

文章编号: 1001-0920(2002) 02-0252-03

基于 EGA 的非线性预测控制器

王慧燕, 诸 静

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 提出一种基于 Volterra 模型的非线性预测控制器。采用收敛精度高、速度快的 EGA 算法滚动求解控制律, 反馈校正中考虑了对误差和输出变化趋势影响的双重抑制。对一类非线性系统的仿真研究表明该预测控制器响应快, 具有较强的鲁棒性, 对于改善非线性预测控制策略的性能非常有益。

关键词: EGA; 非线性预测控制器; Volterra 模型

中图分类号: O 231

文献标识码: A

Nonlinear predictive controller based on elitist preserved genetic algorithm (EGA)

WANG Hui-yan, ZHU Jing

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A nonlinear predictive controller based on elitist preserved genetic algorithm (EGA) is presented. The trend of output variation is take into account together with the output error in the controller, and an EGA is used to obtain the control law. The simulation results show that the controller has enhanced response speed and robustness. It is an effective control algorithm combined EGA with predictive control.

Key words: EGA; nonlinear predictive controller; Volterra model

1 引 言

由于实际工业过程大多具有强非线性特性, 因而基于非线性模型来处理反馈控制问题存在一定的困难。近年来, 基于 Volterra 级数逼近非线性系统的方法备受关注, 取得了大量研究成果。

本文基于非线性系统的 Volterra 模型研究预测控制算法, 采用收敛精度高、速度快的 EGA 算法求解控制律, 反馈校正中考虑了对输出误差和输出变化趋势影响的双重抑制, 并引入积分因子项来消除由于引入控制量约束而失去零偏差特性的现象。

最后给出一个精馏塔简化模型的仿真研究结果。理论分析和仿真结果表明本文算法响应速度快, 具有较强的鲁棒性。

2 EGA 算法原理

近年来, 对遗传算法(GA)^[1]的研究大多集中在基于各种修正形式对 GA 进行改进, 具有最优保留特性的 GA(EGA) 是其中较为典型的一类。EGA 的主要思想是迭代过程中最优个体得到一定程度的保护, 最优保留作用是保持迄今为止所发现的最优解。

收稿日期: 2000-09-29; 修回日期: 2000-12-13

作者简介: 王慧燕(1975—), 女, 山东招远人, 博士生, 从事非线性预测控制、计算机图像处理等研究; 诸静(1938—), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、机器人控制等研究。

由此可见,EGA 一旦发现全局最优解,则该最优解将保持到最后。因此,EGA 能否全局收敛的关键是 EGA 能否发现全局最优解。

EGA 为全局收敛的充分条件是^[2]:在搜索过程中,EGA 能发现全局最优解或经历包含全局最优解的状态。

3 非线性系统 Volterra 模型的获取

实际应用中常采用正反向阶跃响应法建立系统的 Volterra 模型。对于时不变系统,令

$$s(k) = \begin{cases} 1, & k \geq 0 \\ 0, & k < 0 \end{cases}$$
$$s_{2p}(k,i,j) = s(k-i) + s(k-j)$$
$$s_{2n}(k,i,j) = -s(k-i) - s(k-j)$$

若系统在 $s(k)$, $-s(k)$ 和 $s_{2p}(k,i,j)$, $s_{2n}(k,i,j)$ 激励下的零状态响应分别为 $y_+(k)$, $y_-(k)$ 和 $y_{2+}(k,i,j)$, $y_{2-}(k,i,j)$, 则系统的 Volterra 核可确定为

$$h_1(k) = [y_+(k) - y_-(k)]/2$$
$$h_2(k,k) = [y_+(k) + y_-(k)]/2$$
$$h_2(i,j) = [y_{2+}(i,0,i-j) + y_{2-}(i,0,i-j) - h_2(i,i) - h_2(j,j)]/2$$

其中, $k \geq 1, j < i_0$

4 基于 Volterra 级数的预测控制器

4.1 非线性系统的 Volterra 级数描述

假定非线性系统

$$y(k) = F[y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n), u(t-d), u(t-d-1), \dots, u(t-d-m)] \quad (1)$$

可用如下二阶 Volterra 级数表示,即

$$y(k) = T_s \sum_{i=0}^{k-1} h_1(k-i) \Delta u(i) + \sum_{i=0}^{k-1} \sum_{j=0}^{k-1-i} h_2(k-i, k-j) \Delta u(i) \Delta u(j) \quad (2)$$

利用正反向阶跃响应法获取非线性系统的 Volterra 核 $h_1(i)$, $h_2(i,j)$, 可以得到基于 Volterra 级数的多步预测模型

$$y_m(k+l|k) = T_s \sum_{i=0}^{k+l-1} h_1(k+l-i) \Delta u(i|k) + \sum_{i=0}^{k+l-1} \sum_{j=0}^{k+l-1-i} h_2(k+l-i, k+l-j) \Delta u(i|k) \Delta u(j|k), \quad l = 1, 2, \dots, M$$

其中, $y(k+l|k)$ 是 k 时刻对 $k+l$ 时刻的预测输出, $\Delta u(i|k) = \Delta u(i)$ ($i < k$) 是 $t = kT$ 时刻对 $\Delta u(i)$ ($i > k$) 的假想值。

4.2 基于 EGA 的非线性预测控制器设计

基于 EGA 的非线性预测控制系统结构如图 1 所示(为方便起见,以单步预测为例)。若令

$$e(k) = y(k) - y_m(k)$$
$$d(k) = y_m(k+1) - y(k)$$
$$f(k) = \sum_{j=k-m+1}^k e(j)$$

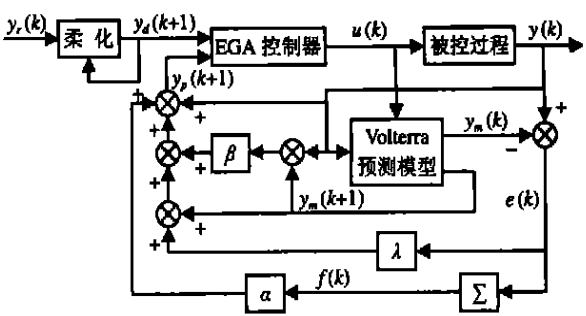


图 1 基于 EGA 的预测控制系统结构

显然, $e(k)$ 代表预测误差, $d(k)$ 可近似表征实际输出 $y(k)$ 的变化趋势(模型无失配)。闭环预测输出由如下形式给出

$$y_p(k+1) = y_m(k+1) + \lambda e(k) + \beta d(k) + \alpha f(k) \quad (4)$$

其中, $\alpha f(k)$ 为误差积分因子, 用于保证内模控制器的理想控制器特性以消除静差; $\beta d(k)$ 用来抑制 $y(k)$ 变化趋势对预测输出的影响。选取性能指标

$$J = \min_{\Delta u(k)} \{p[y_d(k+1) - y_p(k+1)]^2 + q\Delta u^2(k)\} \quad (5)$$

其中 p 和 q 分别为误差和控制约束权。

于是, 求解非线性系统预测控制律问题可归纳为一个在线优化问题, 即在每一时刻 k 寻找可行控制域内局部最优控制变化量 $\Delta u^*(k)$, 使得性能指标 $J(k)$ 极小, $J[k, \Delta u^*(k)] = \min_{\Delta u} [k, \Delta u(k)]$ 。利用 EGA 在线求解预测控制律的流程如图 2 所示。

5 参考轨迹

取如下经柔化的设定轨迹为参考轨迹

$$y_d(k+i) = \rho y_d(k+i-1) + (1-\rho)y_r, \quad 0 \leq \rho \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

其中, 柔化因子 $\rho = \exp(-T_s/\tau)$, τ 为参考轨迹常

数, y_r 为设定轨迹。

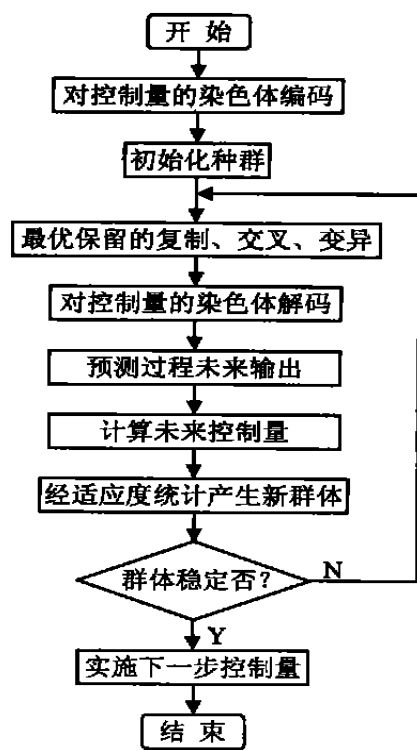


图 2 求解预测控制律流程

6 仿真研究

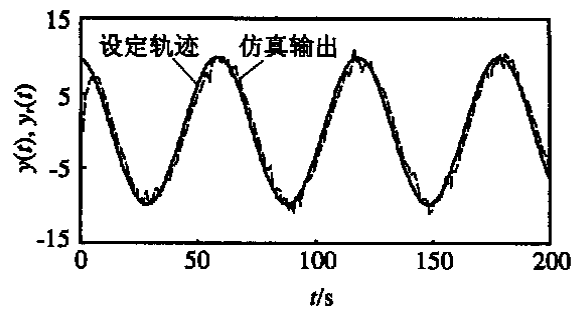
设非线性被控对象可用如下模型描述

$$y(k) = \frac{y(k-1)y^2(k-2)u(k-d-1)}{1+y^2(k-1)+y^2(k-2)} + \frac{y(k-1)y(k-2)u(k-d-1)}{1+y^2(k-1)+y^2(k-2)} + w(k)$$

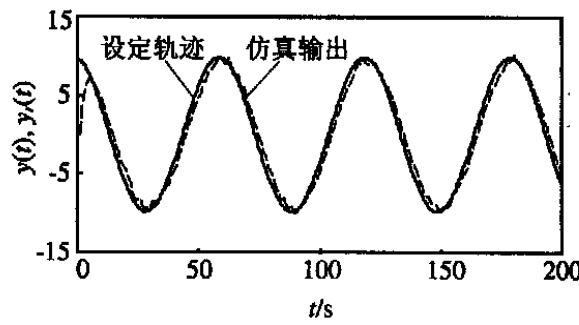
其中, $w(k)$ 是均值为 0、方差为 0.01 的白噪声, 时滞 $d = 4$ 。仿真中首先用正反阶跃响应法辨识其 Volterra 核(取为二阶截断模型), 然后在其 Volterra 模型的基础上实施基于 EGA 的预测控制算法, 以跟踪预设曲线。其中预设曲线为

$$y_r(t) = 5\sin(0.033\,3\pi t + 0.612\pi) + 5\cos(0.033\,3\pi t)$$

选择种群个体的进化已趋于基本稳定的状态作为 EGA 的迭代终止条件(即某一个体在种群中的比例已遥遥领先)。在种群规模为 32, 交叉率为 0.5, 变异率为 0.02 的情况下, 基于 EGA 的预测控制系统对设定轨迹的跟踪情况如图 3(a) 所示; 在交叉率为



(a) 预测控制系统跟踪情况 1



(b) 预测控制系统跟踪情况 2

图 3 仿真结果

0.7, 变异率为 0.05 的情况下, 预测控制系统对设定轨迹的跟踪情况如图 3(b) 所示。

由图可见, 基于 EGA 的预测控制算法取得了较好的控制效果, 能有效地抑制超调, 克服外加噪声的影响, 较为成功地解决了一类非线性系统的动态优化问题。

7 结 论

本文提出的基于 EGA 的非线性预测控制器, 实现了对一类可用 Volterra 模型逼近的非线性系统的反馈控制。理论分析和仿真实验都表明本文算法响应快, 具有较强的鲁棒性, 对于改善非线性预测控制性能非常有益, 可在化工、冶金等工业过程中推广使用。

参考文献(References):

[1] Merino D I. Genetic algorithms: Theory and application [J]. Comput Educ J, 2000, 10(2): 9-66.
[2] 何琳, 王科俊, 李国斌, 等. 最优保留遗传算法及其收敛性分析[J]. 控制与决策(Control and Decision), 2000, 15(1): 63-66.