

基于 GA 参数整定的时变时滞系统 灰色预测控制

马小雨, 慕 昆

(河南工程学院 计算机学院, 郑州 451191)

摘要: 针对一类数学模型未知且存在时变时滞的复杂系统, 提出一种基于遗传算法参数整定的灰色预测控制方法; 该方法采用 BP 神经网络对系统的时变时滞进行辨识, 利用灰色预测算法对系统的输出进行预测, 进而使用基于遗传算法整定 PID 控制器对系统进行输出反馈控制; 该方法将灰色预测算法与遗传算法相结合, 有效提高了控制器的自适应性; 通过仿真实例, 结果表明该方法能够对具有大时滞、大惯性、模型不确定等特点的复杂系统进行有效地控制; 该方法是可行的、有效的。

关键词: 遗传算法; 灰色预测; BP 神经网络; 时滞系统; 参数整定

Research on Grey—Model Prediction Control Based on GA

Ma Xiaoyu, Mu Kun

(Computer Department of Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: For a class of nonlinear systems with unknown input delay, a grey predictive control method based on Genetic Algorithm is proposed. By using BP neural network, the unknown input delay is identified, The system output is estimated by the grey predictive algorithm, and then use PID controller based on genetic algorithm to conduct output feedback control for the system. The method combines grey predictive algorithm with genetic algorithm, the adaptability of the controller is improved effectively. Through simulation, the results show that the method can effectively control complex system with a large delay, large inertia, model uncertainty and other characteristics. The method is feasible and effective.

Keywords: GA; grey—model prediction; BP neural network; time—delay systems; parameter setting

0 引言

随着我国工业技术发展的不断深入, 在大多数工业控制过程中, 多数系统的时滞、非线性、分布参数、时变性等特性不同程度地影响着被控过程控制品质以及控制精度等一些性能指标^[1]。由于这些系统机理的复杂, 给系统的准确建模带来比较大的困难。因此常规 PID 控制方法通常不能获得良好的控制品质。

近年来, 针对无法建立精确模型的复杂被控对象, 一些学者把模糊控制和神经网络技术引入 PID 控制^[2]中, 增强了控制器的鲁棒性, 取得了较好的控制效果。然而当被控对象存在着较为明显时滞特性时, 上述控制方法容易导致较大的超调和较长的调节时间, 影响控制品质。文献 [3] 针对一类模型未知且具有固定时滞的系统, 提出了灰色预测时滞补偿方法来改善控制效果, 具有很强的自适应性。但该方法需已知延迟时间, 因此若将此方法应用于时滞未知系统, 需首先对时滞进行辨识。文献 [4-5] 提出利用神经网络来辨识时滞的方法, 对变化参数或不确定性延迟时间的大延迟系统取得了较好的控制效果。

本文依据遗传算法的基本理论和观点, 提出一种灰色预测控制理论。作为灰色系统理论的重要组成部分, 该方法应用于 BP 网络的问题处理和逼近线性或非线性函数的优良特性来辨

识系统未知时滞, 在此基础上在线调整灰色预测算法参数, 利用灰色 GM(1, 1) 模型^[6]算法对系统输出进行预估, 将预估量反馈给输入端并将其作为控制参考量; 利用遗传算法本身具备良好的全局搜索能力, 信息处理的隐含并行性等优良特点来设计控制器代替常规 PID 控制, 使控制器具有较强的自适应性。通过仿真研究, 验证文中方法对数学模型未知且存在时变时滞的复杂系统的控制具有较强的自适应性。

1 基于 GA 参数整定的时变时滞系统灰色预测控制

1.1 系统结构设计

本文采用带有滞后时间辨识的灰色预测方法对被控对象输出进行预测, 以 BP 神经网络算法^[7]设计控制器, 对系统进行预测控制。系统主要由 3 个控制模块构成。第一个模块是利用三层反向传播 (BP) 网络来辨识被控对象的时滞量; 第二个模块以辨识的结果作为此模块的输入参数, 利用传统灰色 GM(1, 1) 模型对被控对象的历史输出来预测未来一段时间的输出值, 实现对系统的超前控制; 第三模块以灰色预估器的预测值作为模块的输入, 再利用遗传算法设计控制器, 提高整个系统的控制品质。系统如图 1。

1.2 基于 BP 神经网络的时滞辨识

考虑一般非线性纯滞后系统:

$$y(k) = f(y(k-1), \dots, y(k-n), u(k-d), \dots, u(k-m-d)) \quad (1)$$

当前输出 $y(k)$ 是以前输出 $y(k-1), \dots, y(k-n)$ 以及 d 步延迟以前的输入 $u(k-d), \dots, u(k-m-d)$ 的非线性函数。由于系统的非线性, 不能采用两层自适应线性单元

收稿日期: 2014-10-22; 修回日期: 2014-11-20。

作者简介: 马小雨(1978-), 男, 河南郑州人, 讲师, 主要从事计算机网络与安全方向的研究。

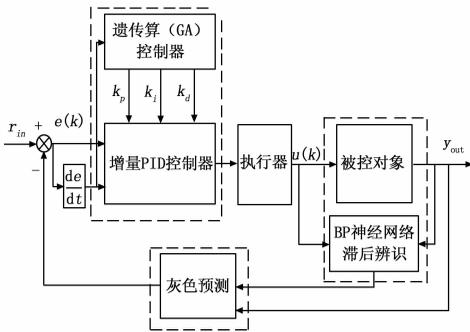


图 1 控制系统图

(ADALINE) 网络对于系统时滞 d 进行辨识^[8-9]。

考虑采用三层反向传播网络, 对系统时滞进行辨识, 如图 2, n 个历史输出 y 和 $m+1$ 个历史输入共同构成输入节点中间隐含层节点数量可取输入节点数量的 0.8~1.5 倍。

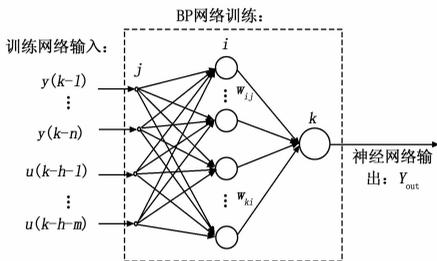


图 2 非线性系统辨识方法

研究表明: 用 BP 神经网络进行辨识, 采用不同的输入采样区间的采样序列 $u(k-h)$ 、 $u(k-h-1) \dots u(k-h-m)$ 对网络的训练结果有很大的影响。

考虑以下时滞模型:

$$y(k) - 0.778y(k-1) = 0.443u^2(k-4)$$

时滞辨识的核心思想为: 对于滞后时间为 d 的系统, k 时刻的系统的输出值与 $k-d$ 时刻系统输入信息相关, 所以当系统输入采样序列 $u(k-h)$ 、 $u(k-h-1) \dots u(k-h-m)$ 中包含 $k-d$ 的信息时, 这些神经网络的输入信息经过神经网络学习后的输出与期望输出的误差较小, 反之误差比较大。即从输入区间 $u(k-h)$ 、 $u(k-h-1) \dots u(k-h-m)$ 不包括第一个延迟输入量 $h=d+1$ 到包含第一个延迟输入量 $h=d+1$ 时, 期望输出与 BP 网络输出的误差平方和产生突变, 以此可以得到系统滞后时间的估计量。辨识结果与程序流程如图 3 和图 4 所示。由于 BP 网络对非线性系统辨识具有较高的逼近精度, 具有良好的泛化能力, 对非线性系统具有较强的拟合能力, 可用来实现对非线性系统时滞的辨识。

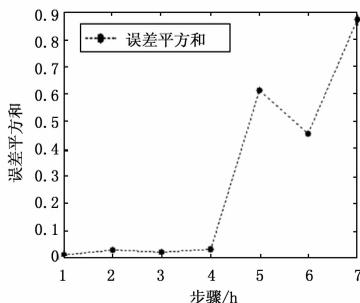


图 3 非线性系统辨识方法

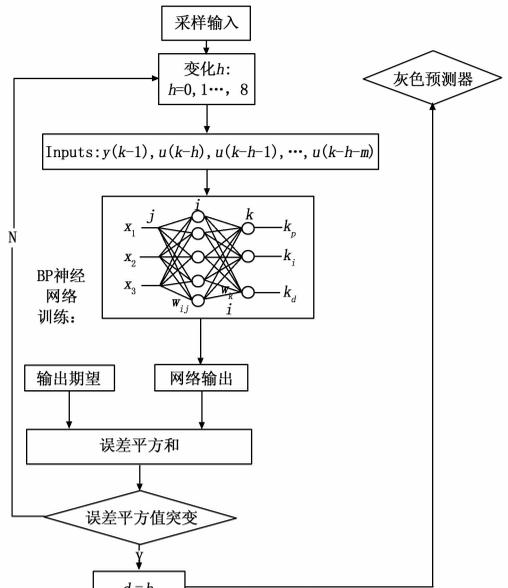


图 4 程序流程

1.3 灰色预估补偿

灰色预测控制是将控制理论与灰色系统理论相结合的一种新型控制方法, 是处理具有大惯性、大延迟特点的系统问题的重要解决手段^[10]。该理论的处理方法为: 把随机量试作特定区域内不断改变的灰色量指标, 这是解决了对象问题; 把对应的随机变化视为特定时空不断更新的灰色过程, 这就解决了变化范围的问题。找准了研究对象和研究时空范围, 灰色预测就可以实现了。该方法就是依据灰色系统对未来的发展趋势和将要发生的事件进行估测, 核心思想是据已知信息因素估测未知信息。

灰色预估器以系统 k 时刻及 k 时刻以前的一系列系统信息作为原始数据序列, 对系统未来输出进行预测。为了使预测更有意义, 可以使灰色预估器预测的步数为系统的滞后时间 d (d 值由 BP 网络辨识后得到), 在 k 时刻, 以灰色预估器预测的输出 $y(k+d)$ 代替 $y(k)$ 作为控制器的输入端, 从而使控制器提前得到响应, 并采取下一步的控制动作, 提高整个系统的性能。本文采用的灰色预估方法是在对原始样本数据作累加生成处理的基础上建立起来的 GM(1, 1) 灰色系统模型; 改进该模型, 将最新信息增添到已有的数据序列样本中, 使样本数据和模型始终保持最新, 从而实现“滚动”式预测, 使预测数据的规律性得到优化:

设 $Y_k^{(0)}$ 为系统 $k-m+1$ 到 k 时刻的原始输出序列:

$$Y_k^{(0)} = (y^{(0)}(k-m+1), y^{(0)}(k-m+2), \dots, y^{(0)}(k)) \quad (3)$$

m 是预测模型的维数; 对 $Y_k^{(0)}$ 进行一次累加生成处理, 记生成数列为 $Y_k^{(1)}$

$$Y_k^{(1)} = (y^{(1)}(k-m+1), y^{(1)}(k-m+2), \dots, y^{(1)}(k)) \quad (4)$$

$$\text{其中: } y^{(1)}(j) = \sum_{i=k-m+1}^j y^{(0)}(i), j = k-m+1, \dots, k;$$

$$y^{(1)}(k-m+1) = y^{(0)}(k-m+1)。$$

由于序列 $\{Y_k^{(1)}\}$ 具有近似的指数增长规律, 对序列可建立白化形式的微分方程:

$$\frac{dy^{(1)}}{dt} + ay^{(1)} = b \tag{5}$$

上式为经典灰色预测理论模型^[11]。a 表示构建模型的发展参数大小，能够体现 $Y_k^{(1)}$ 和 $Y_k^{(0)}$ 的变化走向；b 表示对应的协调系数的数值大小，体现各数据元素间的协调关系达到何种程度。

这两个模型参数是用指数曲线进行拟合，用最小二乘法进行求解，模型待辨识参数列为：

$$[a, b]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_k \tag{6}$$

式中：

$$Y_k = [y^{(0)}(k-m+2), y^{(0)}(k-m+3), \dots, y^{(0)}(k)]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.5[y^{(1)}(k-m+1) + y^{(1)}(k-m+2)] & 1 \\ -0.5[y^{(1)}(k-m+2) + y^{(1)}(k-m+3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -0.5[y^{(1)}(k-1) + y^{(1)}(k)] & 1 \end{bmatrix}$$

确定 a 和 b 之后，通过求解上述白化形式的微分方程 (5) 微分方程就可得到预测模型在 k+1 时刻的预测解为：

$$Y_k^{(1)} = [y^{(0)}(k-m+1) - \frac{b}{a}]e^{-ak} + \frac{b}{a} \tag{7}$$

k+d 步 $Y_{k+d}^{(1)}$ ：

$$Y_{k+d}^{(1)} = [y^{(0)}(k-m+1) - \frac{b}{a}]e^{-a(k+d-1)} + \frac{b}{a} \tag{8}$$

d 为 BP 神经网络辨识出的系统滞后量；还原 $Y_{k+d}^{(1)}$ ，可得 k+d 时刻的预估输出

$$\hat{y}^{(0)}(k+d) = Y_{k+d}^{(1)} - Y_{k+d-1}^{(1)} = [y^{(0)}(k-m+1) - \frac{b}{a}](e^{-a(m+d-1)} - e^{-a(m+d-2)}) \tag{9}$$

当实施预估操作时，还需要确定合适的建模维数，进一步发挥灰色预测的事前控制功效，确保预测结果具有较高的准确度和可操作性。经过建立起来的 GM(1, 1) 系统模型的预测操作，其所获结果的精准程度由确定的建模维数和初始数据列的基本情况共同决定。一般对于变化程度比较强的系统而言，确定较高的维数值与获得精确的结果没有必然的联系，系统中的旧信息经常会出现覆盖了最新数据信息的情况，这就造成在对波动性较大的系统进行检测时不具备及时性和准确性，难以满足相关的要求。另外，若想强化滤波所起的功效，可以通过选取较大的维数来实现。一般情况下，理想的建模维数可根据被预测对象的特性，通过试探法确定，本文实验建模维数取为 m=5。

1.4 基于遗传算法整定的 PID 控制器

遗传算法 (GA)^[12] 是以自然选择和遗传理论为基础，将生物进化过程中适者生存规则与群体内部染色体的随机信息交换机制相结合的搜索算法，其基本操作是复制、交叉、变异。

作为最早使用并且现在仍然应用的工业控制器，PID 控制器经历了一个快速发展的过程。现在，人们正在尝试对控制器参数进行最优化处理，以获得更好的性能。用于解决最佳化搜索的遗传算法理论，其在对应参数搜寻的问题处理中，具有稳定和快捷的功效，并得到了一定的应用。

下面对遗传算法的求解步骤进行说明。

1) 复制：

根据适应度比例法的理论计算出对应的适配值和复制率，为“自然选择”提供依据。遵循的规则是：复制率数值大小决定子代的数目。

2) 交叉：

交叉是把两父代个体的部分结构进行替换和重组，进而产生新个体的过程。在第一步中获得的个体内以交叉概率 P_c 来确定字串，它们是构成匹配池的元素，并对其中的个体元素按照随机性原则进行配对，配对的组合也就是交叉位置。

3) 变异：

按照变异算子 P_m 作用于种群，获得下一代群体。

原始种群经过上述三步操作之后，将进行检验，将种群对应解码处理之后，按照适配函数进行检。如果满足相关条件，停止操作；否则，进行迭进处理^[11]。

本文把进化理论演变来的遗传算法应用在 PID 相关系数的整定方面，

在全部预设的取样时间内实现 PID 控制量的及时整定。在每个采样时间内，取定一定数量的个体元素，并求出全部个体对应的自适应度数值，根据遗传算法的操作步骤，对参数进行寻优处理。结果中出现的自适应度数值最高的个体参数就是所求的理想控制参数，求解完毕。

2 仿真研究

设非线性滞后系统传递函数离散化的差分方程为：

$$y(k) - 0.6789 y(k-1) = 0.3424u^2(k-4)$$

利用上述 BP 神经网络辨识出系统输入时滞 d，灰色预估器模型维数为 5，预测系统对应与输入 u(k) 的输出 y(k+d)，并反馈至该新型控制器。

根据上述获得的控制参数 k_p, k_d ，需要进一步处理。实现模型的动态特性的优化处理，需要根据相应误差和误差变化率等的加权以及作为第 k 个采样时间时第 i 个个体的参数所选择最小目标函数。

$$J(i) = \alpha_p \times |error(i)| + \beta_p \times |de(i)| \tag{10}$$

为确保数据更为精确，相关量执行惩罚功能^[12]来加以控制和平衡。如果有超调现象的发生，就会把超调项列入指标的范围內，所以所求的最优指标可以表示如下：

如果满足 $error(i) < 0$ 的条件，则有：

$$J_i = J_i + 100 |error(i)| \tag{11}$$

仿真实验操作程序为：

1) 使用二进制编码方法，对所有参数的长度与基本范围进行暂定。其中，规定参量 k_p 与 k_d 的长度为 10 位。 k_p ，范围取 [5, 15]， k_d 取 [0.1, 0.5]。

2) 规定初始种群用 P(0) 来表示，样本个数 Size=120，需要进行 10 代进化。

3) 进行解码操作，并获得各自的参数数值，进一步计算 J 与 f。在式 (10) 中， $\alpha_p=0.95, \beta_p=0.05$ 。

4) 根据遗传算法的计算步骤，由 P(t) 获取子代种群，待处理。

实验中令 $P_c=0.9$ ，根据自适应理论，来确定变异的可能性的 高低程度。那么则有 $P_m=0.2 - [1; 1; Size] \times 0.01 / Size$ 。

5) 重复步骤 (3) 和 (4)，直至参数收敛。

图 5~8 为 PD 的阶跃响应、PD 整定过程中控制器的输出变化以及 k_p, k_d 的整定过程。

经过 10 代进化，获得优化参数： $k_p=12.054, k_d=0.0753$ ，仿真结果表明，本文采用的灰色补偿时滞的遗传算法

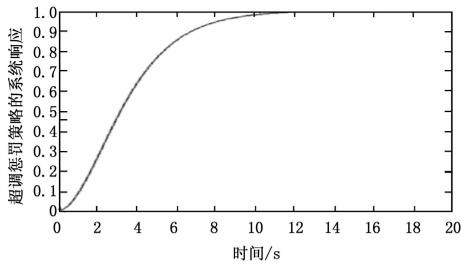


图 5 采用超调惩罚策略的系统响应

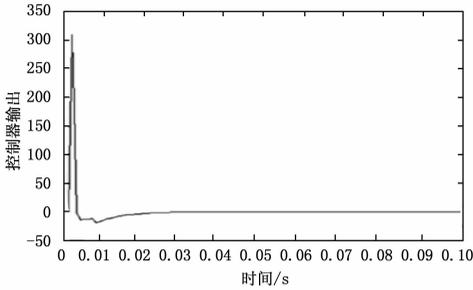


图 6 控制器输出

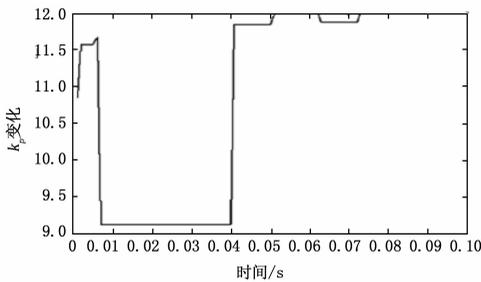


图 7 参数整定过程中 k_p 变化

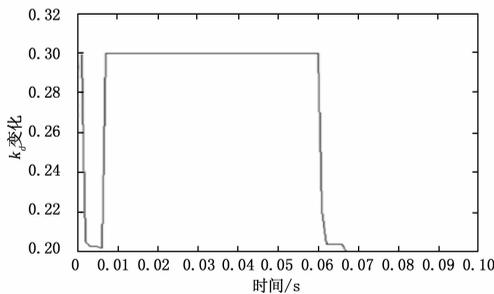


图 8 参数整定过程中 k_d 变化

控制对非线性时滞系统有良好的控制效果。

3 结论

文中提出的带灰色预估的遗传算法 (GA) 参数整定控制策略把全局寻优算法与预测控制相结合, 并利用 BP 神经网络对系统的滞后时间进行辨识。以被控对象的输出和时滞辨识的结果作为灰色预估器的输入来对系统进行预测控制, 把灰色预估器的输出作为控制器的输入, 再利用 GA 对 PID 控制器参数进行优化。经过在一个具有时滞、非线性等特性模型的仿真表明, 该控制方法对非线性时变滞后系统的过程控制有比较好的控制效果。

参考文献:

[1] Khashei M, Reza Hejazi S, Bijari M. A new hybrid artificial neural networks and fuzzy regression model for time series forecasting [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2013, 159 (7): 769-786.

[2] Moghaddamnia A, Ghafari Gousheh M, Piri J, et al. Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques [J]. Advances in Water Resources, 2014, 32 (1): 88-97.

[3] 罗伟. 基于灰色预测的参数自校正构架电阻炉温度模糊控制系统 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 965-967.

[4] 吴裕高, 朱学峰, 史步海. 基于灰色预测的大时滞过程的控制研究 [J]. 控制与决策, 2012, 14 (3): 278-280.

[5] 陆燕, 杜继宏, 李春文. 延迟时间未知的时延系统神经网络补偿控制 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 38 (9): 67-69.

[6] 王军平, 王安, 樊文侠, 等. 延迟时间未知的时延系统灰色预测控制 [J]. 测控技术, 2012, 21 (3): 39-41.

[7] Wang J Z, Wang J J, Zhang Z G, et al. Forecasting stock indices with back propagation neural network [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 38 (11): 14346-14355.

[8] 陈星, 李东海. 基于遗传算法的分布参数对象 PID 控制器设计 [J]. 自动化学报, 2012, 47 (8): 1356-1360.

[9] Chang G W, Chen C I, Liang Q W. A two-stage ADALINE for harmonics and interharmonics measurement [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2013, 56 (6): 2220-2228.

[10] 吴裕高, 朱学峰, 史步海. 基于灰色预测的大时滞过程的控制研究 [J]. 控制工程, 2012, 14 (3): 278-280.

[11] 尹琦, 袁小平. 基于灰色预测可变裕度 PID 网络自适应算法 [J]. 计算机应用研究, 2012, 29 (2): 711-713.

[12] Cubitt R P, Drouvelis M, Gächter S. Framing and free riding: emotional responses and punishment in social dilemma games [J]. Experimental Economics, 2013, 14 (2): 254-272.

(上接第 1577 页)

[2] 袁国利, 郎兵. 三冗余 PLC 在压缩机防喘振控制中的应用研究 [J]. 自动化仪表, 2011, 32 (1): 54-57.

[3] 张婉悦, 唐健, 孙以雷, 等. 污水处理过程中鼓风机防喘振控制的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (2): 217-218.

[4] 黄丽梅, 李鸣, 张宇. 基于 PLC 的鼓风机防喘振控制系统 [J]. 电气传动, 2012, 42 (8): 73-76.

[5] 付华, 孙树生. 基于 PLC 和模糊控制的矿井供风系统的改进方法研究 [J]. 煤矿机械, 2006, 27 (1): 139-141.

[6] 崔坚. 西门子工业网络通信指南. [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[7] 苏昆哲. 深入浅出西门子 S7-300 PLC [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.

[8] 孙增圻. 智能控制理论与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[9] 张经周, 杨伟静, 张安祥. 模糊自适应 PID 控制的研究及应用仿真 [J]. 计算机仿真, 2009, 26 (9): 132-135.

[10] 瞿枫, 徐中宏, 孙冀. 基于西门子 S7-300 PLC 的模糊控制实现 [J]. 南京师范大学学报, 2007, 7 (4): 23-27.