

文章编号: 1000-8152(2009)03-0349-04

混合编码免疫算法在船舶载重计量的应用

龚固丰, 章 兢, 何昭晖, 何 敏, 王炼红

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 提出一种混合编码免疫辨识算法, 并应用于船舶载重货物计量的模型辨识. 该算法结合免疫算法优越的全局搜索性能与 GP 算法简洁的结构树编码方法, 将抗体编码为模型结构树编码与模型参数编码的组合, 通过对抗体结构与参数的免疫操作, 实现全局寻优及非线性模型的结构与参数的一体化辨识. 算法不依赖对象的先验知识, 辨识的模型结构简单、易于理解. 仿真及船舶载重模型的辨识应用验证了本算法的有效性较强的非线性逼近能力.

关键词: 免疫算法; 系统辨识; 非线性系统; 结构辨识; 参数估计

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Application of combinatorial-coded artificial immune system(AIS) to ship cargo weighing

GONG Gu-feng, ZHANG Jing, HE Zhao-hui, HE Min, WANG Lian-hong

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China)

Abstract: A combinatorial-coded artificial immune system(AIS) is presented and applied to the modeling of ship cargo weighing. This algorithm possesses the advantage of immune algorithm in global searching and the conciseness of genetic program(GP) in structure-tree. It codes the antibodies in a combination of structure-tree-coding model and parameter-coding model. By applying immune operations to both structures and parameters of antibodies, the global optimization and the identification of both structures and parameters of the nonlinear system are thus realized. The algorithm is independent of prior knowledge; and the identified model is of simple structure to be understood. Simulations and applications of the identification to the ship cargo weighing model demonstrate the efficacy and efficiency of the proposed algorithm.

Key words: immune algorithm; system identification; nonlinear system; structure identification; parameter estimation

1 引言(Introduction)

常规免疫算法采用定长的二进制数或浮点数组来编码抗体, 在系统参数辨识中得到了广泛应用^[1~3]. 基于 GP 算法的系统辨识方法^[4~6]将辨识模型编码为基因结构树, 不需要先验知识, 通过对基因树的遗传进化操作实现系统结构的辨识, 通常能得到结构简单、容易理解的系统结构模型. 本文将免疫算法与 GP 算法结合, 提出一种混合编码免疫辨识算法, 该算法将非线性模型表达式编码为结构树, 将表达式中的参数编码为浮点数组, 不需要对象的先验知识, 利用免疫机理在解空间中全局搜索最优解, 从而实现模型结构与参数的一体化辨识.

2 算法实现(Algorithm realization)

2.1 抗体编码(Coding antibody)

由于非线性问题的复杂性, 非线性系统的辨识通

常采用各种非线性分解表达式来逼近一个未知非线性系统. 因而可以由预定义的基本函数的组合来逼近一个非线性系统模型, 一个单输入多输出系统可以描述为^[6]

$$y(k) = (f_1, f_2, \dots, X(k), P). \quad (1)$$

式中: $X(k) = [u(k-1), \dots, u(k-n_u), y(k-1), \dots, y(k-n_y)]^T$ 为系统的输入向量; $y(k)$ 为系统的输出; n_u, n_y 为系统输入与输出的阶; f_1, f_2, \dots 为预定义的基本函数; p_1, p_2, \dots 为表达式中的参数.

免疫辨识算法通常将训练数据定义为抗原, 将待辨识的模型定义为抗体. 常规免疫辨识算法采用定长的二进制数或浮点数组来编码抗体, 这种方法比较适合结构已知的模型参数辨识. 对于式(1)的非线性分解式, 可以采用一个结构树 T 来描述其结构^[4], 采用一个不定长的浮点数组 $P = [p_1, p_2, \dots]$ 来描

述表达式中的参数. 因而, 本文抗体编码AB由树编码T与参数编码P两部分组成, 即

$$AB_i = (T_i, P_i). \quad (2)$$

树编码T反映了抗体的内在组织结构, 对应着非线性系统模型表达式的结构; 参数编码P反映了抗体的特性参数, 对应着模型表达式的参数. 这样, 每个抗体就对应了一个非线性系统模型. 在抗原的刺激下, 抗体的结构T与参数P通过一系列的免疫操作, 最终产生与抗原最匹配的抗体, 从而实现非线性模型的辨识. 图1所示为模型表达式(3)对应抗体编码的一个示例.

$$y = \sin(x_1 x_2 + 0.2 \times (x_3 - 0.3)). \quad (3)$$

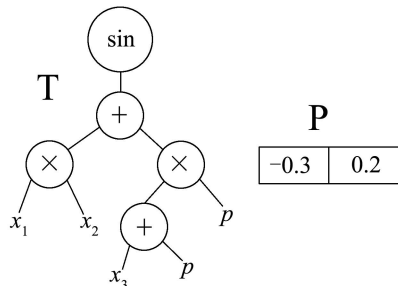


图1 抗体编码示例

Fig. 1 Example of coding antibody

2.2 抗体初始化(Initializing antibodies)

首先定义抗体规模N, 树的最大层数L_{max}, 运算符集M(基本函数)与终止符集G(模型的输入变量及参数); 随机从M与G中选取元素生成N个不超过最大层数L_{max}的抗体结构树; 对每个树中的参数用随机数进行初始化.

2.3 亲和力函数定义(Affinity function)

系统辨识的目标是寻找模型结构简单、阶次较低且预测误差最小的最优模型, 亲和力函数如式(6)所示:

$$y'_{ij} = F(AB_i, X_j), \quad (4)$$

$$E_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (y'_{ij} - y_{ij})^2, \quad (5)$$

$$f_i = \exp[-\alpha \times (E_i^2 - \beta \times L_i - \gamma \times r_i)]. \quad (6)$$

式中: F(AB_i, X)为第i个抗体对应的模型表达式, E_i, f_i为第i个抗体预测均方差与亲合力; m为训练数据对的数量; y'_j, y_{ij}为第j个输入值对应的实测输出值与模型预测值; L_i, r_i分别为抗体i的结构树层数与对应模型的阶数; α为分布系数, β, γ分别为层数与阶的惩罚因子.

2.4 抗体选择与克隆(Selection and clone of AB)

为了充分利用优良个体, 提高算法效率, 采用自适应克隆方法, 抗体越优良, 克隆越多. 个体克隆规

模可由式(7)计算:

$$c_i = C_{\max} \times f_i, \quad (7)$$

式中: C_i为抗体i的克隆数, C_{max}为最大克隆数.

2.5 结构变异(Structure mutation)

结构树的变异主要包括交叉、点突变与子树突变3种形式. 交叉是指对群体中个体的节点进行随机选择, 将选中的节点子树进行交叉, 从而产生新的个体; 点突变是指用随机从运算符集M与终止符集G中选取的基本函数、常数或变量替换突变点原有节点; 子树突变是指删除突变点以下的子树, 用随机产生的一颗新子树插入到突变点来更换旧子树, 其中单变量或参数可以视为只有一个节点子树. 在结构变异操作时必须进行有效性检查以避免产生非法表达式或超过最大层数的结构树.

2.6 抗体参数估计(Optimization of parameters)

在抗原的刺激下, 除了抗体结构免疫操作以外, 抗体的特性参数(即参数编码部分)也会进行一系列的免疫反应. 抗体参数的免疫操作通过一个内循环来实现. 在循环中, 对每一个抗体的参数编码部分进行克隆、变异、选择等操作, 从而实现参数的优化, 这一过程类似于确定结构的参数辨识算法, 具体实现参见文献[7].

2.7 算法流程(Algorithm flowchart)

混合编码免疫辨识算法流程如图2所示.

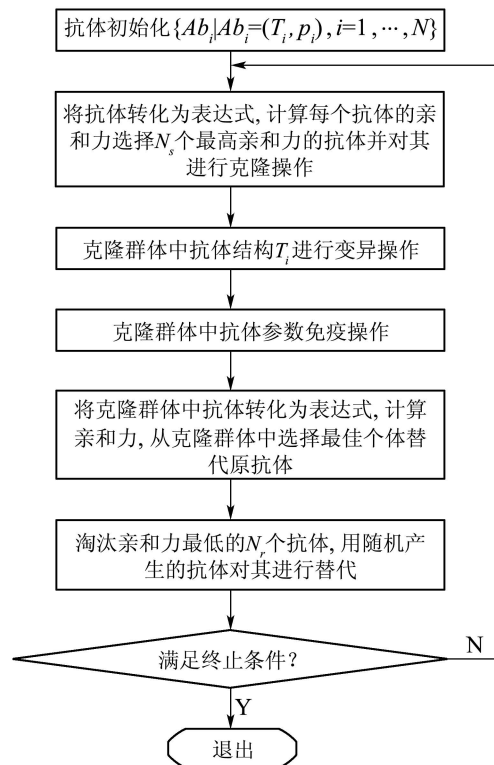


图2 算法流程

Fig. 2 Flowchart of the algorithm

3 仿真实例(Simulations)

为了验证算法的有效性, 对非线性对象

$$y(k) = 0.8u(k-1)^2 + 1.2y(k-1) - 0.9y(k-2) - 0.2 + e(k). \quad (8)$$

进行仿真, 其中 $e(k)$ 为4%的随机白噪声序列. 加入激励信号获取500组输入输出数据序列, 作为训练集用于模型辨识. 设运算符集 $M = \{+, -\}$, 终止符集 $G = \{u(k-1), u(k-2), y(k-1), y(k-2)\}$, 运行1000代后, 最佳抗体的编码如图3所示, 其对应的模型表达式与式(8)几乎完全吻合.

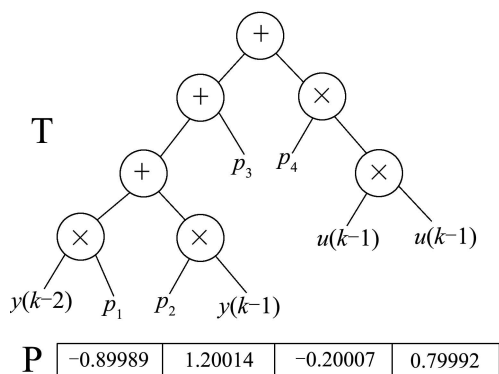


图3 仿真结果

Fig. 3 Result of simulation

文献[6]提出了一种带罚函数 OLS(orthogonal least squares)的GP算法, 并提供了同基本GP算法与带罚函数的GP算法进行比较的仿真结果, 为了检验算法的性能, 同文献[6]进行仿真比较. 终止条件设为: 运行时间大于1000或预测均方差小于0.0001. 每种算法都运行10次, 仿真结果如表1所示.

表1 几种算法比较结果
Table 1 Comparing results

	基本 GP	带罚函数的 GP	带罚函数与 OLS 的 GP	本文算法
成功辨识	0	6	7	10
不成功辨识	10	4	3	0
运行时间	1000	880	565	584

仿真结果表明, 由于GP算法易于陷入早熟收敛, 从而不能保证每次都能成功辨识; 混合编码免疫算法避免了GP算法早熟收敛的缺点, 每次都能成功辨识出最优模型表达式与参数, 是一种全局寻优算法, 而运行时间与文献[6]提出的带罚函数与OLS的GP算法基本相近.

4 应用实例(Applications)

水尺计重是一种船舶运输货物计量普遍采用的方法, 通过测量船体吃水线, 参照《船舶载重与水尺

对照表》及船舶的其他有关资料, 来测算船舶装卸货物重量. 然而由于船舶是一个不规则几何体, 加上浪、船体倾斜度、人员主观因素等的影响, 其测量精度往往不高^[8]. 罐装水泥运输船往海上作业的搅拌船运送散装水泥时, 由于缺乏有效的货物计量手段, 只能依靠起运点卖方的计量设备计量所需货物后运送到海上单个作业点卸货. 然而, 由于搅拌船无储料设备, 日需求量很小, 导致船舶运力的巨大浪费. 为了充分发挥船舶运力, 改变船舶货物计量难的现状, 开发了一套船舶智能载重测量仪.

该测量仪通过检测船体吃水深度, 根据船舶模型及吃水深度计算排水量, 从而实现船舶载重货物的计量. 船舶载重模型采用混合编码免疫辨识算法获得. 在船体底部前后左右4个位置安装压力变送器, 船舶载重模型表达式可以描述为

$$G = p_0 + p_{ijkm} \times \sum_i \sum_j \sum_k \sum_m h_1^i h_2^j h_3^k h_4^m, \quad (9)$$

式中: G 为船舶载重量; h_1, h_2, h_3, h_4 为船体前后左右的吃水深度.

在测量仪正确安装在船舶上以后, 通过岸上精确计量装置计量货物进行装载试验, 记录每次装载货物量及吃水深度数据作为训练数据集. 将训练数据输入辨识软件, 即可获得表达式简单、精度较高的船舶载重模型.

该测量仪已在多条东海大桥及杭州湾大桥工程的水泥承运船舶上安装并得到成功应用, 实现了多点卸货, 有效提高了船舶的运输效率. 水泥承运方在买方及卖方参与下对10条船舶的智能载重测量仪进行了测试, 测试结果见表2.

表2 测试结果
Table 2 Testing results

测试条件	风速1级以内	风速2~3级	3~6级
最大误差	0.31%	0.45%	0.48%
最小误差	0.15%	0.25%	0.39%
平均误差	0.21%	0.37%	0.44%

测试结果表明该测量仪在风浪很小时具有很高的测量精度, 在风速6级以内, 测量误差小于0.5%. 误差大小与风浪条件有关, 主要由于风浪越大, 引起船舶摇晃漂移, 造成牵引船舶的缆绳紧绷而产生较大的拉力, 而这个拉力在垂直方向分力引起吃水深度测量的误差, 从而导致计量误差增大.

5 结论(Conclusion)

本文结合免疫算法的优越搜索性能与GP算法结构树编码方法, 提出了一种混合编码免疫辨识算法.

该算法采用不同于经典免疫算法中定长数组的抗体编码方法,采用结构树与不定长数组的混合编码方法来编码抗体,通过对结构树与参数向量的免疫进化操作,实现非线性模型的结构与参数的一体化辨识.该算法不依赖于非线性系统的先验知识,具有全局搜索性能,能辨识出结构简单、易于理解的模型,仿真及在罐装水泥船舶载重计量仪的应用验证了本算法的有效性较强的非线性逼近能力.

参考文献(References):

- [1] DE CASTRO L N, TIMMIS J. *Artificial Immune Systems: A New Computational Intelligence Approach*[M]. London: Springer, 2002.
- [2] WEI Y G, ZHENG D L, WANG Y. Research of an immune clone selection algorithm and its application in heating furnace state recognition[C] // *Proceedings of 2004 International Conference on Information Acquisition*. Hefei, China: IEEE Press, 2004: 384 – 387.
- [3] 徐雪松, 诸静. 人工免疫系统在复杂系统免疫辨识中的应用[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 890 – 894.
(XU Xuesong, ZHU Jing. Application of artificial immune system in immunised neural network identification of complex system[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(6): 890 – 894.)
- [4] RODRIGUEZ-VAZQUEZ K, FLEMING P J. A genetic programming NARMAX approach to nonlinear system identification[C] // *Second International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications*. University of Strathclyde, Glasgow, UK: IEE Conference Publication, 1997: 409 – 414.
- [5] WINKLER S, AFFENZELLER M, WAGNER S. New methods for the identification of nonlinear model structures based upon genetic programming techniques[J]. *Journal of Systems Science*, 2004, 31(1): 5 – 13.
- [6] MADAR J, ABONYI J, SZEIFERT F. Genetic programming for the identification of nonlinear input-output models[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(9): 3178 – 3186.
- [7] 李晓斌, 左磊, 于波. 一种自适应免疫遗传算法及其在系统辨识和参数优化中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(3): 85 – 88.
(LI Xiaobin, ZUO Lei, YU Bo. An adaptive immune genetic algorithm and its application in system identification and parameter optimization[J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2006, 32(3): 85 – 88.)
- [8] 张钢. 散装货物运输中水尺计重的原则和方法[J]. 中国航海, 2006, 69(4): 35 – 38.
(ZHANG Gang. The principle and means of draft survey in bulk cargo transportation[J]. *Navigation of China*, 2006, 69(4): 35 – 38.)

作者简介:

龚固丰 (1968—), 男, 博士研究生, 主要从事智能控制与预测控制、工业仪器仪表的开发与应用, E-mail: gghncs@yahoo.com.cn;

章兢 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事工业自动化、复杂系统计算机控制方面的研究, Email: zhangj@hnu.cn;

何昭晖 (1975—), 男, 博士生, 主要从事复杂系统智能控制研究, E-mail: he_zhaohui@163.com;

何敏 (1977—), 女, 博士生, 讲师, 主要从事仪器仪表与复杂系统智能控制研究, E-mail: Xrl2004_914@sohu.com;

王炼红 (1975—), 女, 副教授, 主要从事仪器仪表与复杂系统智能控制研究, E-mail: WLH-01@163.com.