和与之比较的传统 PD 控制参数的设置相同 在第 1 次偏差出现时没有控制抗体, IC 仍用辅助 PD 算法消除偏差, 但通过学习形成第 1 个控制抗体; 当控制偏差第 2 次出现时, 控制抗体开始发挥作用

本文选取某生产过程的液位控制系统作为仿真对象, 其传递函数为

$$G(s) = \frac{3.56}{3.22s^2 + 2.13s + 1} \quad (6)$$

IC 的控制参数设置如表 1 所示 表中:  $K_{p1}$ ,  $T_{i1}$  和  $T_{d1}$  是 IC 辅助 PD 控制算法控制参数, 也是传统 PD 控制器的控制参数;  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  分别是 IC 偏差设定阈值和 PD 算法转换设定阈值 IC 所形成的抗体如表 2 所示 与传统 PD 控制器的对比效果如图 6 所示

表1 控制参数表

参数	$K_{p0}$	$K_{p1}$	$T_{ii}$	$T_{d1}$	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$
数值	1.3	1.3	5.0	0.0	0.005	0.01

表2 生成抗体库

对象	序号	给定值	偏差变化值	输出变化值
数值	1	1.000 0	0.500 0	0.281 5
	2	0.500 0	- 0.250 0	- 0.140 7
	3	1.500 0	0.500 0	0.281 5
	4	1.800 0	0.150 0	0.084 4
	5	1.500 0	- 0.150 0	- 0.084 4

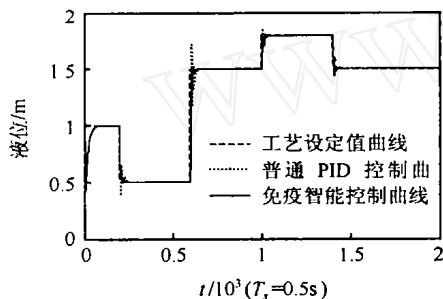


图6 二阶对象控制效果

从图6可以看出,与传统PID控制器相比,IC能够迅速、无超调、稳定地消除控制偏差

从仿真实验可以看出,在辅助PID算法和与之比较的传统PID算法的控制参数相同的情况下,采用控制抗体记忆算法后,IC的控制效果好于传统PID控制器。另外,IC表现出较好的系统响应能力,这主要是由于控制偏差出现时IC可以通过控制抗体计算得出系统稳定时控制器的阶跃输出信号,然后在此基础上叠加比例控制作用,从而达到快速消除偏差的目的。而传统PID算法是在当前输出状态下进行调整,因此其控制稳定速度较慢

## 5 结论

本文基于免疫系统的存储记忆原理,提出了一种新颖的IC。该IC能够自动生成抗体,当控制偏差出现时可以通过匹配找出最为匹配的抗体,并根据实际的偏差特征对抗体进行修正,形成中间抗体。当控制偏差迅速消除后,新的抗体已经在控制系统内部形成。智能控制系统运行的时间越长,控制偏差出现的次数越多,则生成的抗体数量越多,从而它的控制精度和适应能力越强。通过与传统的PID控制规律相结合,该IC能够迅速稳定地消除控制偏差,提高控制效果。

## 参考文献(References)

- [1] Leandro N D C, Jonathan T. *Artificial Immune System: A New Computational Intelligence Approach* [M]. London: Springer-Verlag Inc, 2002: 13-150
- [2] Ding Y S, Ren L H. Fuzzy Self-tuning Immune Feedback Controller for Tissue Hyperthermia [A]. *Fuzzy IEEE 2000, The 9th IEEE Int Conf* [C]. San Antonio, 2000, 1: 534-538
- [3] Qi Z Q, Song S M, Yang Z H, et al. A Novel Immune Feedback Control Algorithm and its Applications [A]. *Genetic and Evolutionary Computation-GECCO 2004: Genetic and Evolutionary Computation Conf* [C]. Seattle, 2004, 3102: 318-320
- [4] Takashi K, Yamada T. Application of an Immune Feedback Mechanism to Control System [J]. *JSM E Int J, Series C*, 1998, 41(2): 184-191
- [5] Kim D H. PID Controller Tuning of a Boiler Control System Using Immune Algorithm Typed Neural Network [A]. *Computational Science-ICCS 2004: 4th Int Conf* [C]. Krakow, 2004, 3037: 695-698
- [6] Kim D H, Park J I. Intelligent PID Control by Immune Algorithms Based Fuzzy Rule Auto-tuning [J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, 2715: 474-482

(上接第1168页)

- [7] 冯俊娥,程兆林. 线性广义时滞系统的H状态反馈控制器[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 159-163  
(Feng J E, Cheng Z L. H State Feedback Control for Linear Singular Systems with Time-delay in State [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 159-163)
- [8] Xu S, Dooren P V, Stefan R. et al. Robust Stability and Stabilization for Singular Systems with State Delay and Parameter Uncertainty [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(7): 1122-1128
- [9] 冯俊娥,程兆林. 不确定奇异时滞系统的保性能控制[J]. *控制与决策*, 2002, 17(增刊): 711-714  
(Feng J E, Cheng Z L. Guaranteed Cost Control of

Linear Uncertain Singular Time-delay [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(5): 711-714)

- [10] 夏元清,贾英民. 一类含未建模动态和时滞系统的鲁棒二次镇定[J]. *控制与决策*, 2001, 16(5): 602-604  
(Xia Y Q, Jia Y M. Robust Quadratic Stabilization for a Class of Uncertain Systems with Time-delay and Unmodeled Dynamics [J]. *Control and Decision*, 2001, 16(5): 602-604)
- [11] Carlos E, De Souza, Xi Li. Delay-dependent Robust H Control of Uncertain Linear State-delayed Systems [J]. *Automatica*, 1999, 35(9): 1313-1321)