

一种新颖的模糊自调整免疫反馈控制系统*

永生 任立红

(东华大学信息科学与技术学院 上海 200051)

摘要 针对低阶或高阶对象,提出一种新颖的基于生物免疫系统反馈机理的通用控制器结构。该控制器包括一个基本的 P 型免疫反馈控制器和一个增量模块, P 型免疫反馈规律由模糊控制器自动调整。激光热疗法中组织温度控制的计算机仿真结果表明,该控制器的控制性能优于常规控制器。

关键词 免疫反馈, 模糊自调整, 常规控制, 各阶对象, 激光热疗法

分类号 TP 18

A New Fuzzy Self-tuning Immune Feedback Control System

Ding Yongsheng, Ren Lihong

(Donghua University)

Abstract A new universal controller structure based on the immune feedback mechanism of biological immune systems was presented. The controller included a basic P-type immune feedback controller and an incremental block. The P-type immune feedback law was automatically tuned by a fuzzy controller. The controller structure is suitable to various low or high order plants. Computer simulation results, in the control of tissue temperature during laser hyperthermia, demonstrate that the control performance of the immune controller is superior to that of conventional controller.

Key words immune feedback, fuzzy self-tuning, conventional control, various order plants, laser hyperthermia

1 引言

生命现象的奥秘和生物的智能行为一直为科学家们所关注。生物信息系统可看成一个分布式自治系统, 它能为科学和工程领域提供各种富有成效的技术和方法。由生物引发的信息处理系统, 如神经网络和进化计算等, 现已广泛应用于各个领域。此外, 另一类主要信息系统——免疫系统, 通过从不同种类的抗体中构造自己-非己的非线性自适应网络, 在处理动态变化环境中起主要作用^[1]。免疫计算系统结合先验知识和免疫系统的自适应能力, 具有许多有意义的特性, 提供了一种解决复杂问题的方法。例如, 基于免疫系统中 B 细胞和 T 细胞之间的相互反应, 被用于建立人工免疫网络模型^[2]; 基于 T 细胞的免疫反馈规律设计反馈控制系统^[3]等。

本文基于生物免疫系统的反馈机理, 针对低阶

或高阶对象, 提出一种新颖的适用于各阶对象的免疫反馈控制系统。其中, 免疫控制器由一个基本的 P 型免疫控制器和一个增量模块组成, P 型免疫反馈规律由模糊控制器自动调整。文中给出一个在激光热疗中组织温度控制的应用例子, 计算机仿真结果表明, 该控制系统的控制性能优于常规 PID 控制系统。

2 免疫系统的反馈机理

免疫系统是生物尤其是脊椎动物和人类所必备的防御机理, 它由具有免疫功能的器官、组织、细胞、免疫效应分子及有关基因等组成, 可以保护机体抵御病原体、有害异物及癌细胞等致病因子的侵害。免疫系统的功能有: 1) 免疫防御; 2) 免疫稳定; 3) 免疫监视。免疫系统中最重要的细胞是淋巴细胞, 主要有 B 和 T 两类淋巴细胞。

由于 T 细胞在免疫反应中起关键作用, 因此本文仅借鉴 T 细胞的反馈调节机理。为简单起见, 主

* 国家自然科学基金项目(69874038)和上海市曙光计划项目
1999-07-20 收稿, 1999-10-16 修回

要考虑 B 细胞和 T 细胞之间的反应,即抗原(Ag)、抗体(Ab)、B 细胞(B)、辅助 T 细胞(T_H)和抑制 T 细胞(T_S)之间的反应。抑制机理和主反馈机理之间的相互协作,是通过免疫反馈机理对抗原的快速反应和很快的稳定免疫系统完成的。上述免疫反馈机理可用图 1 来表示。其中,IL⁺表示 T_H 细胞分泌白细胞介素,IL⁻表示 T_S 细胞分泌白细胞介素。

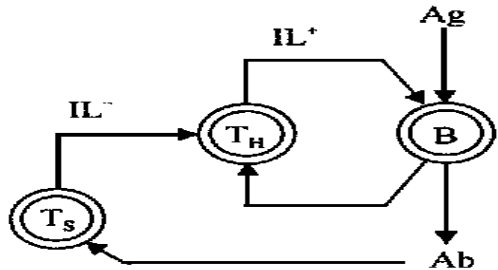


图 1 免疫反馈原理

由图 1 可见,当抗原进入机体并经周围细胞消化后,将信息传递给 T 细胞,即传递给 T_H 细胞和 T_S 细胞,T_S 细胞用于抑制 T_H 细胞的产生。然后共同刺激 B 细胞,经过一段时间后,B 细胞产生抗体以清除抗原。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,从而产生的 B 细胞会多些。随着抗原的减少,体内 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。经过一段时间后,免疫反馈系统便趋于平衡。

3 基于免疫反馈机理的控制系统

3.1 免疫反馈规律

基于上述 T 细胞反馈调节原理,考虑以下简单的反馈机理。定义第 k 代的抗原数量为 $\epsilon(k)$,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

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

其中^[3]

$$T_H(k) = k_1 \epsilon(k), \quad T_S(k) = k_2 f[\Delta S(k)] \epsilon(k)$$

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

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

其中, $K = k_1$, $\eta = k_2/k_1$, $f[\cdot]$ 是一选定的非线性函数。式(1)中,参数 K 控制反应速度,参数 η 控制稳定效果。考虑常规 P 控制器的控制算法为

$$u(k) = K_P e(k) \quad (2)$$

式中 K_P 为比例增益。

将式(1)与式(2)比较可知,基于免疫反馈机理的控制器是一个非线性 P 控制器,其比例增益 $K_P = K \{1 - \eta f[\Delta u(k)]\}$,它随着控制器输出的变化而变化。控制器的性能在很大程度上依赖于参数 K , η 和非线性函数 $f[\cdot]$ 的选取。

3.2 免疫反馈控制器的设计

以上 P 型免疫控制器对于二阶及高阶对象不是很有效,不能补偿由噪声或干扰引起的控制偏差。为此,基于文献[5]的工作,以下提出一种适用于各阶对象的免疫反馈控制系统结构。控制系统的原理框图如图 2 所示。其中,免疫控制器由一个基本的 P 型免疫控制器和一个增量模块组成。考虑到设计 P 型免疫反馈规律时选取参数值 K , η 和非线性函数 $f[\cdot]$ 的困难^[3],用一个模糊控制器来实现抑制项 $f[\cdot]$ 。

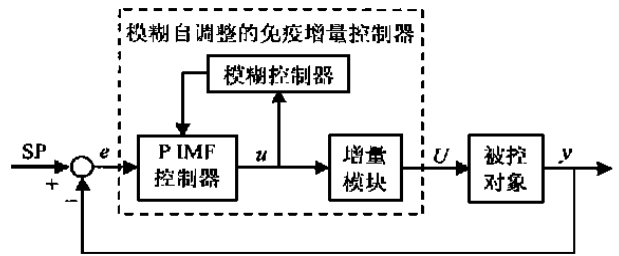


图 2 模糊自调整的免疫增量反馈控制系统

根据极点配置方法,对于一个 n 阶对象,控制系统的阶数应为 $n - 1$ 。于是,对 P 型免疫控制器的输出经增量模块运算后,整个控制器的输出应为

$$U = K_0 \int u(\tau) d\tau + K_1 u + K_2 u^{(1)} + \dots + K_{n-1} u^{(n-2)} \quad (3)$$

以离散形式表示,则有

$$\begin{cases} u^{(1)}(k) = \frac{u(k) - u(k-1)}{\Delta t} \\ u^{(2)}(k) = \frac{u(k) - 2u(k-1) + u(k-2)}{\Delta t^2} \\ \vdots \\ u^{(n-2)}(k) = \frac{f(u(k), \dots, u(k-n+2))}{\Delta t^{n-2}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $u(k)$ 为 P 型免疫控制器在 k 时刻的输出, Δt 为采样间隔。于是,整个控制器算法离散形式为

$$U(k) = K_0 \sum_{i=0}^k u_i + K_1 u(k) + K_2 u(k-1) + \dots + K_{n-1} u(k-n+2) \quad (5)$$

其中, $K_0, K_1, \dots, K_{n-1}$ 的表达式可由式(3),(4)

推导得到。

为使上述控制器的结构清晰明确,下面以常用的 PID 型控制器结构为例来进行说明。考虑常规 PID 控制算法的离散形式为

$$u(k) = K_P \left[1 + \frac{T_I}{z - 1} + T_D \frac{z - 1}{z} \right] e(k) \quad (6)$$

其中, K_P 为比例增益, T_I 和 T_D 分别为积分常数和微分常数。若将 PID 控制器(6) 与式(1) 和(5) 结合起来,则可得 PID 型免疫控制器,其输出为

$$U(k) = K \{ 1 - \eta f[\Delta u(k)] \} \times \left[1 + \frac{T_I}{z - 1} + T_D \frac{z - 1}{z} \right] e(k) \quad (7)$$

控制器(7) 可进一步写成

$$U(k) = \left[\bar{K}_P + \bar{K}_I \frac{1}{z - 1} + \bar{K}_D \frac{z - 1}{z} \right] e(k) \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{K}_P &= K \{ 1 - \eta f(\Delta u(k)) \} \\ \bar{K}_I &= K \{ 1 - \eta f(\Delta u(k)) \} T_I \\ \bar{K}_D &= K \{ 1 - \eta f(\Delta u(k)) \} T_D \end{aligned}$$

分别为可变的非线性比例增益、积分增益和微分增益。免疫控制器(8) 是一个非线性 PID 控制器。根据所控制对象的不同, $\bar{K}_P$, $\bar{K}_I$ 和 $\bar{K}_D$ 中的参数 K , η 和非线性函数 $f[\cdot]$ 也可以不同,从而可获得多种不同形式的非线性 PID 控制器,以适合于不同的控制对象。

3.3 免疫反馈规律的模糊自调整

鉴于免疫控制器中非线性函数 $f[\cdot]$ 设计的困难,本节讨论用一个模糊控制器来实现 P 型免疫反馈规律中的非线性函数 $f[\cdot]$ 。合适地选择各个设计参数,模糊控制器能逼近任意的线性或非线性函数。同时,模糊控制器也是构造非线性函数逼近器的一种有效方法。本系统中的模糊控制器采用与[5] 中相同的结构,即模糊控制器有两个输入变量和一个输出变量。两个输入变量分别是 P 型免疫控制器的输出 $u(k)$ 和输出变化 $\Delta u(k)$; 输出变量是 T_s 细胞的抑制量 $f[u(k), \Delta u(k)]$ 。每个输入变量被两个输入模糊集模糊化,它们分别是“正” $\mathcal{T}(P)$ 和“负” $\mathcal{T}(N)$,如图 3 所示。输出变量被三个输出模糊集模糊化,它们分别是“正” $\mathcal{T}(P)$ 、“零” $\mathcal{T}(Z)$ 和“负” $\mathcal{T}(N)$,如图 4 所示。以上隶属度函数都定义在整个 $(-\infty, \infty)$ 区间。

模糊控制器使用以下 4 条规则:

$$\begin{aligned} r_1: & \text{IF } u(k) \text{ is P AND } \Delta u(k) \text{ is P} \\ & \text{THEN } f[u(k), \Delta u(k)] \text{ is N} \\ r_2: & \text{IF } u(k) \text{ is P AND } \Delta u(k) \text{ is N} \end{aligned}$$

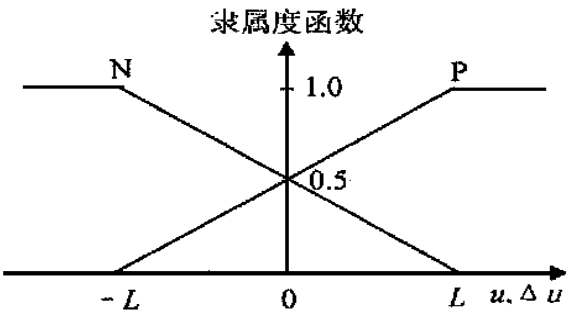


图 3 模糊控制器的输入隶属度函数

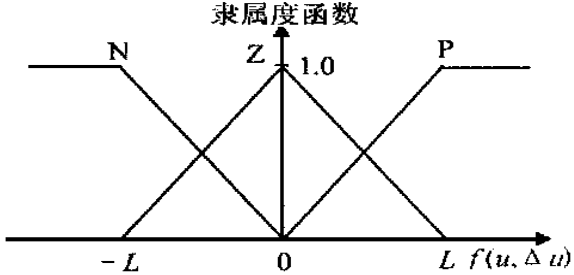


图 4 模糊控制器的输出隶属度函数

THEN $f[u(k), \Delta u(k)]$ is Z
 r_3 : IF $u(k)$ is N AND $\Delta u(k)$ is P
THEN $f[u(k), \Delta u(k)]$ is Z
 r_4 : IF $u(k)$ is N AND $\Delta u(k)$ is N
THEN $f[u(k), \Delta u(k)]$ is P

各规则中,使用 Zadeh 的模糊逻辑 AND 和 OR 操作,并采用常用的重心反模糊器得到模糊控制器的输出 $f[u(k), \Delta u(k)]$ 。将 $f[u(k), \Delta u(k)]$ 替代式(7) 中的 $f[\Delta u(k)]$, 可得模糊自调整的 PID 型免疫控制器,其输出为

$$U(k) = K \{ 1 - \eta f[u(k), \Delta u(k)] \} \times \left[1 + \frac{T_I}{z - 1} + T_D \frac{z - 1}{z} \right] e(k) \quad (9)$$

式(9) 中,只有 $\eta f[u(k), \Delta u(k)] \leq 1$ 才能确保负反馈,即保证系统稳定。

4 热疗法中组织温度控制的应用

为了验证上述设计方法的可行性,本节将模糊自调整的 PID 型免疫控制器(9) 应用于激光热疗法中的组织温度控制,并与常规 PID 控制器进行比较。

热疗法是治疗各种疾病组织(如癌症) 的一种有效方法。在热疗法中,当温度保持在 $43 \sim 46$ 之间达 30min ~ 60min 后,被治疗组织会被杀死。由于热疗法是一个非线性时变的动态过程,因而具有:

- 1) 在时空上不断变化的血扩散速率;
- 2) 治疗中组织的生物和生理特性的变化;
- 3) 组织中存在热传递的

时间延迟,高性能的温度控制不易实现。临床研究已找到热疗法失败的主要原因,其中之一是被治疗的组织中缺乏偏差范围小的被控温度分布。临床要求被治疗的组织温度能很快上升到期望的温度设定值(如 43℃),且组织温度在整个治疗过程中一直维持,以保证治疗效果。为了确保对邻近正常组织的热损伤最小,同时避免组织碳化,被治疗组织的温度应在期望值附近波动很小。

加热能量与组织温度之间的数学模型是生物热传递方程,它是一个复杂的三维偏微分方程,很难得到解析解,数值解也要花费难以承受的时间才能得到。作为控制仿真研究带时间滞后的一阶线性时变模型(可看作高阶模型的近似),能较好地近似生物热传递的三维偏微分方程的模型^[6]。其模型如下

$$P(s) = \frac{K_G}{\tau s + 1} e^{-\tau_d s}$$

(10)

其中, K_G 为模型常数增益,取值范围为 0.12 /W ~ 24.6 /W; τ 为固定的时间常数,取值范围为 43s ~ 2 570s; 时间滞后常数 τ_d 的值随不同病人而不同,一般取值范围为 10s ~ 70s。研究表明^[6],对于典型的病人,参数值为 $K_G = 1.1$, $\tau = 250$, $\tau_d = 45$ 。它们将作为免疫控制系统设计时的主要模型参数值。

在设计免疫反馈控制系统时,先用参数调整方法,如 Ziegler-Nichols 方法,在线设计线性 PID 控制器,这样能确保 PID 闭环控制系统稳定。然后根据 PID 控制器增益和 PID 型免疫控制器增益的关系(9),调整参数 η 和模糊控制器的设计参数。本文仿真中,线性 PID 控制器的 $K_P = 3.2$, $K_I = 0.012$, $K_D = 1$; 模糊自调整的免疫控制器中, $\eta = 0.8$, $L = 1$ 。计算机仿真结果表明,所设计的免疫反馈控制系统无超调,性能较好,优于对应的线性 PID 控制系统的性能(图 5 中,实线为免疫控制系统的控制曲线,虚线为 PID 控制系统的曲线)。

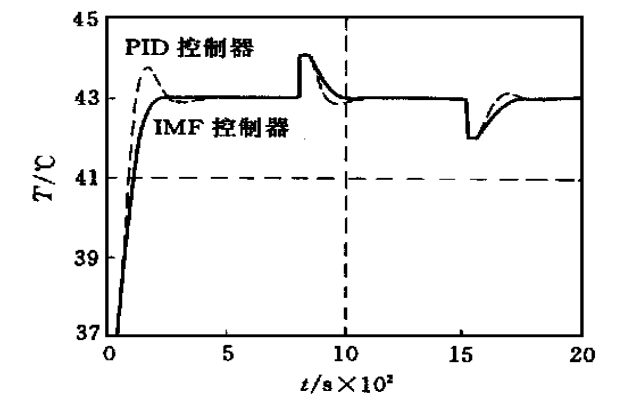


图 5 免疫反馈控制系统与 PID 控制系统的性能比较

为进一步验证所设计的免疫控制系统的鲁棒性和稳定性, K_G 值和 τ 值在 800s 时突然增加 20% (此时 $K_G = 1.32$, $\tau = 300$), 然后在 1 500s 时又突然回到原来值 ($K_G = 1.1$, $\tau = 250$) (见图 5)。由于参数突变,最大温度偏差仅为 1.1℃,且免疫反馈控制系统能很快消除偏差,比线性 PID 控制系统快。以上仿真结果表明,所设计的免疫反馈控制系统,即使在对象参数有较大突变时也具有鲁棒性和稳定性。

5 结 论

本文针对低阶或高阶对象,提出一种新颖的基于生物免疫反馈机理的通用控制器结构。该控制器包括一个基本的 P 型免疫反馈控制器和一个增量模块, P 型免疫反馈规律由模糊控制器自动调整。激光热疗法中组织温度控制的计算机仿真结果表明,该控制器的控制性能比传统控制器优越。进一步的工作是深入研究免疫系统的自适应机理,并借助其它计算智能技术来设计更有效的免疫反馈控制系统。

致 谢 感谢美国 The University of Texas Medical Branch 的 Hao Ying 教授和东华大学邵世煌教授的帮助和指导。

参 考 文 献

- 1 N K Jerne. The immune systems. Scientific American, 1973, 229(1): 52 ~ 60
- 2 Z Tang, T Yamaguchi, K Tashima *et al.* Multiple-valued immune network model and its simulations. In: Proc 27th Int Symp on Multiple-valued Logic. Antigonish, 1997. 233 ~ 238
- 3 K Takahashi, T Yamada. Application of an immune feedback mechanism to control systems. JSME Int J, Series C, 1998, 41(2): 184 ~ 191
- 4 X M Qi, T C Chin. Genetic algorithms based fuzzy controller for high order systems. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 91: 279 ~ 284
- 5 H Ying, W Siler, J J Buckley. Fuzzy control theory: A nonlinear case. Automatica, 1990, 26(3): 513 ~ 520
- 6 J A DeFord, C F Babs, U H Patel. Design and evaluation of closed-loop feedback control of minimum temperatures in human intracranial tumors treated with interstitial hyperthermia. Medical & Biological Engineering & Computing, 1991, 29(2): 197 ~ 206

(下转第 450 页)

$DT = (0\ 4\ 0\ 3\ 0\ 0\ 5\ 0\ 2\ 0\ 0\ 6\ 0\ 3\ 0\ 3\ 0\ 0\ 0\ 0)$
初始状态矢量
 $x(\tau_0) = (0\ 99\ 99\ 99\ 99\ 0\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 0\ 0\ 0)$

其中99表示无穷大。假设 $\tau_0 = 0$, 用 MATLAB 进行仿真, 如果出现资源争用冲突, 则调用启发式调度规则解决冲突。在仿真运行过程中, 模型不断检测冲突变迁, 并冻结仿真时钟直到冲突得以消除, 随后仿真继续进行。当到达终止状态 $M(K)$ 时, 相应的状态矢量演变为

$x(\tau_k) = (99\ 99\ 99\ 99\ 11\ 99\ 99\ 99\ 99\ 8\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 12\ 9\ 12\ 11)$

文献[3]在仿真过程中, 预先假定设备 R1, R2, R3 的处理顺序分别为 CA, BC, CBA, 并以此来消除资源争用冲突。本文利用启发式调度规则, 并借助于分层决策法, 从冲突的变迁集中选出最优的变迁触发, 只需较少的迭代次数, 就可使批处理循环时间相对于文献[3]减小 25%。仿真结果如表 1 所示。

表 1 仿真结果比较

仿真方法	A 总加工 时间(min)	B 总加工 时间(min)	C 总加工 时间(min)	批处理循环 时间(min)	迭代 次数
文献[3]方法	16	8	12	16	11
本文方法	11	8	12	12	10

6 结 论

本文基于多目的批处理过程的赋时 Petri 网模型, 引入动态优化及启发式调度规则对过程进行控制。研究结果表明, 利用 Petri 网及动态优化算法设

计的 Petri 网控制器, 不仅能简洁而直观地表达多目的批处理过程中资源的复杂交互关系, 而且在 Petri 网的执行过程中嵌入启发式调度规则, 可以给出最优过程控制序列, 并使 makespan 为最小。进一步的研究应是系统的全局优化设计, 即局部控制器与上层 Petri 网控制器之间的协调和控制问题。

参 考 文 献

1 Murata T. Petri nets: Properties, analysis and application. Proc of the IEEE, 1989, 77(4): 541~580

2 Lloyd S, Salleh Y Md. Real-time control of batch process plant through timed Petri net modeling and dynamic optimization. In: 1st IFAC Workshop on Algorithms and Architectures for Real-time Control. Bangor, North Wales, 1991. 11~13

3 Lloyd S, Salleh Y Md. Modeling and control design of batch process plant by timed Petri net. In: Proc of the 30th Conf on CDC. Brighton, 1991. 1531~1536

4 French S. Sequencing and scheduling: An introduction to the mathematics of the job-shop. New York: John Wiley & Sons, 1982

作 者 简 介

李慧芳 女, 1966 年生。1994 年在西安交通大学信息与控制系统获硕士学位, 现为该校系统工程研究所博士生。主要研究方向为离散事件动态系统, 化工批处理过程调度。

李人厚 男, 1935 年生。1957 年毕业于上海交通大学工业电气自动化专业, 现为西安交通大学系统工程研究所教授, 博士生导师。主要研究方向为智能控制理论与方法, 智能制造系统调度, 多媒体与 CSCW 理论及应用。

(上接第 446 页)

作 者 简 介

丁永生 男, 1967 年生。东华大学副教授, 博士, 1996~1998 年作为访问学者在美国得克萨斯大学医学院工作。主要学术方向为模糊控制, 智能控制, 人工免疫系统, DNA 计

算等。

任立红 女, 1967 年生。东华大学讲师, 在职博士生。主要学术方向为 DNA 计算, 软计算, 人工免疫系统, 智能控制等。